令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

令和 4年3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

令和３年度重要技術管理体制強化事業（国際レジームリスト品に係る動向等調査）
<目次>

１【輸出令第4項（18-2）】熱電池
２【輸出令第4項（23）】ロケット又は無人航空機用Ａ／Ｄ変換器
３【輸出令第4項（26）】ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム
４【輸出令第7項（１）】集積回路
５【輸出令第7項（2）】マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品
６【輸出令第7項（3）】弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品
７【輸出令第7項（4）】超電導材料を用いた装置
８【輸出令第7項（5）】超電導電磁石
９【輸出令第7項（6）】一次セル、二次セル又は太陽電池セル
１０【輸出令第7項（７）】高電圧用コンデンサ
１１【輸出令第7項（８）】エンコーダー
１２【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール
１３【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール
１４【輸出令第7項（8の4）】電気光学効果を利用する光変調器
１５【輸出令第7項（9）】サンプリングオシロスコープ
１６【輸出令第7項（10）】アナログデジタル変換回路
１７【輸出令第7項（11）】デジタル方式の記録装置
１８【輸出令第7項（12）】信号発生器
１９【輸出令第7項（13）】周波数分析器
２０【輸出令第7項（14）】ネットワークアナライザー
２１【輸出令第7項（15）】原子周波数標準器
２２【輸出令第7項（15の2）】スプレー冷却方式の熱制御装置
２３【輸出令第7項（16）】半導体製造装置若しくは試験装置
２４【輸出令第7項（17）】マスク又はレチクル
２５【輸出令第7項（17の2）】マスクの製造に用いられる基材
２６【輸出令第7項（18）】半導体基板
２７【輸出令第7項（19）】レジスト
２８【輸出令第7項（20）】アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物　燐・砒素・アンチモン有機化合物
２９【輸出令第7項（21）】燐・砒素・アンチモン水素化物
３０【輸出令第7項（22）】炭化けい素・窒化ガリウム・窒化アルミニウム・窒化アルミニウムガリウムの基板・インゴット、プール、その他のプリフォーム
３１【輸出令第7項（23）】多結晶基板
３２【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル
３３【輸出令第12項（6）】燃料電池

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第4項（18の2）
熱電池

令和 4年3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

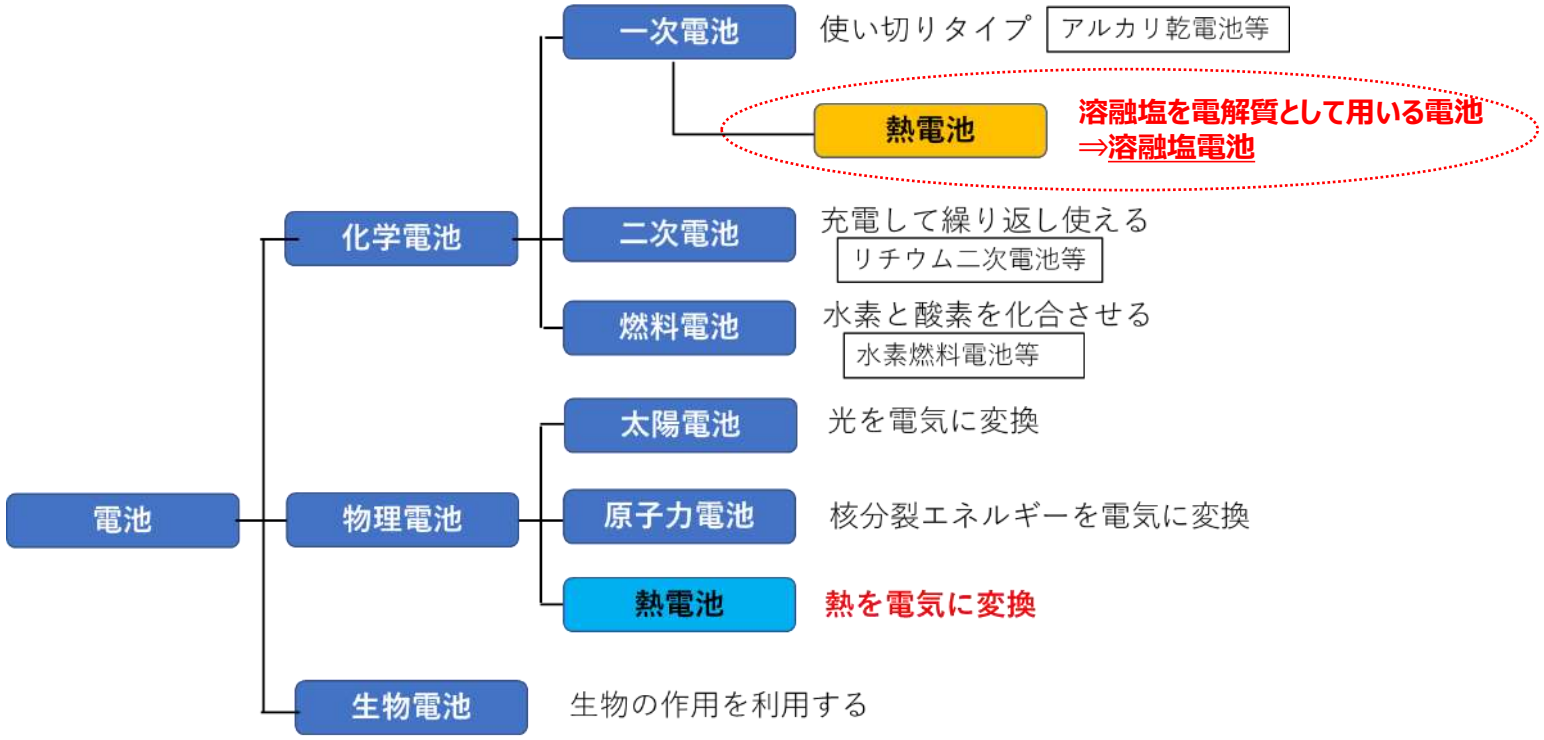
○輸出令4項（18の2）熱電池

電池は、エネルギーを電気に変換する装置で、化学反応を利用する「化学電池」と、熱や光といった物理エネルギーを利用する「物理電池」、生物の作用を利用する「生物電池」に分類される。電池の分類を図4-182-1に示す。

図のように「熱電池」と呼ばれるものは二種類あり、化学反応を利用したものと物理現象を利用したものがある。

輸出貿易管理令では、「**電解質として個体の非導電無機塩類を含むもの**」と定義されていることから、ここでは熱電池として「**溶融塩電池**」のことを指すことにする。

図4-182-1　電池の分類



1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令4項（18の2）熱電池

【熱電池の仕組み】

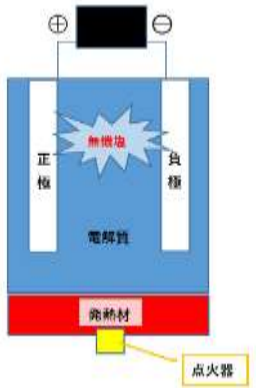
熱電池の原理図を図4-182-2に示す。

熱電池の基本原理は、固体塩電解質に熱を加えて溶融塩にするとイオン伝導性を生じるため電池が活性化して放電し、溶融塩が冷めて凝固すると作動を停止するものである。

本報告書が対象とする熱電池は溶融塩を電解質として用いる電池のことであり、熱電素子を用いた熱電池と区別して、溶融塩電池とも呼ばれる。

溶融塩は常温では非導電性の固体（粉体を圧縮して固めたもの）であり、熱により溶融すると瞬時に導電性を示して電解液として作用する。また外気温が低くても高くても使用でき、固体状態では自然放電が無く、振動や衝撃にも強いため、信頼性が非常に高い。また瞬時に大電流を放電できる。

図4-182-2　熱電池



①発熱材に点火
↓
②電解質溶融
↓
③無機塩が絶縁状態から電導状態に変化
↓
④電力発生

【熱電池の特長】

1. 上に述べたように、**熱電池は溶融塩を加熱して使用**するため、動作可能温度領域が一般的なリチウムイオン電池や鉛電池より広い。GSユアサの熱電池の特性を表4-182-1に示す
2. 自己放電をほとんど示さず、優れた保存特性を示す。

表4-182-1　熱電池の特性

区分	標準電圧	使用可能温度(℃)	定格電流	電池サイズ	質量
±28 V形熱電池 (±28 V TYPE)	±28V	-45　～　+74	6 A	φ51×66 mm	380 g
+25 V形熱電池 (+25 V TYPE)	+25V	-45　～　+74	0.8 A	φ25×45 mm	45 g

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令4項（18の2）熱電池

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とMTCRの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とMTCRの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
4(18の2)	3	1	十九号の二	ペイロードを300キロメートル以上運搬することができるロケット又は無人航空機に使用することができるように設計した熱電池であって、電解質として固体の非導電無機塩類を含むもの。	ペイロードを300キロメートル以上運搬することができるロケット又は無人航空機に使用することができるように設計した

MTCR規制番号		MTCR規制文言（英文）
4桁	細番	
12A6		Thermal batteries designed or modified for the systems specified in 1.A., 19.A.1. or 19.A.2.
		Note: Item 12.A.6. does not control thermal batteries specially designed for rocket systems or unmanned aerial vehicles that are not capable of a "range" equal to or greater than 300 km.
		Technical Note: Thermal batteries are single use batteries that contain a solid non-conducting inorganic salt as the electrolyte. These batteries incorporate a pyrolytic material that, when ignited, melts the electrolyte and activates the battery.
19A1		Complete rocket systems (including ballistic missiles, space launch vehicles, and sounding rockets), not specified in 1.A.1., capable of a "range" equal to or greater than 300 km.
19A2		Complete unmanned aerial vehicle systems (including cruise missiles, target drones and reconnaissance drones), not specified in 1.A.2., capable of a "range" equal to or greater than 300 km.
1.A.1.		Complete rocket systems (including ballistic missiles, space launch vehicles, and sounding rockets) capable of delivering at least a 500 kg "payload" to a "range" of at least 300 km.
1.A.2.		Complete unmanned aerial vehicle systems (including cruise missiles, target drones and reconnaissance drones) capable of delivering at least a 500 kg "payload" to a "range" of at least 300 km.

比較原文
・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html
・MTCR
　https://mtcr.info/mtcr-annex/

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令4項（18の2）熱電池

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

電池の種類と用途を図4-182-3に、機器の作動領域と適用電池を図4-182-3-1に示す。
電池の用途は、日常使用する電子機器に始まり、移動手段としてのEVやPHEV、自然エネルギーの平準化等幅広い用途に使用されている。
熱電池は軍事用途として、無人航空機、ミサイル、魚雷等でも使用されている。

図4-182-3　電池の種類と用途

【電池の種類】
<化学電池>
・一次電池
・二次電池
・燃料電池
・熱電池（溶融塩電池）
<物理電池>
・太陽電池
・原子力電池
・熱電池
<生物電池>
・電気化学式光生物電池

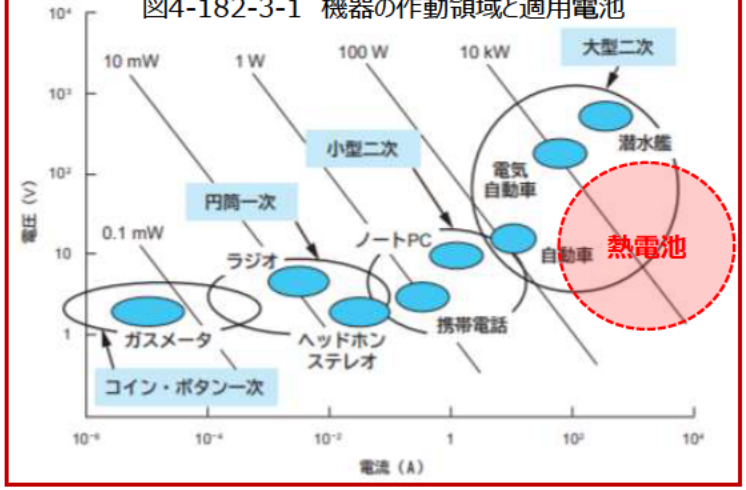
【電池の用途】
・電子機器の電源
・EV やPHEVの蓄電池
・非常用電源
・蓄電
・自然エネルギーの平準化
他

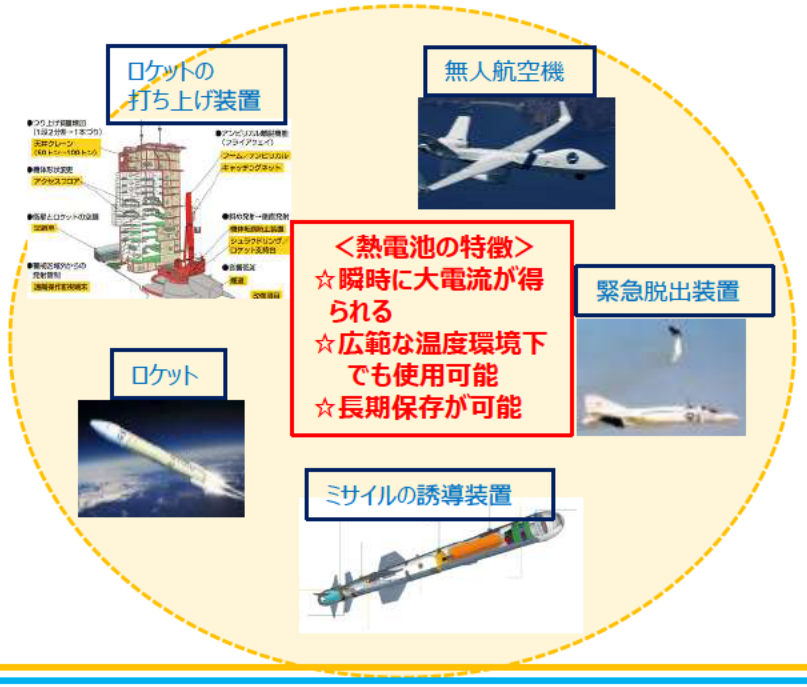
※EV：電気自動車（Electric Vehicle）
PHEV：プラグインハイブリッド自動車

【熱電池の用途】
<民生用>
・車両動力源
・宇宙ステーション
・ロケット
・ロケットの打ち上げ装置

<軍事用>
・無人航空機
・魚雷
・緊急脱出装置
・ミサイル
・ミサイルの誘導装置
・誘導砲

図4-182-3-1　機器の作動領域と適用電池





3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令4項（18の2）熱電池

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

規制対象品目となりえる品目を図4-182-4に示す。

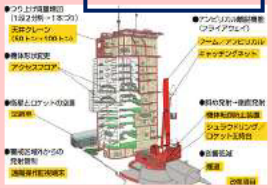
図4-182-4　規制対象品目となりえる品目

熱電池は「☆瞬時に大電流が得られる、☆広範な温度環境下でも使用可能、☆長期保存が可能」な特徴を持ち、この特徴に基づいたカスタム生産となる。コストパフォーマンスを考慮すると、宇宙産業と軍事用途での採用がほとんどで、規制対象となる。

＜民生用＞
- 宇宙ステーション
- ロケット
- ロケットの打ち上げ装置

＜軍事用＞
- 無人航空機
- 魚雷
- 緊急脱出装置
- ミサイル
- ミサイルの誘導装置
- 誘導砲

ロケットの打ち上げ装置



無人航空機



緊急脱出装置



ロケット



ミサイルの誘導装置



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令4項（18の2）熱電池

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

【参考　熱電池の使用例】

☆緊急脱出装置

緊急脱出装置を図4-182-5に示す。

緊急脱出装置は、航空機から非常時に脱出するため作動させると、搭乗者は座席ごとロケットモーターなどによって機外へと射ち出され、パラシュートで降下する。主に戦闘機など小型の軍用機に装備されている。 かつてはパイロットを射出するのに火薬が使われていたが、現在ではロケットモーターが使われている。一瞬の力でドカンと打ち出す火薬に比べ、より長い時間をかけて推力を生むロケットモーターはパイロットにかかる負担が軽減されるという特徴があり、**瞬発力に優れた**熱電池が使用されている。

☆誘導砲

誘導砲を図4-182-6に示す。

GPSを用いて、砲弾を目標物へ誘導し命中精度を上げたもの。レーザー照射による方法もある。

広い温度環境で使用でき、保存性、信頼性を備えた熱電池が用いられている。

図4-182-5　緊急脱出装置



図4-182-6　誘導砲



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令4項（18の2）熱電池

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化

MTCRの規定により、500kg以上で、航続距離300km以上のものは弾道ミサイル等の戦略核兵器を運搬しえるロケット又は無人航空機、及び、300km以上を運搬シエル戦略兵器となりえるロケット又は無人航空機が規制されている。

熱電池は注文に応じて特定の要件を満たすように設計される場合が多く、汎用品として市販されている熱電池は数少ない。国内ではGSユアサのものがあり、図4-182-7に示す。これはパッケージングされた一次電池で、二次電池としての熱電池は効率が悪く実用化されていない。

熱電池は高温作動であることから、水溶液や有機溶媒などを用いる室温作動の電池に比べて電極反応が格段に速く進行するため、優れた大電流放電特性を有する。このような特性を活かして、宇宙開発関連機器や、誘導機器、各種防衛機器の電源や緊急用電源として用いられている。

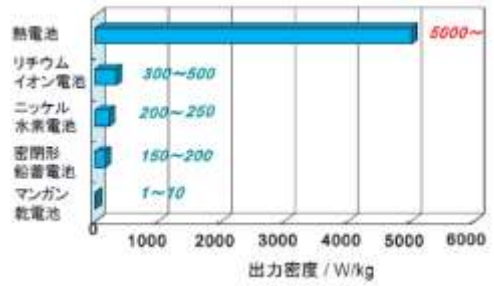
電池の出力密度比較を図4-182-8に示す。

熱電池は上で述べたように出力は大きいが、反面エネルギー密度は小さく、カルシウム系で100Wh/kg、リチウム系で40Wh/kg程度である。したがって、持続的に高エネルギーを必要とする用途には向かない。

図4-182-7　ＧＳユアサの熱電池



図4-182-8　出力密度比較



4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令4項（18の2）熱電池

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

規制パラメータ　輸出令第4項(18の2)
電解質として固体の非導電無機塩類を含むもの

【固体の非導電無機塩】
　熱電池の電解質は、塩化リチウム・塩化カリウム共融混合物などの電解質で、保管・貯蔵中では**非電導性の固体無機塩**なので電力を供給しないが，使用時には発熱体を燃焼することで電解質を加熱し溶融状態にして電導性を持たせ電力を供給できる。したがって、その電池性能は長期間保存しても性能が劣化しないと考えられる。
　GSユアサが行った実験によると、出力が±28V形熱電池の場合、定格時間内最小電圧の経年変化を図4-182-9に、電圧の経年変化による寿命予測を図4-182-10に示す。これより、経年性能の劣化が極めて少ないことが分かる。

図4-182-9　定格時間内最小電圧の経年変化

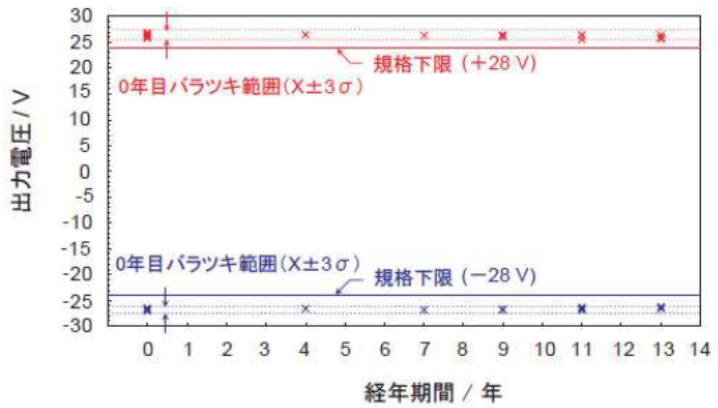
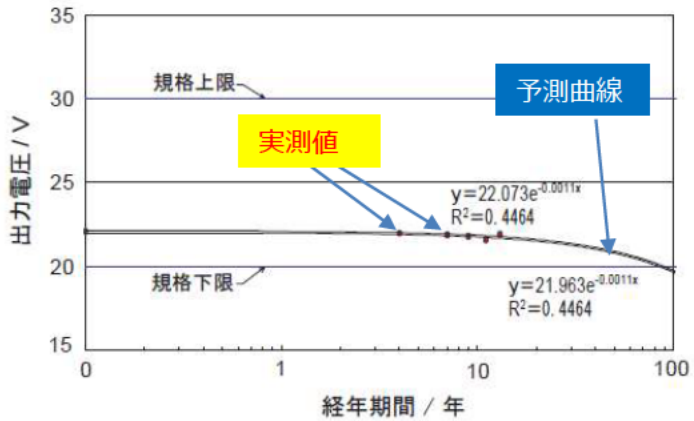


図4-182-10　寿命予測



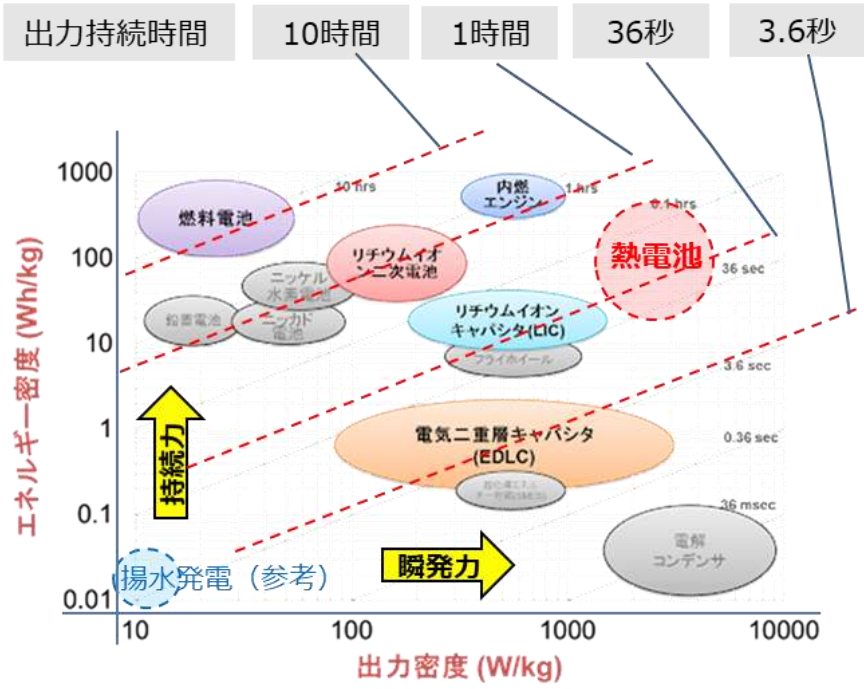
4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令4項（18の2）熱電池

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

熱電池の特性として、出力/エネルギー相関図での熱電池のポジショニングを図4-182-11に示す。図中で、内燃エンジン、燃料電池、リチウムイオン二次電池との位置関係から、「熱電池は、瞬時に大電流が必要な用途に適している」ことが分かる。

図4-182-11　各種電池のエネルギー密度と出力密度の関係



4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令4項（18の2）熱電池

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

☆世界の熱電池市場

・地域別状況

世界の熱電池市場は北アメリカ、アジア太平洋地域、ヨーロッパ、ラテンアメリカ、および中東＆アフリカに分類できる。

北アメリカは航空宇宙、軍事、防衛産業の主要地域であるため、この分野で利用される熱電池の需要が高く、2020年において世界の熱電池市場シェアトップであった。

アジア太平洋地域の市場は、中国、インド、インドネシア、日本、シンガポールの工業化と都市化の高まりにより、今後高い成長が予測される。

ヨーロッパの熱電池市場は、民間航空機および戦闘機の需要の増加により、熱電池の需要は大幅に増加すると予測される。

・世界の熱電池市場へのコロナウイルスの影響

熱電池の需要は、航空宇宙および航空、軍事および防衛、自動車、海洋、および公益事業で喚起されている。しかし、コロナウイルスの発生により、さまざまな国での封鎖や、サプライチェーンを混乱させた。これにより、バッテリーの需要が低減し、世界の熱電池市場に悪影響を及ぼしている。

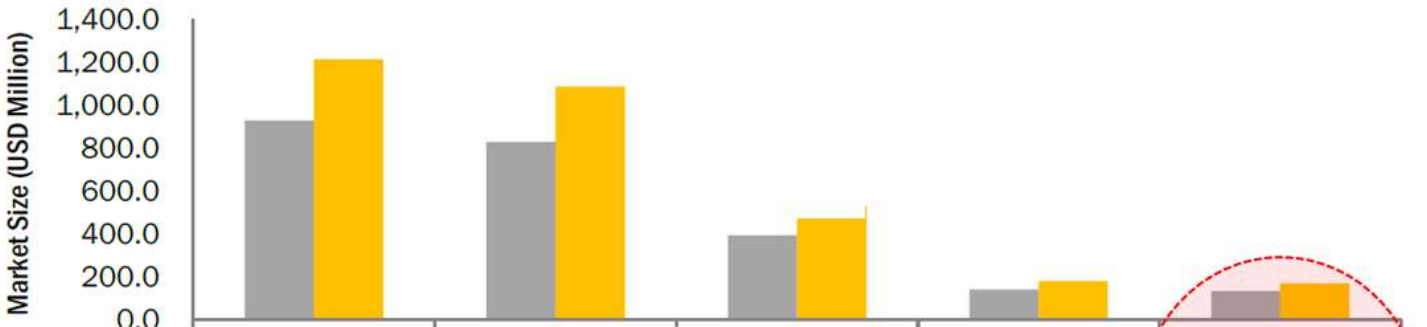
4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令4項（18の2）熱電池

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

熱電池は、主に軍事および航空セクター向けの高信頼性用途で、ほぼ独占的に使用されている。
軍用バッテリー市場の電池種類別占有率を図4-182-12に示す。
熱電池は15年間の保管後でも瞬時に活性化できる性能を示し、信頼性が高いため、今後もミサイルやロケットへの使用が主な市場になると予想される。他に軍事用途としては、・無人航空機、・魚雷、・ミサイルの誘導装置、・緊急脱出装置、・誘導砲等がある。

図4-182-12　軍用バッテリー市場の電池種類別占有率



	鉛蓄電池	ニッケル電池	リチウムイオン電池	その他の電池	熱電池
2018	926.6	826.5	391.1	139.6	134.0
2023	1,210.5	1,084.3	528.8	179.6	167.8
CAGR (2018-2023)	5.49%	5.58%	6.22%	5.17%	4.60%

出典：MarketsandMarkets
MILITARY BATTERY MARKET – GLOBAL FORECAST TO 2023

4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令4項（18の2）熱電池

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

主な熱電池メーカーを表4-182-2に示す。

表4-182-2　主な熱電池メーカー

企業		会社概要
Advanced Thermal Batteries IN	フランス	熱電池のリーディング企業で、米軍の御用達企業でもある。
APS-ASB india	インド	航空宇宙製品および部品、農業、建設用、鉱業用機械の製造、アルミナおよびアルミニウムの製造および加工企業。
DFR Solutions	アメリカ	電子技術のすべての市場で、顧客のコンサルティングを行っており、バッテリーを安全に使用するための専門知識、情報を提供している。2019年、Ansys社に買収された。
Diehl Stifting & Co. KG	ドイツ	ドイツ最大の兵器製造企業。誘導ミサイル等を生産する。
EaglePicher	アメリカ	バッテリーテクノロジー、高エネルギーデバイス、バッテリー管理システムで知られる米国の非上場製造会社。1842年にオハイオ州シンシナティのホワイトリードカンパニーとしてスタートした。米国国防総省から800万米ドル相当のミニットマンIIIミサイル用融合アセンブリ電池を受注した。
EnergyNest	ノルウェー	電力システム用熱電池を製造販売する。
EnerSys	アメリカ	貯蔵エネルギーシステム用のバッテリー、充電器、電力機器を製造し、世界中の顧客に販売している。
Missiles & Space Batteries LTD	イギリス	バッテリーとアキュムレーターの製造販売。
SINOEV technologies inc	中国	電気自動車の組立および電気自動車の技術開発を行う、北京中関村にあるハイテク企業。
GSユアサ	日本	自動車電池、産業用電池、電力貯蔵用電池、特殊電池、燃料電池などの電池や比較的大規模の電源装置を中心に開発・製造・販売をしている。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第4項（23）
ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

貨物等省令ではアナログデジタル変換用集積回路又はアナログデジタル変換器が規制の対象となっている。以下にそれらの説明をする。



【アナログデジタル変換用集積回路】
　マイクが受け取った音声信号やアンテナに入力された電波またはデジタルカメラに入力された光といったアナログ電気信号をデジタル電気信号に変換する電子回路である。アナログ-デジタル変換回路を図4-23-1に示す。

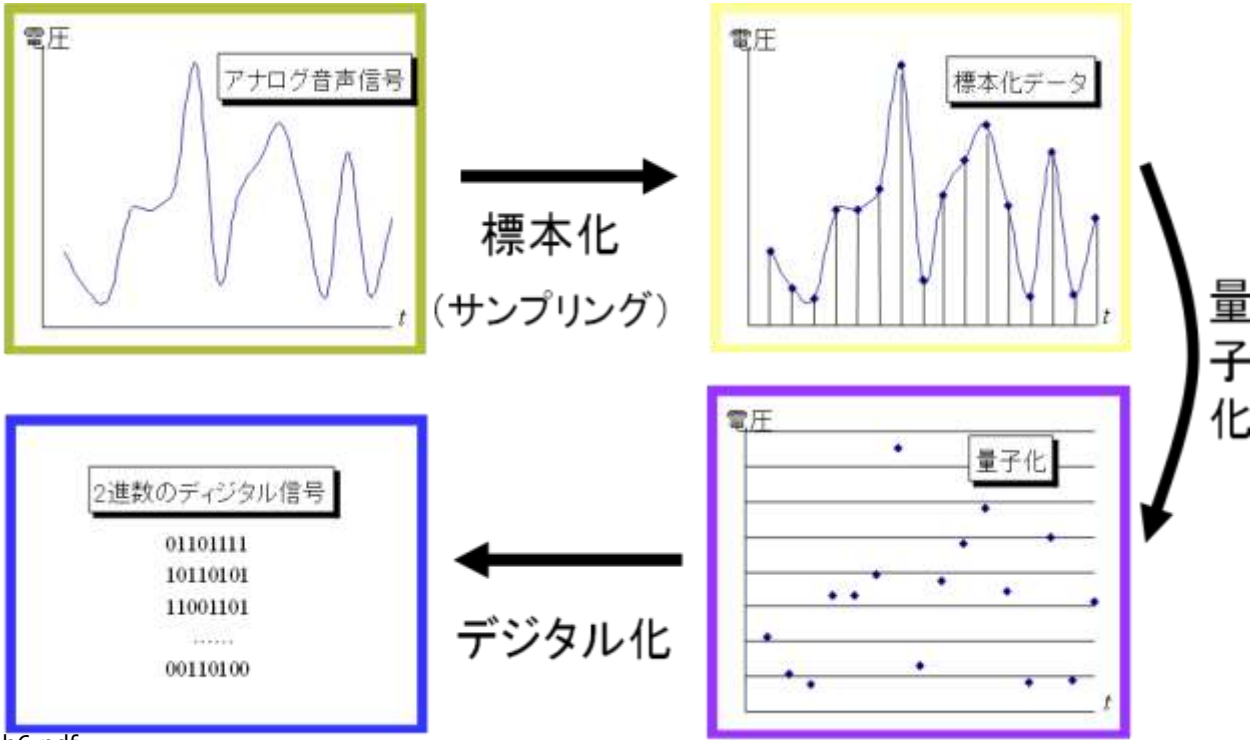
図4-23-1　アナログ-デジタル変換回路

右図は、アナログ電気信号（例としてアナログ音声信号）をデジタル化するイメージである。

標本化：１秒間に標本化されたデータの数（標本化周波数）

量子化：標本化されたデータをデジタル量にすること。そのデータを何段階の数値で表現するかを示す値を量子ビット数と呼ぶ。

デジタル化：デジタル量をデコータ（コード変換回路）によりデジタル信号する。



http://www.info.cs.kumamoto-u.ac.jp/ds/ch6.pdf

1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

主なアナログデジタル変換回路の方式と性能を図4-23-２に示す。

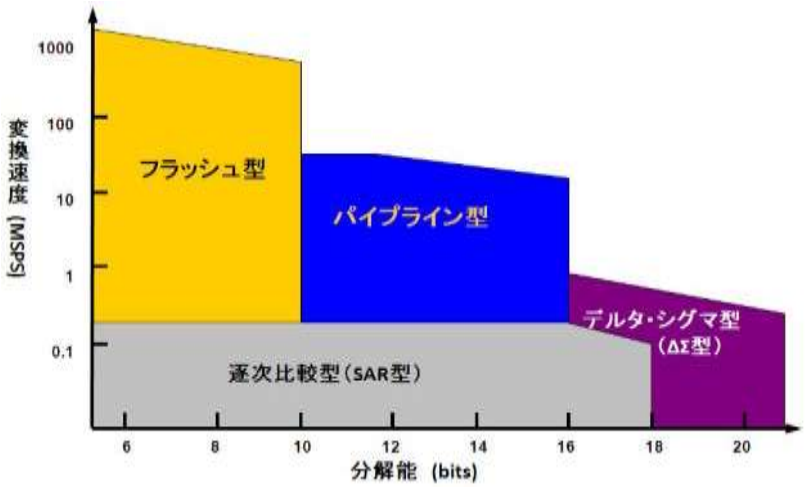
1．フラッシュ型（並列比較型）

n bit出力のAD変換であれば、2n-1個の比較器を用意して変換を行う。たとえば0Vから15Vまで1V間隔でAD変換して4bit出力を得る場合であれば、1Vから15Vまで15個の比較器を用意して入力と比較を行い、必要があればそれらの出力を2進数にエンコードする。原理が単純であり、比較器の動作だけで結果が出るので高速である。しかしビット数が増えると比較器の数が急激に増える。

2. 逐次比較型およびパイプライン型

正確な n bit DA変換器の出力は2n個の電圧の基準になる。つまりDA変換器出力を入力電圧と比較する事で n bitのAD変換を実現できる。1回の比較で1bitずつ精度を上げる事が出来るので、 n bitの場合は n 回の比較で結果が得られる。比較器1つを繰り返し用いて n 回の比較を行い正確な値に近づける方法が逐次比較型、パイプライン処理のように n 段階の回路構成で処理する場合がパイプライン型である。この他に、上位半分用と下位半分用のフラッシュ型および上位半分に相当するDA変換器を用意して、2段階に分けて変換する方法などがある。この場合でも完全なフラッシュ型と比べれば比較器の数を大幅に削減できる。1回の変換のために何度も入力を参照する必要があり、その間に入力電圧が変動すると誤変換をしてしまう。そのため、変換が完了するまでの一定時間だけ入力電圧を固定する回路が必要となる。

図4-23-2　主なアナログデジタル変換回路の方式と性能



https://edn.itmedia.co.jp/edn/articles/1003/03/news123.html

3.デルタシグマ型

デジタル入力を時間方向に補完してサンプリング周波数を数十倍にする（オーバーサンプリング）。この出力をデルタ・シグマ・モジュレータを通すことで低ビットのオーバーサンプリングデータにする。デルタ・シグマ・モジュレータの目的はAD変換の場合と同じだが、高ビットのデジタル入力を、デジタル処理によって低ビットの「ディザ化」されたデジタル出力にする。1bit出力であればパルス幅変調と似た出力になるが、デルタ・シグマ・モジュレータにより、より良いパルス波形になる。この低ビット出力をDA変換し（1bitの場合は出力電力が足りればそのままでもよい）、パルス幅変調型と同様にローパスフィルタに通すことで折り返し雑音（エイリアス）成分や量子化誤差成分を除去して、アナログ出力とする。

1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

【アナログデジタル変換用のモジュール、組立品】

　アナログ電気信号をデジタル電気信号に変換する電子回路装置である。アナログデジタル変換用のモジュール、組立品の例を図4-23-3~図4-23-5に示す。アナログデジタル変換カード、データ収集カード、信号収集ボード、波形デジタイザー及びトランジェントレコーダー、アナログ画像変換キャプチャーなどがある。

図4-23-3　シングルエンド4chのA/D変換PCカード



図4-23-4　24ビット8チャンネル高精度データ収集カード

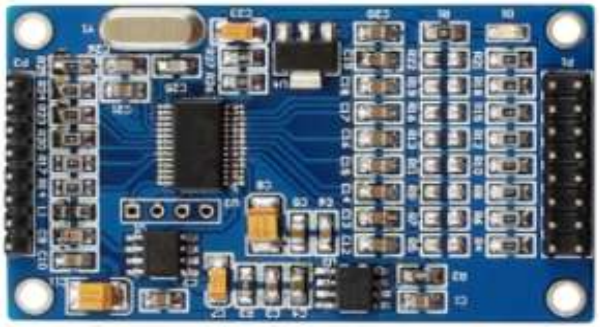


図4-23-5　ＶＨＳビデオ変換キャプチャー



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（1）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とMCTRの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
4(23)	3	1	二十四	アナログデジタル変換用の集積回路又はアナログデジタル変換器（500キログラム以上のペイロードを300キロメートル以上運搬することができるロケット又は無人航空機に使用することができるものに限る。）であって、次のいずれかに該当するものイ　分解能及びサンプルレートが次のいずれかに該当するもの アナログデジタル変換用の集積回路又はアナログデジタル変換器（500キログラム以上のペイロードを300キロメートル以上運搬することができるロケット又は無人航空機に使用することができるものに限る。）であって、次のいずれかに該当するもの イ　アナログデジタル変換用の集積回路であって、全吸収線量がシリコン換算で50万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計したもの又は次の（一）及び（二）に該当するもの （一）　零下54度より低い温度から125度を超える温度まで使用することができるように設計したもの （二）　気密封止したもの ロ　電気入力型のアナログデジタル変換用の組立品又はモジュールであって、次の（一）及び（二）に該当するもの （一）　零下４５度より低い温度から８０度を超える温度まで使用することができるように設計したもの （二）　イに該当する集積回路を組み込んだもの	イ　アナログデジタル変換用の集積回路であって、全吸収線量がシリコン換算で50万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計したもの又は次の（一）及び（二）に該当するもの （一）　零下54度より低い温度から125度を超える温度まで使用することができるように設計したもの （二）　気密封止したもの ロ　電気入力型のアナログデジタル変換用の組立品又はモジュールであって、次の（一）及び（二）に該当するもの （一）　零下４５度より低い温度から８０度を超える温度まで使用することができるように設計したもの （二）　イに該当する集積回路を組み込んだもの

MCTR規制番号	MCTR規制文言（全文）
3桁	
14.A.1.	Analogue-to-digital converters, usable in the systems specified in 1.A., having any of the following characteristics: a. Designed to meet military specifications for ruggedised equipment; or b. Designed or modified for military use and being any of the following types: 1. Analogue-to-digital converter "microcircuits", which are "radiation-hardened" or have all of the following characteristics: "Radiation hardened" Means that the component or equipment is designed or rated to withstand radiation levels which meet or exceed a total irradiation dose of 5 x 105 rads (Si). a. Rated for operation in the temperature range from below -54oC to above +125oC; and b. Hermetically sealed; or 2. Electrical input type analogue-to-digital converter printed circuit boards or modules, having all of the following characteristics: a. Rated for operation in the temperature range from below -45oC to above +80oC; and b. Incorporating "microcircuits" specified in 14.A.1.b.1.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（１）

マイクロプロセッサ等の集積回路のクロック周波数やメモリのアクセス速度が上がり、デジタル信号の処理速度は格段に向上した。その背景には、限られた周波数資源の中で、いつでもどこでも大量のデータをやりとりできるユビキタス社会へのニーズがある。現在では、メガ・ピクセル画像センサの信号処理や高精細画像データの伝送、高速ネットワークやデジタル・テレビのデータ復調処理、大容量ストレージにおけるデータ復号化処理といった用途に、さまざまな高速アナログデジタル変換器が使われている。PCにおけるアナログデジタル変換器の使用イメージを図4-23-6に示す。これらには、アナログデジタル変換を行う機能を有するモジュール、組立品が使用されている。

また、アナログデジタル変換器の主な用途のサンプリングレートと分解能を図4-23-7に示す。

図4-23-6　PCにおけるアナログデジタル変換器の使用イメージ

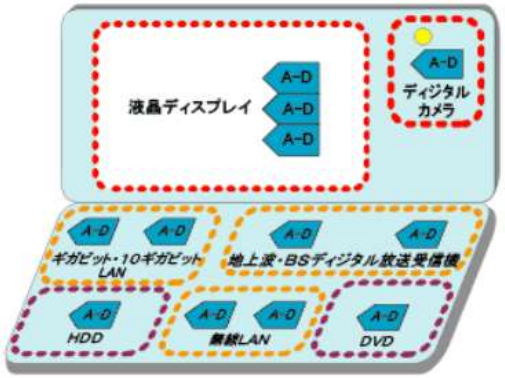
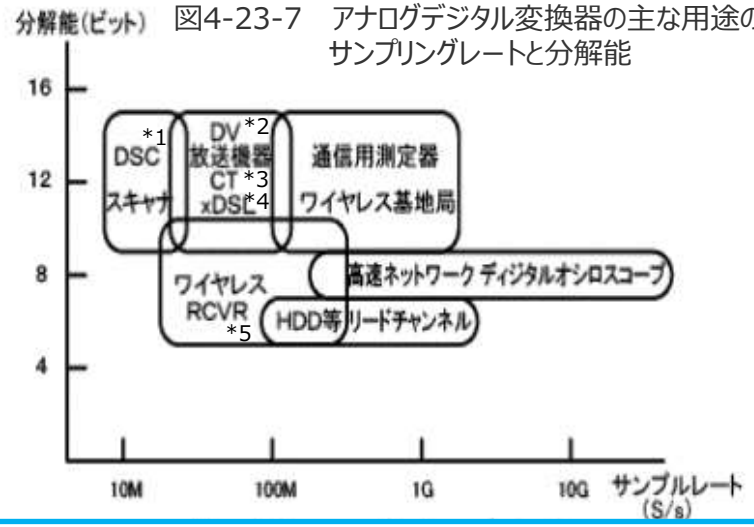


図4-23-7　アナログデジタル変換器の主な用途のサンプリングレートと分解能



DSC[*1]:Digital Still Camera（デジタルスチルカメラ）
DV[*2]：Digital Video（デジタルビデオ）
CT[*3]：Computed Tomography（コンピュータ断層撮影装置）
xDSL[*4]：x Digital Subscriber Line
（ADSL、RADSL、SDSL、HDSL、VDSL等各種デジタル加入者線の総称）
RCVR[*5]：Pronounced Receiver
（伝送媒体<ワイヤレスまたは有線>からの信号を受け取りそれらの信号を、ローカル回路を駆動できる形式にデコードまたは変換する回路。）

3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（２）

アナログデジタル変換器のモジュール、組立品、アナログデジタル変換カード、データ収集カード、信号収集ボード、波形デジタイザー及びトランジェントレコーダーの用途の例について、図4-23-8に示す。現代社会において、家電、情報通信、自動車、電力、航空、宇宙、分析器、計測器に幅広く使用されている。・

アナログデジタル変換器は、用途に求められる性能に応じて、適したサンプリング周波数や分解能で使用されている。

図4-23-8　アナログデジタル変換器の用途の例

アナログデジタル変換器

【モジュール】

【組立品】

【アナログデジタル変換カード】

【データ収集カード】

【信号収集ボード】

【波形デジタイザー】

【トランジェントレコーダー】

用途分野	用途
家電	TV、オーディオ、デジタルカメラ、エアコンなど
情報端末	スマートフォン、タブレット、PCなど
通信	データセンター、通信基地局など
医療	超音波、CT、MRI、SPECTなど
自動車	自動運転：画像、各種センサ（レーダー、レーザー（LiDARなど）、GNSS（GPSなど）、生体モニタ）など エンジン/エアーバック/ABSブレーキシステム/エンジン制御ユニット/燃料噴射システムなど
計測/観測	スペクトラムアナライザー、オシロスコープ、信号発生器 センサーデータ分析器（加速度/重力/圧力/温度/変位/ph/ジャイロ等） レーザー（LiDARなど）、レーダー、超音波など
電力	回路遮断器/フューズ試験/照明衝撃分析/ 電力調波分析/電力線欠陥および過渡状態分析など
軍事宇宙	ロケット弾道/推進システム/ミサイルシステム/サテライト試験/物質研究 電子戦力組成装置（EOB：Electric Order of Battle） 電子対策装置(ECM：electronic counter-measure) 対電子対策装置（ECCM：electronic counter-counter measure） など

3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

用途としては、ロケット及び無人航空機に限定されている。

輸出令の対象となる用途において、アナログデジタル変換器は耐放射線量、動作温度とペイロードで規制されている。ペイロードとは、飛行の維持に使用されない、ロケットシステムまたは無人航空機（UAV)によって運搬または配達できる総重量である。

ロケットと無人航空機の例を図4-23-9に示す。

図４-23-9　ロケットと無人航空機の例　　左：JAXA H3ロケット　　中：北朝鮮の火星14型･15型　　右：米国の無人航空機



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化【アナログデジタル変換器】

アナログデジタル変換器は、主に、レーダー、赤外線、ジャイロ出力、加速度センサーなどのアナログ電気信号を、制御用コンピューターで演算処理できるようにデジタル信号に変換するために利用する。

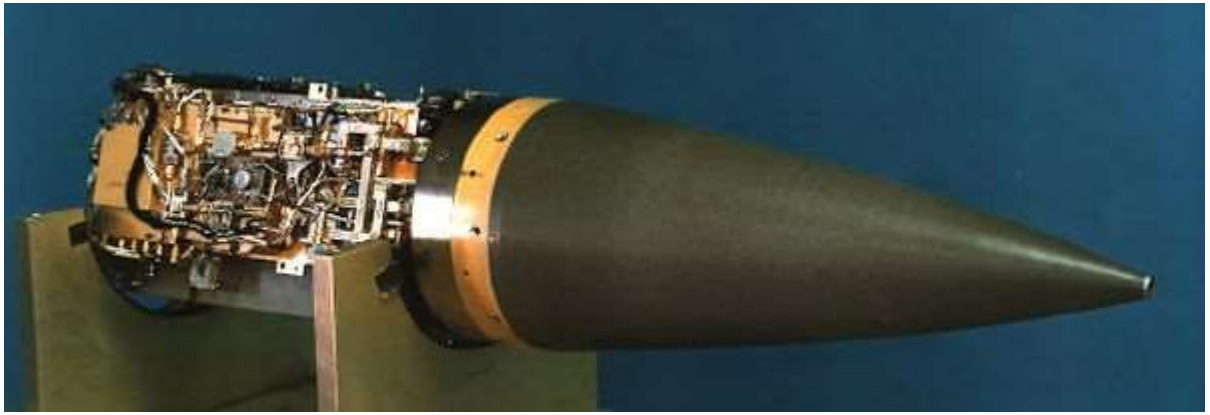
軍事用ロケットの構造模式図図４-23-10に示す。図４-23-11にパトリオット　P3C のシーカーと誘導制御部写真を示す。アナログデジタル変換器は、誘導制御部に使用されている。

図４-23-10　軍事用ロケットの構造模式図



図４-23-11　パトリオット　P3C のシーカーと誘導制御部

アナログデジタル変換器は、誘導制御部に使用されている。



http://sakurajadehouse.com/?p=9616

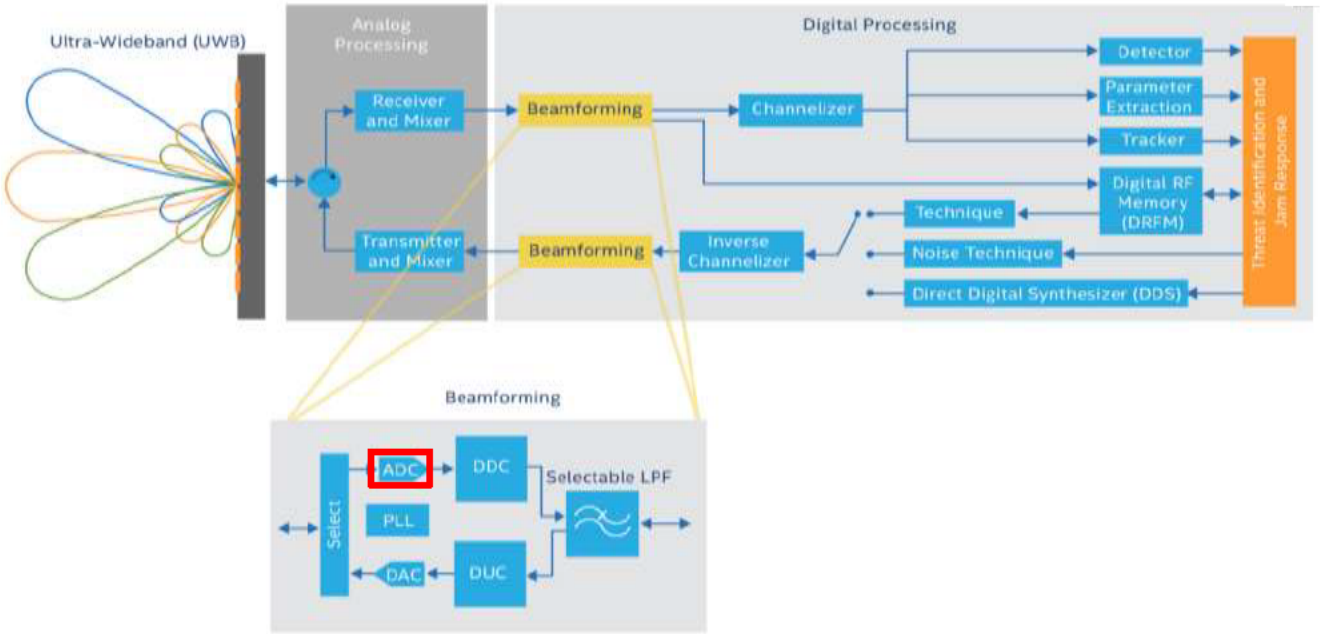
3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化【耐放射線／耐温度】

ロケット又は無人航空機を使用した軍事電子戦システムは、超高温・高放射線下の極限環境において短時間で複数の脅威を迅速に分析し、対応する能力が求められる。具体的には複数のソフトウェア生成波形を送信して偽物目標を与えると同時に、強力な広帯域信号で全体を秘匿することが必要となる。こうした刻一刻と変化する戦術的対応には機動的な高性能処理と宇宙での耐放射線や耐温度の対応が必要で、これに対応できるアナログデジタル変換器が必要となる。電子戦おけるロケット又は無人航空機に使用される機器の内部構造の例を図4-23-12に示す。アナログデジタル変換器（図中ADC）は信号のビームフォーミング（電波または音波、超音波を特定の方向に向けて送信、または特定の方向から受信する技術。図中Beamforming）で使用されている。

図4-23-12　電子戦に使用される機器の内部構造の例



4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（１）

輸出令は、アナログデジタル変換器の用途として、最終製品を、「500キログラム以上のペイロードを300キロメートル以上運搬することができるロケット又は無人航空機に使用することができるものに限る。」と限定している。 この用途に使用するアナログデジタル変換器について耐放射線量、動作温度を規制している。耐放射線量とパラメータ規制の関係を図4-23-13に、温度とパラメータ規制の関係を図4-23-14に示す。

【500キログラム以上のペイロードを300キロメートル以上運搬することができる】

ペイロードとは、飛行の維持に使用されない、指定されたロケットシステムまたは無人航空機（UAV)によって運搬または配達できる総重量である。（MTCR/TEM/2019/Annex 2019.10.11貨物より） MTCRでは、弾道ミサイル、無人航空機などの飛行体ごとにペイロードの説明があり、核弾頭などの爆弾とそれを目的地まで届けるための付帯装置である。300キロメートル以上運搬することができるとは、射程が300km以上のことである。

規制パラメータ 輸出令第4項(23)

イ アナログデジタル変換用の集積回路であって、全吸収線量がシリコン換算で50万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計したもの又は次の（一）及び（二）に該当するもの

（一） 零下54度より低い温度から125度を超える温度まで使用することができるように設計したもの

（二） 気密封止したもの

ロ 電気入力型のアナログデジタル変換用の組立品又はモジュールであって、次の（一）及び（二）に該当するもの

（一） 零下４５度より低い温度から８０度を超える温度まで使用することができるように設計したもの

（二） イに該当する集積回路を組み込んだもの

図4-23-13
耐放射線量とパラメータ規制の関係

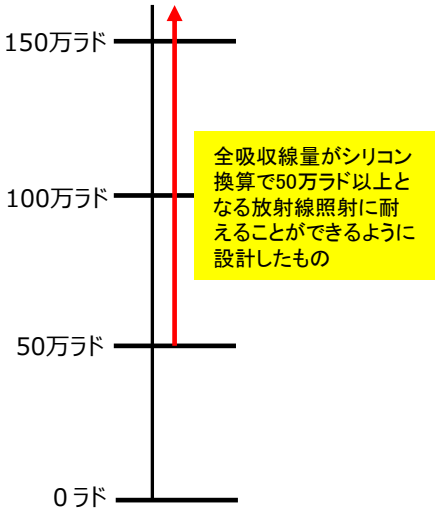
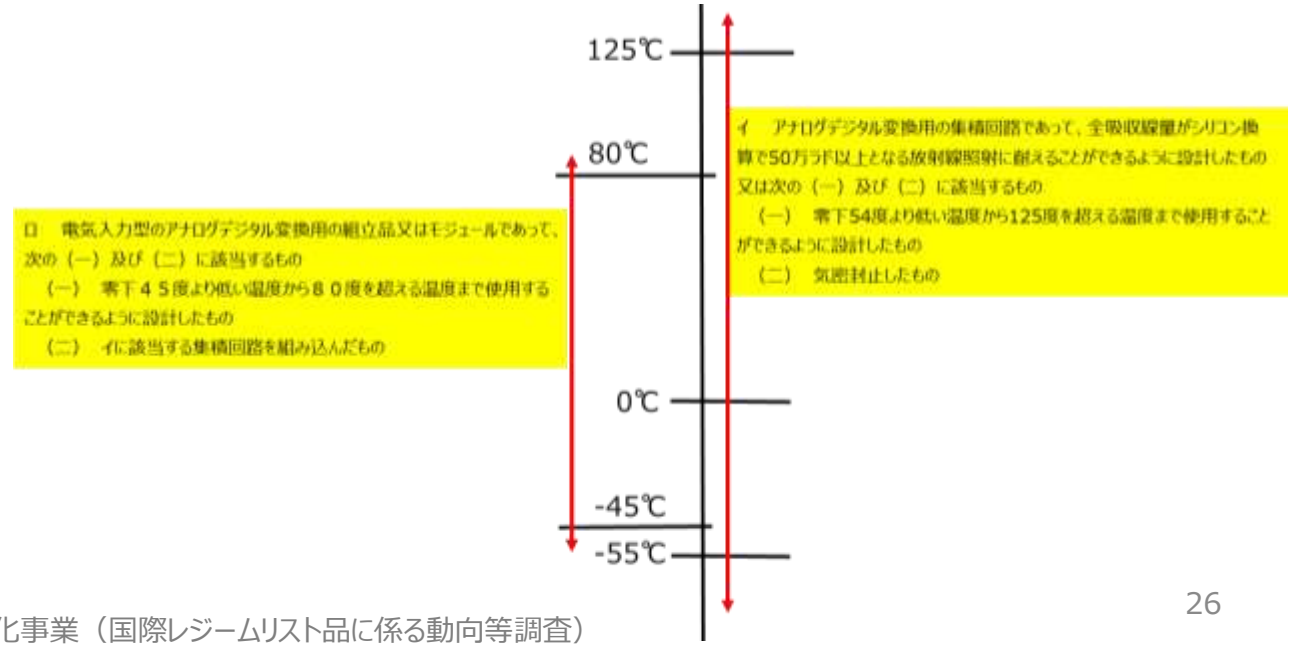


図4-23-14 温度とパラメータ規制の関係



4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（２）

【全吸収線量がシリコン換算で50万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計したもの】(1)

大気圏外の宇宙では、太陽粒子線や銀河宇宙線、いわゆる放射線が多く存在している。（図４-23-15　宇宙の放射線環境を参照）

地球大気と磁場に遮断されてこれらの宇宙線は、地上にはほとんど届かない。（図４-23-16　高度と放射線強度を参照）

大気圏外を飛行するロケットや無人航空機に使用されるアナログデジタル変換器は飛行中の宇宙線による誤動作しないことが必要である。

吸収線量の単位は、1989年からラド(rad)に変わってグレイ(Gy)が用いられている。1グレイ＝100ラドに相当し、50万ラド＝5000グレイである。

規制パラメータ　輸出令第4項(23)

イ　アナログデジタル変換用の集積回路であって、全吸収線量がシリコン換算で50万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計したもの又は次の（一）及び（二）に該当するもの

（一）　零下54度より低い温度から125度を超える温度まで使用することができるように設計したもの

（二）　気密封止したもの

ロ　電気入力型のアナログデジタル変換用の組立品又はモジュールであって、次の（一）及び（二）に該当するもの

（一）　零下４５度より低い温度から８０度を超える温度まで使用することができるように設計したもの

（二）　イに該当する集積回路を組み込んだもの

図４-23-15　宇宙の放射線環境

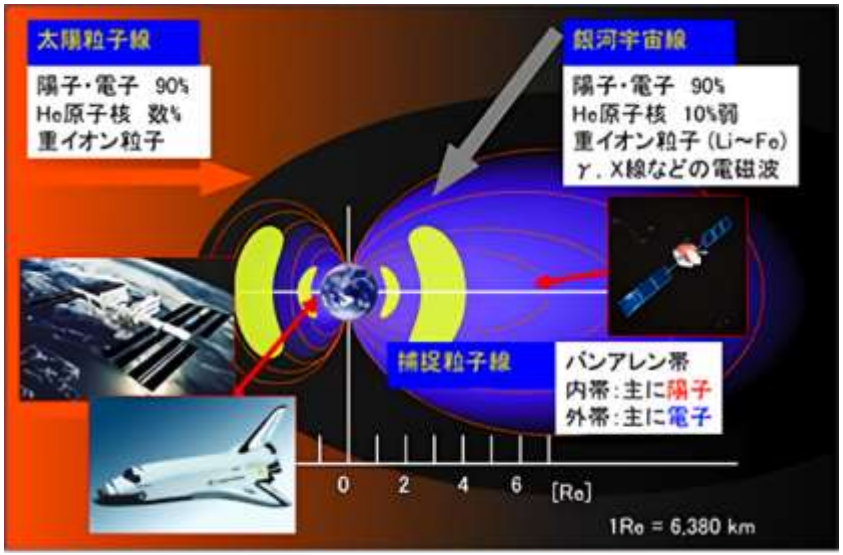
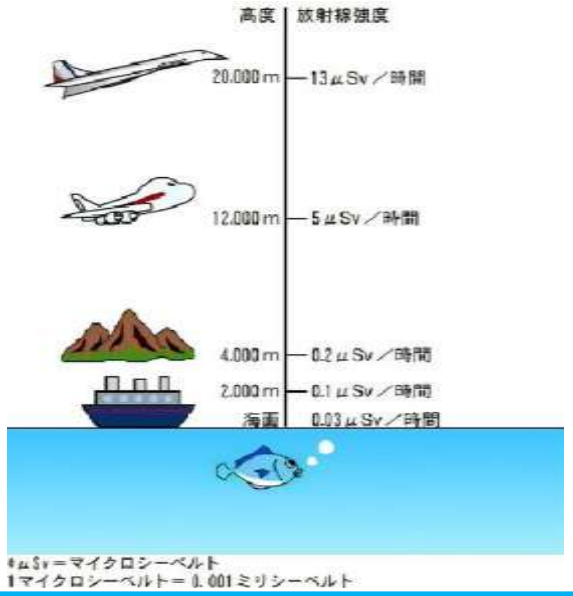


図４-23-16　高度と放射線強度



4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（３）

【全吸収線量がシリコン換算で50万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計したもの】(2)

半導体デバイスに放射線を照射すると、侵入したα線や中性子線によって電子ー正孔ペアが発生し、トータルドーズ及びシングルイベントの不良を引き起こす。（表４-23-1参照）トータルドーズ及びシングルイベントの具体的な現象は、保持しているデータの反転（ソフトエラー）、寄生バイポーラトランジスタ効果によるPNPN接合での電流貫通（ラッチアップ）等である。図４-23-17 参照。 規制は、50万ラド（500kラド）の放射線照射してもシングルイベントが起こらず正常に動作するデバイスである。

規制パラメータ 輸出令第4項(23)

イ　アナログデジタル変換用の集積回路であって、全吸収線量がシリコン換算で50万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計したものの又は次の（一）及び（二）に該当するもの

（一）　零下54度より低い温度から125度を超える温度まで使用することができるように設計したもの

（二）　気密封止したもの

ロ　電気入力型のアナログデジタル変換用の組立品又はモジュールであって、次の（一）及び（二）に該当するもの

（一）　零下４５度より低い温度から８０度を超える温度まで使用することができるように設計したもの

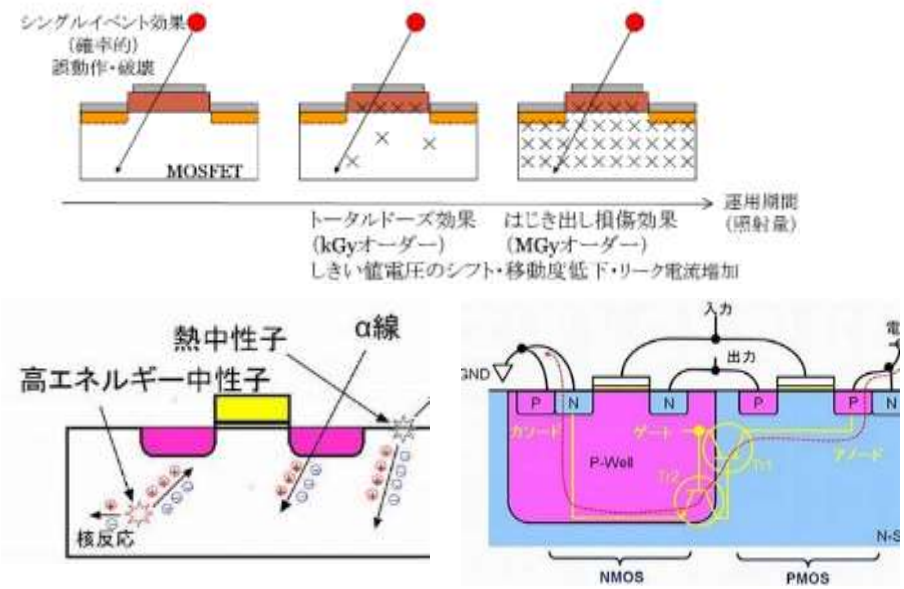
（二）　イに該当する集積回路を組み込んだもの

表４-23-1　半導体デバイスの耐放射線性

	トータルドーズ krads(Si)	シングルイベント	
		ソフトエラー	ラッチアップ
デジタルIC			
NMOS	0.5～10	多くおこる	強　い
CMOSバルク	2～20	ほど良い	弱　い
	10～100	ほど良い	弱　い
CMOSエピ	2～20	ほど良い	中くらい
	10～1000	ほど良い	やや強い
CMOS／SOS	10～1000	強　い	強　い
TTL，ショットキー	50～500	やや多くおこる	報告なし
ALS	20～100	ほど良い	報告なし
パワーショットキーTTL			
ECL	500～5000	ややおこる	報告なし
リニア			
CMOS	1～100	おこる	中くらい
バイポーラ	10～1000	おこる	中くらい

［出典］黒崎 忠明：「宇宙用材料の放射線対策」，放射線と産業、No. 63 (1994)、p. 1

図４-23-17　シングルイベント効果とソフトエラー（左下）、ラッチアップ（右下）



4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（４）

【全吸収線量がシリコン換算で50万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計したもの】(3)
MTCR-Handbook-2017 267ページで明記されている 軍事用に使用されている米国Datel Inc社アナログデジタル変換器（ADS-944）は、耐放射線50万ラド以上と思われるが、同社のWebで公開されているデータシート（図4-23-18）では、耐放射線について言及されていない。動作温度は-55℃から125℃である。

図４-23-18 ADS-944データーシート

https://www.datel.com/data/ads/ads944.pdf

DATEL®
INNOVATION and EXCELLENCE

ADS-944

14-Bit, 5MHz Sampling A/D Converters



PRODUCT OVERVIEW

The low-cost ADS-944 is a high-performance, 14-bit, 5MHz sampling A/D converter. This device accurately samples fullscale input signals up to Nyquist frequencies with no missing codes. The dynamic performance of the ADS-944 has been optimized to achieve a THD of –77dB and a SNR of 76dB.

Packaged in a small, 32-pin TDIP, the functionally complete ADS-944 contains a fast-settling sample-hold amplifier, a subranging (two-pass) A/D converter, an internal reference, timing and control logic, three-state outputs, and errorcorrection circuitry. Digital input and output levels are TTL.

Requiring ±15V, +5V and –5.2V supplies, the ADS-944 typically dissipates 2.95 Watts. The unit is offered with a bipolar input range of ±1.25V. Models are available in commercial (0 to +70°C), industrial (–40 to +100°C), or HI-REL (–55 to +125°C) operating temperature ranges. Typical applications include radar signal analysis, medical/graphic imaging, and FFT spectrum analysis.

FEATURES

- 14-bit resolution
- 5MHz minimum sampling rate
- No missing codes over full HI-REL temperature range
- Edge-triggered, no pipeline delay
- Low power, 2.95 Watts
- Small, 32-pin, ceramic TDIP package
- SMT package available
- Excellent dynamic performance
- MIL-STD-883 screening or DESC SMD available

INPUT/OUTPUT CONNECTIONS

PIN	FUNCTION	PIN	FUNCTION
1	+5V ANALOG SUPPLY	32	START CONVERT
2	–5.2V DIGITAL SUPPLY	31	BIT 1 (MSB)
3	ANALOG INPUT	30	BIT 1 (MSB)
4	ANALOG GROUND	29	BIT 2
5	OFFSET ADJUST	28	BIT 3
6	ANALOG GROUND	27	BIT 4
7	GAIN ADJUST	26	BIT 5
8	COMP. BITS	25	BIT 6
9	OUTPUT ENABLE	24	BIT 7
10	+5V DIGITAL SUPPLY	23	BIT 8
11	ANALOG GROUND	22	BIT 9
12	+15V SUPPLY	21	BIT 10
13	–15V SUPPLY	20	BIT 11
14	–5.2V ANALOG SUPPLY	19	BIT 12
15	DIGITAL GROUND	18	BIT 13
16	EOC	17	BIT 14 (LSB)

４.品目の技術動向調査（5）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（５）

【全吸収線量がシリコン換算で50万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計したもの】(4)

ルネサスエレクトロニクス株式会社が2020.12.1に発売した、-人工衛星、宇宙船、月面探査船向けに、優れた耐放射線性能を実現する14ビット、1 MSPSのSAR型ADコンバータ「ISL73141SEH」の対放射線値は、

「ISL73141SEHは、低線量率感受性（ELDRS）放射線性能について最大75krads（Si）のトータルドーズ効果（TID：Total Ionizing Dose Effect）、およびシングルイベント効果（SEE）について最大86MeV・cm^2/mgの線エネルギー付与（LET：Linear Energy Transfer）での特性検査を行っています。SEE試験では、シングルイベントラッチアップ（SEL）やシングルイベントバーンアウト（SEB）は発生しませんでした。」

であり、7.5万ラドでの試験データが公開されているが、最大耐放射線量は不明である。。

図４-23-19　ISL73141SEHの外観写真



https://www.datel.com/data/ads/ads944.pdf

4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（６）

【（一）零下54度より低い温度から125度を超える温度まで使用することができるように設計したもの】

JAXAによると、「地球周辺の軌道を飛行する物体(スペースシャトルや人工衛星など)の表面の温度は、使用している物質の太陽光(赤外線)の吸収の度合いやその表面から熱を放射する度合いによって変わってくるが、だいたいの値は、陰の部分はマイナス150度、反対に日が当たっている部分はプラス120度ぐらいにまでなる。白色の材料の物は赤外線をあまり吸収せず、熱も放射しないので比較的温度変化は少なくなる。一方黒色の材料のものは、赤外線の吸収はよいが、熱も放射しやすく太陽光が当たったときは高温になり、陰に入った時には逆に低温になる。
人工衛星などは、このような材質をうまく組み合わせて適度な温度範囲になるように設計されている。それでも温度が厳しすぎる場合は、ヒーターや放熱板(ラジエータ)を追加する。」とある。

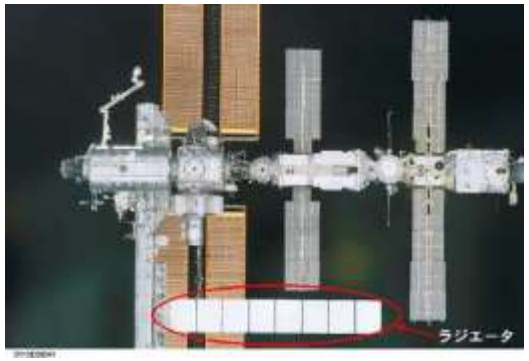
ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器は、極低温から高温までの範囲で安定動作する必要があっるため、「（一）零下54度より低い温度から125度を超える温度まで使用することができるように設計したもの。」の規制がある。

しかし、米国軍規格（MIL規格）を含め、軍事用の半導体デバイスの動作温度範囲は、-55℃から125℃である。これを超える温度範囲の規格は存在しないので、本規制対象の半導体デバイス（アナログデジタル変換器）は、個別設計品となり、第3者がWebなどでデータシートを取得することはできない。

規制パラメータ　輸出令第4項(23)

イ　アナログデジタル変換用の集積回路であって、全吸収線量がシリコン換算で50万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計したもの又は次の（一）及び（二）に該当するもの
（一）　零下54度より低い温度から125度を超える温度まで使用することができるように設計したもの
（二）　気密封止したもの
ロ　電気入力型のアナログデジタル変換用の組立品又はモジュールであって、次の（一）及び（二）に該当するもの
（一）　零下４５度より低い温度から８０度を超える温度まで使用することができるように設計したもの
（二）　イに該当する集積回路を組み込んだもの

図４-23-20　ISSのラジエータ



４.品目の技術動向調査（７）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（７）

【（二）気密封止したもの】

気密封止（Hermetic seal）とは、半導体デバイスを大気、酸素、その他ガスの通過を防ぐためにガラスなどで密封シールすることで、デバイスの性能劣化防止及び耐熱性の向上が期待される。一部のglass-to-metalシールでは450℃まで動作させることができた例がある。

気密封止は、半導体デバイスメーカーで行う。また、気密封止サービースを提供している業者も国内に数社ある。

規制パラメータ　輸出令第4項(23)

イ　アナログデジタル変換用の集積回路であって、全吸収線量がシリコン換算で50万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計したもの又は次の（一）及び（二）に該当するもの

（一）　零下54度より低い温度から125度を超える温度まで使用することができるように設計したもの

（二）　気密封止したもの

ロ　電気入力型のアナログデジタル変換用の組立品又はモジュールであって、次の（一）及び（二）に該当するもの

（一）　零下４５度より低い温度から８０度を超える温度まで使用することができるように設計したもの

（二）　イに該当する集積回路を組み込んだもの

図４-23-21　glass-to-metalシール



https://en.wikipedia.org/wiki/Hermetic_seal

４.品目の技術動向調査（８）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（８）

【電気入力型のアナログデジタル変換用の組立品又はモジュール】

前述のアナログデジタル変換器を組み込んだ、組立品又はモジュールの動作温度規制である。市販されているロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器の組立品又はモジュールは存在しない。 MCTRに掲載されている典型的なアナログデジタル変換ボードを図4-23-22に示す。

規制パラメータ　輸出令第4項(23)

イ　アナログデジタル変換用の集積回路であって、全吸収線量がシリコン換算で50万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計したもの又は次の（一）及び（二）に該当するもの

（一）　零下54度より低い温度から125度を超える温度まで使用することができるように設計したもの

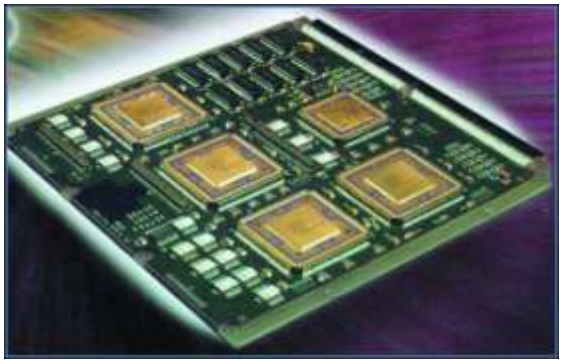
（二）　気密封止したもの

ロ　電気入力型のアナログデジタル変換用の組立品又はモジュールであって、次の（一）及び（二）に該当するもの

（一）　零下４５度より低い温度から８０度を超える温度まで使用することができるように設計したもの

（二）　イに該当する集積回路を組み込んだもの

図４-23-22　MCTRに掲載されている典型的なアナログデジタル変換ボード



MTCR Handbook-2017 ページ276より

4.品目の技術動向調査（９）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（１）

アナログデジタル変換器市場の年次推移を図4-23-23に示す。年々右肩上がりでCAGR6.4%増加している。

また、アナログデジタル変換器用途別市場推移を表4-23-2に示す。規模は通信用途が一番大きいが、伸長率は医療用途が大きくなると予想されている。

図4-23-23　アナログデジタル変換器市場の年次推移

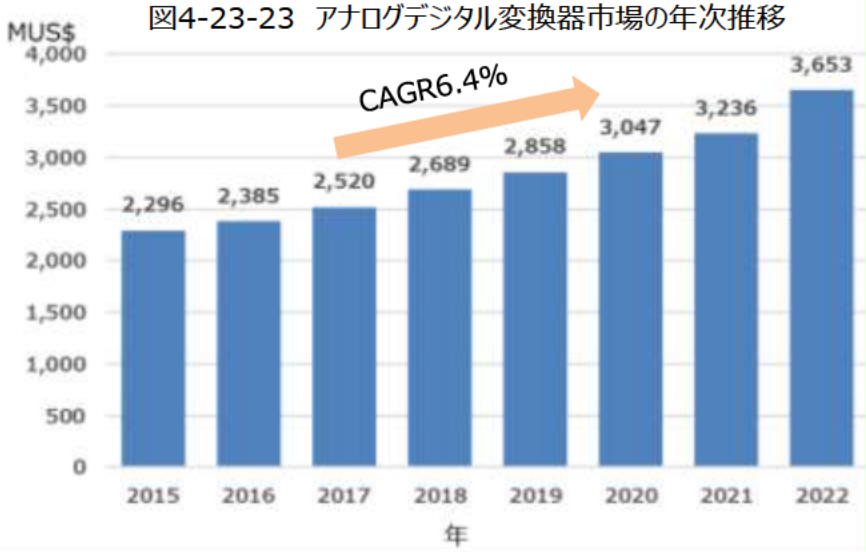


表4-23-2　アナログデジタル変換器用途別市場推移

Application	2015	2016	2017	2019	2021	2023	CAGR (2017-2023)
Communications	770.5	747.0	766.9	869.5	999.2	1,157.3	7.1%
Industrial	539.0	578.7	619.7	704.8	796.3	893.8	6.3%
T&M	329.3	353.3	377.8	429.0	484.3	538.7	6.1%
Automotive	278.7	294.2	310.1	336.3	360.0	383.7	3.6%
Medical	262.5	287.6	314.1	371.6	434.8	503.7	8.2%
Consumer Electronics	116.5	123.9	131.3	146.7	161.6	175.5	4.9%
Total	2,296.4	2,384.7	2,519.9	2,858.0	3,236.2	3,652.7	6.4%

4.品目の技術動向調査（９）

○輸出令4項（23）ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器

② 市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（２）

ロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器（半導体/組立/モジュール）の製造企業概要を表4-23-2に示す。3 Datel Inc以外はロケット又は無人航空機用アナログデジタル変換器を製造している可能性があるが確かではない。

表４-23-3 アナログデジタル変換器（半導体/組立/モジュール）の製造企業概要

	アナログデジタル変換器製造企業（半導体／組立／モジュール）	会社概要
1	Datel Inc（米国）	Datelは、1970年に設立され、本社は米国テキサツ州にあり、データコンバータ、電源、DC-DCコンバータ、デジタルパネルメータなどの高精度データ取得コンポーネントを提供する会社である。 データ取得製品は、軍事、HI-REL、医療、科学、産業用途の絶えず変化する要件を満たすように設計されており、世界中の顕微鏡、レーダー、主要な防衛プログラムなどの機器や高精度アプリケーションのサプライヤーである。
2	Analog Devices（米国）	アナログ・デバイセズは、電子機器でしようされる高性能アナログ、ミックスシグナルおよびデジタルシグナルプロセッシング（DSP)集積回路（IC)を設計および製造している。同社は1965年に設立され、本社は米国マサチューセッツ州にある。従業員数は全世界で約10,000人である。
3	Texas Instruments（米国）	テキサツインスツルメンツは、1930年に設立され、本社は米国テキサツ州にあり、アナログ半導体と組込み半導体を設計、製造および製造している。同社は、産業用、車載、パーソナル・エレクトロニクス、通信機器、エンタープライズ・システムなどの市場で、約80,000種類の製品を約100,000社へ提供している。
4	Linear Technology（米国） （現在）Analog Devices（米国）	Linear Technology（本社は米国カルフォルニア州）は、高性能アナログ集積回路の設計および製造を行っていましたが、2017年にアナログ・デバイセズに買収された。以降、アナログ・デバイセズ社の事業と統合されている。
5	Freescale Semiconductor （米国） （現在）NXP Semiconductors（オランダ）	モトローラの半導体部門を分離設立されたフリースケール・セミコンダクタ（本社は米国テキサス州）は、2015年にNXPセミコンダクターズ（オランダ）に吸収合併され消滅した。 NXPは、2006年、フィリップスの半導体部門より分社化して設立し、本社はオランダのアイントフォーフェンにある。自動車、産業、モバイル、通信インフラの市場を中心に、MCU, Logic, アナログなど各種半導体集積回路製品の設計および製造をしている。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第4項（26）
ロケット又は無人航空機用
集積回路、探知装置又はレードーム

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

貨物等省令では集積回路、探知装置又はレードームが規制の対象となっている。以下にそれらの説明をする。

【集積回路】
集積回路（IC：Integrated Circuit）とは、ひとつのシリコン半導体基板の上に、トランジスタ、抵抗（電気抵抗）、コンデンサなどの機能を持つ素子を多数作り、まとめた電子部品である。集積回路のトランジスタ、コンデンサ、抵抗の構成例を図4-26-1に示す。基板上にトランジスタ、抵抗、コンデンサが構成されている。 集積回路の種類を図4-26-2に示す。
ロケットや航空機用途の集積回路は、動作温度範囲、放射線耐性、故障率・寿命など特性に対して、民生品よりも厳しい要求があるが、要求値は、プロジェクト毎に決定される。
航空・宇宙・防衛分野用集積回路の製造会社は、JISQ9100、AS9100あるいはEN9100(航空、宇宙及び防衛分野の組織に対する品質マネジメントシステム）の第三者認証取得が必要である。また、JAXAやNASAのロケット用集積回路の製造会社は、JAXAやNASAからQML(Qualified Manufacturers List)認定を取得することが必要となる。

図4-26-1　集積回路　トランジスタ、コンデンサ、抵抗の構成例

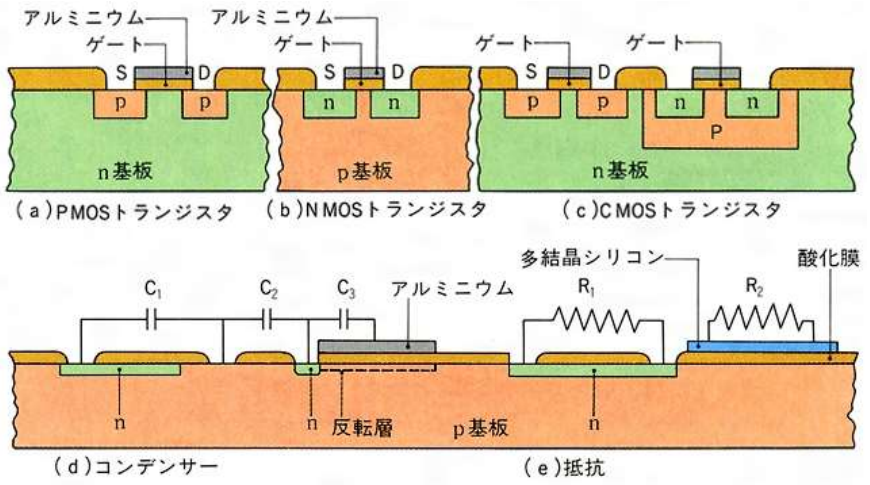
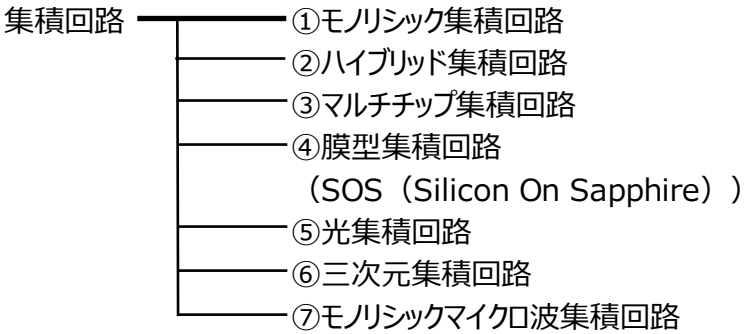


図4-26-2　集積回路の種類



1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

【探知装置（Seeker）】
機械的、電気的、光学的又は化学的に探知する装置であって、ミサイルが標的を捜索(seek)して終端誘導を行うためのセンサー類。可視光誘導からレーダーまで様々な機器が含まれ、それらを総称して探知装置と呼ばれる。
ミサイルに使用されている探知装置の例を　図4-26-3に示す。
世界のミサイル用探知装置の市場規模は、約50億4,000万米ドル（2020年）で、主要な製造会社は、BAE Systems、Boeingなど10社ある。（インドBizwit Research & Consulting社調べ）

図4-26-3　探知装置（Seeker）の例

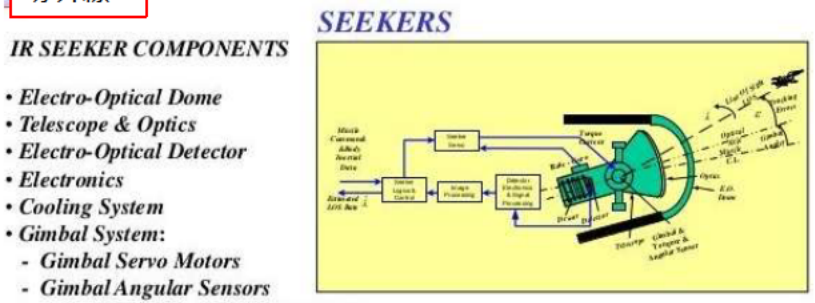
レーダー





RF & 可視光

赤外線







1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

【レードーム（Radome/レドーム）】
radomeは、rader+dome（レーダードーム）が語源である。図4-26-4は、在りし日の富士山レーダードームである。
レードームは、探知装置（Seeker）を保護するため覆いかぶせるドーム状やコーン状の風防である。一般に、ミサイルでは、コーン状の先端部分である。
レードームの材質は、強度、電磁波透過性、耐熱性、耐放射線性などを考慮して選ばれる。Corning社（米国 https://www.corning.com/）はミサイルのレードーム用素材Pyroceram9606（セラミックガラス）、9754（赤外線透過ガラス）を市販している。レードームの例を図4-26-5、図4-26-6に示す。

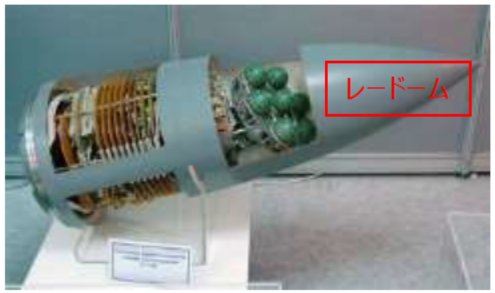
図4-26-4
富士山レーダードーム



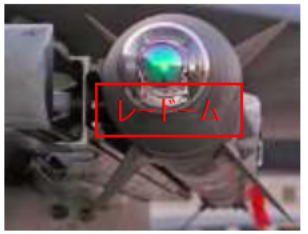
図4-26-5 航空機のレードーム



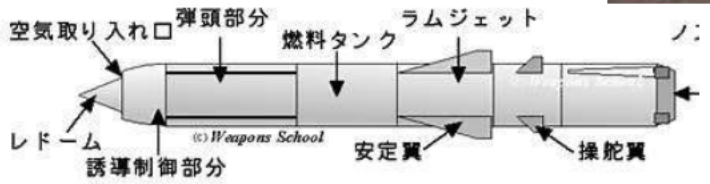
図4-26-6 ミサイルのレードームの例







ヤホント 略図





2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とMCTRの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とMCTRの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
4(26)	3	1	二十七	集積回路、探知装置又はレードーム（５００キログラム以上のペイロードを３００キロメートル以上運搬することができるロケット又は無人航空機に使用することができるものに限る。）であって、次のいずれかに該当するもの イ　全吸収線量がシリコン換算で５０万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計した集積回路であって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの ロ　ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために設計した探知装置 ハ　５０キロパスカルを超える圧力において１平方メートル当たり４，１８４キロジュールを超える熱衝撃に耐えることができるように設計したレードームであって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの	イ　全吸収線量がシリコン換算で５０万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計した集積回路であって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの ロ　ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために設計した探知装置 ハ　５０キロパスカルを超える圧力において１平方メートル当たり４，１８４キロジュールを超える熱衝撃に耐えることができるように設計したレードームであって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの

MCTR規制番号		MCTR規制文言（全文）
3桁	細番	
18.A.1		"Radiation Hardened" "microcircuits" usable in protecting rocket systems and unmanned aerial vehicles against nuclear effects (e.g. Electromagnetic Pulse (EMP), X-rays, combined blast and thermal effects), and usable for the systems specified in 1.A.
18.A.2		'Detectors' specially designed or modified to protect rocket systems and unmanned aerial vehicles against nuclear effects (e.g. Electromagnetic Pulse (EMP), X-rays, combined blast and thermal effects), and usable for the systems specified in 1.A.
18.A.3		Radomes designed to withstand a combined thermal shock greater than 4.184 x 106 J/m2 accompanied by a peak over pressure of greater than 50 kPa, usable in protecting rocket systems and unmanned aerial vehicles against nuclear effects (e.g. Electromagnetic Pulse (EMP), X-rays, combined blast and thermal effects), and usable for the systems specified in 1.A.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【集積回路】

集積回路の用途は、現在社会においてスマートフォンやPC等の情報通信機、自動車の自動運転やEVのパワートレイン等、工場のライン自動化や生産管理、電車や交通、エレベータ等の社会インフラ、テレビや洗濯機や冷蔵庫などの家電、CT･MRI･超音波診断などの医療機器、軍事関連機器や航空機や宇宙機器等幅広くあらゆる機器に使用されている。集積回路を使用する機器の例を図4-26-7に示す。

これらの幅広い用途に使用される集積回路は、用途に対し必要とされる機能や開発費、開発期間、単価などに応じて適材適所で使用され、専用集積回路、汎用集積回路、カスタム集積回路等の種類がある。

図4-26-7　集積回路を使用する機器の例



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【探知装置/レードーム】

ロケット（ミサイル）、無人航空機の誘導制御に使用される。民生用途では、気象衛星、宇宙ステーション、惑星探査機などに探知装置が使用され、レードームは、探知装置の保護カバーとして一体で使用されている。

図４-26-8に小惑星探査機はやぶさ２、図４-26-9に気象衛星ひまわり８号での探知装置を示す。［　　］が探知装置である。

図4-26-８　小惑星探査機　はやぶさ２



図4-26-９　気象衛星ひまわり８号



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

輸出令は、用途を、ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードームに限定している。

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（１）

輸出令は、用途を、ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードームに限定している。

規制パラメータは、イ：極めて高放射線耐性をもった半導体デバイスで構成された、ロ：放射線検出器および付帯装置を、ハ：核爆発が起きたような環境でも耐えられるレードーム　である。

規制パラメータ条件に当てはまるロケット又は無人航空は、カーマン・ライン（上空100km)を超えた宇宙空間を飛行する、弾道ミサイルや衛星攻撃ミサイルなどに限定されると考えられる。（図4-26-10および図4-26-11）

規制パラメータ　輸出令第４項(26)

イ　全吸収線量がシリコン換算で５０万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計した集積回路であって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの

ロ　ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために設計した探知装置

ハ　５０キロパスカルを超える圧力において１平方メートル当たり４，１８４キロジュールを超える熱衝撃に耐えることができるように設計したレードームであって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの

図4-26-10　地球上空

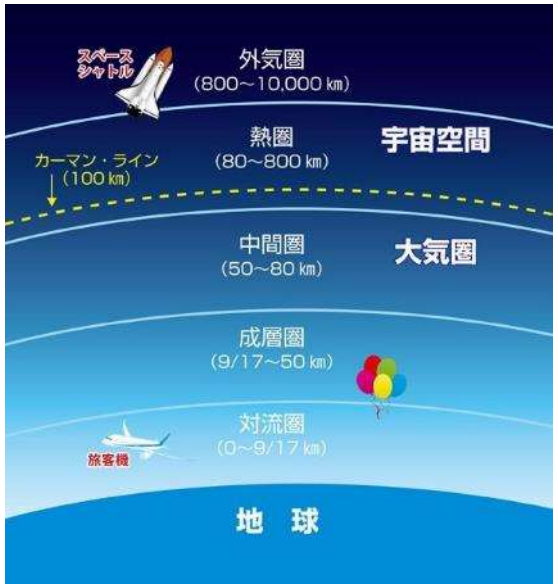


図4-26-11　宇宙空間での軍事例イメージ



4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（２）

【集積回路】

規制対象となる集積回路は、図4-26-12の放射線環境における放射線量と温度の関係で示すように、原子力発電所の原子炉／核融合炉用の極わめて耐放射線性能が高い集積回路（**放射線硬化型IC**）である。この集積回路は、探知装置（後述）に使用される。

【放射線硬化型IC】

放射線硬化型ICは、
①論理的シールド（デバイス回路、構造、材料などを技術の最適化）
②物理的シールド（パッケージ技術の最適化）
集積回路の種類（プロセッサー、ADC,・・・）毎にの２つの視点で耐放射線性能を向上させている。

Si半導体では、30万ラド以上の集積回路は存在するが、50万ラド以上のものは公開されていない。（図4-26-13）

規制パラメータ　輸出令第４項(26)
イ　全吸収線量がシリコン換算で５０万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計した集積回路であって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの
ロ　ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために設計した探知装置
ハ　５０キロパスカルを超える圧力において１平方メートル当たり４，１８４キロジュールを超える熱衝撃に耐えることができるように設計したレードームであって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの

図4-26-12　放射線環境における放射線量と温度の関係

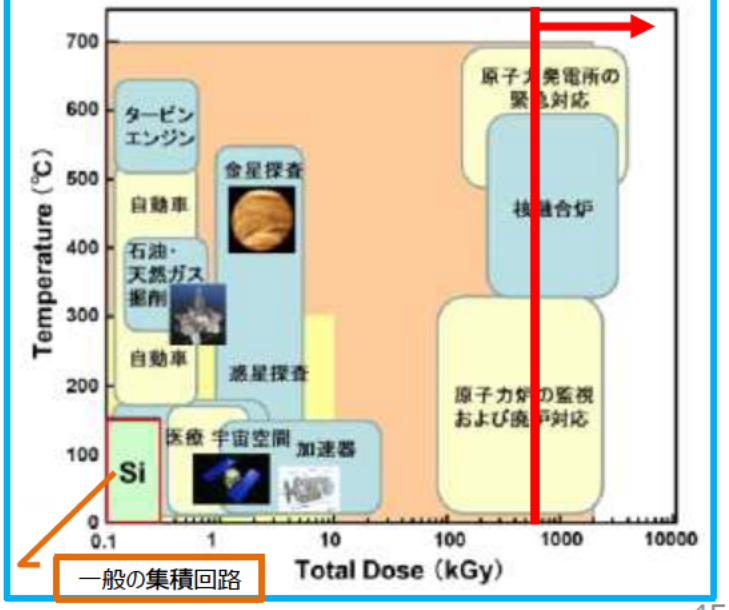


図4-26-13　耐放射線アームプロセッサー　VORAGO社



HARDSIL®と称する設計手法（３重冗長等）を使って回路設計で30万ラド以上を達成している。

Radiation Performance	Total Ionizing Dose (TID) : >300 krad (Si) Soft Error Rate (SER) w/ EDAC and Scrub enabled: <1e-15 errors/bit-day* Latch up immunity LET >= 110MeV-cm^2 / mg

https://www.voragotech.com/products/va41620

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（３）

例えば、電源ICではGaNを使うと、GaN FETはゲート酸化膜を有しないので放射線によるトラップ（ホール）が発生しない。よって耐シングルイベント効果がある。 最近は、より耐放射線性能の高いダイヤモンドデバイスが注目されている。

原子力応用におけるダイヤモンド半導体の優位性（公益財団法人原子力安全研究協会平成28年度事業資料）を表4-23-1に示す。現在では原子力関連の耐放射線集積回路開発は、ダイヤモンドデバイスに注力している。

規制パラメータ　輸出令第４項(26)
イ　全吸収線量がシリコン換算で５０万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計した集積回路であって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの
ロ　ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために設計した探知装置
ハ　５０キロパスカルを超える圧力において１平方メートル当たり４，１８４キロジュールを超える熱衝撃に耐えることができるように設計したレードームであって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの

表4-23-1　原子力応用におけるダイヤモンド半導体の優位性

材料	禁制帯幅	安定動作可能温度	耐放射線性能	
			γ線	中性子
ダイヤモンド	5.5eV	>500°C	◎	◎
SiC (4H)	3.25eV	300°C	○	×
GaN	3.4eV	300°C	△	△
Si	1.1eV	～50°C*	×	×

*SOI(Si on insulatorは200°C付近まで可

4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（４）

【探知装置】

核の影響を探知するのは、γ線、中性子線を検出する必要がある。放射線を計測する方法は、 ①ガス式、 ②半導体式、 ③シンチレーション式がある。放射線検出方式を図4-26-14に示す。

核融合実験施設（JT-60）のリアルタイム中性子モニターは、^{3}H計数管を用いている。

ロケットに使用されている放射線検出器の情報は入手できていない。

衛星に搭載する放射線計測器の例を図4-26-15に示す。

規制パラメータ　輸出令第４項(26)

イ　全吸収線量がシリコン換算で５０万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計した集積回路であって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの

ロ　ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために設計した探知装置

ハ　５０キロパスカルを超える圧力において１平方メートル当たり４，１８４キロジュールを超える熱衝撃に耐えることができるように設計したレードームであって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの

図4-26-14　放射線検出方式



図4-26-15　明星電気株式会社製SPM



高度400～500 km衛星向けの半導体検出器を用いた粒子エネルギスペクトロメータSPM(SPM：Space Particle Monitor)

https://www.meisei.co.jp/products/space/satellite/p1379

4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（５）

【レードーム】
規制パラメータの**50キロパスカル、4,184キロジュール及び熱衝撃**について以下に考察する。

50キロパスカル（kPa)=0.493≒0.5気圧である。
ロケット内が0.5気圧以上であることを想定している。宇宙ステーション（きぼう）は内部を１気圧に保っている。

4,184キロジュール(kJ)＝１000キロカロリー(kcal)
１リットル（1kg)の水を1000℃上昇させるエネルギに相当する。

熱衝撃

熱の伝わり方は①放射、②伝導、③対流がある。大気圏外（真空）を飛行するロケットでは、核からの放射線（電磁波）による放射熱にの熱衝撃がある。放射線によりレードームの分子が振動し熱を発生し、レードームの温度が上昇する。核破裂した場合、極めて短時間に大量の放射線によって急な温度上昇が起こり、熱衝撃となる。

放射熱の例として、太陽によって地球が温められる原理を図4-26-16に示す。

大気圏外を飛行するロケット（弾道ミサイル）に使われているレードームの材質・膜構造、耐熱衝撃性能は、開示されていない。
航空機のレードームの例を図4-26-17に示す。耐熱温度から類推すると、大気圏内で最高速度マッハ５程度以下のミサイルに使用可能である。

弾道ミサイルの場合、大気圏への再突入時に断熱圧縮による突入先端部分の表面温度数千℃から１万℃以上（再突入速度による）になり、突入先端部にレードームを配置することは難しく、後部に配置されていると考える。

小惑星探査衛星はやぶさの大気圏再突入時の表面温度は１万℃で、カプセル表面温度は3,000℃だったと推定されている。

規制パラメータ　輸出令第４項(26)
イ　全吸収線量がシリコン換算で５０万ラド以上となる放射線照射に耐えることができるように設計した集積回路であって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの
ロ　ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために設計した探知装置
ハ　５０キロパスカルを超える圧力において１平方メートル当たり４，１８４キロジュールを超える熱衝撃に耐えることができるように設計したレードームであって、ロケット又は無人航空機を核の影響から防護するために使用することができるもの

図4-26-16　放射熱

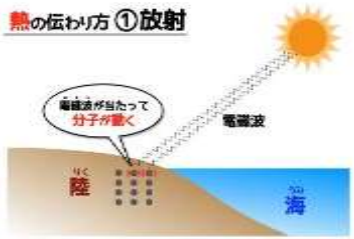
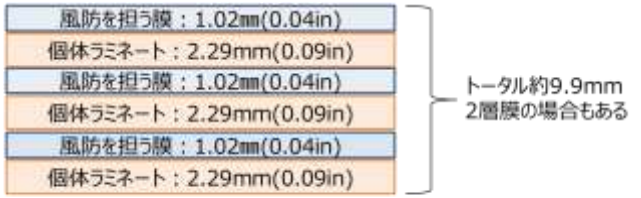


図4-26-17　航空機用レードームの例



主に使われる材質：「グラスファイバー」「グラスウール」「フッ素樹脂加工された繊維（PTFE-coated fabric）」「テフロン」

耐熱温度：約1,500℃～2,000℃

https://www.hikouki-pilot.com/radome-1/

4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

② 市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードームの市場データは公開されていないので、以下に製造企業をまとめた。
【集積回路】放射線硬化型ICの主な製造企業を表4-26-2に示す。

表4-26-2 放射線硬化型ICの主な製造企業

会社	会社概要
Aeroflex Inc.（米国） 現：Cobham Advanced Electronic Solutions（CAES）（米国）	1937年にカンザス州で設立され、本社はニューヨーク州で、無線通信に使用される試験装置、RFおよびマイクロ波集積回路、コンポーネント、システムを製造していた会社である。放射線硬化型ICは、Aeroflexマイクロエレクトロニクスソリューション(AMS)事業部門が担当していた。2014年にCohbam社（英国）に買収され、Cobham Advanced Electronic Solutions（CAES）（本社は米国バージニア州）に組み込まれた。CAESは、航空・宇宙・防衛分野向けの半導体やセンサーを得意とする会社である。
Atmel Corporation（米国） 現：Microchip Technology（米国）	アトメルは、カルフォルニア州に本社を置き、マイクロコントローラ、RFデバイス、ASIC、ASSPを主に消費者、通信、コンピュータネットワーキング、産業、医療、自動車、航空宇宙、軍事などのアプリケーションを提供していた。2016年、マイクロチップテクノロジーに買収された。 マイクロチップは、本社をアリゾナ州に置き、1987年にゼネラル・インスツルメンツのマイクロエレクトロニクス部門を分社化して設立された。マイクロコントローラ、メモリ製品、ワイヤレス製品、組み込みコントローラとスーパーI/Oデバイス、タッチ、マルチタッチ、3Dジェスチャーなど幅広い半導体製品を提供している。
BAE Systems Plc(英国)	BAEシステムズは、1999年にブリティッシュ・エアロスペースとマルコーニ・エレクトロニック・システムズの合併によって設立され、登記上本社はロンドンですが、実際の本社はハンプシャー州の旧ブリティッシュ・エアロスペースにある。戦車、戦闘機、潜水艦などを開発、製造する国防産業を擁し、これらの防衛エレクトロニクス製品を開発している。
Crane Co.（米国）	クレーン社は、コネチカット州に本社を置く工業製品企業で、米国の浴室備品や自動販売機で有名な会社である。事業の一つとして、航空宇宙・エレクトロニクス、エンジニアリング材料(ガラス繊維パネルおよび通信機器)がある。

4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

② 市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【集積回路】

表4-26-2 放射線硬化型ICの主な製造企業（続き）

会社	会社概要
Honeywell Aerospace（米国）	ハネウェルエアロスペースは、航空機エンジンとアビオニクスのメーカーであり、補助動力ユニット(Aパス)および他の航空製品の製造企業である。アリゾナ州に本社を置き、ハネウェル・インターナショナル・コングロマリットの一部門です。
International Rectifier Corporation（米国） 現：Infineon Technologies AG（独）	インターナショナル・レクティファイアー（IR）は、カルフォルニア州に本社を置く、アナログICとミックスドシグナルIC、パワーデバイスなどの製造会社でしたが、2015年1月13日、同社はインフィニオン・テクノロジーズ（ドイツ）に買収された。 IRの製品は、インフィニオン・テクノロジーズの半導体ポートフォリオ全体の一部として、照明、自動車、衛星、航空機、防衛システムなど多くの用途で使用され続けている。
RD Alfa microelectronics（ラトビア）	RDアルファ・マイクロエレクトロニクスは、1962年にラトビアで設立され、ソ連の崩壊までは、ソ連邦の宇宙・防衛の一員で、スプートニクやボストークの電子技術開発に加わっていたエレクトロデバイス企業である。現在はEU宇宙機関及びラトビア宇宙技術クラスターと協働している。
Intersil Corporation（米国） （ルネサスの子会社）	インターシルは、デジタルウォッチ集積回路(IC)の開発者であるスイスの物理学者ジャン・ホエルニによって1967年に設立され、その後、幾度かの変遷を経て、1999年にIntersil Corporationが設立した。PCの電源管理、産業および消費者向け電力システムのスイッチングおよびバックブーストレギュレータ、軍事および商用アプリケーション用の放射線硬化型アナログおよびパワーICの製造会社である。2017年、ルネサス（日本）は、インターシルを買収し子会社化した。
Linear Technology Corporation（米国） 現：Analog Devices, Inc.（米国）	リニア・テクノロジー・コーポレーションは、高性能アナログ集積回路の設計・製造を行い、同社の製品のアプリケーションには、通信、携帯電話、ネットワーキング製品などの民生用途と、軍事および宇宙システムがある。本社はカルフォルニア州で、1981に設立された。 2016年、アナログ。デバイセズに買収され、2017年から同社の一員として事業を行っている。

4.品目の技術動向調査（8）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

② 市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【探知装置】
ミサイル用探知装置を製造している可能性のある企業を表4-26-3に示す。

表4-26-3 ミサイル用探知装置を製造している可能性のある企業

会社	会社概要
BAE Systems Plc(英国)	BAEシステムズは、1999年にブリティッシュ・エアロスペースとマルコーニ・エレクトロニック・システムズの合併によって設立され、登記上本社はロンドンですが、実際の本社はハンプシャー州の旧ブリティッシュ・エアロスペースにある。戦車、戦闘機、潜水艦などを開発、製造する国防産業を擁し、これらの防衛エレクトロニクス製品を開発している。
Boeing（米国）	ボーイング社は1916年、アメリカの木材産業産業のウィリアム・E・ボーイングがワシントン州シアトルにエアロ・プロダクツ・カンパニーを設立した時に始まり、飛行機、回転翼機、ロケット、衛星、通信機器、ミサイルを世界中で設計、製造、販売するアメリカの多国籍企業である。現在、シカゴに国際本部（本社）を置いている。
Leonardo S.P.A.（イタリア） （旧社名　Finmeccanica）	レオナルドは、2017年、フィンメカニカからレオナルドへ社名変更した。フィンメカニカは、1948年に、国有のイスティトゥト・パー・ラ・リコストルツィオン・インダストリアル(IRI)の機械工学サブホールとして設立された。航空、航空機、ヘリコプター、電子機器、防衛システム、遠隔制御兵器ステーション、砲塔、オートキャノン、ロータリー砲、海軍砲兵砲、ミサイル、魚雷、無人地上車両、無人水中車両を専門とするイタリアの多国籍企業である。本社はローマ。
Raytheon Technologies（米国）	レイセオン・テクノロジーズは、マサチューセッツ州本社を置くアメリカの多国籍航空宇宙・防衛の会社です。同社は、航空機エンジン、航空電子工学、航空宇宙構造、サイバーセキュリティ、誘導ミサイル、防空システム、衛星、ドローンなど、航空宇宙・防衛産業における先端技術製品の研究開発、製造を行っている。同社の収益の大部分は、米国政府から大規模な軍事請負による、同社は1922年に設立され、当初は、冷凍技術を使った家電会社でした。

4.品目の技術動向調査（9）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

② 市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【探知装置】

表4-26-3 ミサイル用探知装置を製造している可能性のある企業（続き）

会社	会社概要
Safran S.A.（フランス）	サフランは、フランスの多国籍航空機エンジン、ロケットエンジン、航空宇宙部品、防衛企業であり、航空機及びロケット用エンジン並びに航空宇宙部品メーカーグループのSNECMA社と、セキュリティ会社SAGEM社との合併によって2005年に設立された。本社はパリにあり、従業員は、95,000人以上を雇用している。
Thales S.A.（フランス）	タレスは、フランスの大手電機企業であり、航空宇宙分野、防衛分野、交通システム分野、セキュリティ分野での情報システムと各種サービスを提供している。パリ近郊のラ・デファンスに本社がある。 2000年末にイギリスの防衛機器メーカー「Racal Electronics plc」を吸収合併した時に合わせて、社名を「トムソンCSF」（Thomson-CSF）から「タレス」（Thales）に変更した。タレスの筆頭株主はフランス政府がある。
Northrop Corporation（米国）	ノースロップは、1939年の設立から1994年のグラマンとの合併までアメリカの航空機メーカーであった。同社は、飛行翼の設計、最も成功したB-2スピリットステルス爆撃機の開発で知られている。 同社は、米軍の多くの戦闘機、爆撃機、迎撃機、無人航空機、ミサイルの開発プロジェクトに参加している。
Rafael Advanced Defense Systems Ltd.（イスラエル）	ラファエル・アドバンスト・ディフェンス・システムズは、イスラエル国防省内の兵器と軍事技術の開発のためのイスラエル国家研究開発防衛研究所が、2002年にイスラエル政府所有の会社（ラファエル軍備開発局）として設立された。2007年、現社名に変更した。本部はハイファ（イスラエル第３の都市）。ラファエルはイスラエル国防軍と海外輸出のための武器、軍事、防衛技術を開発し、生産している。

4.品目の技術動向調査（10）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

② 市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【探知装置】

表4-26-3 ミサイル用探知装置を製造している可能性のある企業（続き）

会社	会社概要
Aselsan AS（トルコ）	アセルサンは、キプロス作戦のためにトルコに禁輸措置を設けるという米国の決定の後、1975年にトルコ陸軍財団によって設立された。同社は、トルコ国内外の軍事および産業顧客向けの最新の電子システムを設計、開発、製造している。本社はトルコのアンカラにある軍施設にある。 通信・情報技術事業部門(HBT)、レーダー・電子戦システム事業部門(REHIS)、防衛システム技術事業部門(SST)、運輸・セキュリティ・エネルギー・オートメーション・システム事業部門(UGES)で構成されている。
SemiConductor Devices（イスラエル）	セミコンダクタデバイスは、ミサイル用探知器を設計製造する会社である。本社は、ミスガフのレシェム工業団地内にある。

4.品目の技術動向調査（8）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

② 市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【レードーム】
ロケット・航空機用レードームの主な製造企業を表4-26-4に示す。

表4-26-4 ロケット・航空機用レードームの主な製造企業

会社	会社概要
General Dynamics（米国）	ゼネラル・ダイナミクスは、バージニア州に本社を置くアメリカの上場航空宇宙・防衛企業である。1954年に潜水艦メーカーのエレクトリックボートと航空機メーカーのカナディアーの合併で結成された。同社は、ミサイル、ミサイル発射システム、戦闘機、戦闘システムなどの事業を展開しており、大陸間弾道ミサイル（アトラス）の開発・製造のメンバーであった。
Saint-Gobain（フランス）	サンゴバンは、フランス・パリ近郊のラ・デファンスに本社を置き、各種建築材料や高機能材料を製造する多国籍企業。高機能材料では放射線検出器の重要な部品プラスチックシンチレータで世界的シェアを誇る。サンゴバンは、航空機やロケットなどの苛酷な環境条件下でも耐えうる重要な部品の数多くを設計・開発・製造しており、たとえば、衛星通信を可能にするレドームや、厳しい温度条件、圧力条件にも応えられる高性能なシールなどがある。
Nordam（米国）	ノルダムは、オクラフォマ州に本社を置く、アメリカの航空宇宙企業である。2018年の破産申請し、カーライルグループ（米国プライベートエクイティ）が資本注入している。
Meggitt（英国）	メギットは、航空宇宙、防衛、エネルギー市場向けのコンポーネントとサブシステムを専門とする英国の国際企業です。本社は、コペントリーです。航空宇宙用の極限環境で動作する複雑な複合構造をもった複合材料の製造と、アバス、レオナルド、ボーイング、ボンバルディア、カーライル、エンブラエル、ユーロフィガー、ゴゴ、HAL、ロッキード・マーティン、NHインダストリーズ、パナビア・エアクラフト、無人航空機、宇宙打ち上げ車両、ミサイルシステム企業などへレードームを販売している。
Starwin Industries（米国）	スターウィンは、オハイオ州に本社を置く、1964年に設立された、レイドームや航空機部品から宇宙船ハードウェアなど、航空宇宙防衛用アセンブリ会社である。米国防総省、ロッキード、レイセオン、GEなどと取引している。

4.品目の技術動向調査（10）

○輸出令4項（26）ロケット又は無人航空機用集積回路、探知装置又はレードーム

② 市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【レードーム】

表4-26-4 ロケット・航空機用レードームの主な製造企業（続き）

会社	会社概要
Kitsap Composites（米国）	キトサップは、ワシントン州に本社を置く、航空宇宙用のレードーム、リフレクター、ダクトコンポーネントなどの部品企業である。同社のレードームは、固体ラミネート、モノリシック、2層サンドイッチ、Aサンドイッチ、Cサンドイッチ、多層構造を使用したレイドームの設計、製造行っており、主たる用途は超音速機である。
Northrop Grumman Innovation Systems(米国) 旧）Orbital ATK（米国）	2015年、オービタルATKとして設立し、2018年、ノースロップ・グラマンがオービタルATKの買収により、ノースロップ・グラマン・イノベーション・システムズになった。本社は、バージニア州である。ロケット、宇宙線、武器関連の開発製造会社である。
Jenoptik　AG（ドイツ）	イエナオプティックはドイツ・テューリンゲン州、イェーナ（イエナ）に本社を置く世界有数の光学機器メーカーである。同社はLight & Optics（光学部品・光学機器）、Light & Production（自動車工場向け測定器・計測システム）、Light & Safety（交通管理システム）と、機械部品事業の VINCORION（防衛）の４つの事業部体制で、主な顧客は半導体製造装置、自動車産業、医療機器、セキュリティ、防衛産業、航空産業と多岐にわたる。
Raytheon Technologies（米国）	レイセオン・テクノロジーズは、マサチューセッツ州本社を置くアメリカの多国籍航空宇宙・防衛の会社です。同社は、航空機エンジン、航空電子工学、航空宇宙構造、サイバーセキュリティ、誘導ミサイル、防空システム、衛星、ドローンなど、航空宇宙・防衛産業における先端技術製品の研究開発、製造を行っている。同社の収益の大部分は、米国政府から大規模な軍事請負による、同社は1922年に設立され、当初は、冷凍技術を使った家電会社でした。
Royal Engineered Composites（米国）	ロイヤルは、1949年に石鹸の製造会社として設立され、ガラス繊維強化部品製造に移行し、軍用機のグラスファイバーカバーやダクト生産をして来た。現在は、レードーム、エンジン部品、ダクトの製造を行っている。本社はネブラスカ州にある。
Leonardo S.P.A.（イタリア） （旧社名　Finmeccanica）	レオナルドは、2017年、フィンメカニカからレオナルドへ社名変更した。フィンメカニカは、1948年に、国有のイスティトゥト・パー・ラ・リコストルツィオン・インダストリアル(IRI)の機械工学サブホールとして設立された。航空、航空機、ヘリコプター、電子機器、防衛システム、遠隔制御兵器ステーション、砲塔、オートキャノン、ロータリー砲、海軍砲兵砲、ミサイル、魚雷、無人地上車両、無人水中車両を専門とするイタリアの多国籍企業である。本社はローマ。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（１）
集積回路

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（１）

○輸出令7項（1）集積回路

集積回路について以下の分類の構成で説明をする。

（１）構造上の分類
- ①モノリシック集積回路
- ②ハイブリッド集積回路
- ③マルチチップ集積回路
- ④膜型集積回路（SOS （Silicon On Sapphire））
- ⑤光集積回路
- ⑥三次元集積回路
- ⑦モノリシックマイクロ波集積回路

（２）機能別の分類
- ①マイクロプロセッサ
- ②マイクロコンピュータ/マイクロコントローラ
- ③記憶素子
- ④アナログデジタル変換器
- ⑤デジタルアナログ変換器
- ⑥信号処理
- ⑦信号処理用の電気光学的集積回路又は光集積回路
- ⑧フィールドプログラマブルロジックデバイス
- ⑨ニューラルネットワーク
- ⑩FFTプロセッサ
- ⑪ダイレクトデジタルシンセサイザ
- ⑫暗号機能を含むIC

（３）製造要領の分類
- ①専用集積回路 ASSP（Application Specific Standard Product）
- ②汎用集積回路 GPIC（General Purpose Integrated Circuit）
- ③カスタム集積回路
  - ・ASIC（Application Specific Integrated Circuit）
  - ・FPGA（Field Programmable Gate Array）

1.対象品目の概要調査（２）

○輸出令7項（1）集積回路【構成上の分類】

集積回路（IC：Integrated Circuit）とは、ひとつのシリコン半導体基板の上に、トランジスタ、抵抗（電気抵抗）、コンデンサなどの機能を持つ素子を多数作り、まとめた電子部品である。集積回路のトランジスタ、コンデンサ、抵抗の構成例を図7-1-1に示す。基板上にトランジスタ、抵抗、コンデンサが構成されている。

集積回路の種類を図7-1-2に示す。次項以降にこれらの①～⑦の集積回路について説明する。

図7-1-1　集積回路　トランジスタ、コンデンサ、抵抗の構成例

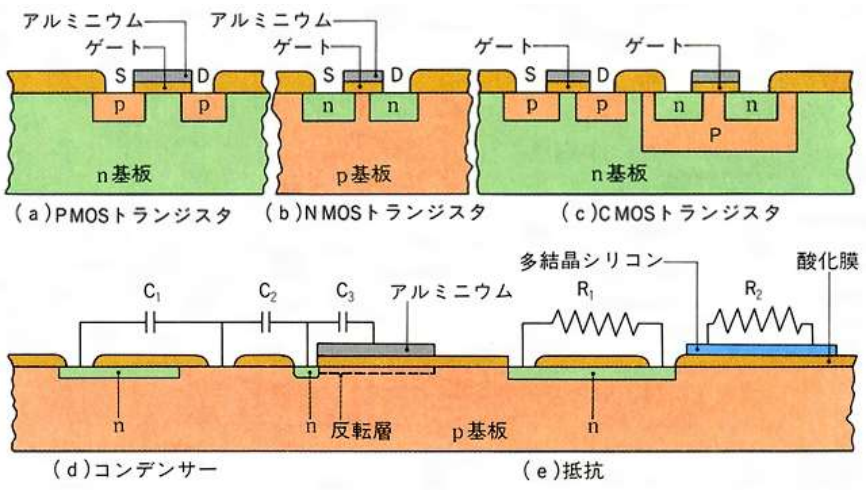
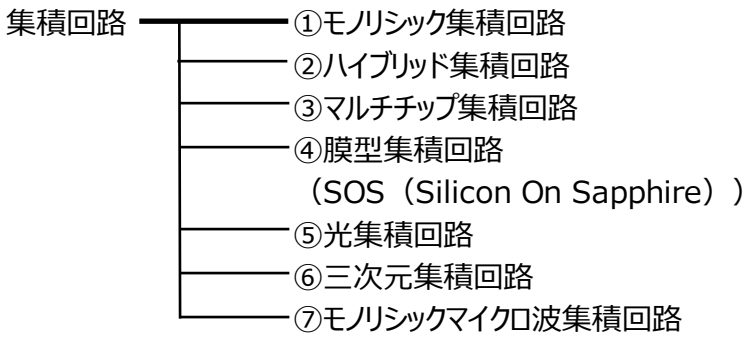


図7-1-2　集積回路の種類



1.対象品目の概要調査（３）

○輸出令7項（1）集積回路【構成上の分類】

①モノリシック集積回路

半導体基板上に新たな結晶を作ることで、受動素子であるトランジスタ、ダイオード、抵抗やキャパシタ及び能動素子であるトランジスタやリレーなどを作り一体化したものである。表面は絶縁膜でおおわれており、端子が取り付けられている。輸出管理品目のガイダンスでは、以下の運用解釈がされている。

- ・半導体材料の小片であるチップの中又はこの上に拡散プロセス、注入プロセス又は堆積プロセスによって形成されたもの
- ・分解することが不可能なように結合されたもの
- ・一つの回路の機能を実行するもの

モノリシック集積回路の例を図7-1-3に示す。

図7-1-3　モノリシック集積回路の例



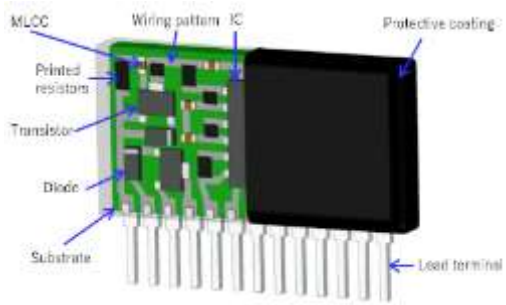
②ハイブリッド集積回路

ハイブリッド集積回路とは、単一の基板の上に複数のICチップや抵抗、コンデンサなどの電子回路を搭載し、ひとつのチップとして扱えるようにした集積回路のことである。ハイブリッドICは、一般的に、通常のICチップに比べて小型化・高密度化が容易である、といった利点がある。輸出管理品目のガイダンスでは、以下の運用解釈がされている。

- ・集積回路を組み合わせたもの又は集積回路と回路素子若しくは個別部品を組み合わせて、特定の機能を行うように相互に接続したものであって、カプセル封じをしていないデバイスを１以上含むもので、通常の集積回路の製造方法を用いて相互接続されているもので、一体として交換可能なもので、かつ、分解することが不可能なものをいう。
- ・上記運用解釈において、通常の集積回路の製造方法の典型例として、カプセル封じをしていないデバイス(ベアチップ）を熱圧着等の技術で基板に装着するチップボンディング又はベアチップ上の電極と基板や他のベアチップ上の電極を熱圧着や超音波圧着等の技術で接続するワイヤボンディングがある。

ハイブリッド集積回路の例を図7-1-4に示す。

図7-1-4　ハイブリッド集積回路の例



1.対象品目の概要調査（４）

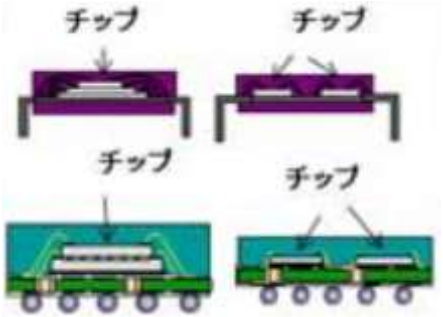
○輸出令7項（1）集積回路【構成上の分類】

③マルチチップ集積回路

マルチチップ集積回路とは、基板の上に2つ以上の相互に接続されたモノリシック集積回路チップを複数個搭載したものである。立体的構造がとれるので、従来のパッケージよりも面積を節約することができる。あるいは、異なる製造プロセスを使用した素子を搭載することができる。携帯電話、デジタルビデオカメラ等に使用され、小型・高性能・低コストを実現している。

マルチチップ集積回路の例を図7-1-5に示す。

図7-1-5マルチチップ集積回路の例

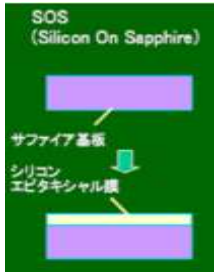


④膜型集積回路（SOS （Silicon On Sapphire））

膜型集積回路とは、厚膜又は薄膜の堆積によって、絶縁基板上に回路素子及び金属相互接続のアレイを形成したものをいう。SOS （Silicon On Sapphire）は、サファイア基板の上にシリコンをエピタキシャル成長させた膜型集積回路で、高周波数特性に優れている。

SOSの構造例を図7-1-6に示す。

図7-1-6 SOS（Silicon On Sapphire）の構造例

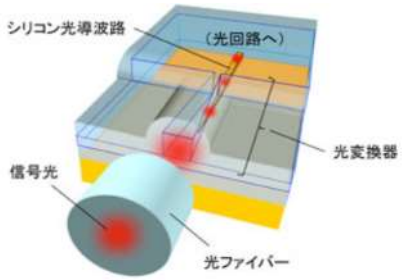


⑤光集積回路

光集積回路は、モノリシック集積回路又はハイブリッド集積回路であって、受光素子若しくは発光素子として機能するように設計した部品又は光機能若しくは光と電気の相互変換の機能を果たすように設計した部品を含むものをいう。光の導波機能を利用する半導体レーザー、光導波路、光スイッチ、光変調器、光検出器などの光素子を同一基板上に一体化した集積回路である。

光集積回路の例を図7-1-7に示す。

図7-1-7光集積回路の例



1.対象品目の概要調査（５）

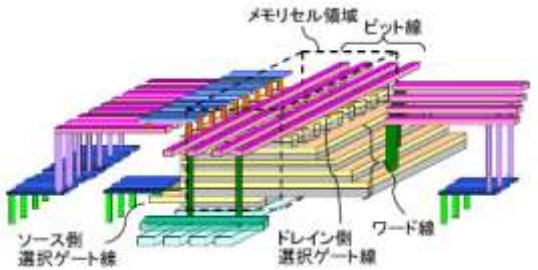
○輸出令7項（1）集積回路【構成上の分類】

⑥三次元集積回路

三次元集積回路は、半導体ダイ又はアクティブデバイス層の集合体であって、デバイス層同士の相互接続を形成するためのインターポーザー（電気的な接続を可能にするためのインターフェース）、基板、ダイ又は層を完全に貫通するビアを有するものである。3Dフラッシュメモリ構造を図7-1-8に示す。

三次元的にチップを積み重ねることによって集積度が高まり、また、特性の違うチップを積み重ねた場合には多機能化が可能となる。これらにより小型・高性能・低コストを実現している。

図7-1-8
三次元集積回路
３Dフラッシュメモリ構造

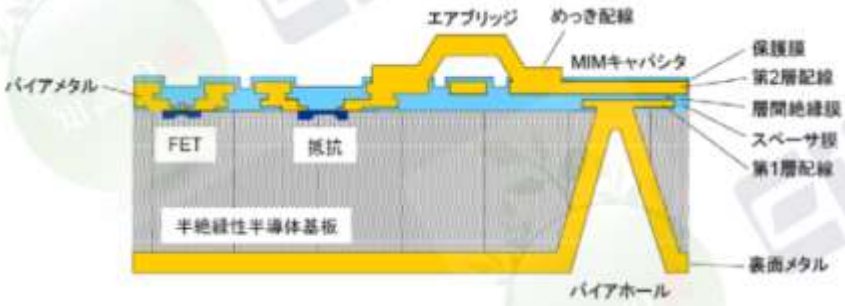


⑦モノリシックマイクロ波集積回路

通常のアナログICは，取り扱う信号やクロックに周波数に相当する1波長がICチップの寸法に比べて十分に長いため、IC内の配線に関して、寄生抵抗、寄生容量のみを考慮した回路設計を行うが、マイクロ波帯の周波数になると，1波長がICチップの寸法に比べて無視できなくなってくる。この課題を解決するため、半導体基板の上に能動素子・受動素子を集積して作った回路、さらに複数の機能をもつ回路を集積・構成し、マイクロ波又はミリ波の周波数で動作するモノリシック集積回路を、モノリシックマイクロ波集積回路という。近年、モノリシックマイクロ波集積回路を搭載した半導体は、スマートフォンや携帯電話、無線LANなどの用途に幅広く使用されている。

化合物半導体のモノリシックマイクロ波集積回路構造例を図7-1-9に示す。

図7-1-9　化合物半導体　モノリシックマイクロ波集積回路構造例



1.対象品目の概要調査（６）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

【集積回路の構成機能とその役割の一覧】

集積回路の構成機能とその役割の一覧を表7-1-1に示す。 また、次頁の図7-1-10にに集積回路の構成例を示し、図中に表7-1-1の機能を①～⑭で示した。

表7-1-1 集積回路の構成機能とその役割の一覧

	集積回路で構成される機能	集積回路における役割
①	マイクロプロセッサ	論理演算や制御などを外部記憶からの汎用命令で実行する。
②	マイクロコンピュータ マイクロコントローラ	マイクロプロセッサと記憶装置、入出力装置などで構成され内部記憶からの汎用命令を実行する。
③	記憶素子	演算や制御に必要なデータや命令（プログラム）を記録し読み出す。
④	アナログデジタル変換	外部のアナログ信号をデジタル信号に変換し、後段のデジタル演算やデジタル記録を可能にする。
⑤	デジタルアナログ変換	デジタル演算やデジタル記録されたデジタル信号をアナログ信号へ変換し、外部へ出力する。
⑥	信号処理	外部からの情報を伝送する信号を、高速フーリエ変換、ウォルシュ変換その他の領域間の変換、時間圧縮、フィルター処理、抽出、選択、相関、たたみ込みその他これらに類するアルゴリズムを用いて処理する。通常、マイクロプロセッサ、マイクロコンピュータ、マイクロコントローラ等で行われる。
⑦	電気光学的集積回路/光集積回路	デジタル演算等のデータ処理やデータの入出力に電子の代わりに光を使うもので、電子を使う従来の集積回路と比較して高速な処理能力と広い帯域幅、高いエネルギー効率を特徴とする。
⑧	フィールドプログラマブルロジックデバイス PLD：Programmable Logic Device	回路の設計情報を外部から送信して書き換えることができるデバイスである。通常の集積回路は内部の回路構成を製造後に変更することはできないが、PLDは製造後も内部の論理回路の構造を再構成できる。
⑨	ニューラルネットワーク	脳の神経回路の一部を模した数理モデルで、入力層、出力層、隠れ層から構成され、層と層の間には、ニューロン同士のつながりの強さを示す重み「W」がある。このニューロンを多数組み合わせる事で複雑な関数近似を行う事ができる。重みが変化するとニューラルネットワークの出力も変化し、重みの学習が可能である。ゆえにニューラルネットワークは機械学習のモデルとして利用されている。
⑩	FFTプロセッサ	FFTプロセッサ（Fast Fourier Transform Prosessor）は、高速フーリエ変換アルゴリズムを用いて時間領域のデータを周波数領域へ変換する。 周波数解析手法として、スペクトル解析に用いられる重要な技術である。
⑪	ダイレクト・デジタル・シンセサイザ DDS：Direct Signal Synthesizer	単一で固定の発振源から、任意の波形や周波数をデジタル的に生成するための電子回路である。デジタル信号で周波数または位相をほぼ瞬時に変更できるため、高度なデジタル変調の主要信号源として使用される。
⑫	スタティック式ラム SRAM：Static Random Access Memory	電源が供給されている限りデータを保持しているメモリで、回路規模は常にデータのリフレッシュが必要なダイナミック式RAM（DRAM：Dynamic Random Access Memory）と比較して大きいが、高速でのデータの書き込みと読み出しが可能なため、高速演算の信号処理のキャッシュメモリとしてマイクロプロセッサの記録装置で使用されることが多い。
⑬	不揮発性メモリ	データの記憶に用いられる半導体メモリの一つで、外部からの電源の供給がなくてもデータの記憶内容を維持することができる。演算結果データの保持やシステムの動作状態データの保持等に使用される。
⑭	暗号機能	暗号アルゴリズムを搭載し信号処理をすることにより、データの暗号化を行い、通信情報の機密を守る機能や送られたデータの送信者が偽物でないことを確認する機能等を有している。

1.対象品目の概要調査（７）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

【集積回路の構成機能とその役割の一覧】

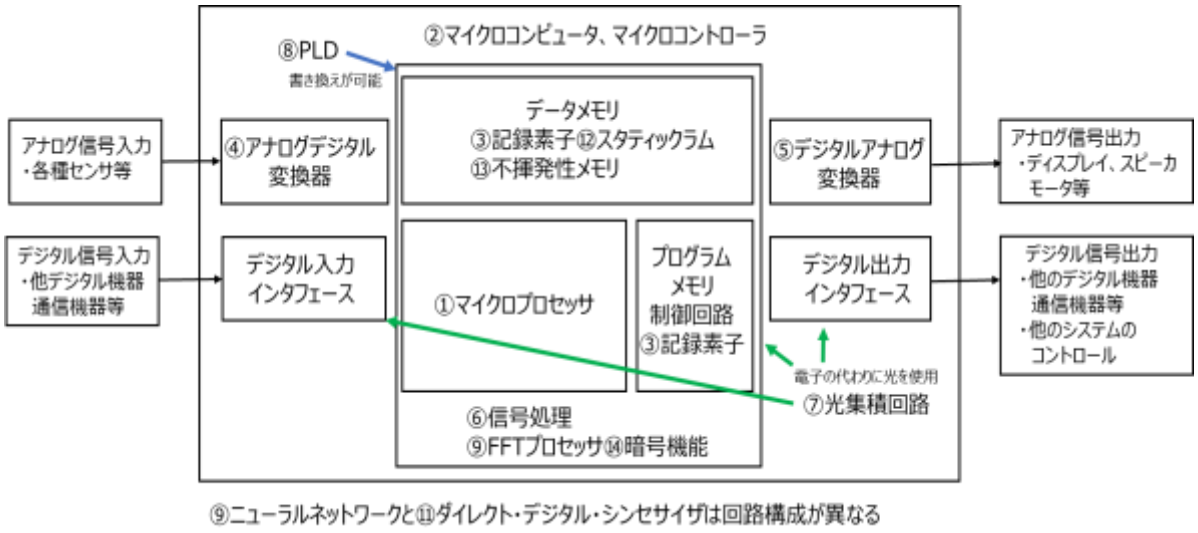
集積回路の構成例を図7-1-10に示し、図中に表7-1-2の集積回路の構成機能を①～⑭で示す。

センサ等からのアナログ信号は、アナログデジタル変換器（④）でデジタル信号に変換される。デジタル信号は、マイクロプロセッサ（①）とデータメモリとしての記録素子（③）のスタティックラム（⑫）や不揮発性メモリ（⑬）、DRAMをプログラムメモリで動作させFFT（⑩）等の信号処理（⑥）が行われる。その後信号処理されたデータは、デジタルアナログ変換器（⑤）でアナログ信号に変換され、ディスプレイの映像やスピーカーの音声、モータの動力等の駆動信号として使用される。

表7-1-2　集積回路の構成機能

	集積回路で構成される機能
①	マイクロプロセッサ
②	マイクロコンピュータ マイクロコントローラ
③	記憶素子
④	アナログデジタル変換
⑤	デジタルアナログ変換
⑥	信号処理
⑦	電気光学的集積回路/光集積回路
⑧	フィールドプログラマブルロジックデバイス PLD：Programmable Logic Device
⑨	ニューラルネットワーク
⑩	FFTプロセッサ
⑪	ダイレクト・デジタル・シンセサイザ DDS：Direct Signal Synthesizer
⑫	スタティック式ラム SRAM：Static Random Access Memory
⑬	不揮発性メモリ
⑭	暗号機能

図7-1-10　集積回路の構成例



1.対象品目の概要調査（８）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

①マイクロプロセッサ

マイクロプロセッサ（MPU: Micro Processing Unit）とは、コンピュータにおける演算や制御などの機能を半導体チップに集積したものである。コンピュータの心臓部であるCPU（中央処理装置）として用いられることが多い。AppleのスマートフォンiPhone 12・12 Proに使用されているA14 Bionicプロセッサ、PC等に使用されているIntel Core i9-10980XE等が一般的にマイクロプロセッサと言われている。この2つのマイクロプロセッサの外観を図7-1-11に示す。

図7-1-11　A14 BionicプロセッサとIntel Core i9-10980XEの外観

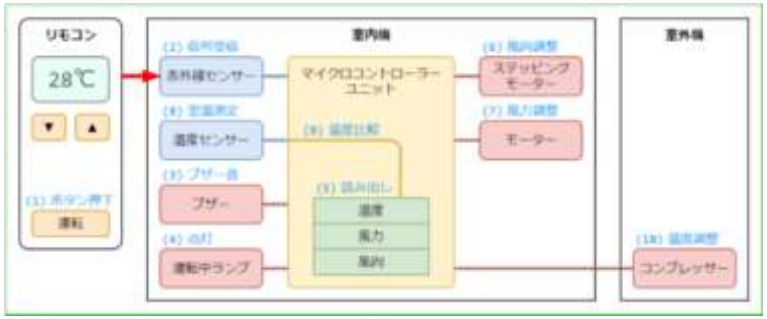




②マイクロコンピュータ/マイクロコントローラ

マイクロコンピュータ/マイクロコントローラ（MCU: Micro Computer Unit/Micro Controller Unit）は、略してマイコンと呼ばれCPUとしてマイクロプロセッサを使用したコンピュータである。特定のアプリケーションに使用され、特定のタスクを実装するように設計されている。 電化製品、電動工具、自動車のエンジン制御システム、コンピューターなど、特定の状況で自動的に制御する必要のある製品に使用されている。エアコンでのマイクロコントローラの使用例を図7-1-12に示す。

図7-1-12　エアコンのマイクロコントローラ使用例



1.対象品目の概要調査（９）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

③記憶素子(1)

集積回路の演算や制御に必要なデータや命令（プログラム）の記録あるいは読み出しができる半導体素子である。記憶素子は揮発性メモリと不揮発性メモリに大別される。

【1】揮発性メモリ：電源を切ると記憶情報が失われる記憶素子である。揮発性メモリは主に以下の2種類がある。

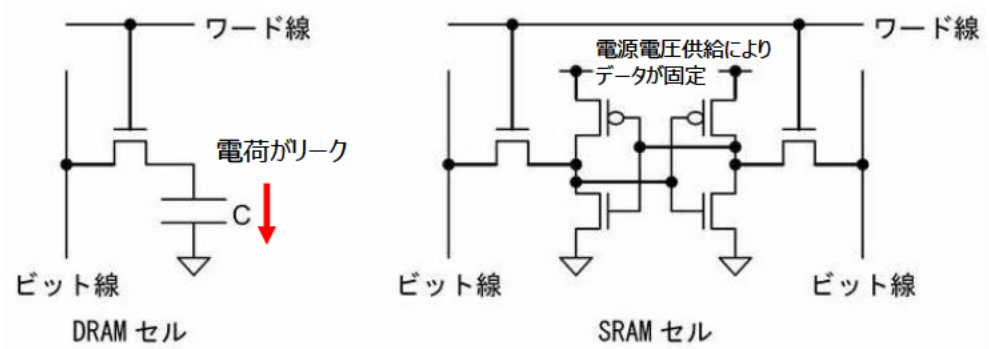
<1>DRAM (Dynamic RAM)

メモリセルが持つ微小なキャパシタの電荷によりデータを記憶する。図7-1-13に示すように、メモリセルは1トランジスタとコンデンサで構成される。情報を保持しているセルは、キャパシタから微小な電荷が短時間にリークしてデータが消失してしまうため、一定時間ごとにリフレッシュ動作と呼ばれるセルに電荷を与える機能が必要である。常にリフレッシュ動作をしていないとデータが保持できないためDynamic RAMと命名されている。

<2>SRAM (Static RAM)

トランジスタのオン、オフによりデータが固定されるスタティックな回路によりデータを記憶する、DRAMのようなリフレッシュが不要である。SRAMは集積回路のキャッシュメモリ等にも使われ、一般に最も高速な記録素子である。しかしながら、図7-1-25に示すとおりフリップフロップ回路を使用する（4~6トランジスタ）ので、回路規模はDRAMより大きい。

図7-1-13　DRAMとSRAMのセルの構成例



DRAM は 1 トランジスタ＋1 コンデンサ、SRAM は 4~6 トランジスタを用いる。

1.対象品目の概要調査（10）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

③記憶素子(2)

【2】不揮発性メモリ：電源を切っても記憶情報が保持される記憶素子である。書き換え可能な不揮発性メモリの多くが、書き換え動作に伴う内部の絶縁層の劣化があるために、書き換え可能回数に上限がある。不揮発性メモリには以下の種類がある。

<1>マスクROM（Mask Read Only Memory）（図7-1-14）

あらかじめデータが集積回路の回路パターンとして作り込まれているROMである。データの読み出しのみ可能で、書き込みはできない。

<2>PROM (Programmable ROM)

通常時はデータを読み出すだけで書き込む事ができないが、特定の手順で書き込みが可能な記録素子である。

<3>EPROM (Erasable Programmable ROM)（図7-1-15）

デバイスの利用者が書き込み・消去可能なROMである。

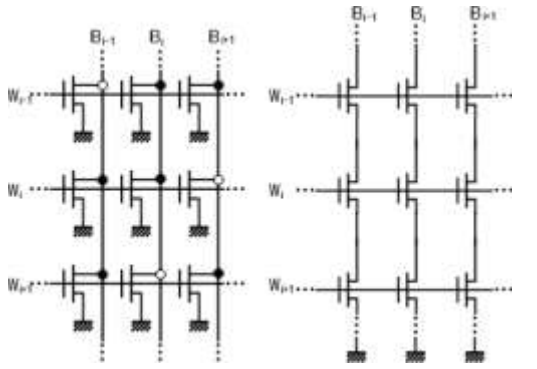
・UV-EPROM (Ultra-Violet Erasable Programmable ROM)

EPROMの一つで、通常のデジタル回路よりも印加する電圧が高い専用機器を使って個々のMOSFETに書き込むことができる。データやプログラムの書き込みを行ったEPROMは、強い紫外線光を照射することでその記憶内容を消去できる。そのため、パッケージ中央上部に石英ガラスの窓があってシリコンチップが見えている。

・EEPROM (Electrically Erasable Programmable ROM)

EPROMの一つで、データを電気的に消去することができる。部分的なデータの書き換えはできないため、全消去の後、新たに書き込む必要がある。また、書き込みの回数に制限がある

図7-1-14　マスクROMのセルの構成例



NOR型マスクROM　　NAND型マスクROM

図7-1-15　UV-EPROM



1.対象品目の概要調査（11）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

③記憶素子(3)

<4>フラッシュメモリ(1)

フラッシュメモリは、浮遊ゲートMOSFETと呼ばれる半導体素子を利用し、浮遊ゲートに電子を蓄えることによってデータ記録を行う不揮発性メモリである。主なフラッシュメモリは、NAND型フラッシュメモリとNOR型フラッシュメモリの2種である。 NOR型フラッシュメモリとNAND型フラッシュメモリの構造比較例を図7-1-16に示す。

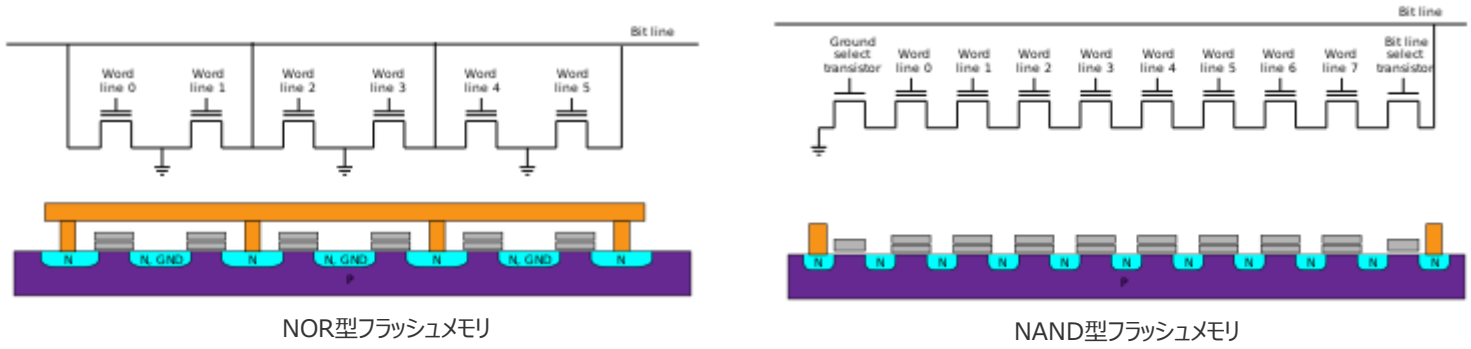
①NOR型フラッシュメモリ

データの読み出しにおいて、RAMと同様にアドレス指定によるアクセスができ、コードをRAMにコピーすることなく直接実行することが可能である。データの書き込みについては、一度ブロック単位で消去した後、書き込む。読み出し速度、ランダムアクセスが高速な一方、NAND型に比べ、集積度が劣る、書き込みが遅いなどの欠点がある。全てのセルがビット線とソース線に接続されている。用途として、マイコンをはじめ、高い信頼性が求められるルーター、プリンター、デジタルカメラ、GPS、車載機器、携帯情報機器など、どれもハードディスクが使用できない環境でファームウェアの格納等に使われている。

②NAND型フラッシュメモリ

NOR型フラッシュメモリと比べて回路規模が小さく、安価に大容量化できる。また書き込みや消去も高速であるが、バイト単位の書き替え動作は不得手である。従来のフロッピーディスクに代わるPC用のUSBメモリやソリッドステートドライブ (SSD)、デジタルカメラ用のメモリーカード、携帯音楽プレーヤー、携帯電話などの記憶装置として使用されている。

図7-1-16　NOR型フラッシュメモリとNAND型フラッシュメモリの構造比較例



NOR型フラッシュメモリ　　NAND型フラッシュメモリ

1.対象品目の概要調査（12）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

③記憶素子(4)

<4>フラッシュメモリ(2)

③強誘電体メモリ (Ferroelectric RAM, FeRAM, FRAM)：

強誘電体メモリ とは、強誘電体が持つ印加電圧をゼロにしても分極状態を維持する性質を利用した不揮発性メモリである。強誘電体とは、電圧を加えた時に、分子分極や電子分極のプラスの電気を帯びた部分と、マイナスの電気を帯びた部分に分かれる性質を持つ物質である。印加電圧をゼロにしても、分極したままの状態を保つ誘電体を強誘電体と呼ぶ。書き込み・消去時には、ワード線でセルを選択し、ビット線－プレート線間に電圧を印加し、強誘電体キャパシタを上向きまたは下向きに分極させる。読み出し時は、パルス電圧を印加し、分極反転による電流の有無により、情報が記録されているか否か（1と0）の判定を行う。読み出しにより、分極方向は元の状態に戻らない（破壊読み出し）ため、読み出しのたびにデータの再書き込みが必要となる。MOS（Metal-Oxide-Semiconductor）型トランジスタのゲート絶縁膜を強誘電体にすることで、1個のトランジスタだけでメモリセルを構成することができる。強誘電体ゲート絶縁膜のトランジスタが、セレクタとメモリセルの両方を兼ねる。このようなトランジスタをFeFET（Ferroelectric Field-Effect Transistor）と呼ぶ。酸化ハフニウムシリケートなどをゲート絶縁膜に使う。高密度なメモリを原理的には実現可能であるが、界面酸化膜の劣化が課題である。半導体の製造工程との相性も良く、多値化メモリセルの可能性も有り得る。FeFETもFeRAMのタイプの一つである。

④磁気抵抗メモリ (Magnetoresistive RAM, MRAM)：

磁気抵抗メモリ は、スピンの向きを変えることで情報の書き込みを行うメモリである。強磁性体に挟まれた絶縁体における電流の流れ難さ（電気抵抗）を変えるというものである。原理的には、スピンの向きが変わるだけで材料にダメージがないので、書換え可能回数に制限はない。磁気抵抗メモリには、スピンの向きを変える方法で、電流磁界型磁気抵抗メモリやスピン注入型磁気抵抗メモリ（STT-MRAM:Spin Transfer Torque MRAM）等の異なるタイプが存在する。電流磁界型は、電線に流した電流が発生する磁界で強磁性体のスピンの向きを変える方式である。この方式では記憶素子の微細化に不向きであったため、STT-MRAMが考案された。磁界を使わずにスピンが特定の方向に偏った電子を強磁性体に流し込むことで、強磁性体のスピンの向きを変化させる。また、TMR（Tunnel Magneto Resistance effect）素子の磁化方向をシリコン基板と垂直にすることで、TMR素子の微細化を容易にするとともにMRAMの微細化も容易にしたのが垂直型スピン注入方式（perpendicular STT-MRAM：pSTT-MRAM）である。現在、STT-MRAMといえば、一般にpSTT-MRAMを指す。スイッチング電流（書き込み電流）が小さいということもpSTT-MRAMの優位点である。

1.対象品目の概要調査（13）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

③記憶素子(5)

<4>フラッシュメモリ(3)

⑤PRAM (Phase change RAM)：

PRAMは、相変化材料のアモルファス状態と結晶状態の相変化（構造相転移）に伴って、抵抗値が高い状態から低い状態に変化することを動作原理としている。結晶状態からアモルファス状態にするには、メモリセルに高電圧を印加し、大電流を流すことで発生するジュール熱を利用し急冷することで実現する。相変化材料へ比較的長いパルス電流を流すことで低い抵抗状態に遷移する。
代表的な相変化材料には、カルコゲナイド がある。カルコゲナイド系で代表的な材料はゲルマニウム・アンチモン・テルルGeSbTe（略称はGST）である。カルコゲナイドの中でもGe-Sb-Te（ゲルマニウム・アンチモン・テルル）系列とSb-Te（アンチモン・テルル）にGeやIn（インジウム）あるいはAg（銀）を少量添加する系列などが有望と考えられている。メモリセルは、記憶素子とセル選択スイッチで構成される。記憶素子は、相変化材料を金属の下部ヒーター電極と上部電極で挟み込んだ構造をしている。PRAMでは、データを書き換える（相変化）際の消費電力や抵抗値の熱的安定性が課題と考えられている。

⑥ReRAM (Resistive RAM, RRAM)：

ReRAMとは、電圧印加によって誘起される酸化還元反応を起因とする電気抵抗の変化を動作原理とするメモリである。電圧印加によって引き起こされる大きな電気抵抗を電界誘起巨大抵抗変化（Colossal Electro Resistance：CER）効果と呼ぶ。ReRAMのメモリセルは、金属電極、絶縁体、金属電極（MIM）という3層構造であり、記憶素子に電圧を印加することにより記憶素子の抵抗を変化させて情報を記憶する。導電パスとしてのフィラメントを形成するReRAMにおいて、最初に高電圧を印加してフィラメントを形成することをフォーミング（Forming）という。書き込み・消去は、電圧を印加して抵抗状態を切り替えることで行う。読み出しは、書き込み・消去電圧よりも低い電圧で行う。この電圧印加によって誘起される酸化還元反応に起因するReRAMには、CB-RAMやOxRAMといった種類がある。
CB-RAMは、ECM（ElectroChemical Metallization Memory）と呼ばれることもある。CB-RAMの動作メカニズムは以下のとおりである。CuやAgなどの電気化学的に活性な金属を使った活性電極に正電圧を印加すると、活性電極材料は絶縁体との界面で金属イオンになる。この金属イオン（陽イオン）は不活性電極で還元され析出する。この酸化還元反応及び金属イオンの移動が連続して発生することにより、絶縁体中の金属析出物は成長し、活性電極と不活性電極をつなぐフィラメントが形成される。フィラメントが形成されると、低抵抗状態となる。活性電極に負電圧を印加すると、フィラメントが破壊され、高抵抗となる

1.対象品目の概要調査（14）

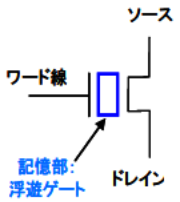
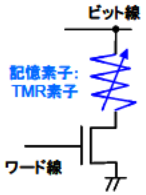
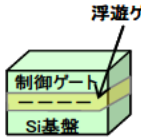
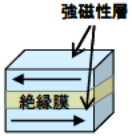
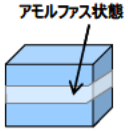
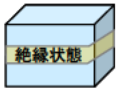
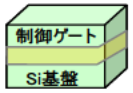
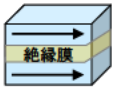
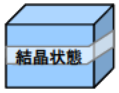
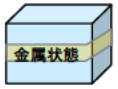
○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

③記憶素子(6)

<4>フラッシュメモリ(4)

各フラッシュメモリの等価回路と記憶素子の状態の一覧表を表7-1-3に示す。

表7-1-3　各フラッシュメモリの等価回路と記憶素子の状態

		NOR型／NAND型	MRAM	PRAM	ReRAM
等価回路					
記憶素子（セル）の状態	1	 電荷あり	 抵抗値大	 抵抗値大	 抵抗値大
	0	 電荷なし	 抵抗値小	 抵抗値小	 抵抗値小

1.対象品目の概要調査（15）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

④アナログデジタル変換器

アナログデジタル変換器は、アナログ電気信号をデジタル電気信号に変換する電子回路である。

サンプリング周波数（サンプリングレート）で一定の時間に入力されるアナログ信号を標本化（数値化）し、それを量子化（デジタル値に変換）する。3bitの逐次比較型のアナログデジタル変換回路を図7-1-17に示す。アナログデジタル変換器は基準電圧を抵抗Rで分圧し、それぞれのコンパレータの基準電圧としている。 このコンパレータの基準電圧とアナログ入力の電圧を比較し、コンパレータの基準電圧より低いと「0」、高いと「1」がエンコーダへ出力される。

アナログ信号(入力)とデジタル信号(出力)の関係を、図7-1-18に示す。3bitのアナログデジタル変換の例である。3bitのアナログデジタル変換では、アナログ信号を7つの量子化ステップで、8つのデジタル信号で表すことができる。デジタル信号の差として判別できるアナログ信号の最小振幅が最小分解能(=1LSB)であり、アナログ信号とデジタル信号の間で生じる誤差を量子化誤差という。

アナログデジタル変換器の方式の種類を表7-1-4に示す。フラッシュ形（並列比較形）、パイプライン形、逐次比較型、デルタシグマ形、二重積分形等がある。方式によりサンプリングレート、分解能、処理速度、精度、消費電力が違い、それらに適した用途に使用されている。

表7-1-4　アナログデジタル変換器の方式の種類

名称	サンプリングレート (Hz)	分解能 (bit)	特徴	用途
フラッシュ形 (並列比較形)	10G～10M	12～6	高速・大規模	高速測定器
パイプライン形	200M～10M	14～8		映像、通信
逐次比較形	1M～10k	16～8	低消費電力	マイコン
デルタシグマ形	10M～100	24～12	高分解能	音声処理、計測、通信
二重積分形	1k～10	22～12	高精度	計測

図7-1-17　逐次比較型アナログデジタル変換器の回路構成例

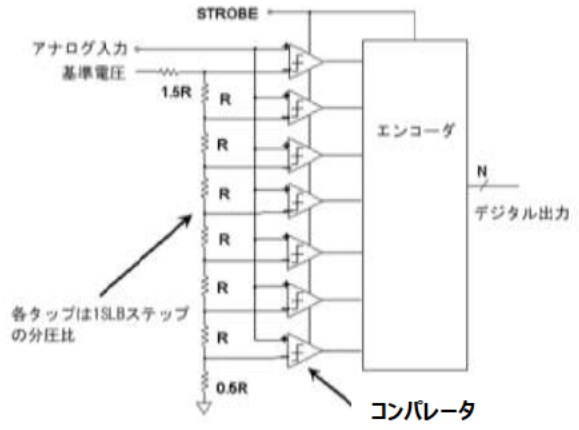
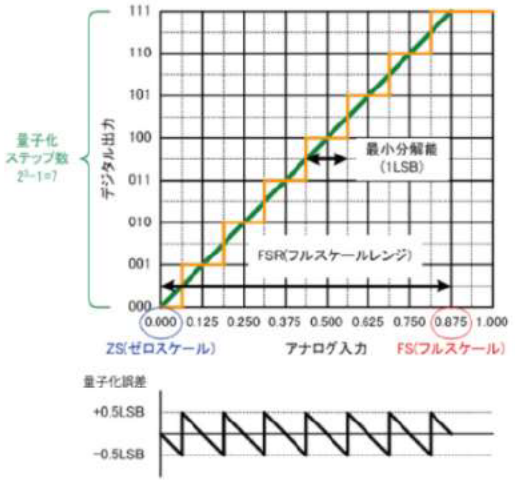


図7-1-18　アナログ信号(入力)とデジタル信号(出力)の関係



1.対象品目の概要調査（16）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

⑤デジタルアナログ変換器

デジタルアナログ変換器は、デジタル電気信号をアナログ電気信号に変換する電子回路である。

プロセッサなどからサンプリング周波数（サンプリングレート）で出力されたデジタル信号を、アナログ信号に変換する。デジタルアナログ変換器のイメージを図7-1-19に示す。

3bitの抵抗ラダー型のデジタルアナログ変換回路の例を図7-1-20に示す。デジタルアナログ変換器は基準電圧（図中*Vref*）を抵抗Rで分圧し、000~111の各デジタルデータの出力電圧としている。デコーダからトランジスタで形成されたスイッチのオン、オフの制御を行い、オンしているトランジスタの各デジタルデータの出力電圧が加算され、出力用のオペアンプに入力される。オペアンプにて所望の出力電圧レベル、インピーダンスに変換され、アナログ信号として出力される。

デジタルアナログ変換器の方式の種類を表7-1-5に示す。抵抗ラダー型、抵抗ストリング型、電流出力型等がある。方式によりサンプリングレート、分解能、処理速度、精度、消費電力が違い、それらに適した用途に使用されている。

図7-1-19　デジタルアナログ変換器のイメージ

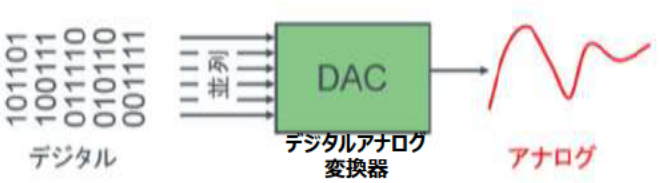


図7-1-20　抵抗ラダー型デジタルアナログ変換回路の例

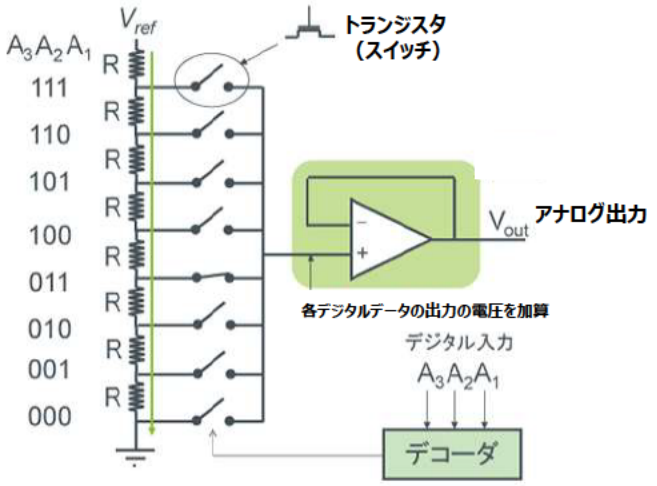


表7-1-5　デジタルアナログ変換器の方式の種類

名称	サンプリングレート (Hz)	分解能 (bit)	特徴	用途
抵抗ラダー型	10M～DC	12～6	小面積、低消費電力	サーボ、電子制御
抵抗ストリング型	1M～DC	12～6	小面積、低消費電力	電子ボリューム、電子制御
電流出力形	1GHz～DC	14～8	高速標本化	映像信号処理、通信
デルタシグマ形	10M～100K (オーバーサンプリング)	24～18	高分解能	音声信号処理、特に音響機器

1.対象品目の概要調査（17）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

⑦信号処理用の電気光学的集積回路又は光集積回路

光集積回路とは、各種の光機能素子を一つの基板上に集積化し、幅広い機能をもたせるようにした光回路である。具体的には、受光素子若しくは発光素子として機能するように設計した部品又は光機能若しくは光と電気の相互変換の機能を果たすように設計した部品を含むものをいう。光の導波機能を利用する半導体レーザー、光導波路、光スイッチ、光変調器、光検出器などの光素子を同一基板上に一体化した集積回路である（図7-1-21）。信号処理用としては、光位相を電気制御する光位相シフタが多数集積されたプログラマブル光回路を用いることで、任意の行列演算が光演算で可能となる。東京大学では、化合物半導体薄膜をシリコン光回路上に貼り合わせたハイブリッド光位相シフタで実証実験が進められている。（図7-1-22）この技術で、大規模で省電力、高速な深層学習アクセラレータが実現できる。

図7-1-21　光集積回路の例

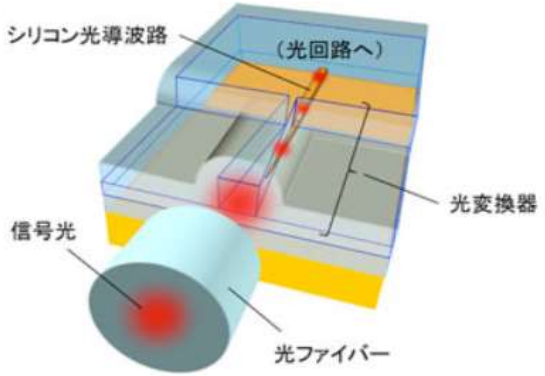
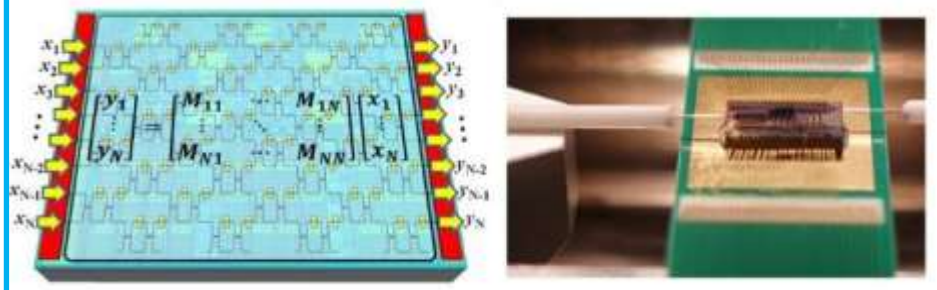


図7-1-22　信号処理用のシリコン光回路上に貼り合わせた
ハイブリッド光位相シフタ



1.対象品目の概要調査（18）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

⑧フィールドプログラマブルロジックデバイス

フィールドプログラマブルロジックデバイス（FPLD:Field Programmable Logic Device)は、FPGA（Field Programmable Gate Array）ともいい、回路の設計情報を外部から送信して書き換えることができるカスタム集積回路である。通常の集積回路は内部の回路構成を製造後に変更することはできないが、フィールドプログラマブルロジックデバイスは製造後も内部の論理回路の構造を再構成できる。

専用集積回路、汎用集積回路、カスタム集積回路のASIC、FPLDの設計、製造プロセスと開発担当を図7-1-23に示す。

図7-1-23　専用集積回路、汎用集積回路、カスタム集積回路のASIC、FPLDの設計、製造プロセスと開発担当



		開発担当	
		顧客	製造者
専用集積回路	ASSP	－	①、②、③、④
汎用集積回路	GPIC	－	①、②、③、④
カスタム集積回路	ASIC	①、（②、③）	（②、③）、④
	FPLD	⑤、⑥	①、②、③、④、（⑤）

顧客が仕様を設計し集積回路を多数製造する場合は、カスタム集積回路のASICのように1個のLSIにまとめて実現することが多い。しかし図7-1-23の①仕様設計、②回路設計/検証と③レイアウト設計で、技術資産（ツール購入、技術者教育）や設備の整備、IPの購入費用はすべて顧客側で行うので高い初期コストが発生する。さらに製造後の修正・改良が不可能なことから、設計時に多くの条件を加味した徹底的な最適化が必要となるため、設計には長期間を要する上、網羅的な検証が必要となり、開発コストを押し上げることになる。

しかし、FPLDの場合、汎用品のプログラマブルロジックデバイス上に回路を何度でも再設定することで再利用や修正が可能であるため、設計・検証コストが低減化されチップ製造を行わない。よって、図7-1-23の⑤、⑥のみの顧客側の負担で済み、開発コストも極めて低く抑えられる。しかし、量産時の単価はASICに比べ高くなる。

このような特徴から、フィールドプログラマブルロジックデバイスは、カスタム集積回路の動作確認のための試作、次世代携帯電話基地局など将来的に仕様の変更が見込まれる製品、規格の策定途中でハードウェア完成後に仕様を変更する必要がある製品、論理設計技術の習得用の実験回路など、試作品、少量生産品から量産品まで幅広く利用されるようになってきている。

1.対象品目の概要調査（19）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

⑨ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークとは、脳の神経回路の一部を模した数理モデルである。（図7-1-24）入力層、出力層、中間層（隠れ層）から構成され、層と層の間には、ニューロン同士のつながりの強さを示す重み付け「W」がある。このニューロンを多数組み合わせる事で複雑な関数近似を行う事ができる。重み付けが変化するとニューラルネットワークの出力も変化し、重みの学習が可能である。ゆえにニューラルネットワークは機械学習のモデルとして利用されている。ニューロンネットワークの構造例を図7-1-25に、ニューラルネットワークのアーキテクチャ例を図7-1-26に示す。

図7-1-24　脳の神経回路の一部を模したニューラルネットワーク

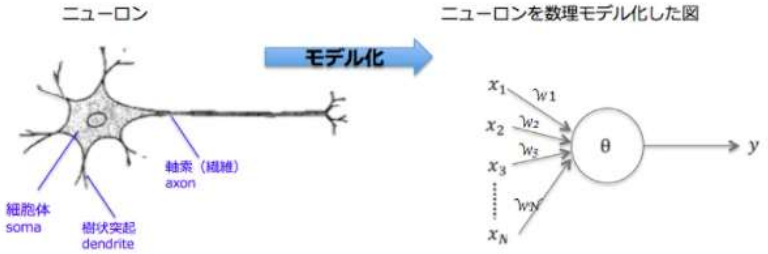


図7-1-25　ニューラルネットワークの構造例

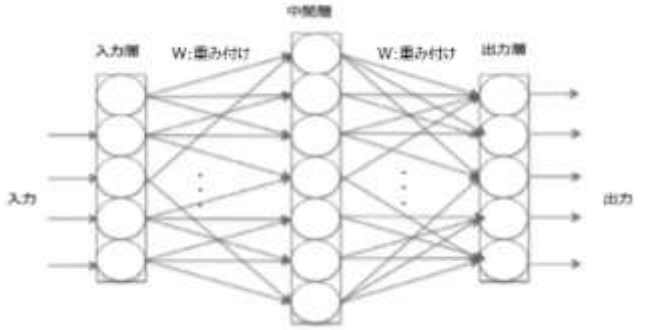
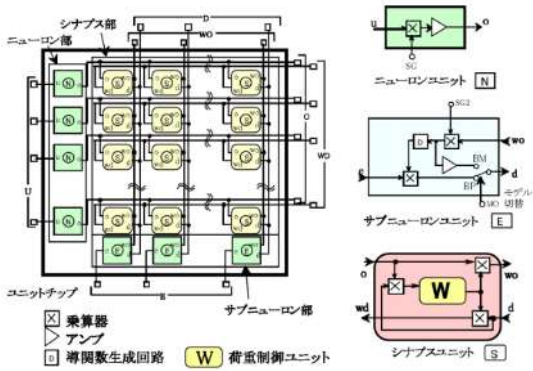


図7-1-26　ニューラルネットワークのアーキテクチャ例



ニューラルネットワークには、以下の3つの代表的な種類がある。

<1>ディープニューラルネットワーク（DNN）

もっとも広く利用されている深層学習モデルで、脳の仕組みを模したニューラルネットワークを多層に重ねたものである。近年、コンピュータの計算処理能力が劇的に向上し、ニューラルネットワークを大規模化したDNNを構築可能になったことで真価を発揮できるようになった。

<2>畳み込みニューラルネットワーク（CNN）

画像認識処理でよく利用される深層学習モデルだが、自然言語処理にも利用され、成果を出しているモデルである。順伝播型ニューラルネットワークである。

<3>再帰型ニューラルネットワーク（RNN）

時系列データを扱うことができるニューラルネットワークである。リカレントニューラルネット、フィードバックニューラルネットとも言われる。文脈を考慮することのできるニューラルネットワークのモデルなので、機械翻訳や音声認識に使われる。近年翻訳の精度が劇的に向上したGoogle翻訳にも採用されている。

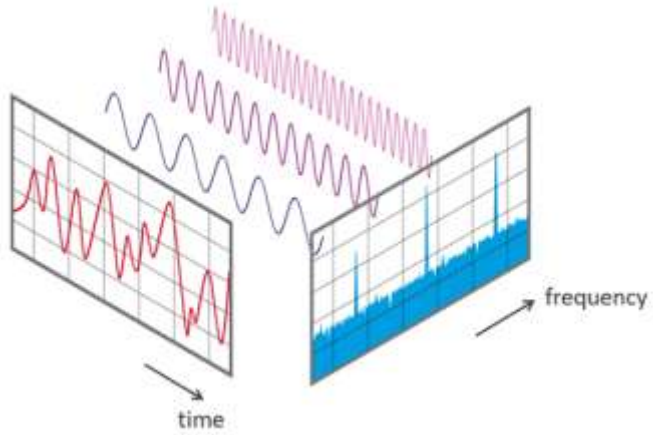
1.対象品目の概要調査（20）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

⑩FFTプロセッサ

FFTプロセッサ（Fast Fourier Transform Processor）は、高速フーリエ変換アルゴリズムを用いて時間領域のデータを周波数領域へ変換する。周波数解析手法として、スペクトル解析に用いられる重要な技術である。テレビや通信機器の電波信号を電気信号へ変換する復調器、あるいは電気信号を電波信号へ変換する変調器や、自動運転や医療用機器の画像処理、電波天文台での観測機器等幅広く世の中に使用されている。FFT変換のイメージを図7-1-27に示す。

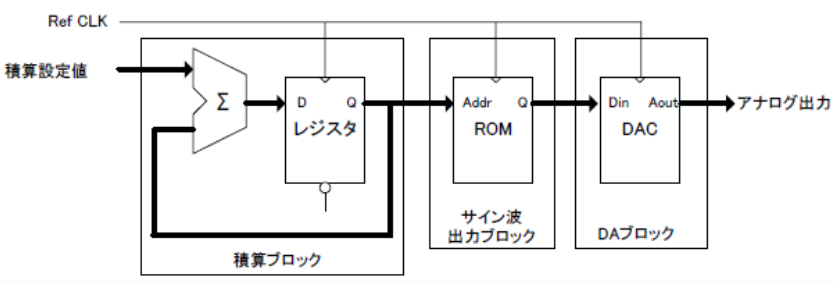
図7-1-27　FFT変換のイメージ



⑪ダイレクトデジタルシンセサイザ

単一で固定の発振源から、任意の波形や周波数をデジタル的に生成するための電子回路である。デジタル信号で周波数または位相をほぼ瞬時に変更できるため、高度なデジタル変調の主要信号源として使用される。高精度リファレンス・クロック、加算器、プログラマブル読出し専用メモリ（PROM）、デジタルアナログ変換器で実現できる。（図7-1-28）広い周波数で安定したアナログ波形が瞬時に得られるので、高性能測定器や周波数カウンタなどに使用する集積回路に内蔵されている。

図7-1-28　ダイレクトデジタルシンセサイザの構成例



1.対象品目の概要調査（21）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

⑫暗号機能を含むIC】(1)

暗号機能は、暗号アルゴリズムを搭載し信号処理をすることにより、データの暗号化を行い、通信情報の機密を守る機能や、送られたデータの送信者が偽者でないことを確認する機能である。集積回路に内蔵することにより、通信機器等で使用されている。現在、IoT機器の普及が進んでおり、ネットワークに接続される機器が増えるにつれ暗号機能を持つ集積回路が重要視されてきている。

暗号化方式には、データの解読不可能化やデータ隠蔽のための一連の技法が含まれる。解読不可能にされたデータは、そのデータを元の形に復元できる人だけが使用することができる。データを権限のない人には理解できないようにする一方で、権限保持者には容易に復号できるようにすることが必要となる。

現代では暗号化の種類として「共通鍵暗号方式」と「公開鍵暗号方式」及びこれらの２つを組み合わせた「ハイブリッド方式」が特に使用されている。

＜1＞共通鍵暗号方式

共通鍵暗号方式とは、暗号化と復号化の両方で同じ鍵を使う暗号化方式のことである。共通鍵暗号方式の特徴は、処理速度が速いことである。しかし、安全性の観点では公開鍵暗号方式に劣る。暗号化に使った鍵を何らかの方法でデータ受信者に渡す必要があるためである。その途中で第三者に鍵を盗まれるおそれがある。また、鍵の管理が煩雑になる。正規のデータ受信者以外に復号されないためには、データをやり取りする相手ごとに異なる鍵を用意しなければない。やり取りする相手が増えるのに伴って、管理すべき鍵が増えることになる。暗号化アルゴリズムとしては「DES」「RC4」「AES」などがある。

①DES（Data Encryption Standard）

56bitの鍵を使った方式である。現在では、この程度の長さの鍵は簡単に解読されるリスクがあるため推奨されていない。

②RC４（Rivest Cipher ４）

40～256bitの鍵を使った方式である。2015年に解読法が公開されたため、現在は推奨されていない。

③AES（Advanced Encryption Standard）

128・192・256bitの鍵を使った方式である。DESに代わる暗号アルゴリズムとして登場し、高い安全性を誇る。SSL通信などに使われている。

1.対象品目の概要調査（22）

○輸出令7項（1）集積回路【機能別の分類】

⑫暗号機能を含むIC(2)

<2>公開鍵暗号方式

公開鍵暗号方式とは、暗号化と復号化で異なる鍵を使う暗号化方式のことである。まず、データ受信者が２つの鍵を作成し、そして暗号用の鍵（公開鍵）だけを一般公開する。公開鍵は、誰もが入手可能である。公開鍵でできるのは暗号化だけであるため、この鍵が第三者の手に渡っても問題はない。データを送信する側は、送りたいデータを公開鍵で暗号化する。そのデータを受け取った受信者は、自身が持っている復号用の秘密鍵でデータを復号できる。公開鍵暗号方式の特徴は、やり取りする相手ごとに異なる鍵を用意する必要がないことである。また、共通鍵暗号方式と異なり復号用の鍵を送信者から受信者に渡す必要がなく、第三者に盗まれるリスクがない。しかし、公開鍵暗号方式は処理速度が遅いという難点もある。暗号化アルゴリズムとしては「RSA」「楕円曲線暗号」などがある。

①RSA（発明者3名の頭文字で命名）

桁数が大きい合成数の素因数分解問題が困難であることを安全性の根拠とした公開鍵暗号である。公開鍵と秘密鍵を使用し秘密鍵は、公開鍵を生成するときに使用した素数と公開鍵として生成した値を使って生成する。

②楕円曲線暗号

楕円曲線暗号は、楕円曲線を利用した暗号アルゴリズムの総称で、多くの場合、公開鍵暗号として利用されている。ビットコインの暗号化方式として採用されていることで知られる。この方式は、楕円曲線上の離散対数問題といわれる数学上の問題を安全性の根拠としている。楕円曲線暗号は、RSAと比較すると短い鍵長でも高い安全性を確保できるとされているため、計算能力の低いコンピューターでも実装できるという特性がある。

<3>ハイブリッド方式

共通鍵暗号方式の場合は、鍵管理に問題があった。一方で、公開鍵暗号方式には、暗号化や復号の処理に時間がかかるという問題がある。ハイブリッド暗号では、時間のかかる暗号化を共通鍵で処理し、共通鍵を相手の公開鍵で暗号化する。こうして、暗号文と暗号化された共通鍵を相手に送信し、暗号通信を実現する。受信者は、自分の秘密鍵で共通鍵を復号し、得られた共通鍵で暗号文を復号すればよい。ハイブリッド暗号は、メールを暗号化するS/MIMEなどで実装されている暗号方式である。

1.対象品目の概要調査（23）

○輸出令7項（1）集積回路

（３）製造要領の分類

集積回路には専用、汎用、カスタムの製造要領の分類がある。

①専用集積回路 ASSP（Application Specific Standard Product）

特定の用途や機能のために半導体メーカーが独自に開発し、様々な顧客に完成品（既成品）として製造、提供する半導体である。半導体メーカが主体となって設計・開発し、通信・AV・OAなどの各応用商品に特化した標準ICとして、複数ユーザを対象として販売する。例としてQualcomm社（米国）のスマートフォン用5G対応プラットフォームチップを図7-1-29に示す。

②汎用集積回路 GPIC（General Purpose Integrated Circuit）

特に用途を限定せず汎用的に使用が可能である半導体である。ロジックIC、メモリ、マイコンなどである。例として汎用ロジックICとメモリの外観を図7-1-30に示す。

③カスタム集積回路

顧客の要望に応じカスタムメイドで製造される半導体である。

ASICとFPGAの2種類がある。

・ASIC（Application Specific Integrated Circuit）

メーカーが自社の機器に搭載するために自社で、あるいは半導体メーカーなどに依頼して、特別に設計するオリジナルの半導体である。機器メーカにとって開発費は高いが、量産数量が多いと下のFPGAよりも半導体の単価は低くなる。量産数量の多いデジタルムービー/カメラやプリンタ、FAX、コピーが可能な複合機等に使用されている。

・FPGA（Field Programmable Gate Array）

購入者や設計者が構成を設定できる集積回路である。購入後に回路を設計し半導体に書き込むことができる。上のASICに対し開発費は低く抑えることができるが、半導体の単価が高くなることがデメリットである。量産数量が少ないCT、MRI、超音波等の医療機器、宇宙関連機器、軍事関連等で使用されている

これらのメリットとデメリット比較を表7-1-6に示す。

図7-1-29　Qualcomm社（米国）のスマートフォン用5G対応プラットフォームチップ



図7-1-30　汎用ロジックICとメモリの外観



汎用ロジックIC



メモリ

表7-1-6　用途別集積回路の比較

用途別集積回路の分類		メリット	デメリット
専用集積回路	ASSP	・半導体メーカーの自主開発であるためハードウエアの開発コストが不要	・半導体メーカーの自主開発のため、製品の差別化しにくい ・ASSP半導体メーカ依存の危険性（入手性、機能セット、スケジュール）
汎用集積回路	GPIC	・標準品であるため開発コストが不要 ・複数の半導体メーカーが供給可能	・標準規格外での使用は不可
カスタム集積回路	ASIC	・カスタム品（最も自由度が高い） ・チップ単価が低い ・性能、消費電力を最適化しやすい	・開発コストが大きい（マスク、開発ツール、IPライセンス） ・開発期間（Time to market）が長い ・開発リスク（仕様変更、設計ミス）
	FPGA	・カスタム品 開発コストが低い ・開発期間（Time to market）を短縮 ・開発リスクが低い（プログラマブル）	・単価、性能、消費電力がトレードオフ

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（１）

○輸出令7項（1）集積回路

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(1)	6	1	一	集積回路（モノリシック集積回路、ハイブリッド集積回路、マルチチップ集積回路、膜形集積回路（シリコンオンサファイア集積回路を含む。）、光集積回路、三次元集積回路及びモノリシックマイクロ波集積回路を含む。）であって、次のいずれかに該当するもの イ　次のいずれかの放射線照射に耐えられるように設計したもの （一）　全吸収線量がシリコン換算で5,000グレイ以上のもの （二）　吸収線量がシリコン換算で1秒間に5,000,000グレイ以上のもの （三）　1メガ電子ボルト相当の中性子束（積算値）が1平方センチメートルあたり50兆個以上をなるもの（MIS型のものを除く。）	・全吸収線量がシリコン換算で5,000グレイ以上 ・吸収線量がシリコン換算で1秒間に5,000,000グレイ以上 ・1メガ電子ボルト相当の中性子束（積算値）が1平方センチメートルあたり50兆個以上

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A1	a	1	General purpose integrated circuits, as follows: Note Integrated circuits include the following types: - "Monolithic integrated circuits"; - "Hybrid integrated circuits"; - "Multichip integrated circuits"; - "Film type integrated circuits", including silicon-on-sapphire integrated circuits; - "Optical integrated circuits"; - "Three dimensional integrated circuits"; - "Monolithic Microwave Integrated Circuits" ("MMICs"). 1. Integrated circuits designed or rated as radiation hardened to withstand any of the following: a. A total dose of 5 x 10^3 Gy (Si) or higher; b. A dose rate upset of 5 x 106 Gy (Si)/s or higher; or" c. A fluence (integrated flux) of neutrons (1 MeV equivalent) of 5 x 1013 n/cm2 or higher on silicon, or its equivalent for othermaterials;"

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（２）

○輸出令7項（1）集積回路

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(1)	6	1	一ロ	マイクロプロセッサ、マイクロコンピュータ、マイクロコントローラ、化合物半導体を用いた記憶素子用のもの、アナログデジタル変換用のもの、アナログデジタル変換機能を有しデジタル化されたデータを記録し、若しくは処理することができるもの、デジタルアナログ変換用のもの、信号処理用の電気光学的集積回路若しくは光集積回路、フィールドプログラマブルロジックデバイス、カスタム集積回路（ハからチまで若しくはルからワまでのいずれかに該当する貨物であるかどうかの判断をすることができるもの又は輸出令別表第１の５から１５までの項の中欄のいずれかに該当する貨物に使用するように設計したものであるかどうかの判断をすることができるものを除く。以下この条において同じ。）、FFTプロセッサ、スタティック式のラム又は不揮発性メモリーであって、次のいずれかに該当するもの（民生用の自動車又は鉄道車両用に設計した集積回路を除く。） （一）　125度を超える温度で使用することができるように設計したもの （二）　零下55度未満の温度で使用することができるように設計したもの （三）　零下55度以上125度以下のすべての温度範囲で使用することができるように設計したもの	・125度を超える温度で使用することができるように設計したもの ・零下55度未満の温度で使用することができるように設計したもの ・零下55度以上125度以下のすべての温度範囲で使用することができるように設計したもの

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A1	a	1	2. "Microprocessor microcircuits", "microcomputer microcircuits", microcontroller microcircuits, storage integrated circuits manufactured from a compound semiconductor, analogue-to-digital converters, integrated circuits that contain analogue-to-digital converters and store or process the digitized data, digital-to-analogue converters, electrooptical or "optical integrated circuits" designed for "signal processing ", field programmable logic devices, custom integrated circuits for which either the function is unknown or the status of the equipment in which the integrated circuit will be used is unknown, Fast Fourier Transform(FFT) processors, Static Random-Access Memories (SRAMs) or 'nonvolatile memories', having any of the following: Technical Note 'Non-volatile memories ' are memories with data retention over a period of time after a power shutdown Note 3.A.1.a.2. does not apply to integrated circuits designed for civil automobile or railway train applications. a. Rated for operation at an ambient temperature above 398 K (125°C); b. Rated for operation at an ambient temperature below 218 K(-55°C); or c. Rated for operation over the entire ambient temperature range from 218K (-55°C) to 398 K (+125°C);"

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（３）

○輸出令7項（1）集積回路

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(1)	6	1	一ハ	マイクロプロセッサ、マイクロコンピュータ又はマイクロコントローラのうち、化合物半導体を用いたものであって、最大クロック周波数が40メガヘルツを超えるもの （解釈）マイクロコンピュータを除き、デジタルシグナルプロセッサ、デジタルアレイプロセッサ、デジタルコプロセッサ及び複数のチップから構成されたものであって、一緒に動作することによりマイクロプロセッサ機能を与えるように設計したチップセットを含む。	最大クロック周波数が40メガヘルツを超えるもの

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3A1	a 1	3. "Microprocessor microcircuits", "microcomputer microcircuits" and microcontroller microcircuits, manufactured from a compound semiconductor and operating at a clock frequency exceeding 40 MHz; Note:3.A.1.a.3. includes digital signal processors, digital array processors and digital coprocessors.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（４）

○輸出令7項（1）集積回路

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(1)	6	1	一	ホ アナログデジタル変換用のもの又はデジタルアナログ変換用のものであって、次のいずれかに該当するもの(ワに該当するものを除く。) （一） アナログデジタル変換用のものであって、次のいずれかに該当するもの 1 分解能が8ビット以上10ビット未満のものであって、サンプルレートが1.3ギガサンプリング毎秒を超えるもの 2 分解能が10ビット以上12ビット未満のものであって、サンプルレートが600メガサンプリング毎秒を超えるもの 3 分解能が12ビット以上14ビット未満のものであって、サンプルレートが400メガサンプリング毎秒を超えるもの 4 分解能が14ビット以上16ビット未満のものであって、サンプルレートが250メガサンプリング毎秒を超えるもの 5 分解能が16ビット以上のものであって、サンプルレートが65メガサンプリング毎秒を超えるもの	・分解能8ビット以上10ビット未満： サンプルレート1.3ギガサンプリング毎秒を超える ・分解能が10ビット以上12ビット未満： サンプルレート600メガサンプリング毎秒を超える ・ 分解能が12ビット以上14ビット未満： サンプルレート400メガサンプリング毎秒を超える ・分解能が14ビット以上16ビット未満： サンプルレート250メガサンプリング毎秒を超える ・分解能が16ビット以上： サンプルレート65メガサンプリング毎秒を超える

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A1	a	1	5. Analogue-to-Digital Converter (ADC) and Digital-to-Analogue Converter (DAC) integrated circuits, as follows: a. ADCs having any of the following:" 1. A resolution of 8 bit or more, but less than 10 bit, with a "sample rate" greater than 1,3 Giga Samples Per Second (GSPS); 2. A resolution of 10 bit or more, but less than 12 bit, with a "sample rate" greater than 600 Mega Samples Per Second (MSPS); 3. A resolution of 12 bit or more, but less than 14 bit, with a "sample rate" greater than 400 MSPS; 4. A resolution of 14 bit or more, but less than 16 bit, with a "sample rate" greater than 250 MSPS; or 5. A resolution of 16 bit or more with a "sample rate" greater than 65 MSPS;

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
貨物・技術のマトリクス表
（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
PUBLIC DOCUMENTS Volume II
List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（５）

○輸出令7項（1）集積回路

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(1)	6	1	一	ホ アナログデジタル変換用のもの又はデジタルアナログ変換用のものであって、次のいずれかに該当するもの(ワに該当するものを除く。) （二） デジタルアナログ変換用のものであって、次のいずれかに該当するもの" 1 分解能が10ビット以上12ビット未満のものであって、調整された更新速度が3,500メガサンプリング毎秒を超えるもの" 2 分解能が12ビット以上のものであって、次のいずれかに該当するもの 一 調整された更新速度が一、二五〇メガサンプリング毎秒を超え三、五〇〇メガサンプリング毎秒以下のもののうち、次のいずれかに該当するもの イ 一二ビットの分解能で動作する場合のアナログ出力値が、フルスケールのレベルからフルスケールの〇・〇二四パーセント以内のレベルに変化するまでのセトリング時間が九ナノ秒未満のもの ロ 一〇〇メガヘルツのデジタル入力信号でフルスケールを出力する場合又は一〇〇メガヘルツ未満のデジタル入力信号で最も高いフルスケールを出力する場合のスプリアス・フリー・ダイナミック・レンジが六八デシベルを超えるもの ニ 調整された更新速度が三、五〇〇メガサンプリング毎秒を超えるもの	・分解能10ビット以上12ビット未満 更新速度が3,500メガサンプリング毎秒を超える ・分解能12ビット 更新速度が一、二五〇メガサンプリング毎秒を超え三、五〇〇メガサンプリング毎秒以下 ・一二ビットの分解能で動作する場合のアナログ出力値が、フルスケールのレベルからフルスケールの〇・〇二四パーセント以内のレベルに変化するまでのセトリング時間が九ナノ秒未満 ・一〇〇メガヘルツのデジタル入力信号でフルスケールを出力する場合又は一〇〇メガヘルツ未満のデジタル入力信号で最も高いフルスケールを出力する場合のスプリアス・フリー・ダイナミック・レンジが六八デシベルを超える ・更新速度が三、五〇〇メガサンプリング毎秒を超える

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A1	a	1	5. Analogue-to-Digital Converter (ADC) and Digital-to-Analogue Converter (DAC) integrated circuits, as follows: b. Digital-to-Analogue Converters (DAC) having any of the following: 1. A resolution of 10 bit or more but less than 12 bit, with an 'adjusted update rate' exceeding 3 500 MSPS; or 2. A resolution of 12 bit or more and having any of the following: a. An 'adjusted update rate' exceeding 1 250 MSPS but not exceeding 3 500 MSPS, and having any of the following: 1. A settling time less than 9 ns to arrive at or within 0,024% of full scale from a full scale step; or 2. A 'Spurious Free Dynamic Range' (SFDR) greater than 68 dBc (carrier) when synthesising a full scale analogue signal of 100 MHz or the highest full scale analogue signal frequency specified below 100 MHz; or" b. An 'adjusted update rate' exceeding 3 500 MSPS;

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（６）

○輸出令7項（1）集積回路

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(1)	6	1	一	へ　信号処理用の電気光学的集積回路又は光集積回路であって、次の（一）から（三）までのすべてに該当するもの （一）　レーザー発振器を有するもの （二）　受光素子を有するもの （三）　光導波路を有するもの ト フィールドプログラマブルロジックデバイス (コンプレックスプログラマブルロジックデバイス、フィールドプログラマブルゲートアレイ、フィールドプログラマブルロジックアレイ又はフィールドプログラマブル相互接続用集積回路を含む。)であって、次のいずれかに該当するもの(ワに該当するものを除く。) （一）　シングルエンド方式の最大デジタル入出力数が700を超えるもの （二）　シリアルトランシーバーの最大データ速度の総計が１秒当たり500ギガビット以上のもの	ト フィールドプログラマブルロジックデバイス （一）シングルエンド方式の最大デジタル入出力数が700を超えるもの （二）シリアルトランシーバーの最大データ速度の総計が１秒当たり500ギガビット以上のもの

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A1	a	1	6. Electro-optical and "optical integrated circuits", designed for "signal processing" and having all of the following: a. One or more than one internal "laser" diode; b. One or more than one internal light detecting element; and c. Optical waveguides; 7. Field programmable logic devices having any of the following: Note: 3A001.a.7. includes: – Complex Programmable Logic Devices (CPLDs) – Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) – Field Programmable Logic Arrays (FPLAs) – Field Programmable Interconnects (FPICs) N.B. For integrated circuits having field programmable logic devices that are combined with an analogue-to-digital converter, see 3A001.a.14. a. A maximum number of single-ended digital input/outputs of greater than 700; or b. An 'aggregate one-way peak serial transceiver data rate' of 500 Gb/s or greater;

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（７）

○輸出令7項（1）集積回路

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(1)	6	1	一	チ　ニューラルネットワークを用いたもの リ　カスタム集積回路であって、次のいずれかに該当するもの （一）　端子数が1,500を超えるもの （二）　基本ゲート伝搬遅延時間が0.02ナノ秒未満のもの （三）　動作周波数が3ギガヘルツを超えるもの ヌ　化合物半導体を用いたデジタル方式のものであって、次のいずれかに該当するもの（ハ、ホからリまで及びルのいずれかに該当するものを除く。） （一）　等価ゲート数が２入力ゲート換算で3,000を超えるもの （二）　トグル周波数が1.2ギガヘルツを超えるもの ル　ＦＦＴプロセッサであって、高速フーリエ変換のミリ秒で表した定格実行時間が次に掲げる式により算出した値未満のもの （複素点の数）ｌｏｇ２（複素点の数）／20,480	リ　カスタム集積回路であって、次のいずれかに該当するもの （一）端子数が1,500を超えるもの （二）基本ゲート伝搬遅延時間が0.02ナノ秒未満のもの （三）動作周波数が3ギガヘルツを超えるもの ヌ　化合物半導体を用いたデジタル方式のものであって、次のいずれかに該当するもの （一）等価ゲート数が２入力ゲート換算で3,000を超えるもの （二）トグル周波数が1.2ギガヘルツを超えるもの ル　ＦＦＴプロセッサであって、高速フーリエ変換のミリ秒で表した定格実行時間が次に掲げる式により算出した値未満のもの （複素点の数）ｌｏｇ２（複素点の数）／20,480

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3A1	A 1	9. Neural network integrated circuits; 10. Custom integrated circuits for which the function is unknown, or the control status of the equipment in which the integrated circuits will be used is unknown to the manufacturer, having any of the following: a. More than 1,500 terminals; b. A typical "basic gate propagation delay time" of less than 0.02 ns; or c. An operating frequency exceeding 3 GHz; 11. Digital integrated circuits, other than those described in 3A001.a.3. to 3A001.a.10. and 3A001.a.12., based upon any compound semiconductor and having any of the following: a. An equivalent gate count of more than 3,000 (2 input gates); or b. A toggle frequency exceeding 1.2 GHz; 12. Fast Fourier Transform (FFT) processors having a rated execution time for an N-point complex FFT of less than (N log2 N) /20,480 ms, where N is the number of points

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（８）

○輸出令7項（1）集積回路

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(1)	6	1	一	ヲ　ダイレクト・デジタル・シンセサイザ（DDS）集積回路であって、次のいずれかに該当するもの （一）　デジタルアナログ変換クロック周波数が3.5ギガヘルツ以上であって、デジタルアナログ変換分解能が10ビット以上12ビット未満のもの （二）　デジタルアナログ変換クロック周波数が1.25ギガヘルツ以上であって、デジタルアナログ変換分解能が12ビット以上のもの	ヲ　ダイレクト・デジタル・シンセサイザ（DDS）集積回路 （一）デジタルアナログ変換クロック周波数が3.5ギガヘルツ以上であって、デジタルアナログ変換分解能が10ビット以上12ビット未満のもの （二）デジタルアナログ変換クロック周波数が1.25ギガヘルツ以上であって、デジタルアナログ変換分解能が12ビット以上のもの

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3A1	a 13	13. Direct Digital Synthesizer (DDS) integrated circuits having any of the following: a. A Digital-to-Analogue Converter (DAC) clock frequency of 3.5 GHz or more and a DAC resolution of 10 bit or more, but less than 12 bit; or b. A DAC clock frequency of 1.25 GHz or more and a DAC resolution of 12 bit or more;

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（９）

○輸出令7項（1）集積回路

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(1)	6	1	一	ワ 次の(一)及び(二)に該当するもの又はこれを実行するようにプログラムが可能なもの （一） アナログデジタル変換機能を有するものであって、次のいずれかに該当するもの 1 分解能が8ビット以上10ビット未満のものであって、サンプルレートが1.3ギガサンプリング毎秒を超えるもの 2 分解能が10ビット以上12ビット未満のものであって、サンプルレートが1ギガサンプリング毎秒を超えるもの 3 分解能が12ビット以上14ビット未満のものであって、サンプルレートが1ギガサンプリング毎秒を超えるもの 4 分解能が14ビット以上16ビット未満のものであって、サンプルレートが400メガサンプリング毎秒を超えるもの 5 分解能が16ビット以上のものであって、サンプルレートが180メガサンプリング毎秒を超えるもの (二) 次のいずれかに該当するもの 1 デジタル化されたデータを記録するもの 2 デジタル化されたデータを処理するもの	ワ 次の(一)及び(二)に該当するもの又はこれを実行するようにプログラムが可能なもの （一） アナログデジタル変換機能を有するものであって、次のいずれかに該当するもの 1 分解能が8ビット以上10ビット未満のものであって、サンプルレートが1.3ギガサンプリング毎秒を超えるもの 2 分解能が10ビット以上12ビット未満のものであって、サンプルレートが1ギガサンプリング毎秒を超えるもの 3 分解能が12ビット以上14ビット未満のものであって、サンプルレートが1ギガサンプリング毎秒を超えるもの 4 分解能が14ビット以上16ビット未満のものであって、サンプルレートが400メガサンプリング毎秒を超えるもの 5 分解能が16ビット以上のものであって、サンプルレートが180メガサンプリング毎秒を超えるもの

Wassenaar規制番号 3桁	細番	Wassenaar規制文言（全文）
3A1	a 13	14. Integrated circuits that perform or are programmable to perform all of the following: a. Analogue-to-digital conversions meeting any of the following: 1. A resolution of 8 bit or more, but less than 10 bit, with a "sample rate" greater than 1.3 Giga Samples Per Second (GSPS); 2. A resolution of 10 bit or more, but less than 12 bit, with a "sample rate" greater than 1.0 GSPS; 3. A resolution of 12 bit or more, but less than 14 bit, with a "sample rate" greater than 1.0 GSPS; 4. A resolution of 14 bit or more, but less than 16 bit, with a "sample rate" greater than 400 Mega Samples Per Second (MSPS); or 5. A resolution of 16 bit or more with a "sample rate" greater than 180 MSPS; and b. Any of the following: 1. Storage of digitised data; or 2. Processing of digitised data.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（1）集積回路

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

集積回路の用途は、現在社会においてスマートフォンやPC等の情報通信機、自動車の自動運転やEVのパワートレイン等、工場のライン自動化や生産管理、電車や交通、エレベータ等の社会インフラ、テレビや洗濯機や冷蔵庫などの家電、CT･MRI･超音波診断などの医療機器、軍事関連機器や航空機や宇宙機器等幅広くあらゆる機器に使用されている。集積回路を使用する機器の例を図7-1-31に示す。

これらの幅広い用途に使用される集積回路は、用途に対し必要とされる機能や開発費、開発期間、単価などに応じて適材適所で使用され、専用集積回路、汎用集積回路、カスタム集積回路等の種類がある。これらの種類について、次頁で説明をする。

図7-1-31　集積回路を使用する機器の例



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（1）集積回路

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（１）

集積回路は貨物等省令において、「耐放射線照射」「動作温度範囲」で規制されている。また、「マイクロプロセッサ、マイクロコンピュータ又はマイクロコントローラの最大クロック周波数」と「アナログデジタル変換器とデジタルアナログ変換器の更新速度と分解能」で規制されており、これらは集積回路の用途が「精度／速度」で規制されていることと同じである。よって規制がかかっている用途として「放射線」、「動作温度範囲」、「精度／速度」に関して、高い性能が求められる機器を中心に分析する。

（１）放射線

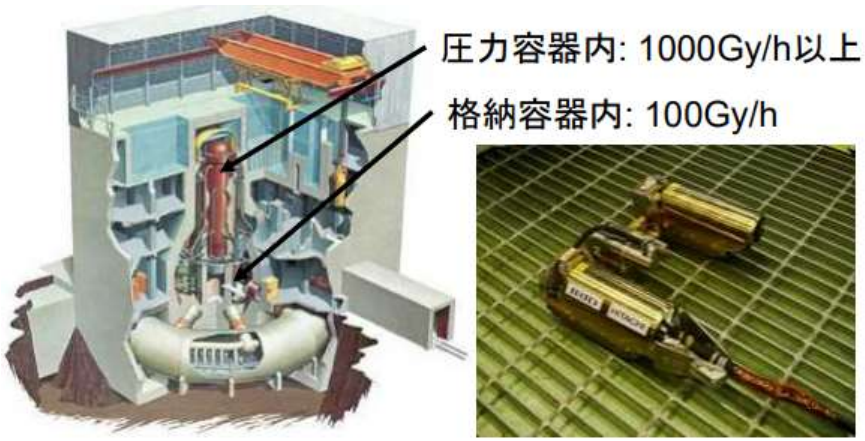
「放射線に耐えることができるように設計したもの」の用途として、主に原子炉、医療機器、宇宙関連機器、軍事関連等が考えられる。この３つについて説明をする。

【原子炉】

原子力圧力容器内等の実環境では、高放射線量、温度、湿度といった複合環境下においての耐性が必要とされている。特に東京電力福島第一原子力発電所の廃炉措置においては高線量環境場での作業が必須で、人間の被ばくを低減するためにもロボット等の使用が避けられなくなっている。福島第一原子力発電所の放射線量と調査装置を図7-1-32に示す。格納容器内では100グレイ/h、圧力容器内では1000グレイ/hの放射線量となり、この放射線に耐性のある放射線調査装置が必要となる。調査用ロボットもこれに準ずる放射線の耐性が必要となる。

格納容器内部調査装置や圧力容器内部調査装置に集積回路は使用されている。

図7-1-32　福島第一原子力発電所原子炉の放射線量と調査装置



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（1）集積回路

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（２）

（１）放射線

【医療機器】

人工/自然放射線量を図7-1-33に示す。人工放射線を扱う医療機器では、放射線量がCT（Computed Tomography）検査で10ミリグレイ前後、心臓カテーテルで1~10グレイ、がん治療で10グレイ以上である。例としてCTの外観と内部構造を図7-1-34に示す。検出器に集積回路が使用されており、放射線量を測定している。このように医療機器では放射線量を測定する部分で集積回路を使用しており、上記の放射線量に繰り返し耐えることができることが必要である。

図7-1-33　人工/自然放射線量

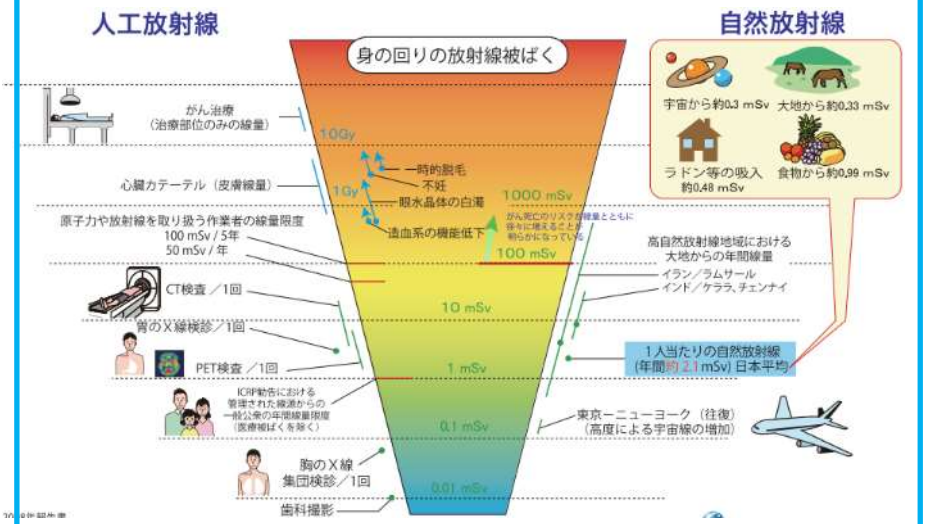


図7-1-34　CTの外観と内部構造



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令7項（1）集積回路

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（３）

（１）放射線

【宇宙関連機器】

宇宙放射線は宇宙環境に存在する電離放射線であり、X線やガンマ線等の電磁波の他、陽子、中性子、電子、アルファ線、重粒子等の粒子線からなっている。図7-1-35で比較すると国際宇宙ステーション内では20.8~41.8マイクロシーベルト/時と、宇宙は地上に比べて200倍以上も放射線量の高い環境である。

宇宙開発事業団H-IIA試験機2号機の実証衛星(MDS-1)の衛星システムを図7-1-36に示す。民生部品の軌道上データ取得を目的とした装置、コンポーネントの宇宙実証を目的とした装置、宇宙環境計測を目的とした装置等で構成され、半導体レコーダ実験装置等これらすべての装置に集積回路が使用され、宇宙の高い放射線量の環境に耐える必要がある。

図7-1-35　空間線量率の比較

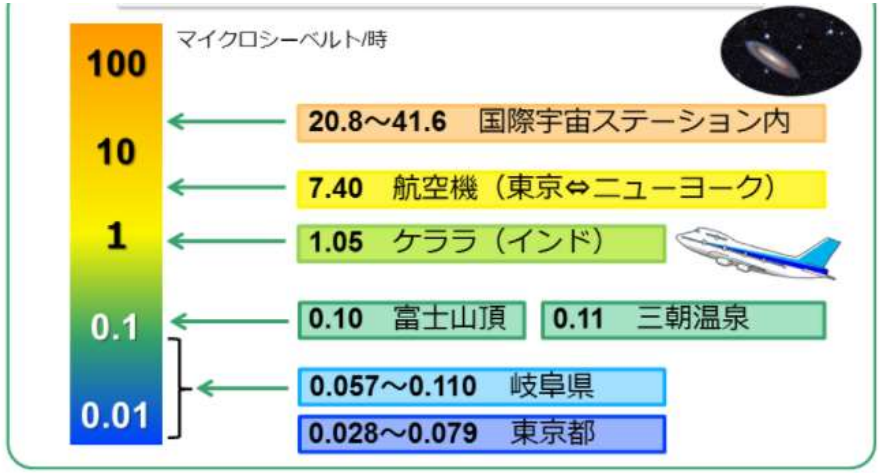
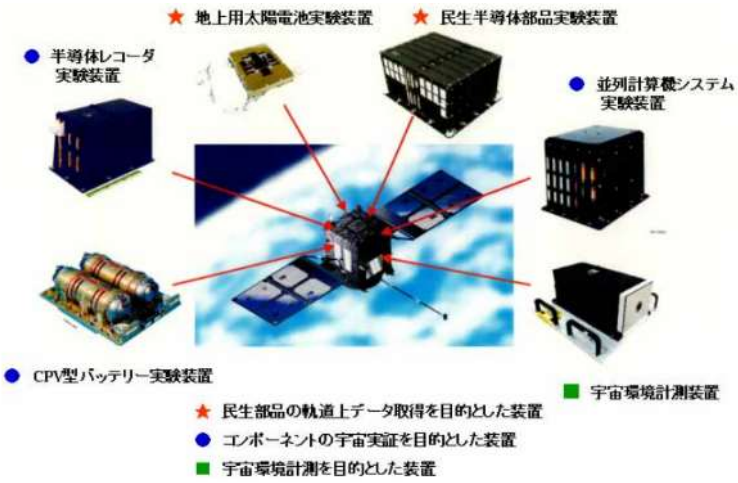


図7-1-36　H-IIA試験機2号機の実証衛星(MDS-1)の衛星システム



3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○輸出令7項（1）集積回路

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（４）

（１）放射線

【軍事関連機器】

核兵器や原子炉事故によるフォールアウト(Fallout：放射性降下物)の状況下やサリンやVXガスなどの有毒･神経ガス等、汚染された地域において活動するための装輪式(タイヤタイプ)装甲車である自衛隊の化学防護車を図7-1-37に示す。放射線検出器を装備しており、そこに集積回路を内蔵している。

また、軍事用と民生用に両方使用できるNorse Asset Solutions社（米国）のUAVであるスカイレンジャーR70を図7-1-38に示す。放射線検出器を装備し、放射線量率測定範囲は 0.001μSv/h～10Sv/hとなっている。この検出器に集積回路が使用されている。

これらで使用されている集積回路はいずれも放射線量の高い環境に耐える必要がある。

図7-1-37　自衛隊の化学防護車



図7-1-38　スカイレンジャーR70



3.品目の主たる用途の調査分析（6）

○輸出令7項（1）集積回路

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（５）
（２）温度

【宇宙関連機器】
　宇宙ステーションでは、地球周辺の軌道を飛行する物体（スペースシャトルや人工衛星など）の表面の温度は、使用している物質の太陽光（赤外線）の吸収の度合いやその表面から熱を放射する度合いによって変わってくるが、陰の部分は約-150℃、反対に日が当たっている部分は+120℃ぐらいにまでなる。宇宙ステーションのラジエータを図7-1-39に示す。宇宙ステーション内部の熱を外部に取り付けられた大型のラジエータから宇宙空間へ放熱している。JAXAの宇宙ステーション船外実験プラットフォームの例を図7-1-40に示す。このプラットフォームでは、宇宙物理学、素粒子物理学の解明のため「CALET（CALorimetric Electron Telescope：高エネルギー電子、ガンマ線観測装置」を搭載している。このCALETに集積回路は多く使用されており、厳しい温度環境に耐える必要がある。

図7-1-39　宇宙ステーションのラジエータ

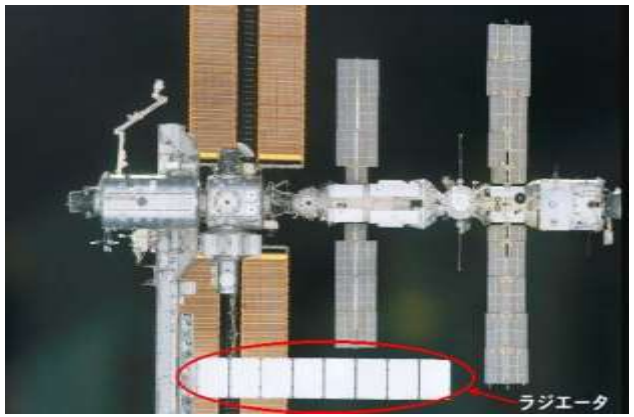


図7-1-40　宇宙ステーション船外実験プラットフォームの例



3.品目の主たる用途の調査分析（7）

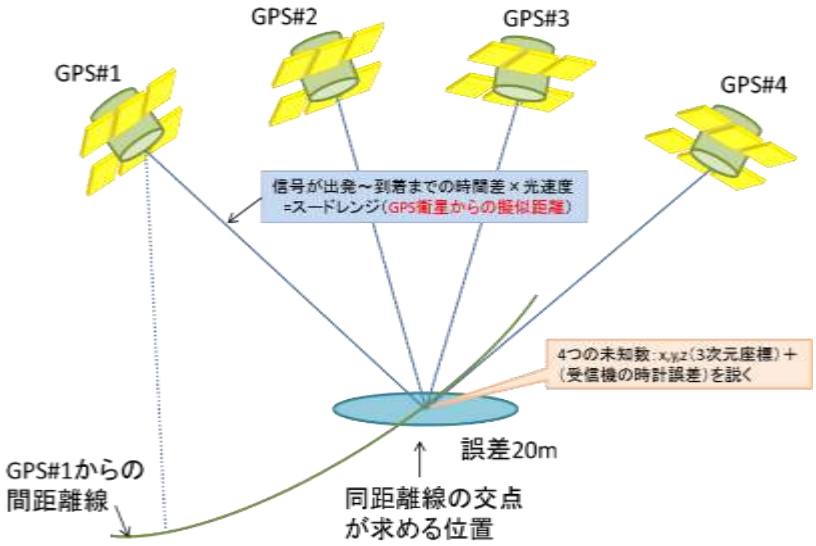
○輸出令7項（1）集積回路

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（６）
（３）精度／速度

【測位衛星システム】

GNSS（Global Navigation Satellite System、全球測位衛星システム）を使用し、正確な位置を把握するシステムは今やナビゲーションシステムとして一般的に普及している。GNSS の一つであるGPS（Global Positioning System)による測位の原理を図7-1-41に示す。軌道情報から位置が分かっている4個の衛星が発信する1,176.45MHzの電波を受信し、発信時間と受信時間の差から4個の衛星からのそれぞれの距離を計算する。受信点の位置（x,y,z）と時間誤差tを未知数として方程式を解き、受信点の座標（x,y,z）を求める。更に精度の良い測位として、複数の受信情報使用する相対測位や、干渉測位がある。民生用のナビゲーションシステムでは誤差20m程度で使用されているが、軍事用途では誤差数cmで精度を増して使用される。これらの位置測位システムは、集積回路が多数使用されており、アナログデジタル変換器、デジタルアナログ変換器や各種プロセッサの精度や高速動作が求められている。

図7-1-41　GPSによる測位（単独測位）の原理



3.品目の主たる用途の調査分析（8）

○輸出令7項（1）集積回路

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（７）

（３）精度／速度

【軍事関連】

防衛省の弾道ミサイル防衛整備構想・運用構想を図7-1-44に示す。イージス艦に搭載された迎撃ミサイルにより弾道ミサイルをミッドコース段階（宇宙空間）で迎撃することを想定している。このシステムに使用される迎撃ミサイルの構造を図7-1-42に示す。キネティック弾頭の軌道姿勢制御装置、誘導部、赤外線シーカ等で集積回路は使用されている。赤外線シーカの回路例を図7-1-43に示す。画像処理部、演算処理部、電源処理部で集積回路が使用されている。実際にはミサイルが発射されて目標物を追随しミサイルを制御するので、搭載されたアナログデジタル変換器、デジタルアナログ変換器や各種プロセッサの精度や高速動作が求められる。

また、図7-1-44のシステムの実現には、レーダーでターゲットを探知、認識、追尾し、これらの情報をイージス艦、自動警戒管制システム、司令官へ通信することを瞬時に行い対応する必要があり、これらすべてのシステムに集積回路の精度と高速化が求められる。

図7-1-42　迎撃ミサイルの構造

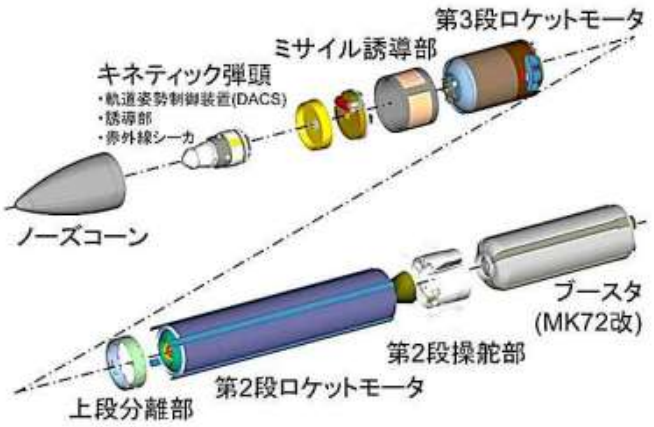


図7-1-43　赤外線シーカの回路例

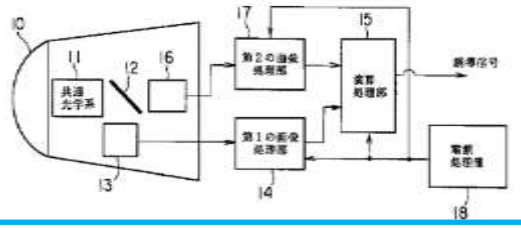
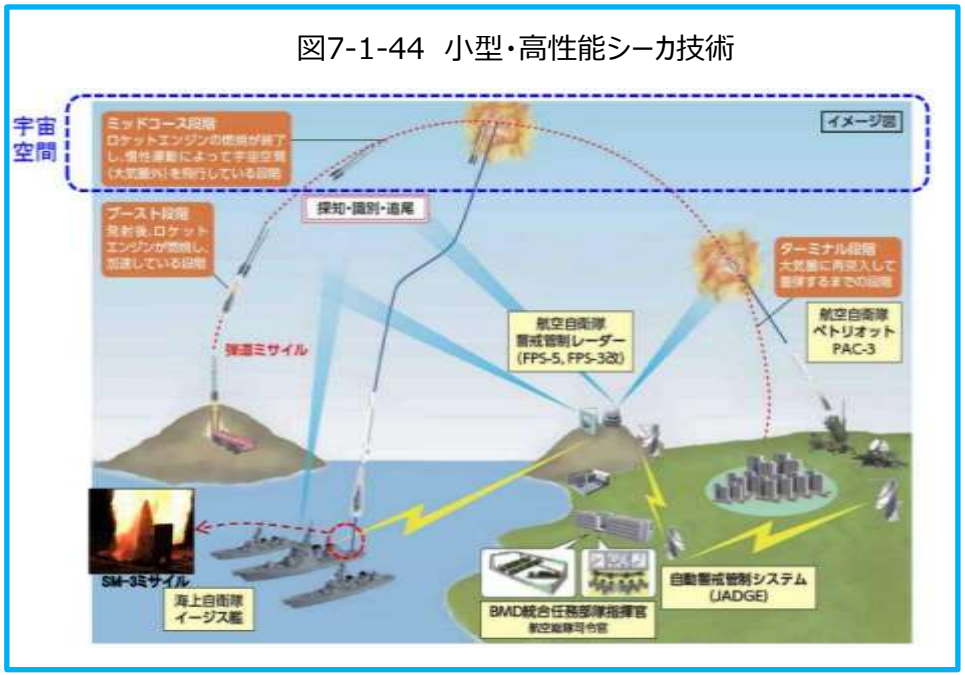


図7-1-44　小型・高性能シーカ技術



3.品目の主たる用途の調査分析（9）

○輸出令7項（1）集積回路

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化（１）

輸出管理品目ガイダンスエレクトロニクス第16版によると、規制の対象となる集積回路は、表7-1-7のように示されている。次頁以降にパラメータで規制されている耐放射性設計、動作温度範囲、マイクロプロセッサ／マイクロコンピュータ／マイクロコントローラ、アナログデジタル変換器／デジタルアナログ変換器を中心に説明する。

表7-1-7　規制の対象となる集積回路

1	耐放射線設計されたもの
2	動作温度範囲がすぐれたもの
3	マイクロプロセッサ／マイクロコンピュータ／マイクロコントローラ
4	アナログデジタル変換器
5	デジタルアナログ変換器
6	アナログデジタル変換機能を有しデジタル化されたデータを記録し、若しくは処理できるもの
7	光IC
8	FPLD（Field Programable Logic Device）
9	ニューラルネットワークIC
10	カスタムIC
11	化合物半導体デジタルIC
12	不揮発性メモリ
13	FFTプロセッサ・ダイレクト・デジタル・シンセサイザ（DDS）IC
14	マイクロ波IC
15	暗号機能を含むIC
16	専用集積回路

3.品目の主たる用途の調査分析（10）

○輸出令7項（1）集積回路

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化（２）

【耐放射線設計された集積回路（１）】

劣悪な放射線環境で集積回路などの半導体デバイスを使用すると、以下の3つの現象が起きる。

・シングルイベント効果

1個の粒子が入射することで高密度の電荷が生成され、半導体素子中を流れることにより過渡電流が流れ、一時的あるいは定常的に、ソフトエラーやハードエラーが引き起こされる。中性子がシリコンにぶつかり核反応を起こしアルファ線が出ることで引き起こされることが多い。

・トータルドーズ効果

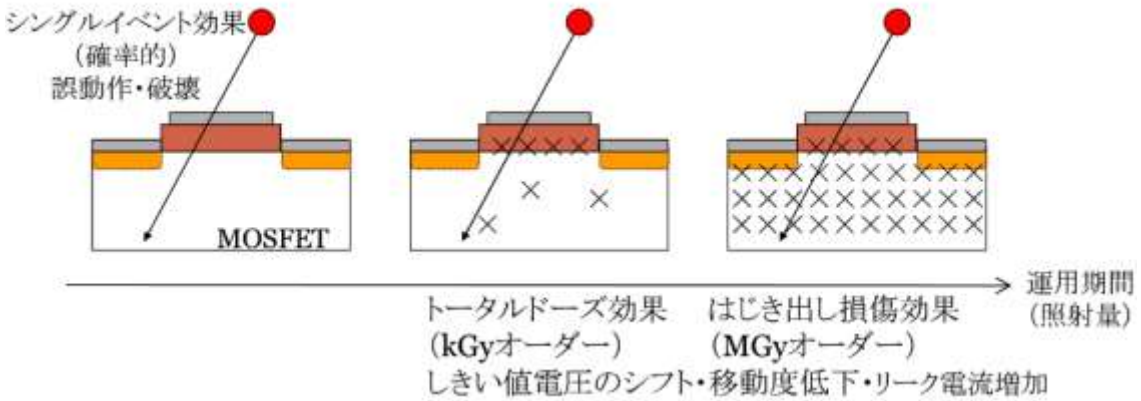
入射した全放射線の累積により材料の劣化が起こる現象である。材料のイオン化に起因する損傷と材料の結晶構造に欠陥が生じ、半導体素子の諸特性を劣化させる。

・はじき出し損傷効果

多量の放射線の入射により、半導体結晶を構成する原子がその定常状態からはじき出され、その原子と空光子点が欠陥準位を形成し、半導体素子の諸特性を劣化させる。

これらの放射線による半導体デバイスの現象を図7-1-45に示す。宇宙開発の黎明期は主としてトータルドーズ効果が課題であったが、近年急速に微細化が進む半導体部品においては、シングルイベント効果が相対的に大きな課題となっている。

図7-1-45　放射線による半導体デバイスの現象



3.品目の主たる用途の調査分析（11）

○輸出令7項（1）集積回路

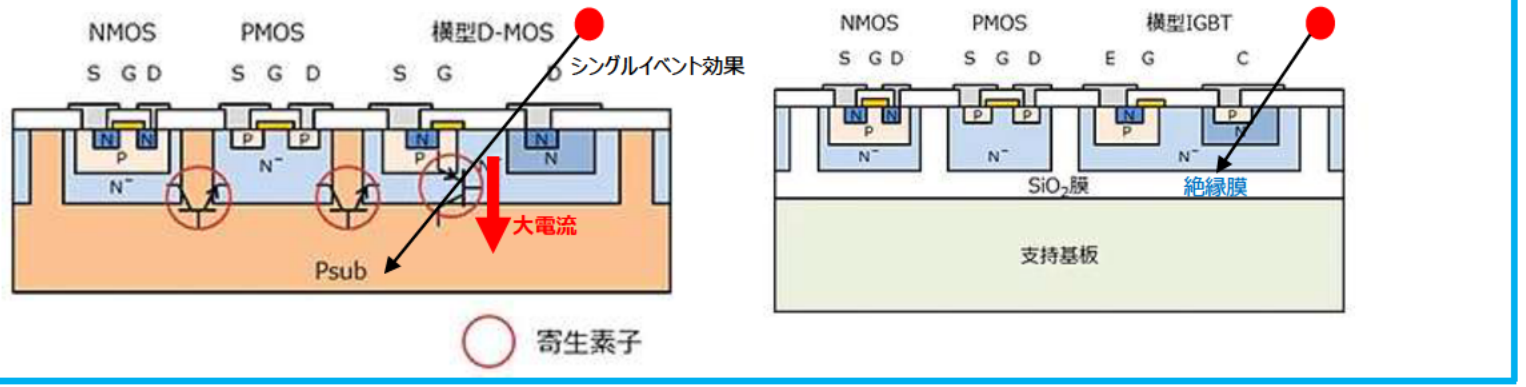
③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化（3）

【耐放射線設計された集積回路（2）】

放射線のシングルイベント効果の対策は、Si活性層と支持基板が絶縁膜（シリコン酸化膜）で分離されたSOI (Silicon On Insulator)デバイスが有効である。集積回路の高速性・低消費電力を向上させる技術である。集積回路上のMOSFET*1は、素子間分離をPN接合の逆バイアスによって形成するが、サブストレート（基板）との間に寄生素子や浮遊容量を生じ、信号の遅延やサブストレートへのリーク電流が発生していた。この浮遊容量と寄生トランジスタの影響を低減するため、MOSFETのチャネルの下に絶縁膜を形成し、寄生素子の影響及び浮遊容量を減らしたものがSOIである。従来のウエハはSOIウエハと区別するためにバルクウエハと呼ばれている。バルク構造とSOI構造の比較イメージを図7-1-46に示す。

寄生素子と浮遊容量はCMOSのMOSFETに対して、スイッチング時の遅延/電流を増加させる要因であるため、寄生素子と浮遊容量の低減は高速度化/低消費電力化の両方の面で有利になる。また、放射線の影響によるシングルイベント効果により集積回路の中に存在する寄生素子のサイリスタ構造の部分に電荷が発生すると、電極間が導通状態になり外部電源を切るまで集積回路に大電流が流れ続け、ついには焼損することがある（ラッチアップ）。SOIでは、絶縁膜により活性層内で発生した電荷のみが回路に吸収され、ラッチアップは起こらない。放射線耐性に優れた構造である。

図7-1-46　MOSFETバルク構造とSOI構造の比較イメージ



MOSFET*1：Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor（金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ）

3.品目の主たる用途の調査分析（12）

○輸出令7項（1）集積回路

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化（４）

【耐放射線設計された集積回路（３）】

中性子の放射線によるトータルドーズ効果、はじき出し損傷効果に対しては、放射線耐性に優れたSiC、GaN、Ga_2O_3、ダイヤモンド、AlN等の 化合物半導体材料の研究開発や製品化が進んでいる。特に、Si基板に代わる材料として、ダイヤモンド基板が注目されている。ダイヤモンドはSiと比べて高耐圧、高移動度など優れた半導体特性を持ち、さらに放射線による欠陥が入りにくく（図7-1-47）、ダイヤモンドはSiの1000倍と高い放射線耐性がある。

また、放射線損傷回復が可能な半導体素子として、CIGS（$CuInGaSe_2$）素子の研究が進んでいる。CCD や CMOS などのシリコン撮像素子は放射線耐性が低く、1kGy 程度の積算線量で画質劣化が生じるとされており、原子炉内 1年間程度の積算線量である7MGyでは使用できない。これに対しCIGS素子は、7MGyの放射線照射後も動作可能で、熱・光照射により、機能が回復する。また宇宙でも劣化を回復させる機構を有する高い放射線耐性は、日本の民生部品・コンポーネント実証衛星MSD1（Mission Demonstration test Satellite-1）“Tsubasa”で実証済である。CIGSとシリコンの放射線耐性比較を太陽電池を例に図7-1-48に示す。

図7-1-47　原子はじき出しエネルギーと逆光子パラメータ

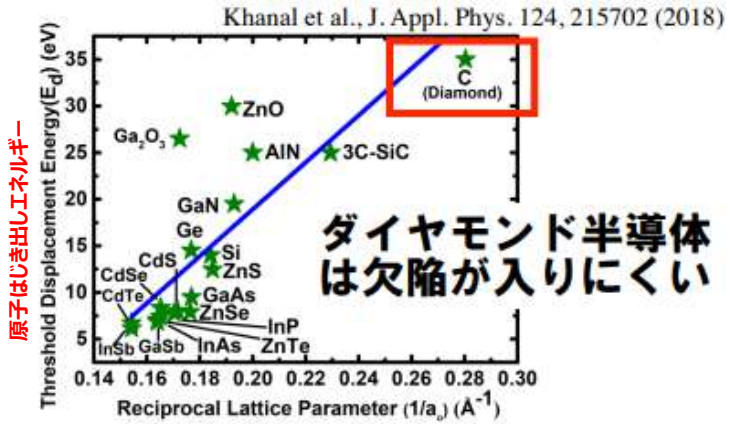
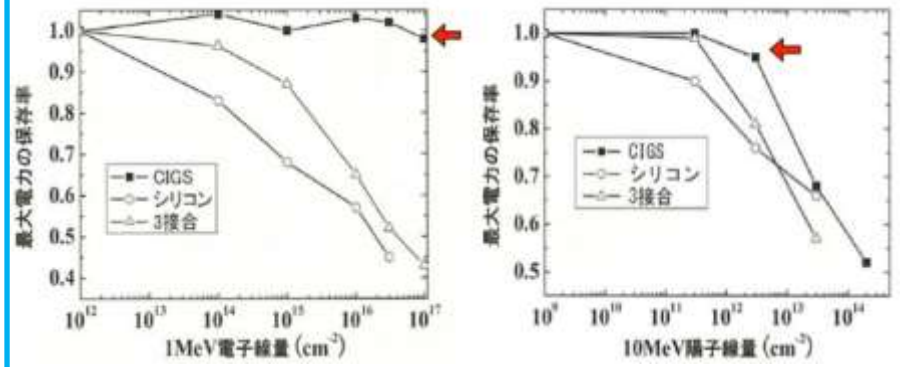


図7-1-48　CIGSとシリコンの放射線耐性比較（太陽電池の場合）



3.品目の主たる用途の調査分析（13）

○輸出令7項（1）集積回路

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化（５）

【動作温度範囲】
アメリカ航空宇宙局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）の「MIL-HDBK-978B-NASA Parts Application Handbook（1988年）」及び「USE OF PLASTIC ENCAPSULATED MICROCIRCUITS (PEMs) IN MILITARY EQUIPMENT（1996年）」によると、プラスティック樹脂で封止された集積回路は、表7-1-8で示された用途別の動作温度範囲によって規定されている。

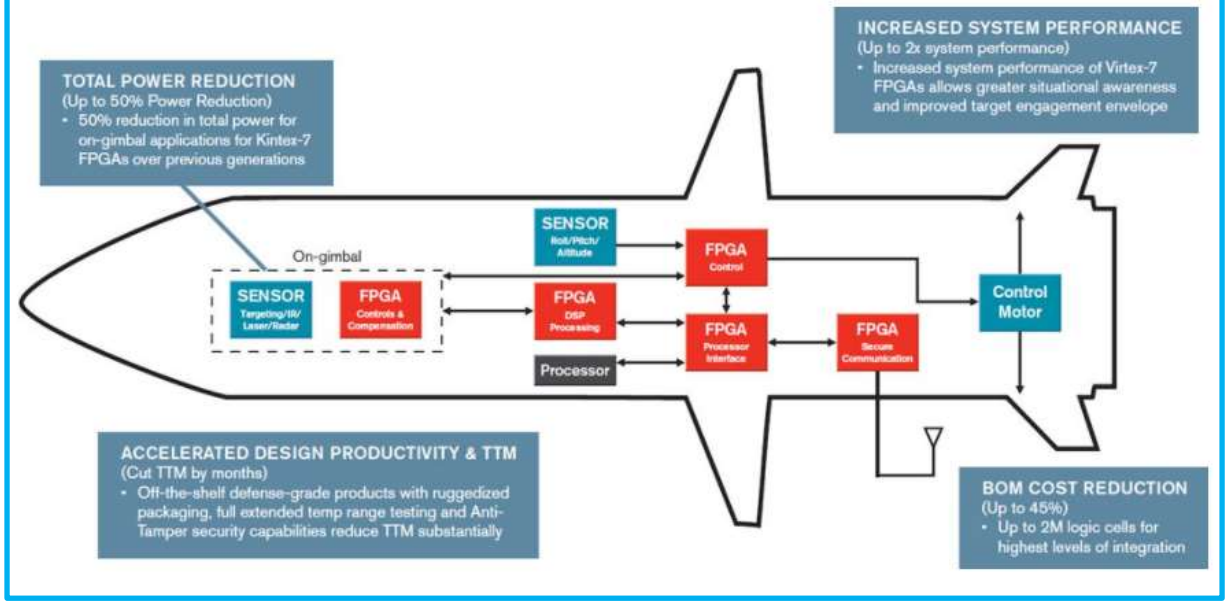
表7-1-8　NASAの用途別動作温度範囲

用途	動作温度範囲
軍事関連用	-55°C ~ +125°C
自動車用グレード１	-40°C ~ +125°C
自動車用グレード2	-40°C ~ +105°C
産業用／自動車用グレード３	-40°C ~ +85°C

XILINX（米国）のミサイル用集積回路構成の例を図7-1-49に示す。レーダーセンサ等のセンサのコントロール、センサ情報の信号処理、ミサイルの姿勢コントロール、セキュアな通信等の軍事関連用途の動作温度範囲（-55℃～+125℃）を満たすFPGAのラインアップを取り揃えている。1Msps *1 /12 ビットのアナログデジタル変換器も内蔵することが可能である。

このように、高温・低温環境下で使用できるようにした集積回路は、極端な温度環境下で使用可能であり、兵器システム、運搬システム、その他多くの軍用電子機器に使用することができる。

図7-1-49　XILINX（米国）のミサイル用集積回路構成の例



1Msps*1：1Megasample(s) per second
1メガサンプル/秒

3.品目の主たる用途の調査分析（14）

○輸出令7項（1）集積回路

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化（６）

【マイクロプロセッサ／マイクロコンピュータ／マイクロコントローラ】

マイクロプロセッサ／マイクロコンピュータ／マイクロコントローラについては、最大クロック周波数で規制がかかっている。マイクロプロセッサのクロック周波数の動向を把握するため、iPhoneシリーズのマイクロプロセッサのCPUクロック周波数の年次推移を表7-1-9に示す。CPUクロック周波数は2007年に対し2021年では約5倍になっていることが分かる。Intel（米国）のマイクロプロセッサもCeleronが1.6GHz、Pentiumが4.0GHz、Core I9が5.0GHzと世代ごとにCPUクロック周波数が上がっている。

表7-1-9　iPhoneシリーズのマイクロプロセッサのCPUクロック周波数の年次推移

	2007年	2010年	2012年	2013年	2014年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
iPhoneシリーズ	iPhone 3G	iPhone 4	iPhone 5	iPhone 5s	iPhone 6	iPhone 7	iPhone 8	iPhone X	iPhone 11	iPhone 12	iPhone 13
マイクロプロセッサ	Samsung S5L8900 ARM 11	Apple A4	Apple A6	Apple A7	Apple A8	Apple A10 Fusion	Apple A11 Bionic	Apple A12 Bionic	Apple A13 Bionic	Apple A14 Bionic	Apple A15 Bionic
CPUクロック周波数（Hz）	666M	0.9G	1.3G	1.3G	1.4G	2.34G	2.39G	2.49G	2.66G	2.99G	3.23G

しかし、貨物等省令では「マイクロプロセッサ、マイクロコンピュータ又はマイクロコントローラのうち、化合物半導体を用いたもの」であり、上記マイクロプロセッサは化合物半導体を使用しておらず、規制対象には入らない。化合物半導体を用いたプロセッサはシリコンより放射線に強く高速で動作が可能なことから、一般的に高速コンピュータ、画像処理、計測用デバイス、マイクロ波IC等に使用されている。

3.品目の主たる用途の調査分析（15）

○輸出令7項（1）集積回路

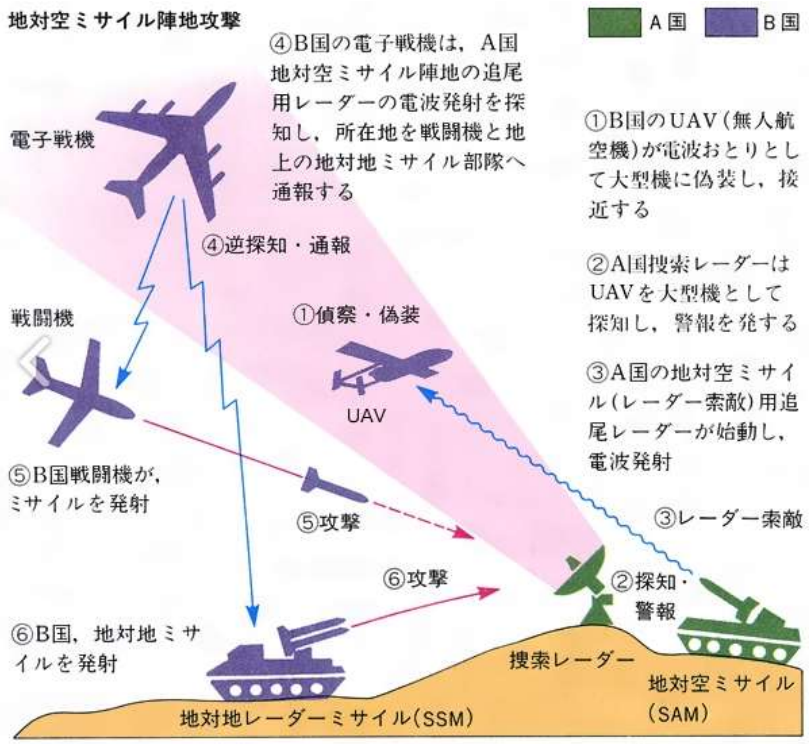
③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化（７）

【信号処理等】

多様な信号処理が必要な電子戦システムの例を図7-1-50に示す。電子戦システムは電波の収集・分析を行うとともに、相手方の通信電子活動を妨害して、作戦を有利に進めるためのシステムである。電子戦システムでは対電子妨害手段(ECCM)、ステルス技術、密連結スマート・センサ・ネットワーク、インテリジェント誘導兵器などを実現するために、継続的に機能を強化されている。

このシステムには、短時間で複数の脅威を迅速に分析し、対応する能力が求められる。高帯域雑音の中で目標とする特徴を見つけるためには、集積回路にて出力周波数チューニング高分解能を実現できるDDS（ダイレクト・デジタル・シンセサイザ）や、高速フーリエ変換 (FFT)、コレスキー分解、行列乗算、ニューラルネットワーク等のAI処理の複雑な処理の実行が必須である。

図7-1-50　電子戦システムの例



3.品目の主たる用途の調査分析（16）

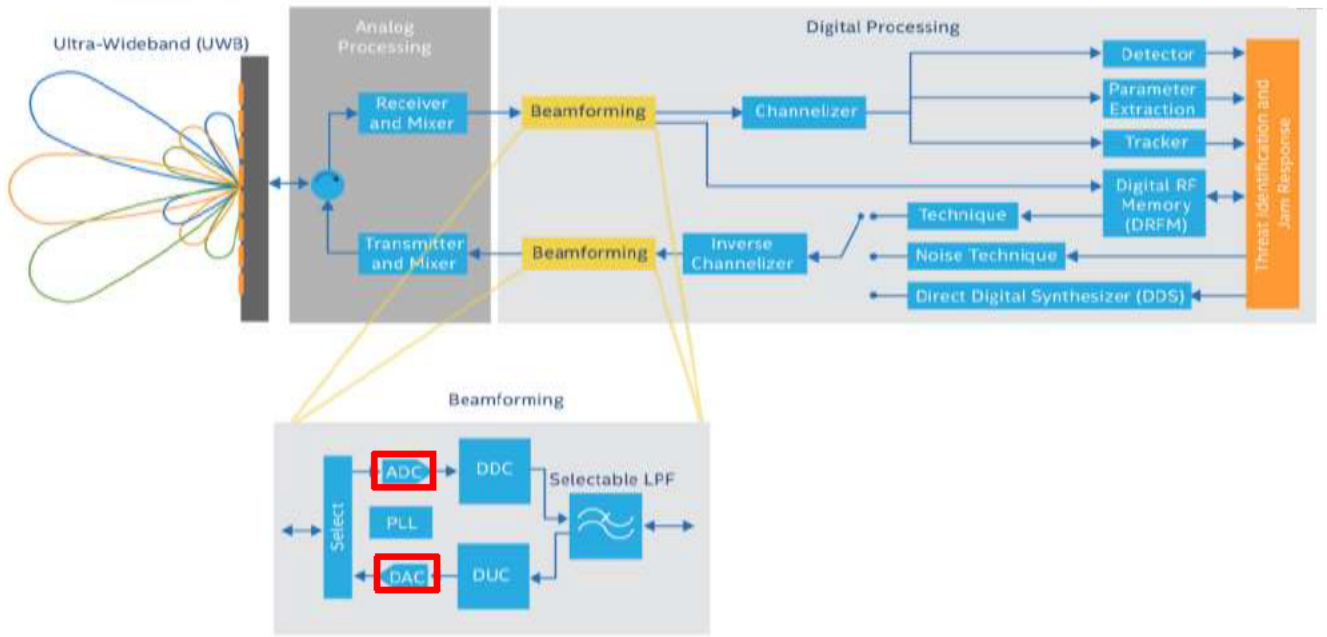
○輸出令7項（1）集積回路

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化（８）

【アナログデジタル変換器／デジタルアナログ変換器】

電子戦システムは、短時間で複数の脅威を迅速に分析し、対応する能力が求められる。具体的には複数のソフトウェア生成波形を送信して偽物目標を与えると同時に、強力な広帯域信号で全体を秘匿することが必要となる。こうした刻一刻と変化する戦術的対応には機動的な高性能処理が必要で、これに対応できる高速なアナログデジタル変換器／デジタルアナログ変換器が必要となる。電子戦に使用される機器の内部構造の例を図7-1-51に示す。アナログデジタル変換器（図中ADC）とデジタルアナログ変換器（図中DAC）は信号のビームフォーミング（電波または音波、超音波を特定の方向に向けて送信、または特定の方向から受信する技術。図中Beamforming）で使用されており、高速に移動する目標物へ追従、対応するため、高速信号処理及び高分解能が求められる。

図7-1-51　電子戦に使用される機器の内部構造の例



4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（１）

【放射線】

イ（一）（二）では、規制パラメータの放射線照射の単位にグレイがに使用されている。

○グレイ（記号:Gy）

単位質量当りの物質が、放射線によって吸収したエネルギーを表す単位である。グレイはジュール／キログラム（J/kg)とも表され、1グレイは物質1kgあたりに1ジュールのエネルギーの放射線を受けたことを示す。この単位はすべての物質、あらゆる放射線に適用される。

デバイスの用途の極限環境におけるトータルドーズ量と温度の関係を図7-1-52に示す。

イ（一）の規制パラメータは、全吸収線量がシリコン換算で5000グレイ以上となっており、原子力関連の集積回路はすべて規制にかかることが分かる。主にガンマ線によるトータルドーズ効果に対する規制パラメータである。

また、イ（二）の規制パラメータでは、吸収線量がシリコン換算で1秒間に5,000,000グレイ以上となっており、短時間での吸収線量を対象としている規制パラメータである。

規制パラメータ　輸出令第7項(1)

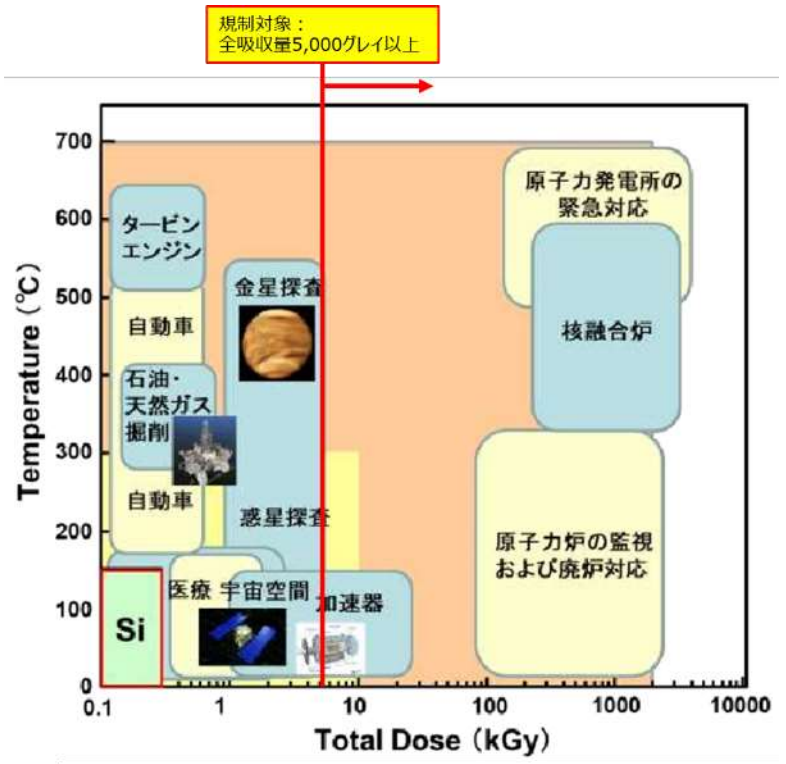
集積回路（モノリシック集積回路、ハイブリッド集積回路、マルチチップ集積回路、膜形集積回路（シリコンオンサファイア集積回路を含む。）、光集積回路、三次元集積回路及びモノリシックマイクロ波集積回路を含む。）であって、次のいずれかに該当するもの

イ　次のいずれかの放射線照射に耐えられるように設計したもの

（一）　全吸収線量がシリコン換算で5,000グレイ以上のもの

（二）　吸収線量がシリコン換算で1秒間に5,000,000グレイ以上のもの

図7-1-52　極限環境におけるトータルドーズ量と温度の関係



4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（2）

規制パラメータ　輸出令第7項(1)
集積回路（モノリシック集積回路、ハイブリッド集積回路、マルチチップ集積回路、膜形集積回路（シリコンオンサファイア集積回路を含む。）、光集積回路、三次元集積回路及びモノリシックマイクロ波集積回路を含む。）であって、次のいずれかに該当するもの
イ　次のいずれかの放射線照射に耐えられるように設計したもの
（三）　1メガ電子ボルト相当の中性子束（積算値）が1平方センチメートルあたり50兆個以上となるもの（MIS型のものを除く。）

【放射線】

イ（三）では、「規制パラメータとして、1メガ電子ボルト相当の中性子束（積算値）が1平方センチメートルあたり50兆個以上となるもの」と定められている。

自由空気中の中性子束が1平方センチメートルあたり1兆個である場合の実行線量を表7-1-10に示す。中性子エネルギーが1MeVの場合、実効線量は282Svとなり、規制パラメータは50兆個以上であるので、

282×50= 14,100Sv以上となる。

中性子の放射線の場合、トータルドーズ効果とはじき出し損傷効果によるソフトエラーが集積回路の微細化に伴い起きやすくなっている。

前述の CIGS （$CuInGaSe_2$）とシリコンの放射線耐性比較（太陽電池の場合）を図7-1-53に示す。1MeVの中性子束50兆個以上でも、CIGSで設計された太陽電池は、最大出力の保存率を維持しており、規制対象となることが分かる。

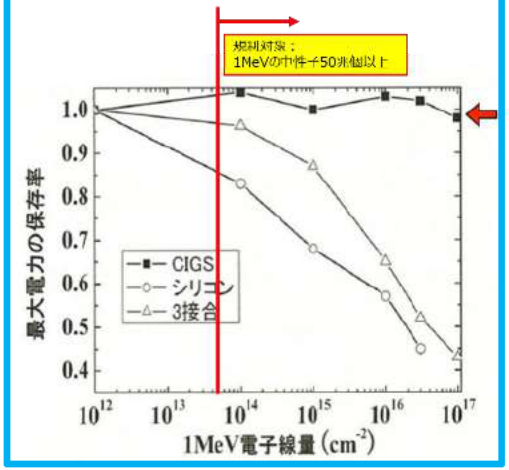
表7-1-10　自由空気中の中性子束が1平方センチメートルあたり１兆個である場合の実行線量

第一欄 中性子のエネルギー (MeV)	第二欄 実効線量 (Sv)	第一欄 中性子のエネルギー (MeV)	第二欄 実効線量 (Sv)
1.0×10^{-9}	5.24	1.5×10^{-1}	80.2
1.0×10^{-8}	6.55	2.0×10^{-1}	99.0
2.5×10^{-8}	7.60	3.0×10^{-1}	133
1.0×10^{-7}	9.95	5.0×10^{-1}	188
2.0×10^{-7}	11.2	7.0×10^{-1}	231
5.0×10^{-7}	12.8	9.0×10^{-1}	267
1.0×10^{-6}	13.8	1.0×10^{0}	282
2.0×10^{-6}	14.5	1.2×10^{0}	310
5.0×10^{-6}	15.0	2.0×10^{0}	383
1.0×10^{-5}	15.1	3.0×10^{0}	422
2.0×10^{-5}	15.1	4.0×10^{0}	458
5.0×10^{-5}	14.8	5.0×10^{0}	474
1.0×10^{-4}	14.6	6.0×10^{0}	483
2.0×10^{-4}	14.4	7.0×10^{0}	490
5.0×10^{-4}	14.2	8.0×10^{0}	494
1.0×10^{-3}	14.2	9.0×10^{0}	497
2.0×10^{-3}	14.4	1.0×10^{1}	499
5.0×10^{-3}	15.7	1.2×10^{1}	499
1.0×10^{-2}	18.3	1.4×10^{1}	496
2.0×10^{-2}	23.8	1.5×10^{1}	494
3.0×10^{-2}	29.0	1.6×10^{1}	491
5.0×10^{-2}	38.5	1.8×10^{1}	486
7.0×10^{-2}	47.2	2.0×10^{1}	480
1.0×10^{-1}	59.8		

（備考：該当値がないときは、補間法によって計算する。）

［出所］ICRP Publication 74
［出典］(社)日本アイソトープ協会：アイソトープ法令集(I)2002年版、丸善 (2003) p.328

図7-1-53　CIGSとシリコンの放射線耐性比較（太陽電池の場合）



4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（3）

【使用温度】

規制パラメータである集積回路の使用温度（設計値）を図7-1-54に示す。125℃を超える温度で動作、-55℃未満で動作、-55℃～125℃で動作するように設計された集積回路が規制対象となっている。

宇宙関連機器や核融合炉関連機器、軍事関連機器は、民生機器や産業機器よりも過酷な温度環境で使用されるため、内蔵されている集積回路にも同様の動作温度範囲が求められる。

アメリカ航空宇宙局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）で示されている用途別動作温度範囲を表7-1-11に示す。（再掲）NASAの軍事関連用の動作温度範囲は、輸出令7（１）ロ（三）の規制パラメータの−55℃~125℃と同じ動作温度範囲である。

規制パラメータ　輸出令第7項(1)

ロ　マイクロプロセッサ、マイクロコンピュータ、マイクロコントローラ、化合物半導体を用いた記憶素子用のもの、アナログデジタル変換用のもの、アナログデジタル変換機能を有しデジタル化されたデータを記録し、若しくは処理することができるもの、デジタルアナログ変換用のもの、信号処理用の電気光学的集積回路若しくは光集積回路、フィールドプログラマブルロジックデバイス、カスタム集積回路FFTプロセッサ、スタティック式のラム又は不揮発性メモリーであって、次のいずれかに該当するもの（民生用の自動車又は鉄道車両用に設計した集積回路を除く。）

（一）　125度を超える温度で使用することができるように設計したもの

（二）　零下55度未満の温度で使用することができるように設計したもの

（三）　零下55度以上125度以下のすべての温度範囲で使用することができるように設計したもの

図7-1-54　集積回路の使用温度（設計値）のパラメータ

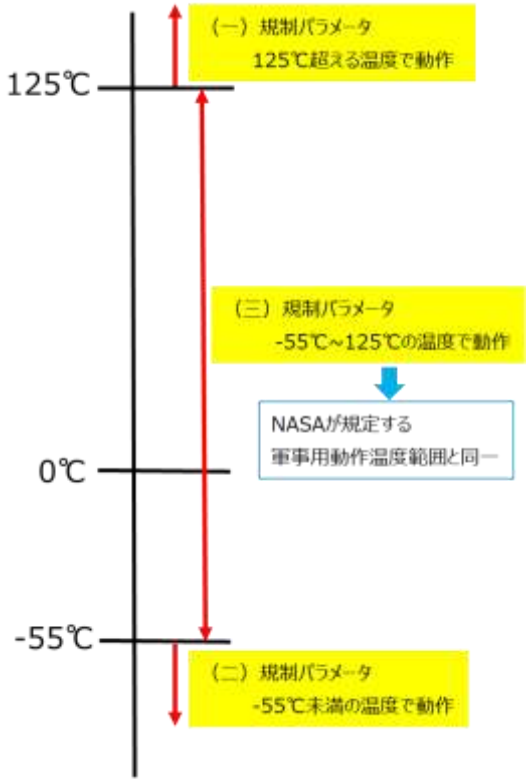


表7-1-11　NASAの用途別動作温度範囲

用途	動作温度範囲
軍事関連用	-55°C ~ +125°C
自動車用グレード１	-40°C ~ +125°C
自動車用グレード2	-40°C ~ +105°C
産業用／自動車用グレード３	-40°C ~ +85°C

4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（4）

規制パラメータ　輸出令第7項(1)
ハ　マイクロプロセッサ、マイクロコンピュータ又はマイクロコントローラのうち、化合物半導体を用いたものであって、最大クロック周波数が40メガヘルツを超えるもの
（解釈）マイクロコンピュータを除き、デジタルシグナルプロセッサ、デジタルアレイプロセッサ、デジタルコプロセッサ及び複数のチップから構成されたものであって、一緒に動作することによりマイクロプロセッサ機能を与えように設計したチップセットを含む。

【化合物半導体】
化合物半導体は、半導体基板の上に能動素子・受動素子を集積でき、マイクロプロセッサ、マイクロコンピュータ又はマイクロコントローラを搭載して高速での動作が可能であるため、マイクロ波又はミリ波の周波数で動作するモノリシックマイクロ波集積回路等で使用されている。また、「3.品目の主たる用途の調査分析」の「③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化（４）」で示したように、放射線に強く高速で動作が可能である。
規制パラメータは化合物半導体で最大クロック周波数が40メガヘルツを超えるものであるが、近年では表7-1-12が示すとおり、前述のSOI技術等により、シリコン半導体でも40メガヘルツを超える耐放射線集積回路が多数製品化されている。

表7-1-12　40メガヘルツを超えるクロック周波数の宇宙・軍事用途の集積回路製品例

企業	製品名（例）	最大クロック周波数
Teledyne e2v Semiconductors（英国）	PC8548E	1.2GHz
Microchip Technology Incorporated（米国）	SAMV71Q21ET	300MHz
Texas Instruments（米国）	5962-9866102VXA	140MHz
VORAGO Technologies（米国）	VA416XX	100MHz
Xilinx（米国）	XQRKU060	1.5GHz

4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（5）

規制パラメータ　輸出令第7項(1)

ホ アナログデジタル変換用のもの又はデジタルアナログ変換用のものであって、次のいずれかに該当するもの(ワに該当するものを除く。)

（一）　アナログデジタル変換用のものであって、次のいずれかに該当するもの

1 分解能が8ビット以上10ビット未満のものであって、サンプルレートが1.3ギガサンプリング毎秒を超えるもの
2 分解能が10ビット以上12ビット未満のものであって、サンプルレートが600メガサンプリング毎秒を超えるもの
3 分解能が12ビット以上14ビット未満のものであって、サンプルレートが400メガサンプリング毎秒を超えるもの
4 分解能が14ビット以上16ビット未満のものであって、サンプルレートが250メガサンプリング毎秒を超えるもの
5 分解能が16ビット以上のものであって、サンプルレートが65メガサンプリング毎秒を超えるもの

【アナログデジタル変換器】

規制パラメータのビット数とサンプルレートの関係を図7-1-55に示す。規制パラメータの（一）の１～５を図中に示した。 ビット数が低いとサンプルレートが高く、またビット数が高いとサンプルレートが低い規制パラメータの設定となっている。

ビット数とサンプルレートの関係に対する用途について図7-1-56に示す。通信測定器やワイヤレス基地局など高周波数を扱う機器は応答性と精度を求められるため、アナログデジタル変換器に高いサンプルレートと高いビット数が求められる。高速通信ネットワーク/デジタルオシロスコープの一部と通信測定器やワイヤレス基地局のアナログデジタル変換器は規制対象となる場合がある。

図7-1-55　規制パラメータのビット数とサンプルレートの関係

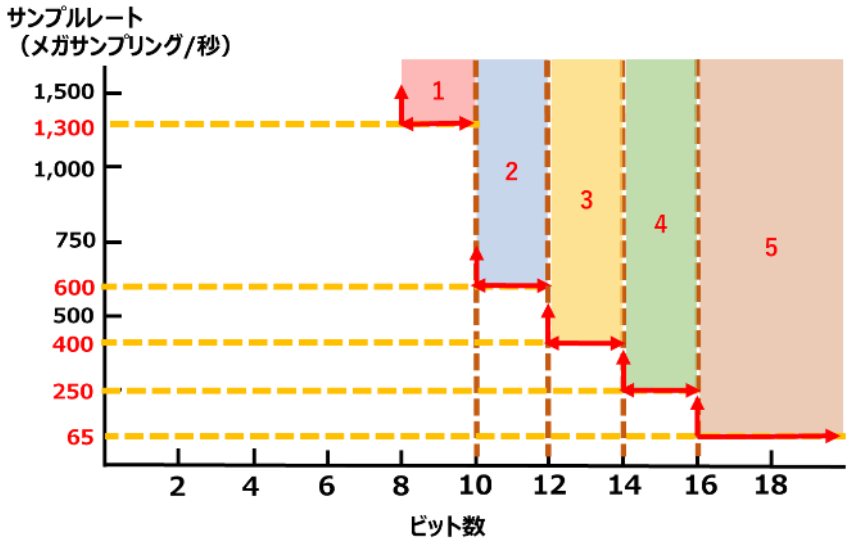
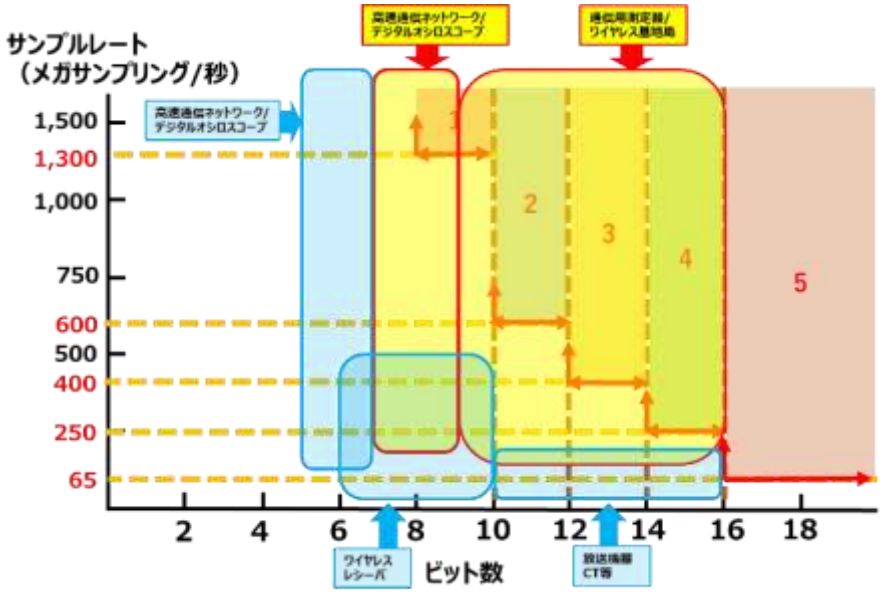


図7-1-56　ビット数とサンプルレートの関係に対する用途



4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（6）

【デジタルアナログ変換器】

規制パラメータのビット数と調整された更新速度の関係を図7-1-57に示す。規制パラメータの ホの(ニ) 1と、2 の一(イ)(ロ)及び二を図中に示した。調整された更新速度とは、デジタル入力信号がアナログ出力信号に変換されるときの速度をいう。調整された更新速度が速ければ、デジタルアナログ変換の速度が速くなり応答性が上がり遅延が小さくなる。規制パラメータでは、ビット数が高く高い分解能で、調整された更新速度が速く応答性が良く遅延が小さいデジタルアナログ変換器を規制している。

2 の一(イ)(ロ)については次頁で説明をする。

規制パラメータ　輸出令第7項(1)

ホ アナログデジタル変換用のもの又はデジタルアナログ変換用のものであって、次のいずれかに該当するもの(ワに該当するものを除く。)

（二）　デジタルアナログ変換用のものであって、次のいずれかに該当するもの"

1 分解能が10ビット以上12ビット未満のものであって、調整された更新速度が3,500メガサンプリング毎秒を超えるもの"

2 分解能が12ビット以上のものであって、次のいずれかに該当するもの

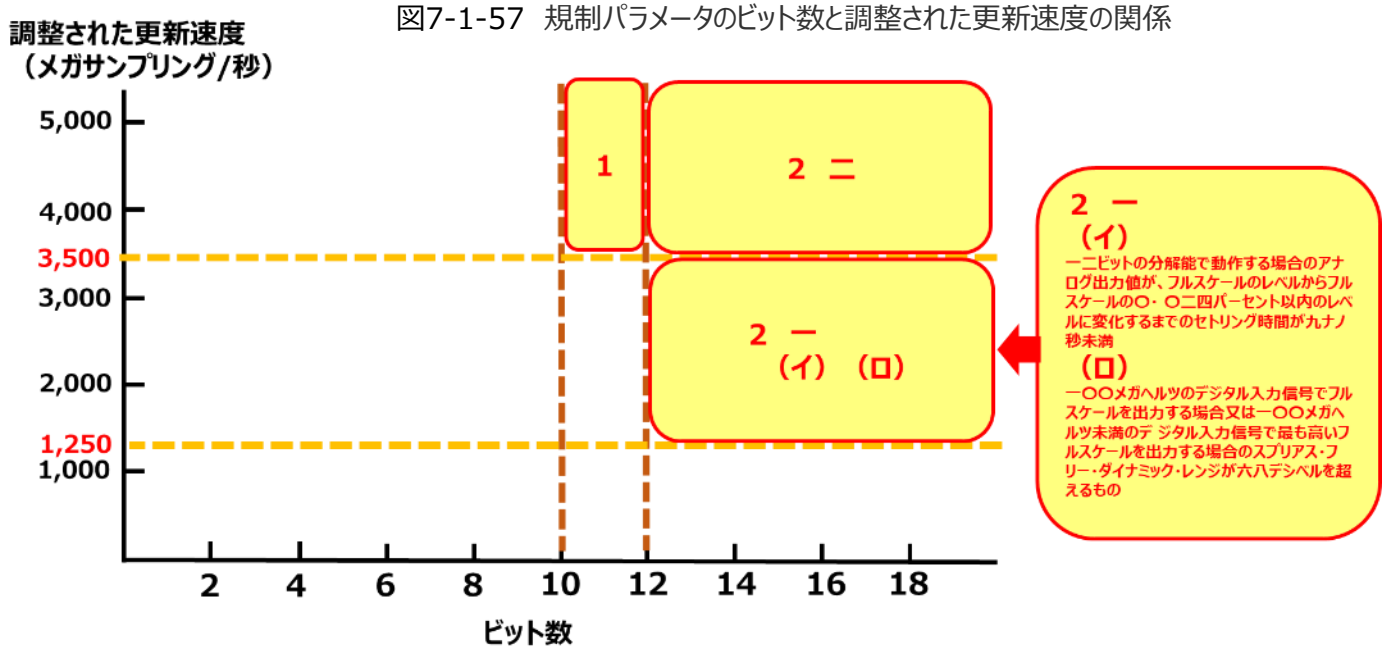
一　調整された更新速度が一、二五〇メガサンプリング毎秒を超え三、五〇〇メガサンプリング毎秒以下のもののうち、次のいずれかに該当するもの

イ　一二ビットの分解能で動作する場合のアナログ出力値が、フルスケールのレベルからフルスケールの〇・〇二四パーセント以内のレベルに変化するまでのセトリング時間が九ナノ秒未満のもの

ロ　一〇〇メガヘルツのデジタル入力信号でフルスケールを出力する場合又は一〇〇メガヘルツ未満のデジタル入力信号で最も高いフルスケールを出力する場合のスプリアス・フリー・ダイナミック・レンジが六八デシベルを超えるもの

二　調整された更新速度が三、五〇〇メガサンプリング毎秒を超えるもの

図7-1-57　規制パラメータのビット数と調整された更新速度の関係



4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（7）

【デジタルデジタル変換器】

2 の一の(イ)では、セトリング時間でパラメータの規制がかかっている。規制パラメータは12bitのデジタルアナログ変換器がフルスケールからフルスケールの0.024%以内のレベルに変化するまでのセトリング時間なので、表7-1-13より±0.5ビット（12bitの1bit分）の幅内に入るまでの時間が理想的な応答から90ns未満であることで規制がかかっていることが分かる。時間とデジタルアナログ変換器の出力の関係における規制パラメータを図7-1-58に示す。

規制パラメータ　輸出令第7項(1)

ホ アナログデジタル変換用のもの又はデジタルアナログ変換用のものであって、次のいずれかに該当するもの(ワに該当するものを除く。)

（二）　デジタルアナログ変換用のものであって、次のいずれかに該当するもの"

1 分解能が10ビット以上12ビット未満のものであって、調整された更新速度が3,500メガサンプリング毎秒を超えるもの"

2 分解能が12ビット以上のものであって、次のいずれかに該当するもの

一　調整された更新速度が一、二五〇メガサンプリング毎秒を超え三、五〇〇メガサンプリング毎秒以下のもののうち、次のいずれかに該当するもの

イ　一二ビットの分解能で動作する場合のアナログ出力値が、フルスケールのレベルからフルスケールの〇・〇二四パーセント以内のレベルに変化するまでのセトリング時間が九ナノ秒未満のもの

ロ　一〇〇メガヘルツのデジタル入力信号でフルスケールを出力する場合又は一〇〇メガヘルツ未満のデジタル入力信号で最も高いフルスケールを出力する場合のスプリアス・フリー・ダイナミック・レンジが六八デシベルを超えるもの

二　調整された更新速度が三、五〇〇メガサンプリング毎秒を超えるもの

図7-1-58　時間とデジタルアナログ変換器の出力の関係

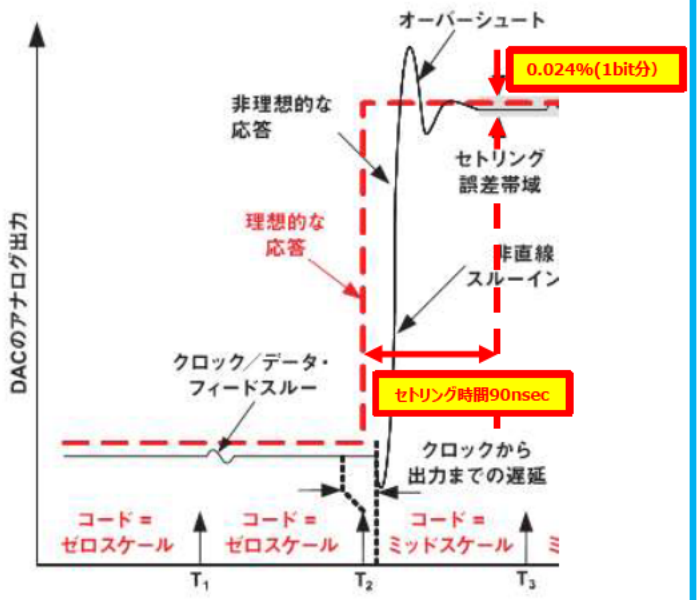


表7-1-13　デジタルアナログ変換器の分解能と量子化の単位（LSB）

分解能（N）	段階（2N）	段階当たりの電圧幅（10VFSの場合）	%FS	dBFS
2ビット	4	2.5V	25	−12
4ビット	16	0.625V（625mV）	6.25	−24
6ビット	64	0.156V（156mV）	1.56	
8ビット	256	0.0391V（39.1mV）	0.39	
10ビット	1,024	0.00977V（9.77mV）	0.098	−60
12ビット	4,096	0.00244V（2.44mV）	0.024	−72
14ビット	16,384	0.000610V（610μV）	0.0061	−84
16ビット	65,536	0.000153V（153μV）	0.0015	−96
18ビット	262,144	0.000038V（38μV）	0.0004	−108
20ビット	1,048,576	0.00000954V（9.54μV）	0.0001	−120
22ビット	4,194,304	0.00000238V（2.38μV）	0.000024	−132
24ビット	16,777,216	0.000000596V（596nV）	0.000006	−144

量子化単位1bit（%）

※FSは、Full Scaleの略です。
※段階は、「2のN乗」で与えられます。
※段階当たりの電圧値は、「FS電圧/段階数」で与えられます。
※%FSは、一段階電圧のFS電圧に対する百分率で、「段階当たりの電圧/FS電圧」で与えられます。
※dBFSは、FS電圧を基準とした段階当たりの電圧のデシベル値で、「20*log10（段階当たりの電圧/FS電圧）」で与えられます。

4.品目の技術動向調査（8）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（8）

【アナログデジタル変換器】

2 の一の(ロ)ではスプリアス・フリー・ダイナミック・レンジ（SFDR：Spurious Free Dynamic Range）についてパラメータで規制がかかっている。

スプリアスとは、電源やグランド及び入力信号から集積回路へ入る周波数成分を有したノイズが、デジタルアナログ変換器のアナログ出力に重畳して現れるノイズ信号成分のことをいう。

スプリアス・フリー・ダイナミック・レンジは、スプリアスの影響を受けないダイナミックレンジである。（図7-1-59）

規制パラメータでは、100MHzのデジタル入力信号の出力又は100MHz未満のデジタル信号で最も高いフルスケール出力で、スプリアス・フリー・ダイナミック・レンジが68dBを超えるもので規制されている。

12bitでは前頁の表7-1-13によると理論値が72dBなので、スプリアスノイズが4dB以下のデジタルアナログ変換器が規制対象となる。

規制パラメータ　輸出令第7項(1)

ホ アナログデジタル変換用のもの又はデジタルアナログ変換用のものであって、次のいずれかに該当するもの(ワに該当するものを除く。)

(二)　デジタルアナログ変換用のものであって、次のいずれかに該当するもの"

1 分解能が10ビット以上12ビット未満のものであって、調整された更新速度が3,500メガサンプリング毎秒を超えるもの"

2 分解能が12ビット以上のものであって、次のいずれかに該当するもの

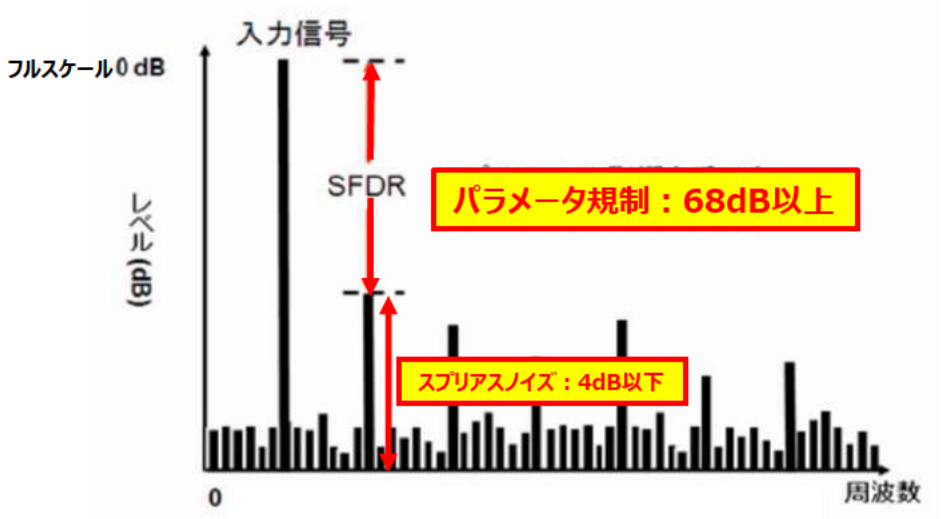
一　調整された更新速度が一、二五〇メガサンプリング毎秒を超え三、五〇〇メガサンプリング毎秒以下のもののうち、次のいずれかに該当するもの

イ　一二ビットの分解能で動作する場合のアナログ出力値が、フルスケールのレベルからフルスケールの〇・〇二四パーセント以内のレベルに変化するまでのセトリング時間が九ナノ秒未満のもの

ロ　一〇〇メガヘルツのデジタル入力信号でフルスケールを出力する場合又は一〇〇メガヘルツ未満のデジタル入力信号で最も高いフルスケールを出力する場合のスプリアス・フリー・ダイナミック・レンジが六八デシベルを超えるもの

二　調整された更新速度が三、五〇〇メガサンプリング毎秒を超えるもの

図7-1-59　スプリアス・フリー・ダイナミック・レンジ（SFDR）



4.品目の技術動向調査（9）

○輸出令7項（1）集積回路

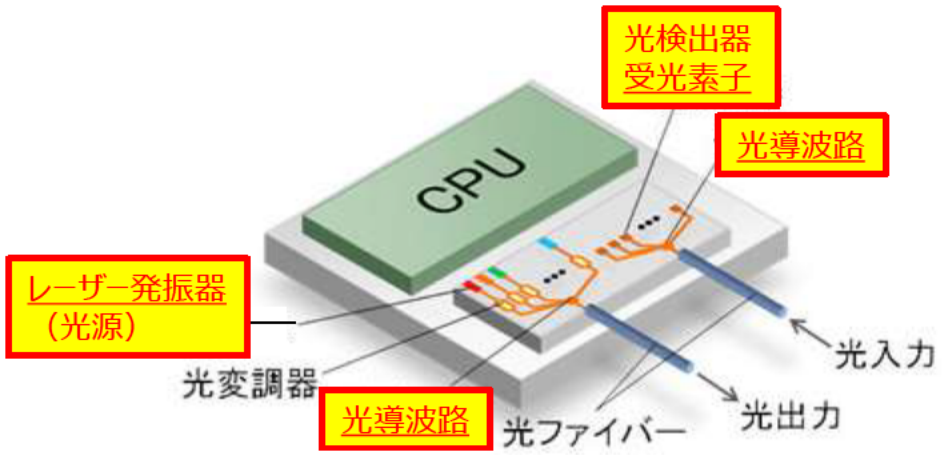
①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（9）

規制パラメータ　輸出令第7項(1)
へ　信号処理用の電気光学的集積回路又は光集積回路であって、次の（一）から（三）までのすべてに該当するもの
（一）　レーザー発振器を有するもの
（二）　受光素子を有するもの
（三）　光導波路を有するもの

【信号処理用の電気光学的集積回路又は光集積回路】

規制対象となる信号処理用の電気光学的集積回路又は光集積回路の例を図7-1-60に示す。
規制対象は、レーザー発振器、受光素子、光導波路のすべてを有する信号処理用の集積回路である。
これらの光集積回路を用いることにより、半導体集積回路より低消費電力で高速な信号処理が可能となる。

図7-1-60　規制対象となる信号処理用の電気光学的集積回路又は光集積回路の例



4.品目の技術動向調査（10）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（10）

規制パラメータ　輸出令第7項(1)
ト フィールドプログラマブルロジックデバイス
(コンプレックスプログラマブルロジックデバイス、フィールドプロ グラマブルゲートアレイ、フィールドプログラマブルロジ ックアレイ又はフィールドプログラマブル相互接続用集積回路を含む。)であって、次のいずれかに該当するもの
(ワに該当するものを除く。)
（一）　シングルエンド方式の最大デジタル入出力数が700を超えるもの
（二）　シリアルトランシーバーの最大データ速度の総計が１秒当たり500ギガビット以上のもの

【フィールドプログラマブルロジックデバイス】

規制はフィールドプログラマブルロジックデバイスとして、コンプレックスプログラマブルロジックデバイス、フィールドプログラマブルゲートアレイ、フィールドプログラマブルロジ ックアレイ又はフィールドプログラマブル相互接続用集積回路も含まれている。これらの名称の定義を表7-1-14に示す。これら用語の使い分けは統一されていない。規制パラメータの（一）及び（二）は次頁に説明する。

表7-1-14　製造後に購入者や設計者が構成を設定できる集積回路の名称

名称	英語名称	内容
プログラマブルロジックデバイス	PLD （Programmable Logic Device）	製造後に購入者や設計者が構成を設定できる小規模な集積回路
コンプレックスプログラマブル ロジックデバイス	CPLD （Complex PLD）	AND-OR構造でできたPLDを拡張した集積回路
フィールドプログラマブル ロジックデバイス	FPLD （Field　Programmable Logic Device）	製造後に購入者や設計者が論理回路を書き込むことのできる 大規模な集積回路
フィールドプログラマブル ゲートアレイ	FPGA （Field　Programmable Gate Array）	製造後に購入者や設計者が論理回路を書き込むことのできる 大規模な集積回路（ゲートアレイ技術を使用）
フィールドプログラマブル ロジ ックアレイ	FPLA （Field　Programmable Logic Array）	製造後に購入者や設計者が論理回路を書き込むことの出来る 大規模な集積回路
フィールドプログラマブル 相互接続用集積回路	-	製造後に購入者や設計者が論理回路を書き込むことのでき、論理 ブロック間を相互接続する再構成可能な配線階層がある集積回路

4.品目の技術動向調査（11）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（11）

規制パラメータ　輸出令第7項(1)
ト　フィールドプログラマブルロジックデバイス
(コンプレックスプログラマブルロジックデバイス、フィールドプロ グラマブルゲートアレイ、フィールドプログラマブルロジ ッ クアレイ又はフィールドプログラマブル相互接続用集積回路を含む。)であって、次のいずれかに該当するもの
(ワに該当するものを除く。)
(一)　シングルエンド方式の最大デジタル入出力数が700を超えるもの
(二)　シリアルトランシーバーの最大データ速度の総計が１秒当たり500ギガビット以上のもの

【フィールドプログラマブルロジックデバイス】

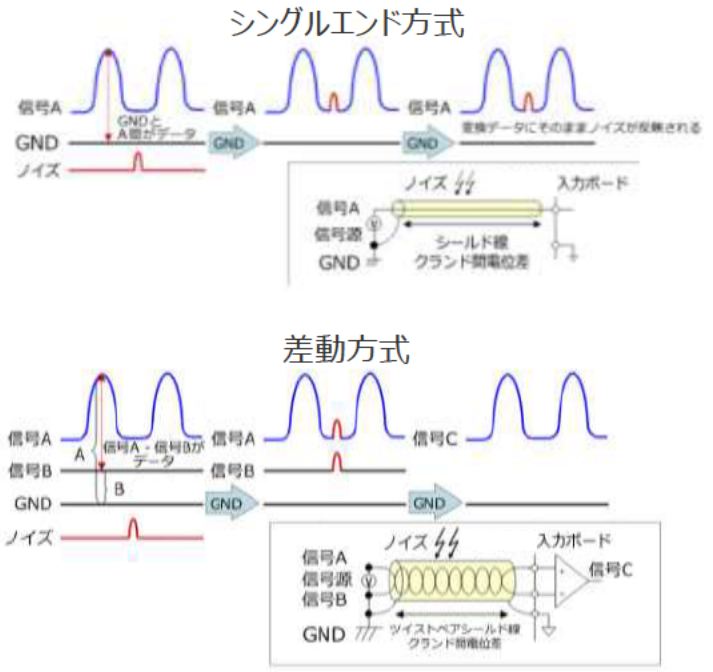
（一）では、シングルエンド方式で規制がかかっている。入出力にはシングルエンド方式と差動方式がある。入力信号におけるシングルエンド方式と差動方式の例を図7-1-61に示す。

シングルエンド方式は、信号線とグランド線の2線で接続して、グランドからの電位差で信号源の電圧を測定する方式である。アナログ入出力やデジタル入出力では最も一般的な方式で、1つの信号源に対して、配線が2線で済むというメリットがある。差動入力と比較して、ノイズの影響を受けやすいというデメリットがある。

差動方式は、2つの信号線とグランド線の合計3線で信号源の電圧を測定する方式である。グランドとA点間の電位とグランドとB点間の電位の差をとって信号源（A－B間）の電位を測定する。そのため、（A-B間）はグランドにのったノイズは相殺され、シングルエンド入力と比較して、ノイズの影響を受けにくいというメリットがある。しかし、1つの信号源に対して、配線が3線必要となるため、シングルエンド入力と比較して、使用できるチャネル数が半分になるといったデメリットもある。

規制パラメータはシングルエンド方式の最大デジタル入出力数が700を超えるものとなっており、購入者や設計者が論理回路を書き込むことが可能で、多数の入力信号の検出や演算等の信号処理を行うことができ、多数の出力信号で機器の制御を行うことができる集積回路に規制がかかっている。

図7-1-61　入力信号におけるシングルエンド方式と差動方式の例



4.品目の技術動向調査（12）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（12）

【フィールドプログラマブルロジックデバイス】

（二）では、シリアルトランシーバーで規制がかかっている。シリアルトランシーバーとは、高速なシリアル・データの送受信を行うための回路のことである。FPGA 上のシリアルトランシーバーの例を図7-1-62に示す。

トランシーバーはアナログ回路を含む専用ブロックなので、FPGAの大部分を占めるロジックファブリックとは別に、通常はデバイスの一番端に配置されている。図7-1-62は、FPGA 上のシリアルトランシーバと、64b/66b コーディングで 10.0Gbps のデータを送受信する場合の各部のクロックレートの例を示したものである。シリアル信号はTX（送信側）とRX（受信側）に直接つながっておりPMA(Physical Medium Attachment) と呼ばれるアンプを含む送受信回路のほかに、シリアルーパラレル変換を行うシリアライザ (送信側)、デシリアライザ (受信側) が搭載されている。PCSには 8b/10b エンコーダ・デコーダや各種のプロトコルの実装オプション機能、さまざまなビット幅のインタフェイスを提供するギアボックスと呼ばれる回路が搭載されている。

規制パラメータは、シリアルトランシーバーの最大データ速度の総計が１秒当たり500ギガビット以上となっている。大容量のデータを高速に多数送受信できるフィールドプログラマブルデバイスに規制がかかっている。

例えばXILINX（米国）のFPGAであるXC7VX690Tは、13.1Gbpsのシリアルトランシーバーを80個持っており、最大データ速度の総計は1秒当たり1048ギガとなり規制にかかっている。XC7VX690Tの外観を図7-1-63に示す。

規制パラメータ　輸出令第7項(1)

ト　フィールドプログラマブルロジックデバイス
(コンプレックスプログラマブルロジックデバイス、フィールドプロ グラマブルゲートアレイ、フィールドプログラマブルロジ ッ クアレイ又はフィールドプログラマブル相互接続用集積回路を含む。)であって、次のいずれかに該当するもの
(ワに該当するものを除く。)
（一）　シングルエンド方式の最大デジタル入出力数が700を超えるもの
（二）　シリアルトランシーバーの最大データ速度の総計が１秒当たり500ギガビット以上のもの

図7-1-62　FPGA 上のシリアルトランシーバの例

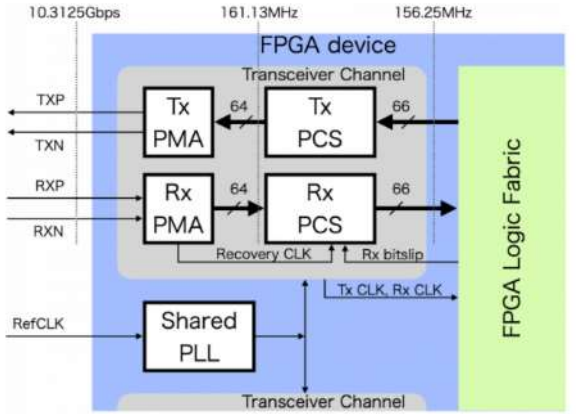


図7-1-63　XC7VX690Tの外観



4.品目の技術動向調査（13）

規制パラメータ　輸出令第7項(1)
チ　ニューラルネットワークを用いたもの

○輸出令7項（1）集積回路

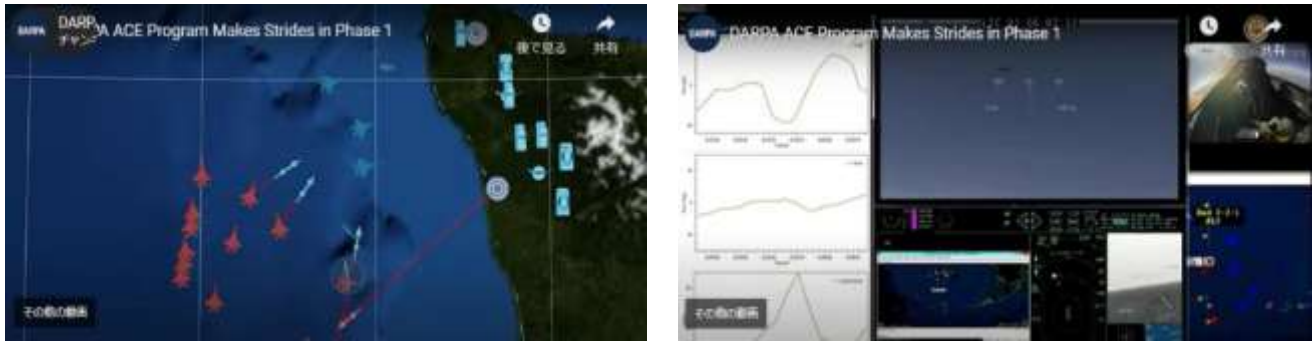
①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（13）

【ニューラルネットワーク】

規制対象となっているニューラルネットワークを用いた集積回路は、人間と同じような複雑な意思決定プロセスを実行する回路で、画像や音を解釈する機能、人間のような思考プロセスを実行する機能などが搭載されている。こうしたことからこの集積回路は、画像認識型等の先端誘導制御システムの軍事用途で使用される。画像を認識・判断する機能を有することから、システムに蓄積された“特徴ある”データの迅速な処理に有用である。

実際にDARPA（Defense Advanced Research Projects Agency.：米国　国防高等研究計画局）は2020年、ニューラルネットワーク等を使用したAI制御の単座戦闘機が人間のパイロットを簡単に制圧できることをシミュレーションで実証した。ニューラルネットワークを使用した米国国防総省の「Air Combat Evolution（ACE）」での実際の訓練の様子を図7-1-64に示す。

図7-1-64　米国国防総省の「Air Combat Evolution（ACE）」での実際の訓練の様子



4.品目の技術動向調査（14）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（14）

規制パラメータ　輸出令第7項(1)
リ　カスタム集積回路であって、次のいずれかに該当するもの
（一）　端子数が1,500を超えるもの
（二）　基本ゲート伝搬遅延時間が0.02ナノ秒未満のもの
（三）　動作周波数が3ギガヘルツを超えるもの

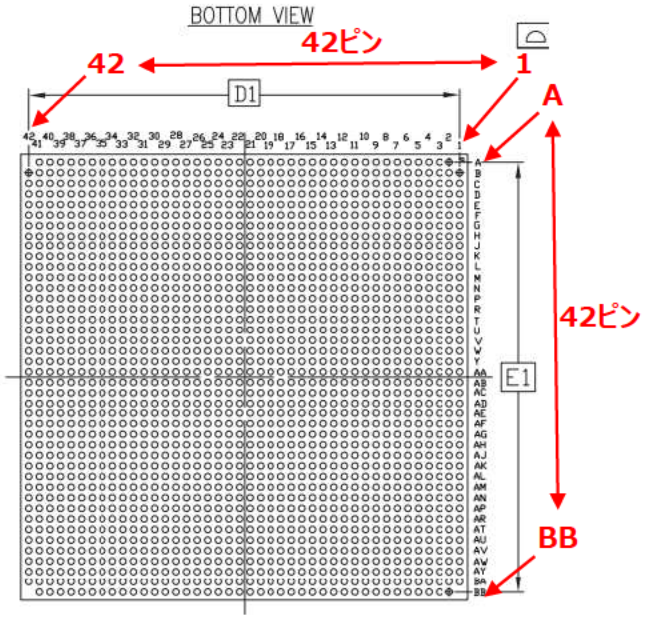
【カスタム集積回路】

カスタム集積回路は、標準集積回路では果たせない迅速なリアルタイム応答を可能にしている。

（一）では、端子数が1500を超えるもので規制がかかっている。端子数が多いということは、多数の入力信号の検出や演算等の信号処理を行うことができ、多数の出力信号で機器の制御を行うことができる。

Xilinx（米国）のVirtex-7 FPGAシリーズのRF1761フリップチップBGA（Ball grid array）パッケージ（裏面）を図7-1-65に示す。 このパッケージでは1760の端子数を持っており、このパッケージで1500以上の端子を使用したカスタム集積回路は、規制がかかることになる。

図7-1-65 Xilinx（米国）のVirtex-7 FPGAシリーズのRF1761フリップチップBGAパッケージ（裏面）



42ピン×42ピン=1764
四隅の4ピンはピンが出ていないため
端子数は1760となっている。

4.品目の技術動向調査（15）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（15）

【カスタム集積回路】

（二）では、基本ゲート伝搬遅延時間が0.02ナノ秒未満のもので規制がかかっている。

基本ゲートとは、低い電圧(L)と高い電圧(H)の2種類の信号電圧しか扱わない2値論理回路の中で、特に基本的な、2入力または1入力で1出力のものを指す。一般的には、NOT回路、AND回路、OR回路、NAND回路、NOR回路、XOR回路の6種類が、基本ゲートと呼ばれている。

伝搬遅延時間とは、これらの論理ゲートに信号を入力し、信号が出力されるまでの時間差をいう。伝搬遅延時間が小さいということは集積回路で応答速度が速く遅延が少ないので、軍事遠隔通信システム等に使用できる。

伝搬遅延時間の例を図7-1-66に示す。この伝搬遅延時間が0.02ナノのもので規制がかかっている。

（三）では、動作周波数3ギガヘルツを超えるもので規制がかかっている。

2021年にソシオネクスト（日本）がASIC顧客向けにCPUを設計した。製造はTSMC（台湾）で、動作周波数は3.0GHzとされている。このCPUを用いカスタム集積回路を製造すれば、動作周波数は3.0GHzとなり、ぎりぎり規制にかからないことになる。ソシオネクストのカスタム集積回路向けCPUデザイン概要を図7-1-67に示す。

規制パラメータ　輸出令第7項(1)

リ　カスタム集積回路であって、次のいずれかに該当するもの

（一）　端子数が1,500を超えるもの

（二）　基本ゲート伝搬遅延時間が0.02ナノ秒未満のもの

（三）　動作周波数が3ギガヘルツを超えるもの

図7-1-66　伝搬遅延時間の例

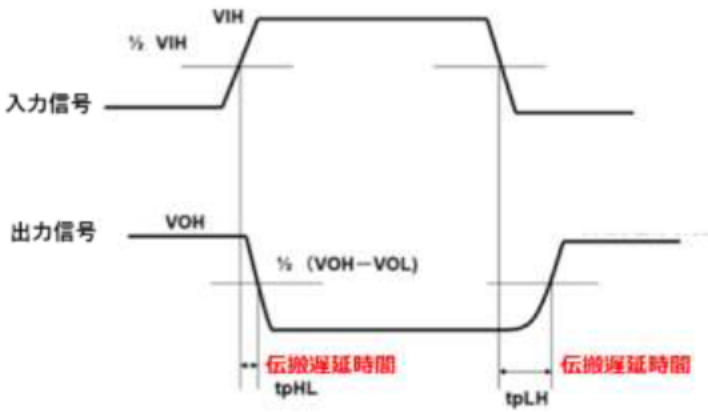


図7-1-67　ソシオネクストのカスタム集積回路向けCPUデザイン概要



4.品目の技術動向調査（16）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（16）

【化合物半導体を用いたデジタル方式】

規制パラメータ　輸出令第7項(1)

ヌ　化合物半導体を用いたデジタル方式のものであって、次のいずれかに該当するもの（ハ、ホからリまで及びルのいずれかに該当するものを除く。）

（一）　等価ゲート数が２入力ゲート換算で3,000を超えるもの

（二）　トグル周波数が1.2ギガヘルツを超えるもの

（一）では、 等価ゲート数が２入力ゲート換算で3,000を超えるものが規制されている。

ゲートは以下のように換算される。

ANDの論理回路の例を図7-1-68に示す。ANDのトランジスタ回路は、P型MOSトランジスタが3個、N型MOSトランジスタが3個で、右図のような6素子のトランジスタ構成となる。ANDはNAND（4素子）とNOT（2素子）で構成される。

FPGAなどの集積回路でのゲート規模（数）を換算する場合には、4素子を1ゲートとして換算する。ゲート回路では2入力のNAND（またはNOR）を1ゲートとして換算する。ANDはトランジスタ数が6個なので、ゲート数の換算をすると1.5となる。

パラメータ規制では、放射線耐性のある化合物半導体を用いたデジタル方式の集積回路で、このゲートが3,000を超えると規制がかかっている。

（二）では、トグル周波数が1.2ギガヘルツを超えるものが規制されてる。

ラッチ回路の動作例を図7-1-69に示す。ラッチの－Q出力をD入力につなぐと、出力が反転することが保証されている。この図の場合、システムクロックが入る度に－Q出力は0と１を繰り返す。しかしながらシステムクロックの動作周波数が高くなると、ラッチの動作が間に合わなくなる。この反転しなくなる最高動作周波数を最大トグル周波数といい、集積回路の動作速度の目安になっている。最大トグル周波数は回路動作できる最高周波数である。化合物半導体を用いたデジタル方式の集積回路は、1.2GHzで規制がかかっているが、ASICでは4GHz程度で動作が可能なものがある。

図7-1-68　ANDの論理回路の例

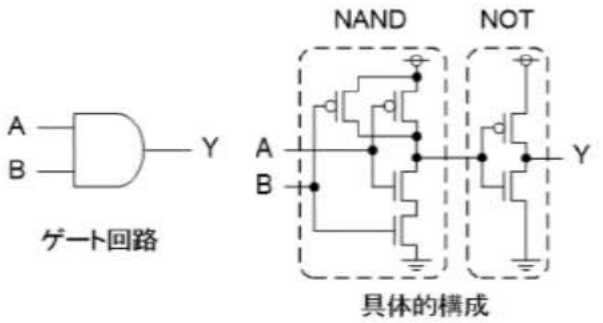
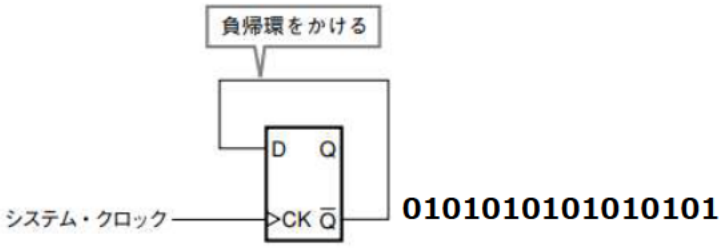


図7-1-69　ラッチ回路の動作例



4.品目の技術動向調査（17）

規制パラメータ　輸出令第7項(1)
ル　ＦＦＴプロセッサであって、高速フーリエ変換のミリ秒で表した定格実行時間が次に掲げる式により算出した値未満のもの
（複素点の数）ｌｏｇ２（複素点の数）／20,480

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（17）

【FFTプロセッサ】

FFT（Fast Fourier Transform;高速フーリエ変換）は、DFT（ Discrete Fourier Transform：離散フーリエ変換）の対称性に着目して、その演算量を減らし高速に変換を行う手法であり、1965年にCooleyとTukeyにより発表された。

周期 NのDFTでは、複素数の乗算を N^2 回行う必要がある。

集積回路において、

DFTの演算回数は、

乗算回数　N^2回　　加算回数　$N(N-1)$回　　合計　$(N^2+ N(N-1))$回　である。

FFTの演算回数は、

乗算回数　$N\cdot\log_2 N$回　加算回数　$N\cdot\log_2 N$回　合計　　$2N\cdot\log_2 N$回　である。

N=1024とすると、

DFTは、1,048,576+1,047,552　　=2,096,128回となる。

FFTは、$2\cdot1024(\log_2 1024)=2048\cdot10=$　20,480回となる。

規制パラメータは、FFTの複素点の数をNとすると高速フーリエ変換のミリ秒で表した定格実行時間が、

$(N\cdot\log_2 N)$　/20,480

未満のものに規制がかかっている。

N=1024（2^{10}）の場合は1.0ミリ秒未満のものに規制がかかることになる。

同様に、

N=2048（2^{11}）の場合は2.2ミリ秒未満のものに規制がかかることになる。

これらは計算値であり、実際の集積回路では乗算器、加算器、データメモリ、プログラムメモリ、FFT専用回路等をそれぞれ複数用い、効率よくFFTの演算を行っている。

4.品目の技術動向調査（18）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（18）

規制パラメータ　輸出令第7項(1)
ヲ　ダイレクト・デジタル・シンセサイザ（DDS）集積回路であって、次のいずれかに該当するもの
（一）　デジタルアナログ変換クロック周波数が3.5ギガヘルツ以上であって、デジタルアナログ変換分解能が10ビット以上12ビット未満のもの
（二）　デジタルアナログ変換クロック周波数が1.25ギガヘルツ以上であって、デジタルアナログ変換分解能が12ビット以上のもの

【ダイレクト・デジタル・シンセサイザ（DDS）集積回路】

ダイレクト・デジタル・シンセサイザは、デジタルアナログ変換のクロック周波数とビット数（分解能）で規制されている。単一で固定の発振源から、任意の波形や周波数をデジタル的に生成するための電子回路で、高度なデジタル変調の主要信号源として使用されるため、デジタルアナログ変換の応答性及び分解能は、機器の性能に重要なパラメータである。DDSデジタルアナログ変換器の規制パラメータのビット数とサンプルレートの関係を図7-1-70に示す。規制パラメータでは、ビット数が高く、分解能が高いDDSのデジタルアナログ変換器を規制している。また、アナログデバイス（米国）のDDS製品を図7-1-71に、Analog DevicesのAD9914の外観を図7-1-72に示す。AD9914、AD9915が規制にかかっていることが分かる。

図7-1-70　DDSデジタルアナログ変換器の規制パラメータのビット数とサンプルレートの関係

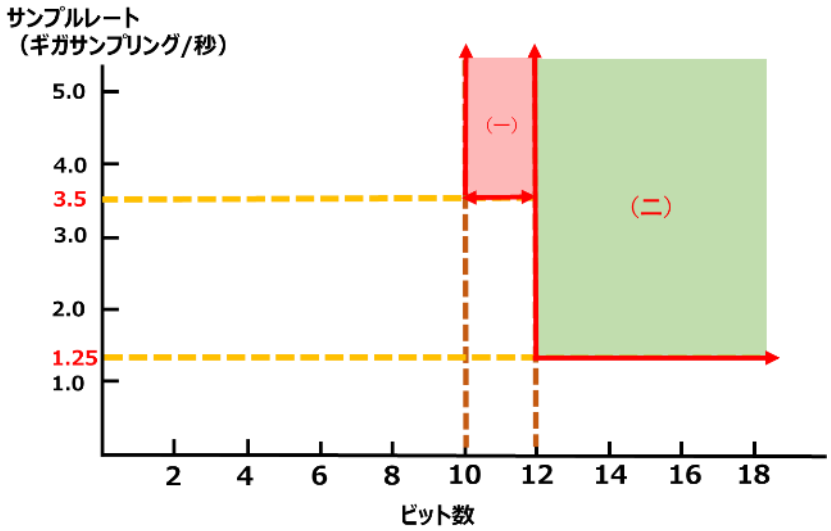


図7-1-71　Analog Devices（米国）のDDS製品

製品番号	Device Primary Function	DAC Resolution bits	Clock Input max | Hz
Filter Parts	OR AND 1 選択済の値 HIDE	OR AND 5 選択済の値 HIDE	1G - 12G HIDE
6 部品			
AD9177 NEW	DDS, High Speed DAC	16	12G
AD9914	DDS	12	3.5G
AD9915	DDS	12	2.5G
AD9912	DDS	14	1G
AD9910	DDS	14	1G
AD9858	DDS	10	1G

図7-1-72
アナログデバイス（米国）
AD9914の外観



4.品目の技術動向調査（19）

○輸出令7項（1）集積回路

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（１９）

【デジタル化されたデータを記録あるいは処理する集積回路のアナログデジタル変換機能】

デジタル化されたデータを記録あるいは処理する集積回路のアナログデジタル変換機能は、アナログデジタル変換のクロック周波数とビット数（分解能）で規制されている。

デジタルアナログ変換の応答性及び分解能は、データ処理やデータを記録する機器の性能に重要なパラメータである。

このアナログデジタル変換機能の規制パラメータのビット数とサンプルレートの関係を図7-1-73に示す。規制パラメータでは、アナログデジタル変換機能のビット数が高く、分解能が高いデータを処理あるいは記録する集積回路を規制している。

規制パラメータ　輸出令第7項(1)

ワ 次の(一)及び(二)に該当するもの又はこれを実行するようにプログラムが可能なもの

(一)　アナログデジタル変換機能を有するものであって、次のいずれかに該当するもの

1 分解能が8ビット以上10ビット未満のものであって、サンプルレートが1.3ギガサンプリング毎秒を超えるもの

2 分解能が10ビット以上12ビット未満のものであって、サンプルレートが1ギガサンプリング毎秒を超えるもの

3 分解能が12ビット以上14ビット未満のものであって、サンプルレートが1ギガサンプリング毎秒を超えるもの

4 分解能が14ビット以上16ビット未満のものであって、サンプルレートが400メガサンプリング毎秒を超えるもの

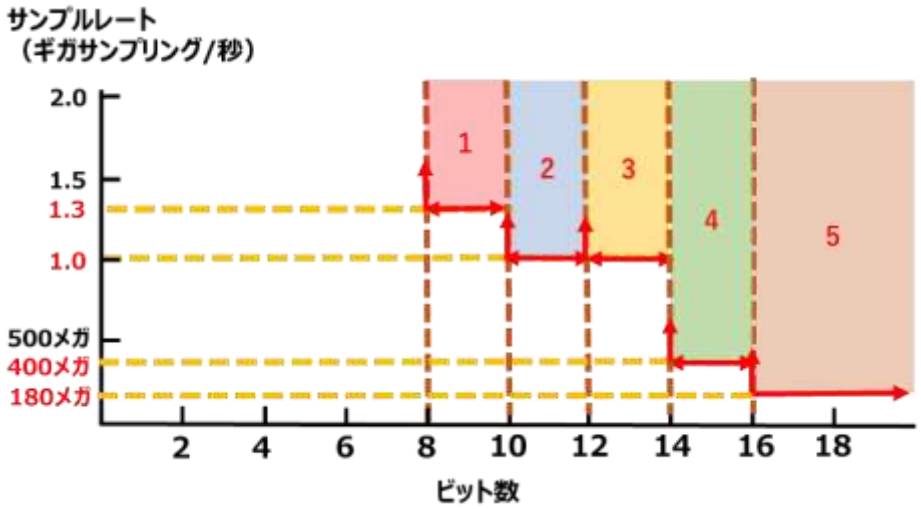
5 分解能が16ビット以上のものであって、サンプルレートが180メガサンプリング毎秒を超えるもの

(二) 次のいずれかに該当するもの

1 デジタル化されたデータを記録するもの

2 デジタル化されたデータを処理するもの

図7-1-73　デジタル化されたデータを記録あるいは処理する集積回路のアナログデジタル変換機能のビット数とサンプルレートの関係



4.品目の技術動向調査（20）

○輸出令7項（1）集積回路

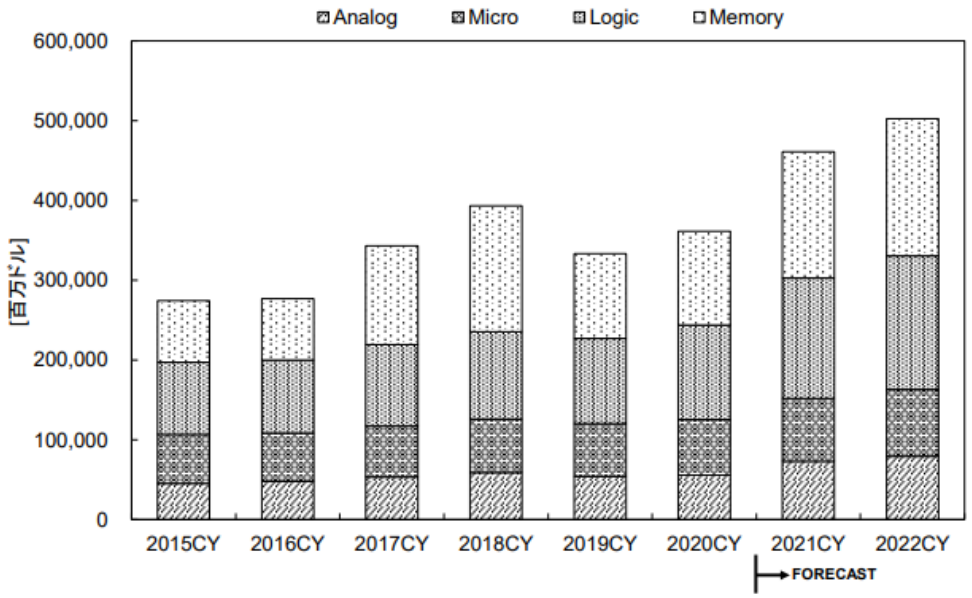
・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（１）

WSTS（WORLD SEMICONDUCTOR TRADE SATISTICS）が2021年11月に公表した世界の集積回路（Integrated Circuit）製品別市場を図7-1-74に示す。

WSTSによると、2020年の世界半導体市場は前年比+6.8%であった。世界経済が新型コロナウィルスのパンデミックの影響で低迷した一方、半導体市場はパンデミック以降、在宅勤務・授業等に必要なパソコンやタブレット、WiFi機器等の需要が増え、 また家庭で楽しむエンターテインメントとしてビデオ配信やゲーム機の需要も拡大し、スマートフォンの5G化も進み、インターネット上を行き交うデータ通信量が飛躍的に増大することになり、クラウドサービス等のインフラ投資需要も高まった。結果的に半導体市場にはプラス要素が多く、パンデミックによる世界経済低迷の影響が打ち消された形となったとしている。

また、2021年は前年比+19.7%と成長が大幅に加速するものと予測されている。さらに、世界経済活動は緩やかながら正常化に向かっていることに加え、2020年に半導体市場を牽引した要因の多くが継続していることから2018年以来の二桁成長が見込まれている。そして2022年は前年比+8.8%と成長が継続するものと予測している。

図7-1-74 世界の集積回路（Integrated Circuit）製品別市場（WSTS）



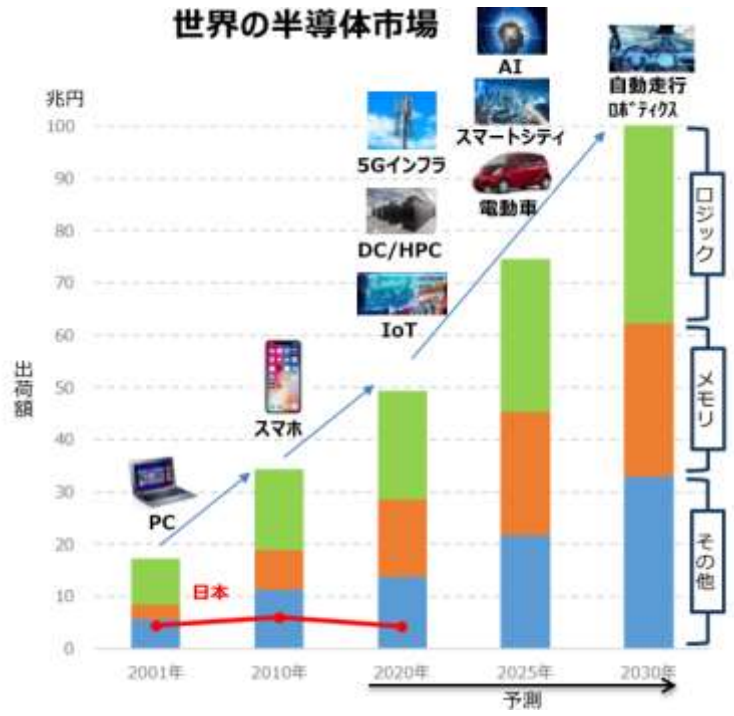
4.品目の技術動向調査（21）

○輸出令7項（1）集積回路

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（２）

経済産業省の半導体・デジタル産業戦略検討会議で、2021年6月に取りまとめられた「半導体戦略（概要）」の世界の半導体市場の概要を図7-1-75示す。その中で、半導体市場は、デジタル革命の進展に伴い今後も右肩上がりで成長（2030年約100兆円）で、ボリュームゾーンは、スマホ・PC・DC・5Gインフラに使われるロジックとメモリで米韓台が市場を席巻し、今後、5G・ポスト5Gインフラの基盤の上に、エッジコンピューティング・アプリケーション・デバイス（自動運転、FA等）での新たな半導体需要の成長が見込まれるとされている。

図7-1-75　世界の半導体市場の概要



	市場規模 2018年	製品例	主要企業
ロジック（制御用）	21兆円	プロセッサ	intel, tsmc
		GPU	
		SoC	QUALCOMM, NVIDIA
メモリ（データ記憶用）	18兆円	DRAM	SAMSUNG, SK hynix
		NAND	Micron, KIOXIA
その他	15兆円	アナログLSI	Infineon, SONY
		パワー半導体	ON Semiconductor, MITSUBISHI ELECTRIC
		イメージセンサ	

4.品目の技術動向調査（22）

○輸出令7項（1）集積回路

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（３）

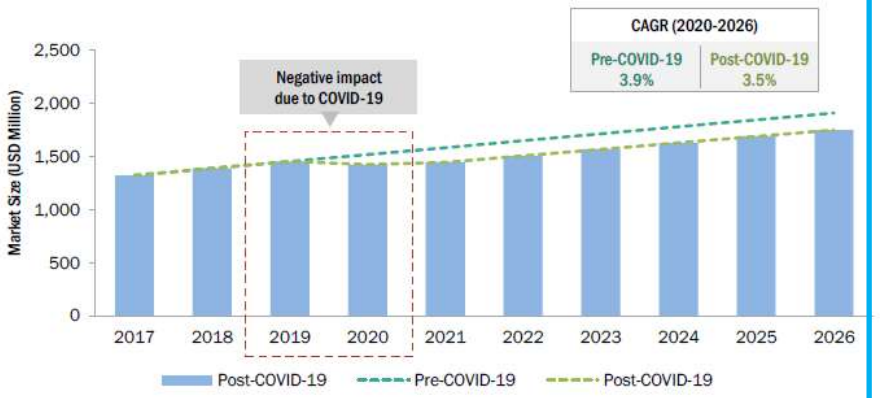
【耐放射線集積回路市場】

輸出令7項（1）集積回路の主な規制対象の一つである耐放射線集積回路市場の市場推移実績及び予測を図7-1-76に示す。また、用途別耐放射線集積回路市場の2020年の実績と2026年の予測を図7-1-77に示す。

近年の世界的情報収集（Global Intelligence）、警戒監視及びと偵察（Intelligence, Surveillance and Reconnaissance： ISR ）、フィールドプログラマブルゲートアレイ（FPGA）の進歩や耐放射線性電子部品に対する高い需要がある航空宇宙及び産業が、耐放射線性電子機器市場の成長を後押しすると予想されている。市場は、COVID19の影響はあるものの、2026年には1億7,500万米ドルに達し、2020年から2026年までのCAGRが3.5%と予想されている。

宇宙（衛星）用途の耐放射線性電子機器市場は、2019年に7億6,270万米ドルに相当する最大の市場規模を保持し、2020年から2026年の間に4.0%の高いCAGRを記録すると予想されている。

図7-1-76　世界の半導体市場の概要



出典：MarketsandMarkets
RADIATION-HARDENED ELECTRONICS MARKET WITH COVID-19 IMPACT –GLOBAL FORECAST TO 2026

図7-1-77　用途別耐放射線集積回路市場
2020年の実績と2026年の予測



	Space (Satellites)	Aerospace & Defense	Medical	Nuclear Power Plants	Others
2020	751.6	417.5	187.4	53.6	13.3
2026	952	490	236.3	57.8	14
CAGR (2020-2026)	4.0%	2.7%	3.9%	1.2%	0.9%

出典：MarketsandMarkets
RADIATION-HARDENED ELECTRONICS MARKET WITH COVID-19 IMPACT –GLOBAL FORECAST TO 2026

4.品目の技術動向調査（23）

○輸出令7項（1）集積回路

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（４）

2019年の耐放射線集積回路市場は、BAE Systems（英国）、Microchip Technology（米国）、Infineon Technologies（ドイツ）、STMicroelectronics（スイス）、及びRenesas Electronics（日本）が上位を占めている。（図7-1-78）上位5社の事業の内容は以下のとおりである。

BAE Systems（英国）は、航空、海事、陸上、サイバー市場を対象に製品とサービスを提供する世界的な防衛、航空宇宙、セキュリティ企業である。集積回路は、宇宙及びミサイル防衛向けに高い信頼性の耐放射線標準コンポーネントとしてSRAM、不揮発性メモリであるカルコゲニドランダムアクセスメモリ（C-RAM）、化合物半導体PROM、FPGA等を製造、販売している。

MICROCHIP TECHNOLOGY（米国）は、1957年に電気機械式リレーをボイジャー1号に供給して以来、航空宇宙および防衛半導体ソリューション製品を継続的に拡大し、現在ではFPGA、ASIC、RFコンポーネント、ダイオード、トランジスタ、MOSFET、ハイブリッド製品、電力システムなど、耐放射線性の宇宙製品の幅広いポートフォリオを持つに至っている。

Infineon Technologies（ドイツ）は、自動車メーカーや各種産業向けに半導体を製造する多国籍企業である。パワー半導体、特にIGBTおよびパワーMOSFETにおいて世界トップクラスの市場シェアを有する。同社は、子会社のIR HiRelを通じて、衛星および宇宙探査用の耐放射線性およびRFソリューションを提供している。

STMicroelectronics（スイス）は、半導体の製造・販売を行う多国籍企業でスイス・ジュネーヴに本社を置き（法人登記はオランダ・アムステルダム）、世界35カ国に拠点を持っている。衛星のプラットフォームとペイロードの制御ユニット向けには、FPGAやマイクロプロセッサ（MPU）、ASIC、標準ロジックなどの製品をそろえている。

Renesas Electronics（日本）は、日本の大手半導体メーカーである。三菱電機および日立製作所から分社化していたルネサス テクノロジと、NECから分社化していたNECエレクトロニクスの経営統合によって、2010年4月に設立された。2020年以降、宇宙向けに人工衛星の電源管理システム向けにGaN FET/デジタルアイソレーターIC/降圧型DC-DCコンバーターIC、宇宙用途向け耐放射線性シングルチップ14ビット1メガSPSの逐次比較（SAR）型アナログ／デジタル（AD）コンバータ、宇宙用途向け耐放射線性シングルチップなどを開発、製品化している

図7-1-78　耐放射線集積回路市場企業シェア

RANK		SHARE
1	BAE Systems	18–20%
2	Microchip Technology	15–18%
3	Infineon Technologies	10–13%
4	STMicroelectronics	8–10%
5	Renesas	Less than 8%

出典：MarketsandMarkets
RADIATION-HARDENED ELECTRONICS MARKET WITH COVID-19 IMPACT –GLOBAL FORECAST TO 2026

4.品目の技術動向調査（24）

○輸出令7項（1）集積回路

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（５）

その他の企業を表7-1-15に示す。

表7-1-15　耐放射線集積回路市場企業シェア

	企業	会社概要
1	Xilinx（米国）	Xilinxは、1984年に設立され本社は米国カリフォルニア州にあり、製造を社外ファウンドリに委託するファブレス半導体企業である。半導体製品は幅広いポートフォリオで、プログラマブルシステムオンチップ（SoC）や3次元IC（3D IC）などのプログラマブルロジックデバイス（PLD）である集積回路（IC）が含まれている。 耐放射線性の宇宙向け及び軍事向けの製品にはには、フィールドプログラマブルゲートアレイ（FPGA）およびプログラマブル読み取り専用メモリ（PROM）等の多数のラインアップをそろえている。
2	Texas Instruments （米国）	Texas Instruments は、1930年にGeophysical Service Inc.として設立された。 1952年にTexas Instrumentsとしてブランド名を変更し、1952年に半導体の製造を開始した。それ以来、同社はアナログ及びデジタル半導体の設計と製造で世界的な企業となっている。 同社のアナログデバイスビジネスユニットでは、電力マネージメントコンポーネント、ロジック、プロセッサ、メモリ、タイミングジェネレータ、増幅器、データコンバータ、インターフェイスなどのあらゆる耐放射線集積回路を製造している。同社は35か国以上で事業を展開し、世界中の100,000を超える顧客にサービスを提供しており、業界最大の営業およびサポートスタッフを擁している。
4	Analog Devices（米国）	Analog Devicesは、集積回路（IC）の設計、開発、製造を幅広く行っている企業である。製品には、産業用制御システム、医療用画像機器、工場自動化システム、監視デバイス、計装及び測定システム、ワイヤレスインフラストラクチャ機器、エネルギー管理システム、ネットワーキング機器、航空宇宙および防衛用電子機器、光学システム、民生用機器が含まれている。 2017年3月、同社は、幅広く高性能アナログ集積回路を設計、製造、販売するLinear Technology（米国）を買収している。
6	Teledyne e2v Semiconductors（英国）	Teledyne e2v Semiconductors は、医療、科学、航空宇宙、防衛、および産業向け等のコンポーネントとサブシステムを提供する企業である。同社は、宇宙用の画像センサー、アレイ、サブシステムなどの宇宙画像ソリューションや航空宇宙および防衛プログラム用の半導体ソリューションにおける高信頼性マイクロプロセッサ、高速データコンバータなどを製造している。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（2）
マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【マイクロ波について】

マイクロ波およびミリ波は電磁波の一種である。一般にマイクロ波は周波数3GHzから30GHz（波長10cmから1cm）、ミリ波は周波数30GHzから300GHz（波長10mmから1mm）の電波を指すことが多い（図7-2-1）。ただしマイクロ波およびミリ波についての統一された定義は存在せず、例えば0.3GHzより高い周波数の電波をマイクロ波と呼ぶ場合も多い。ミリ波の名称は波長がmm単位であることに由来するが、マイクロ波の名称は波長に由来しない。広義では波長に由来するセンチ波・ミリ波・サブミリ波を合わせてマイクロ波と称することもある。本報告書では以下、特に区別の必要がない限り、センチ波・ミリ波・サブミリ波を総称してマイクロ波と記載する。貨物等省令第6条第二号の周波数の数値による規制はいずれも2.7GHzを超える周波数である。

マイクロ波は波長が1m以下であるため小型のアンテナで使え、周波数が高いため高密度の情報を送ることができる。そのため、用途は地上の無線通信、衛星通信、放送、電波天文、レーダーなどがある。また高いエネルギーを送ることができるため、遠距離無線給電への利用が検討されている。国際無線障害特別委員会（CISPR）が定めた国際規格CISPR11に基づき大掛かりな電波漏洩対策なしに使うことのできる周波数は、家庭用の電子レンジで広く使われている。米国電気電子学会（IEEE）は周波数に応じて表7-2-1のような名称をつけている。

図7-2-1　マイクロ波、ミリ波の位置付けと用途

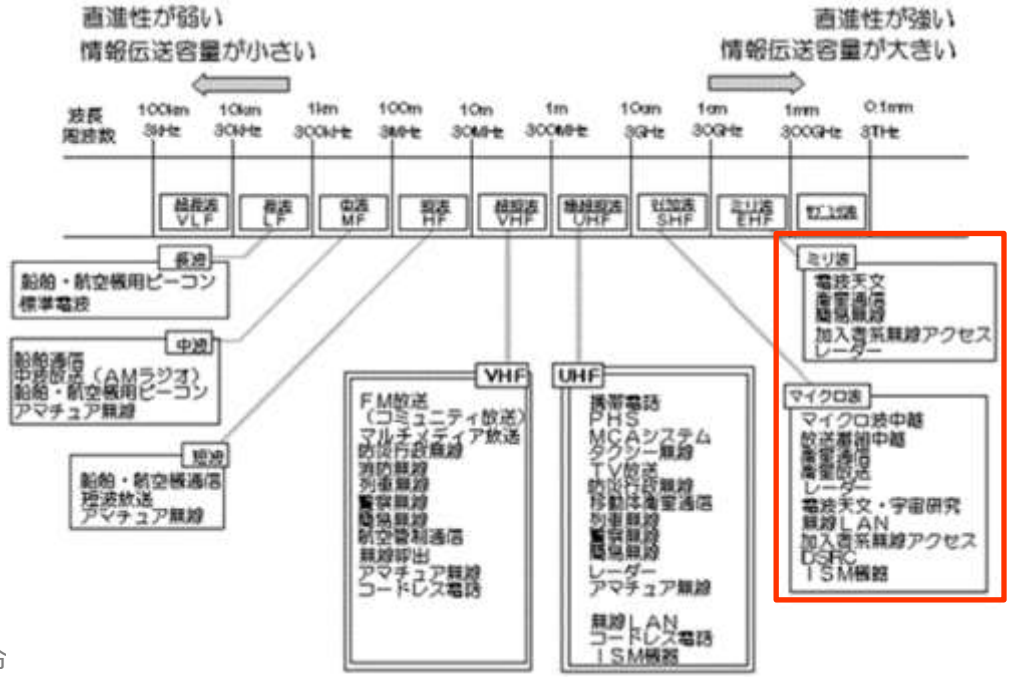


表7-2-1　マイクロ波帯のIEEE名

名称	周波数(GHz)
P帯	0.25-0.5
L帯	0.5-1.5
S帯	2-4
C帯	4-8
X帯	8-12
Ku帯	12-18
K帯	18-26
Ka帯	26-40
V帯	40-75
W帯	75-111

令

1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【輸出令7項（2）の規制対象の品目】
　貨物等省令第6条第二号は、マイクロ波に関する部品から組立品までの種々の段階と機能におよぶ品目を対象としている。それらを示すと表7-2-2のようになる。この「マイクロ波用ディスクリートトランジスタ」は、経済産業省の「輸出貿易管理令の運用について」によると、電力増幅器のこととされている。輸出令第7項(2)では他に第6条第十五号でマイクロ波用試験受信機も対象としている。

表7-2-2　貨物等省令第6条第二号の規制対象となる品目

発振・増幅部	デバイス	モジュール	組立品
真空電子デバイス（イ）	帯域通過フィルター（ヘ）	マイクロ波用固体増幅器を含むモジュール（ホ）	マイクロ波用固体増幅器を含む組立品（ホ）
熱電子陰極（ロ）	帯域阻止フィルター（ト）	マイクロ波用電力モジュール（ル）	発振器又は発振機能を有する組立品（ヲ）
モノリシックマイクロ波集積回路増幅器（ハ）	ハーモニックミクサ又はコンバータ（リ）	送受信モジュール（カ）	周波数シンセサイザーを用いた組立品（ワ）
マイクロ波用ディスクリートトランジスタ（ニ）	送受信用モノリシックマイクロ波集積回路（カ）	送信モジュール（カ）	
マイクロ波用固体増幅器（ホ）	送信用モノリシックマイクロ波集積回路（カ）		
マイクロ波用電力増幅器（ヌ）			

（チ）は削除

1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【真空電子デバイス（発振・増幅用真空管）】

マイクロ波用の真空電子デバイスは、磁界で制御された電子流とマイクロ波との相互作用により、電子流からマイクロ波にエネルギーを与えて大きな電力のマイクロ波とし、これを取り出すものである。自らマイクロ波を作り出して増幅し出力する自励式と、外部から導入したマイクロ波を増幅して出力する他励式がある。ここでは両者を区別なく取り上げるが、自励式の真空電子デバイスについては後に改めて取り上げる。マイクロ波増幅のための電子流との関係や装置の構造などによって多くの方式に分類できるが、相互作用する電界と磁界の向きが同方向（線ビーム型）か、交差するか（電磁界直交型）などによって、表7-2-3のように分類できる。

これらの中でも代表的なものとして、4種類（進行波管、クライストロン、マグネトロン、ジャイロトロン）を取り上げ、次頁から原理を説明する。

なお真空電子デバイスの性能を表す代表的な用語に効率と利得（ゲイン）がある（表7-2-4）。

表7-2-3　マイクロ波発振・増幅用真空管の代表的な種類

線ビーム型 (Linear Beam, O-Type)	速度変調管 (クライストロン)	直進型	連続波	高出力、高効率、高利得
			パルス波	超高出力（100MW級）、高効率、高利得
		反射型		現在は半導体に置き換わりつつある
	進行波管(TWT)	ヘリックス型		広帯域
		結合空洞型		
	後進波管	BWA/BWO		発振周波数を広範囲に変えられる
電磁界直交型 (Crossed Field, M-Type)	共振型	マグネトロン	連続波	高効率、安価、小型なものが手に入る
			パルス波	
	非共振型	CFA/CFO		高効率
メーザー効果型(Helical Beam, M-Type)		ジャイロトロン		ミリ波帯で高出力

表7-2-4　真空電子デバイスの性能の指標

効率	直流電子ビームから出力マイクロ波に変換されるエネルギー（電力） （出力マイクロ波電力）/（直流電子ビームエネルギー）
利得（ゲイン）	出力マイクロ波電力と入力マイクロ波電力の比 （出力マイクロ波電力）/（入力マイクロ波電力）

1.対象品目の概要調査（4）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【真空電子デバイス（進行波真空電子デバイス）】

進行波真空電子デバイス（進行波管、TWT：Travelling wave tube）の基本的な原理は、外部から導入したマイクロ波とTWT内で発生させた電子流が同じ方向に同程度の速度で進む時に、マイクロ波と電子流の相互作用によってマイクロ波を増幅するというものである。しかし光速に近いマイクロ波はせいぜい光速の数十分の一程度の電子流に比べて速度が遥かに速く電子流との相互作用をほとんど起こさないため、マイクロ波を迂回させて直進する電子流との速度を近づける工夫が必要となる。図7-2-2の例ではマイクロ波をらせん状の低速波回路に通すことで電子流との速度の差を縮めている。なおここでいうマイクロ波の速度とは、位相速度のことである。集束コイルは磁場により電子をビーム状に集束させる働きをする。またコレクタは余剰の電子ビームを回収するためのものである。

図7-2-2の左端の陰極・陽極・ヒーターからなる部分は電子流を発生させる電子銃の一種であり、熱電子陰極という。いくつか種類がある中の1つの模式図を図7-2-3に示す。陰極を加熱することにより発生する熱電子が陽極へ向かう性質を利用して電子流を発生させる。熱電子陰極については後でより詳しく記載する。

図7-2-2　マイクロ波用真空電子デバイスの例（進行波管）

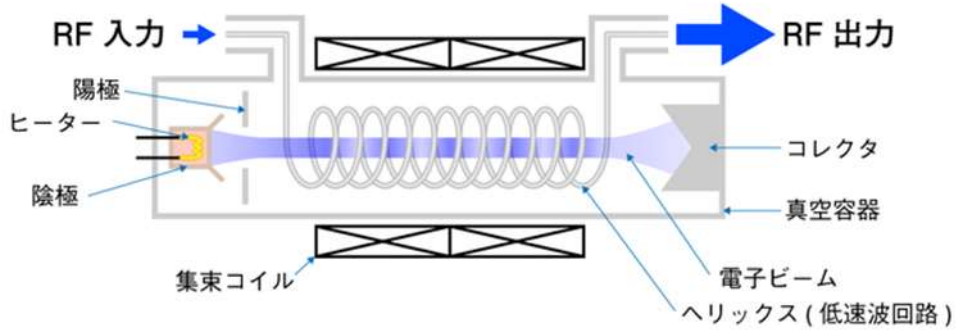


図7-2-3　熱電子陰極

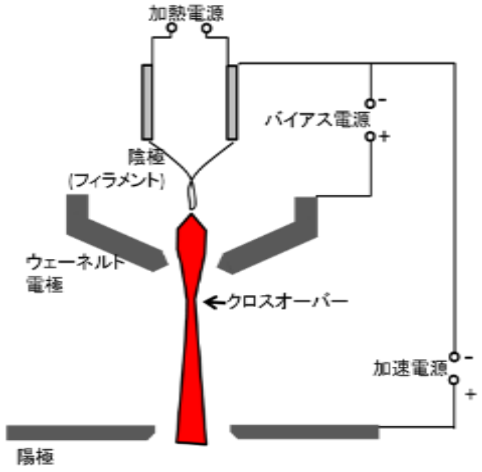


図1熱電子放出型電子銃の構造

1.対象品目の概要調査（5）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

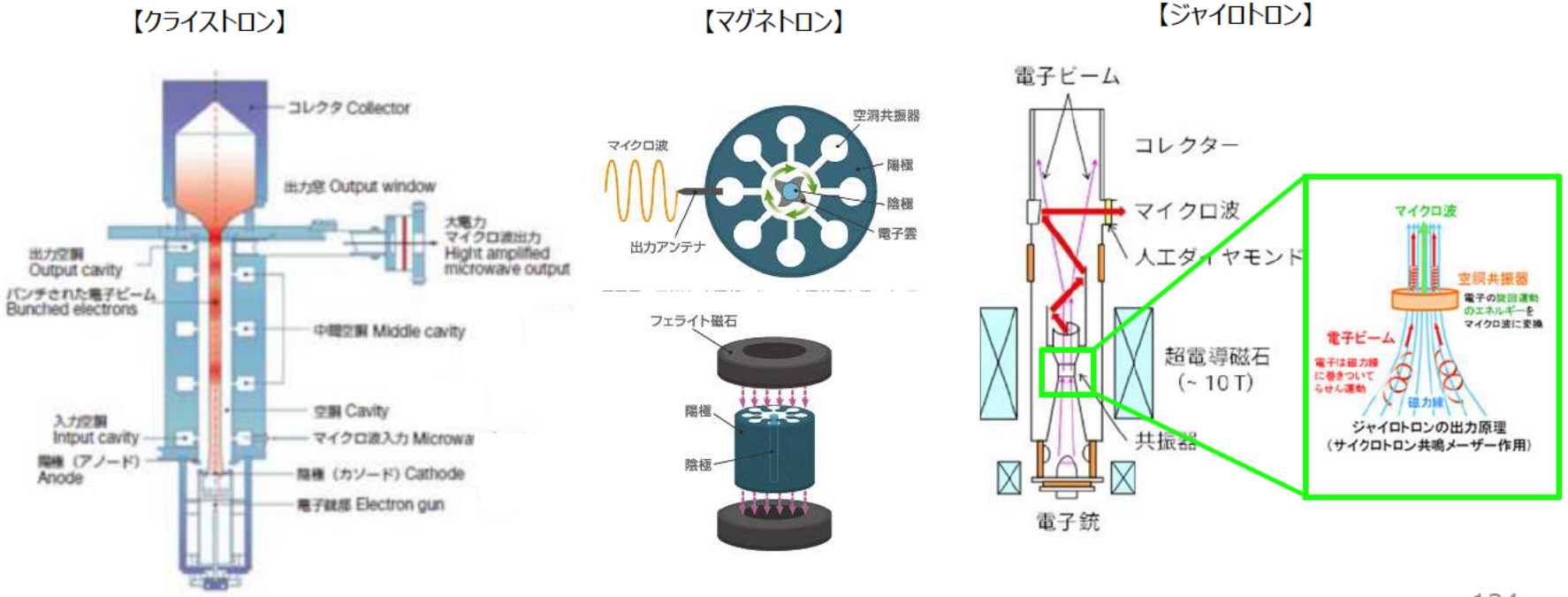
【真空電子デバイス（クライストロン、マグネトロン、ジャイロトロン）】

図7-2-4に示すクライストロンでは、電子銃から放出された電子が外部から入力されたマイクロ波と空洞（共振器）でエネルギーを授受して加速あるいは減速されて局所的に電子の集合を形成（集群、バンチ）する。複数ある空洞を経るたびに電子の集群は大きくなり、最後の空洞を通過する際に強大な交流電界で大電力のマイクロ波を出力する。

マグネトロンは、中心部の陰極から放出された電子が外周部の陽極と外部磁場の作用により陰極の周りを周回しながら空洞（共振器）で共振し、そのエネルギーをマイクロ波として取り出す。

ジャイロトロンは、電子銃の電子ビームが外部から金属製円筒（空洞共振器）に与えられる磁力線に巻き付きらせん運動をして共振器内を通過し、その際に電子の旋回エネルギーがマイクロ波に変換される現象（サイクロトロン共鳴メーザー作用）によってマイクロ波を生じさせる装置である。

図7-2-4　マイクロ波用真空電子デバイスの例



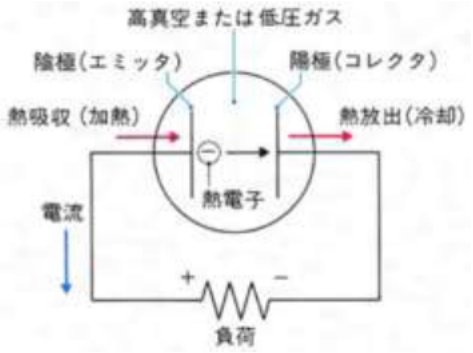
1.対象品目の概要調査（6）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

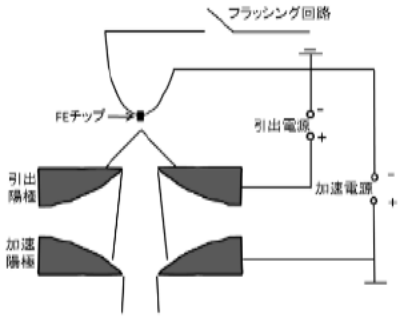
【真空電子デバイス（電子銃）】
　電子銃は従来、仕組みの違いから熱電子放出型、電界放出型、ショットキー型と分類される3種が主に使われてきた。比較的新しい型として、光電子放出（フォトエミッション）型がある（図7-2-5）。
　熱電子放出型は陰極を加熱して放出される熱電子を陽極側に引きつけることで電子流を発生させるものである。電界放出型は、固体表面に強い電界をかけると固体中の電子が放出されやすくなる現象を利用したものである。ショットキー型は加熱された金属に強い電界をかけると熱電子が放出されやすくなる性質（ショットキー放出現象）を利用したものである。光電子放出型を除く3方式にはそれぞれ次頁の図7-2-6のような特徴がある。

図7-2-5　代表的な電子銃の仕組み

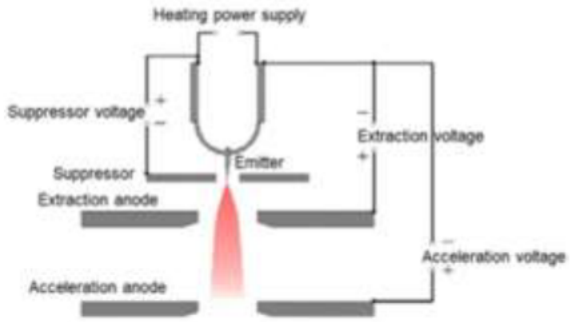
【熱電子放出型】



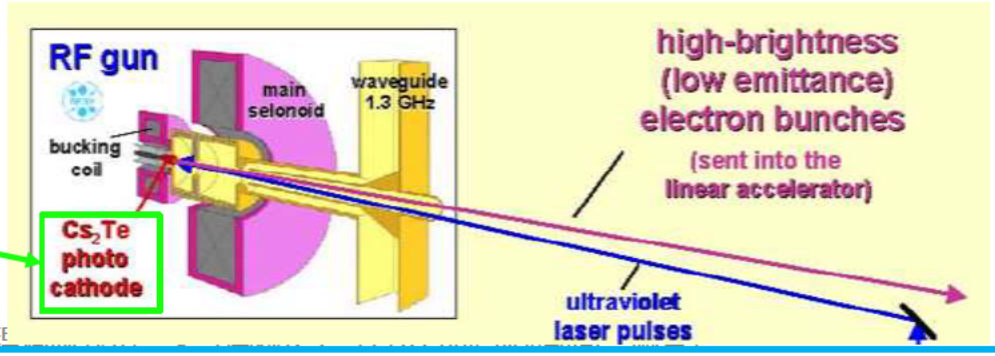
【電界放出型】



【ショットキー型】



【光電子放出型】



1.対象品目の概要調査（7）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【真空電子デバイス（グリッド式電子銃）】

図7-2-6は電子銃の方式による特徴の比較である。

電子銃の中には、パルス状の電子流を発生できるものがある。パルス発生方法としては、陰極にパルス電圧を送るカソードパルサー方式と、グリッドに制御パルスを送るグリッドパルサー方式がある（図7-2-7）。グリッドパルサー方式は、陰極と陽極の間に導電性のグリッドを設け、グリッドにかける電圧を制御することにより電子流の強さを制御する（図7-2-8）。パルス電子流を発生させる場合には、パルス電圧をグリッドに印加して、陰極から発生する連続波の電子流をパルス化する。

図7-2-6　電子銃の特徴

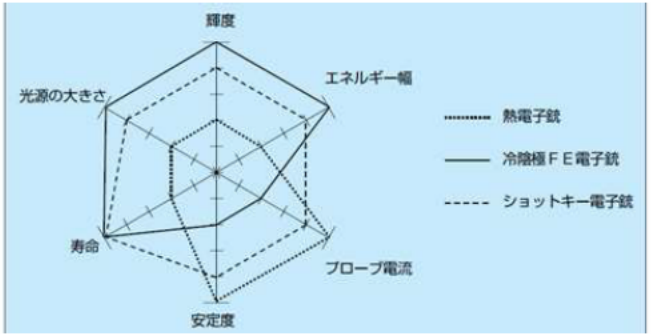


図7-2-7　電子銃のパルス発生方法

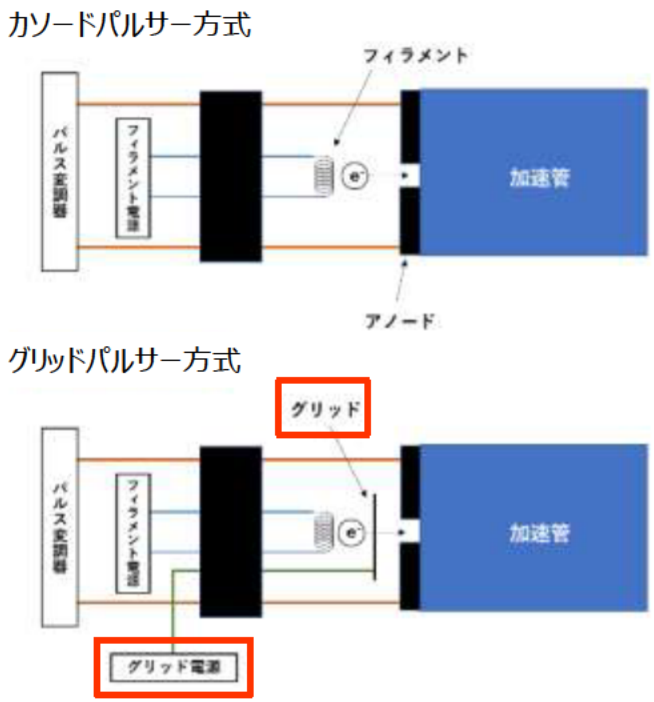
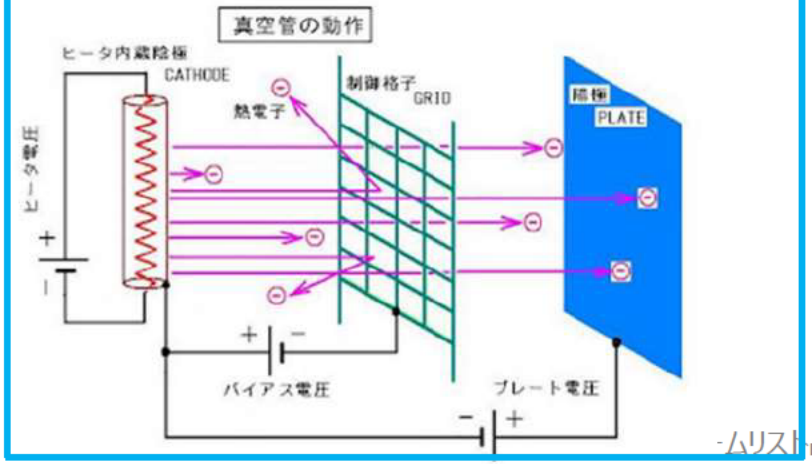


図7-2-8　グリッド式電子銃の原理



1.対象品目の概要調査（8）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【真空電子デバイス（熱電子陰極）】

熱電子陰極は図7-2-3、7-2-5でも触れたとおり熱電子を発生させるための電極の一部である。熱電子陰極はかつてはブラウン管テレビで使われており、現在でも身近なところでは照明用蛍光管、さらに電子顕微鏡などで使われている。

真空電子デバイス用の熱電子陰極は上記のような用途の場合よりも大きな電流を発生させるものが用いられている。

図7-2-9に熱電子陰極材料の開発の歩みを示す。最初の熱陰極材料にはタングステンが用いられ、電球や電子顕微鏡に使われていたが、その後、より大きい電流密度が得られる酸化物カソードが発明され、真空電子デバイスの熱電子陰極として広く使われた。しかしながら酸化物カソードもやがて構造に起因する大電流密度化の壁に突き当たり、また真空電子デバイス内の残留ガスに起因する不具合の発生もあった。この酸化物カソードの欠点を克服して現在主に使われているのが含浸型カソード（Dispenser Cathode）である。含浸型カソードには様々な種類があるが、大電力真空電子デバイスにはM型カソードとスカンデートカソードが使われている。図7-2-10は含浸型カソードの構造と製品の例である。M型カソードは、空孔を有するタングステンにBaOなどの電子放射物質を含浸させ、陰極表面に電子を放出しやすくするためにOs(-Ru)やIrなどの金属薄膜を形成している。 スカンデートカソードはBaOなどの電子放射物質にScOを添加してさらに電子を放出しやすくしている。

図7-2-9　熱電子陰極材料の開発の歩み

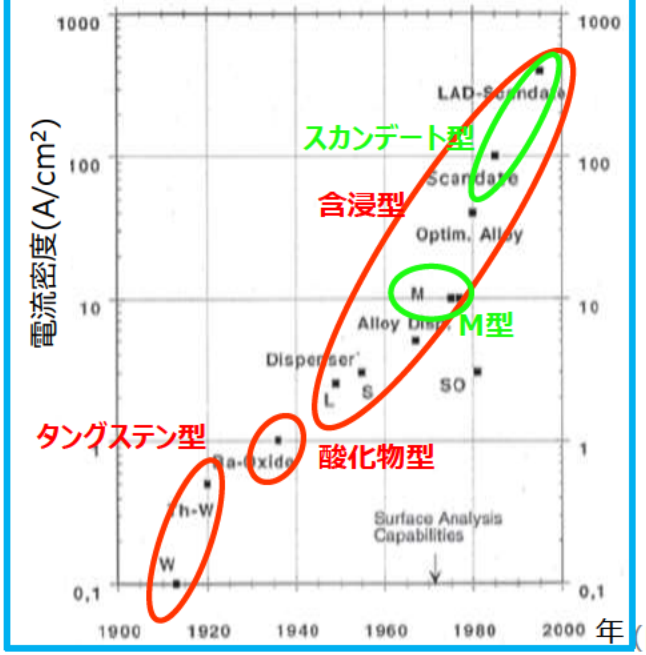
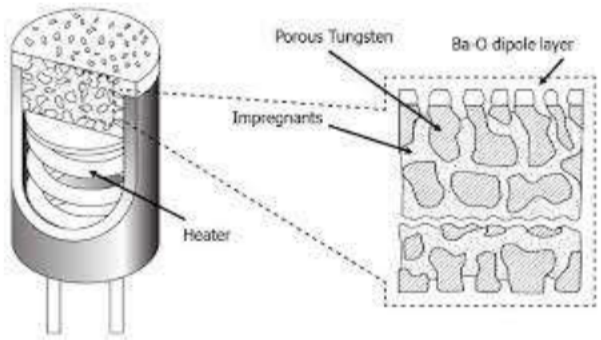
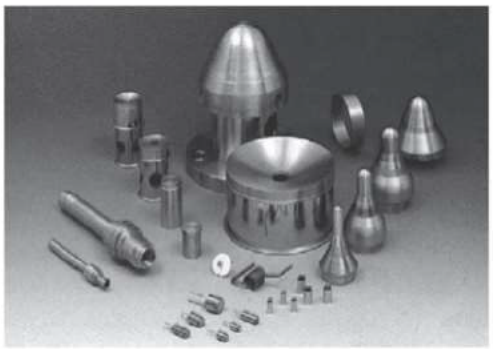


図7-2-10　含浸型カソードの構造と製品の例





1.対象品目の概要調査（9）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【真空電子デバイス（電子ビーム形状）】
マイクロ波真空電子では、出力や効率などを向上させるために、ビーム形状の工夫も行われている。
非軸対称電子ビームの例としてシート状ビームを取り上げる。マイクロ波と電子ビームの相互作用のために必要な電子ビーム密度は周波数の2乗に比例して増える。そのため、特にミリ波帯のような高周波領域では円柱状のビームではビーム形状の制御のために磁界をより強くしなければならず、永久磁石では困難である。これを解決するための手段の一つとして、シート状電子ビームが使われている。これにより装置の大型化も抑えることができる。図7-2-11はクライストロンの例である。電子ビームの複数化もシート状ビームと同様の目的で使われている。図7-2-12はクライストロンの例である。
環状電子ビームの例としては、後進波管の例が挙げられる（図7-2-13）。真空管の管壁付近で強くなる電磁界を利用するため、電子ビームも管壁付近を通過する円環状のものを使うことにより、大出力を実現できる。1GWを超えるものも実現できるという。

図7-2-11　非軸対称電子ビームの例
（シート状電子ビームのクライストロンの電子銃部分）

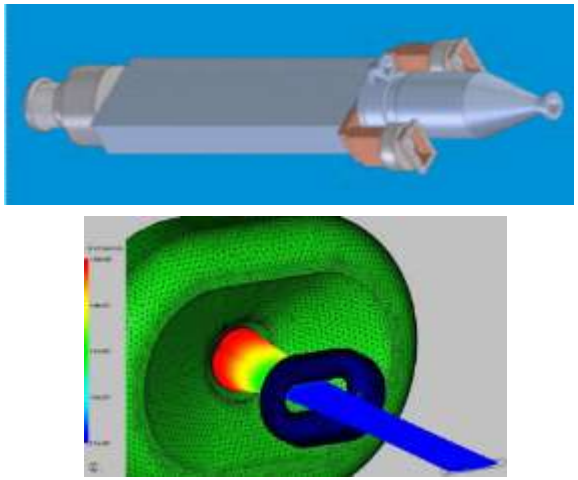


図7-2-12　複数電子ビームの例
（6ビーム型クライストロン断面）

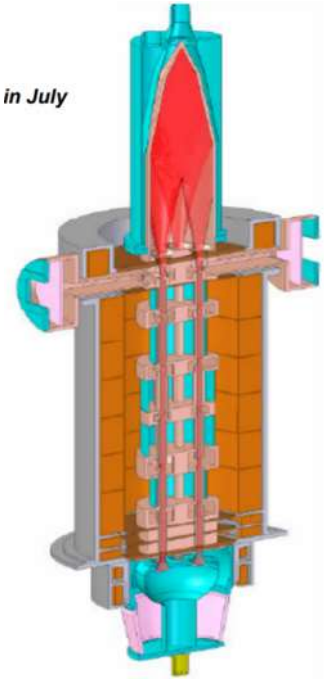
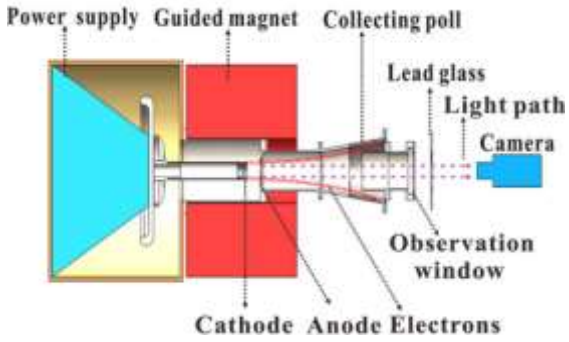
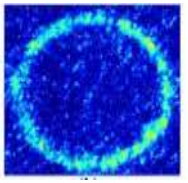


図7-2-13　環状電子ビームの例
（後進波管の電子銃部分）



【電子ビーム断面】



1.対象品目の概要調査（10）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【真空電子デバイス（遅波回路：空洞結合形、ヘリックス形[はしご形、インタデジタル形、リングアンドバー形、折返し形）】
マイクロ波以上の高周波になると、同軸ケーブルなどに使われるポリエチレンなどの誘電体による損失が非常に大きくなる。一方、マイクロ波は空間を直進し、金属表面で反射する性質がある。そのため出力の高い場合、マイクロ波の伝送や閉じ込めには、電線の代わりに導波管、コイルとコンデンサーからなる共振器の代わりに空洞共振器という、矩形の金属管や金属球が使われることが多い（図7-2-14）。
すでに図7-2-2でも触れたとおり、進行波管では電子流とマイクロ波の伝搬速度（位相速度）を近づけるためにマイクロ波の遅波回路を使う場合がある。図7-2-2ではらせん（ヘリックス）形の例を示したが、その他にも種々の形状の遅波回路がある。ぞの例を図7-2-15に示す。
クライストロンでは、進行方向に隣接して設けた複数の空洞によりマイクロ波を遅らせる方法を使っており、空洞結合形という（図7-2-16）。

図7-2-14　マイクロ波の導波管、空洞共振器

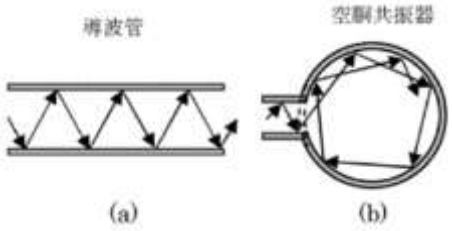


図7-2-16　空洞結合形遅波回路

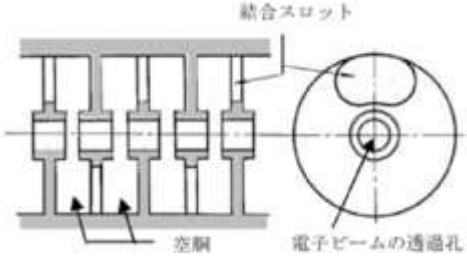


図7-2-15　進行波管の遅波回路の例

【ヘリックス形】



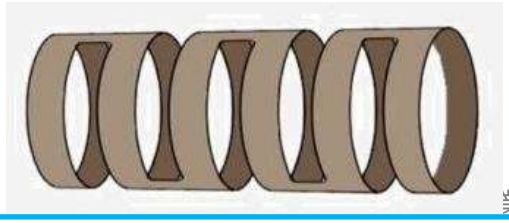
【はしご形の一種】



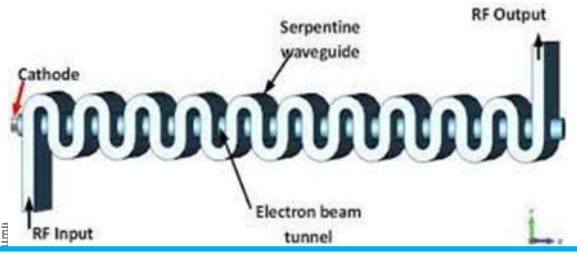
【インタデジタル形】



【リングアンドバー形】



【折返し形（蛇行形）】



1.対象品目の概要調査（11）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【半導体増幅素子】
マイクロ波の発振・増幅用の部品としては、ここまで記してきた真空電子デバイスの他に、半導体回路（ソリッドステートマイクロ波発振器・増幅器）も存在する。マイクロ波用の受信アンプ、送信アンプ、スイッチ、ミキサーなどの個別の機能を有するチップ（ディスクリートコンポーネント）を回路基板上に配置して、発振、増幅、その他の目的の機能の回路としたものをハイブリッドマイクロ波集積回路（HMIC）といい、回路全体を単一のチップとして半導体上に設計したものをモノリシックマイクロ波集積回路（MMIC）という。
表7-2-5にマイクロ波増幅用の半導体素子の種類を示す。なお半導体発振用の素子については別に説明する。

表7-2-5　マイクロ波増幅用の半導体素子

種類			材料例
電界効果トランジスタ（FET）	絶縁ゲートFET（IGFET）	金属酸化膜半導体FET（MOSFET）	Si
		ヘテロ接合FET（HFET）、高電子移動度トランジスタ（HEMT）	AlGaN/GaN, AlGaAs/GaAs, GaAs, AlGaN/GaN, GaN, InP, SiGe
	接合型FET（JFET）		Si
	金属半導体FET（MESFET）		GaAs
バイポーラ接合トランジスタ（BJT）	ホモ接合型		Si
	ヘテロ接合型（HBT）		SiGe, GaAs, InGaP/GaAs

1.対象品目の概要調査（12）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【半導体増幅素子】

半導体増幅素子で代表的なものに電界効果トランジスタ（FET）があり、図7-2-17に動作原理を示す。ソース(S)とドレイン(D)の間は通常は電子が欠乏している半導体層(p)で絶縁されているが、ゲート(G)とボディ(B)の間に電圧（ゲート電圧）をかけてG側すなわちSとDの間にpの電子を引き寄せると、SとDの間に電流が流れるようになる。小さなゲート電圧のオン・オフでS-D間の大きな電流を制御できるため、見かけ上増幅効果が得られる。トランジスタには構造によって、FETの他にもバイポーラ接合トランジスタ（BJT）、高電子移動度トランジスタ（HEMT）などがあり、それぞれのトランジスタに応じた半導体材料として、シリコン（Si）や、化合物半導体（GaAs、GaN）などの材料が使われる。図7-2-18に材料別の半導体および真空電子管の性能を示す。高周波数、高電力の分野は依然として真空電子管でないと対応できない領域もあるが、半導体材料の進歩により真空電子管は徐々に半導体に置き換わっている。半導体の中でもGaNは高出力かつ高周波数の信号を扱えるため、現在広く使われている。またダイヤモンド基板が実用化されれば、さらに真空電子管の置き換えが進むと予想されている。

図7-2-17　FETの動作原理図

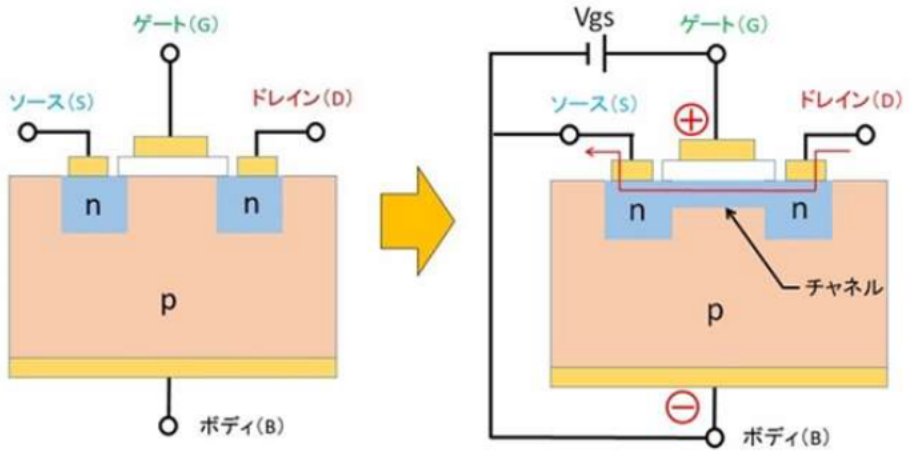
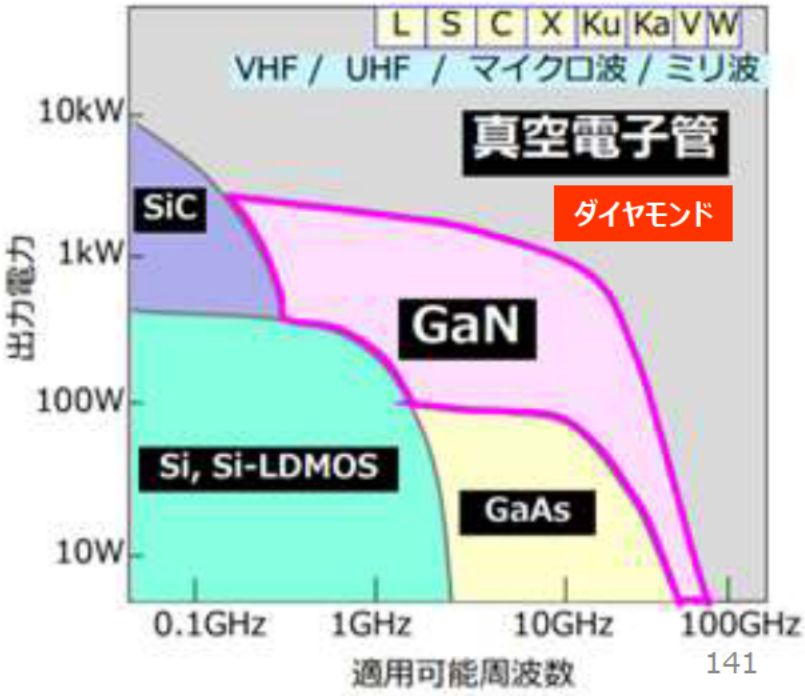


図7-2-18　半導体と真空電子管の性能



1.対象品目の概要調査（13）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【ディスクリートトランジスタ、マイクロ波集積回路、固体増幅器、モノリシックマイクロ波集積回路】

先に図7-2-17で示したような単独の半導体素子をディスクリートトランジスタという。なお経済産業省の「輸出貿易管理令の運用について」では、貨物等省令第6条第二号のディスクリートトランジスタを電力増幅機能のあるものに限定している。ディスクリートトランジスタは、コンデンサやコイルなどの他の素子と伝送線でつないで組み合わせ、増幅回路などの回路を形成する。図7-2-19は半導体増幅素子をセラミックや樹脂基板上でコンデンサやコイルなど他の素子と組み合わせて回路を形成した例である。このように同一の基板上に素子を実装した回路を集積回路（IC：Integrated Circuit）といい、マイクロ波用の回路の場合は特にマイクロ波集積回路（MIC：Microwave IC）という。真空電子デバイスを使わず、半導体増幅器で構成した増幅器を固体増幅器という。

一方、半導体を基板として、一つの半導体基板上にトランジスタ、コンデンサ、コイルや伝送線を形成する回路をモノリシック集積回路（Monolithic IC）といい、マイクロ波用の回路の場合はモノリシックマイクロ波集積回路（MMIC：Monolithic MIC）という。MMICにはさらに、半導体の片面に回路、反対の面に接地導体を設けるマイクロストリップ型、回路、接地導体を同一面に構成するコプレーナ型、多層化した3次元型がある（図7-2-20）。MMICは回路の小型化が可能であり、またプロセスによっては製造コストが低くなる。3次元型ではさらに小型化が可能になる。

図7-2-19　半導体マイクロ波用増幅回路の模式図

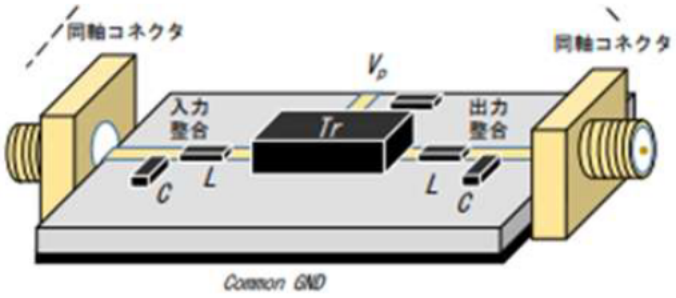
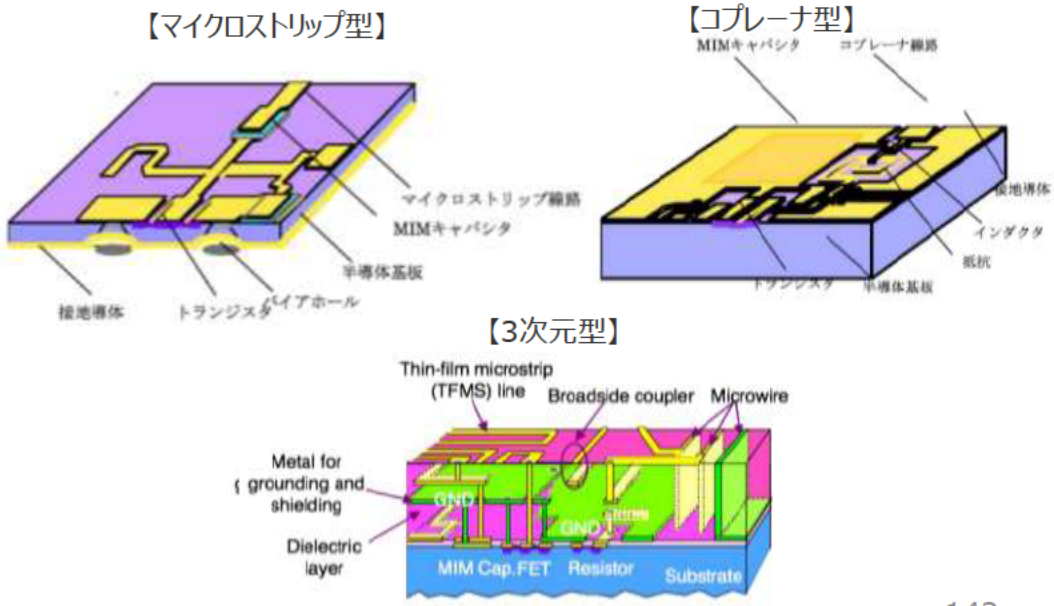


図7-2-20　モノリシックICの種類



1.対象品目の概要調査（14）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【フィルター（帯域通過フィルター、帯域素子フィルター）】
　周波数フィルターは通過・減衰する信号により、図7-2-21に示す4種がある。そのうち貨物等省令第6条第2号の対象となるのはバンドパスフィルター（帯域通過フィルター）とバンドストップフィルター（帯域阻止フィルター）の2つである。
　通過する周波数の幅（帯域幅）は、図7-2-22に示すとおり最大レベルから一定の値だけ低いゲイン値に対応する周波数の幅で表される。図に示す3dBや、1dBの値を用いることが多い。3dBの場合は3dB帯域幅という。

図7-2-21　周波数フィルターの種類

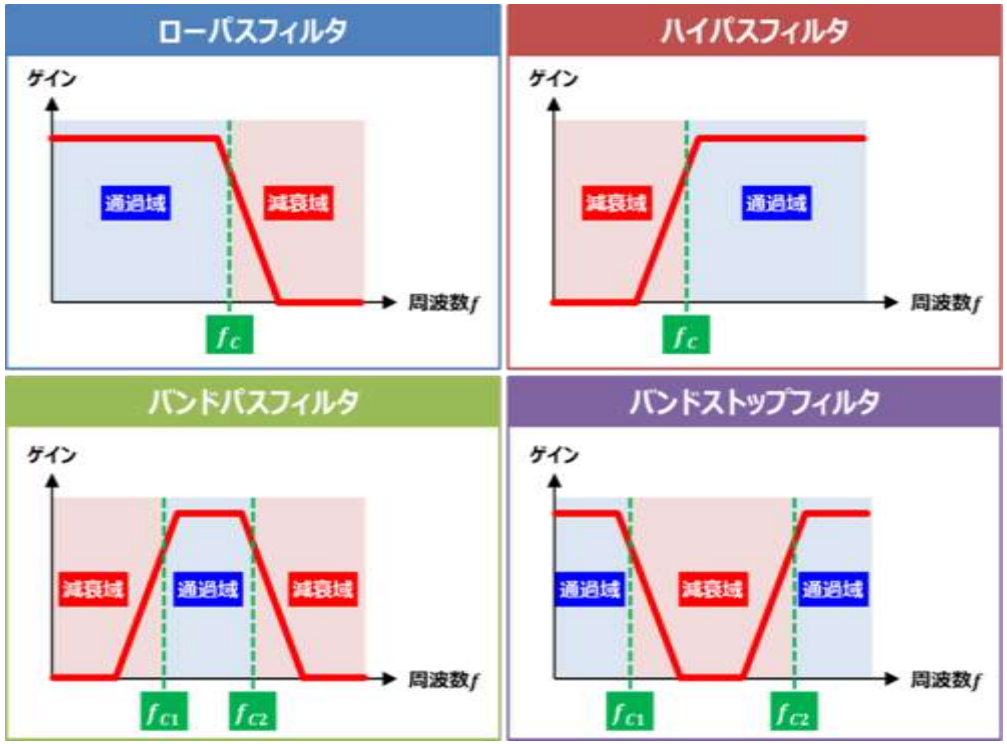
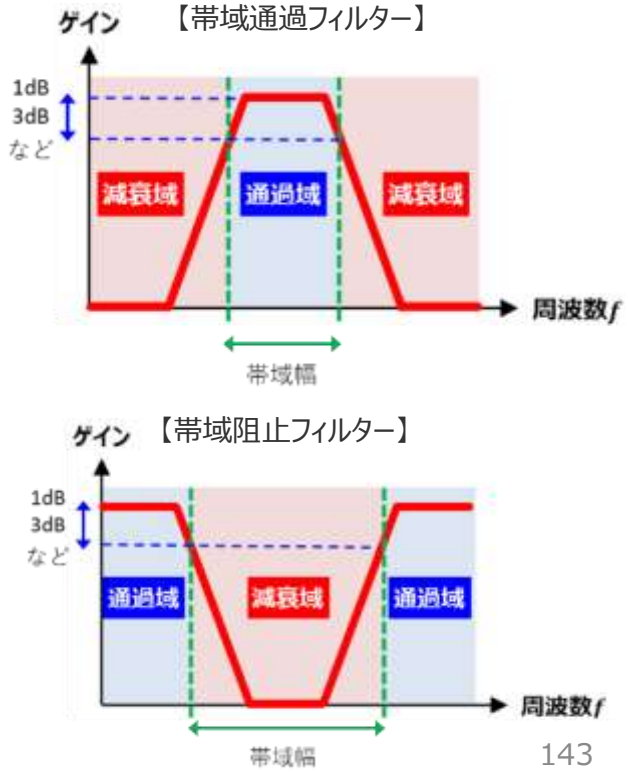


図7-2-22　帯域幅



1.対象品目の概要調査（15）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【フィルター（コンデンサとコイルからなる電気回路）】

マイクロ波用のフィルターには、より低い周波数の電磁波で一般に使われているインダクタやコンデンサからなるフィルター（表7-2-6）、機械的振動を利用するもの（表7-2-7）、電磁波共鳴を利用するもの（表7-2-8）、光信号に変調して光領域でフィルタリングするもの（表7-2-9）に大別できる。

コイルとコンデンサの部品からなる回路において、マイクロ波のような高い周波数（すなわち短い波長）の信号では導線内での位相変化を抑えるために導線や部品の大きさを波長に対して十分小さくする必要があり、このように設計した回路を集中定数回路という。

金属などの導電体薄膜のパターンによりインダクタやコンデンサを形成したフィルターも存在する。導体パターンの位置（基板の表面か内部か）やグランド（GND）層との位置関係により、マイクロストリップ型、ストリップライン型、コプレーナ型がある。この種類のフィルターには、回路を積層して3次元化し小型化、高集積化したものもあり、半導体基板上に形成したもの（多層化/3次元MMIC）や低温同時焼成セラミックス（LTCC）に形成したものがある。導電体に超電導材料を用いると、常電導材料では実現できない低損失と急峻な遮断特性が両立したフィルターを実現できる。

インダクタやコンデンサからなるフィルターの例を次頁の図7-2-23に示す。

表7-2-6　マイクロ波用フィルターの種類（インダクタやコンデンサからなるもの）

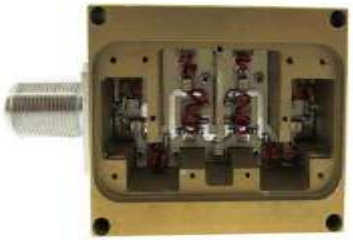
フィルタリング原理	方式			概要	長所	短所	同調方法の例（可能な場合）
コンデンサとコイルからなる電気回路	集中定数回路（Lupmed elements）		常電導	独立したコイルとコンデンサで構成されるが、回路網の長さや素子の大きさが、流れる交流波長（マイクロ波）に対し無視できる程度の大きさの回路	小さいフットプリント 広帯域で機能	狭帯域化は困難 高周波は対応困難 大電力に対応できない	
			超電導	高温超電導体材料で回路を形成する	低損失と急峻な遮断特性が両立	大電力では超電導状態が破れる 冷却用設備・エネルギーが必要	温度変化で超伝導体の特性を変える
	分布定数型	マイクロストリップ、 ストリップライン、 コプレーナ導波路（CPW）、 サスペンデッドストリップライン	常電導	導電体薄膜の微細な配線路のパターンによってインダクタやコンデンサの機能を発現させてフィルターを形成する	狭帯域・広帯域両対応 軽量	挿入損失大（1-4dB） 減衰特性良くない 対応電力は数10W程度	
			超電導	高温超電導体膜で回路を形成する	低損失と急峻な遮断特性が両立	大電力では超電導状態が破れる 冷却用設備・エネルギーが必要	温度変化で超伝導体の特性を変える 誘電体板の距離を変えて調整

1.対象品目の概要調査（16）

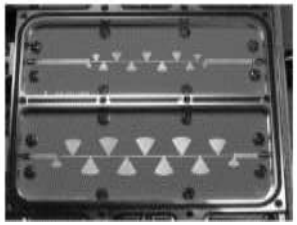
○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

図7-2-23　マイクロ波用フィルターの例（インダクタやコンデンサからなるもの）

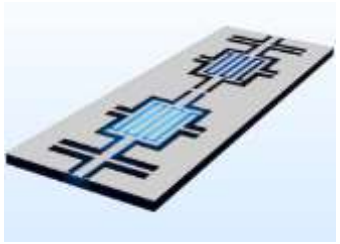
【集中定数回路フィルター】



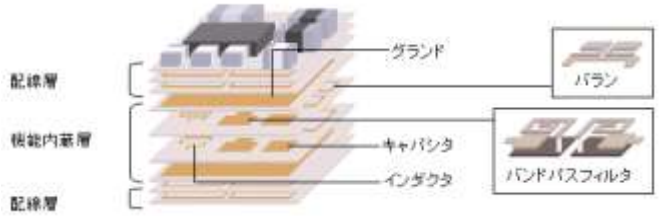
【マイクロストリップ型フィルター】



【コプレーナ型フィルター】



【LTCC多層フィルター】



1.対象品目の概要調査（17）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【フィルター（機械的振動を利用するもの）】
機械的振動を利用したマイクロ波用フィルターとしては、圧電材料と電極を組み合わせた表面弾性波（SAW）フィルターおよびバルク弾性波（BAW）フィルターがある（表7-2-7）。機械的振動を利用した方式では帯域阻止フィルターは形成できず、帯域通過フィルターに限られる。

表7-2-7　マイクロ波用フィルターの種類（機械的振動を利用するもの）

フィルタリング原理	方式		概要	長所	短所	同調方法の例（可能な場合）
機械的振動	表面弾性波（SAW）		圧電体の表面を伝わる弾性波（表面弾性波）を用いて機械的振動をフィルタすることで、圧電体表面の2つの電極間で特定の周波数成分を通過あるいは遮断する。	狭帯域 低コスト キャビティフィルタやセラミックフィルタより小型 低挿入損失	3GHz程度までしか対応できない	
		温度補償SAW（TC-SAW）	SAWフィルターの表面をSiO_2層で覆って温度による中心周波数変動を抑える	狭帯域 キャビティフィルタやセラミックフィルタより小型 低挿入損失	3GHz程度までしか対応できない	
	バルク弾性波（BAW）	圧電薄膜共振子（FBAR）	圧電体の内部を伝わる弾性波（バルク弾性波）を用いて機械的振動をフィルタすることで、圧電体を挟んだ電極間で特定の周波数成分を通過あるいは遮断する。	狭帯域 高周波数化しやすい 高Q値 高周波数ほど小型化 SAWよりも温度の影響非常に少ない Si基板上に半導体技術で作成可能	SAWよりも高価	
		固体実装型共振器（SMR）	圧電体の内部を伝わる弾性波（バルク弾性波）を用いて機械的振動をフィルタすることで、圧電体を挟んだ電極間で特定の周波数成分を通過あるいは遮断する。電極の下部は空隙である。下部電極の下に音響反射膜の層を設ける。	FBARよりも基板への振動漏れが小さくてQ値が高い FBARよりも放熱性が良い FBARよりも堅牢な構造	FBARよりも損失が大きい	

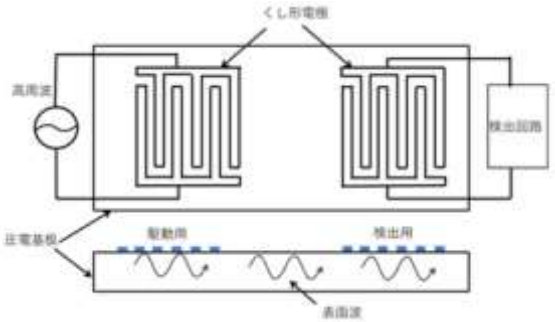
1.対象品目の概要調査（18）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【フィルター（機械的振動を利用するもの）】
　力を加えると変形し、加えた力を取り除くと元の形に戻る固体を弾性体という。表面弾性波（SAW）は弾性体の表面を伝わる波、バルク弾性波（BAW）は弾性体の内部を伝わる波をいう。
　SAWフィルターは、表面のクシ型入力電極に入力した電気信号のうち電極ピッチに応じた波長成分が、圧電材料の表面を進む弾性波に変換されて対向するクシ型の出力電極に伝わり、再び電気信号となって出力されるものである。温度補償SAWは表面に膜を設けて温度による特性変化を抑えたものである（図7-2-24）。
　BAWフィルターは圧電体を挟んで設けられた電極の間で圧電体の内部を進むバルク弾性波を介して特定の周波数の信号を伝える。下部電極の下が空洞（キャビティ）になっていて基板への振動の漏れが少ない圧電薄膜共振子（FBAR）型と、下部電極の下に強度や放熱性を上げるための膜を設けた固体実装型共振子（SMR）がある（図7-2-25）。

図7-2-24　SAWフィルターの模式図

【基本構成】



【温度補償SAW】

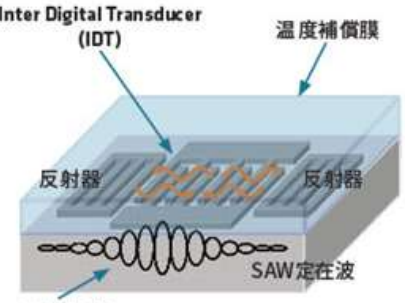
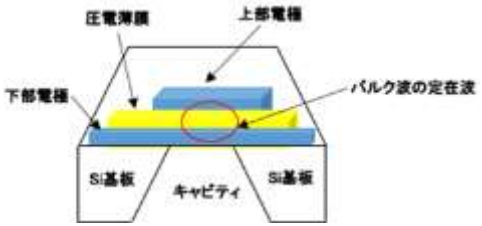
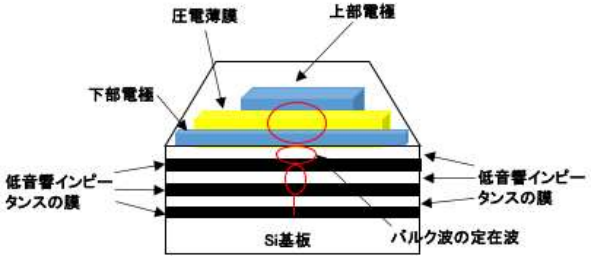


図7-2-25　BAWフィルターの模式図

【FBAR型】



【SMR型】



1.対象品目の概要調査（19）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【フィルター（電磁波共鳴を利用するもの）】
　電磁波の共鳴現象を利用したフィルターには、キャビティや導波管のように導体で囲われた空洞を利用するもの、半透過面間の反射を利用するもの、誘電体材料を用いるもの、周囲の磁界の強さに応じて特定の周波数のマイクロ波と共鳴するフェリ磁性体を利用するものがある（表7-2-8）。

表7-2-8　マイクロ波用フィルターの例（電磁波の共鳴現象を利用するもの）

フィルタリング原理	方式		概要	長所	短所	同調方法の例（可能な場合）
電磁波共鳴	キャビティ		導体壁で囲まれた空間内に放射された電磁波のうち、その寸法および形状で定まる特定の波長の電磁波のみが成長する「共振現象」を利用してフィルタを形成する。	低損失 高Q 大電力に対応可能 狭帯域化可能 正確な周波数にチューニング可能	高価 金属管型は特に大きい 広帯域化困難 周波数が低くなるほど大型化	複数のキャビティを複数の導波管スイッチで切り替える（フィルタバンク方式） アクチュエーターでキャビティ形状を変える
	導波管	中空金属管	導体壁からなる導波管の内部に絞り構造物（アイリス）や柱を設けて、キャビティを複数つなげたフィルタと同等の効果を発揮する。	低挿入損失 高Q 大電力に対応可能	高価 狭帯域 金属管型は特に大きい	
	ファブリペロー共振器		対向する2つの部分透過鏡間を往復する電磁波のうち、位相が一致した場合に干渉により電磁波が強め合う性質を利用	小型 高周波数帯で使用可能	構造が複雑で機械公差の問題で140GHz程度までが限度	アクチュエータで共振器長を直接変える
	誘電体材料	セラミックス共振器	誘電率の高い材料内部では外部空間との境界で電磁波が全反射して閉じ込められる性質を利用し、入力した交流信号で共振した誘電体（セラミックス）が、近傍の別の誘電体を電磁波で共振させる性質を利用して、別の誘電体から交流信号を取り出す。	低挿入損失 減衰量大 高Q	高価 キャビティフィルタほどの電力には対応できない	圧電素子で機械的にキャビティ形状を変える 電圧により可変容量ダイオード（バラクタ）の静電容量を変える フェライト棒を動かして磁界を変える
	フェリ磁性材料	ストリップライン	磁性ガーネットに外部磁場を印加して結晶中の磁気モーメントとマイクロ波により生じる高周波磁場の磁気共鳴を利用する	広帯域可変同調可能（2-18GHz） 高Q値（2000-5000@2-10GHz）	磁場の形成と温度の安定化に大電力が必要	印加する外部磁場の強さを変える

1.対象品目の概要調査（20）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

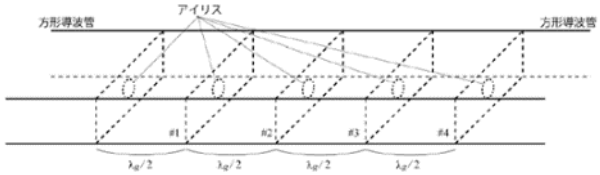
【フィルター（電磁波共鳴を利用するもの）】
図7-2-26に電磁波の共鳴現象を利用したフィルターの例を示す。
キャビティフィルターや導波管フィルターは、金属に代表される導体壁で囲まれた空間内に放射されたマイクロ波のうち、一定の波長のもののみが成長して出力側から放射され、他は反射されて入力側に戻る現象を利用するものである。金属管を用いたものや金属ブロック内に導波路を設けたものがある。
　対向する2枚の部分反射リフレクター間を往復する電磁波のうち、位相が一致した成分のみが干渉で強められる性質を利用したものがファブリペロー型のフィルターである。
　誘電体材料を用いるフィルターは、誘電率の高い材料内部では外部空間との境界で電磁波が全反射して閉じ込められる性質を利用したものである。入力した交流信号で共振した誘電体（セラミックス）が、近傍の別の誘電体を電磁波で共振させる性質を利用して、別の誘電体から交流信号を取り出す。
　フェリ磁性体を用いるフィルターは、フェリ磁性体を介した2本の導電体（ストリップラインなど）の間でマイクロ波をやりとりするもので、外部磁場の強さによって決まるフェリ磁性体の共鳴周波数に相当する周波数成分のみが伝わる。フェリ磁性体としてはイットリウム・鉄・ガーネット（YIG）単結晶が広く使われている。

図7-2-26　マイクロ波用フィルターの例（電磁波の共鳴現象を利用するもの）

【導波管フィルタ（金属ブロック内に形成）】



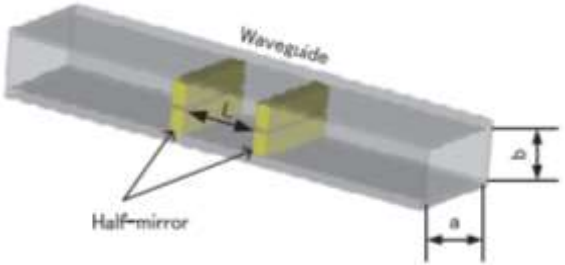
【導波管フィルタ（金属管型）】



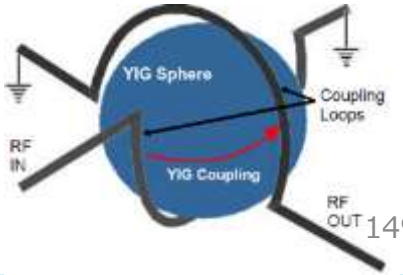
【セラミックス共振器フィルタ】



【ファブリペロー共振器フィルタ】



【フェリ磁性体フィルター】



1.対象品目の概要調査（21）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【フィルター（光領域でのフィルタリングを利用するもの）】

マイクロ波信号を光信号に変調して処理する方式は、1980年代半ばから研究が始まり現在精力的に研究が進められているマイクロ波フォトニクス技術の一つである。マイクロ波を光変調器で光信号に変換し、光領域で種々の光フィルタリング技術を適用した後、光検出器でマイクロ波に復調することでマイクロ波をフィルタリングする。原理的に既存のマイクロ波領域でのフィルタリングに比べ、Q値、挿入損失、帯域幅、遅延で優れた特性を発揮できる可能性を有する。光領域でのフィルタリング方法の多くは既知の技術であるが、誘導ブルリアン散乱（SBS：Stimuated Brillouin Scattering)を利用する方法は2010年代に報告された新しい方法である。

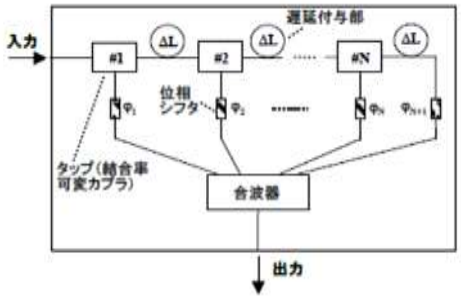
表7-2-9、図7-2-27と次ページの図7-2-28に光領域でのフィルタリングを利用したマイクロ波フィルターの例を示す。

表7-2-9　マイクロ波用フィルターの例（光領域でのフィルタリングを利用するもの）

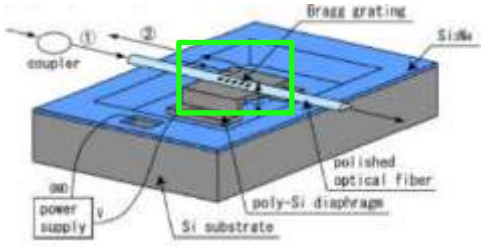
フィルタリング原理	方式	概要	長所	短所	同調方法の例（可能な場合）
光領域でのフィルタリング	光ディレイライン 光回折格子 マッハ・ツェンダー干渉計 ファブリペロー共振器 誘電体多層膜 誘導ブリルアン散乱（SBS） リング共振器	マイクロ波を光変調器で光信号に変換し、光領域で種々の手法でフィルタリングした後に光検出器でマイクロ波に復調する。	電磁干渉を受けにくい 小型 低消費電力 高Q 低挿入損失 高帯域幅 低遅延	大電力には対応できない 電気信号と光信号のリンクでの信号損失、雑音、スプリアス成分混入の改善が必要	屈折率、格子間隔などを電子的に調整

図7-2-27　マイクロ波用フィルターの例（光領域でのフィルタリングを利用するもの）①

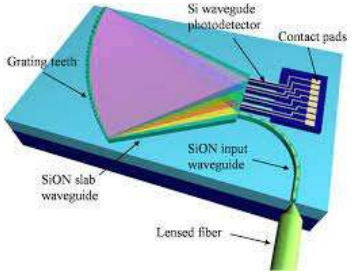
【光ディレイライン（ブロック図）】



【光回折格子（ファイバーブラッググレーティング）】



【光回折格子（アレイ導波路（AWG））】

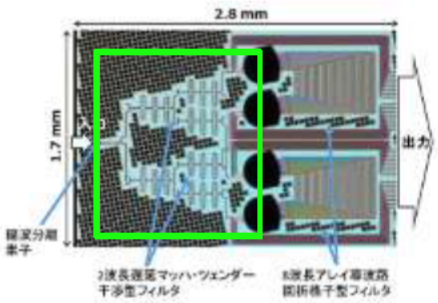


1.対象品目の概要調査（22）

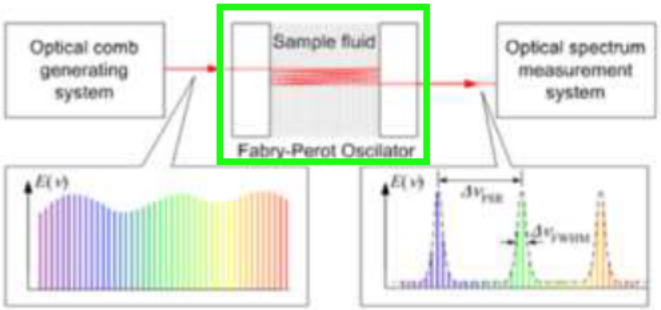
○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

図7-2-28　マイクロ波用フィルターの例（光領域でのフィルタリングを利用するもの）②

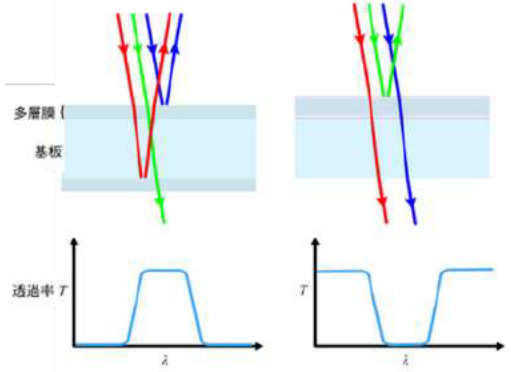
【マッハ・ツェンダー
干渉計カスケード】



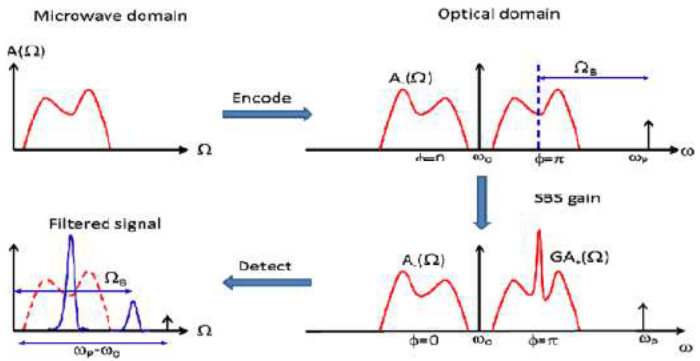
【ファブリペロー共振器（原理）】



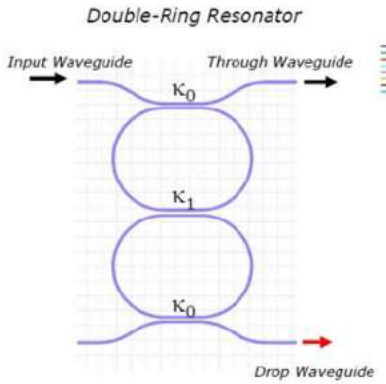
【誘電体多層膜（原理）】

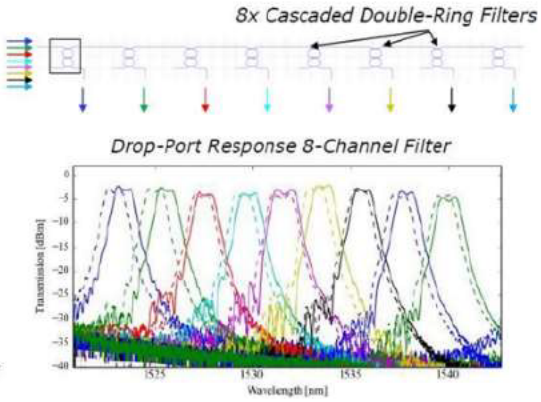


【誘導ブリルアン散乱
（フィルタリングの原理）】



【リング共振器】





1.対象品目の概要調査（23）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【同調可能なフィルター】
　高速移動体通信において周波数帯が変化していく中で通信を行う場合など、通過・阻止周波数帯域を変える機能はマイクロ波技術で必須の技術である。
　帯域可変の方式としては表7-2-10と次頁以降に示す通り、手動またはモーターによる方法（図7-2-29）、MEMS（微小電子機械システム）の動作による方法（図7-2-30）、温度で制御する方法（図7-2-31）、磁気的に制御する方法（図7-2-32）、電子的に制御する方法（図7-2-33）、電磁光学的・光学的に制御する方法（図7-2-34）などがある。

表7-2-10　マイクロ波用フィルターの同調方法の例

調整手段	フィルター種類	原理
手動またはモーターで調整	同軸型フィルター（キャビティ型）	ネジでキャビティ内の容量Cを調整
	ファブリペロー共振器	モーターでエタロン（反射面）間の距離を調整
MEMSの動作で制御	キャビティ型	圧電素子や静電気動作等でMEMSを駆動しキャビティ内の容量を調整
	分布定数型（常電導）	バネと静電気動作の組み合わせ等でMEMSを駆動しインダクタンス等を調整
	誘電体フィルター	圧電素子等でMEMSを駆動し誘電体間の距離を調整
	ブラッググレーティングファイバ	poly-SIの遠近でエバネッセント場（電磁場）を調整してグレーティングフィルターの屈折率を調整
	ファブリペロー共振器	圧電素子でエタロン（反射面）間の距離を調整
温度で制御	ファブリペロー共振器	干渉する層の厚さを熱で調整
	分布定数型（超電導）	温度で超電導状態を制御
磁気的に制御	フェリ磁性材料	外部磁場の強さでフェリ磁性体の共振周波数を調整
電子的に制御	可変抵抗、容量、インダクタ	バラクタで可変容量ダイオードの静電容量を変える
	マッハ・ツェンダー干渉計	光電材料の屈折率変化で光信号の位相などを変える
電磁光学的・光学的に制御	誘導ブリルアン散乱	キャリア光とポンプ光の波長を制御
	リング共振器	電磁光学的に光導波路の屈折率を変化させる
	光ディレイライン	キャリア光の波長を変える

令和○　○○○

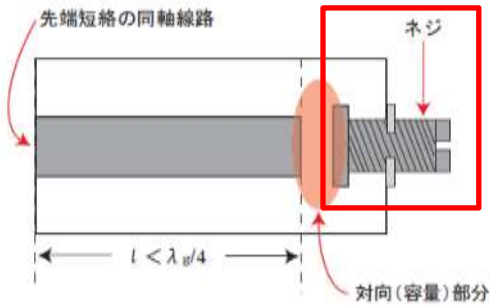
1.対象品目の概要調査（24）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

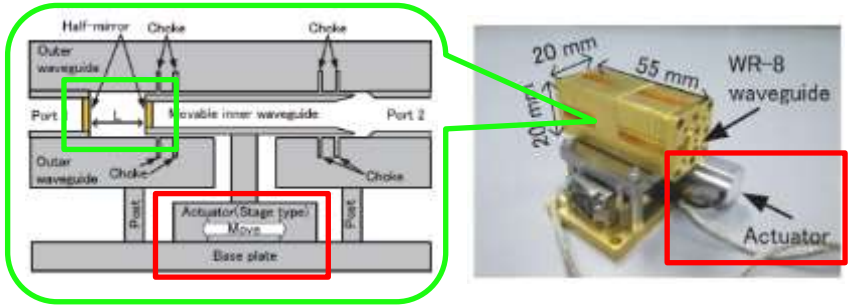
【同調可能なフィルター（手動またはモーターによるもの）】
　手動またはモーターによる方法では、キャビティ型フィルターの容量を調整するものや、ファブリペロー共振器のエタロン（反射面）間の距離を変えるものなどがある（図7-2-29）。

図7-2-29　マイクロ波用フィルターの同調方法の例（手動またはモーターによる方法）

【同軸型フィルター（キャビティ型）】



【ファブリペロー共振器フィルター】



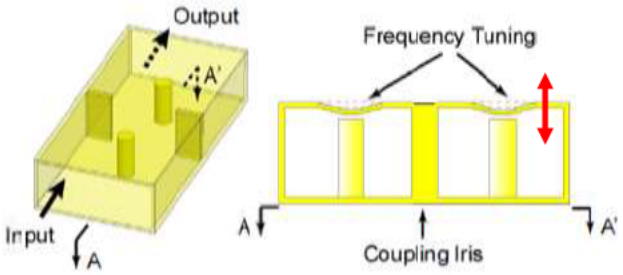
1.対象品目の概要調査（25）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

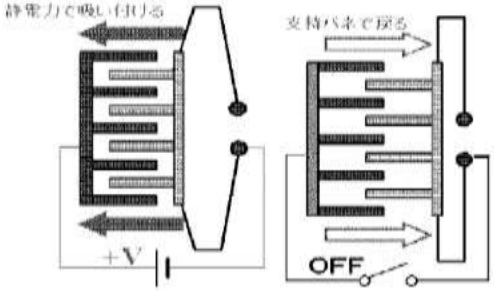
【同調可能なフィルター（MEMSの動作で制御するもの）】
MEMS（微小電子機械システム）では、圧電素子やバネ、静電気作用、熱膨張などで部品を動かすことができる。これを利用して、キャビティ型フィルターの容量を調整するもの、分布定数型フィルターのインダクタンスを変えるもの、誘電体フィルターの誘電体間の距離を変えるもの、poly-Siの遠近でエバネッセント場（電磁場）を調整してグレーティングフィルターの屈折率を調整するもの、ファブリペロー共振器のエタロン（反射面）間の距離を変えるものなどの例がある。（図7-2-30）。

図7-2-30　マイクロ波用フィルターの同調方法の例（MEMSの動作で制御する方法）

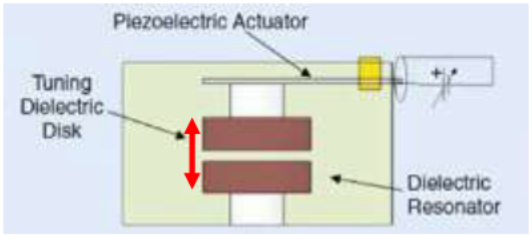
【キャビティ型フィルター】



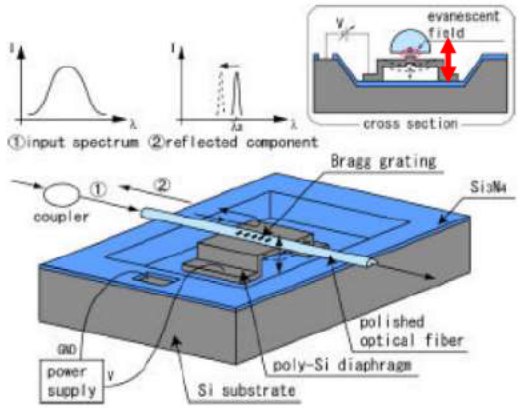
【分布定数型フィルター（インダクタ部分）】



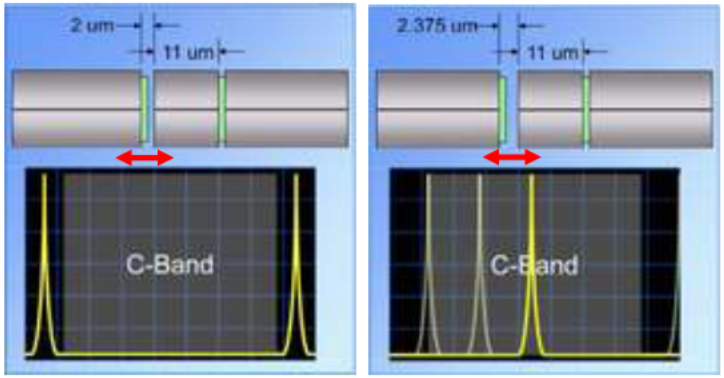
【誘電体フィルター】



【ブラッググレーティングフィルター】



【ファブリペロー共振器フィルター】



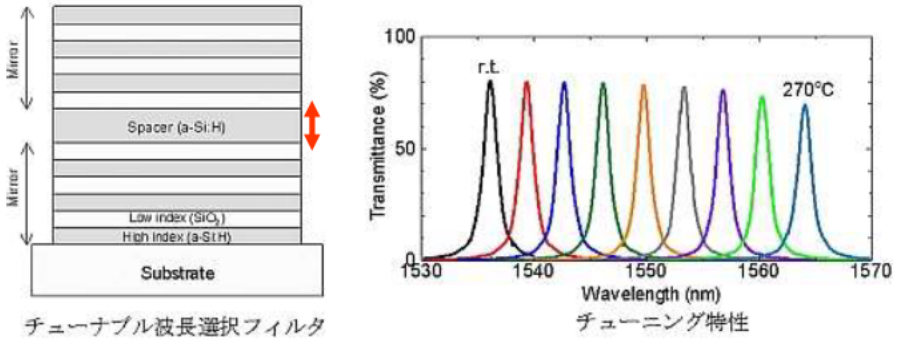
1.対象品目の概要調査（26）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【同調可能なフィルター（温度で制御するもの）】
温度で制御する方法としては、ファブリペロー共振器のエタロン（反射面）間の距離を熱膨張・収縮で変えるもの、超電導材料を用いた分布定数型あるいは集中定数型回路の電気特性を温度で変えるものなどがある（図7-2-31）。
磁気で制御する方法としては、外部磁界強度を変えてフェリ磁性体の共振周波数を変えるものがある（図7-2-32）。

図7-2-31　マイクロ波用フィルターの同調方法の例（温度で制御する方法）

【ファブリペロー共振器フィルター】



チューナブル波長選択フィルタ　　チューニング特性

【超電導フィルター（外観）】

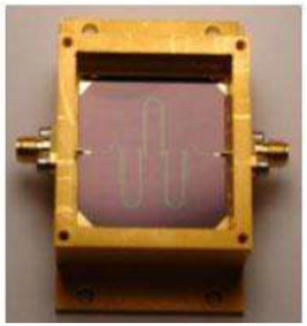
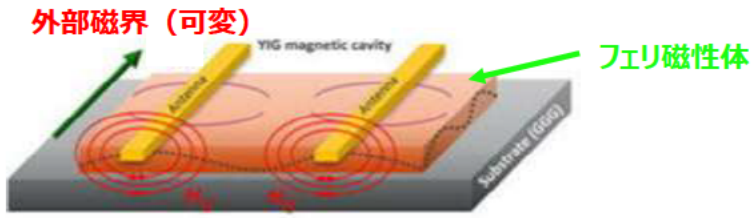


図7-2-32　マイクロ波用フィルターの同調方法の例（磁気で制御する方法）



1.対象品目の概要調査（27）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【同調可能なフィルター（電子的に制御するもの）】
　電子的に制御する方法の一つに、集中定数回路や分布定数回路からなるフィルターの抵抗・容量・インダクタを電子的に調整する方法がある。容量調整のために広く用いられるものがバラクタ（可変容量ダイオード）である。バラクタは図7-2-33に示すように、半導体の空乏層の幅を電圧で調整することにより容量を変化させるものである。
　このバラクタにより、集中定数回路や分布定数回路フィルターの容量を変えて同調するものや、誘電体フィルターの共振周波数を変えるものなどがある（図7-2-34）。

図7-2-33　バラクタの動作原理

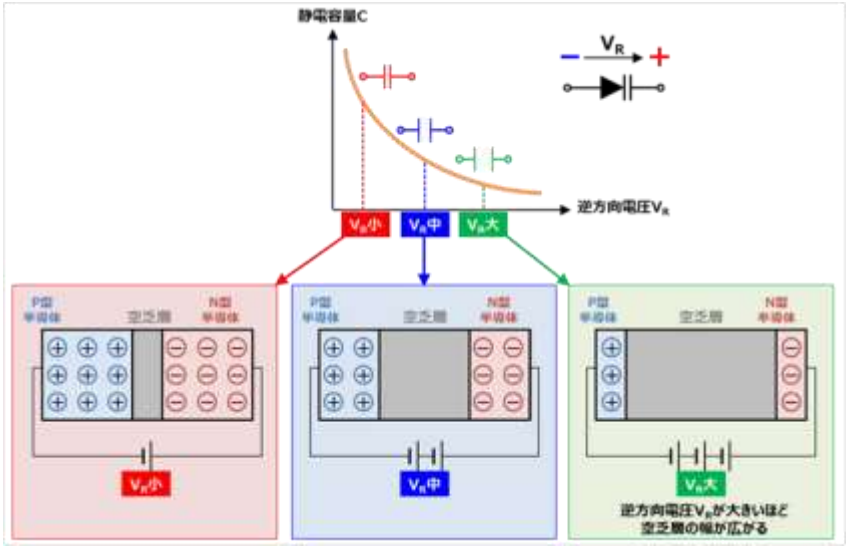
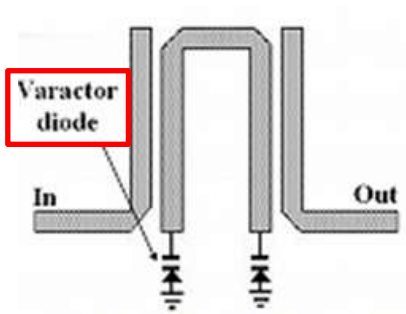
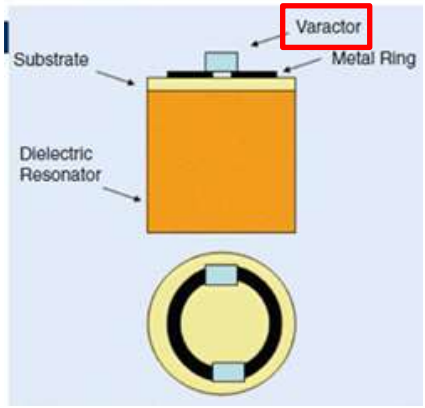


図7-2-34　マイクロ波用フィルターの同調方法の例
（電子的に制御する方法）

【集中定数回路フィルター
（キャパシタ部分）】



【誘電体フィルター】



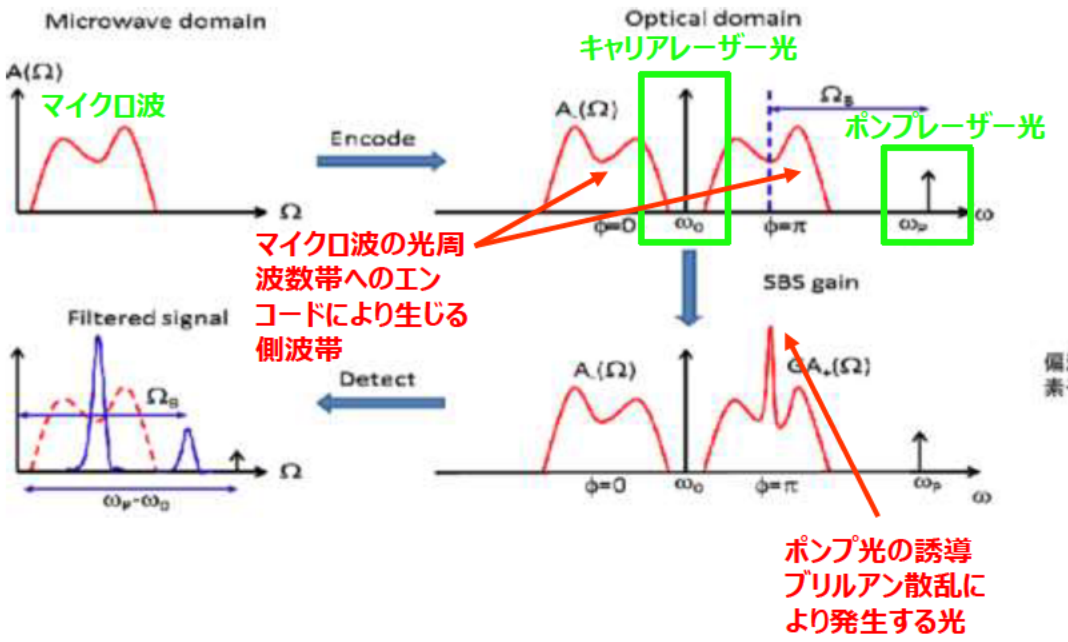
1.対象品目の概要調査（28）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

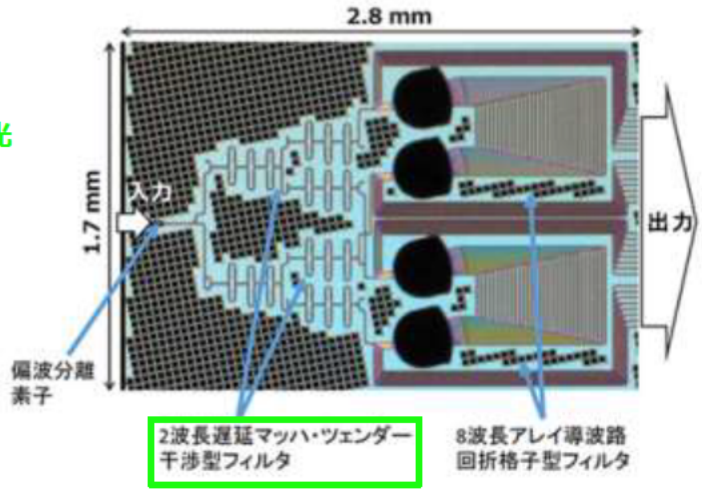
【同調可能なフィルター（電磁光学的・光学的に制御するもの）】
電磁光学的・光学的に制御する方法としては、レーザー光の波長を変えて制御するもの、光導波路の屈折率を電磁光学的に変化させるものなどがある（図7-2-35）。

図7-2-35 マイクロ波用フィルターの同調方法の例（電磁光学的・光学的に制御する方法）

【レーザー光の波長で制御（誘導ブリルアン散乱フィルター）】



【光導波路の屈折率を電磁光学的に制御（マッハツェンダ型フィルター）】



電磁光学的に屈折率を変えて通過光の位相を制御

1.対象品目の概要調査（29）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【ハーモニックミクサ、コンバータ】
　マイクロ波用デバイスの1種であるハーモニックミクサは、スペクトラムアナライザーやネットワークアナライザーなどの測定器と測定対象との間に挿入し、スペクトラムアナライザーやネットワークアナライザーなどの動作周波数範囲を拡張するために使用する回路である。測定対象からの高周波信号と測定器の局部発振器や信号発生器の信号から発生する高調波（ハーモニック）信号を混合してその周波数差の信号（IF信号）を測定器に戻す。図7-2-36にスペクトラムアナライザーと組み合わせて使った例と製品の写真を示す。これにより、測定対象からのミリ波などの高周波信号をより低い周波数のIF信号で解析できるため、スペクトラムアナライザーの測定周波数範囲が拡張したことになる。
　コンバータも測定対象からの高周波信号と外部の発振器からの信号を混合してその周波数差IF信号を測定器に送る回路である。しかしハーモニックミクサとは異なり発振器の信号の高調波ではなく発振器の信号の周波数を回路によりn倍する（逓倍する）ことで周波数を高くした信号を使う（図7-2-37）。このため測定器の発振器ではなく、別の発振器と逓倍器が必要である。ハーモニックミクサと比べて、IF信号の周波数を測定器の入力周波数の上限まで上げることができる。

図7-2-36　ハーモニックミクサの原理と製品例

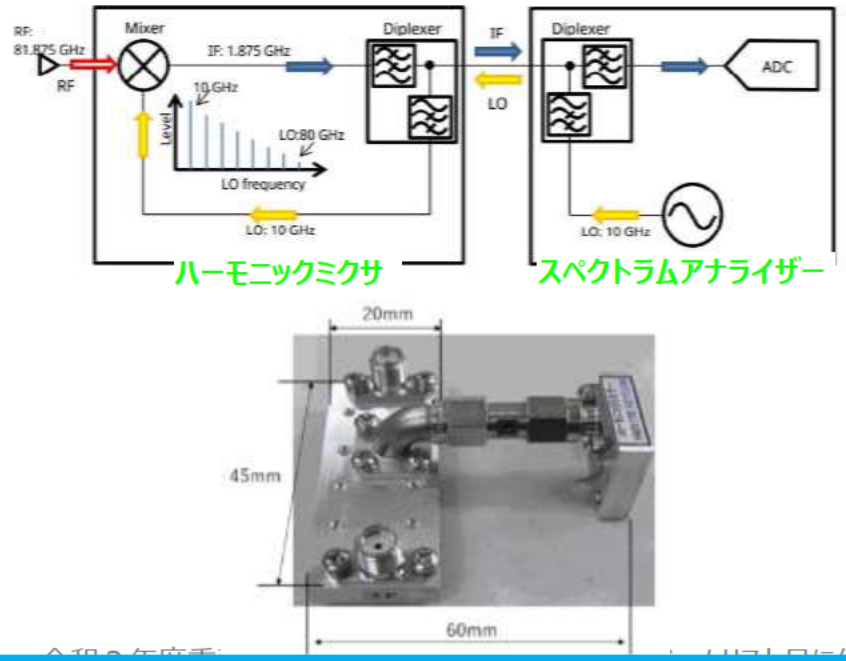
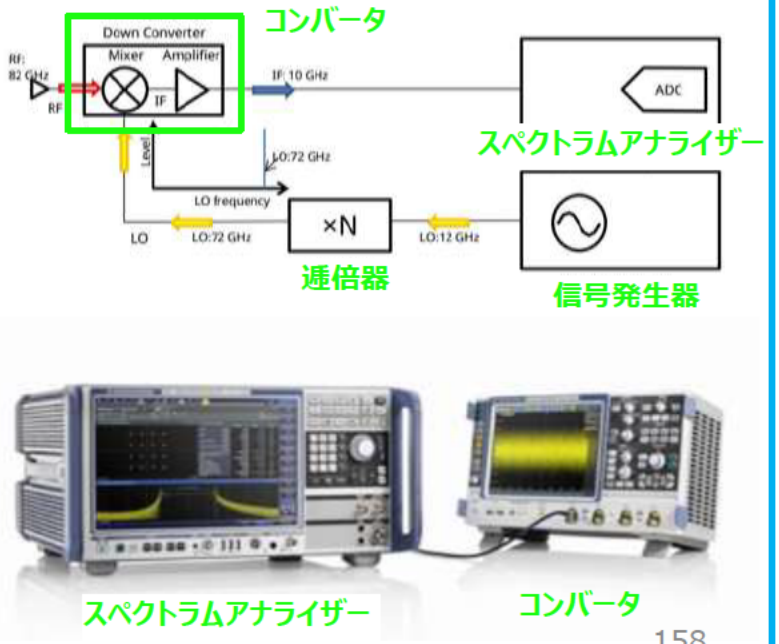


図7-2-37　コンバータの原理と製品

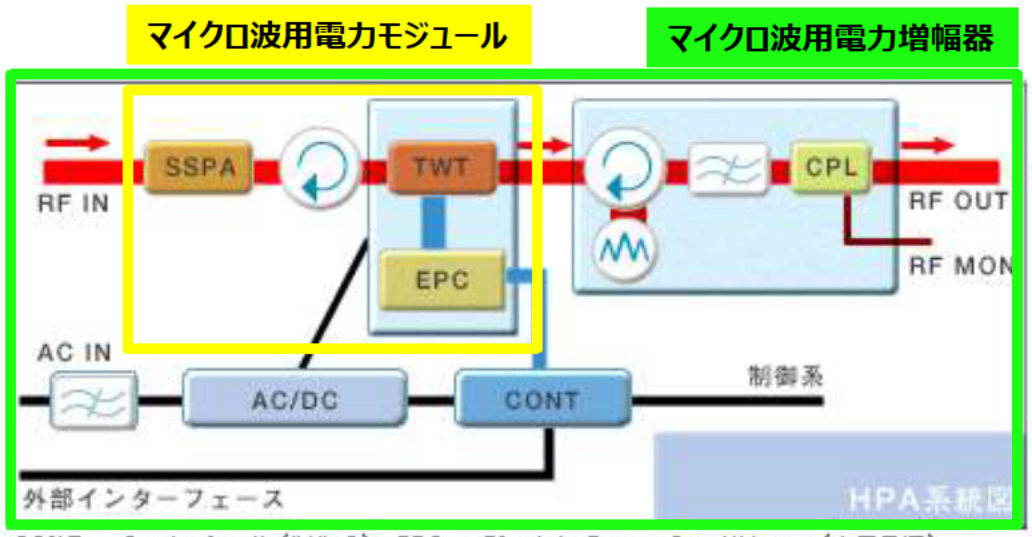


1.対象品目の概要調査（30）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【マイクロ波用電力増幅モジュール、電力増幅器】
　マイクロ波による通信などで情報を送るためにマイクロ波を増幅する装置をマイクロ波用電力増幅器という。マイクロ波の増幅にはマイクロ波用固体増幅器単体を使う場合や、真空電子管とマイクロ波用固体増幅器を組み合わせて使う場合がある。マイクロ波用電力増幅器は、高周波系、電源系、制御系により構成される。
　マイクロ波用電力増幅器の一部で、高周波増幅部と電源系が一体化して一つのモジュールとなっているものをマイクロ波用電力モジュールという。
　図7-2-38に、進行波管（TWT）とマイクロ波用固体増幅器（SSPA）を組み合わせたマイクロ波用電力増幅器およびマイクロ波用電力増幅器の一般的な系統図を示す。また図7-2-39に製品例を示す。

図7-2-38　マイクロ波用の電力増幅器および電力モジュールの系統図
（進行波管と固体増幅器を組み合わせて使う例）



CONT ： Control unit（制御系）　EPC ： Electric Power Conditioner（高圧電源）
CPL ： Coupler（方向性結合器）

図7-2-39　マイクロ波用の電力増幅器
および電力モジュールの製品例

【マイクロ波用電力モジュール（TWT型）】



【マイクロ波用電力増幅器】

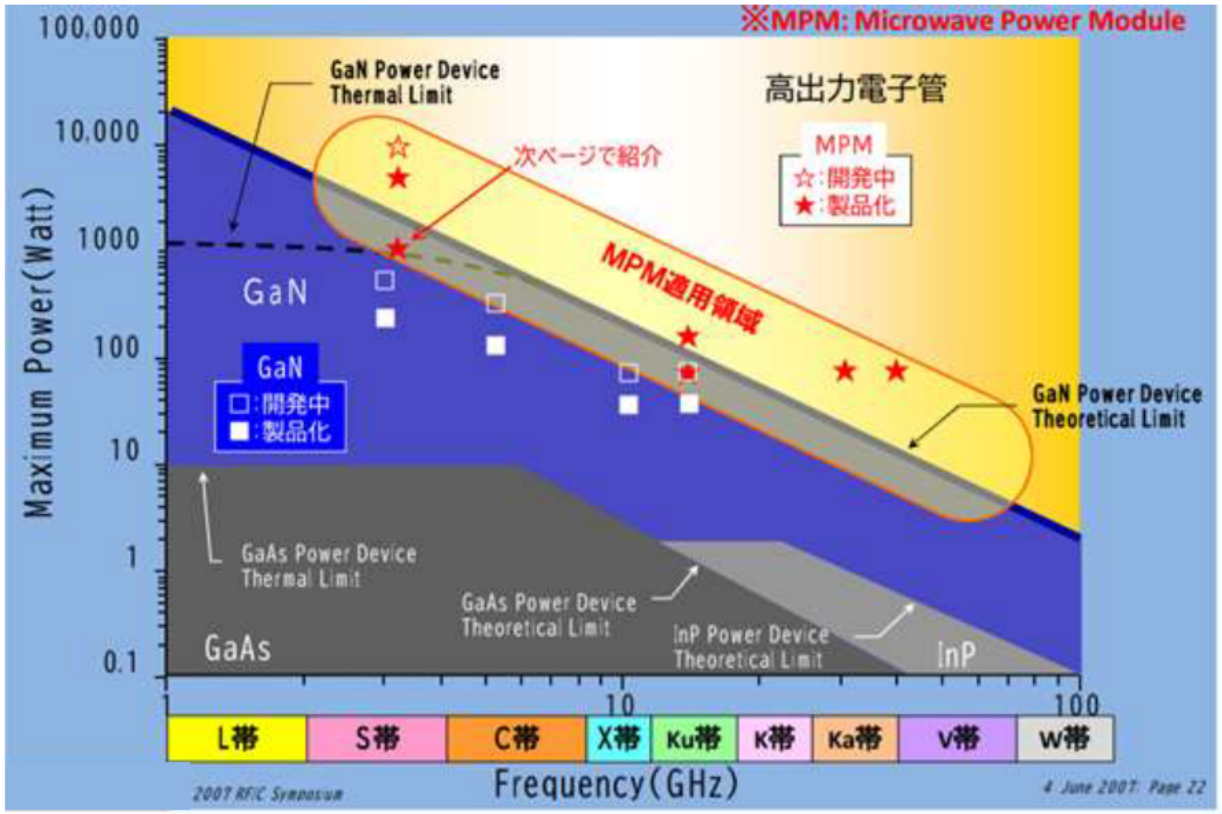


1.対象品目の概要調査（31）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【マイクロ波用電力増幅モジュール、電力増幅器】
　マイクロ波用電力増幅器で真空電子管と固体増幅器を組み合わせて使うことにより、真空電子管と固体増幅器それぞれ単独では得られない領域の特徴（高出力、小型、低消費電力）を持つ増幅器を実現できる（図7-2-40）。

図7-2-40　マイクロ波用電力増幅モジュール（MPM）の性能の位置づけ



1.対象品目の概要調査（32）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【発振器又は発振機能を有する組立品】
　発振器又は発振機能を有する組立品にはマイクロ波を発振するためのデバイスが必要である。
　マイクロ波の主な発振方法としては表7-2-11に示すように、①磁界で制御された電子流の共振によるもの、②正帰還を利用するもの、③負性抵抗を示す材料を利用するもの、④低周波を発振する振動子と高周波化回路を用いるもの、⑤機械的振動を利用するものがある。
　①は主に真空管デバイスによる方法である。真空電子デバイスには発振機能と増幅機能を持つものがあり、マグネトロン、ジャイロトロンについては先に表7-2-3、図7-2-4で示した。クライストロンは増幅機能を持つものが使われることが多いが、反射型クライストロンは発振器である。ただし現在では半導体発振器に置き換えられ、ほとんど使われていない。

表7-2-11　マイクロ波発振機能を有するデバイス

磁界で制御された電子流の共鳴	マグネトロン
	ジャイロトロン
	反射型クライストロン
正帰還回路を利用するもの	バイポーラ接合トランジスタ（BJT）
	電界効果トランジスタ（FET）
負性抵抗を示す材料を利用するもの	ガン（Gann）ダイオード
	インパット（IMPATT）ダイオード
低周波発振器の信号周波数を高周波数化するもの	周波数逓倍器
	周波数シンセサイザ
機械的振動を利用するもの	SAW発振器

1.対象品目の概要調査（33）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【発振器又は発振機能を有する組立品】

表7-2-11の②の正帰還とは、図7-2-41に示すとおり、最初に入力した雑音（種々の周波数からなる信号）を増幅後、フィルターにより目的の周波数の信号のみを増幅器に戻す、という動作を繰り返すことにより、目的の周波数の信号を発振するものである。フィルターには誘電体やフェリ磁性体が使われることもあり、それぞれ誘電共振発振器（DRO）やYIG（イットリウム鉄ガーネット）発振器などと呼ばれることがある。

③の方式で利用される負性抵抗性とは、電流電圧特性において図7-2-42のように電圧増加に伴い電流値が減少（右下がり）となる領域を有する性質である。この電圧付近における電流の増減（振動）を利用してマイクロ波を発振する。

図7-2-41　正帰還による発振の原理

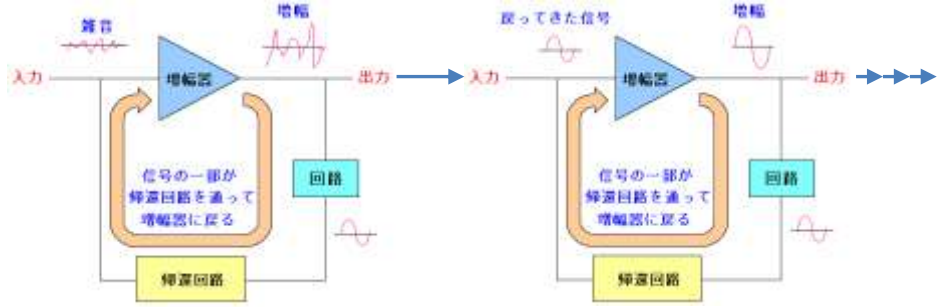
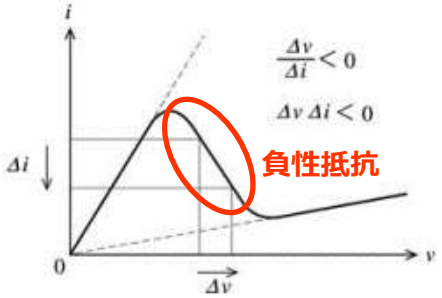


図7-2-42　負性抵抗性



1.対象品目の概要調査（34）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【発振器又は発振機能を有する組立品】

表7-2-11の④は、特定の周波数の電気信号に含まれる周波数n倍の成分（高調波）を共振させる回路（逓倍回路）や位相同期（PLL：Phase Locked Loop）回路により、基準発振器の信号を高周波数化して出力するものである（図7-2-43）。基準発振器には水晶発振器などが使われる。PLL回路は入力信号の周波数を1/n倍にする分周器や2つの入力信号の位相に応じた電圧を出力する位相比較器などからなり、基準信号機と電圧制御発振器からのそれぞれ分周された位相が合うように電圧制御発振器の電圧を調整することで、基準発振器のN/M倍の周波数で基準発振器並みの安定な周波数信号を発生させる。

表7-2-11の⑤は圧電基板上に形成したクシ型の電極と反射器により、電極から発生したSAW（弾性表面波）が反射器との間に閉じ込められて共振する性質を利用したものである（図7-2-44）。周波数を高くするにはクシ型の間隔を狭くする必要がある。2.5GHz程度までの周波数を直接発信できる。

図7-2-43　基準発振器の信号の高周波数化

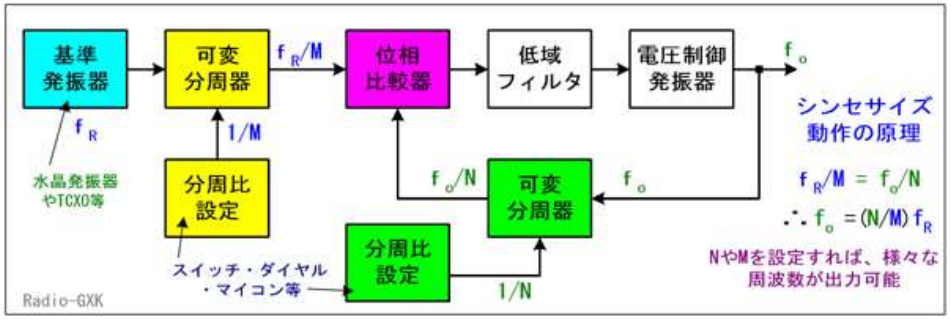
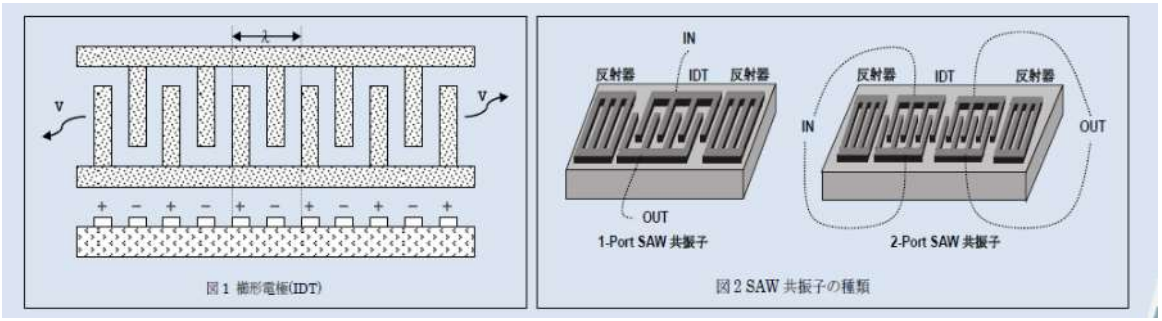


図7-2-44　SAW発振器と電極の構造



1.対象品目の概要調査（35）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【周波数シンセサイザー】
周波数シンセサイザーの主な方式には位相同期（PLL）シンセサイザーと、ダイレクトデジタルシンセサイザ（DDS）の２つがある。
PLLシンセサイザーは、すでに前頁の図7-2-43に示したように、2つの分周器（例では1/M倍と1/N倍）によって、基準信号のN/M倍のさまざまな周波数の信号を発生することができる。
DDSは、ROMに予め格納されている多数の1周期分の波形（正弦波や三角波など）を、位相アキュムレーターで設定される鋸歯状デジタルデータ（出力波形の位相に対応）に従って出力することで様々な波形を発生させることができる装置である（図7-2-45）。
PLLシンセサイザーは信号のフィードバックの過程を伴うため、高速の周波数の切換えは難しい反面、DDSのような位相歪みのない高いS/N比の信号を発生させられる。またサンプリング過程のあるDDSでは原理上、サンプリング周波数は基準信号の1/2の周波数（ナイキスト周波数）以下に限られる。

図7-2-43（再掲） PLLシンセサイザー

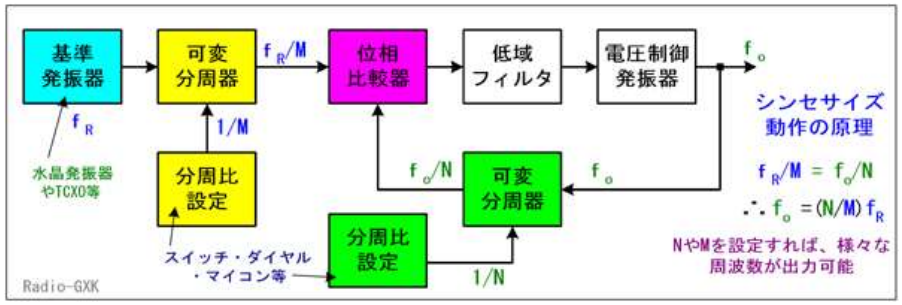
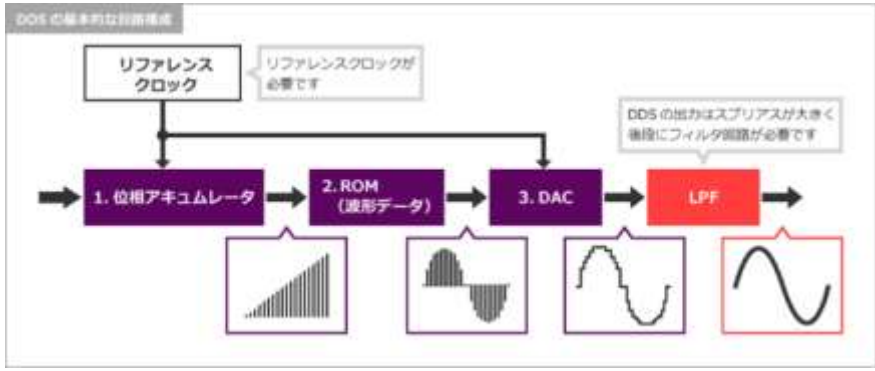


図7-2-45 DDS



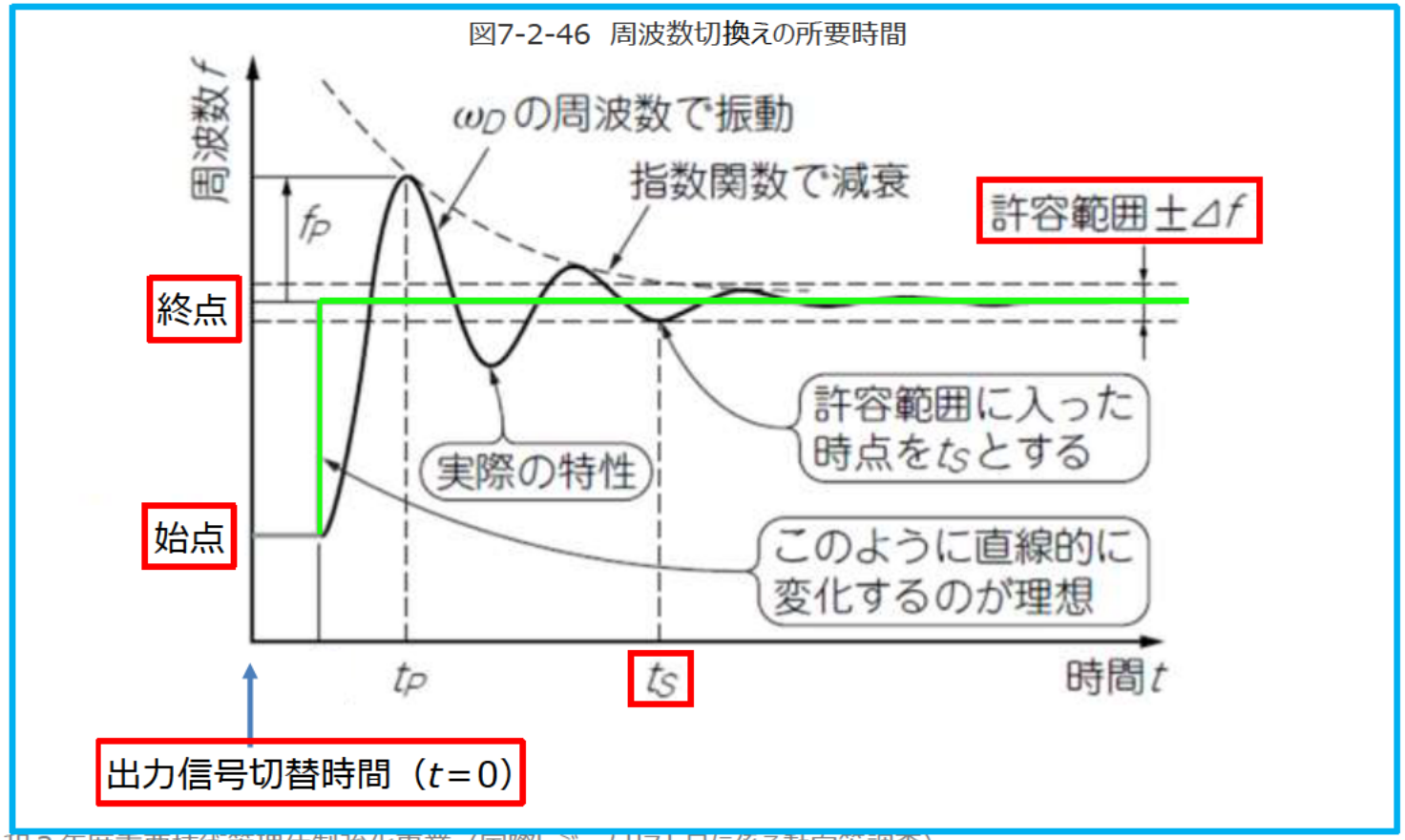
1.対象品目の概要調査（36）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【周波数切換えの所要時間】

図7-2-46に示すとおり、信号発生器はある周波数（始点）から別の周波数（終点）に切り換える際に一定の時間を要する。出力信号が切り替えられた時点（t=0）から、終点の周波数を中心とした一定の幅の周波数以内（±⊿f）に達するまでの時間（t_s）を周波数切換えの所要時間という。±⊿fについて、経済産業省「輸出貿易管理令の運用について」では、終点の±100Hz以内（出力周波数1GHz未満）、又は終点の±0.1ppm以内（出力周波数1GHz以上）を規制値としている。

図7-2-46　周波数切換えの所要時間

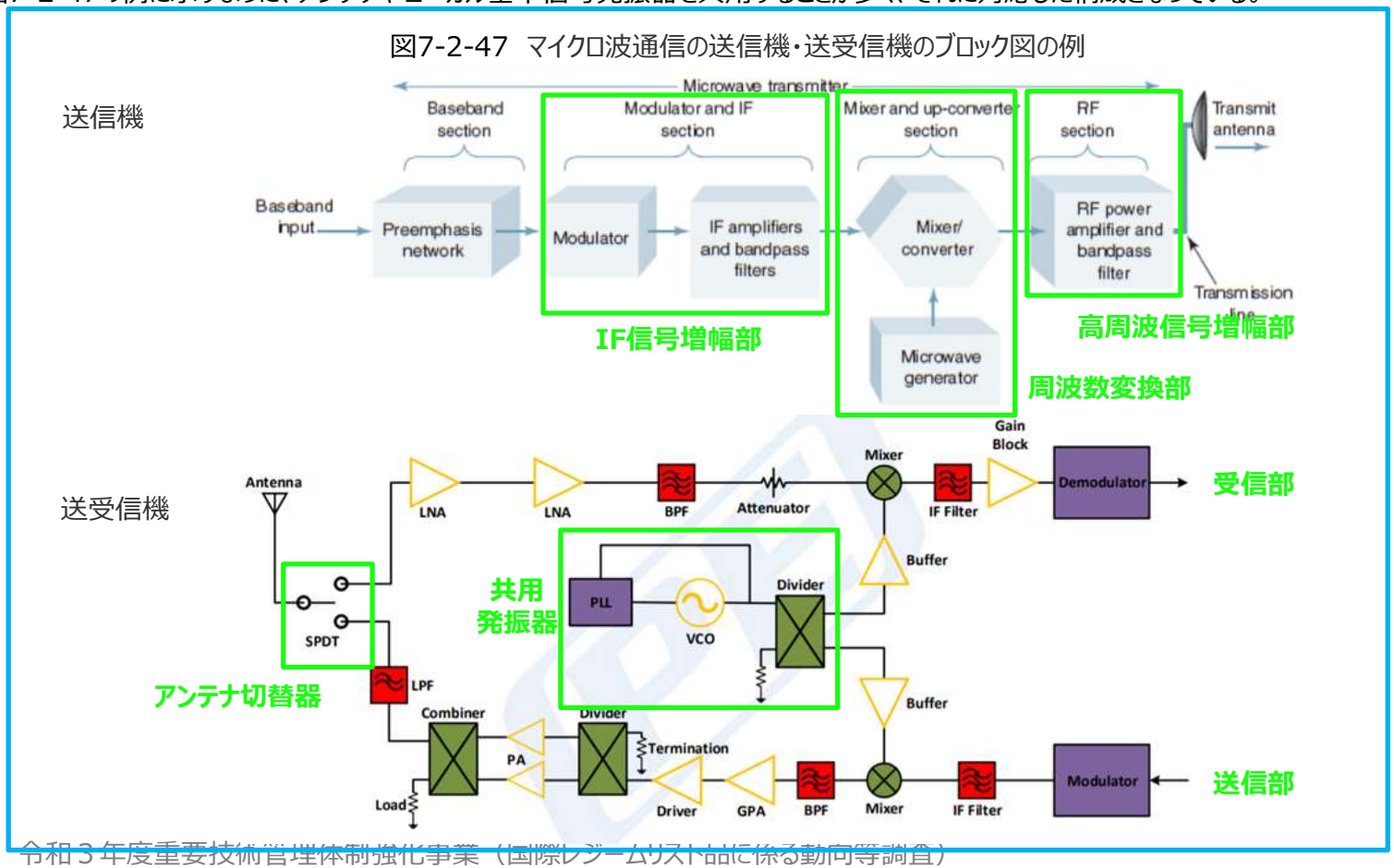


1.対象品目の概要調査（37）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【マイクロ波送受信機】
　マイクロ波の送受信の代表例として、通信とレーダーを取り上げ、ついてブロック図の例を示す。
　一般にマイクロ波通信の送信機のブロック図は図7-2-47に示すとおり、送信する情報（IF信号）の増幅部、周波数変換部（マイクロ波化）、高周波信号の増幅部からなる。一方マイクロ波受信器は送信機と逆の経路をたどって信号が出力されるが、送受信機能が一体となっている場合は、図7-2-47の例に示すように、アンテナやローカル基準信号発振器を共用することが多く、それに対応した構成となっている。

図7-2-47　マイクロ波通信の送信機・送受信機のブロック図の例

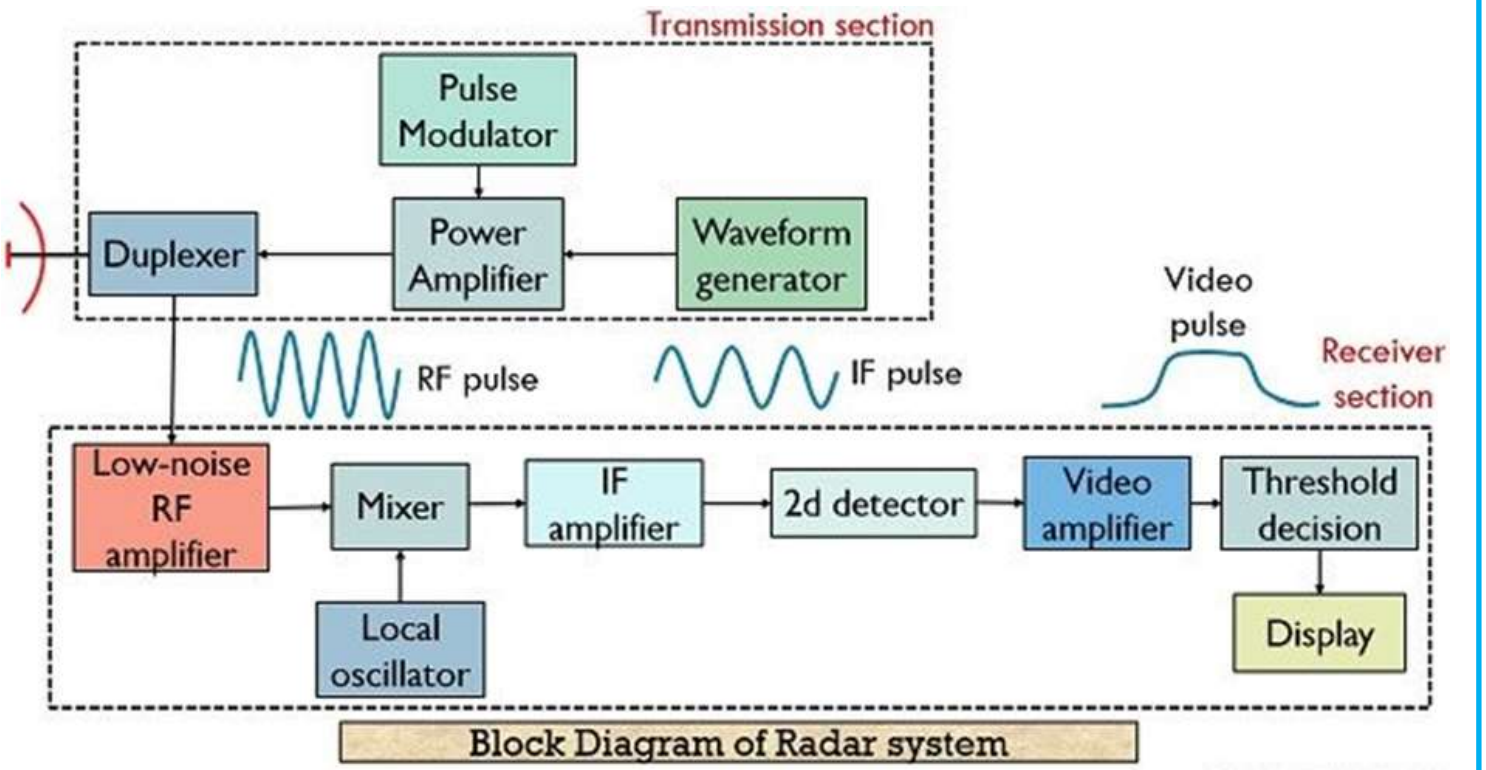


1.対象品目の概要調査（38）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【マイクロ波送受信機】
　図7-2-48は一般的なパルスレーダーのブロック図の例である。発信部はマイクロ波をそのまま発信するため、受信部に比べて単純な構成となっており、マイクロ波を増幅してアンテナから発信する。パルスモデュレーターによってパルス波を発信することが可能である。受信部は高周波信号の増幅部、周波数変換部、変換された低周波数信号の増幅部を経て画像表示される。
　モノリシックマイクロ波集積回路では、図7-2-47、図7-2-48のブロック図で示した回路の一部が一つの半導体基板上に形成されている。

図7-2-48　パルスレーダーのブロック図の例



1.対象品目の概要調査（39）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【電子的な位相シフト】
　多数のアンテナ素子からなるフェーズドアレイアンテナを有するフェーズドアレイレーダー（図7-2-49）では、その名の示すとおり各アンテナ素子の位相の制御（移相）を素子ごとに行うことで、発信するマイクロ波の方向をアンテナを機械的に動かすことなく電気的に制御することができる。またアンテナ素子が移相機能のみを持つパッシブ式に対し、アクティブ式では各素子が送信および受信の機能も有する。
　マイクロ波の位相を変えるには共振回路のキャパシタンスかレジスタンスを変える方法があるが、①キャパシタンスを可変容量ダイオード（バラクタ）で変える方法、②レジスタンスをトランジスタで変える方法（図7-2-50）などがある。

図7-2-49　フェーズドアレイレーダー

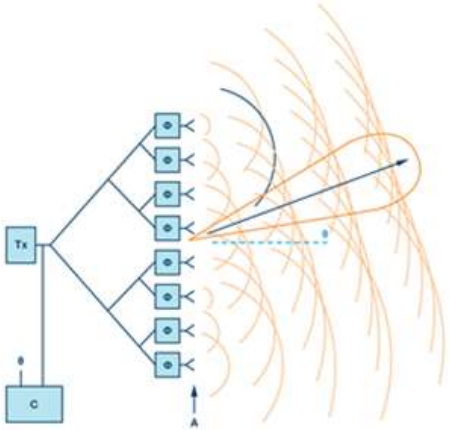
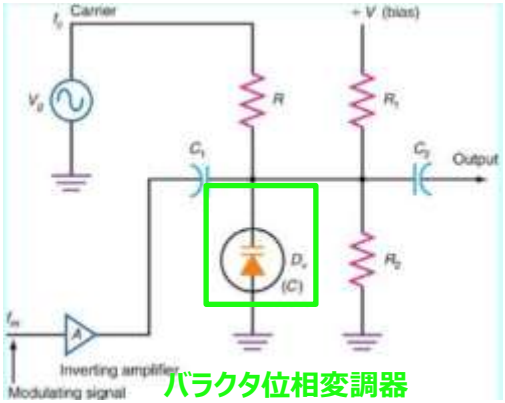
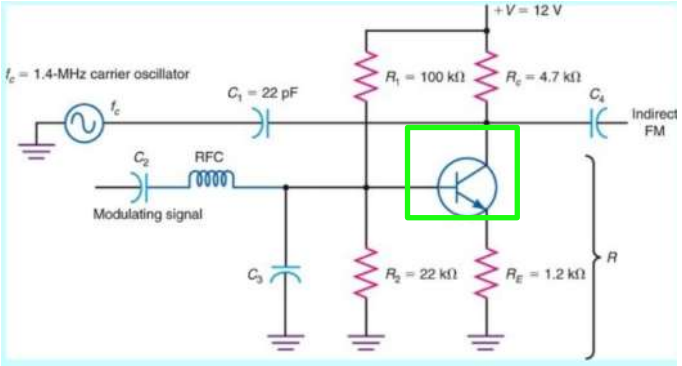




図7-2-50　マイクロ波の位相制御方法



バラクタ位相変調器



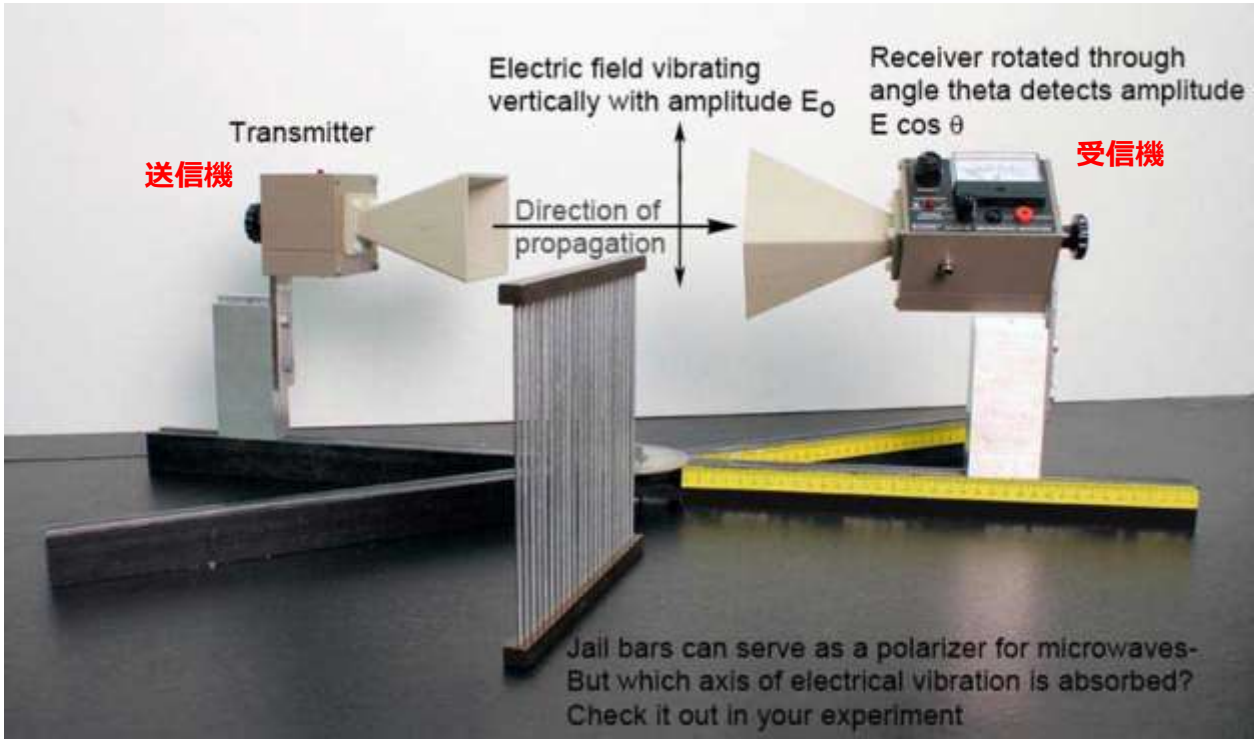
トランジスタ位相シフタ

1.対象品目の概要調査（40）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【マイクロ波用試験受信機】
　マイクロ波用の試験受信器には確立された共通の分類があるわけではないが、アンテナ一体型の小型で簡易な構造のものとしては図7-2-51に示すようなものがある。

図7-2-51　マイクロ波試験用送信機および受信機



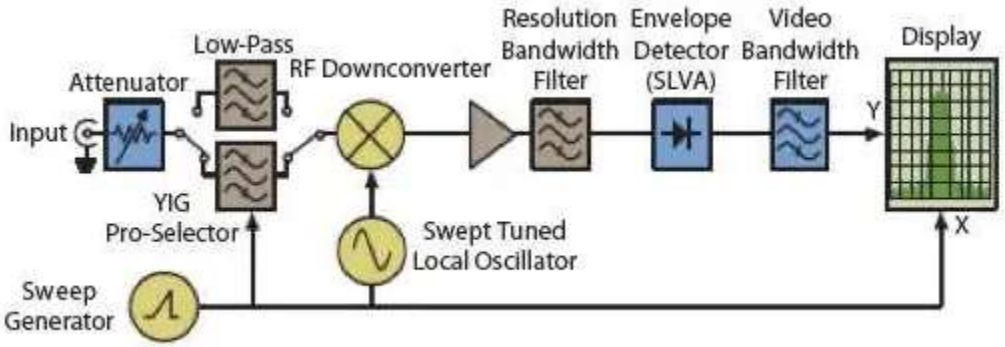
1.対象品目の概要調査（41）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

【マイクロ波用試験受信機】
マイクロ波の解析に広く使われているのがスペクトラムアナライザー（周波数分析機）である。スペクトラムアナライザーが、受信した信号を同時に表示するための機能を有するのに対し、受信した信号の解析にさらに特化し、スペクトルの表示の同時性を有さない装置もあり、シグナルアナライザーなどと呼ばれている（図7-2-52）。図7-2-52に示した例では、シグナルアナライザーは時間ごとに取り込んだ時間領域の信号をデジタル化後いったんメモリーに記憶し、必要に応じこのデータを呼び出して解析を行う。
時間領域の信号データの解析のために周波数領域のデータに変換すると位相の情報は失われてしまう。このため、時間領域のデジタルデータをアナログ信号に戻して位相に関する解析を可能にする機能を備えているシグナルアナライザーがあり、ベクトルシグナルアナライザーと呼ばれることがある（図7-2-53）。

図7-2-52　スペクトラムアナライザーとシグナルアナライザー

【スペクトラムアナライザー】



【シグナルアナライザー】

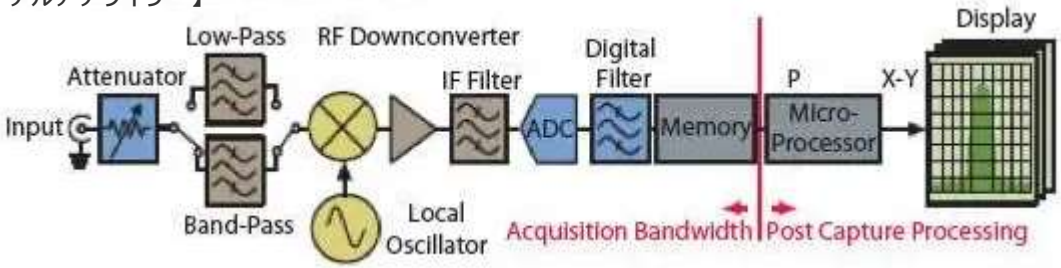
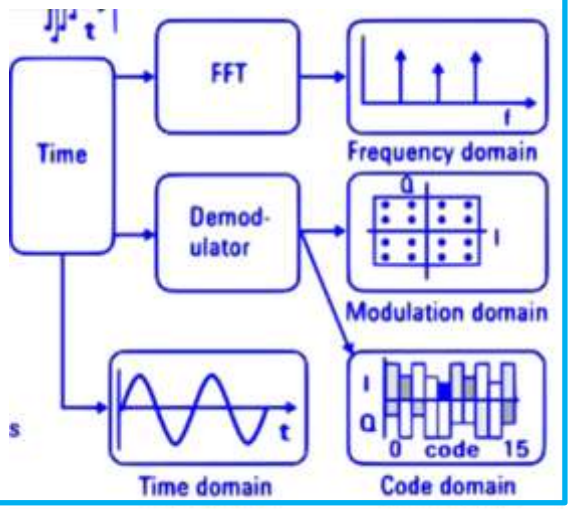


図7-2-53　ベクトルシグナルアナライザーの解析機能



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（1）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。
なお黄色の部分はイ（四）の頁で比較する。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(2)	6		二	二 マイクロ波用機器又はミリ波用機器の部分品であって、次のいずれかに該当するもの イ 真空電子デバイス(クライストロン、進行波管及びこれらから派生したものを含む。以下ロにおいて同じ。)であって、次のいずれかに該当するもの（（四）に該当するものを除く。） 真空電子デバイス 真空回路における電磁波の伝搬又は無線周波数空洞共振器を使用した電子ビームの相互作用を基礎とした電子デバイスをいう。	

Wassenaar規制番号 3桁	細番					Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b					b. Microwave or millimetre wave items, as follows: Technical Note For purposes of 3.A.1.b., the parameter peak saturated power output may also be referred to on product data sheets as output power, saturated power output, maximum power output, peak power output, or peak envelope power output.
		1				1. "Vacuum electronic devices" and cathodes, as follows: "Vacuum electronic devices" Electronic devices based on the interaction of an electron beam with an electromagnetic wave propagating in a vacuum circuit or interacting with radiofrequency vacuum cavity resonators. "Vacuum electronic devices" include klystrons, travelling-wave tubes, and their derivatives.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（2）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(2)	6		二	（一）進行波真空電子デバイスであって、次のいずれかに該当するもの 1　動作周波数が31.8ギガヘルツを超えるもの 2　フィラメントを加熱してから定格出力に達するまでの時間が３秒未満の熱陰極を有するもの 3　空胴結合形のものであって、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が７パーセントを超えるもの又は最大出力が2.5キロワットを超えるもの 空胴結合形 遅波回路として、軸方向に隣接して配設した複数個の空胴を電磁気的に結合したものをいう。 空胴結合形の変形を含む。 瞬時帯域幅 他の動作パラメータを変えない状態で、出力が３デシベル未満の変化範囲にとどまる帯域幅をいう。	動作周波数が31.8ギガヘルツを超える 加熱してから定格出力に達するまでの時間が３秒未満 瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が７パーセントを超えるもの又は最大出力が2.5キロワットを超える

Wassenaar規制番号 3桁	細番	Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b 1 a 1	a.　Travelling-wave "vacuum electronic devices", pulsed or continuous wave, as follows: 1.Devices operating at frequencies exceeding 31.8 GHz;
	2	2. Devices having a cathode heater with a turn on time to rated RF power of less than 3 seconds;
	3	3. Coupled cavity devices, or derivatives thereof, with a "fractional bandwidth" of more than 7% or a peak power exceeding 2.5 kW; "instantaneous bandwidth" The bandwidth over which output power remains constant within 3 dB without adjustment of other operating parameters.

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（3）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令				貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号			
7(2)	6		二		4　ヘリックス形のもの、折返し導波管形のもの又は蛇行導波管回路形のものであって、次のいずれかに該当するもの ヘリックス形 遅波回路として、１以上のヘリックス形の高周波遅波回路を用いたらせん形のものをいう。 はしご形、インタデジタル形、リングアンドバー形及びこれらの変形を含む。 一　１オクターブを超える瞬時帯域幅を有するものであって、キロワットで表した場合の平均出力の数値にギガヘルツで表した場合の動作周波数の数値を乗じて得た数値が0.5を超えるもの 二　１オクターブ以下の瞬時帯域幅を有するものであって、キロワットで表した場合の平均出力の数値にギガヘルツで表した場合の動作周波数の数値を乗じて得た数値が１を超えるもの	１オクターブを超える瞬時帯域幅を有するキロワットで表した場合の平均出力の数値にギガヘルツで表した場合の動作周波数の数値を乗じて得た数値が0.5を超える １オクターブ以下の瞬時帯域幅を有するキロワットで表した場合の平均出力の数値にギガヘルツで表した場合の動作周波数の数値を乗じて得た数値が１を超える

Wassenaar規制番号						Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番					
3A1	b	1	a	4		4. Devices based on helix, folded waveguide, or serpentine waveguide circuits, or derivatives thereof, having any of the following:
					a	a. An "instantaneous bandwidth" of more than one octave, and average power (expressed in kW) times frequency (expressed in GHz) of more than 0.5;
					b	b. An "instantaneous bandwidth" of one octave or less, and average power (expressed in kW) times frequency (expressed in GHz) of more than 1;

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（4）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では一致している。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(2)	6		二	三　宇宙用に設計したもの 宇宙用に設計した 地表から１００キロメートルを超える高度で動作するよう設計若しくは製造されたこと又は試験に合格して適格とされたことをいう。特定の貨物が試験に合格したことにより宇宙用に設計したと判定されても、同じ生産工程又は一連の型式である他の貨物は、個々に試験されなければ宇宙用に設計したことにならない。 四　グリッド式電子銃を有するもの 5　瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が10パーセント以上のものであって、次のいずれかを有するもの 一　環状電子ビーム 二　非軸対称電子ビーム 三　複数電子ビーム	

Wassenaar規制番号 3桁	細番					Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b	1	a	4	c	c. Being "space-qualified"; or "Space-qualified" Designed, manufactured, or qualified through successful testing, for operation at altitudes greater than 100 km above the surface of the Earth. Note A determination that a specific item is "space- qualified" by virtue of testing does not mean that other items in the same production run or model series are "space-qualified" if not individually tested.
					d	d. Having a gridded electron gun;
				5		5. Devices with a "fractional bandwidth" greater than or equal to 10%, with any of the following:
					a	a. An annular electron beam;
					b	b. A non-axisymmetric electron beam; or
					c	c. Multiple electron beams;

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（5）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	(二) クロスフィールド増幅真空電子デバイスであって、その利得が17デシベルを超えるもの (三) デュアルモードで操作可能なもの デュアルモード 真空電子デバイスのビーム電流がグリッドを使用することで意図的に連続モードとパルスモードとの間で切り換えることが可能なものであって、最大パルス出力が連続波出力よりも大きいものをいう。	利得が17デシベルを超える

Wassenaar規制番号						Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番					
3A1	b	1	b			b. Crossed-field amplifier "vacuum electronic devices" with a gain of more than 17 dB; d. "Vacuum electronic devices" with the capability to operate in a 'dual mode'. Technical Note 'Dual mode' means the "vacuum electronic device" beam current can be intentionally changed between continuous-wave and pulsed mode operation by use of a grid and produces a peak pulse output power greater than the continuous-wave output power.
			d			

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（6）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	（（四）に該当するものを除く。） (四) 国際電気通信連合が無線通信用に割り当てた周波数帯域(無線測位用に割り当てた周波数帯域を除く。)で使用するように設計したものであって、次のいずれかに該当するもの 1 動作周波数が31.8ギガヘルツ以下であるもの 2 専ら宇宙において使用するために設計したもの以外のものであって、平均出力値が50ワット以下及び動作周波数が31.8ギガヘルツ超43.5ギガヘルツ以下のもの	動作周波数が31.8ギガヘルツ以下 平均出力値が50ワット以下及び動作周波数が31.8ギガヘルツ超43.5ギガヘルツ以下

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3A1		Note1: 3A001.b.1. does not apply to control "vacuum electronic devices" designed or rated for operation in any frequency bands and having all of the following: a. Does not exceed 31.8 GHz; and b. Is "allocated by the ITU" for radio-communications services, but not for radio-determination. Note2: 3A001.b.1. does not apply to control non-"space-qualified" "vacuum electronic devices" having all of the following: a. An average output power equal to or less than 50 W; and b. Designed or rated for operation in any frequency band and having all of the following: 1. Exceeds 31.8 GHz but does not exceed 43.5 GHz; and 2. Is "allocated by the ITU" for radio-communications services, but not for radio-determination.

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（7）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(2)	6		二	ロ 真空電子デバイスに使用するように設計した熱電子陰極であって、定格動作状態での放射電流密度が5アンペア毎平方センチメートルを超えるもの又は定格動作状態でのパルス放射電流密度が10アンペア毎平方センチメートルを超えるもの 熱電子陰極 固体を加熱することで電子を放出させる陰極をいう。 ハ モノリシックマイクロ波集積回路増幅器であって、次のいずれかに該当するもの（カに該当する集積化された移相器を有するモノリシックマイクロ波集積回路増幅器を除く。） （一）動作周波数が２．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１５パーセントを超えるもののうち、次のいずれかに該当するもの ピーク飽和出力値 製品データシート中に参照されている出力、飽和出力、最大出力、ピーク出力又はピーク包絡線出力ともいう。	放射電流密度が5アンペア毎平方センチメートルを超える又はパルス放射電流密度が10アンペア毎平方センチメートルを超える 動作周波数が２．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１５パーセントを超える

Wassenaar規制番号 3桁	細番			Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b	1	c	c. Thermionic cathodes designed for "vacuum electronic devices" producing an emission current density at rated operating conditions exceeding 5 A/cm2 or a pulsed (non-continuous) current density at rated operating conditions exceeding 10 A/cm2;
		2		2. "Monolithic Microwave Integrated Circuits" ("MMIC") amplifiers that are any of the following:
			a	a. Rated for operation at frequencies exceeding 2.7 GHz up to and including 6.8 GHz with a "fractional bandwidth" greater than 15%, and having any of the following: Technical Note: For purposes of 3A001.b., the parameter peak saturated power output may also be referred to on product data sheets as output power, saturated power output, maximum power output, peak power output, or peak envelope power output.

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（8）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は黄色の部分を合わせたもの同士、青色の部分を合わせたもの同士が対応しているが、赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(2)	6		二	1 動作周波数が２．７ギガヘルツ超２．９ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が７５ワット（４８．７５ディービーエム）超３００ワット（５４．８ディービーエム）以下のもの 2 動作周波数が２．９ギガヘルツ超３．２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が５５ワット（４７．４ディービーエム）超３００ワット（５４．８ディービーエム）以下のもの 3 動作周波数が３．２ギガヘルツ超３．７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が４０ワット（４６ディービーエム）超３００ワット（５４．８ディービーエム）以下のもの 4 動作周波数が３．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２０ワット（４３ディービーエム）超１２０ワット（５０．８ディービーエム）以下のもの 5 動作周波数が２．７ギガヘルツ超３．７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が３００ワット（５４．８ディービーエム）を超えるもの 6 動作周波数が３．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１２０ワット（５０．８ディービーエム）を超えるもの	動作周波数が２．７ギガヘルツ超２．９ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が７５ワット（４８．７５ディービーエム）超３００ワット（５４．８ディービーエム）以下 動作周波数が２．９ギガヘルツ超３．２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が５５ワット（４７．４ディービーエム）超３００ワット（５４．８ディービーエム）以下 動作周波数が３．２ギガヘルツ超３．７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が４０ワット（４６ディービーエム）超３００ワット（５４．８ディービーエム）以下 動作周波数が３．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２０ワット（４３ディービーエム）超１２０ワット（５０．８ディービーエム）以下 動作周波数が２．７ギガヘルツ超３．７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が３００ワット（５４．８ディービーエム）を超える 動作周波数が３．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１２０ワット（５０．８ディービーエム）を超える

Wassenaar規制番号 3桁	細番				Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b	2	a	1	1. A peak saturated power output greater than 75 W (48.75 dBm) at any frequency exceeding 2.7 GHz up to and including 2.9 GHz; 2. A peak saturated power output greater than 55 W (47.4 dBm) at any frequency exceeding 2.9 GHz up to and including 3.2 GHz; 3. A peak saturated power output greater than 40 W (46 dBm) at any frequency exceeding 3.2 GHz up to and including 3.7 GHz; or 4. A peak saturated power output greater than 20 W (43 dBm) at any frequency exceeding 3.7 GHz up to and including 6.8 GHz;
				2	
				3	
				4	

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（9）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は無色の部分同士、緑色の部分を合わせたもの同士が対応しているが、赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）
7(2)	6		二	（二）動作周波数が６．８ギガヘルツ超１６ギガヘルツ以下であって、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超えるもののうち、次のいずれかに該当するもの １　動作周波数が６．８ギガヘルツ超８．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１０ワット（４０ディービーエム）超２５ワット（４４ディービーエム）以下のもの ２　動作周波数が８．５ギガヘルツ超１２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が５ワット（３７ディービーエム）超２５ワット（４４ディービーエム）以下のもの又は動作周波数が１２ギガヘルツ超１６ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が５ワット（３７ディービーエム）を超えるもの ３　動作周波数が６．８ギガヘルツ超１２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２５ワット（４４ディービーエム）を超えるもの

パラメータ
動作周波数が６．８ギガヘルツ超１６ギガヘルツ以下であって、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超える 動作周波数が６．８ギガヘルツ超８．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１０ワット（４０ディービーエム）超２５ワット（４４ディービーエム）以下 動作周波数が８．５ギガヘルツ超１２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が５ワット（３７ディービーエム）超２５ワット（４４ディービーエム）以下 動作周波数が１２ギガヘルツ超１６ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が５ワット（３７ディービーエム）を超える 動作周波数が６．８ギガヘルツ超１２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２５ワット（４４ディービーエム）を超える

Wassenaar規制番号 3桁	細番				Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b	2	b		b. Rated for operation at frequencies exceeding 6.8 GHz up to and including 16 GHz with a "fractional bandwidth" greater than 10%, and having any of the following:
				1	1. A peak saturated power output greater than 10 W (40 dBm) at any frequency exceeding 6.8 GHz up to and including 8.5 GHz; or
				2	2. A peak saturated power output greater than 5 W (37 dBm) at any frequency exceeding 8.5 GHz up to and including 16 GHz;

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（10）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(2)	6		二	（三）動作周波数が１６ギガヘルツ超３１．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が３ワット（３４．７７ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超えるもの （四）動作周波数が３１．８ギガヘルツ超３７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が０．１ナノワット（マイナス７０ディービーエム）を超えるもの （五）動作周波数が３７ギガヘルツ超４３．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１．０ワット（３０ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超えるもの （六）動作周波数が４３．５ギガヘルツ超７５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が３１．６２ミリワット（１５ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超えるもの （七）動作周波数が７５ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１０ミリワット（１０ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が５パーセントを超えるもの	動作周波数が１６ギガヘルツ超３１．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が３ワット（３４．７７ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超える 動作周波数が３１．８ギガヘルツ超３７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が０．１ナノワット（マイナス７０ディービーエム）を超える 動作周波数が３７ギガヘルツ超４３．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１．０ワット（３０ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超える 動作周波数が４３．５ギガヘルツ超７５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が３１．６２ミリワット（１５ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超える 動作周波数が７５ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１０ミリワット（１０ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が５パーセントを超える

Wassenaar規制番号 3桁	細番	Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b 2 c	c. Rated for operation with a peak saturated power output greater than 3 W (34.77 dBm) at any frequency exceeding 16 GHz up to and including 31.8 GHz, and with a "fractional bandwidth" of greater than 10%;
	d	d. Rated for operation with a peak saturated power output greater than 0,1 nW (-70 dBm) at any frequency exceeding 31.8 GHz up to and including 37 GHz;
	e	e. Rated for operation with a peak saturated power output greater than 1 W (30 dBm) at any frequency exceeding 37 GHz up to and including 43.5 GHz, and with a "fractional bandwidth" of greater than 10%;
	f	f. Rated for operation with a peak saturated power output greater than 31.62 mW (15 dBm) at any frequency exceeding 43.5 GHz up to and including 75 GHz, and with a "fractional bandwidth" of greater than 10%;
	g	g. Rated for operation with a peak saturated power output greater than 10 mW (10 dBm) at any frequency exceeding 75 GHz up to and including 90 GHz, and with a "fractional bandwidth" of greater than 5%; or

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（11）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	（八）動作周波数が９０ギガヘルツを超え、ピーク飽和出力値が０．１ナノワット（マイナス７０ディービーエム）を超えるもの 二 マイクロ波用ディスクリートトランジスタであって、次のいずれかに該当するもの マイクロ波用ディスクリートトランジスタ 貨物等省令第６条第二号ニの（一）から（五）でそれぞれ定める周波数帯域において、２以上の周波数帯域にまたがって作動するものについては、これらのうちピーク飽和出力値の最も低いものを制限値とする。 電力増幅器ともいう。これらは、貨物等省令第6条第二号二（一）～（六）の規定に基づいて判定するものとする。 被覆されていないダイ、キャリアに搭載されたダイ及びパッケージに搭載されたダイを含む。	動作周波数が９０ギガヘルツを超え、ピーク飽和出力値が０．１ナノワット（マイナス７０ディービーエム）を超える

Wassenaar規制番号				Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番			
3A1	b	2	h	h. Rated for operation with a peak saturated power output greater than 0.1 nW (-70 dBm) at any frequency exceeding 90 GHz; 3
		3		3. Discrete microwave transistors that are any of the following: Note 1 The status of a transistor in 3.A.1.b.3.a. through 3.A.1.b.3.e. whose rated operating frequency includes frequencies listed in more than one frequency range, as defined by 3.A.1.b.3.a. through 3.A.1.b.3.e., is determined by the lowest peak saturated power output threshold. Note 2 3.A.1.b.3. includes bare dice, dice mounted on carriers, or dice mounted in packages. Some discrete transistors may also be referred to as power amplifiers, but the status of these discrete transistors is determined by 3.A.1.b.3.

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（12）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では無色の部分同士、黄色同士、水色同士の組み合わせで規制内容が一致しているが、赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(2)	6		二	（一）動作周波数が２．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、次のいずれかに該当するもの １　動作周波数が２．７ギガヘルツ超２．９ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が４００ワット（５６ディービーエム）超６００ワット（５７．８ディービーエム）以下のもの ２　動作周波数が２．９ギガヘルツ超３．２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２０５ワット（５３．１２ディービーエム）超６００ワット（５７．８ディービーエム）以下のもの ３　動作周波数が３．２ギガヘルツ超３．７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１１５ワット（５０．６１ディービーエム）超６００ワット（５７．８ディービーエム）以下のもの ４　動作周波数が３．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が６０ワット（４７．７８ディービーエム）超１３０ワット（５１．２ディービーエム）以下のもの ５　動作周波数が２．７ギガヘルツ超３．７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が６００ワット（５７．８ディービーエム）を超えるもの ６　動作周波数が３．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１３０ワット（５１．２ディービーエム）を超えるもの	動作周波数が２．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下 動作周波数が２．７ギガヘルツ超２．９ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が４００ワット（５６ディービーエム）超６００ワット（５７．８ディービーエム）以下 動作周波数が２．９ギガヘルツ超３．２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２０５ワット（５３．１２ディービーエム）超６００ワット（５７．８ディービーエム）以下 動作周波数が３．２ギガヘルツ超３．７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１１５ワット（５０．６１ディービーエム）超６００ワット（５７．８ディービーエム）以下 動作周波数が３．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が６０ワット（４７．７８ディービーエム）超１３０ワット（５１．２ディービーエム）以下 動作周波数が２．７ギガヘルツ超３．７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が６００ワット（５７．８ディービーエム）を超える 動作周波数が３．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１３０ワット（５１．２ディービーエム）を超える

Wassenaar規制番号 3桁	細番			Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b	3	a	a. Rated for operation at frequencies exceeding 2.7 GHz up to and including 6.8 GHz and having any of the following:
			1	1. A peak saturated power output greater than 400 W (56 dBm) at any frequency exceeding 2.7 GHz up to and including 2.9 GHz;
			2	2. A peak saturated power output greater than 205 W (53.12 dBm) at any frequency exceeding 2.9 GHz up to and including 3.2 GHz;
			3	3. A peak saturated power output greater than 115 W (50.61 dBm) at any frequency exceeding 3.2 GHz up to and including 3.7 GHz; or
			4	4. A peak saturated power output greater than 60 W (47.78 dBm) at any frequency exceeding 3.7 GHz up to and including 6.8 GHz;

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（13）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では無色の部分同士、同じ色同士の組み合わせで規制内容が一致しているが、赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）
7(2)	6		二	（二）動作周波数が６．８ギガヘルツ超３１．８ギガヘルツ以下であって、次のいずれかに該当するもの １　動作周波数が６．８ギガヘルツ超８．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が５０ワット（４７ディービーエム）超１３０ワット（５１．２ディービーエム）以下のもの ２　動作周波数が８．５ギガヘルツ超１２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１５ワット（４１．７６ディービーエム）超６０ワット（４７．８ディービーエム）以下のもの ３　動作周波数が６．８ギガヘルツ超８．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１３０ワット（５１．２ディービーエム）を超えるもの ４　動作周波数が８．５ギガヘルツ超１２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が６０ワット（４７．８ディービーエム）を超えるもの ５　動作周波数が１２ギガヘルツ超１６ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が４０ワット（４６ディービーエム）を超えるもの ６　動作周波数が１６ギガヘルツ超３１．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が７ワット（３８．４５ディービーエム）を超えるもの （三）動作周波数が３１．８ギガヘルツ超３７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が０．５ワット（２７ディービーエム）を超えるもの

Wassenaar規制番号 3桁	細番	Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b 3 b 1	b. Rated for operation at frequencies exceeding 6.8 GHz up to and including 31.8 GHz and having any of the following: 1. A peak saturated power output greater than 50 W (47 dBm) at any frequency exceeding 6.8 GHz up to and including 8.5 GHz;
	b 3 b 2	2. A peak saturated power output greater than 15 W (41.76 dBm) at any frequency exceeding 8.5 GHz up to and including 12 GHz;
	b 3 b 3	3. A peak saturated power output greater than 40 W (46 dBm) at any frequency exceeding 12 GHz up to and including 16 GHz; or
	b 3 b 4	4. A peak saturated power output greater than 7 W (38.45 dBm) at any frequency exceeding 16 GHz up to and including 31.8 GHz;
	b 3 c	c. Rated for operation with a peak saturated power output greater than 0.5 W (27 dBm) at any frequency exceeding 31.8 GHz up to and including 37 GHz;

パラメータ
動作周波数が６．８ギガヘルツ超３１．８ギガヘルツ以下
動作周波数が６．８ギガヘルツ超８．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が５０ワット（４７ディービーエム）超１３０ワット（５１．２ディービーエム）以下
動作周波数が８．５ギガヘルツ超１２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１５ワット（４１．７６ディービーエム）超６０ワット（４７．８ディービーエム）以下
動作周波数が６．８ギガヘルツ超８．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１３０ワット（５１．２ディービーエム）を超える
動作周波数が８．５ギガヘルツ超１２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が６０ワット（４７．８ディービーエム）を超える
動作周波数が１２ギガヘルツ超１６ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が４０ワット（４６ディービーエム）を超える
動作周波数が１６ギガヘルツ超３１．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が７ワット（３８．４５ディービーエム）を超える
動作周波数が３１．８ギガヘルツ超３７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が０．５ワット（２７ディービーエム）を超える

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（14）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	（四）動作周波数が３７ギガヘルツ超４３．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１ワット（３０ディービーエム）を超えるもの （五）動作周波数が４３．５ギガヘルツを超え、ピーク飽和出力値が０．１ナノワット（マイナス７０ディービーエム）を超えるもの （六）動作周波数が８．５ギガヘルツ超３１．８ギガヘルツ以下の全ての周波数帯域において、ピーク飽和出力値が五ワット（三七ディービーエム）を超えるもの（第六条第二号ニ（一）から（五）までのいずれかに該当するものを除く。）	動作周波数が３７ギガヘルツ超４３．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が１ワット（３０ディービーエム）を超える 動作周波数が４３．５ギガヘルツを超え、ピーク飽和出力値が０．１ナノワット（マイナス７０ディービーエム）を超える 動作周波数が８．５ギガヘルツ超３１．８ギガヘルツ以下の全ての周波数帯域において、ピーク飽和出力値が五ワット（三七ディービーエム）を超える

Wassenaar規制番号					Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番				
3A1	b	3	d		d. Rated for operation with a peak saturated power output greater than 1 W (30 dBm) at any frequency exceeding 37 GHz up to and including 43.5 GHz; e. Rated for operation with a peak saturated power output greater than 0.1 nW (-70 dBm) at any frequency exceeding 43.5 GHz; f. Other than those specified in 3.A.1.b.3.a. to 3.A.1.b.3.e and rated for operation with a peak saturated power output greater than 5 W (37.0 dBm) at all frequencies exceeding 8.5 GHz up to and including 31.8 GHz;
			e		
			f		

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（15）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	ホ マイクロ波用固体増幅器（モノリシックマイクロ波集積回路増幅器及びハーモニックミクサ又はコンバータを除く。）又はこれを含む組立品若しくはモジュール（送受信モジュール及び送信モジュールを除く。）であって、次のいずれかに該当するもの 貨物等省令第6条第二号ホ中のマイクロ波用固体増幅器 モノリシックマイクロ波集積回路増幅器は第６条第２号ハの規定に基づいて判定し、スペクトラムアナライザー、信号発生器、ネットワークアナライザー又はマイクロ波用試験受信機の動作周波数を拡張するように設計したハーモニックミクサ若しくはコンバータは、同条第２号リの規定に基づいて判定するものとする。 モジュール 基板上に回路素子、個別部品又は集積回路を相互に接続したものであって、一体として交換可能であり、かつ、分解することが不可能なものをいう。	

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A1	b	4	4. Microwave solid state amplifiers and microwave assemblies/modules containing microwave solid state amplifiers, that are any of the following: N.B.1. For "MMIC" amplifiers see 3A001.b.2. N.B.2. For 'transmit/receive modules' and 'transmit modules' see 3A001.b.12. N.B.3. For converters and harmonic mixers, designed to extend the operating or frequency range of signal analysers, signal generators, network analysers or microwave test receivers, see 3A001.b.7.

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（16）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	マイクロ波用固体増幅器（モノリシックマイクロ波集積回路増幅器及びハーモニックミクサ又はコンバータを除く。）又はこれを含む組立品若しくはモジュール（送受信モジュール及び送信モジュールを除く。） 貨物等省令第６条第二号ホの（一）から（五）でそれぞれ定める周波数帯域において、２以上の周波数帯域にまたがって作動するものについては、これらのうちピーク飽和出力値の最も低いものを制限値とする。 組立品 （６の「組立品」の解釈に同じ。） 基板上に複数の回路素子、個別部品又は集積回路を特定の機能を行うように相互に接続したものであって、一体として交換可能であり、かつ、分解することが可能なものをいう。 貨物等省令第第6条第二号ホ中のモジュール 送受信モジュール及び送信モジュールは第６条２号カの規定に基づいて判定するものとする。	

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3A1	b 4	Note 2 The status of an item whose rated operating frequency includes frequencies listed in more than one frequency range, as defined by 3.A.1.b.4.a. through 3.A.1.b.4.e., is determined by the lowest peak saturated power output threshold. N.B.2. For 'transmit/receive modules' and 'transmit modules' see 3.A.1.b.12.

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（17）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	（一）動作周波数が２．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１５パーセントを超えるもののうち、次のいずれかに該当するもの １　動作周波数が２．７ギガヘルツ超２．９ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が５００ワット（５７ディービーエム）を超えるもの ２　動作周波数が２．９ギガヘルツ超３．２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２７０ワット（５４．３ディービーエム）を超えるもの ３　動作周波数が３．２ギガヘルツ超３．７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２００ワット（５３ディービーエム）を超えるもの ４　動作周波数が３．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が９０ワット（４９．５４ディービーエム）を超えるもの	動作周波数が２．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１５パーセントを超える 動作周波数が２．７ギガヘルツ超２．９ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が５００ワット（５７ディービーエム）を超える 動作周波数が２．９ギガヘルツ超３．２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２７０ワット（５４．３ディービーエム）を超える 動作周波数が３．２ギガヘルツ超３．７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２００ワット（５３ディービーエム）を超える 動作周波数が３．７ギガヘルツ超６．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が９０ワット（４９．５４ディービーエム）を超える

Wassenaar規制番号					Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番				
3A1	b	4	a		a. Rated for operation at frequencies exceeding 2.7 GHz up to and including 6.8 GHz with a "fractional bandwidth" greater than 15%, and having any of the following:
				1	1. A peak saturated power output greater than 500 W (57 dBm) at any frequency exceeding 2.7 GHz up to and including 2.9 GHz;
				2	2. A peak saturated power output greater than 270 W (54.3 dBm) at any frequency exceeding 2.9 GHz up to and including 3.2 GHz;
				3	3. A peak saturated power output greater than 200 W (53 dBm) at any frequency exceeding 3.2 GHz up to and including 3.7 GHz; or
				4	4. A peak saturated power output greater than 90 W (49.54 dBm) at any frequency exceeding 3.7 GHz up to and including 6.8 GHz;

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（18）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(2)	6		二	（二）動作周波数が６．８ギガヘルツ超３１．８ギガヘルツ以下であって、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超えるもののうち、次のいずれかに該当するもの １ 動作周波数が６．８ギガヘルツ超８．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が７０ワット（４８．５４ディービーエム）を超えるもの ２ 動作周波数が８．５ギガヘルツ超１２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が５０ワット（４７ディービーエム）を超えるもの ３ 動作周波数が１２ギガヘルツ超１６ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が３０ワット（４４．７７ディービーエム）を超えるもの ４ 動作周波数が１６ギガヘルツ超３１．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２０ワット（４３ディービーエム）を超えるもの （三）動作周波数が３１．８ギガヘルツ超３７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が０．５ワット（２７ディービーエム）を超えるもの	動作周波数が６．８ギガヘルツ超３１．８ギガヘルツ以下であって、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超える 動作周波数が６．８ギガヘルツ超８．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が７０ワット（４８．５４ディービーエム）を超える 動作周波数が８．５ギガヘルツ超１２ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が５０ワット（４７ディービーエム）を超える 動作周波数が１２ギガヘルツ超１６ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が３０ワット（４４．７７ディービーエム）を超える 動作周波数が１６ギガヘルツ超３１．８ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２０ワット（４３ディービーエム）を超える 動作周波数が３１．８ギガヘルツ超３７ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が０．５ワット（２７ディービーエム）を超える

Wassenaar規制番号 3桁	細番			Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b	4	b	b. Rated for operation at frequencies exceeding 6.8 GHz up to and including 31.8 GHz with a "fractional bandwidth" greater than 10%, and having any of the following:
			1	1. A peak saturated power output greater than 70 W (48.54 dBm) at any frequency exceeding 6.8 GHz up to and including 8.5 GHz;
			2	2. A peak saturated power output greater than 50 W (47 dBm) at any frequency exceeding 8.5 GHz up to and including 12 GHz;
			3	3. A peak saturated power output greater than 30 W (44.77 dBm) at any frequency exceeding 12 GHz up to and including 16 GHz; or
			4	4. A peak saturated power output greater than 20 W (43 dBm) at any frequency exceeding 16 GHz up to and including 31.8 GHz;
		c		c. Rated for operation with a peak saturated power output greater than 0.5 W (27 dBm) at any frequency exceeding 31.8 GHz up to and including 37 GHz;

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（19）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(2)	6		二	（四）動作周波数が３７ギガヘルツ超４３．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２ワット（３３ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超えるもの （五）動作周波数が４３．５ギガヘルツを超えるものであって、次のいずれかに該当するもの １　動作周波数が４３．５ギガヘルツ超７５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が０．２ワット（２３ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超えるもの ２　動作周波数が７５ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２０ミリワット（１３ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が５パーセントを超えるもの ３　動作周波数が９０ギガヘルツ超であって、ピーク飽和出力値が０．１ナノワット（マイナス７０ディービーエム）を超えるもの	動作周波数が３７ギガヘルツ超４３．５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２ワット（３３ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超える 動作周波数が４３．５ギガヘルツを超える 動作周波数が４３．５ギガヘルツ超７５ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が０．２ワット（２３ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が１０パーセントを超える 動作周波数が７５ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下であって、ピーク飽和出力値が２０ミリワット（１３ディービーエム）を超えるもののうち、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が５パーセントを超える 動作周波数が９０ギガヘルツ超であって、ピーク飽和出力値が０．１ナノワット（マイナス７０ディービーエム）を超える

Wassenaar規制番号 3桁	細番				Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b	4	d		d. Rated for operation with a peak saturated power output greater than 2 W (33 dBm) at any frequency exceeding 37 GHz up to and including 43.5 GHz, and with a "fractional bandwidth" greater than 10%; e. Rated for operation at frequencies exceeding 43.5 GHz and having any of the following: 1. A peak saturated power output greater than 0.2 W (23 dBm) at any frequency exceeding 43.5 GHz up to and including 75 GHz, and with a "fractional bandwidth" greater than 10%; 2. A peak saturated power output greater than 20 mW (13 dBm) at any frequency exceeding 75 GHz up to and including 90 GHz, and with a "fractional bandwidth" greater than 5%; or 3. A peak saturated power output greater than 0.1 nW (-70 dBm) at any frequency exceeding 90 GHz; or
			e		
				1	
				2	
				3	

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（20）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では一致している。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(2)	6		二	ヘ 電子的又は磁気的に同調可能な帯域通過フィルターであって、次の（一）及び（二）に該当するもの 半オクターブ 周波数帯域内の最大周波数と最小周波数の比が、１．５：１のものをいう。 （一）半オクターブの周波数帯域を１０マイクロ秒未満で同調可能な可変周波数共振器を６以上有するもの （二）中心周波数の０．５パーセントを超える帯域を通過することができるもの ト 電子的又は磁気的に同調可能な帯域阻止フィルターであって、次の（一）及び（二）に該当するもの （一）半オクターブの周波数帯域を１０マイクロ秒未満で同調可能な可変周波数共振器を６以上有するもの （二）中心周波数の０．５パーセント未満の帯域を阻止することができるもの チ 削除 リ ハーモニックミクサ又はコンバータであって、次のいずれかに該当するもの （一）スペクトラムアナライザーの周波数帯域を９０ギガヘルツ超に拡張するように設計したもの	半オクターブの周波数帯域を１０マイクロ秒未満で同調可能な可変周波数共振器を６以上有する 中心周波数の０．５パーセントを超える帯域を通過する スペクトラムアナライザーの周波数帯域を９０ギガヘルツ超に拡張する

Wassenaar規制番号 3桁	細番			Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b 5			5. Electronically or magnetically tunable band-pass or band-stop filters, having more than 5 tunable resonators capable of tuning across a 1.5:1 frequency band (fmax/fmin) in less than 10 µs and having any of the following:
		a		a. A band-pass bandwidth of more than 0.5% of centre frequency; or
		b		b. A band-stop bandwidth of less than 0.5% of centre frequency;
	6			6. Not used since 2003
	7			7. Converters and harmonic mixers that are any of the following:
		a		a. Designed to extend the frequency range of "signal analysers" beyond 90 GHz;

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（21）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	（二）信号発生器の動作範囲を拡張するように設計したものであって、次のいずれかに該当するもの 1 周波数帯域が９０ギガヘルツを超えるもの 2 周波数帯域が４３．５ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下であって、出力が１００ミリワット（２０ディービーエム）を超えるもの （三）ネットワークアナライザーの動作範囲を拡張するように設計したものであって、次のいずれかに該当するもの 1 周波数帯域が１１０ギガヘルツを超えるもの 2 周波数帯域が４３．５ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下であって、出力が３１．６２ミリワット（１５ディービーエム）を超えるもの 3 周波数帯域が９０ギガヘルツ超１１０ギガヘルツ以下であって、出力が１ミリワット（０ディービーエム）を超えるもの （四）マイクロ波用試験受信機の周波数帯域を１１０ギガヘルツ超に拡張するように設計したもの	周波数帯域が９０ギガヘルツを超える 周波数帯域が４３．５ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下であって、出力が１００ミリワット（２０ディービーエム）を超える 周波数帯域が１１０ギガヘルツを超える 周波数帯域が４３．５ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下 出力が３１．６２ミリワット（１５ディービーエム）を超える 周波数帯域が９０ギガヘルツ超１１０ギガヘルツ以下であって、出力が１ミリワット（０ディービーエム）を超える マイクロ波用試験受信機の周波数帯域を１１０ギガヘルツ超に拡張する

Wassenaar規制番号					Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番				
3A1	b	7	b		b. Designed to extend the operating range of signal generators as follows:
				1	1. Beyond 90 GHz;
				2	2. To an output power greater than 100 mW (20 dBm) anywhere within the frequency range exceeding 43,5 GHz but not exceeding 90 GHz;
			c		c. Designed to extend the operating range of network analysers as follows:
				1	1. Beyond 110 GHz;
				2	2. To an output power greater than 31.62 mW (15 dBm) anywhere within the frequency range exceeding 43.5 GHz but not exceeding 90 GHz;
				3	3. To an output power greater than 1 mW (0 dBm) anywhere within the frequency range exceeding 90 GHz but not exceeding 110 GHz; or
			d		d. Designed to extend the frequency range of microwave test receivers beyond 110 GHz;

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（22）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	ヌ イに該当する真空電子デバイスを内蔵するマイクロ波用電力増幅器であって、次の（一）及び（二）に該当するもの（国際電気通信連合が無線通信用に割り当てた周波数帯域（無線測位用に割り当てた周波数帯域を除く。）で使用するように設計したものを除く。） （一）動作周波数が３ギガヘルツを超えるもの （二）平均出力電力の質量に対する比が８０ワット毎キログラムを超えるものであって、体積が４００立方センチメートル未満のもの	動作周波数が３ギガヘルツを超える 平均出力電力の質量に対する比が８０ワット毎キログラムを超えるものであって、体積が４００立方センチメートル未満

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A1	b	8	8. Microwave power amplifiers containing "vacuum electronic devices" specified in 3A001.b.1. and having all of the following: Note: 3A001.b.8. does not apply to equipment designed or rated for operation in any frequency band which is "allocated by the ITU" for radio-communications services, but not for radio-determination. a. Operating frequencies above 3 GHz; b. An average output power to mass ratio exceeding 80 W/kg; and c. A volume of less than 400 cm3;

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（23）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	貨物等省令 項	貨物等省令 号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(2)	6		二	ル マイクロ波用電力モジュールであって、進行波真空電子デバイス、モノリシックマイクロ波集積回路及び電源を有するもののうち、次の（一）から（三）までの全てに該当するもの （一）完全停止状態から完全作動状態までの時間が10秒未満のもの 完全停止状態から完全作動状態までの時間 予熱時間を含む。 （二）体積が、ワットで表した最高定格出力値に10立方センチメートル毎ワットを乗じて得た数値未満のもの （三）１オクターブを超える瞬時帯域幅を有するものであって、次のいずれかに該当するもの 1 周波数が18ギガヘルツ以下のものにあっては、無線周波数の出力が100ワットを超えるもの 2 周波数が18ギガヘルツを超えるもの	完全停止状態から完全作動状態までの時間が10秒未満 体積が、ワットで表した最高定格出力値に10立方センチメートル毎ワットを乗じて得た数値未満 １オクターブを超える瞬時帯域幅を有する 周波数が18ギガヘルツ以下のものにあっては、無線周波数の出力が100ワットを超える 周波数が18ギガヘルツを超える

Wassenaar規制番号 3桁	細番			Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b 9			9. Microwave power modules (MPM) consisting of, at least, a travelling wave "vacuum electronic device", a "Monolithic Microwave Integrated Circuit" ("MMIC") and an integrated electronic power conditioner and having all of the following:
		a		a. A 'turn-on time' from off to fully operational in less than 10 seconds; Technical Notes 2. The 'turn-on time' in 3.A.1.b.9.a. refers to the time from fully-off to fully operational, i.e., it includes the warm-up time of the MPM.
		b		b. A volume less than the maximum rated power in Watts multiplied by 10 cm3/W; and
		c		c. An "instantaneous bandwidth" greater than 1 octave (fmax > 2fmin) and having any of the following:
			1	1. For frequencies equal to or less than 18 GHz, an RF output power greater than 100 W; or
			2	2. A frequency greater than 18 GHz;

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（24）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	ヲ 発振器又は発振機能を有する組立品であって、動作周波数とオフセット周波数の隔たりが１０ヘルツ以上１０キロヘルツ以下のいずれかの周波数帯域において、搬送波に対する１ヘルツ当たりの単側波帯位相雑音の比が次に掲げる式により算定した値未満のもの ２０log10（メガヘルツで表した動作周波数）－２０log10（ヘルツで表した動作周波数とオフセット周波数の隔たり）－126 発振器又は発振機能を有する組立品 カタログ等の仕様に従って評価する。	、動作周波数とオフセット周波数の隔たりが１０ヘルツ以上１０キロヘルツ以下のいずれかの周波数帯域において、搬送波に対する１ヘルツ当たりの単側波帯位相雑音の比が次に掲げる式により算定した値未満 ２０log10（メガヘルツで表した動作周波数）－２０log10（ヘルツで表した動作周波数とオフセット周波数の隔たり）－126

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A1	b	10	10. Oscillators or oscillator assemblies, specified to operate with a single sideband (SSB) phase noise, in dBc/Hz, less (better) than -(126 + 20log10F - 20log10f) anywhere within the range of 10 Hz ≤ F ≤ 10 kHz; Technical Note: In 3A001.b.10., F is the offset from the operating frequency in Hz and f is the operating frequency in MHz.

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（25）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(2)	6		二	ワ 周波数シンセサイザーを用いた組立品のうち、次のいずれかに該当するもの 周波数シンセサイザー 出力周波数の数より少ない数の基準周波数により制御、導出又は統合し、一つ若しくは多数の出力周波数を同時若しくは選択的に出すことができる周波数源をいう。	

Wassenaar規制番号 3桁	細番	Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b 11	11. 'Frequency synthesiser' "electronic assemblies" having a "frequency switching time" as specified by any of the following: Technical Note A 'frequency synthesiser' is any kind of frequency source, regardless of the actual technique used, providing a multiplicity of simultaneous or alternative output frequencies, from one or more outputs, controlled by, derived from or disciplined by a lesser number of standard (or master) frequencies. N.B. For general purpose "signal analysers", signal generators, network analysers and microwave test receivers, see 3.A.2.c., 3.A.2.d., 3.A.2.e. and 3.A.2.f., respectively.

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（26）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	（一）周波数切換えの所要時間が143ピコ秒未満のもの 周波数切換えの所要時間 デジタルコード化された電気信号により出力周波数を切換えたときに、出力周波数が１ギガヘルツ未満の場合は終点の±１００ヘルツ以内、又は１ギガヘルツ以上の場合は終点の±０．００００１パーセント（±０．１ｐｐｍ）以内に達する時間（例えば遅延時間）をいう。 （二）4.8ギガヘルツ超31.8ギガヘルツ以下の合成出力周波数範囲で、2.2ギガヘルツを超えるいずれかの周波数切換えの所要時間が100マイクロ秒未満のもの	周波数切換えの所要時間が143ピコ秒未満 4.8ギガヘルツ超31.8ギガヘルツ以下の合成出力周波数範囲で、2.2ギガヘルツを超えるいずれかの周波数切換えの所要時間が100マイクロ秒未満

Wassenaar規制番号					Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番				
3A1	b	11	a		a. Less than 143 ps; "Frequency switching time" The time (i.e., delay) taken by a signal when switched from an initial specified output frequency, to arrive at or within any of the following: a. ± 100 Hz of a final specified output frequency of less than 1 GHz; or b. ± 0.1 part per million of a final specified output frequency equal to or greater than 1 GHz.
			b		b. Less than 100 μs for any frequency change exceeding 2.2 GHz within the synthesised frequency range exceeding 4.8 GHz but not exceeding 31.8 GHz;

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（27）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	（三）削除 （四）31.8ギガヘルツ超37ギガヘルツ以下の合成出力周波数範囲で、550メガヘルツを超えるいずれかの周波数切換えの所要時間が500マイクロ秒未満のもの （五）37ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下の合成出力周波数範囲で、2.2ギガヘルツを超えるいずれかの周波数切換えの所要時間が100マイクロ秒未満のもの （六）削除 （七）９０ギガヘルツを超える合成出力周波数範囲で、周波数切換えの所要時間が１ミリ秒未満のもの	31.8ギガヘルツ超37ギガヘルツ以下の合成出力周波数範囲で、550メガヘルツを超えるいずれかの周波数切換えの所要時間が500マイクロ秒未満 37ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下の合成出力周波数範囲で、2.2ギガヘルツを超えるいずれかの周波数切換えの所要時間が100マイクロ秒未満 ９０ギガヘルツを超える合成出力周波数範囲で、周波数切換えの所要時間が１ミリ秒未満

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A1	b	11 c d e f g	c. Not used; d. Less than 500 µs for any frequency change exceeding 550 MHz within the synthesised frequency range exceeding 31.8 GHz but not exceeding 37 GHz; e. Less than 100 µs for any frequency change exceeding 2.2 GHz within the synthesised frequency range exceeding 37 GHz but not exceeding 90 GHz; or f. Not used since 2016 g. Less than 1 ms within the synthesized frequency range exceeding 90 GHz;

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（28）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	カ 送受信モジュール、送受信用モノリシックマイクロ波集積回路、送信モジュール及び送信用モノリシックマイクロ波集積回路であって、動作周波数が二・七ギガヘルツを超えるもののうち、次の全てに該当するもの 送受信モジュール 信号の送受信のために双方向の振幅及び位相制御を行うことができる多機能電子装置をいう。 送信モジュール 信号の送信のために振幅及び位相制御を行うことができる電子装置をいう。 送受信用モノリシックマイクロ波集積回路 信号の送受信のために双方向の振幅及び位相制御を行うことができる多機能モノリシックマイクロ波集積回路をいう。	動作周波数が二・七ギガヘルツを超える

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A1	b	12	12. 'Transmit/receive modules', 'transmit/receive MMICs', 'transmit modules', and 'transmit MMICs', rated for operation at frequencies above 2.7 GHz and having all of the following: Technical Notes 1. A 'transmit/receive module': is a multifunction "electronic assembly" that provides bi-directional amplitude and phase control for transmission and reception of signals. 2. A 'transmit module': is an "electronic assembly" that provides amplitude and phase control for transmission of signals. 3. A 'transmit/receive MMIC': is a multifunction "MMIC" that provides bi-directional amplitude and phase control for transmission and reception of signals.

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（29）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	送信用モノリシックマイクロ波集積回路 信号の送信のために振幅及び位相制御を行うことができる送信用モノリシックマイクロ波集積回路をいう。 送受信モジュール又は送信モジュール 貨物等省令第６条第二号カの規定は、放熱板の有無にかかわらず送受信モジュール又は送信モジュールを規制する。また、貨物等省令第６条第二号カ（三）における平面のいずれかの辺の長さには、送受信モジュール又は送信モジュールの放熱板として機能する部分を含まない。 送受信モジュール、送受信用モノリシックマイクロ波集積回路、送信モジュール又は送信用モノリシックマイクロ波集積回路 送信又は送受信チャネルと同数の集積化された放射アンテナ素子を持つ場合も持たない場合もある。	

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3A1		Technical Notes 4. A 'transmit MMIC': is a "MMIC" that provides amplitude and phase control for transmission of signals. 6. 3.A.1.b.12. applies to 'transmit/receive modules' or 'transmit modules' with or without a heat sink. The value of d in 3.A.1.b.12.c. does not include any portion of the 'transmit/receive module' or 'transmit module' that functions as a heat sink. 7. 'Transmit/receive modules', or 'transmit modules', or 'transmit/receive MMICs' or 'transmit MMICs' may or may not have N integrated radiating antenna elements where N is the number of transmit or transmit/receive channels.

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（30）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		二	（一）いずれかのチャネルにおいて、ワットで表したピーク飽和出力値が五〇五・六二をギガヘルツで表した最大動作周波数の二乗で除した値を超えるもの 貨物等省令第６条第二号カ中のチャネル 平面に並べられた複数の送受信モジュール、送受信用モノリシックマイクロ波集積回路、送信モジュール又は送信用モノリシックマイクロ波集積回路の任意の固体をいう。 （二）いずれかのチャネルにおいて、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が五パーセント以上のもの	ワットで表したピーク飽和出力値が五〇五・六二をギガヘルツで表した最大動作周波数の二乗で除した値を超える 瞬時帯域幅を中心周波数で除した値が五パーセント以上

Wassenaar規制番号				Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番			
3A1	b	12	a	a. A peak saturated power output (in watts), Psat, greater than 505.62 divided by the maximum operating frequency (in GHz) squared [Psat>505.62 W*GHz2/fGHz2] for any channel;
			b	b. A "fractional bandwidth" of 5% or greater for any channel;

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（31）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では一致している。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(2)	6		二	(三) 平面のいずれかの辺の長さをセンチメートルで表した値が、送信又は送受信チャネル数と一五の積をギガヘルツで表した最小動作周波数で除した値以下のもの 貨物等省令第６条第二号カ（三）中の計算式 動作帯域幅の下限が２．７ギガ以下に及ぶ場合、最小動作周波数として２．７ギガヘルツを用いるものとする。 次の式を満たすものとする。 ｄ［ｃｍ］≦１５×Ｎ／ｆ［ＧＨｚ］ ｄ：平面のいずれかの辺の長さをセンチメートル（ｃｍ）で表した値 Ｎ：一つの辺に並べられた送信又は送受信のチャネル数 ｆ：ギガヘルツ（ＧＨｚ）で表した最小動作周波数 (四) チャネル毎に電子的に位相シフトできるもの	平面のいずれかの辺の長さをセンチメートルで表した値が、送信又は送受信チャネル数と一五の積をギガヘルツで表した最小動作周波数で除した値以下

Wassenaar規制番号 3桁	細番			Wassenaar規制文言（全文）
3A1	b 12	c		c. Any planar side with length d (in cm) equal to or less than 15 divided by the lowest operating frequency in GHz [d ≤ 15cm*GHz*N/fGHz] where N is the number of transmit or transmit/receive channels; and Technical Notes 5. 2.7 GHz should be used as the lowest operating frequency (fGHz) in the formula in 3.A.1.b.12.c. for transmit/receive or transmit modules that have a rated operation range extending downward to 2.7 GHz and below [d≤15cm*GHz*N/2.7 GHz].
		d		d. An electronically variable phase shifter per channel.

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（32）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(2)	6		十五	マイクロ波用試験受信機であって、次のイ及びロに該当するもの イ １１０ギガヘルツを超える周波数で使用することができるように設計したもの ロ 振幅及び位相を同時に測定できるもの	１１０ギガヘルツを超える周波数で使用することができる

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3A2	f 1 2	f. Microwave test receivers having all of the following: 1. A maximum operating frequency exceeding 110 GHz; and 2. Being capable of measuring amplitude and phase simultaneously;

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（1）

マイクロ波は開発段階のものも含め、表7-2-12に示すような様々な分野で利用されている。 一方、マイクロ波デバイスである真空管と半導体には表7-2-13のような特徴がある。この特徴に応じて、真空管と半導体が使い分けられている。

表7-2-12　マイクロ波の用途例

分野	原理別の用途例					
	誘電体加熱	プラズマ生成・加熱	情報送受信	センシング・イメージング	電磁エネルギー授受・伝送	電磁波探知(*)
産業	乾燥、加熱、滅菌、防徴、粉末冶金、ゴム加硫、セラミックス焼結	プラズマエッチング、プラズマアッシング、人工ダイヤ生成				
通信・放送			衛星通信、地上波放送、衛星放送、見通し通信、モバイル端末通信			
交通		ロケット推進		航空レーダー、船舶レーダー、自動車レーダー、気象レーダー、速度取締用レーダー、自動ドアセンサー、スピードガン		
医療	医療器具滅菌、電気メス、電子線治療			心拍・呼吸・睡床センサー、乳がん検出		
エネルギー		核融合炉用プラズマ			無線給電	
有害物処理	放射線廃棄物減容、アスベスト処理、プラスチック廃棄物の油化・ガス化	フロン分解、ダイオキシン分解				
安全				ボディーチェック		
研究	マイクロ波化学	質量分析器			粒子加速器	地球観測衛星、電波天文

(*)マイクロ波発振機能は必ずしも必要としない

表7-2-13　真空管と半導体増幅・発振器の特徴

	真空管	半導体
信号出力強度	高い	低い
出力安定度	不安定	安定
周波数安定度	悪い	良い
出力信号の位相	不揃い	揃っている
周波数	固定	可変
駆動電圧	高い	低い
効率	高い	低い
大きさ	大きい	小さい
寿命	短い	長い
出力電圧当たりのコスト	低い	高い
製造コスト	高い	低い

3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（2）

【マイクロ波用真空電子デバイスの用途】
　真空波管のマイクロ波発振・増幅器は、現在では半導体では性能あるいはコスト的に対応が難しい大出力分野で使われることが多く、出力と発振周波数に応じて現在では表7-2-14のような用途で使われている。半導体の性能・コスト面での進化により、反射型クライストロンなど、半導体にほとんど置き換えられた真空波管もある。

表7-2-14　真空電子デバイスの種類に応じた現在の用途の例

真空管種類		出力（ｋW）	周波数（GHz）	主な用途
クライストロン	連続波	10～1300	0.35～35	誘電体加熱、衛星通信、地上通信、地上波放送、衛星放送、粒子加速
	パルス	1～100000	0.32～35	誘電体加熱、核融合、船舶・航空・気象レーダー、粒子加速
進行波管		0.001～400	0.4～45	衛星通信、地上通信、地上波放送、衛星放送、航空レーダー
マグネトロン	連続波	0.4～100	0.9～2.45	誘電加熱
	パルス	1～5000	1～17	船舶・航空・気象レーダー、粒子加速
ジャイロトロン		0.6～1000	8～250	誘電加熱、ロケット推進、衛星通信、核融合、無線給電

3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

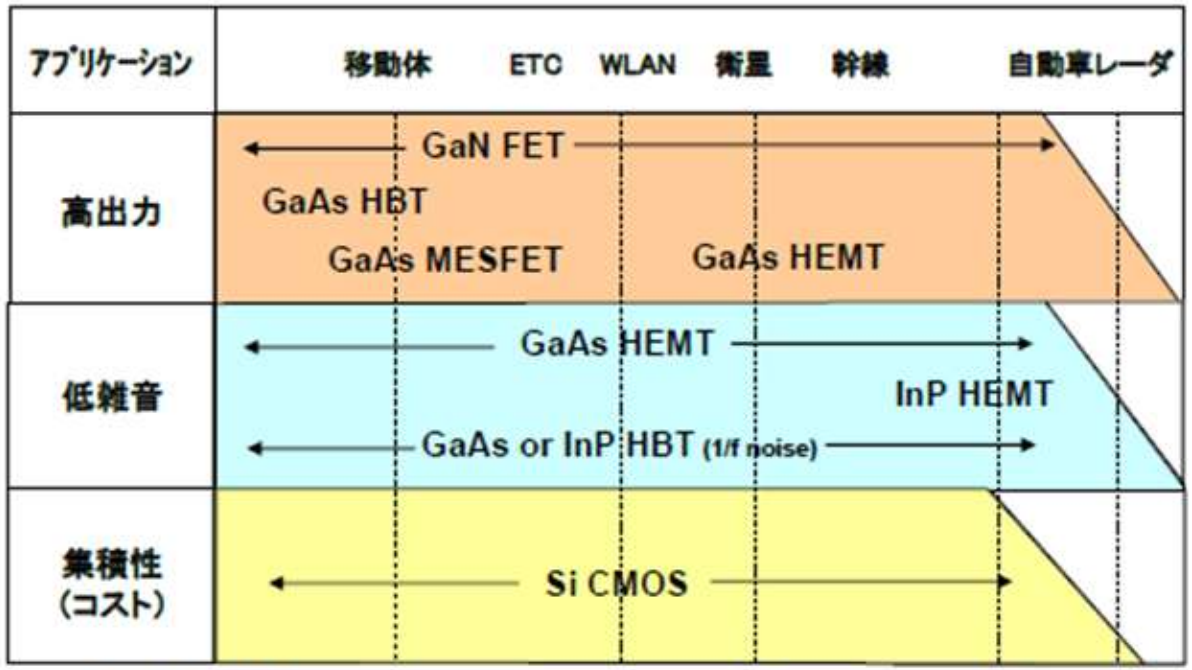
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（3）

【マイクロ波用半導体デバイスの用途】

半導体素子については、主として大電力を伴わない用途である通信や自動車用レーダーなどに使われてきた。しかしながら、GaNのように比較的出力の高い素子の開発が進んだり、発振周波数や位相が非常に安定しているという特徴を生かして複数の発振・増幅素子を並列して使う工夫などにより、徐々に真空管デバイス用途を置き換えつつある。現在では誘電体加熱、通信・放送、センシング・イメージングの分野で幅広く使われているほか、プラズマ生成・加熱、電気エネルギー授受・伝送の分野でも超大電力を必要とする用途以外での利用が広がっている。超大電力が必要であり半導体素子の利用が進んでいない分野の例としては核融合炉用プラズマ発生装置、ビーミング推進ロケット、無線給電（大電力）が挙げられる。

図7-2-54はマイクロ波用半導体デバイスの材料による用途の例である。用途としては重なるが、同じ用途の中で特性により使い分けられる。

図7-2-54　マイクロ波用半導体デバイスの材料による用途の例



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

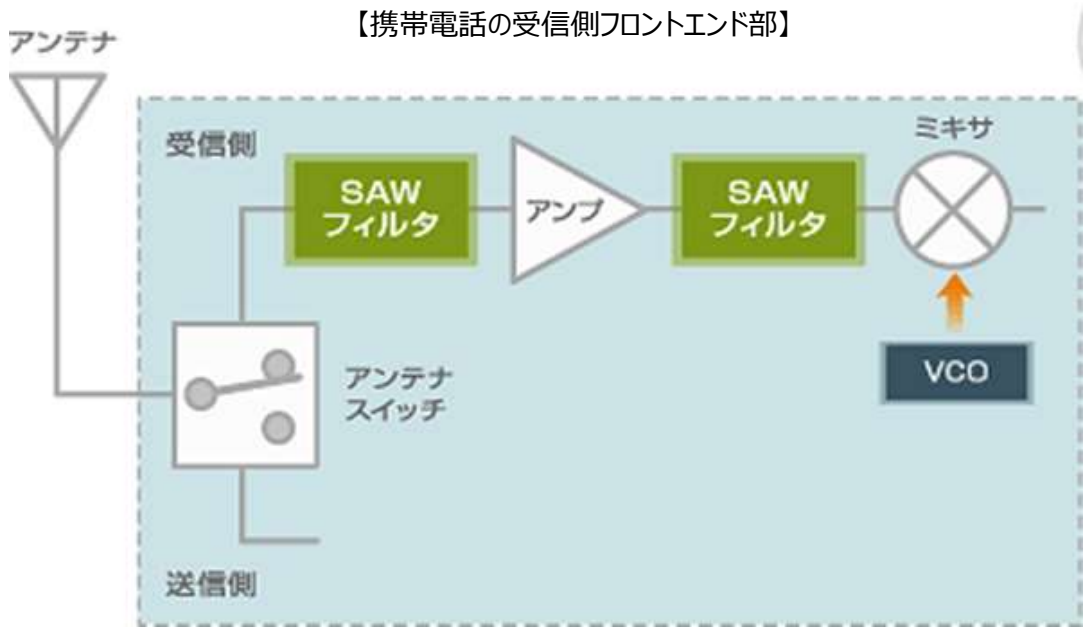
○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（4）

【マイクロ波用フィルターの用途例】

ここまでマイクロ波の発振・増幅用デバイスの用途を記してきた。マイクロ波用のフィルターはこれらデバイスを用いてモジュールや組立品にする際の重要な部材である。様々な部分で使われているが、一例として、携帯電話に使われる例を図7-2-55に示す。

図7-2-55　マイクロ波用フィルタの使用例



3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（5）

【マイクロ波用機器・部分品の用途（レーダー）】

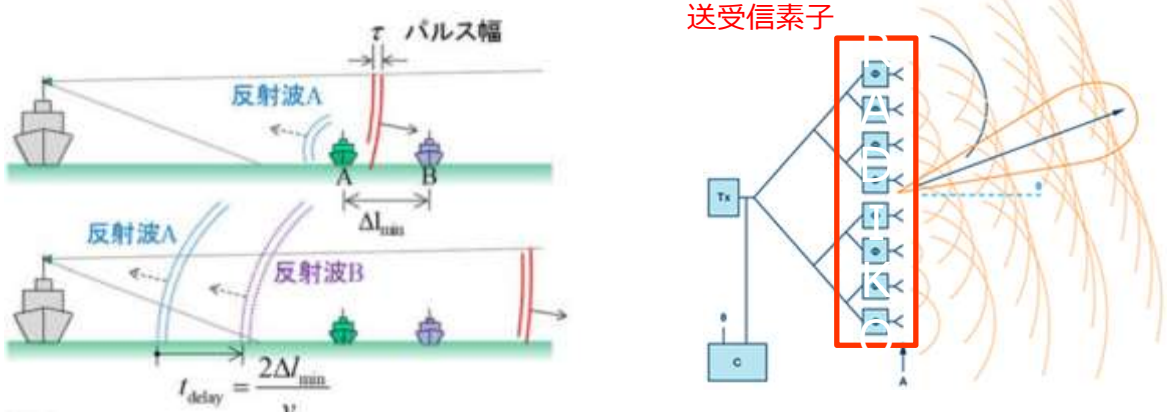
マイクロ波は、もともとレーダーとして利用するために開発が始まった経緯があり、現在でも主要な用途の一つである。マイクロ波用機器や部分品もレーダーに使われるものも多い。レーダーの技術の代表的なものに、パルスレーダーとフェーズドアレイレーダーが挙げられる（図7-2-56）。

レーダーには通常はパルス波が使われる。パルスレーダーはパルス波を発信して対象物からの反射波を受信して対象物までの距離や方位を測定する。この時、同じ方向に並んでいる2つの対象物の反射波が重ならない距離がレーダーの距離分解能になるが、これはパルス幅が狭いほど高くなる。またレーダーの最小探知距離もパルス幅が狭いほど小さくなる。このようにパルス信号の狭さはパルスレーダーの性能に関する重要な要素である。

フェーズドアレイレーダーは、多数の送受信素子を平面上に複数配列し、各素子の位相を電子的に制御することで、アンテナの回転などの機械的な動きを伴わずに、指向性の高いマイクロ波ビームを高速で走査できる。しかし多数の素子の位相を個々に変調（移相）したり（パッシブ式）、個々の素子に移相に加えて送信機能を持たせる（アクティブ式）必要があるため、位相などの精密な制御が可能でかつ小型なマイクロ波用部品が必要とされる。米軍で1983年に配備の始まったフェーズドアレイレーダー（SPY-1A）には真空波管であるクロスフィールド管が、北米航空宇宙防衛司令部の2001年に完成したレーダー（FPS-120）には半導体が使われている。

無人航空機のレーダーや送信機、電子保護システムなどには真空波管と半導体を組み合わせたMPM（マイクロ波用電力モジュール）アンプが使われている。

図7-2-56　パルスレーダーとフェーズドアレイレーダー



3.品目の主たる用途の調査分析（6）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（6）

【マイクロ波用機器・部分品の用途（通信）】

マイクロ波は直進性が高く、電離層による減衰が小さいため、地上と衛星間、衛星同士の通信に適している（図7-2-57）。直進性の高さは傍受されにくさにもつながる。マイクロ波の中でも大気や降雨による減衰も小さいX帯（8～12GHz）は特に軍事用でよく利用されている。

通信やレーダー探知の傍受や妨害を受けにくくする技術として重要な技術にスペクトラム拡散がある。スペクトラム拡散はさらに直接拡散と周波数ホッピング・チャープ変調に分けられる（図7-2-58）。

直接拡散は狭帯域の送信信号を広帯域の信号に変換した後に送信し、受信後に再び本来の狭帯域に戻す方式である。広帯域信号にすることで周波数あたりの信号強度が弱まるため、傍受が難しくなる。また通常は狭い帯域で発生するノイズが混入しても、最終的には広帯域に渡る周波数あたりの信号強度の弱いノイズとなるため、ノイズの妨害を受けにくいという利点もある。直接拡散の他に、送信信号の周波数を一定時間ごとに不連続に変えていく周波数ホッピングと、送信信号の周波数を連続的に変えていくチャープ変調がある。周波数の変化パターンを予め知らないと傍受が難しくなる。また特定の周波数帯域に固定したノイズにも強くなる。周波数ホッピングでは短い周期で周波数を切り替える技術が必要である。

図7-2-57　衛星によるマイクロ波通信のイメージ

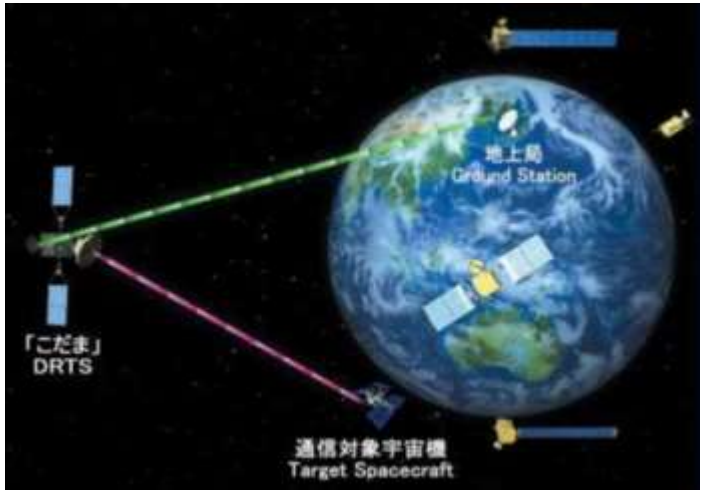
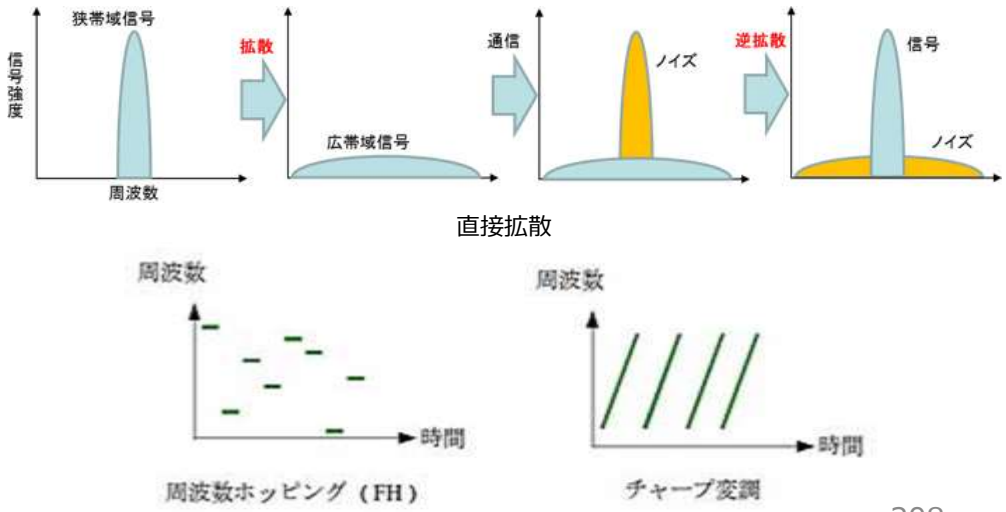


図7-2-58　スペクトラム拡散の種類



3.品目の主たる用途の調査分析（7）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（7）

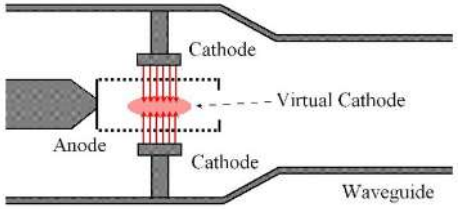
【マイクロ波用機器・部分品の用途（軍事・治安維持用途）】

民生用・軍事用を問わず、社会のインフラストラクチャーが電気・電子機器によって支えられている現在、一瞬でこれらの機器を破壊することのできる電磁パルス（EMP）攻撃は戦闘における重要な攻撃・防御手段となっている（図7-2-59）。電磁パルスを発生させる代表的な方法は核爆弾の爆発であるが、核爆発によらず電磁パルスを発生させる方法も既に実用化されている。そのための手段の一つとして、マイクロ波用機器や部分品も使われる。大電力電磁パルスを発生させる機器の例としてバーチャルカソードオシレータ（バーカトール）が挙げられる。また電磁パルス兵器の開発プログラムの例としてアメリカ軍のCHAMP（Counter-electronics High-powered Microwave Advanced Missile Project）がある。電磁パルスはまた防御手段としても使われる。例えばドローンの制御信号を妨害して無効化する手段として用いられており、またミサイルなどに直接マイクロ波を照射して破壊するLight speed weaponの1種として使うことが検討されている。

対人向けの用途としては、ミリ波の誘導加熱で皮膚の表面温度を上げる指向性エネルギー兵器（Active Denial System）が開発されている。またマイクロ波の照射は体表や頭蓋骨などに損傷を与えずに外傷性脳損傷を起こすことが動物実験で示されており、アメリカ軍もかつてこれに関連した技術としてV2K（Voice-to Skull）技術を使った兵器に触れていたという。

図7-2-59　マイクロ波の軍事分野の利用例

【バーカトールの原理】



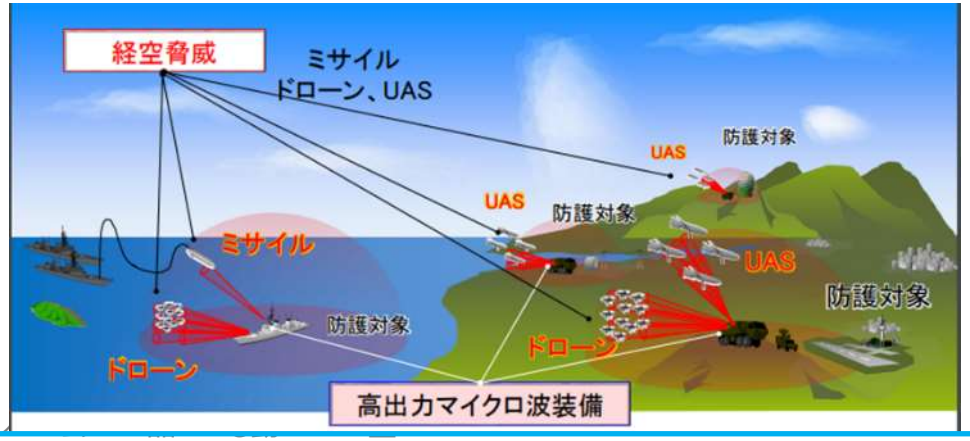
【Active Denial System】



【"CHAMP"ミサイル】



【マイクロ波による防御構想】



3.品目の主たる用途の調査分析（8）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（1）

【宇宙用】

貨物等省令第6条第二号イ（一）4の三では、ヘリックス形のもの、折返し導波管形のもの又は蛇行導波管回路形の真空電子デバイスで宇宙用に設計したものを規制対象としている。通商産業省の通達「輸出貿易管理令の運用について」によれば、「宇宙用に設計した」とは「地表から１００キロメートルを超える高度で動作するよう設計若しくは製造されたこと又は試験に合格して適格とされたことをいう。」とされている。

ヘリックス形のもの、折返し導波管形のもの又は蛇行導波管回路形の真空電子デバイスとは進行波管（TWT）のことである。TWTは効率（直流電流から高周波電力への変換効率）が高く、出力が高く、動作帯域が広いという特徴があるため、衛星通信、衛星放送などに現在でも使われている。衛星に搭載される通信機器で最も電力を消費するのが電力増幅器であるとされている。宇宙用の性能に関する共通の規格は定められていないが、一般的には、表7-2-15のような性能が求められる。出力と大きさ・重量などのように相互に影響し合う特性もある。動作温度については、一例として局所温度250℃（TELEDYNE e2V社）という値が見られる。

半導体増幅器の出力、電力効率の進歩に伴い、小型、軽量、高信頼性といった長所のためTWTからの置き換えも進んでいる。

表7-2-15　宇宙用の真空電子デバイスに求められる性能の例

特性	備考
高効率（直流電力から高周波電力への変換効率）	
高出力	出力が高くなると放熱部が大きくなり、大きさ・重量が増す。
小型	周波数が低くなる（波長が長くなる）と大きさが増す。
軽量	
長寿命	熱電子陰極材料の蒸発の影響を受けやすい。
高信頼性	
耐衝撃性	

3.品目の主たる用途の調査分析（9）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（2）

【真空電子デバイス用熱電子陰極】

真空電子デバイスは現在では大出力を必要とする用途で用いられる場合が多い。そのため、真空電子デバイス用の熱電子陰極には、真空下で高電流密度を発生できる性能が求められることが多い。真空電子デバイス用熱電子陰極には、表7-2-16に示すような特性が求められる。このような特性を満たすためにさまざまな改良が加えられてきたが、例えば現在主流の含浸型カソードの1種のスカンデートカソードは高い電流密度を実現できるがイオン衝撃には弱い傾向がある一方、M型カソードは電流密度ではスカンデート型に劣るがイオン衝撃には強いなど一長一短がある。従って、出力、期待寿命など求める特性に応じた熱電子陰極が使われることになる。

表7-2-16　真空電子デバイス用熱電子陰極に求められる性能の例

高電流密度	①発生した電子ビームの電場が電子銃の加速電場を相殺して電子ビームを発生できなくなる限界（空間電荷制限電流値）と、②陰極の温度により限界値が決まる
イオン衝撃耐性	電子ビームと残留ガス分子の衝突で発生したイオンが電子銃へ逆加速され陰極表面に衝突して陰極表面の変質・破壊を引き起こす
真空管内の残留ガスによる汚染への耐性	残留ガスの汚染により陰極性能が劣化する
動作温度	動作温度が高いと真空中で陰極の電子放出材料原子が蒸発して減少する

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（1）

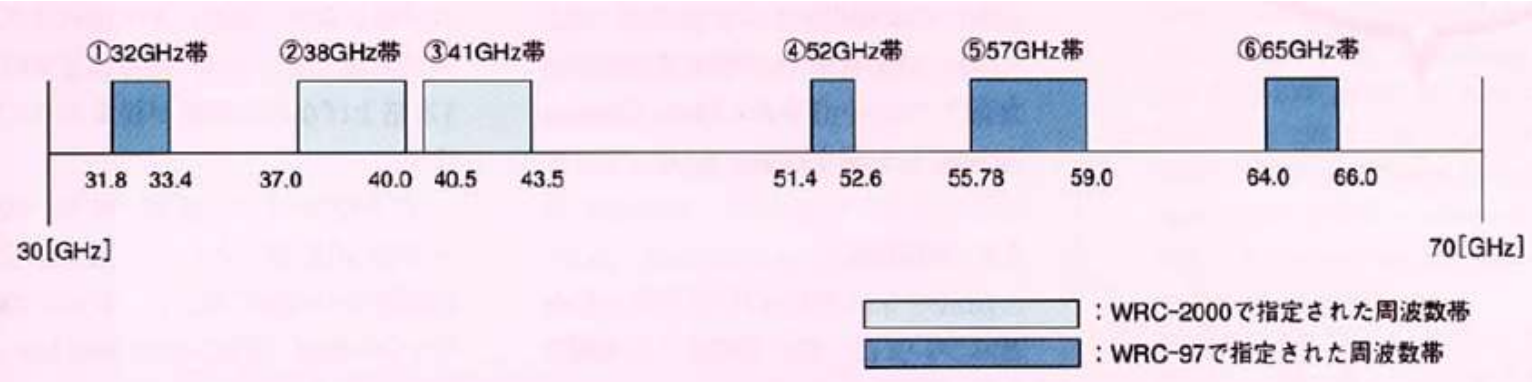
【国際電気通信連合が無線通信用に割り当てた周波数帯域】

貨物等省令第6条第二号のイ（四）では動作周波数31.8GHz超43.5GHz以下の周波数帯を規制の対象外とし、ハおよびホでは31.8GHz超37GHz以下の周波数帯で、瞬時帯域幅を中心周波数で除した値の制限を設けていない。

これらの周波数帯を例外的に扱う理由は判明しなかったが、これらの周波数帯は国際電気通信連合（ITU）が高密度固定無線業務へ割り当てた周波数帯と概ね一致する（図7-2-60）。

ITUのRadio Regulations（2020年版）ではこれらの高密度固定無線業務へ割り当てた周波数帯について、加盟国の政府に対し、規制条項の検討の際には高密度固定無線業務へ割り当てた周波数帯であることを考慮するよう定めている。ただし貨物等省令第6条第二号の周波数帯とは一部一致しない部分もある。

図7-2-60　ITUの高密度固定無線業務へ割り当てた周波数帯



4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（2）

マイクロ波の重要な利用目的がレーダーである。一般にレーダーと周波数には表7-2-17のような関係があり、レーダー設計の際の基礎的な条件となっている。

表7-2-17　周波数帯とレーダー性能の関係

物理的大きさ	低い周波数ほど機器が大きく、重くなる
送信電力	低周波数の大型レーダーほど大電力を送信できる
ビーム幅	狭いほど角度分解能が上がる （アンテナ口径)/（波長）に正比例
大気による減衰	酸素と水蒸気による吸収、液体の水による散乱の影響がほとんど 周波数が高いほどいずれも増加するが特定の周波数帯で減衰の少ない領域がある

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（3）

アメリカ合衆国の国家電気通信情報管理庁（NTIA）によると、レーダーは用途に応じて表7-2-18のような周波数帯が使われている。

表7-2-18 レーダーの用途と周波数帯の関係

設置場所	特徴	周波数帯（GHz）	用途	利点
地上	大電力により長距離まで探索でき、大口径により低周波数でも高い角度分解能を実現できる	0.03-3	宇宙監視　早期警戒レーダー	大気による減衰と自然ノイズがほとんど無視できる
		8-12	ミサイル防衛レーダー	大気による減衰が少ない
船舶	さまざまな気象条件、低い仰角で使われる	2.7-10.5	地表探索、低空飛行ターゲットの検出、船舶の操縦	目標からの反射波のうち、地面　水面で反射する成分（マルチパス）で直接反射信号がキャンセルされにくい周波数
航空機	探索距離、角度分解能、大きさの兼ね合いが求められる	0.4-1	航空機用レーダー	航空機に搭載可能な大きさ
		2-4		
		4.2-4.4	レーダー高度計（対地高度測定）	
		5.2-5.9	大型航空機用気象レーダー	嵐の奥深くまで浸透する能力と機器の大きさ
		8.5-11	小型航空機用気象レーダー	重さの兼ね合い
		8.5-11	戦闘機用攻撃　偵察レーダー	大気による減衰が少なく、ビーム幅が狭い（角度分解能が高い）
		13-18	戦闘機用攻撃　偵察レーダー	
		31-36	地上探索、地形追従、地形回避用航空機レーダー	高い角度分解能、小型
宇宙	消費電力、大きさの制限が大きい	1-11	合成開口イメージングレーダー	省電力、小型
		2-18	宇宙搭載高度計	
		5-36	衛星搭載スキャトロメーター（海面近くの風速　風向き測定）	
		13-18	降水レーダー	

4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（4）

貨物等省令第6条第二号イの真空電子デバイスには、構造別に規制を設定している部分がある（表7-2-19）。
それとは別に、進行波真空電子デバイスについてビーム形状による規制がある（表7-2-19の線ビーム型）。

表7-2-19　真空電子デバイスの規制対象となる構造

イ（一）３の空洞結合型の進行波真空電子デバイス

線ビーム型 (Linear Beam, O-Type)	速度変調管 (クライストロン)	直進型	連続波	高出力、高効率、高利得
			パルス波	超高出力（100MW級）、高効率、高利得
		反射型		現在は半導体に置き換わりつつある
	進行波管(TWT)	ヘリックス型		広帯域
		結合空洞型		
	後進波管	BWA/BWO		発振周波数を広範囲に変えられる
電磁界直交型 (Crossed Field, M-Type)	共振型	マグネトロン	連続波	高効率、安価、小型なものが手に入る
			パルス波	
	非共振型	CFA/CFO		高効率
メーザー効果型(Helical Beam, M-Type)		ジャイロトロン		ミリ波帯で高出力

イ（一）４のヘリックス型・折返し導波管型・蛇行導波管回路型の進行波真空電子デバイス

イ（二）のクロスフィールド増幅真空電子デバイス

イ（一）５の環状電子ビーム、非軸対称電子ビーム、複数電子ビームを有するものが含まれる

4.品目の技術動向調査（5）

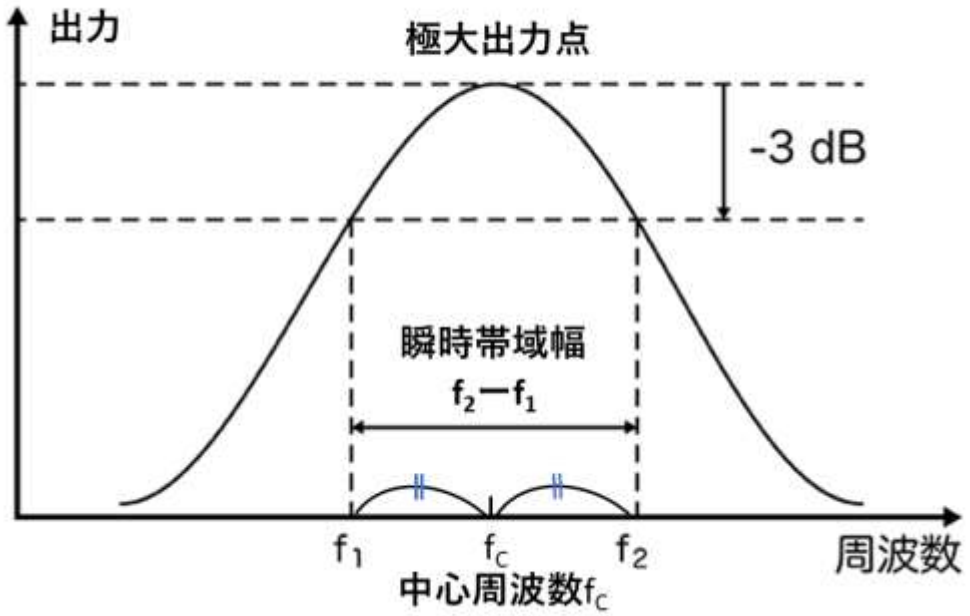
○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（5）

「輸出貿易管理令の運用について」では瞬時帯域幅について「他の動作パラメータを変えない状態で、出力が３デシベル未満の変化範囲にとどまる帯域幅をいう。」としている。

貨物等省令第6条第二号では、イ（一）3、5、ハ（一）、（二）、（三）、（五）、（六）、（七）、ホ（一）、（二）、（四）、（五）1、2、カ（二）で瞬時帯域幅を中心周波数で除した値についての規制がある。この値は図7-2-61のように算出する。

図7-2-61　瞬時帯域幅と中心周波数



瞬時帯域幅を中心周波数で除した値＝$(f_2-f_1)/f_C$

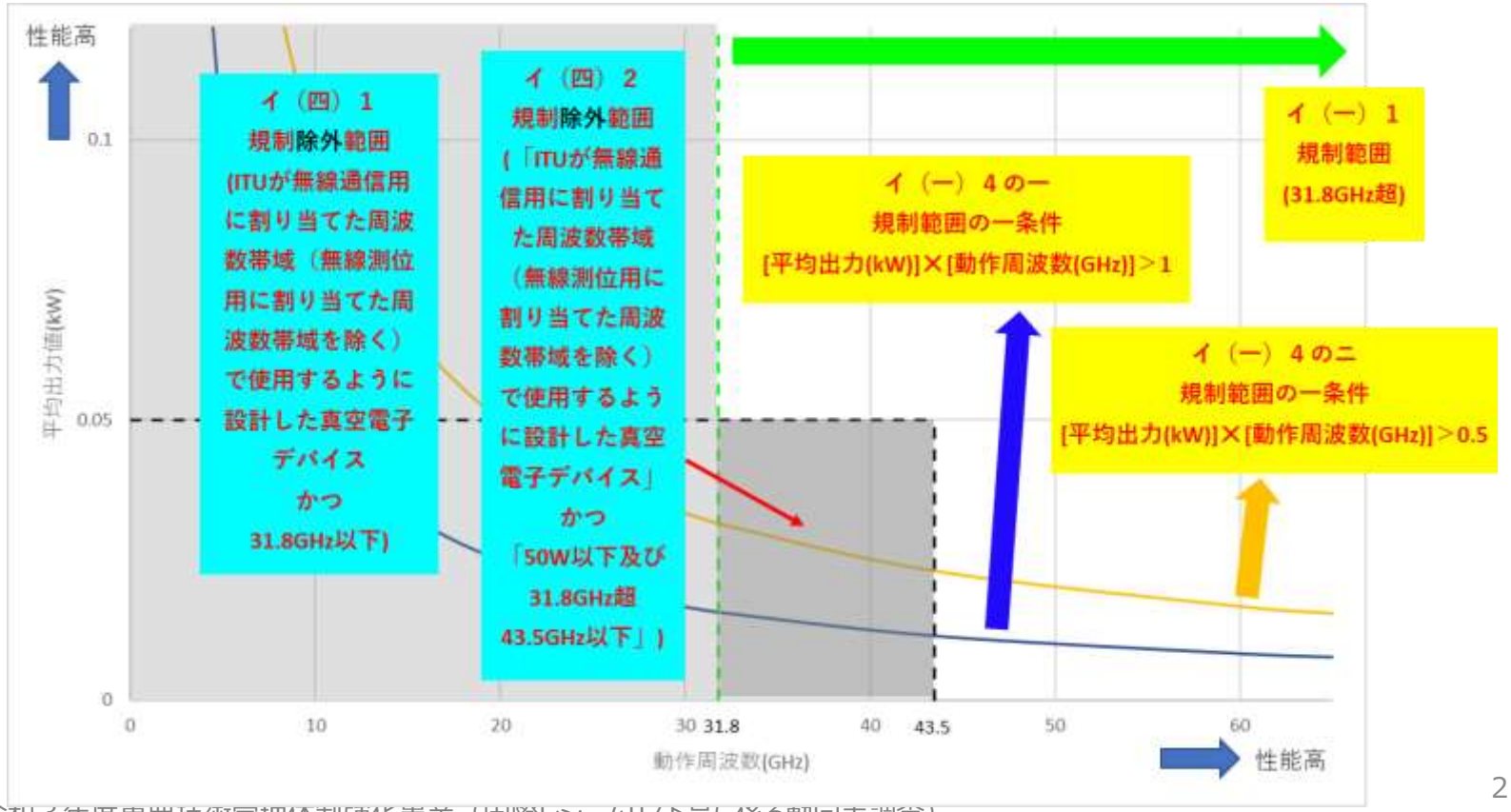
4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（6）

貨物等省令第6条第二号イの真空電子デバイスは、種々の規制パラメータの組み合わせが設定されている。初めに動作周波数を含む規制が定められているものについて、平均出力値との関係で規制内容を図7-2-62に示す。イ（四）は規制の除外範囲である。

図7-2-62　真空電子デバイスの動作周波数に関する規制パラメータ
（進行波真空電子デバイスであって、ヘリックス形のもの、折返し導波管形のもの又は蛇行導波管回路形）



4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（7）

貨物等省令第6条第二号イ（四）と第6条第二号ヌでは、国際電気通信連合（ITU）が無線通信用に割り当てた周波数帯域のうち、無線測位用に割り当てた周波数帯域を除く周波数帯域で使用するように設計された品目を除外している。

ITUの「Radio Regurations」の2020年版によると、無線通信用に割り当てた周波数帯域のうち、無線測位用に割り当てた周波数帯域を除く周波数帯域は、貨物等省令第6条第二号イ（四）と第6条第二号ヌの規制範囲である3GHz超から43.5GHz以下の範囲では表7-2-20のとおりである。

表7-2-20　ITUが無線通信用に割り当てた周波数帯域のうち、無線測位用に割り当てた周波数帯域を除く周波数帯域（2020年版による）

GHz
3.700-4.200
4.400-5.000
5.925-8.500
10.68-13.25
14.4-15.4
17.7-24.05
24.75-31.8
36-43.5

4.品目の技術動向調査（8）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（8）

貨物等省令第6条第二号イの真空電子デバイスは、図7-2-63のように規制されている。

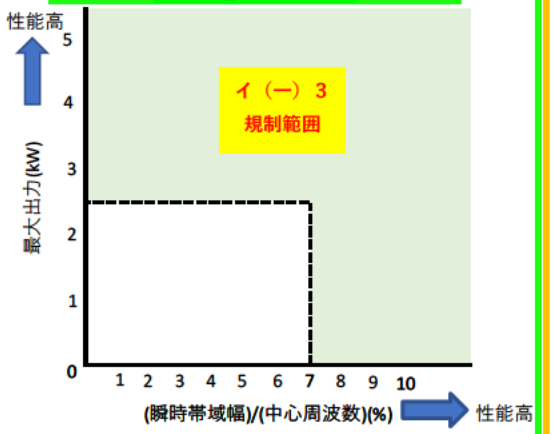
図7-2-63　貨物等省令第6条第二号イの真空電子デバイスの規制パラメータ

イ：真空電子デバイス

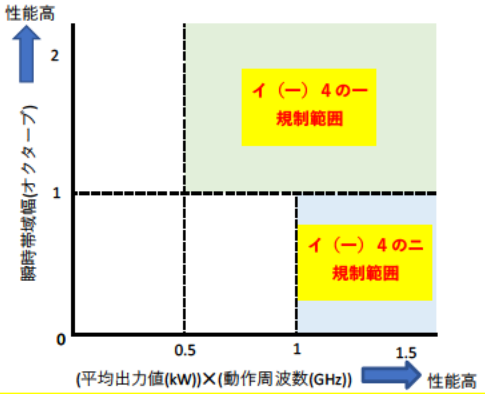
イ（一）１：動作周波数＞31.8GHz
又は
イ（一）２：フィラメントを加熱してから定格出力に達する時間＜3秒
又は
イ（一）５：（瞬時帯域幅）/（中心周波数）≧10%
かつ
環状・非対称・複数のいずれかの電子ビームを有する

イ（一）：進行波真空電子デバイス

イ（一）３：空洞結合型の進行波真空電子デバイス



イ（一）４：ヘリックス型・折返し導波管型・蛇行導波管回路型の進行波真空電子デバイス



又は
イ（一）４の三：宇宙用に設計
又は
イ（一）４の四：グリッド式電子銃を有する

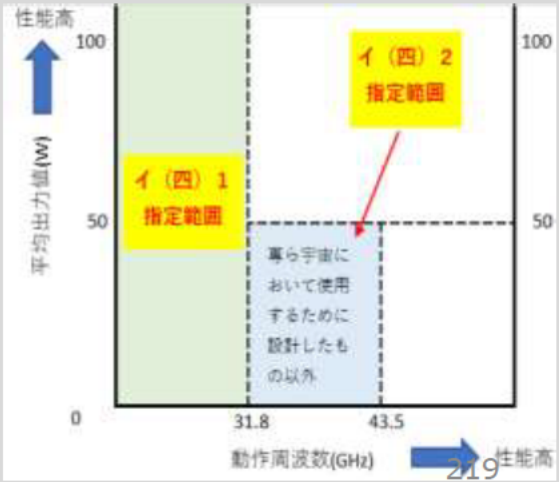
イ（三）：デュアルモードで動作可能

イ（二）：クロスフィールド増幅真空電子デバイス

利得＞17dB

規制対象から除外

イ（四）：ITUが無線通信用に割り当てた周波数帯域（無線測位用に割り当てた周波数帯域を除く）で使用するように設計した真空電子デバイス



4.品目の技術動向調査（9）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（9）

貨物等省令第6条第二号ロではの真空電子デバイスに使用するように設計した熱電子陰極を図7-2-64のように規制している。
この規制を一般的な熱電子陰極材料の性能に仮に当てはめると、図7-2-65のようになる。

図7-2-64　熱電子陰極の規制パラメータ

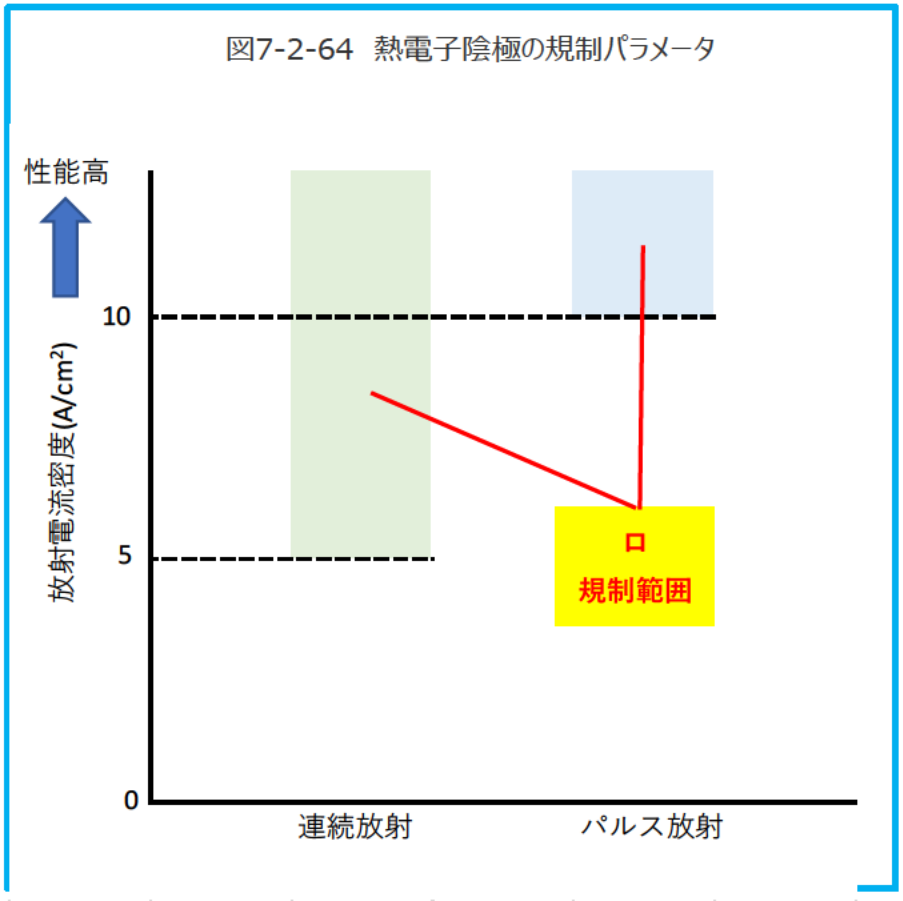
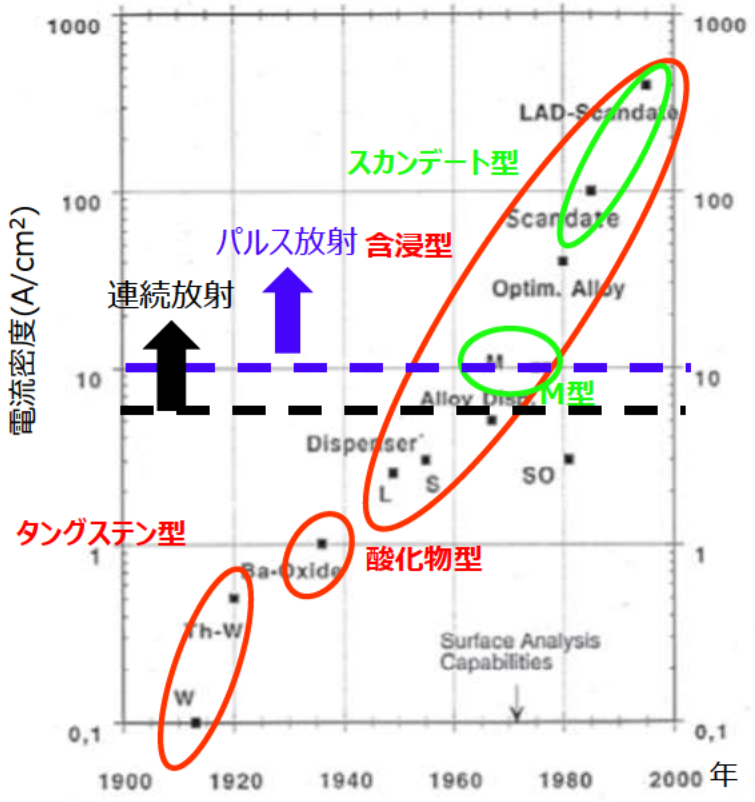


図7-2-65　熱電子陰極の規制パラメータ



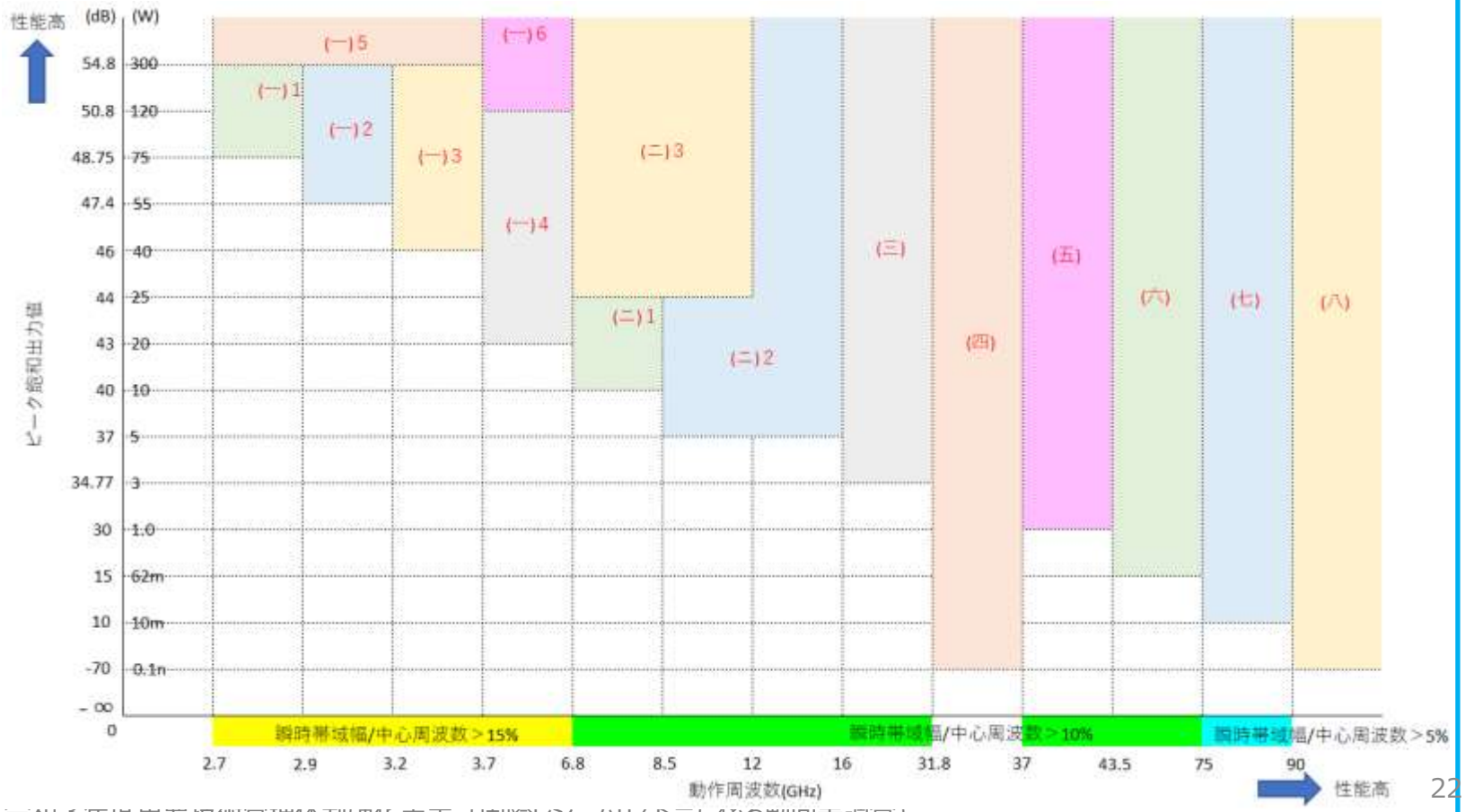
4.品目の技術動向調査（10）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（10）

貨物等省令第6条第二号ハのモノリシックマイクロ波集積回路増幅器は、動作周波数、ピーク飽和出力値、瞬時帯域幅と中心周波数の比で図7-2-66のように規制パラメータが設定されている。

図7-2-66　モノリシックマイクロ波集積回路増幅器の規制パラメータ



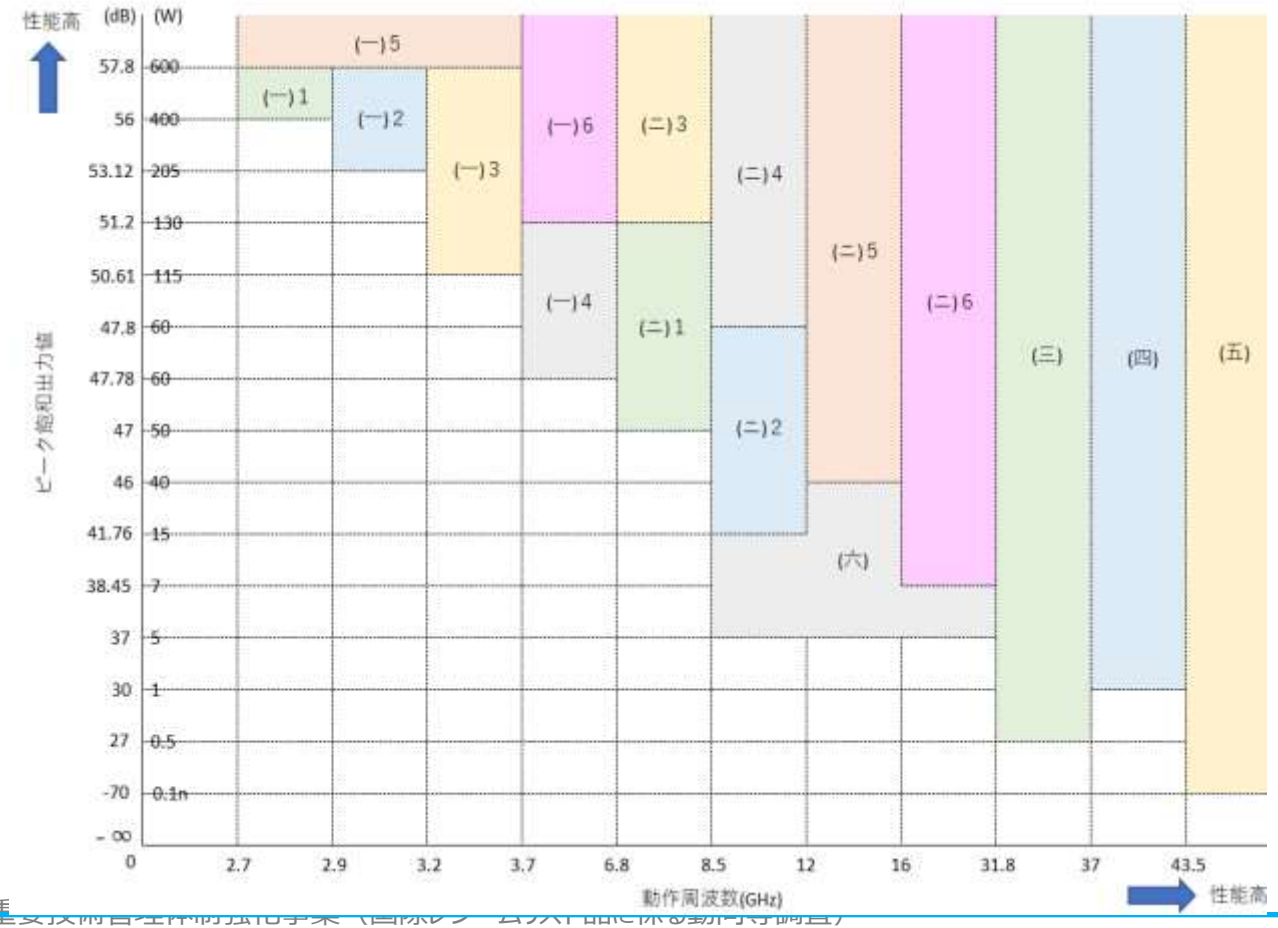
4.品目の技術動向調査（11）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（11）

貨物等省令第6条第二号ニのマイクロ波用ディスクリートトランジスタは、動作周波数、ピーク飽和出力値で図7-2-67のように規制パラメータが設定されている。

図7-2-67　マイクロ波用ディスクリートトランジスタの規制パラメータ



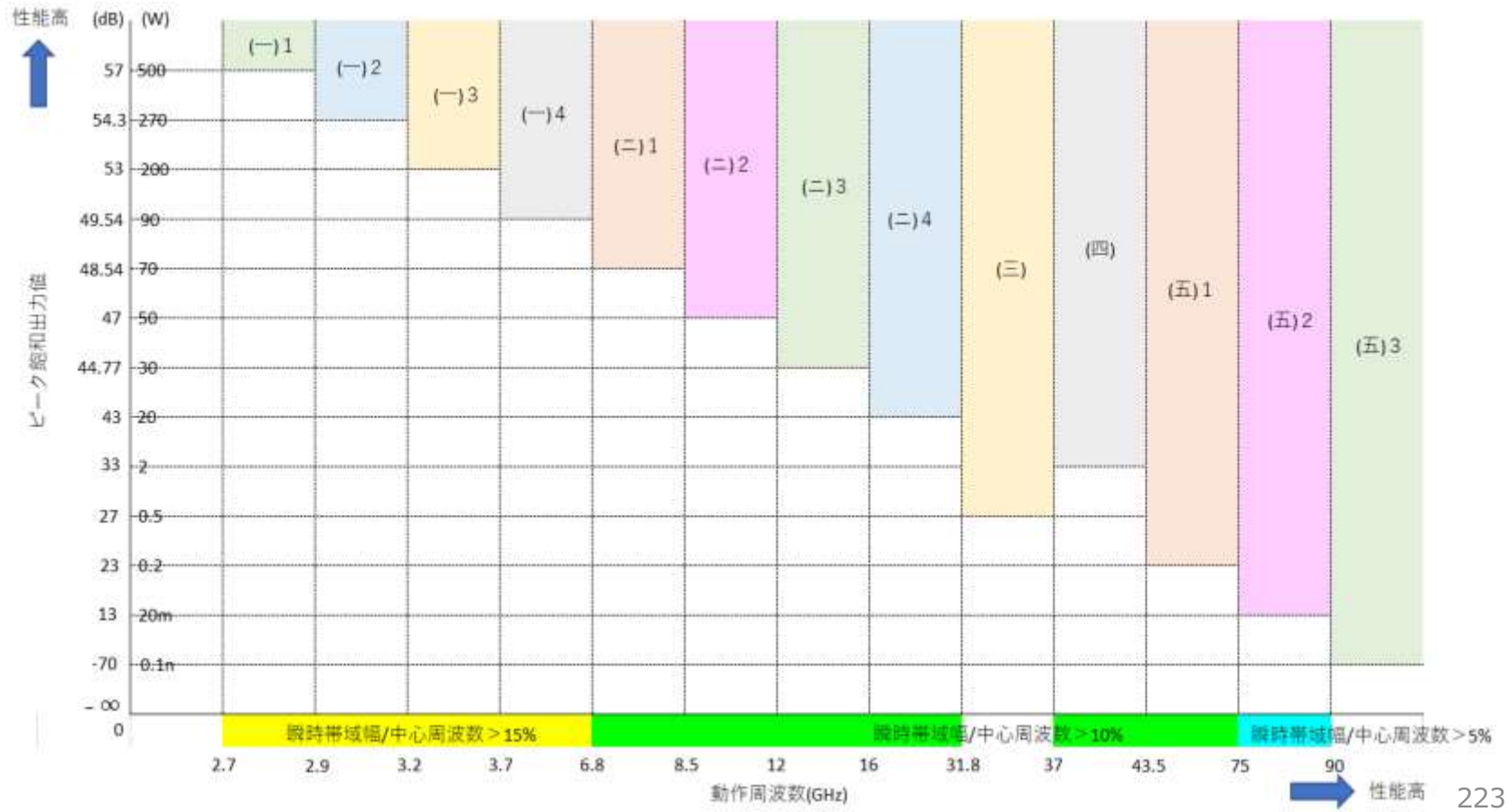
4.品目の技術動向調査（12）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（12）

貨物等省令第6条第二号ホのマイクロ波用固体増幅器（モノリシックマイクロ波集積回路増幅器及びハーモニックミクサ又はコンバータを除く）は、動作周波数、ピーク飽和出力値、瞬時帯域幅と中心周波数の比で図7-2-68のように規制パラメータが設定されている。

図7-2-68　マイクロ波用固体増幅器（モノリシックマイクロ波集積回路増幅器及びハーモニックミクサ又はコンバータを除く）の規制パラメータ



4.品目の技術動向調査（13）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（13）

【フィルターの同調】

貨物等省令第6条第二号への電子的又は磁気的に同調可能な帯域通過フィルターと、貨物等省令第6条第二号トの電子的又は磁気的に同調可能な帯域阻止フィルターは、表7-2-21では赤枠の部分が該当する。いずれの方式も、10マイクロ秒未満で同調可能なものがあると考えられる。

近年研究が進められている電磁光学的・光学的に同調可能なフィルターは規制対象外と考えられる。

表7-2-21　マイクロ波用フィルターの同調方法の例

調整手段	フィルター種類	原理
手動またはモーターで調整	同軸型フィルター（キャビティ型）	ネジでキャビティ内の容量Cを調整
	ファブリペロー共振器	モーターでエタロン（反射面）間の距離を調整
MEMSの動作で制御	キャビティ型	圧電素子や静電気動作等でMEMSを駆動しキャビティ内の容量を調整
	分布定数型（常電導）	バネと静電気動作の組み合わせ等でMEMSを駆動しインダクタンス等を調整
	誘電体フィルター	圧電素子等でMEMSを駆動し誘電体間の距離を調整
	ブラッググレーティングファイバ	poly-SIの遠近でエバネッセント場（電磁場）を調整してグレーティングフィルターの屈折率を調整
	ファブリペロー共振器	圧電素子でエタロン（反射面）間の距離を調整
温度で制御	ファブリペロー共振器	干渉する層の厚さを熱で調整
	分布定数型（超電導）	温度で超電導状態を制御
磁気的に制御	フェリ磁性材料	外部磁場の強さでフェリ磁性体の共振周波数を調整
電子的に制御	可変抵抗、容量、インダクタ	バラクタで可変容量ダイオードの静電容量を変える
	マッハ・ツェンダー干渉計	光電材料の屈折率変化で光信号の位相などを変える
電磁光学的・光学的に制御	誘導ブリルアン散乱	キャリア光とポンプ光の波長を制御
	リング共振器	電磁光学的に光導波路の屈折率を変化させる
	光ディレイライン	キャリア光の波長を変える

規制対象の可能性

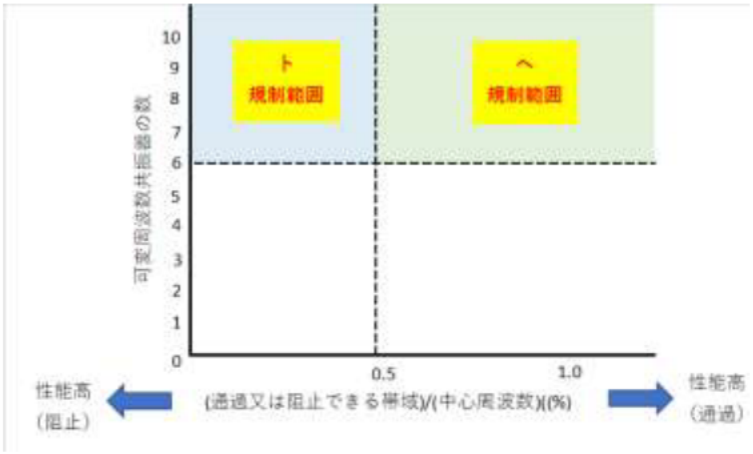
4.品目の技術動向調査（14）

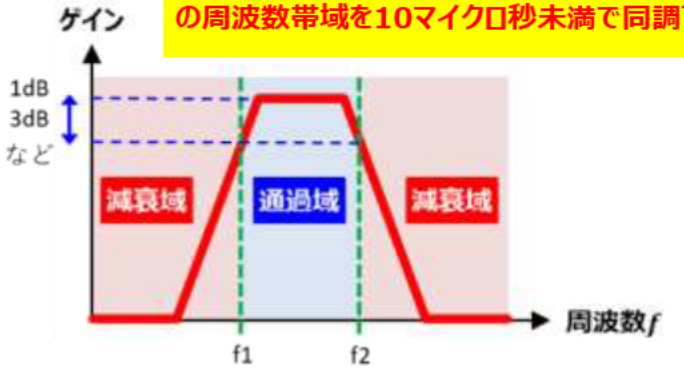
○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

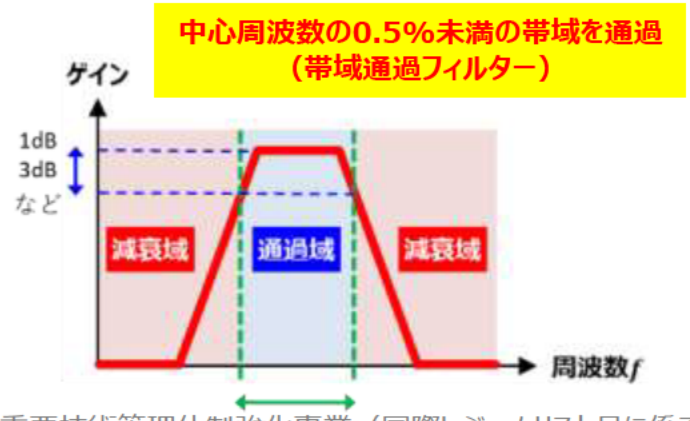
①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（14）

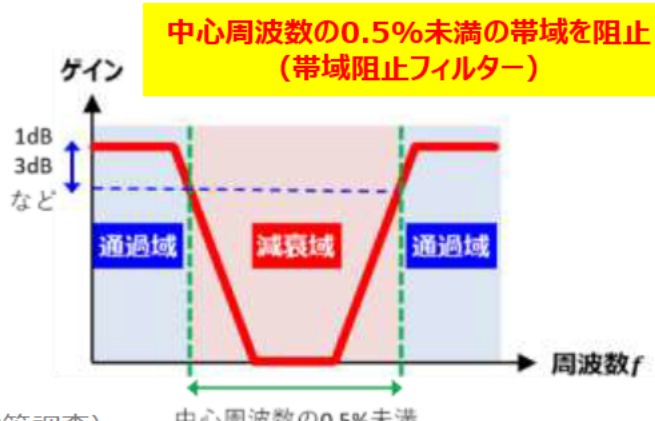
貨物等省令第6条第二号への電子的又は磁気的に同調可能な帯域通過フィルターと、貨物等省令第6条第二号トの電子的又は磁気的に同調可能な帯域阻止フィルターは、図7-2-69のパラメータで規制されている。

図7-2-69　電子的又は磁気的に同調可能な帯域通過フィルター・帯域阻止フィルターの規制パラメータ









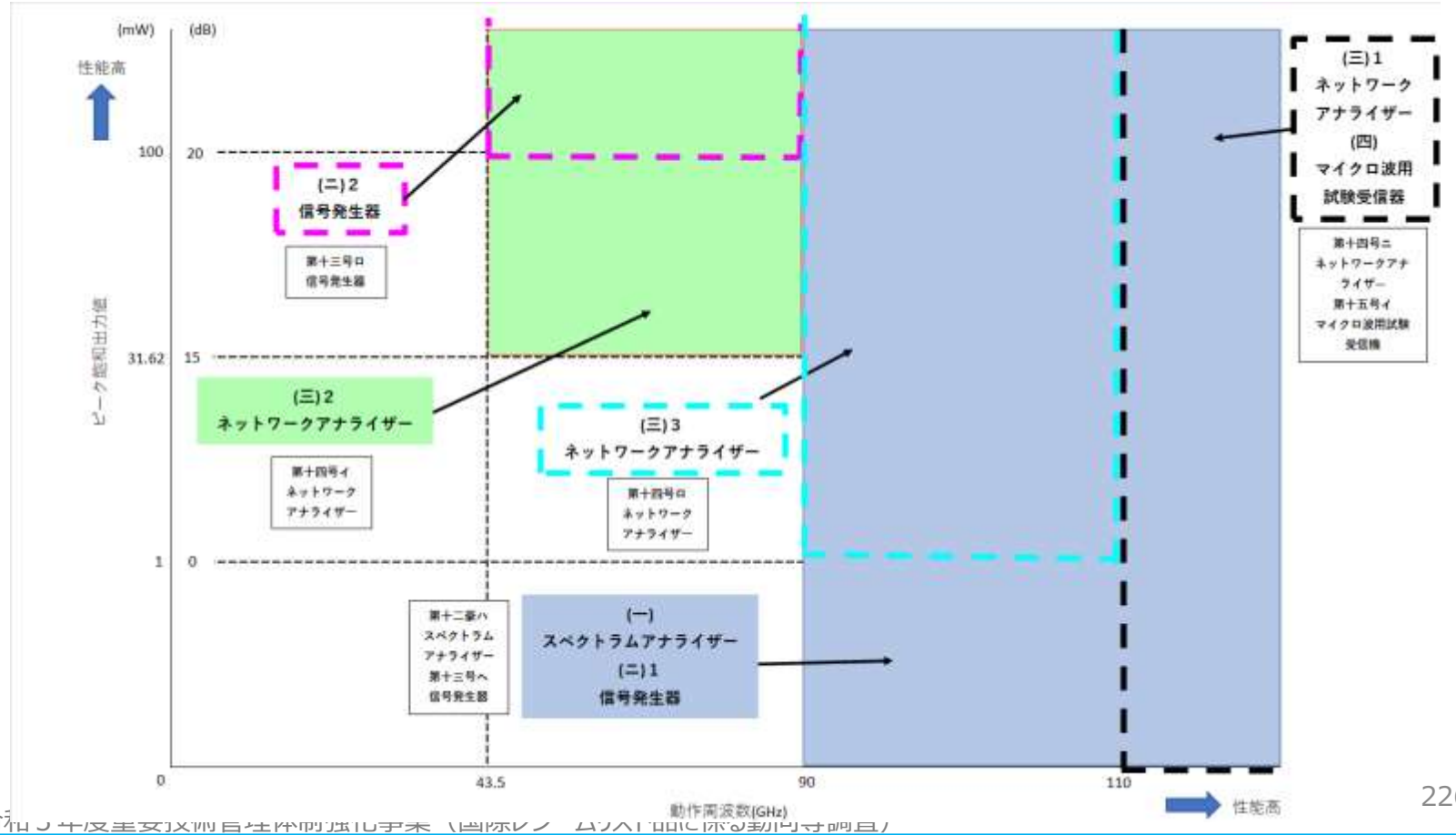
4.品目の技術動向調査（15）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（15）

貨物等省令第6条第二号リのハーモニックミクサ又はコンバータは、使用対象の装置によって、図7-2-70のように規制されている。
規制値は使用対象の装置自体の規制値と一致している。

図7-2-70　ハーモニックミクサ又はコンバータの規制パラメータ



4.品目の技術動向調査（16）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（16）

貨物等省令第6条第二号ヲは、発振器又は発振機能を有する組立品について、動作周波数とオフセット周波数の隔たりに対する単側波帯位相雑音（SSB）の比の値で規制している。動作周波数に関する規制は設定されていない。図7-2-71には動作周波数が3.0GHz、30GHz、110GHzの例を示す。

「搬送波に対する1Hz当たりの単側波帯位相雑音」は図7-2-72に示す値である。なお「1Hz当たりの単側波帯位相雑音の比」は、対数のdBm単位で表された搬送波電力と雑音においては、両者の差で算出される。搬送波（carrier）に対する比であることを示すため、単位はcを付してdBc/Hzとなる。

図7-2-71　貨物等省令第6条第十三号二の規制範囲（例）

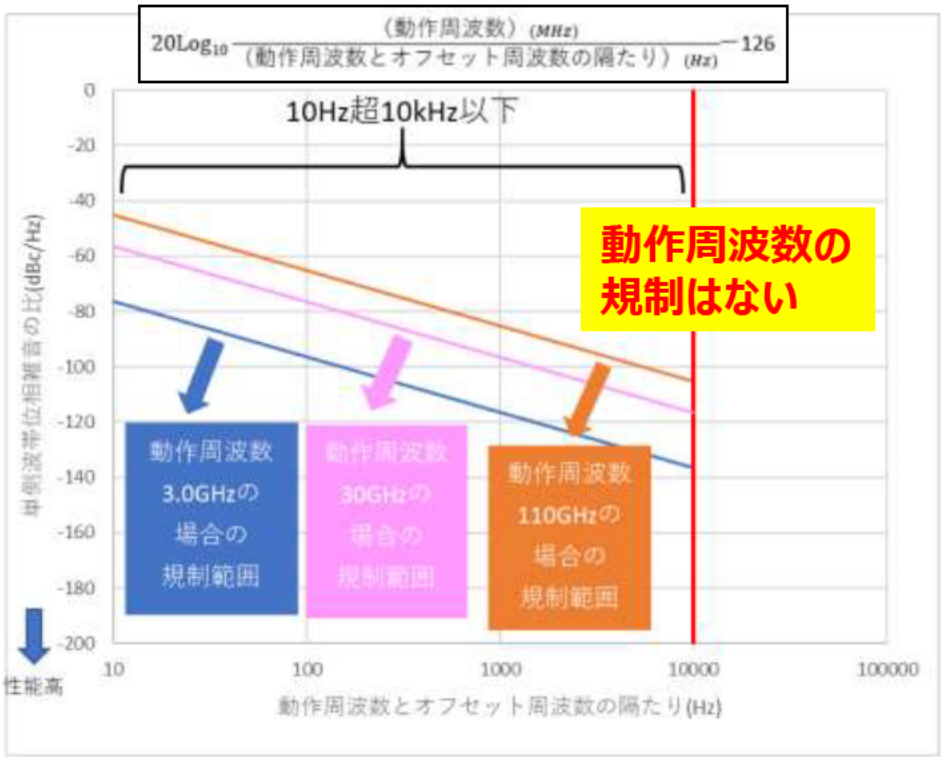
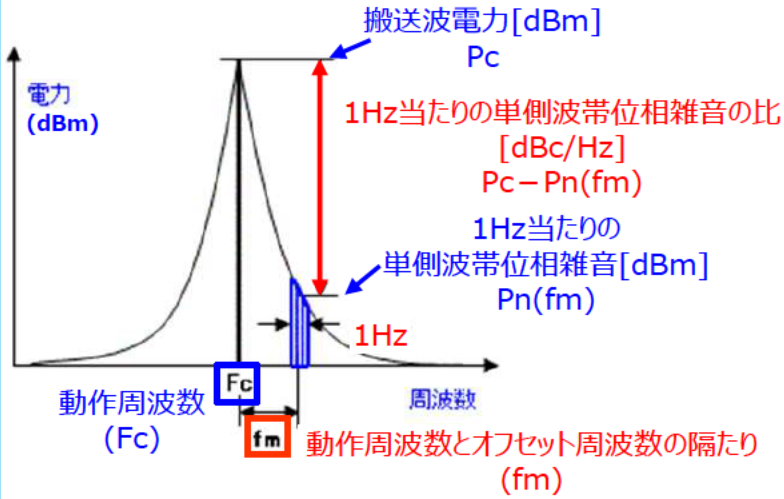


図7-2-72　動作周波数とオフセット周波数の隔たり、搬送波に対する1Hz当たりの単側波帯位相雑音の比



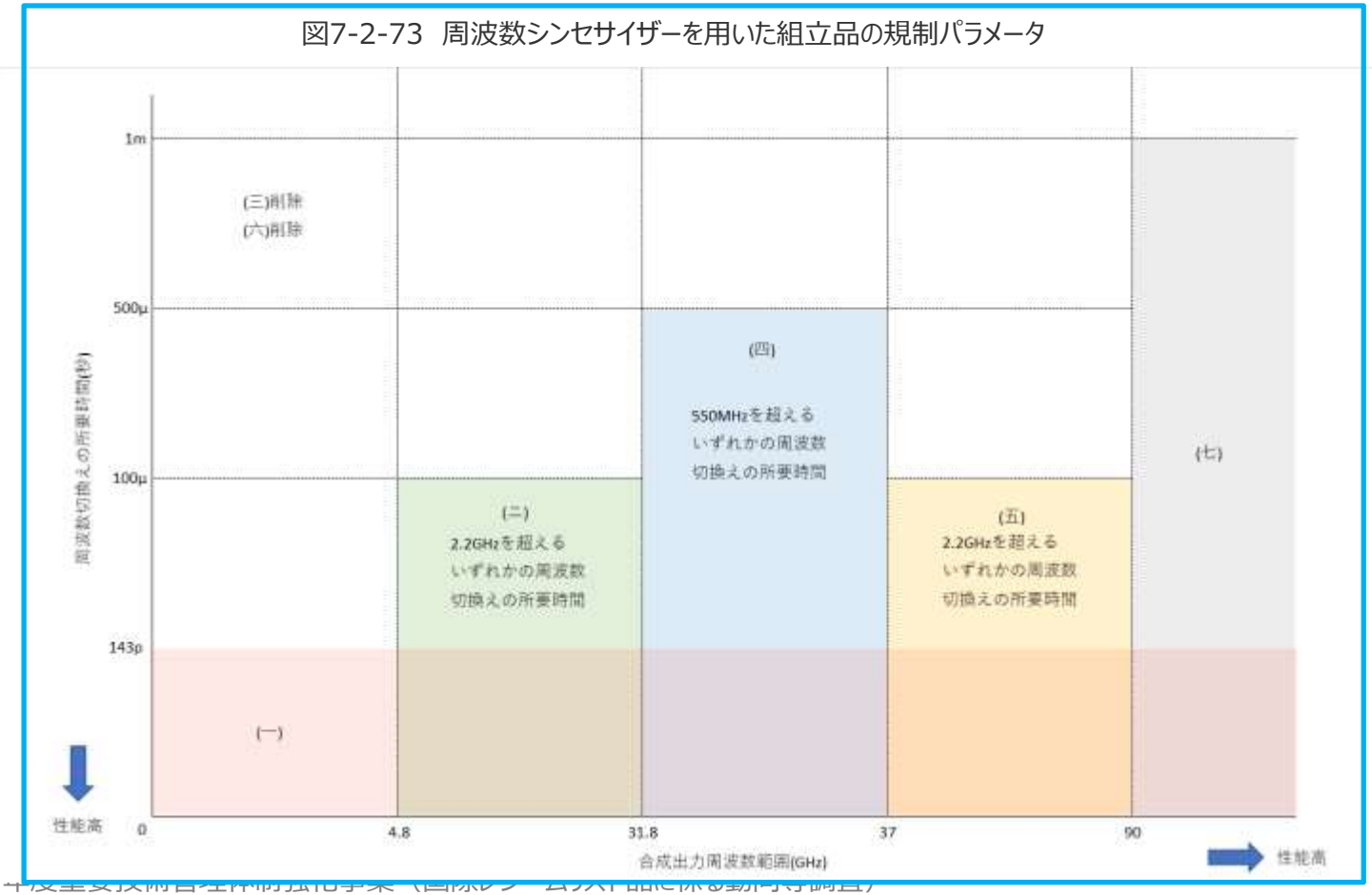
4.品目の技術動向調査（17）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（17）

貨物等省令第6条第二号ワの周波数シンセサイザーを用いた組立品は、合成出力周波数範囲、周波数切換えの所要時間で図7-2-73のように規制パラメータが設定されている。周波数を切換えられる周波数シンセサイザーの用途の一つとして、周波数ホッピング用の送受信機が挙げられる。アメリカ軍規格のFighter Data Link 16においては、ホッピングレートは77,800回/秒であり、12.853ナノ秒/回の周波数切換え頻度である。

図7-2-73　周波数シンセサイザーを用いた組立品の規制パラメータ



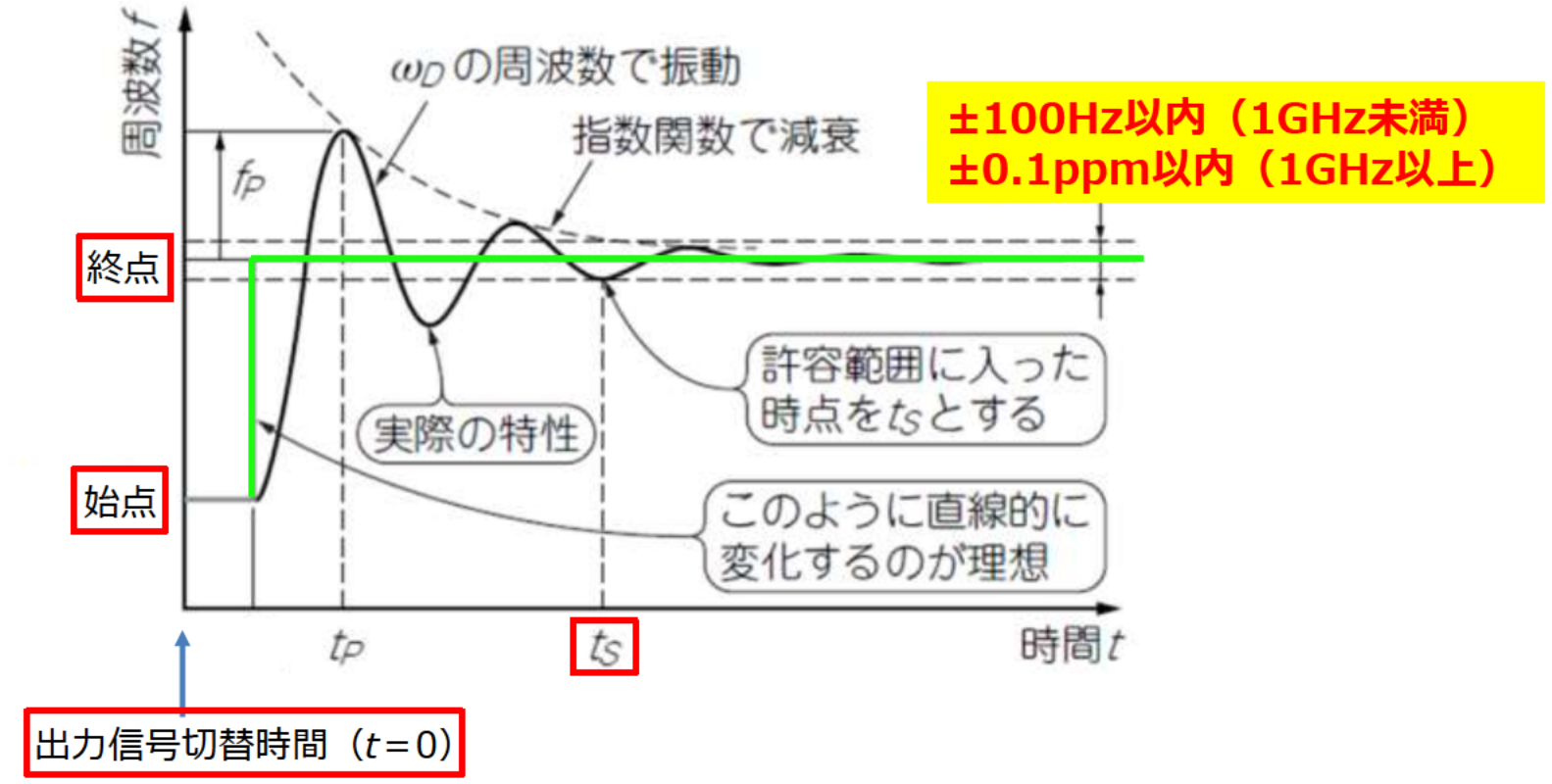
4.品目の技術動向調査（18）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（18）

貨物等省令第6条第二号ワの周波数シンセサイザーを用いた組立品は、周波数切換えの所要時間で図7-2-74のように規制パラメータが設定されている。

図7-2-74　周波数切換えの所要時間



4.品目の技術動向調査（19）

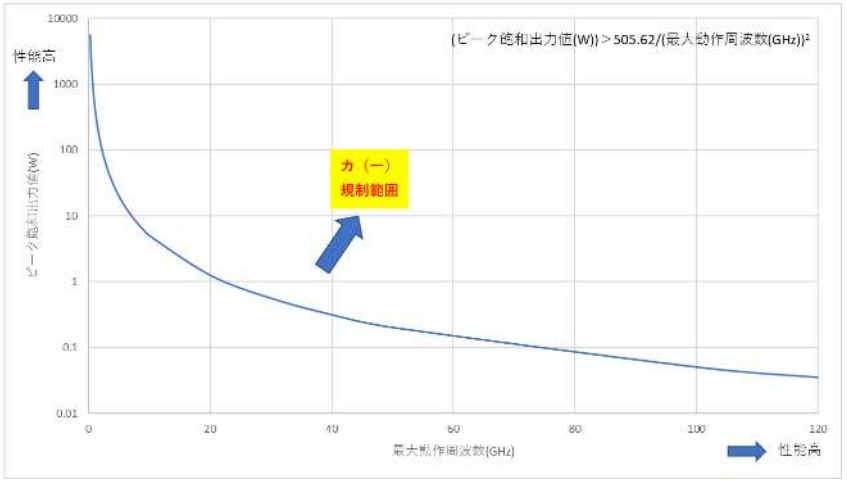
○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

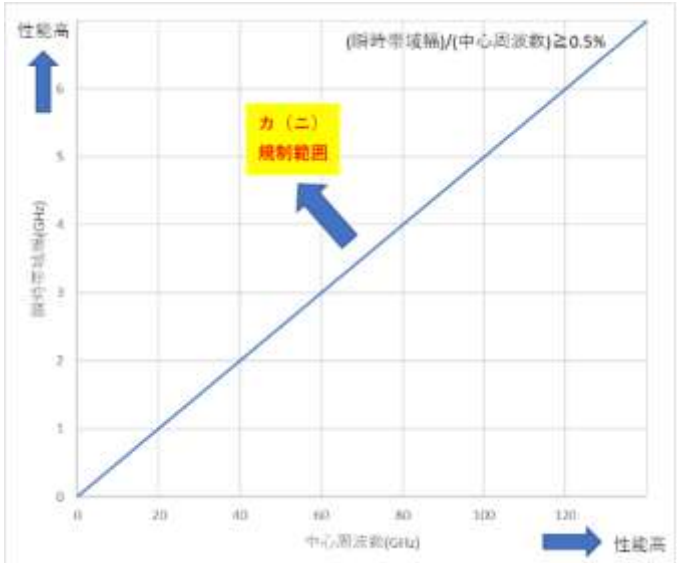
①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（19）

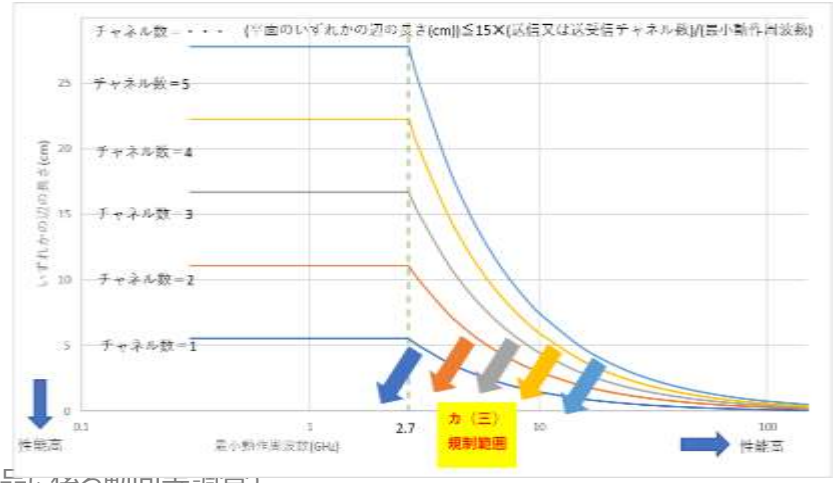
貨物等省令第6条第二号カは送受信モジュール、送受信用モノリシックマイクロ波集積回路、送信モジュール及び送信用モノリシックマイクロ波集積回路について図7-2-75に示すパラメータで規制している。

図7-2-75　送受信モジュール、送受信用モノリシックマイクロ波集積回路、送信モジュール及び送信用モノリシックマイクロ波集積回路の規制パラメータ

動作周波数＞2.7GHz
かつ下記の３つの条件を全て満たす







4.品目の技術動向調査（20）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（20）

貨物等省令第6条第十五号のマイクロ波用試験受信機は、表7-2-22のパラメータで規制されている。

表7-2-22　マイクロ波用試験受信機の規制パラメータ

110GHzを超える周波数で使用できる
かつ
下記の赤枠

IF処理後の受信信号処理	デジタルデータをアナログ信号に戻す機能	振幅と位相の同時測定
フィルタリング後ディスプレイ表示	ー	不可能
デジタル化後メモリに保存して随時呼び出して解析・表示	なし	不可能
	あり	可能

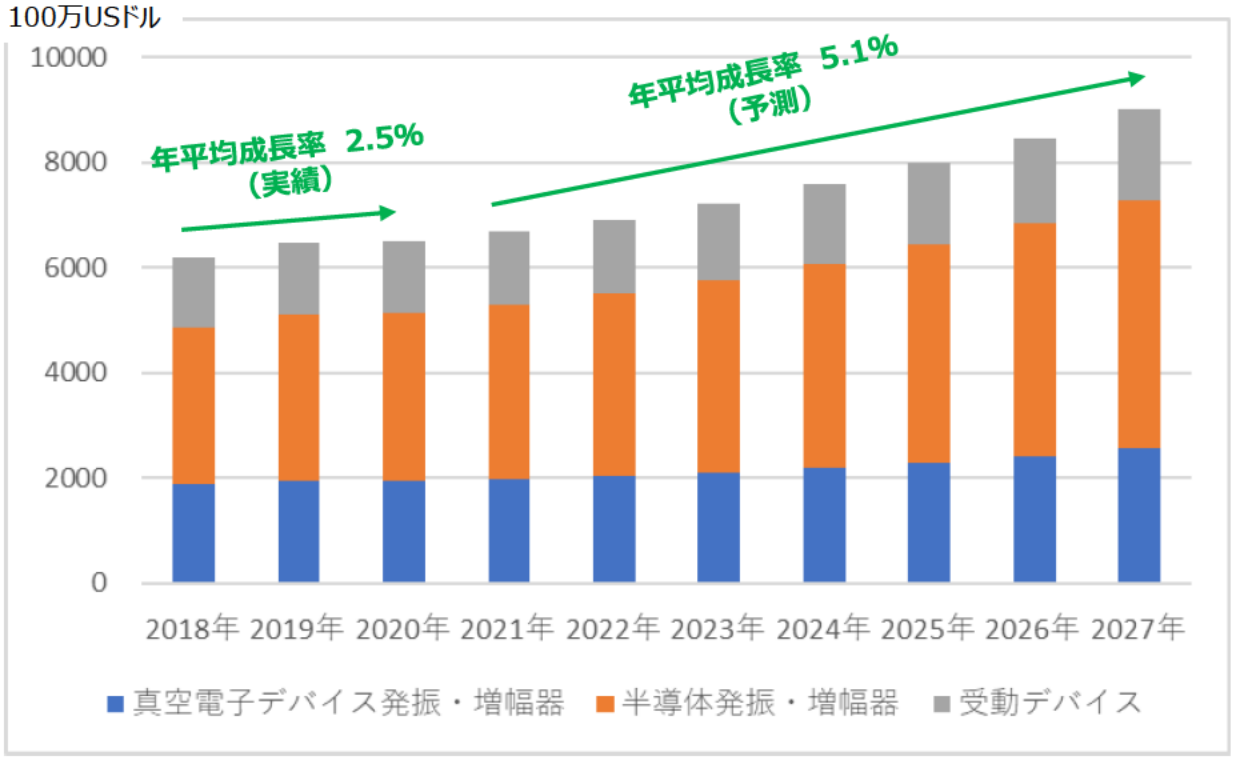
4.品目の技術動向調査（21）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（1）

マイクロ波デバイスの市場について、図7-2-76に示す。2020年までが実績値、2021年以降が予測値である。ここでのマイクロ波デバイスとは能動デバイス（発振器、増幅器）、及び受動デバイス（導波管（ウェーブガイド）、結合器（カプラ）、減衰器（アッテネータ）、フィルタ、アイソレータ、サーキュレータなどである。モジュールや組立品は含まない。

図7-2-76　マイクロ波デバイスの市場規模



		2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年
能動デバイス（発振器、増幅器）	真空電子デバイス	1880.5	1951.5	1949.8	1986.2	2040.7	2113.5	2202.3	2305.3	2424.2	2556.1
	半導体	2989.7	3154.6	3204.2	3319.3	3468.7	3654.6	3874.4	4127.0	4416.8	4740.2
受動デバイス		1324.0	1366.7	1358.3	1376.2	1406.2	1448.3	1500.5	1561.7	1632.6	1711.2
合計		6194.2	6472.8	6512.3	6681.7	6915.6	7216.4	7577.2	7994.0	8473.6	9007.5

4.品目の技術動向調査（22）

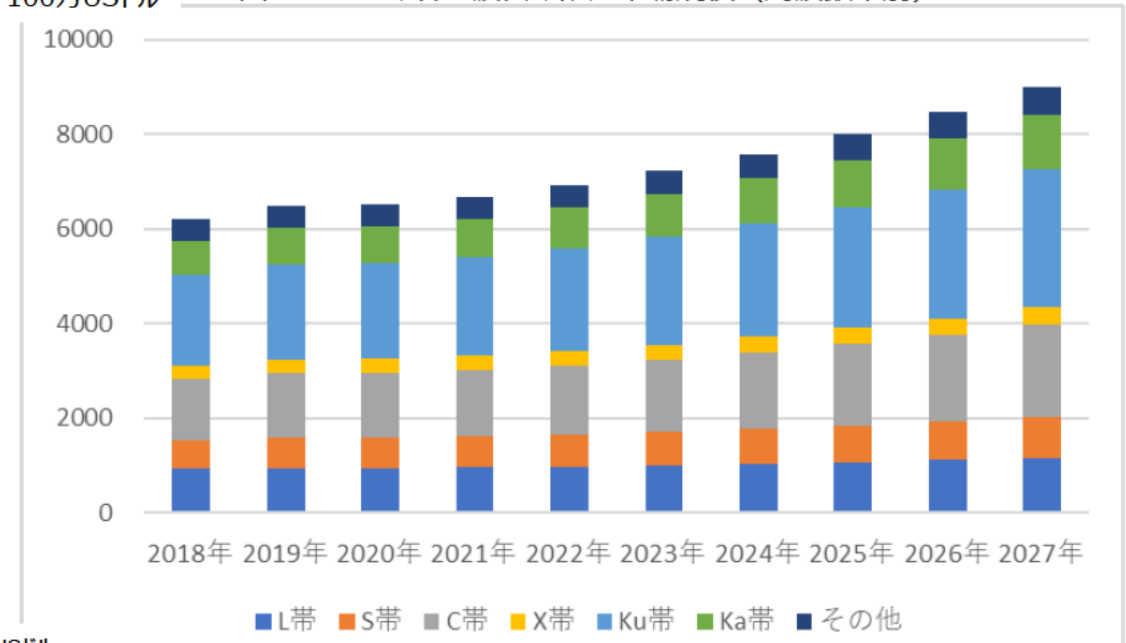
○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

マイクロ波デバイスの市場について、図7-2-77に周波数帯別に示す。

X帯の規模が前後の周波数帯の規模に比べて小さい。これはX帯が天候や大気の影響を受けにくい周波数帯であり、各種衛星や軍事用途で使われる場合が多い周波数帯であるため、民間の通信など大きい市場向けの利用が抑えられているためである可能性がある。

図7-2-77　マイクロ波デバイスの市場規模（周波数帯別）



100万USドル

周波数帯＼年		2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年
L帯	0.5-1.5GHz	919.0	946.6	947.5	957.8	975.6	1001.1	1033.3	1071.2	1115.4	1164.3
S帯	2-4GHz	604.5	631.0	633.8	649.4	671.2	699.4	733.3	772.5	817.6	867.0
C帯	4-8GHz	1305.1	1368.6	1377.4	1417.7	1472.1	1541.2	1623.7	1718.8	1828.1	1949.8
X帯	8-12GHz	279.1	288.4	288.9	293.1	299.7	308.9	320.2	333.5	348.9	366.0
Ku帯	12-18GHz	1912.9	2010.0	2026.5	2090.0	2174.5	2281.3	2408.3	2554.3	2722.0	2908.9
Ka帯	26-40GHz	733.1	773.6	782.4	810.6	847.2	892.8	946.7	1008.5	1079.4	1158.6
その他		440.6	454.6	456.0	463.0	475.3	491.7	511.8	535.2	562.2	593.0
合計		6194.3	6472.9	6512.4	6681.7	6915.6	7216.4	7577.2	7994.0	8473.6	9007.4

4.品目の技術動向調査（23）

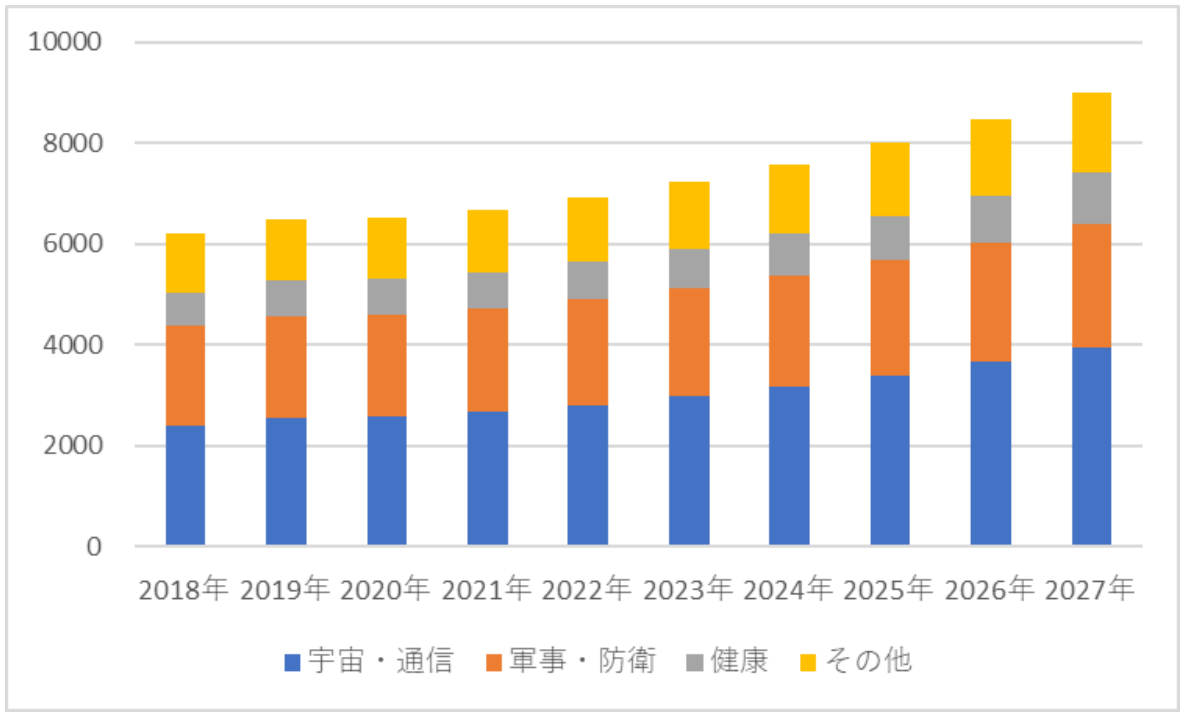
○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

マイクロ波デバイスの市場について、図7-2-78に最終用途別に示す。

宇宙・通信用途が最も多く、軍事・防衛用途がこれに次ぐ。

図7-2-78　マイクロ波デバイスの市場規模（最終用途別）



100万USドル

	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年
宇宙・通信	2390.1	2544.1	2570.1	2671.6	2804.0	2969.5	3164.9	3389.6	3648.3	3938.8
軍事・防衛	1973.5	2021.1	2024.4	2048.4	2087.4	2140.7	2206.3	2282.7	2369.7	2465.2
健康	659.2	693.9	699.6	720.4	748.3	783.9	826.6	875.7	932.1	994.8
その他	1171.5	1213.7	1218.2	1241.4	1275.8	1322.3	1379.5	1446.1	1523.5	1608.7
合計	6194.3	6472.9	6512.4	6681.7	6915.6	7216.4	7577.2	7994.0	8473.6	9007.4

4.品目の技術動向調査（24）

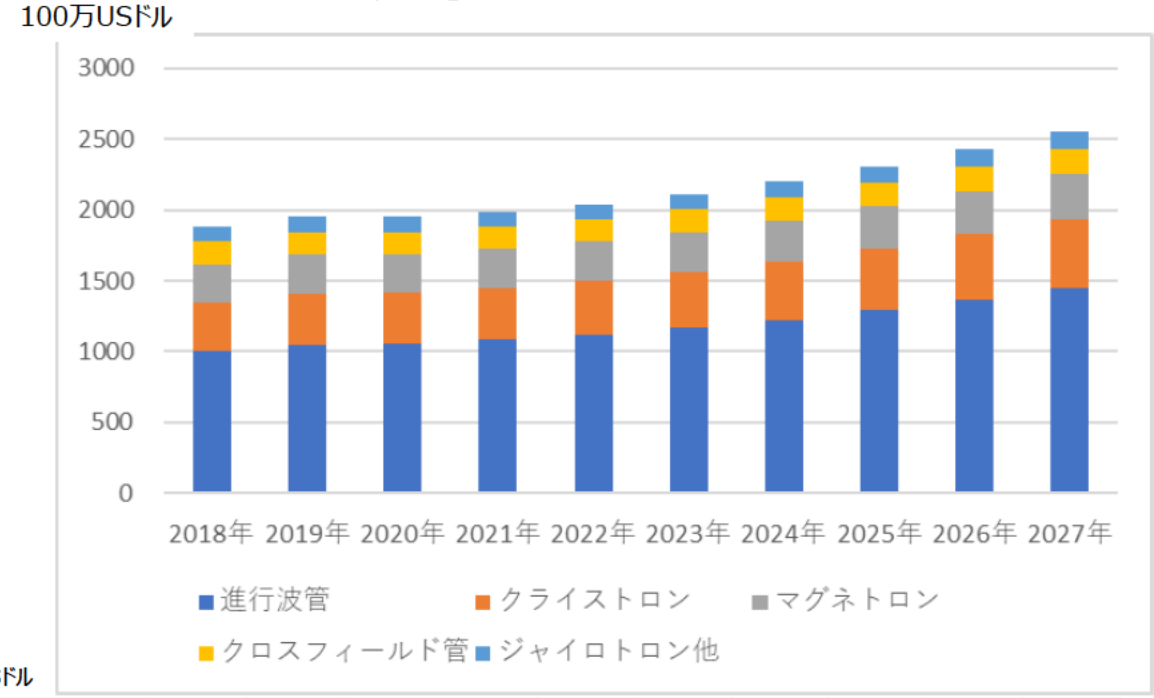
○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（4）

マイクロ波真空電子デバイスの市場について、図7-2-79に種類別に示す。

進行波管が全体の半分程度を占めている。

図7-2-79　マイクロ波真空電子デバイスの市場規模



100万USドル

	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年
進行波管	1005.0	1050.2	1056.4	1083.5	1120.9	1168.8	1226.2	1292.2	1368.1	1452.3
クライストロン	342.2	356.8	358.1	366.4	378.2	393.6	412.0	433.3	457.8	484.9
マグネトロン	271.6	277.7	273.4	274.2	277.4	282.7	289.8	298.4	308.5	319.7
クロスフィールド管	158.1	160.6	156.9	156.2	156.7	158.4	161.0	164.2	168.1	172.4
ジャイロトロン他	103.5	106.3	105.0	105.8	107.5	110.0	113.3	117.2	121.7	126.8
合計	1880.5	1951.5	1949.8	1986.2	2040.7	2113.5	2202.3	2305.3	2424.2	2556.1

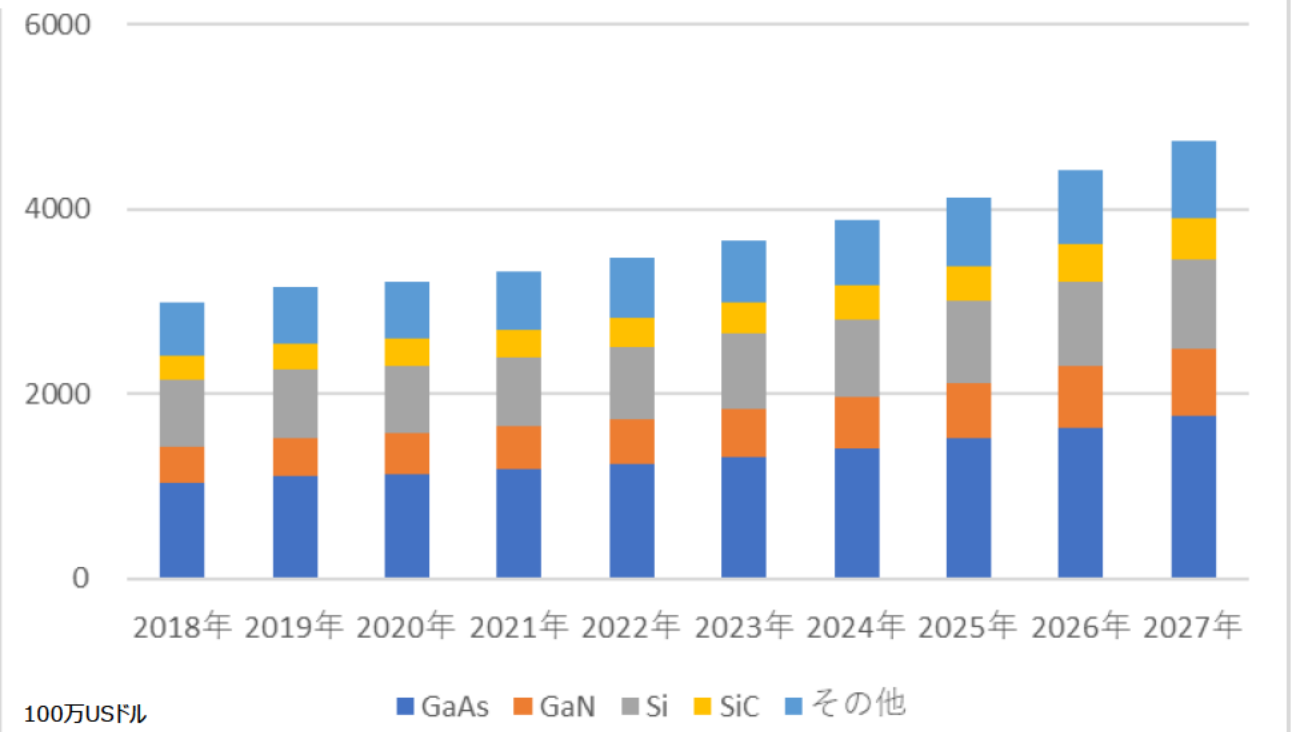
4.品目の技術動向調査（25）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（5）

マイクロ波半導体デバイスの市場について、図7-2-80に材料別に示す。GaAs系が全体の1/3程度を占めている。

図7-2-80　マイクロ波半導体デバイスの市場規模（材料別）



100万USドル

	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年
GaAs	1034.0	1100.1	1126.7	1176.7	1239.8	1316.8	1407.3	1511.1	1630.0	1763.2
GaN	397.7	426.3	439.7	462.6	490.8	524.8	564.7	610.3	662.7	721.3
Si	712.8	740.5	740.4	754.7	775.8	803.9	837.8	877.1	922.3	972.3
SiC	266.4	282.9	289.3	301.6	317.2	336.3	358.8	384.6	414.2	447.2
その他	578.8	604.7	608.2	623.7	645.2	672.8	705.8	743.9	787.6	836.1
合計	2989.7	3154.5	3204.3	3319.3	3468.8	3654.6	3874.4	4127.0	4416.8	4740.1

4.品目の技術動向調査（26）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（6）

マイクロ波用機器・部分品の主な製造企業を表に示す。この中でも特に主要な企業は、真空管電子デバイス関係についてはThales Group、L3Harris Technologies社、Qorvo社、Teledyne Technologies社、Communications & Power Industries International社であり、半導体についてはNXP Semiconductors社、Analog Devices社、Skyworks Solutions社、Broadcom社、Qorvo社である。

	企業	会社概要	真空管発振・増幅器	半導体発振・増幅器
1	Thales Group（フランス）	1893年創立の発送電会社Compagnie Française Thomson-Houstonに起源を持ち、いくつもの企業との合併を繰り返してできたThomson-CSF社が、2000年に名称変更した大手電機企業。航空、輸送、防衛・セキュリティ、デジタルアイデンティティ・セキュリティ、その他の部門からなる。世界最大の電子管メーカーであり、進行波管、クリストロン、ジャイロトロンなどを製造している。	○	
2	L3Harris Technologies, Incoporated（アメリカ）	Harris Corporation（アメリカ）とL3 Technologies社（アメリカ）が2019年に合併して発足した航空宇宙・防衛産業などを中心に活動する企業。通信システム事業、宇宙情報システム事業、エレクトロニックシステム事業、クリティカルネットワークス事業の4つの事業セグメントで事業を展開する。衛星および衛星打ち上げ、航空機用電子機器、ミサイル防衛などの分野で結合空洞進行波管などのマイクロ波デバイスを提供している。	○	
3	Qorvo, Incorporated（アメリカ）	Tektronix社（アメリカ）からのスピンオフで、GaAs半導体を無線用途に利用するための会社として1985年に設立されたTriQuint社（アメリカ）が1957年設立された半導体製造装置と電気製品の会社であるWatkins-Johnson社の他、Texas Instrument社（アメリカ）のGaAsのMMIC部門やRaytheon Defense Systems and Electronics Group（アメリカ）などを次々に買収し事業を拡大した。2014年に現在の社名になった。モバイル製品とインフラ・防衛用製品の2つのセグメントで事業を展開している。インフラ・防衛用製品のセグメントでは携帯電話基地局や他の無線通信インフラ、防衛、スマートホーム、自動車などに向けた高周波機器を提供している。マイクロ波デバイス製品には、通信・放送用の半導体増幅器、通信用のアンテナスイッチ、自動車用SDARS/GPSアンテナフィルタなどがある。		○
4	Teledyne Technologies Incorporated（アメリカ）	1960年にTeledyne Incorporatedとして設立され、1996年から1999年の間、Allegheny Teledyne Incorporatedの傘下にあったが1999年に他の2つの事業体と共に独立してTeledyne Technologiesが発足した。航空宇宙・防衛、工場の自動化、大気および水質環境モニタリング、電子機器の設計・開発、海洋学研究、エネルギー、医用画像、製薬研究などの分野向けの測定、送信、分析機器の製造会社である。マイクロ波製品は、衛星通信用の進行波管、防衛用半導体増幅器、民生用YIG発振器・フィルタ、放送用の送信機やコンバータ、レーダー用受信機、デバイス製造用部品の減衰器、位相シフタなど幅広い。	○	○
5	Communications & Power Industries (CPI) International, Incorporated（アメリカ）	1948年に設立され、最初の製品としてクリストロンを発表したVarian Associates（アメリカ）の電子デバイス事業を1995年にプライベートエクイティファンドのLeonard Green & partners, L.P.が買収してCommunications & Power Industries, Inc.が設立された。その後2004年にプライベートエクイティファンドのThe Cypress Groupが取得し、現在に至る。分析機器製造の同名のCPI International社（アメリカ）とは別の会社である。防衛、通信、医療、科学市場向けに放送や無線通信用機器を製造している。マイクロ波用の具体的な製品としては、気象予報レーダー用半導体増幅器、放送用真空波管増幅器（クリストロン、進行波管）、レーダー用アンテナ、試験・軍事用計装アンプ、放送用マイクロ波源（クリストロン、マグネトロン、ジャイロトロン、進行波管、クロスフィールドアンプ）、レーダー用マイクロ波送信機サブシステム（クリストロン送信機、マグネトロン送信機、ジャイロトロン送信機、らせん進行波管送信機）などがある。	○	
6	NXP Semiconductors Netherlands B.V.（オランダ）	2006年にPhilips社（オランダ）の半導体部門が分社化されて誕生し、2015年にはMotorola社（アメリカ）の半導体セクタが分社化されて設立されたFreescale Semiconductor社（アメリカ）と合併した。世界的な半導体企業。自動車、通信インフラ、産業、携帯機器、スマートシティー、スマートホームの分野向けの製品を展開している。マイクロ波用製品には、低ノイズ発振器、MMIC増幅器、送信器、LDMOS・GaN・GaAsパワートランジスタ、レーダー送信器、PLL発振器などがある。		○

4.品目の技術動向調査（27）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（7）

	企業	会社概要	真空管発振・増幅器	半導体発振・増幅器
7	Analog Devices, Incorporated（アメリカ）	1965年の設立以来、電子機器の信号処理製品に注力している。ほぼあらゆる種類の電子機器で使用されている高性能なアナログ集積回路（IC）、ミックスド・シグナルIC、デジタル・シグナル・プロセッシング（DSP）ICの設計、製造、販売で世界トップの企業である。特にコンバータによる収益が大きく、世界シェアも40～50%を占める。マイクロ波関連製品ではレーダー用減衰器、航空・防衛用GaAs pHEMT増幅器、試験・測定用位相シフタや、RFミキサ、PLLシンセサイザ、可変フィルタなどがある。		○
8	Skyworks Solutions, Incorporated（アメリカ）	Alpha Industries Incorporated（アメリカ）とConexant Sistems Incorporated（アメリカ）の無線ビジネス部門が2001年に合併して設立された企業。航空宇宙、自動車、ブロードバンド、セルラーインフラストラクチャ、コネクテッドホーム、エンターテインメントとゲーム、産業、医療、軍事、スマートフォン、タブレット、ウェアラブル向けのアナログ半導体を製造している。マイクロ波用製品には、増幅器、減衰器、ミキサ、スイッチなどがある。		○
9	Broadcom Incorporated（アメリカ）	1961年設立。データセンター、ネットワーキング、ソフトウェア、ブロードバンド、ワイヤレス、ストレージ、産業などに向けて幅広い半導体およびインフラストラクチャソフトウェアソリューションを設計、開発、提供している。マイクロ波向け製品には電力増幅器、ミキサ、周波数逓倍器、スイッチなどがある。		○
10	Richardson Electronics Limited（アメリカ）	1947年に電子管専門の商社としてスタートし、1981年にNational Electronics社およびCetron社の買収と共に電子管の製造を始めた。その後大手電子管製造メーカーの業務中止後、GE、RCA、Philips、Westing House、AT&Tより、製造ラインおよび技術を入手することで電子管及び電子機器の供給事業を行っている。電子管、マイクロ波、パワー半導体、高圧コンデンサー、及びモニター関連製品における世界最大のエンジニアリングストッキングディストリビューターである。製品には、真空電子管関係（電子銃、クリストロン、マグネトロン、サイラトロン、進行波管など）、半導体パワーアンプ、マイクロ波発生ユニット、マイクロ波電源などがある。	○	○
11	Honeywell International, Incorporated（アメリカ）	1885年に設立されたButs Thermo-Electric Regulator Corporation（アメリカ）を起源とするHoneywell Heating Specialty CompanyがMinneapolis Heat Regulator Company（アメリカ）と1927年に合併してMinneapolis-Honeywell Regulator Companyとなり、その後1999年にAlliedSignal社に買収されて発足した。航空宇宙、建築、機能素材、安全・生産性工場ソリューションを核とする事業を行っており、アメリカ航空宇宙局、Boeing社、アメリカ国防総省などとの取引がある。マイクロ波製品には、宇宙用のマイクロ波コンポーネントや位相シフタなどがある。		
12	Texas Instruments Incorporated（アメリカ）	1930年創設の、アナログ・チップと組込みプロセッシング・チップの設計、製造、テスト、販売に従事している半導体企業。2022年現在、従業員約30000人、世界各地の製造拠点15か所、約80000種類の製品を扱う世界的大企業である。マイクロ波用製品には、ミキサ、モデュレータ、半導体増幅器、ミリ波レーダーセンサ、PLLシンセサイザなどがある。		○
13	Kratos Defense & Security Solutions, Incorporated（アメリカ）	1994年設立。国家安全保障と通信のニーズに対応する、システム、プラットフォーム、および製品を開発・製造している。マイクロ波関係の事業では、市場で35年以上の実績を有する世界最大の電子レンジ企業の1つであるが、軍用・民生用両方の製品を扱っており、ミサイル、電子戦システム、レーダー、無人航空機、通信、データリンク、シミュレータ、試験機器、医療機器などがある。マイクロ波用の具体的な製品には、減衰器、周波数変換器、位相シフタ、スイッチ、半導体電力増幅器、スイッチドフィルタバンクなどがある。		○
14	MACOM Technology Solutions Holdings Incorporated（アメリカ）	1950年設立。データセンター、電気通信、産業および防衛アプリケーション向けの半導体製品を設計および製造している。マイクロ波用製品は電力増幅器、減衰器、MOSFETなどがある。		○
15	Microchip Technology Incorporated（アメリカ）	1989年に設立された半導体製造企業である。工業、自動車、一般消費者、航空宇宙、防衛、通信、コンピュータ市場向けに実績がある。マイクロ波用製品にはフィルタ、モジュール、電力増幅器、GaNトランジスタなどがある。		○

4.品目の技術動向調査（28）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（8）

	企業	会社概要	真空管発振・増幅器	半導体発振・増幅器
16	Triton Services Incorporated（アメリカ）	1994年設立。軍事及び商用アプリケーション向けに開発された電子デバイスが、通信およびデータ機器、電子戦妨害装置、兵器システムシミュレーター、マスコミュニケーションシステムに使用されている。マイクロ波関係の製品には、進行波管、進行波管増幅器、マイクロ波電力モジュールなどがある。	○	
17	Wolfspeed Incorporated（アメリカ）	1987年設立。広バンドギャップのSiCとGaNで電力と高周波向けの材料とデバイスを開発・製造している。		
18	Maxim Integrated Products, Incorporated（アメリカ）	1983年Maxim Integrated Products Incorportratedとして設立され、2021年にAnalog Devices Incorporated（アメリカ）に買収されて同社の子会社となった、アナログ/ミックスド・シグナルIC製品を設計、製造、販売する企業。自動車、工場自動化、データセンター、ウェアラブル機器などに向けた製品を展開している。マイクロ波用製品にはMOSFET電源増幅器、電源モジュール、PLLシンセサイザなどがある。		○
19	MINI-Circuits, Incorporated（アメリカ）	1968年に設立され、RFおよびマイクロ波コンポーネントと統合アセンブリの設計、製造、販売を行っている企業。セルラーワイヤレス、航空宇宙、衛星、Mil-Spec、CATV /ブロードバンド、RFID、テスト機器、画像診断など、商用、産業、および軍事用途で使用されている。マイクロ波用製品には半導体電力増幅器、MMIC電力増幅器、減衰器、フィルタ、ミキサ、逓倍器、発振器、位相シフタ、導波路、PLLシンセサイザなどがある。		○
20	Custom MMIC Design Services, Incorporated（アメリカ）	2006年に設立され、2020年、Qorvo社（アメリカ）に買収された。最大70GHzの周波数のMMICを開発している。カスタムMMICは、小信号ミリ波の専門知識と、LNA、ミキサー、減衰器、位相シフタ、スイッチを含む180を超える標準製品のポートフォリオを有し、防衛フェーズドアレイおよびAESAレーダー、電子戦、衛星通信、ワイヤレスバックホール、およびマイクロ波テストで使用されるミリ波装置製品を開発している。具体的な製品には、MMICによる増幅器、ミキサ、宇宙用MMICなどがある。		○
21	Cobham Limited（イギリス）	1934年に創立された、エレクトリックソリューション、航空サービス、通信・接続などの事業を行う会社である。防衛用の無人機システムなどの事業も行っている。マイクロ波用製品にはフィルタ、デュプレクサ、アイソレータ、サーキュレータなどがある。		
22	API Technologies Limited（イギリス）	1981年設立の企業。RF・マイクロ波コンポーネント、EMIフィルタ、セキュアシステム、マイクロ波用組立品、マイクロエレクトロニクス製品、変電・電気分配機などを製造している。マイクロ波製品には、半導体増幅器、フィルタ、SAW（表面弾性波）発振機、位相シフタ、ミキサ、減衰器などがある。		○
23	Sylatech Limited（イギリス）	1964年設立。マイクロ波関連ではサブシステムの設計やアセンブリを行っている。		
24	TMD Technologies Limited（イギリス）	1969年設立。マイクロ波管、高電圧電源、レーダー、EW、通信、EMC RFテスト、レーダートランスポンダー、その他の実験室アプリケーション向けの送信機のメーカー。起源は1940年代初頭のレーダー用高出力クリストロン開発のために設立されたEMI Electronics社のマイクロ波管研究部門にまで遡れる。クリストロン、進行波管、マグネトロン開発の豊富な経験を有する。現在の製品は、マイクロ波電源モジュール、マイクロ波管、送信機などである。	○	
25	OMMIC S.A.S.（フランス）	Philips Semiconductor（オランダ）を前身として2000年に創立。宇宙、通信、軍事産業向けのGaAsおよびGaN / Siに基づくエピタキシー、ファウンドリサービス、およびMMICの供給を行っている。マイクロ波用MMIC製品には、増幅器、位相シフタ、減衰器、ミキサ、逓倍器、スイッチなどがある。		○
26	United Monolithic Semiconductors S.A.S.（UMS）（フランス）	1996年設立。防衛および宇宙、通信、自動車レーダー、産業用センサーなどの特殊な市場向けに、RF MMIC製品およびファウンドリサービスを提供している。DCから100GHzまで、GaAs、GaN、SiGeテクノロジーに基づき、最大200Wのパワーアンプ、ミックスドシグナル機能、超低ノイズアンプ、およびトランシーバーシステムを網羅している。他に送受信機チップ、ミキサなどの製品もある。		○

4.品目の技術動向調査（29）

○輸出令7項（2）マイクロ波用機器若しくはその部分品又はミリ波用機器の部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（9）

	企業	会社概要	真空管発振・増幅器	半導体発振・増幅器
27	Vectrawave S.A.（フランス）	2006年設立。ディスクリート半導体から、カスタムマイクロ波モノリシック集積回路（MMIC）、システムインパッケージ（SiP）、マルチチップモジュール（MCM）などの高度に統合されたソリューションまで、DCから100GHzまで、さまざまな統合レベルの半導体デバイスの開発に注力している。GaAsGaN / SiC、InP、SiGe、CMOSなど、幅広いファウンドリプロセスにわたるMMIC設計の専門知識を有する。製品にはMMIC、RF信号処理用IC、マルチチップモジュールなどによる、電力増幅器、減衰器、位相シフタなどがある。		○
28	Infineon Technologies AG（ドイツ）	1999年設立の半導体とシステムの企業。オートモーティブ（ATV）、インダストリアル パワー コントロール（IPC）、パワー＆センサー システムズ（PSS）、コネクテッド セキュア システムズ（CSS）の4分野で事業を展開している。マイクロ波用製品には、ミリ波MMIC送信器、増幅器などがある。		○
29	Arralis Limited（アイルランド）	2013年設立の企業。高周波トランシーバー、RFおよびミリ波サブシステム、MMIC、革新的なアンテナの設計と構築に特化した、通信およびレーダーシステム向けの市場をリードするソリューションを提供している。特許取得済みのアンテナや非常に低損失の導波管トランジションなど、技術の多くは独自のものである。製品にはミリ波・マイクロ波RFシステム、アンテナ、小型レーダーや、MMICの電力増幅器、ミキサ、アップ/ダウンコンバータ、モジュールなどがある。		○
30	Berex Corporation（韓国）	ゲインブロック、ドライブアンプ、IFアンプ、パワーアンプ、ディスクリートアンプ、スイッチ、ミキサー、ディバイダー、カプラー、LNA、デジタルステップ減衰器（DSA）、デジタル可変ステップ減衰器（DVGA）、IoTフロントエンドモジュール（FEM）、ベアダイス、MCM、カスタマイズされた製品、およびその他のRF集積回路などのRF ICの主要なマーケティング、設計、開発、製造、販売サプライヤーとして2003年に設立された。半導体製品としてpHEMTベアダイ、pHEMTとMESFETsのパッケージも扱っている。		○
31	WIN Semiconductors Corporation（台湾）	1999年に設立されたGaAsを始めとする半導体のファウンドリ企業。設計住宅および統合型デバイスメーカーへのファウンドリサービス、HBTおよびpHEMTMMIC製造サービス、光通信および3Dセンシングアプリケーション向けのMMICオプトエレクトロニクスデバイス製造サービスを提供している。		
32	MicroArray Technologies Limited（中国）	2010年設立。主な製品は、GaN / GaAsパワーアンプチップ、GaN HEMTダイ、振幅および位相制御多機能チップ、位相シフターチップ、減衰器、LNA、ミキサーや、MCM / SIP小型化高統合マイクロ波モジュールなど。他にコンバータなどもある。低コストのレーダーT/Rモジュールフルチップと0.1～40GHzのソリューションを含む200以上のシェルフ製品がある。同社の製品は、レーダー、衛星通信、測定および制御、対策などの分野で使用されている。		○
33	Astra Microwave Products Limited（インド）	1991年設立。宇宙・防衛と民間数新システム向けのRF・マイクロ波コンポーネントとサブシステムの設計・製造を行う企業である。マイクロ波用製品には、Ku帯受信機、半導体増幅器、位相シフタ、S帯送信機などがある。		○
34	三菱電機株式会社（日本）	1921年創業の総合電機メーカー。主な事業分野は、重電システム、産業メカトロニクス、情報通信システム、電子デバイス、家庭電器である。マイクロ波関連製品には、SPDTスイッチ、GaN HEMT、GaAsトランジスタ、MMICなどがある。		
35	パナソニック株式会社（日本）	1918年創業の総合電機メーカー。マイクロ波関連製品にはリレー、電力増幅器などがある。		○
36	東芝インフラシステムズ株式会社（日本）	1904年創業の総合電機メーカーであり、現在は純粋持株会社の株式会社東芝（日本）から2017年に分社した東芝の100%子会社。マイクロ波半導体の製造を行っている。具体的な製品は、GaN HEMT電源、GaAs FET電源である。		

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（３）
弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

経済産業省の貨物等省令や「輸出貿易管理令の運用について」では信号処理装置についての規定はないが、Wassenaar Arrangementでは「信号処理（Signal processing）」について定義しており、「時間圧縮、フィルタリング、抽出、選択、相関、畳み込み、またはドメイン間の変換（高速フーリエ変換やウォルシュ変換など）などのアルゴリズムによる、外部から導出された情報伝達信号の処理。」と訳すことができる。

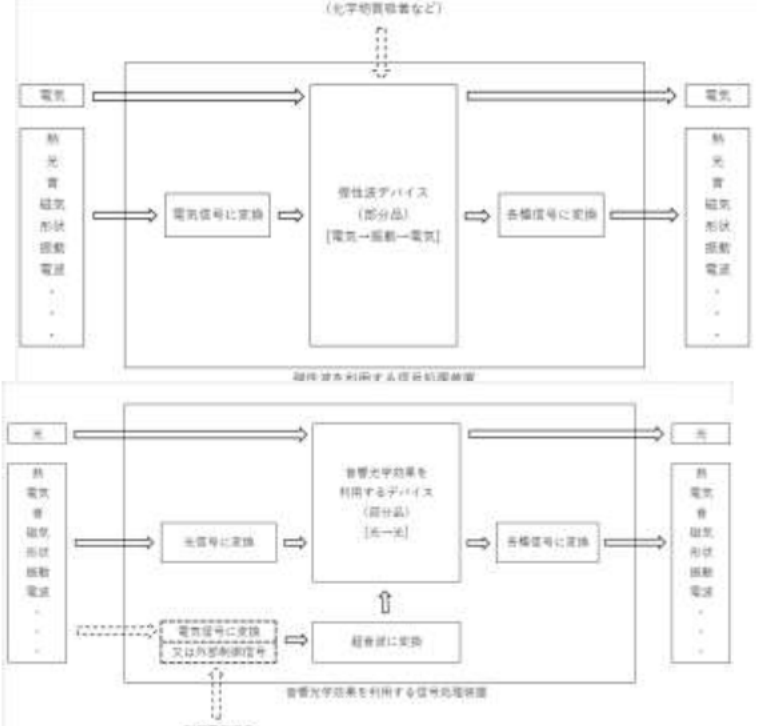
信号とは、光、形、音、電波など、時間や空間に伴って変化する量を指し、隔たっている双方の間で互いに意思を通じさせる方法として用いられることがある。従って、信号処理装置とは光、形、音、電波など、時間や空間に伴って変化する量を取り出し、また加工するための装置である（図7-3-1）。

輸出令7項(3)の対象となる装置は、図7-3-2に示す通り、電気信号→振動→電気信号に変換する弾性波デバイス（部分品）または光信号の波、長、振幅、位相、向きなどを変える音響光学効果を利用するデバイス（部分品）や、それらを内蔵する信号処理装置である。

図7-3-1　信号処理装置



図7-3-2　弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品



1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

【弾性波、音響光学効果】

弾性は固体の性質の1つで、応力を加えると歪が生じて変形するが、応力を除くと元の形に戻る性質をいう。これに対し、応力を除いても元の形に戻らない性質を塑性という。

弾性波とは弾性体の変形によって弾性体を伝わる波である。弾性波には、図7-3-3に示すとおり、波の進行方向の変位により伝わる縦波と波の進行方向に垂直な方向の変位により伝わる横波がある。

弾性波は、伝播する弾性体において波のエネルギーが集中する部位によって分類される。波のエネルギーが表面近傍に集中して2次元的に伝搬する波を表面弾性波（SAW：SAW: Surface Acoustic Wave）あるいは弾性表面波という。また、波のエネルギーは表面近傍に集中していると同時に横波を弾性体内部に放射しながら伝搬する波を擬似表面弾性波（PSAW：Pseudo SAW）、疑似弾性表面波、、漏洩弾性表面波（LSAW：Leaky SAW）などという。さらに、3次元的な広がりを持つ弾性体内部を伝搬する波をバルク弾性波（BAW：Bulk Acoustic Wave）という（図7-3-4）。

音響光学効果とは、媒質の歪に伴って媒質の光学的屈折率が変化する現象である。図7-3-5は圧電素子により発生した超音波による音響光学効果の例である。

以上のように弾性波や音響光学効果は弾性体の変形に起因する現象であるが、これらを利用する信号処理装置では弾性体に変形を与える手段としてもっぱら圧電素子が用いられる。圧電素子（あるいはピエゾ素子）とは、電圧を加えると変形し、逆に圧力を加えて変形させると電圧を発生する圧電材料を用いた素子である。高い周波数の電圧を加えることにより高い振動数の弾性変形を生じさせることができる。圧電材料には水晶や特定のセラミックスなどがある。

図7-3-3　弾性波の縦波と横波

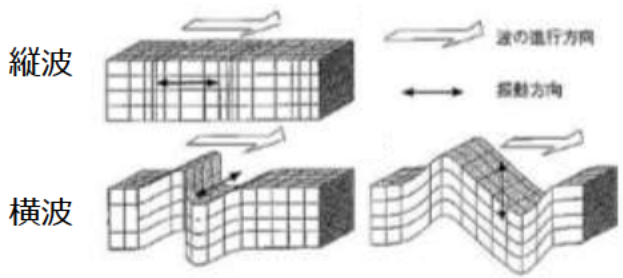


図7-3-4　表面弾性波、疑似表面弾性波、バルク弾性波

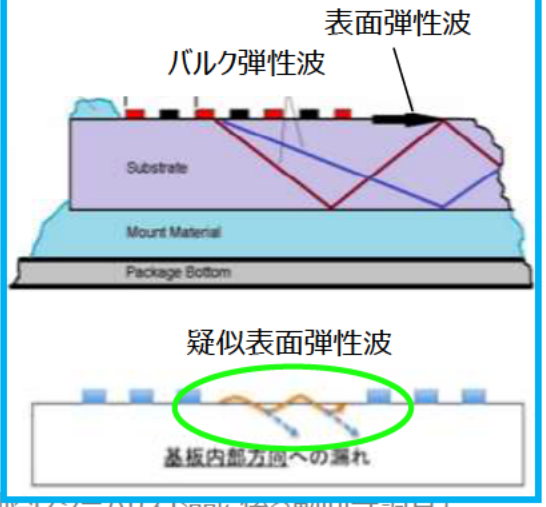
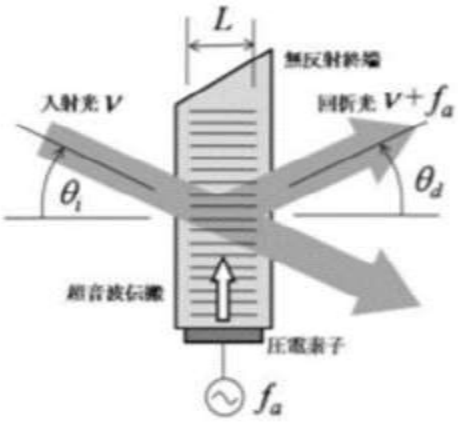


図7-3-5　音響光学効果



1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

【SAWフィルター、BAWフィルター】

図7-3-2に示した弾性波を利用した装置あるいはその部分品にはさまざまな形態があるが、最も重要なものの一つが、特定の周波数帯域の電気信号を取り出すことのできるSAWフィルターおよびBAWフィルターである。

SAWフィルターの基本構造を図7-3-6上左に示す。圧電材料の基板上に2組のすだれ状電極を形成し、一方の電極に入力された電気信号が基板を表面波として伝搬し、もう一方の電極では受け取った振動を電気信号に変換する。表面波の波長が電極の間隔と等しい場合に最も強く励振される。基板の表面波の伝搬速度をv、電気信号の周波数をfとすると、最も強く励振される電極間隔はλ=v/fとなる。マイクロ波領域の信号の場合は、λは数ミクロン程度となる。図7-3-7はSAWフィルターの周波数特性の例である。SAWフィルターの圧電基板材料には、水晶やタンタル酸リチウム（TL：$LiTaO_3$）およびニオブ酸リチウム（LN：$LiNbO_3$）などの結晶、酸化亜鉛（ZnO）、窒化アルミニウム（AlN）、ダイヤモンド薄膜などの薄膜材料が主に使われる。

BAWフィルターは図7-3-6上右に示すとおり圧電板の両面に電極をつけた基本構造を有する。厚さ方向に伝搬する弾性波が板厚の半分の長さの基本波およびその奇数倍の周波数の高調波のみが励振されるため、周波数フィルターとして機能する。材料は主に窒化アルミニウム（AlN）が用いられている。BAWフィルターには共振器の下部が空洞となって自由に振動できるFBAR型（Film Bulk Acoustic Resonator）や弾性波を音響多層膜（ミラー層）で反射させるSMR型（Solid Mounted Resonator）と呼ばれる種類がある。

図7-3-6　SAWフィルターとBAWフィルターの基本構造

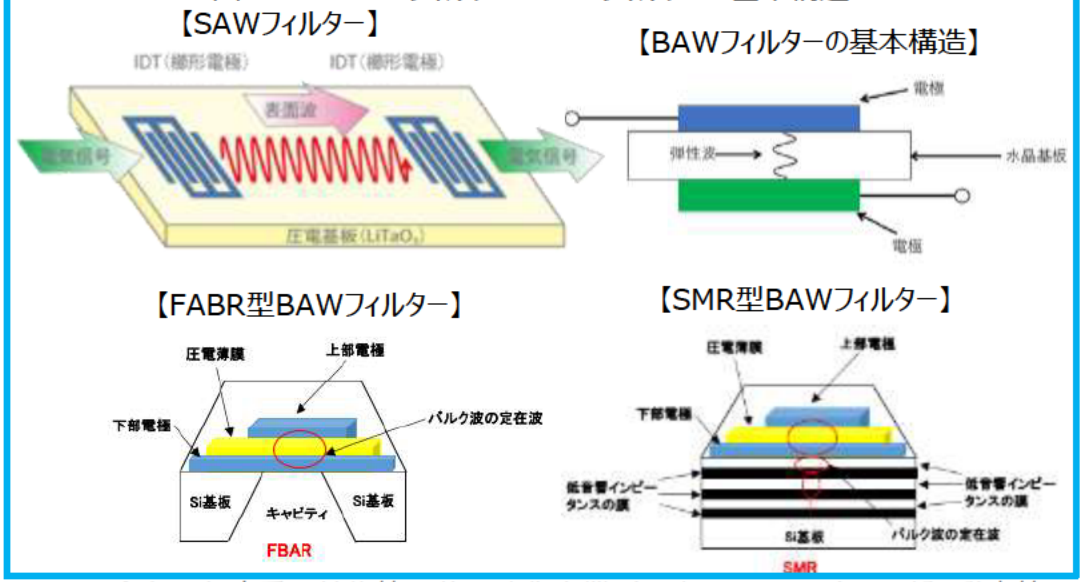
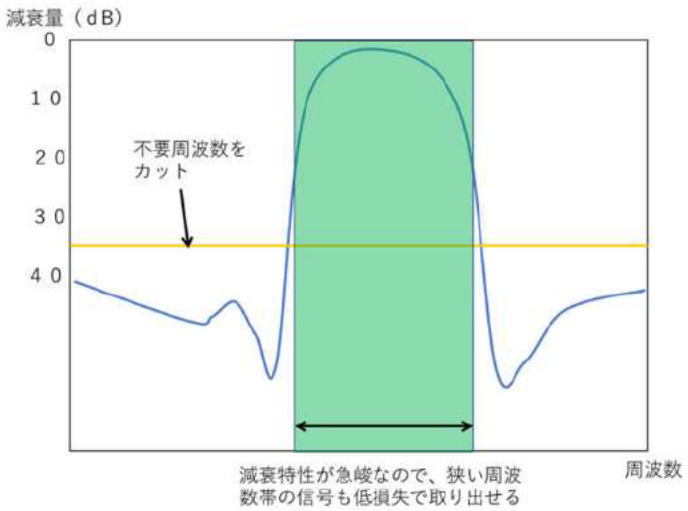


図7-3-7　SAWフィルターの周波数特性の例



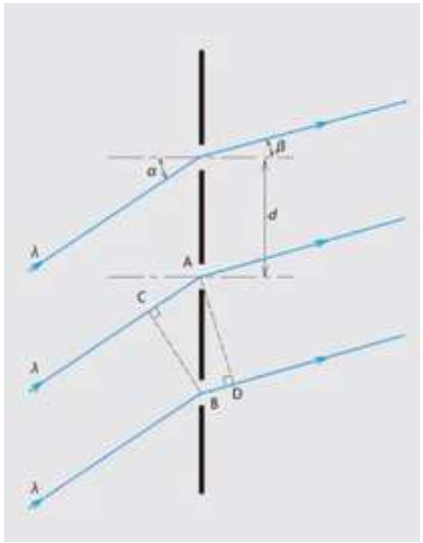
1.対象品目の概要調査（4）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

【回折格子】
　音響光学効果は回折格子の原理に基づくものなので、始めに回折格子について簡単に解説する。回折格子には透過型と反射型があるがここでは音響光学効果と同じ透過型について説明する。光は波の性質を持つため、スリットを通る際には回折現象が起こる。光が透過するスリットが図7-3-8に示すとおり光の波長の数倍程度すなわちμmオーダーの間隔の細いスリットの場合、隣接したスリットを通過する光の成分中の、ある波長の光の光路長差（C-AとB-Dの距離の差）が波長の整数倍の時に光が強め合う。光路長は光の入射角αと出射角βにも依存するので、回折光も角度ごとに異なる波長で分離される（図7-3-9）。

図7-3-8　回折格子（透過型）の原理

【透過光の光路差】



【隣接する透過光同士の干渉】

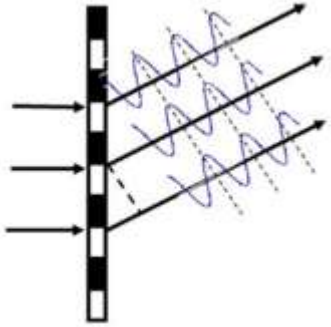
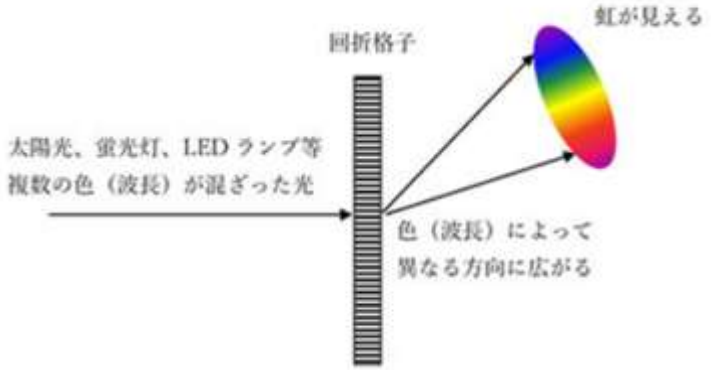


図7-3-9　回折格子による波長の異なる光の分離



1.対象品目の概要調査（5）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

【音響光学効果】

音響光学効果は光を透過する弾性体に振動を与えて弾性波を発生させることにより、弾性体内部に疎密の定常波を作り、屈折率の異なる疎と密の部分が周期的に縞状に並んだ部分を回折格子として利用するものである（図7-3-10）。音響波が存在するすべての光学媒体が音響光学効果を示すが、実際にデバイスなどで利用されるのは異方性が高い結晶であり、GaP（ガリウムリン）、Ge（ゲルマニウム）、InP（インジウムリン）、$LiNbO_3$（ニオブ酸リチウム、リチウムナイオベート）、TeO_2（二酸化テルル）などである。

回折光の周波数は入射光（成分）の周波数から超音波の周波数と同じだけシフトする。

音響光学効果を利用することにより、入射光の曲がる向き（回折角）を変えたり、入射光の成分を周波数ごとに分離することができ、しかも圧電素子に印加する交流電圧によって、それらの効果のオン・オフや、オンの場合の入射光の向きの変化の度合いなどの制御も可能となる。図7-3-11は音響光学効果により光のオン・オフを行う原理の模式図である。

図7-3-10　音響光学効果の原理

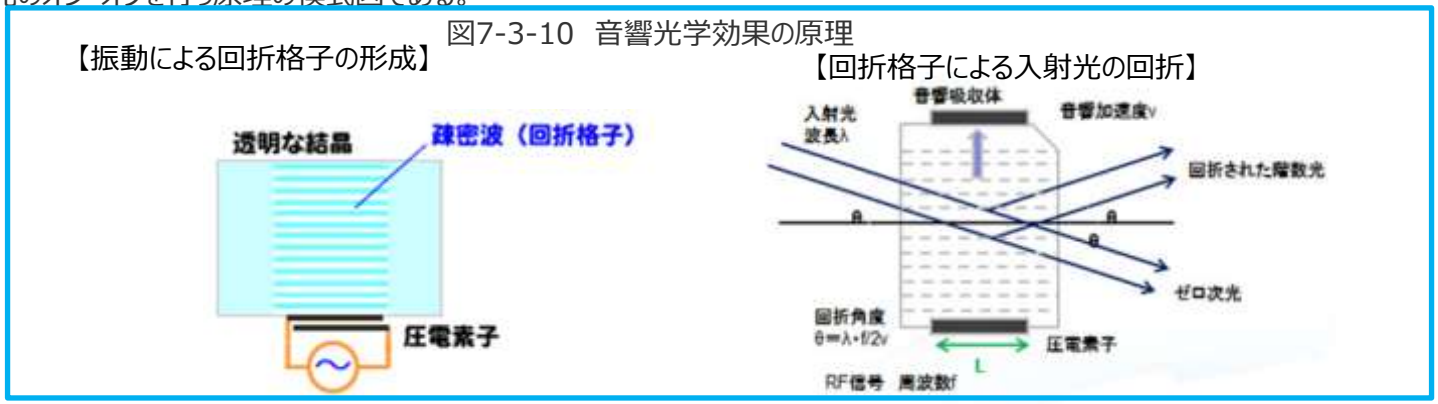
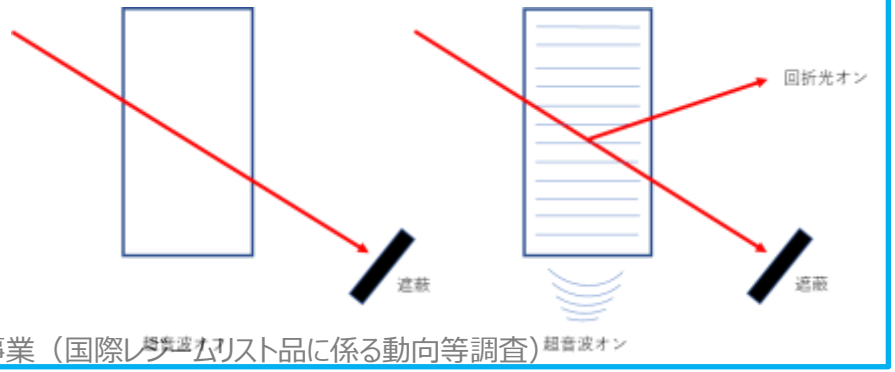


図7-3-11　音響光学効果を利用した光のオン・オフ

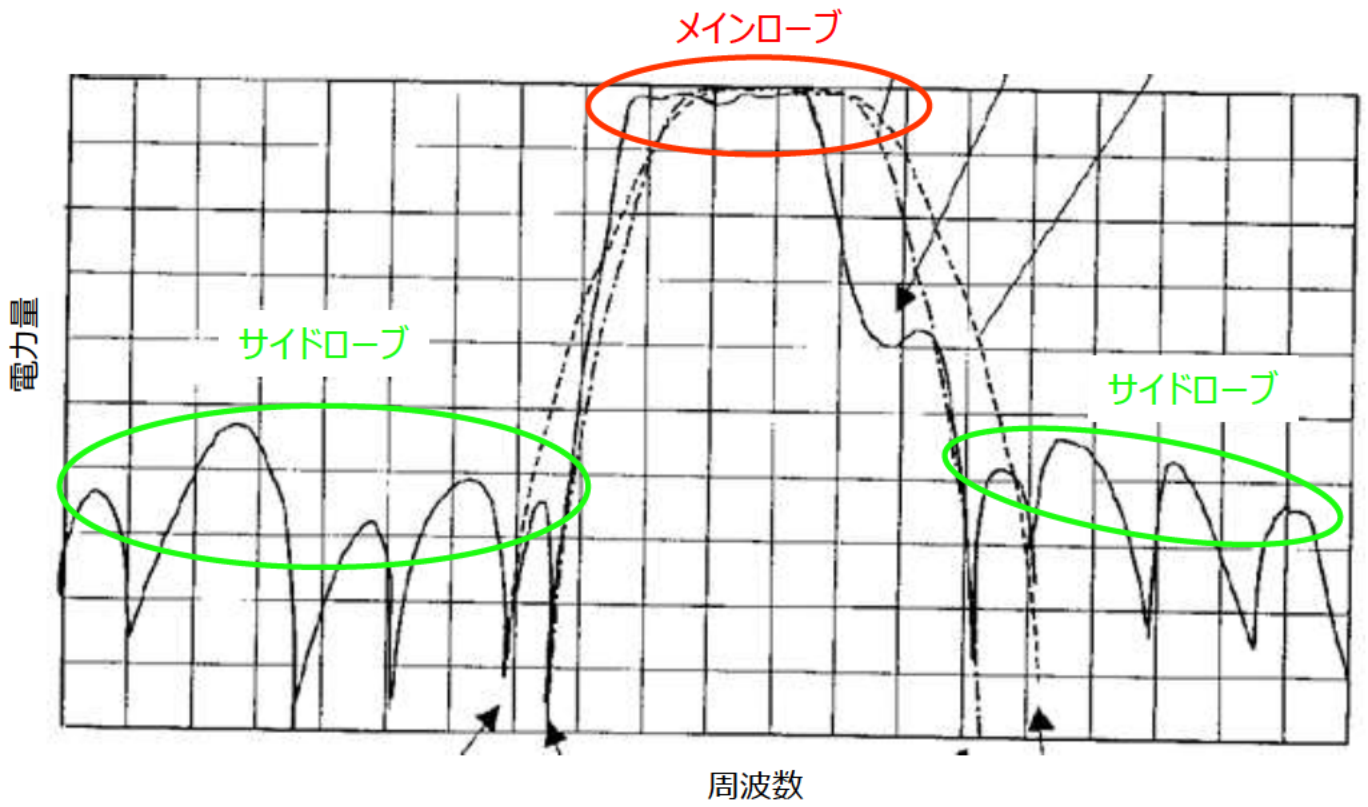


1.対象品目の概要調査（6）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

【メインローブとサイドローブ】
　通過型の周波数フィルターは目的の周波数のみを通過させ、それ以外の周波数は極力通過させないことが求められる。そのような特性を評価する際に、メインローブに対するサイドローブの大きさの比較が使われる。図7-3-12に示すとおり、卓越して最も大きい山をメインローブといい、メインローブ以外の低い山をサイドローブという。メインローブの幅が狭く、サイドローブに対するメインローブの大きさの比が大きいほど優れた特性の周波数フィルターである。

図7-3-12　メインローブとサイドローブ



1.対象品目の概要調査（7）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

【分散型遅延時間、帯域幅】

弾性波フィルターの信号の入力と出力の時間差は通常は信号の周波数によって異なる（図7-3-13）。遅延時間が周波数によって1次関数的に変化する場合を分散型遅延時間といい、メインローブの周波数帯域の信号で最も大きい遅延時間を最大遅延時間という。遅延時間を利用して例えば図7-3-14に示すように複数の信号の位相を揃えて信号間のタイミングを合わせたり、逆に信号間に時間差をもたせることが可能となる。信号を遅延させるための部品を遅延線（ディレイライン）という。

またメインローブの帯域幅は貨物等省令では規定がないが、一般的にはメインローブの最も高い点から一定の値だけ低い位置の幅で定義する。特に図7-3-15の例のように、3dB下がった位置や1dB下がった位置の幅が使われることが多い。

図7-3-13　弾性波フィルターによる入出力信号の時間差

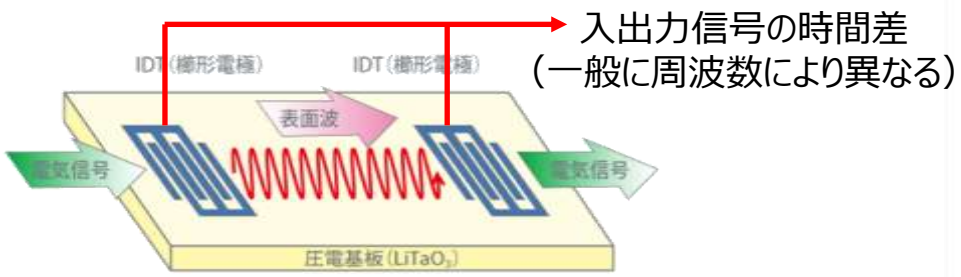


図7-3-14　信号遅延の利用例（位相合わせ）

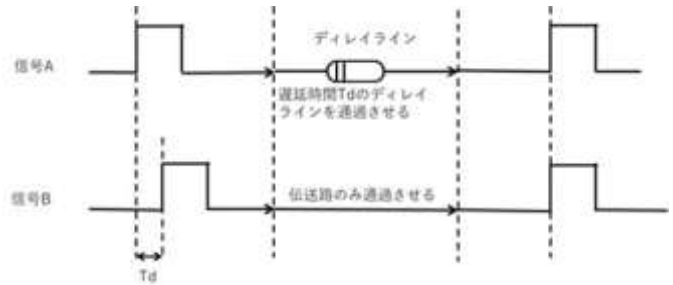
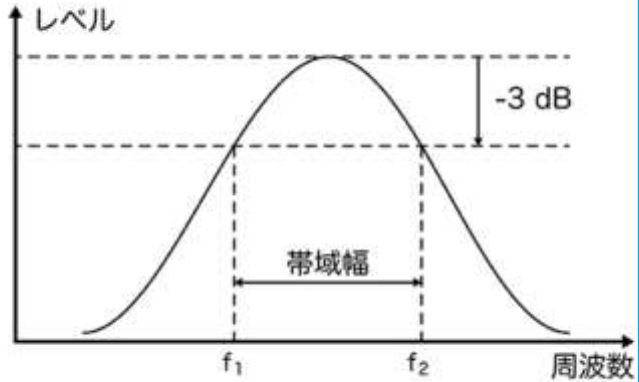


図7-3-15　3dB帯域幅



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（1）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字部分に相違が見られる。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(3)	6		三	三　弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置であって、次のいずれかに該当するもの（特定の帯域通過、低域通過、高域通過、帯域阻止又は共振の機能のいずれかのみを有するものを除く。）又はその部分品 イ　表面弾性波又は疑似表面弾性波を利用するものであって、次のいずれかに該当するもの （一）　搬送周波数が６ギガヘルツを超えるもの （二）　搬送周波数が１ギガヘルツ超６ギガヘルツ以下のものであって、次のいずれかに該当するもの 1　サイドローブに対するメインローブの電力の比が65デシベルを超えるもの サイドローブに対するメインローブの電力の比 データシートに示される最大減衰量をいう。	搬送周波数が６ギガヘルツを超える 搬送周波数が１ギガヘルツ超６ギガヘルツ以下のものであって、次のいずれかに該当する サイドローブに対するメインローブの電力の比が65デシベルを超える

Wassenaar規制番号						Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番					
3A1	c					c. Acoustic wave devices as follows and specially designed components therefor: Note 3 .A.1.c. does not apply to acoustic wave devices that are limited to a single band pass, low pass, high pass or notch filtering, or resonating function. 1. Surface acoustic wave and surface skimming (shallow bulk) acoustic wave devices, having any of the following: a. A carrier frequency exceeding 6 GHz; b. A carrier frequency exceeding 1 GHz, but not exceeding 6 GHz and having any of the following: 1. A 'frequency side-lobe rejection' exceeding 65 dB; Technical Note 'Frequency side-lobe rejection' is the maximum rejection value specified in data sheet.
		1				
			a			
			b			
				1		

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
貨物・技術のマトリクス表
（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
PUBLIC DOCUMENTS Volume II
List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（2）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本項記載部分には相違は無い。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(3)	6		三	2　マイクロ秒で表した場合の最大遅延時間の数値にメガヘルツで表した場合の帯域幅の数値を乗じて得た数値が100を超えるもの 3　帯域幅が250メガヘルツを超えるもの 4　分散型遅延時間（周波数に応じた遅延時間の最大の値と最小の値との差をいう。）が10マイクロ秒を超えるもの	マイクロ秒で表した場合の最大遅延時間の数値にメガヘルツで表した場合の帯域幅の数値を乗じて得た数値が100を超える 帯域幅が250メガヘルツを超える 分散型遅延時間が10マイクロ秒を超える

Wassenaar規制番号						Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番					
3A1	c	1	b	2		2. A product of the maximum delay time and the bandwidth (time in μs and bandwidth in MHz) of more than 100;
				3		3. A bandwidth greater than 250 MHz; or
				4		4. A dispersive delay of more than 10 μs; or

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（3）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字部分に相違が見られる。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(3)	6		三	（三）　搬送周波数が１ギガヘルツ以下のものであって、次のいずれかに該当するもの １　マイクロ秒で表した場合の最大遅延時間の数値にメガヘルツで表した場合の帯域幅の数値を乗じて得た数値が100を超えるもの ２　分散型遅延時間が10マイクロ秒を超えるもの ３　サイドローブに対するメインローブの電力の比が65デジベルを超えるものであって、帯域幅が100メガヘルツを超えるもの ロ　バルク弾性波を利用するものであって、６ギガヘルツを超える周波数で信号の直接処理ができるもの ハ　弾性波と光波の相互作用を利用したものであって、信号又は画像の直接処理ができるもの	搬送周波数が１ギガヘルツ以下 マイクロ秒で表した場合の最大遅延時間の数値にメガヘルツで表した場合の帯域幅の数値を乗じて得た数値が100を超える 分散型遅延時間が10マイクロ秒を超える サイドローブに対するメインローブの電力の比が65デジベルを超えるものであって、帯域幅が100メガヘルツを超える ６ギガヘルツを超える周波数で信号の直接処理ができる

Wassenaar規制番号					Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番				
3A1	c		1		c. A carrier frequency of 1 GHz or less and having any of the following: 1. A product of the maximum delay time and the bandwidth (time in μs and bandwidth in MHz) of more than 100; 2. A dispersive delay of more than 10 μs; or 3. A 'frequency side-lobe rejection' exceeding 65 dB and a bandwidth greater than 100 MHz;
			2		2. Bulk (volume) acoustic wave devices which permit the direct processing of signals at frequencies exceeding 6 GHz;
			3		3. Acoustic-optic "signal processing" devices employing interaction between acoustic waves (bulk wave or surface wave) and light waves which permit the direct processing of signals or images, including spectral analysis, correlation or convolution; "Signal processing" The processing of externally derived information-bearing signals by algorithms such as time compression, filtering, extraction, selection, correlation, convolution or transformations between domains (e.g., fast Fourier transform or Walsh transform).

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

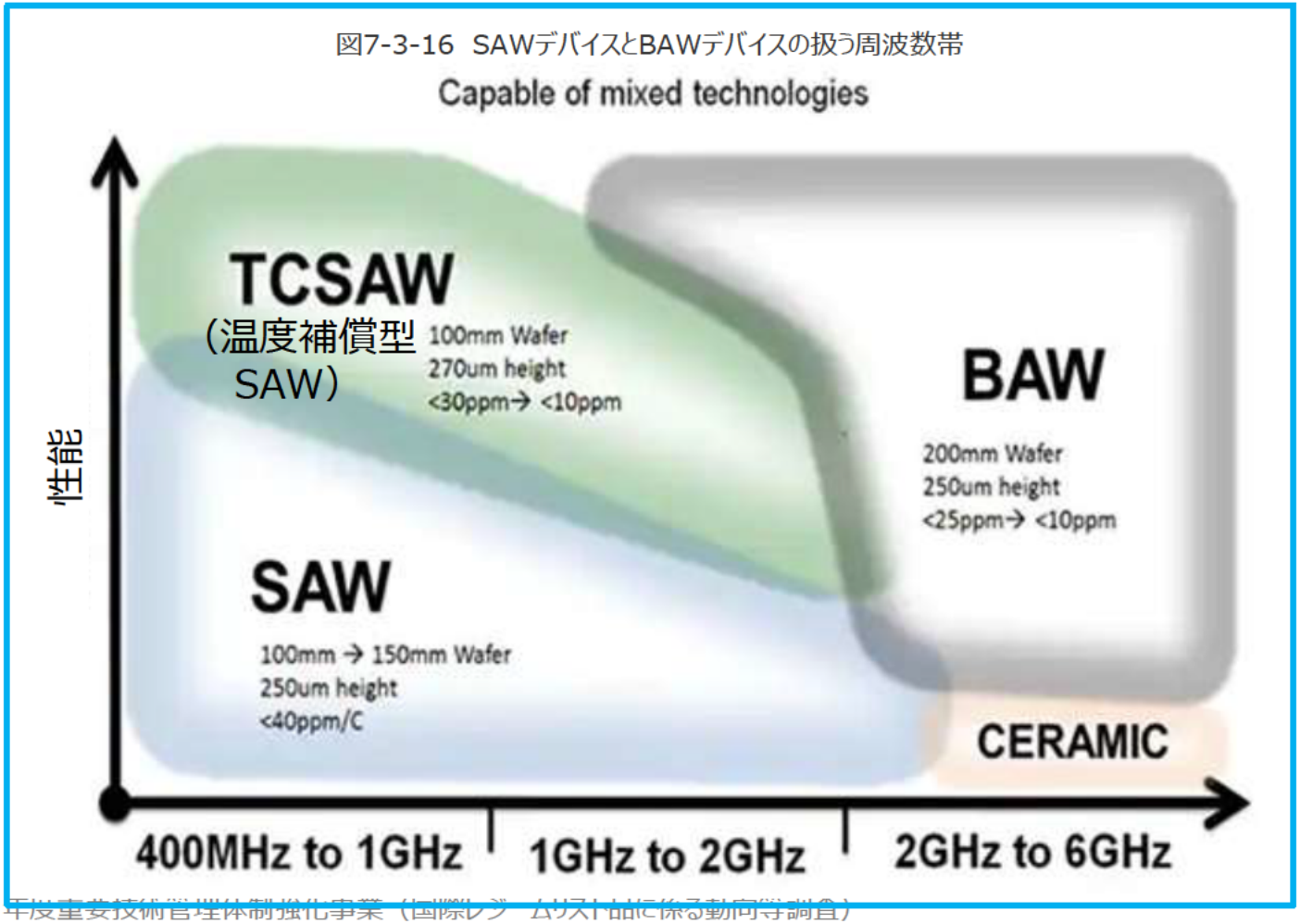
○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（1）

【弾性波デバイスの種類と性能】

図7-3-16に示すとおり、SAWデバイスとBAWデバイスでは、2GHz付近を境としてBAWデバイスの方がより高い周波を扱うことができる。

図7-3-16　SAWデバイスとBAWデバイスの扱う周波数帯



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（2）

【（疑似）表面弾性波を利用したデバイス・装置の例】

弾性波は古くから地震など地殻に関する研究や構造物の非破壊検査などに利用されてきたが、ここではエレクトロニクス分野の利用に関して記載する。既に触れてきたフィルターも含め、表7-3-1と次頁の図7-3-17に表面弾性波（SAW）の用途例を示す。

SAWを平面のX軸およびY軸方向に伝搬させ、SAWが妨げられた位置で平面上の位置を特定するものが、タッチパネルの中でSAW方式と呼ばれるものである。SAW送信電極と受信電極間に設けた感応膜に分子が吸着することで感応膜を通過するSAWに変化が起こる。この現象を利用したガスセンサやバイオセンサが開発されている。タッチパネルや分子センサはSAWの弾性体表面を伝搬する性質を利用したものである。弾性体表面への加工で済み、表面に存在するため様々な機能を付加しやすいSAWデバイスは、電子電気機器の基本的なデバイスとして古くから広範な用途に使われてきた。

表7-3-1　SAW・BAWデバイスの用途の例

	デバイス名		機能	用途
（疑似）表面弾性波	タッチパネル		タッチ位置の検出	各種入力機器
	分子センサ		分子吸着の検出	ガスセンサ、バイオセンサ
	SAWデバイス	フィルタ	特定の周波数帯の分離	TV、VTR、携帯電話、移動体通信
		レゾネータ（共振器）	特定の周波数信号の増幅	キーレスエントリ、バーコードリーダ、タイヤ空気圧力測定器、距離測定、レーダー装置のパルス圧縮器、CDMA通信器
		ディレイライン	電気信号の遅延	電気信号遅延・周波数逓倍・発振回路・パルス信号幅変換などを必要とする各種電子電気機器
		コンボルバ	送受信信号間の暗号符号の一致・不一致の判別	スペクトラム拡散通信、フルハイビジョン伝送、カードシステムセキュリティ、RFタグ
		デュプレクサ	異なる周波数の信号の分離	アンテナ共用器

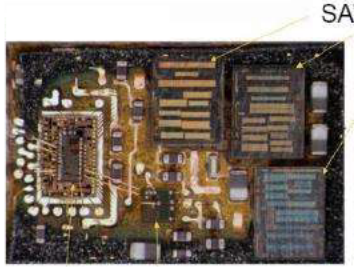
3.品目の主たる用途の調査分析（3）

〇輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

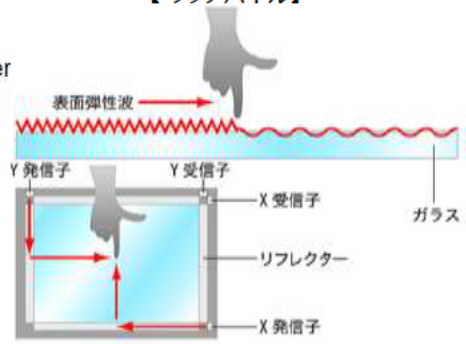
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（3）

図7-3-17　SAWデバイスの例

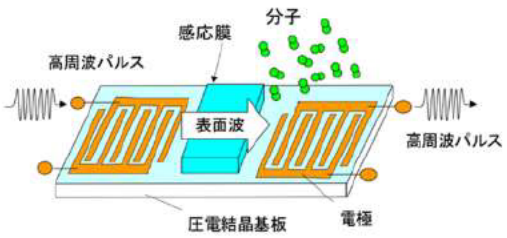
【スマートフォン中のSAWフィルター】



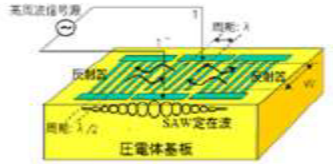
【タッチパネル】



【分子センサ】

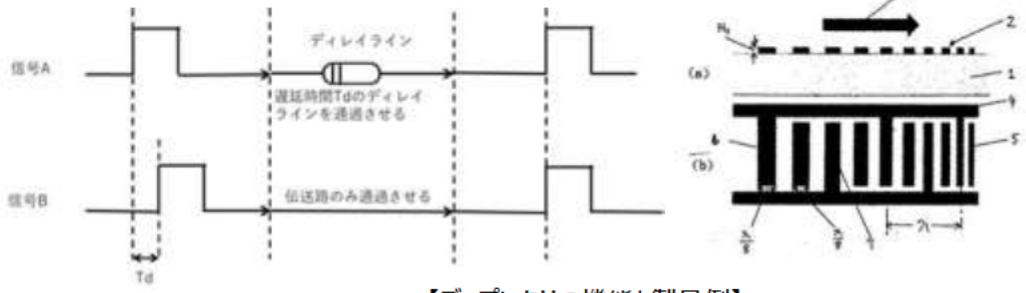


【レゾネータ】

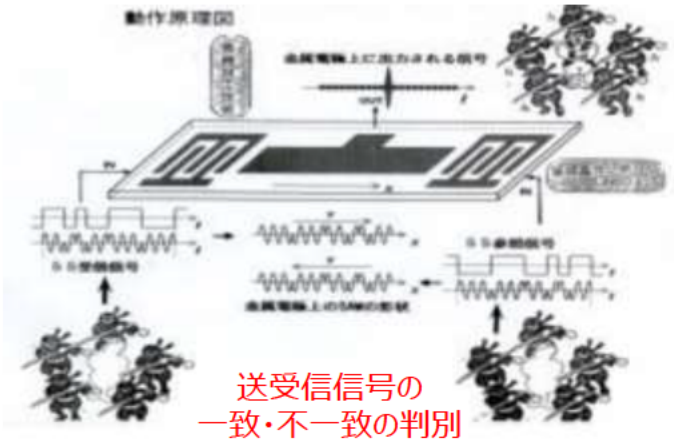


特定の周波数信号の増幅

【ディレイラインの機能と構造例】

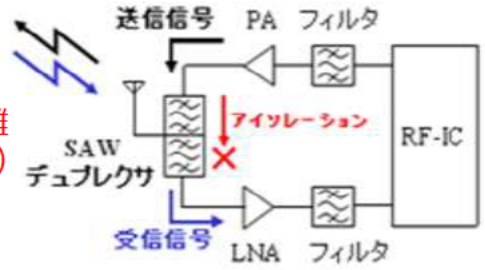


【コンボルバ】

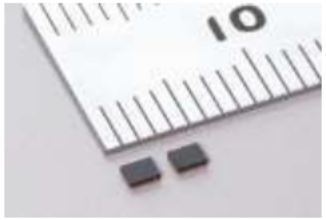


送受信信号の
一致・不一致の判別

【デュプレクサの機能と製品例】



送受信信号の分離
（アンテナの共有化）



村田製作所　SAYPEシリーズ

3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（4）

【バルク弾性波を利用したデバイス・装置の例】

先に図7-3-14で示したとおり、バルク弾性波（BAW）はSAWよりも高い周波数を扱える。従って、フィルターやデュプレクサでも数GHzという高い周波数向けで利用されている。またレゾネータや発振器は原子時計用の部品としても使われている（表7-3-2、図7-3-18）。

表7-3-2　BAWデバイスの用途の例

	デバイス名		機能	用途
バルク弾性波	BAW デバイス	フィルタ	特定の周波数帯の分離	携帯電話、移動体通信
		レゾネータ	特定の周波数信号の増幅	原子時計用発振器
		ディレイライン	電気信号の遅延	電気信号遅延・周波数逓倍・発振回路・パルス信号幅変換などを必要とする各種電子電気機器
		デュプレクサ	異なる周波数の信号の分離	携帯電話機のフロントエンド

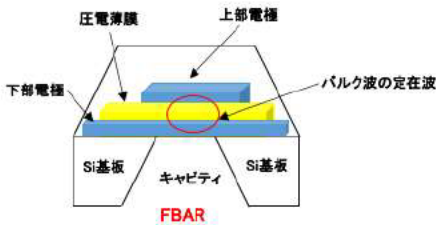
3.品目の主たる用途の調査分析（5）

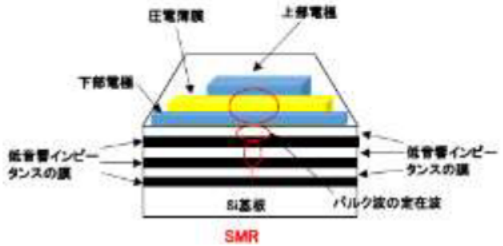
〇輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（5）

図7-3-18　BAWデバイスの例

【 BAWフィルタの構造（FBAR型、SMR型）と製品例】





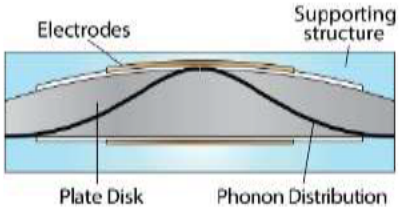


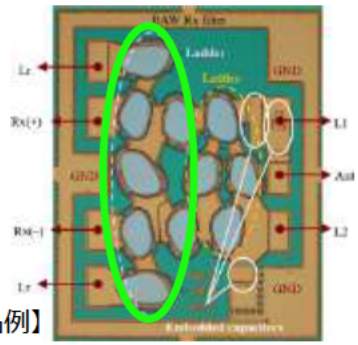
Qorvo社　QPQ1907

【 レゾネータの構造と製品例】

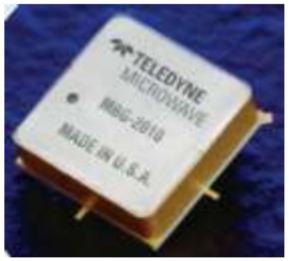
レゾネータ







【ディレイラインの製品例】



Teledyne社　MBG-2010

【 デュプレクサの製品例】



Qorvo社　TQQ6107

3.品目の主たる用途の調査分析（6）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（6）

【音響光学効果を利用したデバイス・装置の例】

音響光学効果を利用することにより、入射光の曲がる向き（回折角）を変えたり、入射光の成分を周波数ごとに分離することができ、しかも圧電素子に印加する交流電圧によって、それらの効果のオン・オフや、オンの場合の入射光の向きの変化の度合いなどの制御も可能となる。

表7-3-3および次頁の図7-3-19に音響光学効果の用途例を示す。Qスイッチはレーザー光を共振器内の反射を繰り返して強度を高めた後、パルス光として照射する際のシャッターの役割を果たす。連続したレーザー光を機械式のシャッターで単純にオン・オフするよりもはるかに強く短いパルス光が得られる。光変調器は回折光の有無で電気信号をデジタル信号に変換する装置である。光偏向器とともにフォトマスクを用いずに微細なパターンを形成できるマスクレスリソグラフィ装置に用いられている。光偏向器は出射光の方向を制御してレーザービームのスキャン掃引を行う。6頁で記したとおり、回折光の周波数は入射光（成分）の周波数から超音波の周波数と同じだけシフトする。周波数シフタはこの性質を利用したものである。周波数がわずかに異なる2つの光の干渉によるうなりから元の光の周波数や位相などを測定する光ヘテロダイン干渉計や、気体原子の運動速度を落とす原子冷却装置、レーザーのドップラー効果を利用して振動を測定するレーザードップラー振動系などに用いられる。波長可変フィルタは航空機や衛星から地表を監視するリモートセンシングシステムに利用可能である。地表の情報をさまざまな波長ごとに測定することができる。

表7-3-3　音響光学効果を利用した装置の例

デバイス名	機能		用途例
光スイッチ	強度変調	出力光のオン・オフ	光通信機器
Qスイッチ		強いパルス光の生成	レーザー加工機、測距計、リモートセンサー、医療用レーザー機器
光変調器		出力光強度変調、出力パルス光の持続時間制御	マイクロマシニング、マスクレスリソグラフィ
光偏向器（光ディフレクタ）	ビーム位置制御	レーザービームのスキャン掃引	レーザープリンタ、レーザー加工機、LiDAR、レーザーディスプレイ、レーザー共焦点顕微鏡、マスクレスリソグラフィ
周波数シフタ	周波数制御	回折光を音響周波数分だけ増減	光ヘテロダイン干渉計、原子冷却装置、レーザードップラ振動計
波長可変フィルタ	周波数フィルタリング	目的の波長の光の取り出し	光スペクトラムアナライザ、波長可変レーザー、光ファイバセンサ、DWDM（高密度波長分割多重）通信機、蛍光顕微鏡、食品異物検出器、地表センシングカメラ

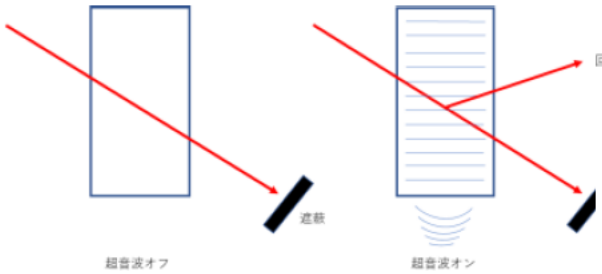
3.品目の主たる用途の調査分析（7）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

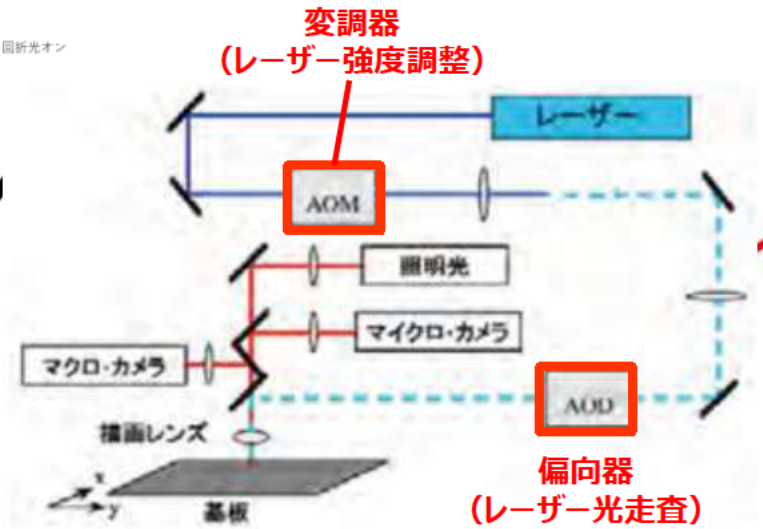
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（7）

図7-3-19　音響光学効果を利用した装置の例

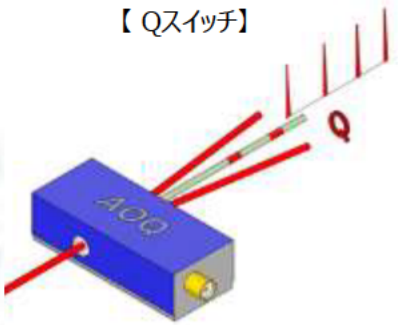
【 光スイッチ・光変調器の原理】



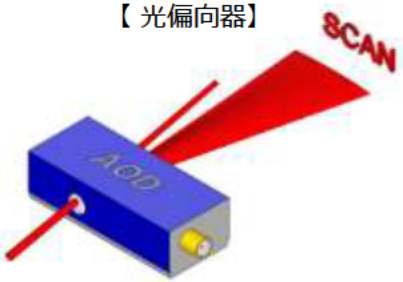
【 マスクレスリソグラフィの構成】



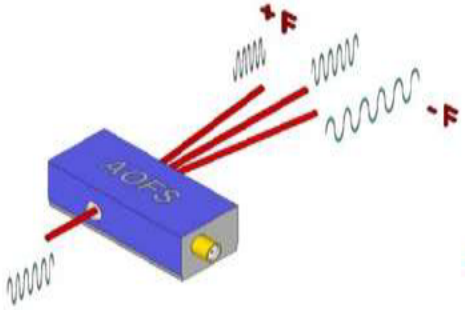
【 Qスイッチ】



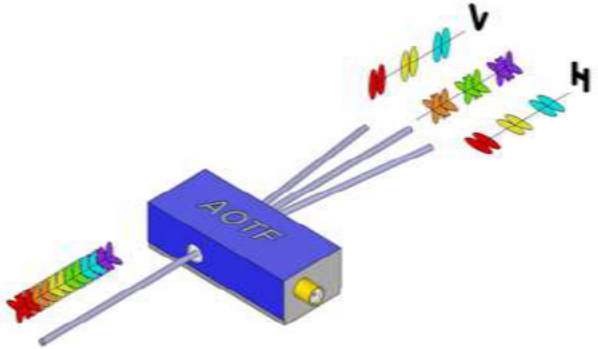
【 光偏向器】

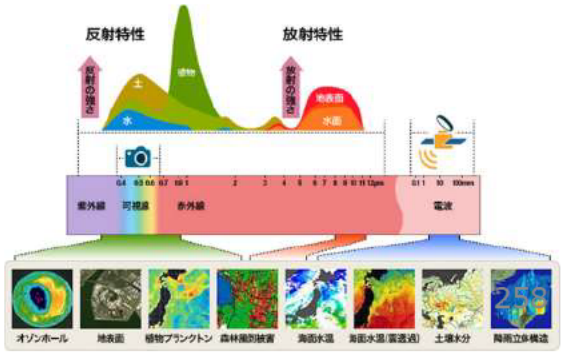


【 周波数シフタ】



【 波長可変フィルタと応用例（リモートセンシング）】





3.品目の主たる用途の調査分析（8）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（8）

【軍事用途】

表7-3-4に、弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品の、軍事関係の用途を示す。なおSAWデバイスに比べてBAWデバイスは、より高い周波数に対応可能であり、両者の境は先に図7-3-16に示した例のように一般には2GHz程度と言われている。しかし両者の用途には共通するものも多い。

SAW特有の用途にタッチパネルと分子センサがある。タッチパネルは必ずしもSAW方式とは限らないが、軍事用機器でも入力インターフェースとして広く利用されている。操縦装置の入力をタッチパネル化した航空機の操縦席はグラスコクピットと呼ばれている。分子センサを用いるとプラスチック爆薬などの探知も可能である。

表7-3-4　弾性波若しくは音響光学効果の軍事関係の用途例

	用途例	
表面弾性波 又は 疑似表面弾性波	タッチパネル	軍事機器（入力インターフェース）
	分子センサー	爆薬探知
	SAWデバイス	軍事通信
	レゾネータ	パルス圧縮レーダー
	ディレイライン	パルス圧縮レーダー
	コンボルバ	データ通信の妨害・傍受耐性
バルク弾性波	BAWデバイス	軍事通信
	レゾネータ	原子時計用発振器、パルス圧縮レーダー
音響光学効果	波長可変フィルタ	地表センシングカメラ

3.品目の主たる用途の調査分析（9）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（9）

一方BAWデバイスは、原子時計で利用される代表的な原子であるルビジウムやセシウムの遷移周波数（数GHz）と同程度の周波数を扱えるため、BAWレゾネーターを利用して、現在の原子時計に使われている水晶発振器と周波数逓倍器が不要の低製造コスト、小型、低消費電力の原子時計を作ることが期待されている（図7-3-20）。原子時計は、全球測位衛星システム（GNSS）、ドップラーレーダー、重力センサー、デジタル通信、データ通信の傍受・妨害耐性向上、敵味方識別システム、無線探知、電子インテリジェンス（ELINT）収集など幅広い用途で使われている。

SAW・BAWデバイスは通信機器はじめ、さまざまな電子・電気機器に使われている。一例としてパルス圧縮レーダーが挙げられる。一般にレーダーは発信するパルスが短いほど分解能が良くなる（図7-3-21上）。しかし発信パルスを短くすることは発信出力を弱くすることでもあるため、探知距離が短くなってしまう。このトレードオフを解消するために、周波数を変調させた長いパルスを発信して発信出力を確保しつつ、受信時にパルスを圧縮して分解能を確保するパルス圧縮技術が使われている（図7-3-21下）。この技術にはレゾネーターやディレイラインが使われている。

図7-3-20　BAWデバイス（FBAR）による原子時計部品の小型化

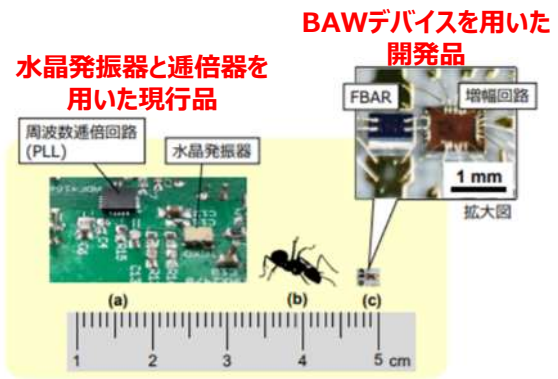
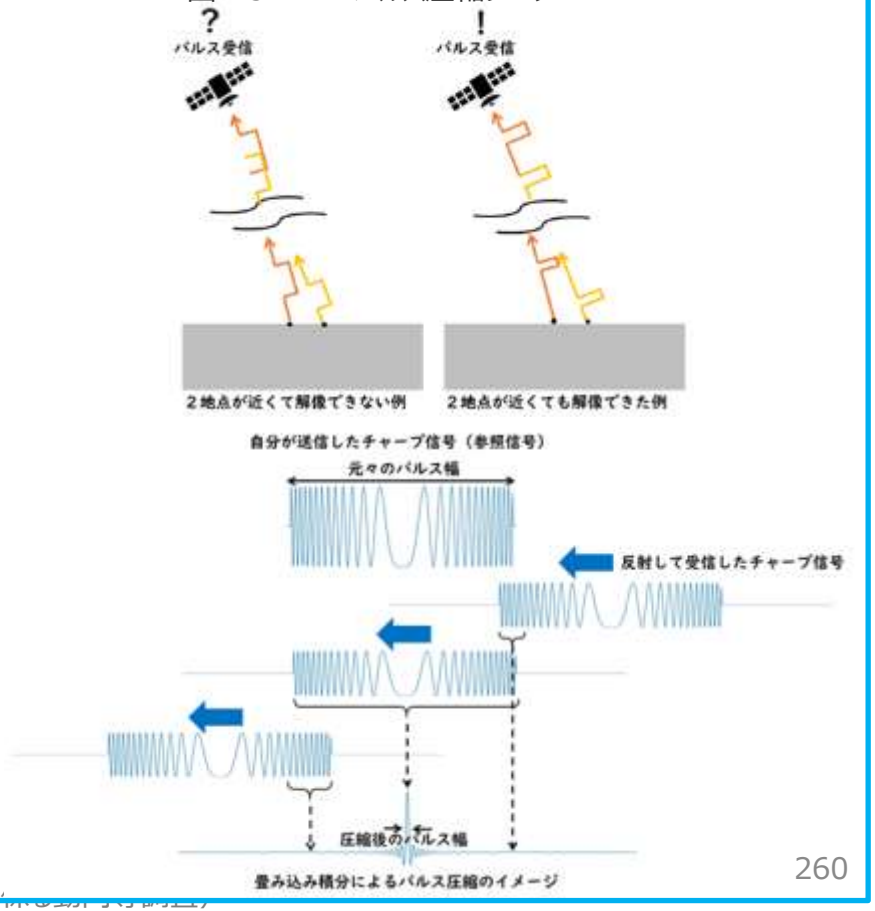


図7-3-21　パルス圧縮レーダー



3.品目の主たる用途の調査分析（10）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（10）

SAW・BAWデバイスを利用した別の例としてスペクトラム拡散通信と呼ばれる技術の一種である直接スペクトラム拡散が挙げられる。直接スペクトラム拡散は元の信号を遥かに広い周波数帯に広く弱く分散して送受信することによりノイズや第三者の傍受への耐性を高める技術であるが（図7-3-22）、送信側と受信側で識別信号が一致しているかの判別にコンボルバが使われる。

音響光学効果を利用する装置では、航空機や衛星から地表を監視するリモートセンシングシステムに波長可変フィルタが利用可能である。地表の情報をさまざまな波長ごとに測定することができる（図7-3-23）。

図7-3-22　直接スペクトラム拡散方式

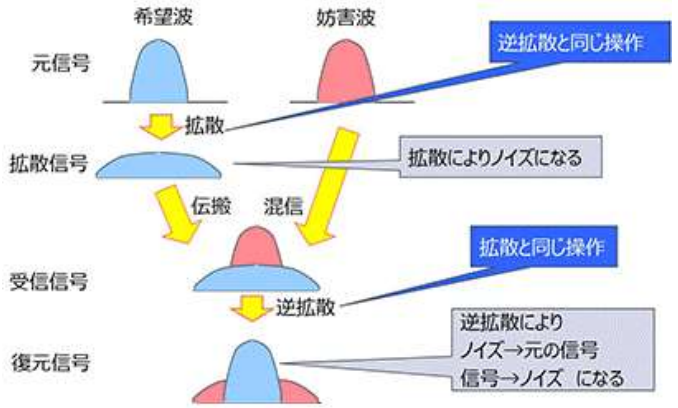
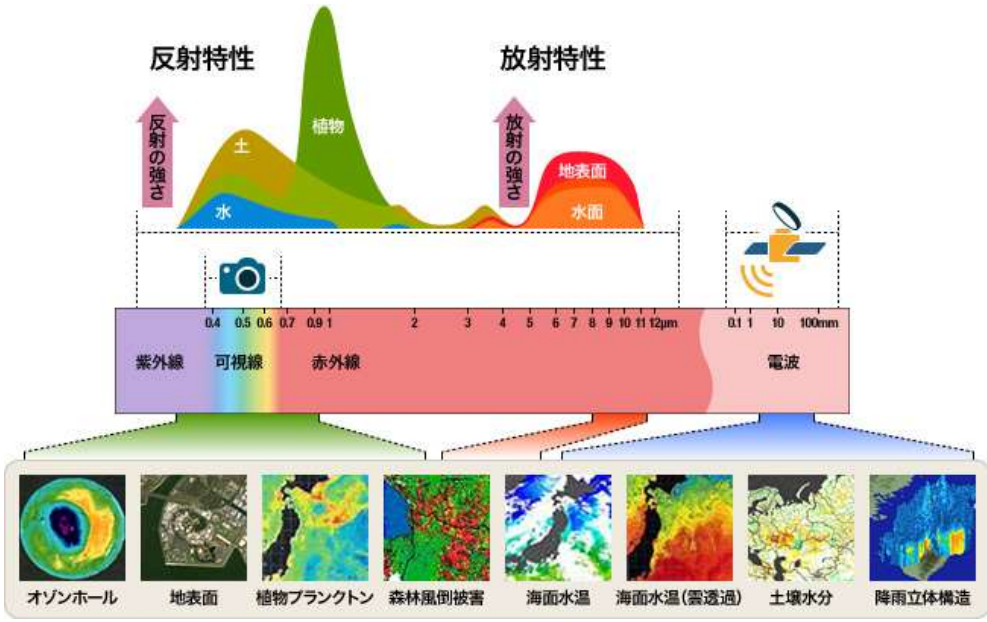


図7-3-23　広周波数帯域でのリモートセンシングのイメージ



3.品目の主たる用途の調査分析（11）

〇輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

本項には、用途に対する規制は無い。

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（1）

弾性波または音響光学効果を利用する信号処理装置で、貨物等省令第6条第三号の規定は品目から規制の有無を判定できる内容はない。ただし、タッチパネルや分子センサーは通常MHz領域の周波数を利用するため、規制対象外と考えられる。

また表面弾性波又は疑似表面弾性波を利用する信号処理装置又はその部分品で、最大遅延時間あるいは分散型遅延時間が関与する規制値があり、いずれも遅延時間が大きい品目を規制している。これはSAWデバイスのうち、ディレイラインを意図した規制であると考えられる（表7-3-5）。

表7-3-5　弾性波若しくは音響光学効果の規制がかかっている用途例

	用途例	
表面弾性波	タッチパネル	軍事機器（入力インターフェース）
又は	分子センサー	爆薬探知
疑似表面弾性波	SAWデバイス	軍事通信
	レゾネータ	パルス圧縮レーダー
	ディレイライン	パルス圧縮レーダー
	コンボルバ	データ通信の妨害・傍受耐性
バルク弾性波	BAWデバイス	軍事通信
	レゾネータ	原子時計用発振器、パルス圧縮レーダー
音響光学効果	波長可変フィルタ	地表センシングカメラ

イ（一）の規制対象となり得る

遅延時間が主要な特性となる
→イ（二）（三）の規制対象となり得る

ハの規制対象となり得る

ロの規制対象となり得る

4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

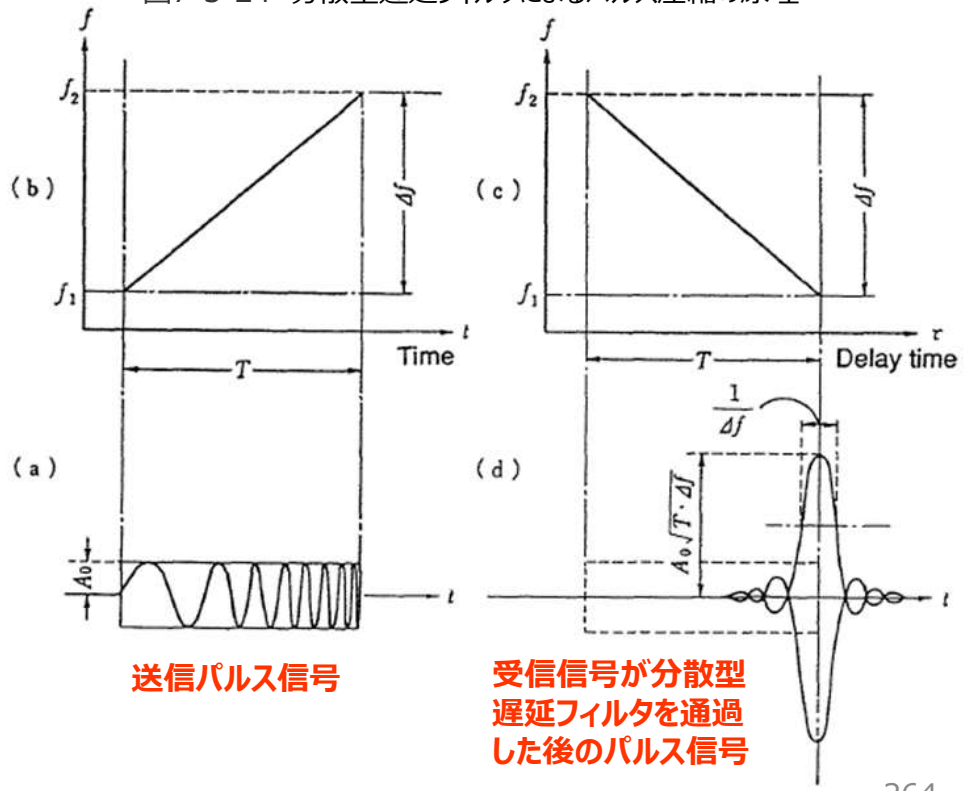
①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（2）

パルスレーダーのパルス圧縮にはいくつかの方法があるが、非常に長い遅延時間が得られるという特徴を有するSAWフィルタなどの分散型遅延フィルタを用いる方法がチャープパルス方式である。図7-3-24に原理を示す。パルス幅Tの送信信号を(b)のように時間とともに周波数がf_1からf_2へと直線的に高くなるように変調させることにより、(a)のような送信信号波形となる。この信号が目標物に当たって返ってくる反射波を受信する際に、周波数に応じて遅延時間が直線的に変化する、すなわち(c)に示すように時間Tの間隔で時間とともに周波数がf_2からf_1へと直線的に低くなる特性を有するフィルタを通すことにより、(d)のようなパルス波としてフィルタから出力される。すなわち送信波があたかも鋭く強いパルス波であったかのような効果が得られる。

振幅（強度）は送信信号の振幅A_0の$\sqrt{(T\times\Delta f)}$倍に、パルス幅は$1/\Delta f$倍になる。つまりTとΔfが大きいほど鋭く強いパルス波が得られるため、パルスレーダーの性能の指標をΔfとTの積で表し、これをBT積（Bandwidth-Time product, Time-Bandwidth product）という。

貨物等省令第6条第三号には「最大遅延時間の数値に帯域幅の数値を乗じて得た数値」に関する規制があるが、「最大遅延時間」はTに相当する「分散型遅延時間」とは異なるので、BT積を規制したものではない。

図7-3-24　分散型遅延フィルタによるパルス圧縮の原理



送信パルス信号

受信信号が分散型遅延フィルタを通過した後のパルス信号

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（3）

表面弾性波又は疑似表面弾性波を利用する信号処理装置の規制パラメータを図7-3-25に示す。

規制パラメータ　輸出令第7項(3)

イ　表面弾性波又は疑似表面弾性波を利用するものであって、次のいずれかに該当するもの

（一）　搬送周波数が６ギガヘルツを超えるもの

（二）　搬送周波数が１ギガヘルツ超６ギガヘルツ以下のものであって、次のいずれかに該当するもの

1　サイドローブに対するメインローブの電力の比が65デシベルを超えるもの

2　マイクロ秒で表した場合の最大遅延時間の数値にメガヘルツで表した場合の帯域幅の数値を乗じて得た数値が100を超えるもの

3　帯域幅が250メガヘルツを超えるもの

4　分散型遅延時間（周波数に応じた遅延時間の最大の値と最小の値との差をいう。）が10マイクロ秒を超えるもの

（三）　搬送周波数が１ギガヘルツ以下のものであって、次のいずれかに該当するもの

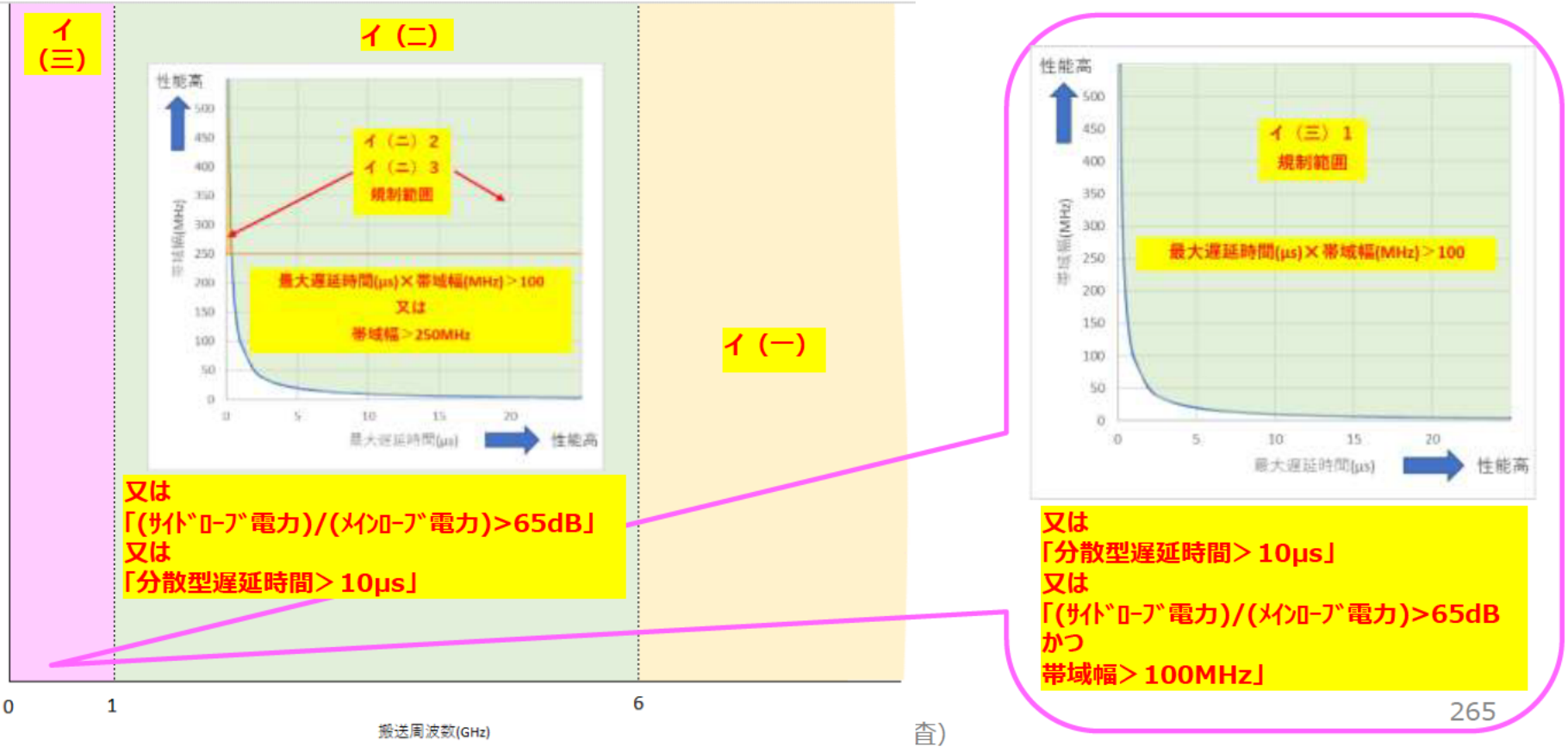
1　マイクロ秒で表した場合の最大遅延時間の数値にメガヘルツで表した場合の帯域幅の数値を乗じて得た数値が100を超えるもの

2　分散型遅延時間が10マイクロ秒を超えるもの

3　サイドローブに対するメインローブの電力の比が65デシベルを超えるものであって帯域幅が100メガヘルツを超えるもの

ロ　バルク弾性波を利用するものであって、６ギガヘルツを超える周波数で信号の直接処理ができるもの

図7-3-25　表面弾性波又は疑似表面弾性波を利用する信号処理装置の規制パラメータ



査）

4.品目の技術動向調査（4）

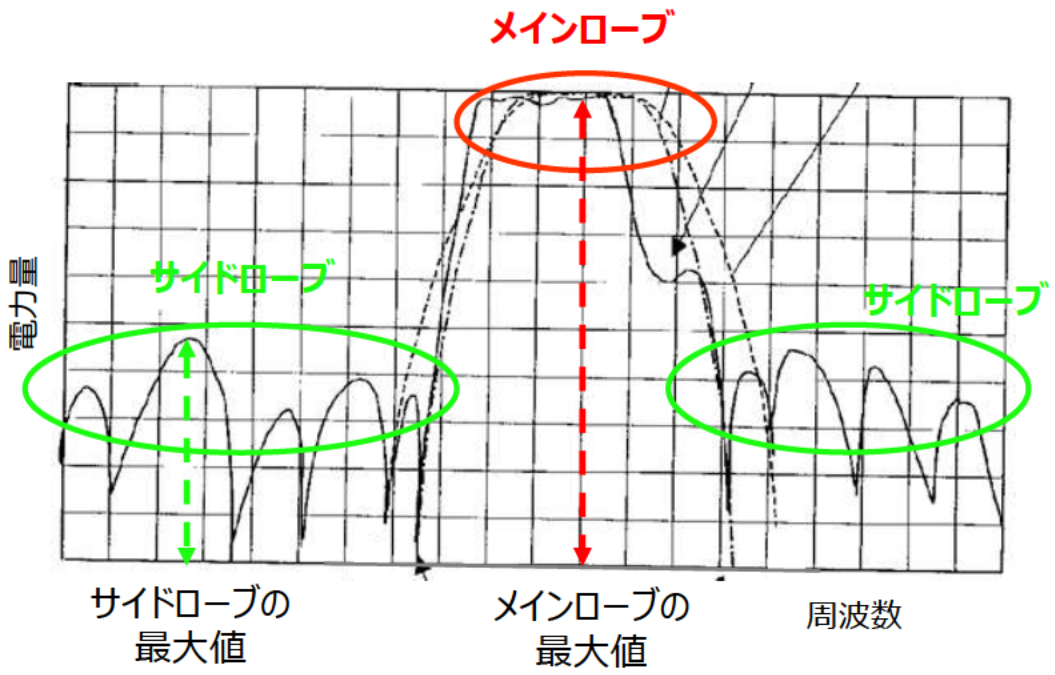
○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（4）

輸出令7項(3)ではサイドローブに対するメインローブの電力の比をデシベル（dB）単位で65dBを超えるものと規制している。メインローブ、サイドローブの電力は、それぞれの中で最も大きいものの値である（図7-3-26）。

図7-3-26　メインローブとサイドローブの電力の比

$$10\times\log_{10}(\text{メインローブの電力}/\text{サイドローブの電力})>65\text{dB}$$



4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（5）

音響光学効果を利用する信号処理装置の規制パラメータは信号処理をする周波数帯のみである（図7-3-27）。表7-3-3や図7-3-19に挙げた例は全て対象となる可能性がある。

図7-3-27　バルク弾性波を利用する
信号処理装置の規制パラメータ



規制パラメータ　輸出令第7項(3)

イ　表面弾性波又は疑似表面弾性波を利用するものであって、次のいずれかに該当するもの

（一）　搬送周波数が６ギガヘルツを超えるもの

（二）　搬送周波数が１ギガヘルツ超６ギガヘルツ以下のものであって、次のいずれかに該当するもの

1　サイドローブに対するメインローブの電力の比が65デシベルを超えるもの

2　マイクロ秒で表した場合の最大遅延時間の数値にメガヘルツで表した場合の帯域幅の数値を乗じて得た数値が100を超えるもの

3　帯域幅が250メガヘルツを超えるもの

4　分散型遅延時間（周波数に応じた遅延時間の最大の値と最小の値との差をいう。）が10マイクロ秒を超えるもの

（三）　搬送周波数が１ギガヘルツ以下のものであって、次のいずれかに該当するもの

1　マイクロ秒で表した場合の最大遅延時間の数値にメガヘルツで表した場合の帯域幅の数値を乗じて得た数値が100を超えるもの

2　分散型遅延時間が10マイクロ秒を超えるもの

3　サイドローブに対するメインローブの電力の比が65デジベルを超えるものであって、帯域幅が100メガヘルツを超えるもの

ロ　バルク弾性波を利用するものであって、６ギガヘルツを超える周波数で信号の直接処理ができるもの

4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（1）

弾性波デバイスのうち、ディレイラインの市場規模を図7-3-28に示す。2016年までが実績値、2017年以降は予測値である。2016年から2022年までのCAGRは10.0%と予想されている。

図7-3-28　弾性波ディレイラインの市場規模



100万USドル

	2014年	2015年	2016年	2017年	2019年	2021年	2023年	CAGR (2017-2023)
ディレイライン	111.7	124.0	137.8	153.1	188.0	227.5	271.4	10.0%

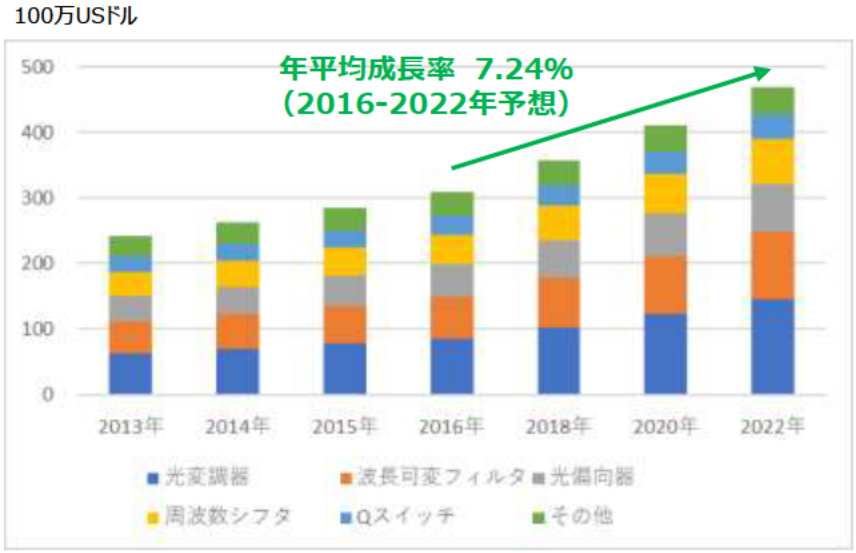
4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

音響光学効果を利用したデバイスの市場規模は光変調器向けが最も大きく、波長可変フィルタ向けがこれに次ぐ。デバイス全体の市場の2016年から2022年までのCAGRは7.24%と予想されている（図7-3-29）。

図7-3-29　音響光学効果デバイスの市場規模（種類別）



100万USドル

	2013年	2014年	2015年	2016年	2018年	2020年	2022年
光変調器	63.1	70.2	77.8	85.8	103.4	123.3	145.7
波長可変フィルタ	48.2	53.0	58.2	63.5	75.2	88.0	102.3
光偏向器	38.6	41.9	45.3	48.9	56.4	64.4	72.9
周波数シフタ	36.2	39.4	42.7	46.2	53.5	61.4	69.9
Qスイッチ	24.1	25.6	27.1	28.6	31.5	34.2	36.8
その他	30.9	32.4	34.0	35.4	38.0	40.0	41.5
合計	241.0	262.6	285.1	308.4	357.9	411.4	469.1

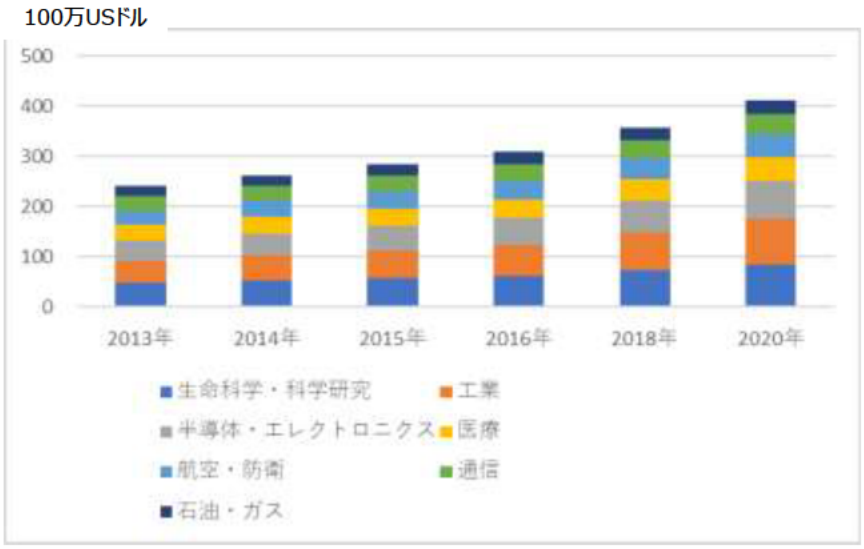
4.品目の技術動向調査（8）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

音響光学効果を利用したデバイスの市場規模は分野別では生命科学・科学研究、工業、半導体・エレクトロニクスが上位を占めるが、突出して大きい分野はない（図7-3-30）。

図7-3-30　音響光学効果デバイスの市場規模（分野別）



100万USドル

	2013年	2014年	2015年	2016年	2018年	2020年	2022年
生命科学・科学研究	48.7	53.2	57.9	62.8	73.3	84.7	97.0
工業	43.9	49.3	55.2	61.5	75.5	91.6	110.0
半導体・エレクトロニクス	40.1	44.3	48.6	53.3	63.3	74.5	86.9
医療	30.9	33.1	35.3	37.6	42.1	46.6	51.1
航空・防衛	28.9	31.2	33.6	36.0	41.1	46.4	52.0
通信	28.5	30.4	32.2	34.1	37.7	41.1	44.4
石油・ガス	20.1	21.2	22.3	23.3	25.0	26.5	27.6
合計	241.0	262.6	285.1	308.4	357.9	411.4	469.1

4.品目の技術動向調査（9）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（4）

弾性波センサの主な製造企業を表に示す。これらの中でも、Althen GmbH Mess- und Sensortechnik社、H. Heinz Meßwiderstände社、Transense Technologies社、pro-micron社4社が市場で主要なシェアを占めている。

	企業	会社概要
1	Althen GmbH Mess- und Sensortechnik（ドイツ）	1978年に設立されたAlthen GmbH Mess- und Sensortechnik（ドイツ）が1947年設立のAltheris BV（オランダ）と2018年に合併して誕生した。Broadporte Holdingの傘下にある企業。弾性波センサーの世界的企業である。
2	H. Heinz Meßwiderstände GmbH（ドイツ）	1991年設立。温度、湿度、圧力、および無線測定技術のためのさまざまなデバイスとシステムを製造している。
3	Transense Technologies PLC（イギリス）	1991年設立。特に航空機、特殊な自動車、再生可能エネルギー、および産業市場を対象として弾性表面波（SAW）センサーを提供している。
4	pro-micron GmbH & Co. KG（ドイツ）	1978年設立。食品、飲料、自動車、機械加工産業向けにワイヤレスセンサーを提供している。
5	Vectron International Incorporated（アメリカ）	1966年設立。2018年にMicrochip Corporation（アメリカ）に買収された。DCからマイクロ波周波数までのバルク音波（BAW）および弾性表面波（SAW）ベースの設計の両方で、周波数制御、センサー、およびハイブリッド製品ソリューションの設計、製造、およびマーケティングを行っている 。製品には水晶発振器、周波数変換器、SAWフィルター、水晶フィルターとコンポーネントなどがあり、電気通信、データ通信、周波数シンセサイザー、タイミング、ナビゲーション、軍事、航空宇宙、計装システムで使用されている。
6	Qualtre Incorporated（アメリカ）	2008年設立。Si半導体MEMSベースのモーションセンサーの開発、製造を行っている企業。BAW MEMSセンサーも開発している。
7	Abracon LLC（アメリカ）	1992年設立。パッシブコンポーネントの業界リーダーであり、周波数制御およびタイミングデバイス、RFおよびアンテナ製品、インダクタおよび接続ソリューションを提供している。具体的な製品には水晶発振器、MEMS発振器、セラミック共振器、SAWフィルタ、SAWレゾネータ、RFアンテナなどがある。
8	Boston Piezo-Optics Incorporated（アメリカ）	1994年設立。SAWコンポーネントとBAWコンポーネントのカスタム製造を行っている。2000年にValpeyFisher社の超音波トランスデューサークリスタル部門を買収した。
9	SenSanna Incorporated（アメリカ）	2014年に設立され、同年Applied Sensor R&D Corporation（アメリカ）を買収した。ワイヤレスSAWベースのセンサーシステムソリューションを開発している。
10	Sensor Technology Limited（カナダ）	1983年設立。圧電素子の音響デバイスとシステムの企業。イギリスに同名の測定機器の会社が存在する。
11	SENSeOR S.A.S.（フランス）	2006年設立。WIKA Group（ドイツ）の傘下にある企業。SAWデバイスに関する代表的企業の一つ。
12	ST Microelectronics N.V.（スイス）	SGS Microelettronica社（イタリア）の半導体事業とThomson Semiconductors社（スイス）の非軍事事業部門が合併して1987年に発足。自動車、コンピュータ周辺機器、工場自動化などの分野向けの半導体ICの設計、開発、製造、販売を行っている。弾性波、温度、光、振動、湿度、超音波などのセンサも提供している。
13	Precision Acoustic Limited（イギリス）	1997年設立。超音波測定に関する製品を製造・販売しており、製品は音圧測定、出力測定、超音波トランスデューサ、音響材料、圧電材料などがある。
14	Hawk Measurement Systems（オーストラリア）	1988年設立。弾性波、超音波、マイクロ波、レーダー光ファイバなどを使ったレベル測定センサの企業である。鉱業/鉱物処理、給水/廃水、石油およびガス、バルク材料の取り扱い、化学、電力、セメント、パルプおよび紙、食物などの産業に製品を提供している。

4.品目の技術動向調査（10）

○輸出令7項（３）弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（5）

音響光学デバイスの主な製造企業を表に示す。これらの中でも、Gooch & Housego社、Brimrose Technology社、Isomet社、L3Harris Technologies社、AMS Technologies社の5社が市場で主要なシェアを占めている。

	企業	会社概要
1	Gooch & Housego PLC（イギリス）	1948年設立。航空宇宙および防衛、産業、ライフサイエンス、科学研究の各セクターで活動しており、幅広いフォトニックテクノロジーに基づくシステムとコンポーネントを提供している。音響光学製品としては、モデュレータ、ビームデフレクタ、周波数シフタ、モードロッカー、パルスピッカー、Qスイッチ、可変フィルタなどがある。
2	Brimrose Technology Corporation（アメリカ）	1980年設立の電気光学製品の代表的企業。音響光学製品に関しては、可変フィルタ、モデュレータ、周波数シフタ、Qスイッチ、デフレクタ、モードロッカー、キャビティダンパ/パルスピッカなどがある。
3	Isomet Corporation（アメリカ）	1956年に設立された、レーザー市場に商用AO変調器を提供した最初の企業の一つ。音響光学デバイス、RFエレクトロニクス、および光学サブシステムの設計、開発、および製造を行っている。音響光学関連の製品には、モデュレータ、周波数シフタ、デフレクタ、可変フィルタ、Qスイッチなどがある。
4	L3Harris Technologies, Incoporated（アメリカ）	Harris Corporation（アメリカ）とL3 Technologies社（アメリカ）が2019年に合併して発足した航空宇宙・防衛産業などを中心に活動する企業。通信システム事業、宇宙情報システム事業、エレクトロニックシステム事業、クリティカルネットワークス事業の4つの事業セグメントで事業を展開する。音響光学関連ではモデュレータ、キャビティダンパーなどを扱っている。
5	AMS Technologies AG（ドイツ）	1982年設立。光学技術、熱管理、電力技術の分野の技術を有し、再生可能エネルギー、医療、防衛および航空宇宙、研究および科学、その他のさまざまな産業分野に製品を提供してきた。音響光学関連の製品には、デフレクタ、周波数シフタ、モデュレータ、Qスイッチ、可変フィルタ、パルスピッカー、多色性変調器などがある。
7	IntraAction Corporation（アメリカ）	1975年設立の音響光学製品メーカー。航空宇宙、バイオテクノロジー、通信、環境モニタ・センシング、ホログラフィ、材料探索、材料加工、医療、生物医学、計測学、印刷、半導体プロセス、信号処理、分光学などの分野に製品を提供している。製品にはモデュレータ、周波数シフタ、デフレクタ、モードロッカー、Qスイッチ、可変フィルタなどがある。
6	AA Opto Electronic（フランス）	1979年にAutomates et Automatismes社として設立。音響光学部品とそれに関連するRFドライバーを専門に扱っている企業。音響光学関連製品には、モデュレータ、周波数シフタ、パルスピッカー、デグレクタ、多色性変調器、可変フィルタ、Qスイッチなどがある。
8	APE Angewandte Physik & Elektronik GmbH（ドイツ）	1992年設立。超高速レーザーパルスを測定および操作するためのデバイスの製造企業。製品は自己相関器から分光計、音響光学デバイスから同期励起光学パラメトリック発振器まで多岐にわたる。音響光学デバイス製品には、パルスピッカー、キャビティダンパ、変調器、周波数シフタなどがある。
9	Lightcomm Technology Corporation, Limited（中国）	2000年設立。光ファイバ製品の企業であり、ヒューズ付きファイバーカプラー、PLC、CWDM / DWDMフィルター、EDFA、ポンプコンバイナー、アイソレーター、PMファイバーコンポーネント、コネクターなどを提供している。製品には音響光学変調器もある。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（4）
超電導材料を用いた装置

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

【超電導の性質】

超電導体（あるいは超伝導体）とは、材料ごとに固有の一定の温度（臨界温度T_C）以下の温度になると急激に電気抵抗が0になる材料である。超電導体はまた、外部磁場を超電導体内部から完全に排除する完全反磁性（マイスナー効果）の性質を有する（図7-4-1）。なお経済産業省の「輸出貿易管理令の運用について」においては、超電導を「すべての電気抵抗を消失することができる金属、合金又は化合物が、無限の導電率に達したときジュール熱の発生なしに大電流を流すことが可能なことをいう。」という表現で定義している。

現在知られている超電導材料のほとんどは臨界温度（超電導転移温度）が非常に低いため、常圧で室温に近い臨界温度を有し、加工等も容易な超電導材料の探索が続けられている（図7-4-2）。

超電導には温度のほか、電流密度、磁場のそれぞれに臨界値（臨界電流密度J_C、臨界磁場H_C）がある。また超電導体には臨界磁場を超えると直ちに超電導状態が壊れて常電導状態になる第1種超電導体と、磁場が一定の強さを超えると徐々に磁束が侵入して超電導状態が徐々に壊れていく第2種超電導体に分類される材料がある。第2種超電導体の場合は、超電導状態が壊れ始める磁場の強さを下部臨界磁場（H_{C1}）、超電導状態が完全に壊れる磁場の強さを上部臨界磁場（H_{C2}）という。

図7-4-1　超電導体の主な特徴

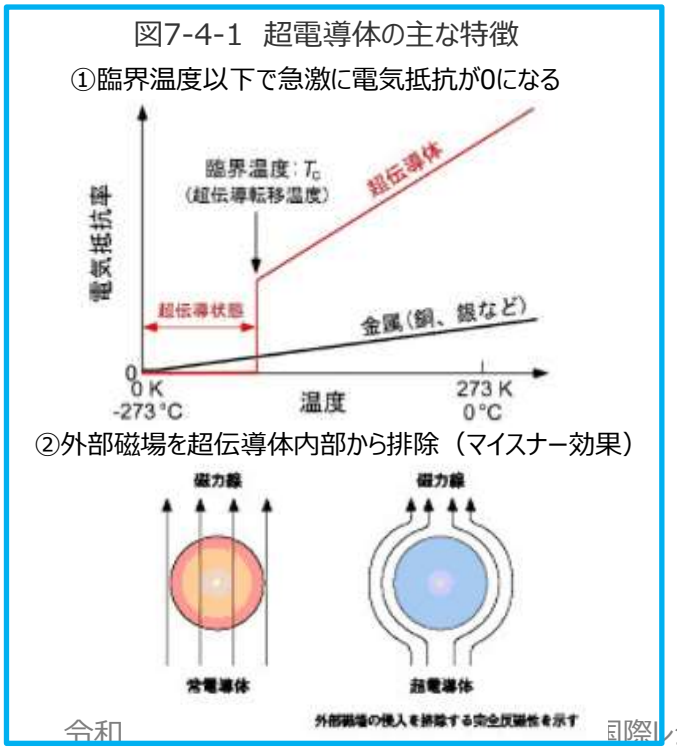
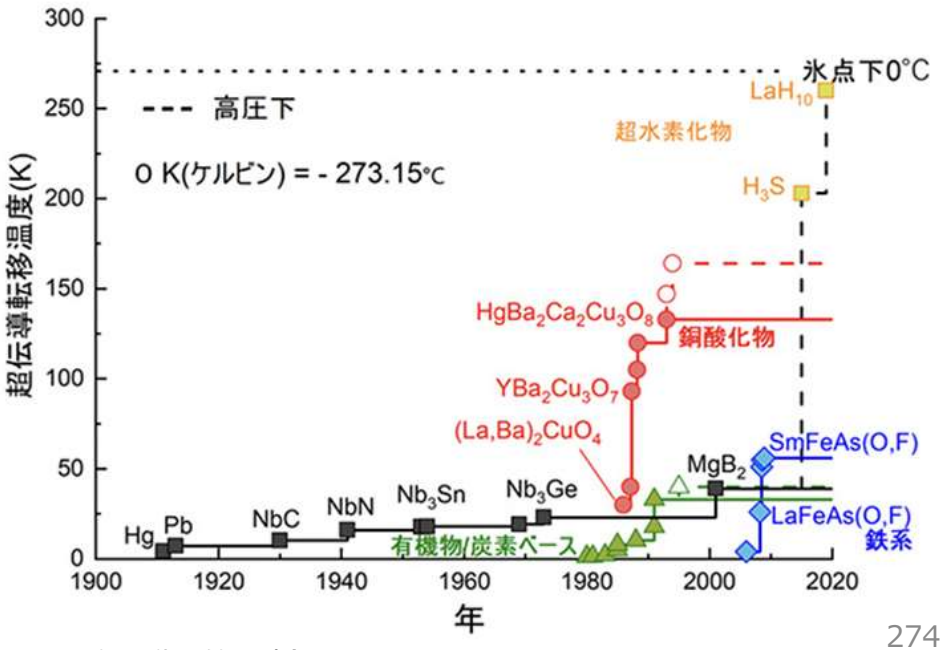


図7-4-2　高温超電導材料の探索



1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

【超電導技術の用途】

臨界温度が低いという課題はあるものの、小型で保守も容易なGM冷凍機（Gifford-McMahon冷凍機）を用いたシステム（図7-4-3）の開発などもあり、超電導技術は様々な用途への利用が拡がっている。表7-4-1に実用化済みおよび開発中の超電導技術の用途を示す。超電導技術の用途は、①電磁石・エネルギー貯蔵、②電子素子・周波数分離回路、③その他に分類することができるが、輸出令7項(4)の規制の対象となり得るのは、電子素子・周波数分離回路としての利用である。

図7-4-3　G-Mサイクルとこれを利用したGM冷凍機

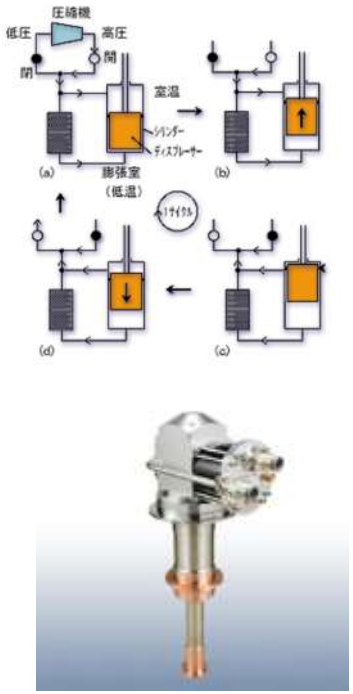


表7-4-1　超電導技術の用途

分野	具体的な製品用途
情報・通信分野	超電導コンピュータ
	高速大容量通信システム/ルーター
	AD変換機
	送信/受信フィルタ
研究・開発・計測機器分野	NMR
	赤外線検出器
	宇宙線検出器
診断・医療分野	MRI
	磁気誘導カテーテル
	磁気標的ドラッグ・デリバリー・システム
	脳磁計
	心磁計
エネルギー・電力分野	発電機
	変圧器
	送電ケーブル
	核融合装置
	大型加速器
	エネルギー貯蔵装置（SMES）
	フライホイール
	限流器
産業・輸送分野	磁気浮上式鉄道用マグネット
	モータ
	単結晶引上装置
	廃水磁気分離装置
	電圧標準
	非破壊検査装置
	半導体検査装置
	地殻中金属資源探査装置
	マグネトロンスパッタ装置
①電磁石・エネルギー貯蔵としての用途	
②電子素子・周波数分離回路としての用途	
③その他の用途	

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（1）

○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容では、Wassenaarアレンジメントの赤字の部分に対応する記載が貨物等省令や輸出貿易管理令の運用についてにはない。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(4)	6		四	四　超電導材料を用いた装置のうち、超電導材料を用いた部品を有する電子素子又は電子回路であって、使用する超電導材料の臨界温度より低い温度で使用することができるように設計し、かつ、次のいずれかに該当するもの 超電導 すべての電気抵抗を消失することができる金属、合金又は化合物が、無限の導電率に達したときジュール熱の発生なしに大電流を流すことが可能なことをいう。 超電導材料を用いた装置 電子素子、回路又はシステムを含む。	

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3A1	d	d. Electronic devices and circuits containing components, manufactured from "superconductive" materials, specially designed for operation at temperatures below the "critical temperature" of at least one of the "superconductive" constituents and having any of the following: "superconductive" Refers to materials, (i.e., metals, alloys or compounds) which can lose all electrical resistance (i.e., which can attain infinite electrical conductivity and carry very large electrical currents without Joule heating). Technical Note The "superconductive" state of a material is individually characterised by a "critical temperature", a critical magnetic field, which is a function of temperature, and a critical current density which is, however, a function of both magnetic field and temperature.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（2）

○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容では、Wassenaarアレンジメントの赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(4)	6		四	臨界温度 （５の「臨界温度」の解釈に同じ。） 超電導物質が直流電流に対するすべての電気抵抗を消失する温度をいう。 イ　超電導ゲートを有するデジタル回路用の電流スイッチングの機能を有するものであって、ゲート当たりの遅延時間にゲート当たりの電力消費を乗じて得た値が一、〇〇〇億分の一ミリジュール未満のもの ロ　周波数分離の機能を有するものであって、キュー値が一〇、〇〇〇を超える共振回路を有するもの	ゲート当たりの遅延時間にゲート当たりの電力消費を乗じて得た値が1000億分の1ミリジュール未満 キュー値が10000を超える

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A1	d		"critical temperature" (Sometimes referred to as the transition temperature) of a specific "superconductive" material is the temperature at which the material loses all resistance to the flow of direct electrical current.
		1	1. Current switching for digital circuits using "superconductive" gates with a product of delay time per gate (in seconds) and power dissipation per gate (in watts) of less than 10^-14 J; or
		2	2. Frequency selection at all frequencies using resonant circuits with Q-values exceeding 10,000;

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（１）

【ジョセフソン接合・ジョセフソン素子】

超電導ゲートを有するデジタル回路用の電流スイッチング機能を有する素子として、ジョセフソン接合を利用したジョセフソン素子が挙げられる。ジョセフソン素子および他のジョセフソン接合の用途について以下に示す。

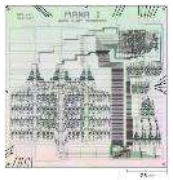
1-1)電流スイッチング機能、電圧・電磁波発生機能

ジョセフソン素子はシリコン半導体などに比べてスイッチング速度や消費電力量を大幅に改善できるため、現在の電圧の有無を論理状態の“0”、“1”に対応させるいわゆる古典コンピュータの素子としての実用化が期待されている。 また、ジョセフソン接合が照射したマイクロ波に正確に比例した電圧を発生する性質を活かして、直流電圧の標準装置として実用化されている。さらに、ジョセフソン接合が結晶中に自然に形成された固有ジョセフソン接合を利用したテラヘルツ波発振素子の研究も進められている（図7-4-4） 。

ジョセフソン素子を用いたコンピュータとしては、古典コンピュータだけでなく、量子コンピュータへの適用も研究されており、量子ビットの種類として、主に量子アニーリングマシン向けの磁束型、万能量子コンピュータ向けの電荷型や、位相型がある。 この磁束型量子コンピュータも含め、ジョセフソン素子を組み込んだSFQ素子やHFQ（半磁束）素子としての活用が検討されている。コンピュータ以外の主な用途としては、広帯域・高精度・高速A/D変換器や高速・低消費電力ルータが挙げられる（図7-4-5） 。

図7-4-4　ジョセフソン接合・素子の用途の例

【ジョセフソン
コンピュータ回路】



【 直流電圧
国家標準装置】



【 テラヘルツ波発振器】

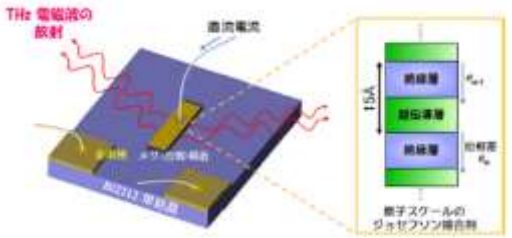
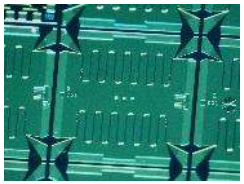
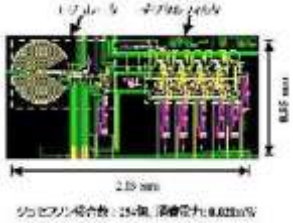


図7-4-5　SFQ素子、HFQ素子の用途の例

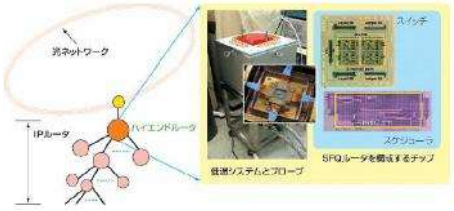
【HFQ回路を利用した
量子コンピュータ素子】



【 A/D変換器】



【ルータ】



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（2）

【ジョセフソン接合・ジョセフソン素子】

ジョセフソン素子は図7-4-6に示す、超電導体が薄い絶縁体を挟むジョセフソン接合を有する。超電導状態を示す低温下では電圧0でもトンネル効果で電子対が絶縁体を透過して電流（ジョセフソン電流）が流れるが、直流電圧を加えて電流がある値を超える（臨界電流）とギャップ電圧が生じ、加えた電圧に比例した周波数の交流電流が発生する。このような抵抗が0と有限の値の2つの状態をとる現象をスイッチとして用いる。

さらに単一の磁束量子を制御することのできる、単一磁束量子（Single Flux Quantum、SFQあるいはRSFQ）回路の研究開発も進められている。SFQ素子は図7-4-7に示すとおり、ジョセフソン素子のオンオフで超電導状態のループの中に量子化された磁束の最小単位を出し入れすることにより、論理状態の“0”、“1”に対応する状態を表すことができる素子である。

SFQ素子のジョセフソン接合の量子力学的位相がπだけシフトしている磁性ジョセフソン接合を用いた半磁束量子（HFQ）素子は、“0”、“1”に対応する状態間の遷移エネルギー（⊿E）がSFQよりも遥かに低いため、SFQよりもさらに低エネルギー消費での動作が期待される（図7-4-8）。

図7-4-6　ジョセフソン接合の構造と電流ー電圧特性

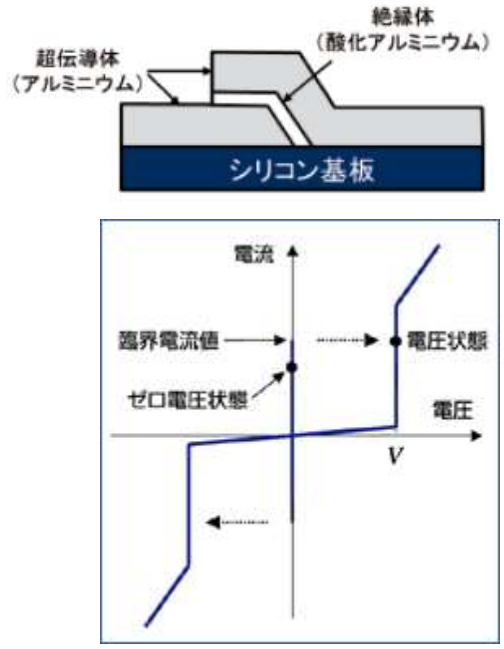


図7-4-7　SFQ回路の動作原理

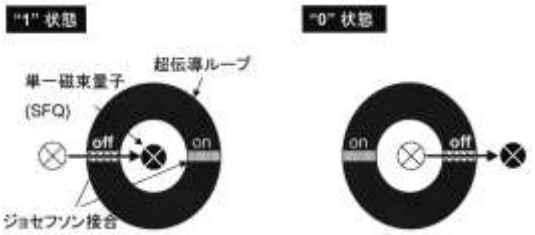
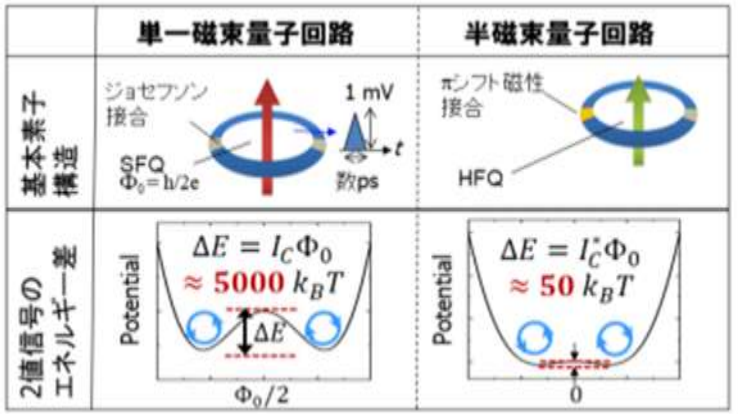


図7-4-8　SFQ回路とHFQ回路の比較



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（3）

1-2)磁気検出機能

ジョセフソン接合を利用した他の装置の例に超電導粒子干渉素子（SQUID）がある。SQUIDは磁気を高感度に検出することができ、人体の心磁界・脳磁界の検出、非破壊検査、資源探査などで利用が進んでいる（図7-4-9）。

SQUIDは図7-4-10に示すとおり、ジョセフソン接合とリング状超電導体からなり、磁気を高感度に検出することができる。

図7-4-9　SQUIDの実用化例

【脳磁計】



【非破壊検査装置】



【資源探査装置】

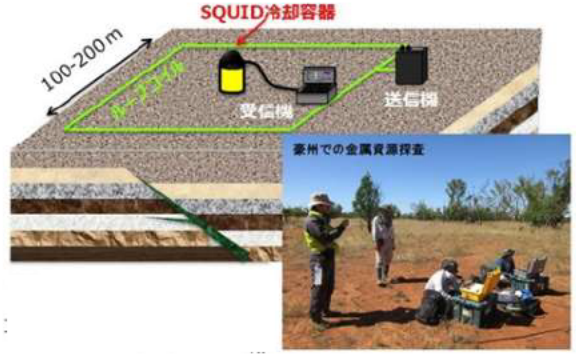
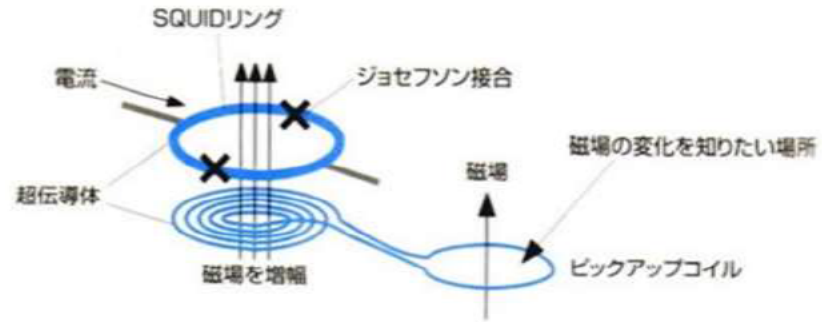


図7-4-10　SQUIDの構造





令和3年度 ～～～

3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（4）

2)周波数分離機能

超電導材料が高周波領域も含めて抵抗値が非常に小さいという特性を利用して、マイクロ波の周波数分離フィルタが実用化されている。

超電導材料により共振回路の電気抵抗がなくなると、回路を多段化することが可能となり、周波数分離特性の非常に高い素子を作ることができる。この超電導フィルタを用いることにより、異なる通信システム間の混信や干渉を防ぐために設ける信号を含まない周波数帯域（ガードバンド）を狭くして、周波数資源を有効に利用することが可能になる（図7-4-11）。

マイクロ波受信用の超電導フィルタは既に国内外で携帯電話の基地局や地上波デジタルテレビの中継局で使われている。また深宇宙探査機との通信を行うパラボラアンテナや電波望遠鏡は周囲からの不要な電波を極力除去する必要があるため、超電導フィルタが採用されている（図7-4-12）。一方、送信用の超電導フィルタは現在開発が進められている。送信用は受信用と比べて超電導体に大電力が加わり、超電導状態が壊れてしまいやすいという課題を解決する必要があるため、実用化がより難しい。

また、マイクロ波よりさらに高周波のミリ波周波数分離フィルタの開発も進められている。

図7-4-11　超電導による周波数の有効活用

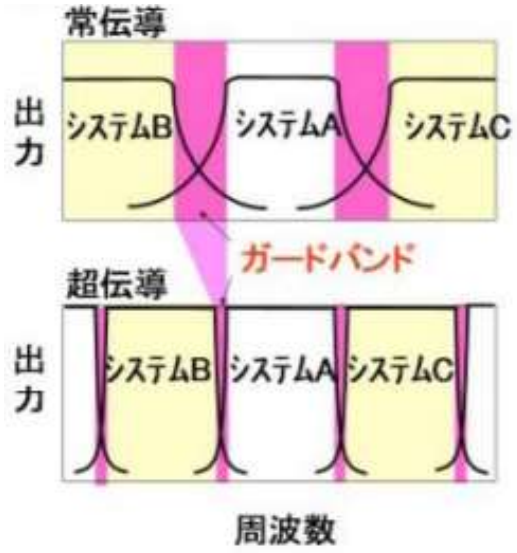


図7-4-12　超電導フィルタの使用例

【 地上波デジタル放送用超電導フィルタとフィルタユニット】



【 深宇宙探査地上局パラボラアンテナ】



3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（5）

【軍事用途】

超電導材料を用いた装置のうち、コンピュータはそのまま軍事用途にも利用可能である。テラヘルツ波はその透過特性から、爆発物の検出やボディースキャナへの利用が検討されている（図7-4-13）。また、水蒸気による減衰が大きいという課題はあるものの、現在のレーダー波では探知の難しい対象物の探知を可能にするテラヘルツ波レーダーの開発が進められているという。

SFQ素子は超高性能の通信機器やコンピュータへの利用が考えられる。通信用機器であるA/DコンバータやSFQルータは、広域軍事通信や多目的無線機（ソフトウェアラジオ）などに使うことが可能である。量子コンピュータは古典コンピュータとは桁違いの並列コンピューティングが可能なことから、主な用途の一つとして暗号解読への利用が挙げられる（図7-4-14）。

図7-4-13　ジョセフソン接合の使用例

【コンピュータによる軍事演習】

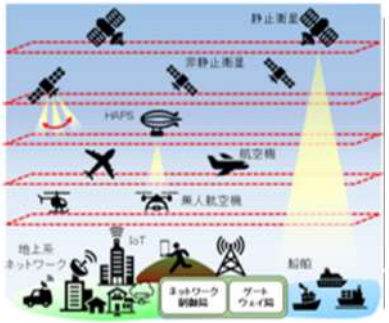


【テラヘルツ波による爆発物探知】



図7-4-14　SFQ素子の使用例

【陸海空宇宙間通信網】



【多目的無線機】



【量子コンピュータ】



3.品目の主たる用途の調査分析（6）

○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（6）

【軍事用途】

SQUIDを用いた磁気センサーは、対潜哨戒機の探知機に用いられている。またSQUIDによる非破壊検査は軍事用機器の製造や点検にも利用可能である（図7-4-15）。しかしながら後述する通り、SQUIDは輸出令7項（4）の対象外である。

超電導バンドパスフィルタは、フェーズドアレイアンテナの受信サブアレイユニットに使うことでアンテナの高感度化に寄与することが期待されている（図7-4-16）。

図7-4-15　SQUIDの使用例（規制対象外）

【対潜哨戒機P3Cの磁気異常探知機（MAD）】



【非破壊検査装置】

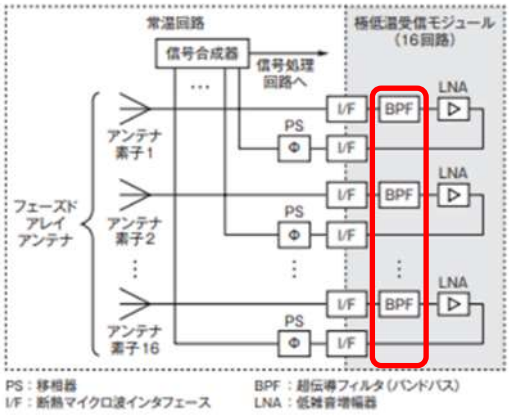


図7-4-16　超電導バンドパスフィルタの使用例

【護衛艦いずものフェーズドアレイアンテナ】



【フェーズドアレイアンテナの受信サブアレイユニット】



3.品目の主たる用途の調査分析（7）

〇輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

本項には用途に関する規制は無い。

4.品目の技術動向調査（1）

規制パラメータ　輸出令第7項(4)
四
イ　超電導ゲートを有するデジタル回路用の電流スイッチングの機能を有するものであって、ゲート当たりの遅延時間にゲート当たりの電力消費を乗じて得た値が一、〇〇〇億分の一ミリジュール未満のもの
ロ　周波数分離の機能を有するものであって、キュー値が一〇、〇〇〇を超える共振回路を有するもの

〇輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（1）

貨物等省令第6条第4項では、超電導材料を用いた部品を有する電子素子又は電子回路のうち、電流スイッチング機能を有するもの（イ）と周波数分離の機能を有するもの（ロ）を規制対象としている。

電流スイッチングの機能を有するものとしてまずジョセフソン接合によるジョセフソン素子が挙げられる。ジョセフソン素子は主として超電導コンピュータへの適用が検討されている。 また、ジョセフソン接合のON/OFFにより量子化された磁束を制御するSFQ素子も規制対象となり得る。

一方、テラヘルツ波発振器に使われるジョセフソン接合や、電圧標準におけるジョセフソン接合の使われ方は、スイッチング機能を有さないので、規制対象に該当しない。

SQUIDはデジタル信号を扱うものではなく、またSQUIDのジョセフソン接合はスイッチング機能は有さないため、SQUIDは規制対象とはならない。

周波数分離機能とはフィルタ機能のことであり、送信/受信フィルタなどは規制対象となり得る。

表7-4-2に規制対象の用途と品目の例を示す。

表7-4-2　規制に該当し得る用途と超電導素子

用途	具体的な装置の例	素子・回路	分野	
電流スイッチング	超電導コンピュータ	ジョセフソン素子	情報・通信	
	高速大容量通信システム/ルータ	SFQ素子	情報・通信	規制対象イ
	AD変換機	SFQ素子	情報・通信	
周波数分離	送信/受信フィルタ	フィルタ回路	情報・通信	規制対象ロ
磁気検出	脳磁計	SQUID	診断・医療	
	心磁計	SQUID	診断・医療	
	地殻中金属資源探査装置	SQUID	産業・輸送	
	非破壊検査装置	SQUID	産業・輸送	
	半導体検査装置	SQUID	産業・輸送	
電磁波発生	テラヘルツ波発振器	ジョセフソン接合	情報・通信	
電圧発生	電圧標準	ジョセフソン接合	産業・輸送	

4.品目の技術動向調査（2）

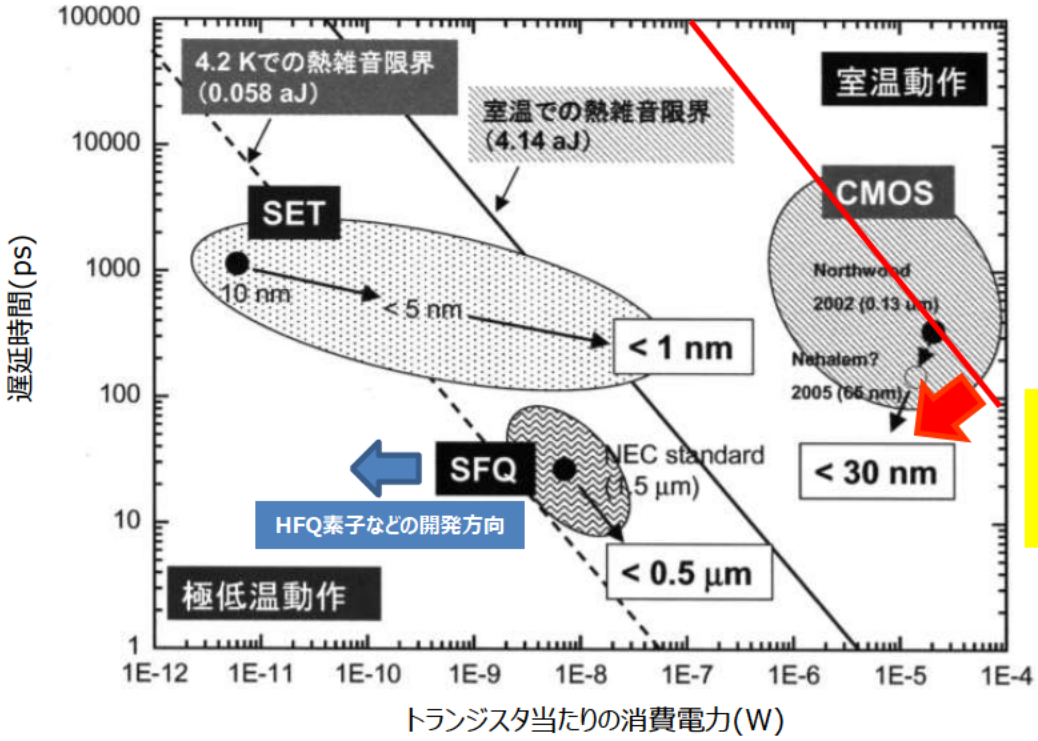
規制パラメータ　輸出令第7項(4)
四
イ　超電導ゲートを有するデジタル回路用の電流スイッチングの機能を有するものであって、ゲート当たりの遅延時間にゲート当たりの電力消費を乗じて得た値が一、〇〇〇億分の一ミリジュール未満のもの

〇輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（2）

現在までに知られている超電導材料はいずれも高圧といった特殊な条件を除くと、超電導の性質を示す臨界温度が常温よりかなり低い。従って、宇宙空間での使用を除き、冷却が大きな課題となる。 そのため、基礎分野ではより常温に近い温度で超電導となる材料の探索が現在も続けられている。
応用分野では、既存の材料を用いて遅延時間が短く、電力消費の少ない回路の開発も進められている（図7-4-17）。
実用化済みおよび開発中の電流スイッチング素子に規制パラメータを当てはめると図7-4-15のようになる。

図7-4-17　電流スイッチング機能を有する素子の規制パラメータ



CMOS　相補型金属酸化物半導体（非超電導体）
SET　単電子トランジスタ（非超電導体）
SFQ　単一磁束量子回路
HFQ　半磁束量子回路

規制パラメータ

（ゲート当たりの遅延時間）×（ゲート当たりの電力消費）$<10^{-11}$mJ

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（3）

周波数分離特性は通過あるいは減衰帯域における信号の鋭さを示すQ値で表される。Q値は中心周波数を通過域幅あるいは減衰域幅で除したものであり、具体的には通過フィルタの場合、中心周波数f_0に対して図7-4-18に示す(式1)で定義される。

図7-4-19に示すとおり、Q値はまた回路の構成素子から(式2)のように計算できる。この例では超電導フィルタは抵抗値Rを極めて小さくできるため、Q値を大きくすることができる。

規制パラメータ　輸出令第7項(4)
四
ロ　周波数分離の機能を有するものであって、キュー値が一〇、〇〇〇を超える共振回路を有するもの

図7-4-18　Q値の定義

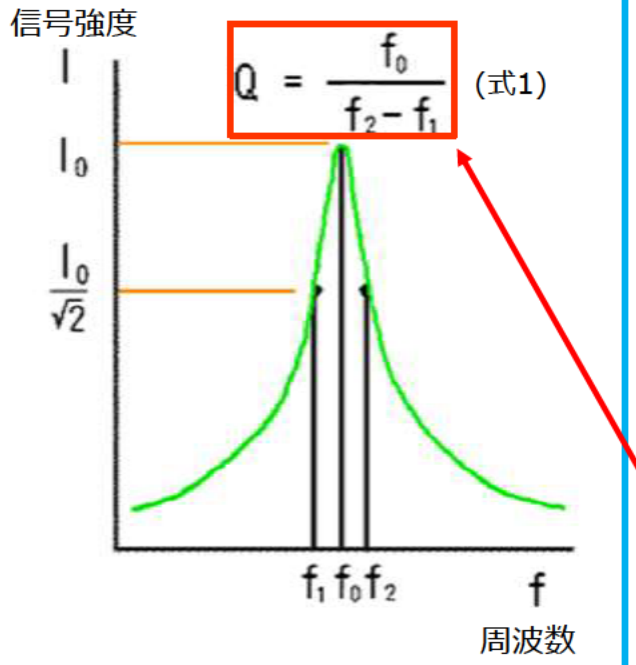
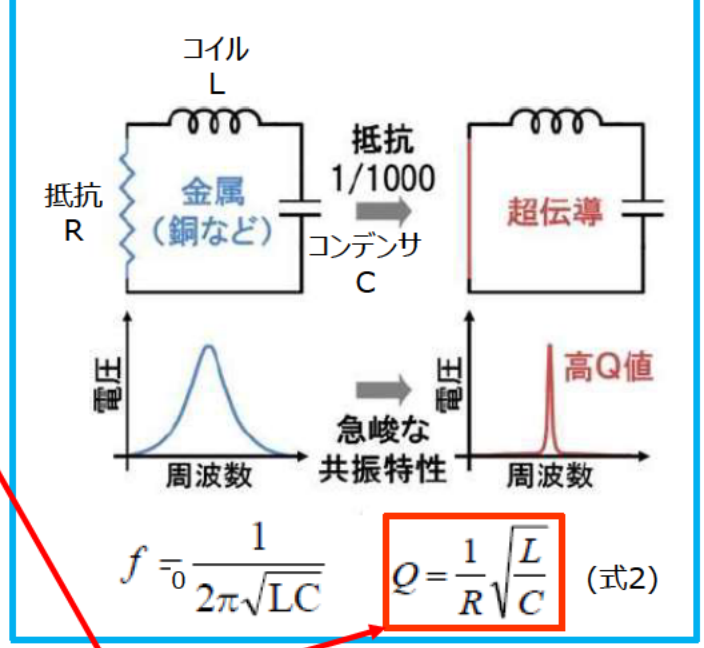


図7-4-19　Q値の計算式例



規制パラメータ：Q値が10000を超える

4.品目の技術動向調査（4）

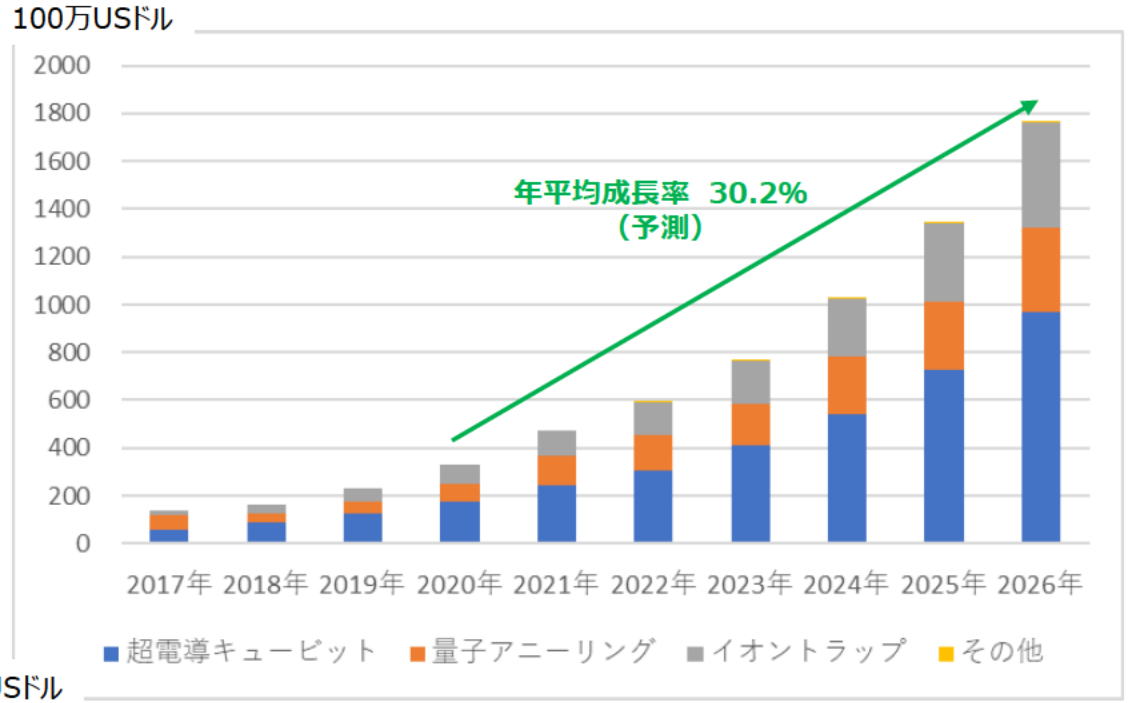
○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（1）

超電導フィルタについては市場規模に関する資料が見当たらなかった。

量子コンピュータの方式別の市場規模を図7-4-20に示す。2019年までが実績、2020年以降が見込み・予測である。記載した方式のうち、超電導キュービットと量子アニーリング方式が超電導を用いた方式である。

図7-4-20　量子コンピュータの市場規模（方式別）



100万USドル

	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年
超電導キュービット	57	91	126	173	245	308	409	544	724	966
量子アニーリング	61	32	48	79	120	145	175	241	289	356
イオントラップ	23	40	55	76	107	135	180	242	325	439
その他	NA	NA	NA	NA	NA	2	2	3	4	4
合計	140	163	229	328	472	589	767	1030	1342	1765

4.品目の技術動向調査（5）

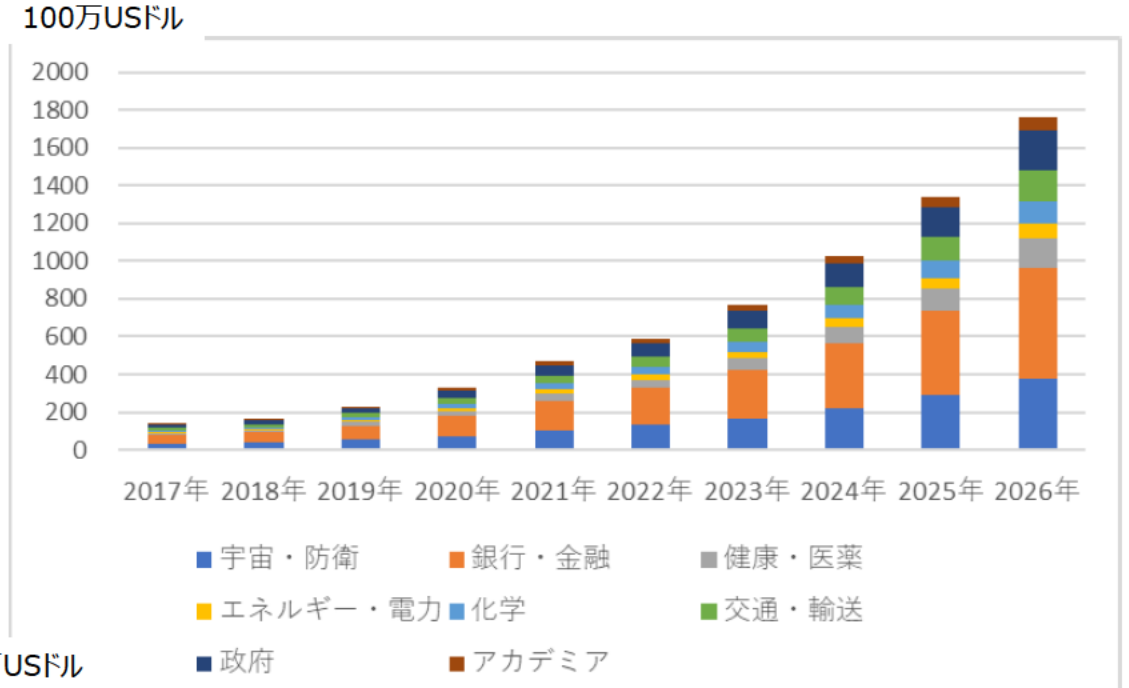
○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

量子コンピュータの用途別の市場規模を図7-4-21に示す。2019年までが実績、2020年以降が見込み・予測である。

銀行・金融の用途が最も多く、宇宙・防衛用途がこれに次ぐが、特に銀行・金融の用途の伸びが大きく、占める割合も大きくなると予想されている。

図7-4-21　量子コンピュータの市場規模（用途別）



100万USドル

	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年
宇宙・防衛	32	37	52	73	105	130	167	223	289	377
銀行・金融	47	55	77	110	157	196	256	343	447	587
健康・医薬	9	11	17	24	36	46	63	86	115	156
エネルギー・電力	5	6	9	13	20	25	33	45	60	79
化学	11	12	17	24	33	41	53	70	90	117
交通・輸送	14	16	22	32	45	56	73	98	127	166
政府	14	17	25	36	53	67	88	120	158	211
アカデミア	8	9	11	16	22	28	33	44	57	73
合計	140	163	229	328	472	589	767	1030	1342	1765

4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（4）超電導材料を用いた装置

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

超電導量子コンピュータを製造している主な企業を表に示す。量子コンピュータのうち超電導ではない量子アニーリング方式を扱う企業は含まれない。既に製造をしている企業では、IBM社やGoogle社のように装置の販売ではなくクラウドサービスなどを目的としている大企業と、D-Wave Systems社のように販売を目的とする新興の小規模企業の2極化の傾向が見られる。

	企業	会社概要
1	International Business Machines（IBM) Corporation（アメリカ）	1911年設立のコンピュータ関連企業。2019年に超電導量子コンピュータを導入し、Q Experienceと名付けた、機械学習、最適化、材料、金融関係のクラウドサービスを提供している。
2	Google LLC（アメリカ）	1998年設立のインターネットの関連サービスと製品の企業。2015年にAlphabet Incorporated（アメリカ）の子会社となった。2019年、同社が独自開発した超電導量子プロセッサSycamoreを用いた量子コンピュータが従来のコンピュータを大幅に上回る性能を発揮したと発表した。同社は2021年、IonQ社（アメリカ）のイオントラップ型量子コンピュータを使ったクラウドコンピューティングサービスの提供を開始した。
3	Intel Corporation（アメリカ）	1968年設立の、半導体素子メーカー。2018年に超電導量子コンピューティングテストチップのTangle lakeを発表し、2019年にはこれを大幅にアップグレードした超電導量子ビット制御チップHorse Ridgeを発表した。
4	Hypres Incorporated（アメリカ）	1983年設立。政府および民間向けに超伝導集積回路（IC）およびシステムを開発および商品化している。フラッグシップ製品は、クライオクーラーにパッケージ化された超電導デジタルおよびミックスドシグナルICで構成されるAdvanced Digital-RF Receiver（ADR）である。またDigital-RFテクノロジーベースを使用して、電磁スペクトル全体にわたるさまざまなアプリケーション向けのセンサーとプロセッサーの多面的なスポンサー付き研究開発（R＆D）活動に取り組んでいる。 同社は、超伝導体および半導体デジタル、高性能アナログおよび混合信号回路を含む、さまざまなカスタムIC設計、テスト、および極低温パッケージングサービスも提供している。 他の注目製品は、液体極低温剤を必要としないターンキーラボテストシステムである統合クライオエレクトロニクステストベッド（ICE-T）である。これは、4K以上で超伝導ICやその他の極低温電子およびフォトニックデバイスのブロードバンド可変温度テスト用の完全な極低温インフラストラクチャを提供する。
5	Rigetti Computing（アメリカ）	IBM社の量子コンピュータ開発に携わっていた研究者により2013年設立。量子コンピュータとその超電導量子プロセッサを製造している。
6	Quantum Circuits Incorporated（アメリカ）	2015年設立。超電導回路を用いた量子コンピュータの開発、製造、販売を目指している企業。
7	D-Wave Systems Incorporated（カナダ）	1999年設立。2011年、世界初の商用量子コンピュータと謳って量子アニーリング法のD-Wave Oneを発表した。このコンピュータには超電導磁束量子ビットを有する超電導集積回路が使われていると発表されている。顧客にはLockheed Martin社、Google社、Volkswagen社、デンソー社などの大企業やNASA Ames研究所などが含まれる。同社は2021年10月、量子ゲート方式のコンピュータを開発ロードマップに載せたと発表した。
8	Anyon Systems Incorporated（カナダ）	2014年設立。超電導量子処理装置（QPU）、量子制御電子機器、およびQPUをホストする超低温極低温システムを設計および製造している。
9	富士通株式会社（日本）	1935年設立の総合エレクトロニクスメーカーであり、コンピュータプラットフォーム、ソフトウェア、ネットワーク機器、電子デバイス・半導体などの開発、製造、販売を行っている。 理化学研究所と共同で、超電導回路を使った量子コンピュータの実用化に向けた研究開発を行っている。
10	日本電機株式会社(NEC)（日本）	1899年創業の電気メーカー。1999年に世界で初めて超電導量子ビットの動作を確認して以来、世界初の量子デバイス開発などに成功している。現在、量子アニーリング方式の量子コンピュータの開発を行っている。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（5）
超電導電磁石

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

【超電導体の性質】

超電導体（あるいは超伝導体）とは、材料ごとに固有の一定の温度（臨界温度T_C）以下の温度になると急激に電気抵抗が0になる材料である。超電導体はまた、外部磁場を超電導体内部から完全に排除する完全反磁性（マイスナー効果）の性質を有する（図7-5-1）。なお経済産業省の「輸出貿易管理令の運用について」においては超電導を、「すべての電気抵抗を消失することができる金属、合金又は化合物が、無限の導電率に達したときジュール熱の発生なしに大電流を流すことが可能なことをいう。」という表現で定義している。

【高温超電導体開発の歴史】

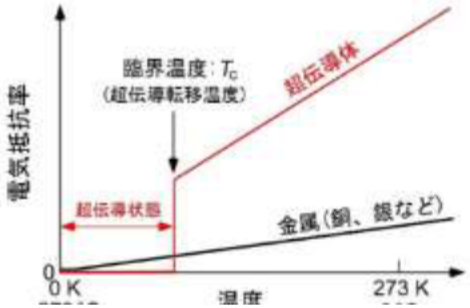
現在知られている超電導材料のほとんどは臨界温度が非常に低いため、常圧で室温に近い臨界温度を有し、加工等も容易な超電導材料の探索が続けられている（図7-5-2）。

【第1種超電導体と第2種超電導体】

超電導には温度のほか、電流密度、磁場のそれぞれに臨界値（臨界電流密度J_C、臨界磁場H_C）がある。また超電導体は臨界磁場を超えると直ちに超電導状態が壊れて常電導状態になる第1種超電導体と、磁場が一定の強さを超えると徐々に磁束が侵入して超電導状態が徐々に壊れていく第2種超電導体に分類される。第2種超電導体の場合は、超電導状態が壊れ始める磁場の強さを下部臨界磁場（H_{C1}）、超電導状態が完全に壊れる磁場の強さを上部臨界磁場（H_{C2}）という。

図7-5-1　超電導の主な特徴

①臨界温度以下で急激に電気抵抗が0になる



②外部磁場を超伝導体内部から排除（マイスナー効果）

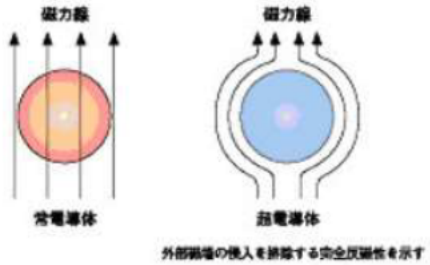
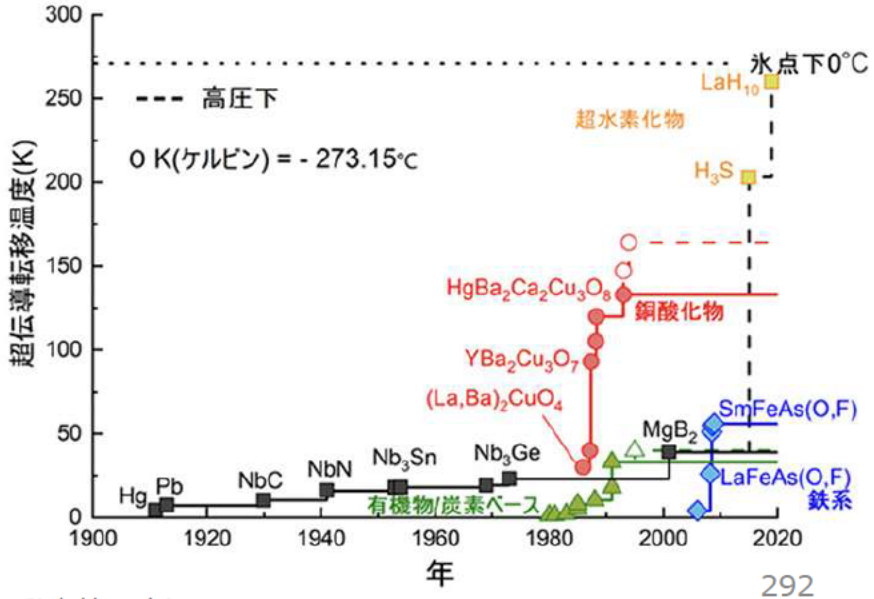


図7-5-2　高温超電導材料の探索の歴史



1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

【電磁石とバルク磁石】
超電導材料を用いた磁石には、電磁石とバルク磁石の２種類がある。
電磁石の原理について、代表的な形状であるソレノイドコイルの例で図7-5-3に示す。直線状の電線に電流を流すと、電線に対し同心円状に磁束が発生する。電線がソレノイドコイル状の場合はコイルの周囲に図のような磁束が発生する。電流を通すことにより発生するこのような磁束を利用するのが電磁石である。
常電導の電磁石では、強い磁場を発生させるために大電流を流しても、導線の発熱により電気抵抗が上がって流せる電流の大きさが頭打ちになるが、電気抵抗がゼロである超電導体では、臨界電流密度、臨界磁場を超えない限りこのような制約がないため、常電導電磁石よりも強い磁場を発生させることができる。
コイルには、発生させたい磁界の形状に応じて、ソレノイドコイルの他、トロイダルコイル、ヘリカルコイルなどがある（図7-5-4）。

図7-5-3　電流と磁束の関係

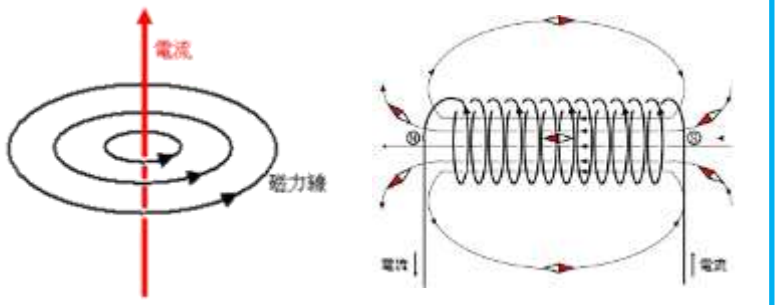
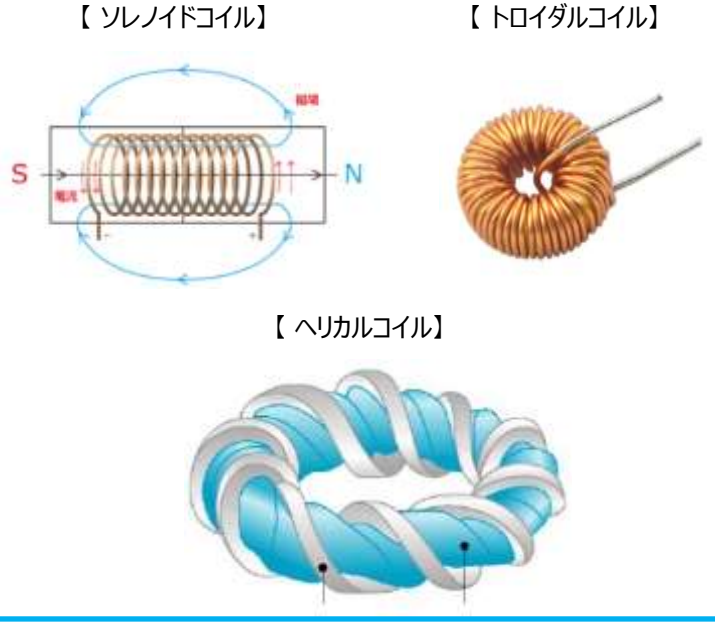


図7-5-4　コイルの形状の例



1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

【線材】
超電導電磁石の実用化には、磁束と電流の相互作用によって磁石のコイルを外側に拡げる向きに発生するフープ応力（図7-5-5）に耐える強度の線材や、超電導体の転移温度以下の温度を保つ冷却システムが必要である。現在は超電導体として加工性の良好なNbTiや、NbTiよりも高価で加工性は劣るが超電導臨界温度の高いNb_3Snを用い、液体ヘリウムを冷却材とするシステムが主として用いられている。
【冷却器】
冷却については図7-5-6で示した耐久性に優れたGM（Gifford-McMahon）冷凍機を用いたシステムの登場により、冷却システムが小型化するとともに保守の負荷が大幅に軽減された。さらに液体ヘリウムを用いず冷凍機で直接冷却が可能な高い転移温度を持つイットリウム系超電導体やビスマス系超電導体を用いた超電導磁石の開発も進められている。
超電導状態の閉じた導電体回路では電流が減衰せずに流れ続ける。これは超電導電磁石の閉じたコイルにも当てはまる。このため、超電導電磁石コイルに電流を流し続けてコイル内に発生する磁気の形で電力を保存する、エネルギー保存装置としても超電導電磁石が用いられる。電流から磁束が発生する際にはエネルギー変換の損失が無いため、高効率でエネルギーを貯蔵することができる。

図7-5-5　フープ応力

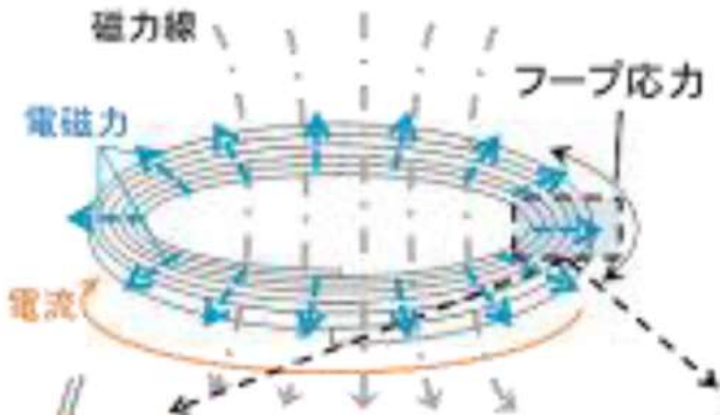
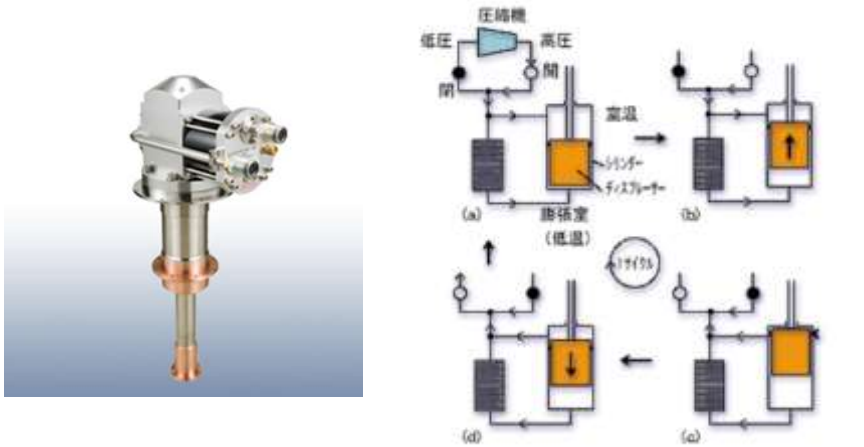


図7-5-6　G-Mサイクルとこれを利用したGM冷凍機



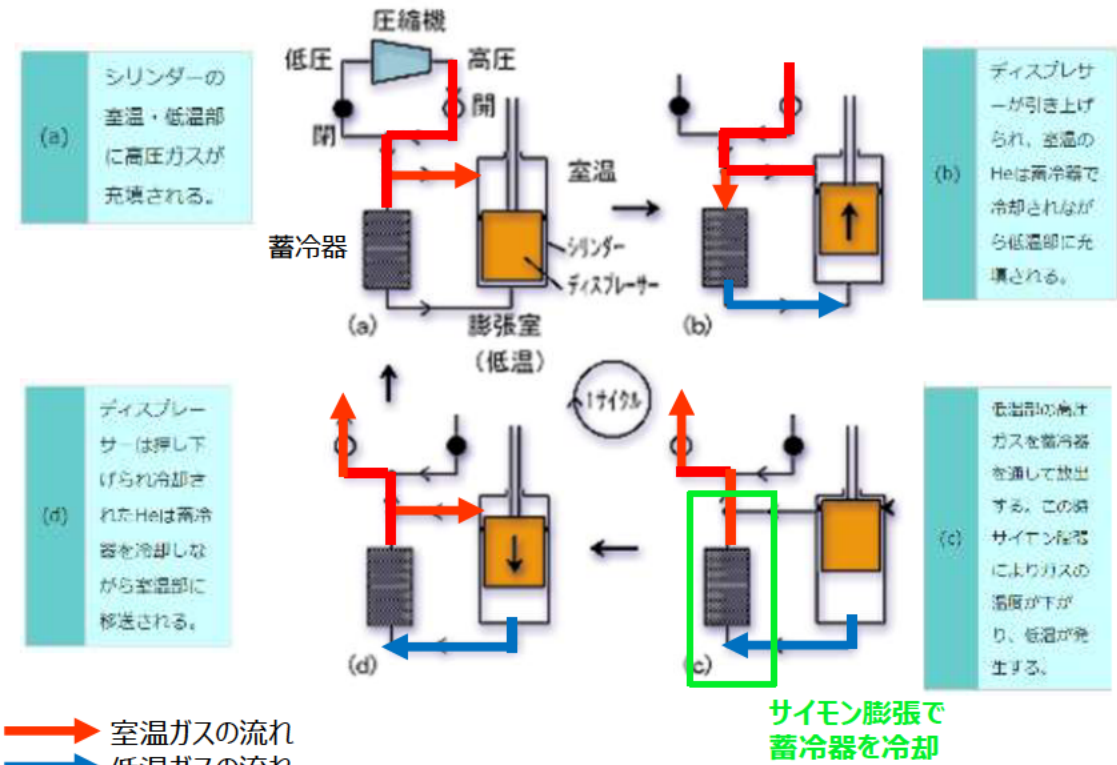
1.対象品目の概要調査（4）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

【GM冷凍機】

G-M（Gifford-McMahon）サイクルを利用したGM冷凍機は、一般の冷蔵庫などと同様に、気体が外部からの熱の出入りが無い状態で膨張する（断熱膨張）際に温度が低下する現象を利用したものである。ただし一般の冷蔵庫と異なるのは、断熱膨張をピストンなどの機械力で行うのではなく、高圧の気体がより圧力の低い部分へ流出する際に自然に膨張する（サイモン膨張）ことで行っている点である。シリンダーの上部と下部は蓄冷機を経由して常に同じ圧力に保たれており、機械的負荷が小さい。また高圧弁と低圧弁は室温部に配置されている。これらによって機械的振動が少なく、耐久性の高い冷却器が実現できる。図7-5-7にG-Mサイクルを利用したGM冷凍機の動作原理を示す。

図7-5-7　G-Mサイクルとこれを利用したGM冷凍機

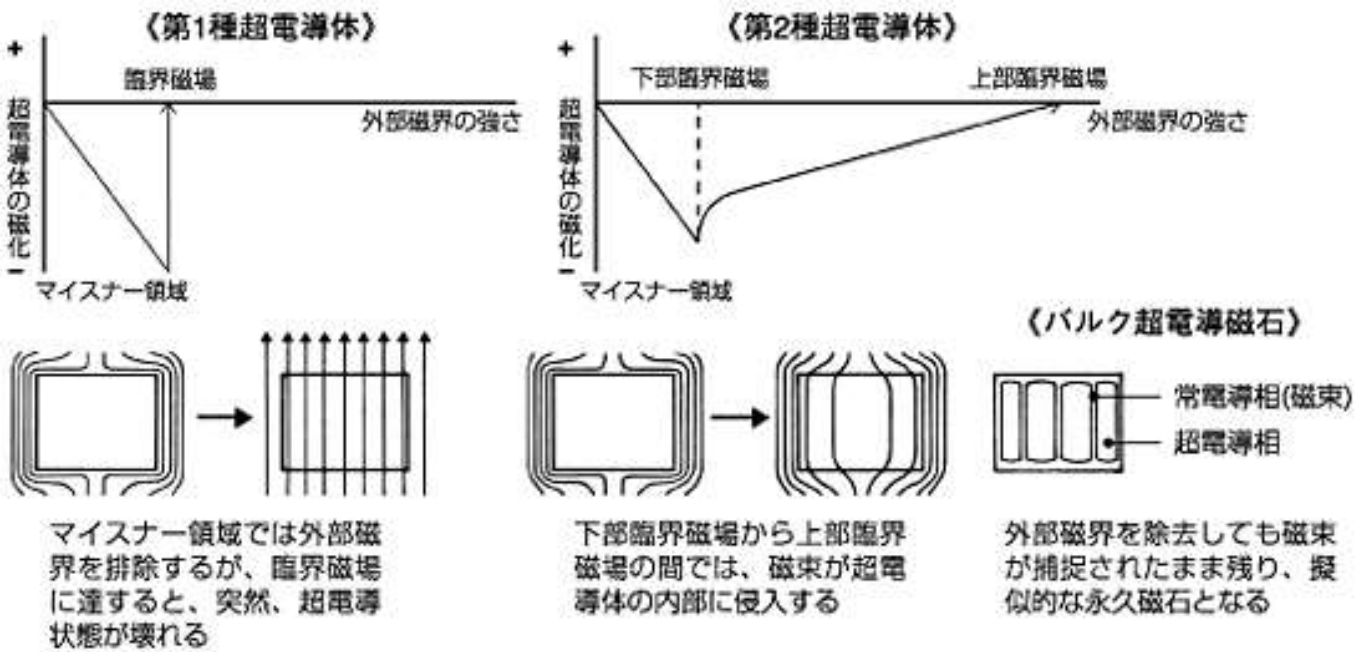


1.対象品目の概要調査（5）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

【超電導バルク磁石】
　輸出令7項(5)の規制対象外ではあるが、規制対象の超電導電磁石の関連の技術に超電導バルク磁石がある。
　超電導バルク磁石は、超電導電磁石のように線状の超電導材料のコイルに通電して磁界を発生させる必要がなく、塊状の超電導材料を臨界温度以下で外部磁場下において着磁することにより、磁石として作用する。
　超伝導バルク磁石は比較的高い温度で超電導状態となるが電線状などへの加工が困難な高温超電導物質の発見とともに開発・応用が進んできた。超電導電磁石と同様に第2種超電導体が用いられ、下部臨界温度と上部臨界温度の間で超電導体内部に侵入した磁束が捕捉されたまま残るため、永久磁石としての性質を示す（図7-5-8）。

図7-5-8　第1種超電導体と第2種超電導体の違いと第2種超電導体の着磁によるバルク磁石の生成



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（1）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令や輸出貿易管理令の運用についての解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(5)	6		七	七　一秒を要しないで磁界を完全に形成させ、又は消失させるように設計した超電導電磁石（ソレノイドコイル形のものを含む。）であって、次のイからハまでのすべてに該当するもの 貨物等省令第６条に掲げる貨物 次のいずれかに該当するものを除く。 イ　医療用に設計された装置 ロ　医療用に設計された装置に組み込まれたもの 超電導電磁石（２の項の中欄に掲げるものを除く。）	１秒を要しないで磁界を完全に形成させ、又は消失させるように設計

Wassenaar規制番号 3桁	細番		Wassenaar規制文言（全文）
3A1	e	3	3. "Superconductive" electromagnets and solenoids, specially designed to be fully charged or discharged in less than one second and having all of the following: Note 3.A.1.e.3. does not apply to "superconductive" electromagnets or solenoids specially designed for Magnetic Resonance Imaging (MRI) medical equipment.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（2）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令や輸出貿易管理令の運用についての解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(5)	6		七	超電導 すべての電気抵抗を消失することができる金属、合金又は化合物が、無限の導電率に達したときジュール熱の発生なしに大電流を流すことが可能なことをいう。	

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A1	e	3	"superconductive" Refers to materials, (i.e., metals, alloys or compounds) which can lose all electrical resistance (i.e., which can attain infinite electrical conductivity and carry very large electrical currents without Joule heating). Technical Note The "superconductive" state of a material is individually characterised by a "critical temperature", a critical magnetic field, which is a function of temperature, and a critical current density which is, however, a function of both magnetic field and temperature. "critical temperature" (Sometimes referred to as the transition temperature) of a specific "superconductive" material is the temperature at which the material loses all resistance to the flow of direct electrical current.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（3）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令や輸出貿易管理令の運用についての解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(5)	6		七	イ　減磁の際に最初の一秒間で放出するエネルギーが一〇キロジュールを超えるもの ロ　コイルの内径が二五〇ミリメートルを超えるもの ハ　定格最大電流密度が三〇〇アンペア毎平方ミリメートルを超えるもの又は定格磁束密度が八テスラを超えるもの 最大電流密度 コイルの巻き数に最大電流を乗じた値をコイルの断面積で除した値をいう。	減磁の際に最初の１秒間で放出するエネルギーが10キロジュールを超える コイルの内径が250ミリメートルを超える 定格最大電流密度が300アンペア毎平方ミリメートルを超えるもの又は定格磁束密度が８テスラを超える

Wassenaar規制番号					Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番				
3A1	e	3	a b c		a. Energy delivered during the discharge exceeding 10 kJ in the first second; b. Inner diameter of the current carrying windings of more than 250 mm; and c. Rated for a magnetic induction of more than 8 T or "overall current density" in the winding of more than 300 A/mm2; "overall current density" The total number of ampere-turns in the coil (i.e., the sum of the number of turns multiplied by the maximum current carried by each turn) divided by the total cross-section of the coil (comprising the superconducting filaments, the metallic matrix in which the superconducting filaments are embedded, the encapsulating material, any cooling channels, etc.).

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（4）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

超電導技術に関連する規制としては、輸出令第7項(4)、(5)の他に、輸出令第2項(34)と第5項(8)があるので、輸出令第2項(34)と第5項(8)について参考に挙げる。

第2項(34)はWassenaar Arrangementによる規制に、第5項(8)はNuclear Suppliers Groupによる規制に対応している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）
	条	項	号	
2(34)	1		三十九	三十九　ソレノイドコイル形の超電導電磁石であって、次のイからニまでのすべてに該当するもの（医療用の磁気共鳴イメージング装置に用いるように設計したものを除く。） イ　磁束密度が２テスラを超えるもの ロ　コイルの長さを内径で除した値が２を超えるもの ハ　コイルの内径が３００ミリメートルを超えるもの ニ　コイルの軸の中心部分を中心として内径の３５パーセントを半径とする円であって、コイルの軸に垂直なものの範囲において、磁界の均一性が１パーセント未満のもの ソレノイドコイル形 導線を同一軸に沿って均一に何回も巻いたコイルの形状を有するものをいう。 内径の35パーセントを半径とする円 コイル断面の円の面積の50パーセントの面積を有する円となる。

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（5）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

超電導技術に関連する規制としては、輸出令第7項(4)、(5)の他に、輸出令第2項(34)と第5項(8)があるので、輸出令第2項(34)と第5項(8)について参考に挙げる。

第2項(34)はWassenaar Arrangementによる規制に、第5項(8)はNuclear Suppliers Groupによる規制に対応している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）
	条	項	号	
5(8)	4		十	十　超電導材料であって、次のいずれかに該当するもの（長さが100メートルを超えるもの又は全重量が100グラムを超えるものに限る。） イ　フィラメントを有するものであって、ニオブチタンのフィラメントを含むもののうち、次の（一）及び（二）に該当するもの フィラメント ワイヤー、シリンダー、フィルム、テープ、リボンの形状のものを含む。 （一）　フィラメントが銅又は銅合金以外のマトリックスに埋め込まれたもの （二）　フィラメントの断面積が100万分の28平方ミリメートル未満のもの ロ　ニオブチタン以外の超電導フィラメントからなる超電導材料であって、次の（一）から（三）までのすべてに該当するもの （一）　磁界をかけない場合に臨界温度が零下263.31度超のもの 臨界温度 超電導物質が直流電流に対するすべての電気抵抗を消失する温度をいう。 （二）　削除 （三）　超電導材料の縦軸に対してあらゆる方向から垂直に12テスラの磁束密度の磁界をかけた場合に、零下268.96度の温度で超電導状態を保つことができるものであって、臨界電流密度がすべての横断面で1,750アンペア毎平方ミリメートルを超えるものミリメートル未満のもの ハ　超電導フィラメントからなる超電導材料であって、零下158.16度の温度を超えて超電導性を保つことができるもの

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（１）

臨界温度が低いという課題はあるものの、小型で保守も容易なGM冷凍機（Gifford-McMahon冷凍機）を用いたシステム（図7-5-3）の開発などもあり、超電導材料は様々な用途への利用が拡がっている。表7-5-1に実用化済みおよび開発中の超電導材料の用途を示す。超電導技術の用途は、①電磁石・エネルギー貯蔵、②スイッチング素子・周波数分離回路、③その他に分類することができる。

表7-5-1　超電導技術の用途

分野	具体的な製品用途
情報・通信分野	超電導コンピュータ
	高速大容量通信システム/ルーター
	AD変換機
	送信/受信フィルタ
研究・開発・計測機器分野	核磁気共鳴（NMR）装置
	赤外線検出器
	宇宙線検出器
診断・医療分野	核磁気共鳴画像（MRI）検査機
	磁気誘導カテーテル
	磁気標的ドラッグ・デリバリー・システム
	脳磁計
	心磁計
エネルギー・電力分野	発電機
	変圧器
	送電ケーブル
	核融合装置
	大型加速器
	エネルギー貯蔵装置（SMES）
	フライホイール
	限流器

分野	具体的な製品用途
産業・輸送分野	磁気浮上式鉄道用マグネット
	モータ
	単結晶引上装置
	廃水磁気分離装置
	電圧標準
	非破壊検査装置
	半導体検査装置
	地殻中金属資源探査装置
	マグネトロンスパッタ装置
軍事分野	電磁パルス発生装置用エネルギー源
	レールガン・クエンチガン
	プラズマエンジン
	非接触磁気軸受

①電磁石・エネルギー貯蔵としての用途
②電子素子・周波数分離回路としての用途
③その他の用途
赤字は調査時点で検討・開発段階と考えられるもの

3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（2）

【研究・開発・計測器分野、診断・医療分野】

既に表7-5-1に示した通り、超電導材料は①研究・開発・計測機器分野、②診断・医療分野、③エネルギー・電力分野、④産業・輸送分野のそれぞれで、利用中あるいは実用化検討中である。

研究・開発・計測機器分野では、分子の構造の解析等に用いる核磁気共鳴（NMR）スペクトル装置や宇宙線検出器が既に実用化されている（図7-5-9）。

診断・医療分野では体内の状態を断面上に撮影できる核磁気共鳴画像（MRI）装置や陽子線あるいは重粒子線治療のための粒子線照射装置が実用化されている。また、カテーテルを磁力で誘導する磁気誘導カテーテルや、磁性を帯びた薬剤を磁力で患部に誘導する磁気標的ドラッグデリバリーシステムについても超電導電磁石の利用が検討されている（図7-5-10）。

図7-5-9　研究・開発・計測機器分野での超電導磁石利用例

【核磁気共鳴スペクトル（NMR）装置】



【宇宙線検出器】

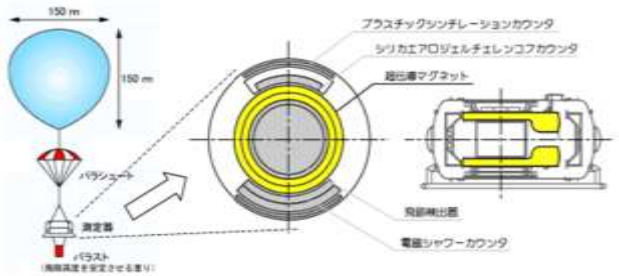


図7-5-10　診断・医療分野での超電導磁石利用例

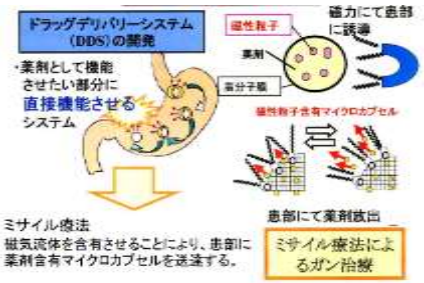
【核磁気共鳴画像（MRI）装置】



【重粒子線照射装置】



【磁気標的ドラッグデリバリーシステム】



【磁気誘導カテーテルナビゲーションシステム】



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

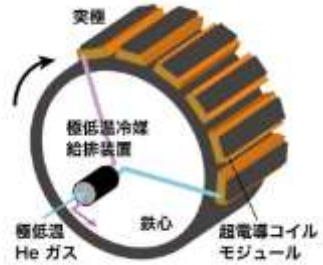
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（3）

【エネルギー・電力分野】

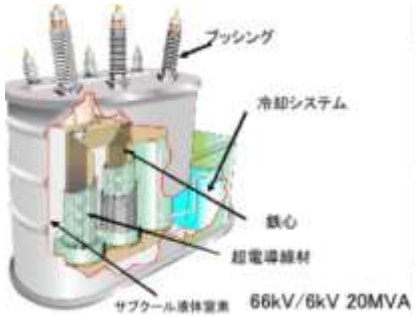
エネルギー・電力分野では、粒子加速器で既に超電導電磁石が使われている。その他、発電機、変圧器、電力貯蔵装置、フライホイールでも超電導電磁石の利用が検討されており、さらに、核融合発電実用化のための実験炉でもプラズマを閉じ込めるための磁場を形成するために超電導電磁石が用いられている。（図7-5-11）。

図7-5-11　エネルギー・電力分野での超電導磁石利用例

【発電機用回転子】

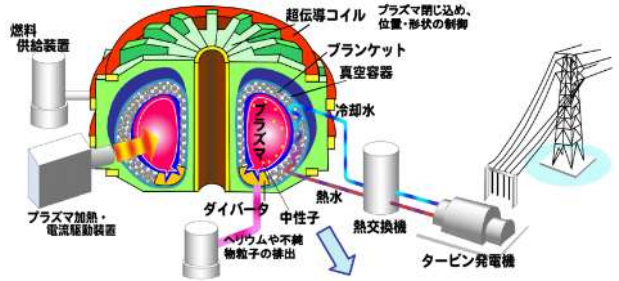


【変圧機】





【核融合装置】

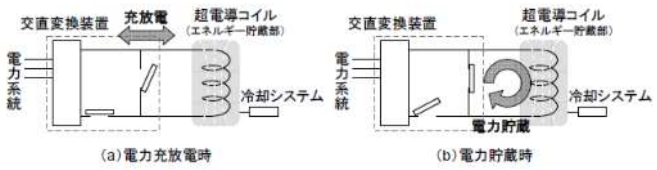


【大型加速器】

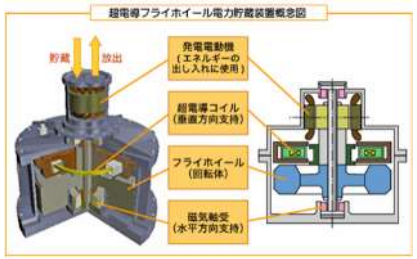




【エネルギー貯蔵装置】



【フライホイール】



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

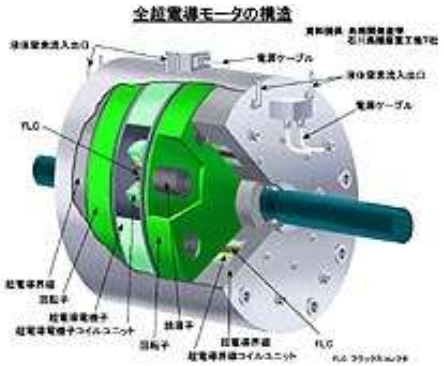
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（4）

【産業・輸送分野】

産業・輸送分野では、回転部分である回転子と回転子を囲んで磁界を発生させる固定子からなる一般的な構造のモーターや、リニアモーターを用いた磁気浮上方式鉄道、電動で推進する船で超電導電磁石の利用が検討されている。また廃水から磁性を有する不純物を除去する廃水磁気分離装置では既に超電導電磁石が使われている。半導体用の高純度シリコン単結晶をシリコン溶融液から作る単結晶引上装置でも導電体のシリコン溶液の流れを制御する磁場をかけるために使われている。（図7-5-12）。

図7-5-12　産業・輸送分野での超電導磁石利用例

【モータと電動航空機】

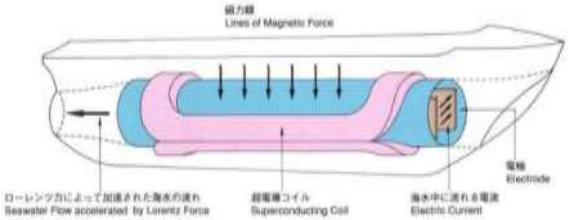




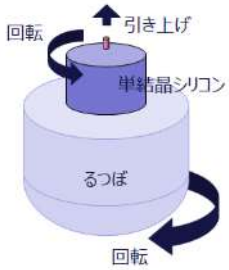
【磁気浮上方式鉄道用マグネット】

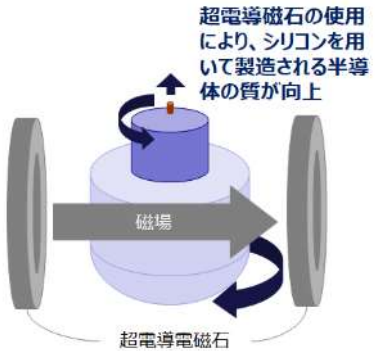


【電動推進船】



【単結晶引上装置】





【廃水磁気分離装置】



3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（5）

【軍事用途】

軍事用途へ超電導電磁石を利用する際の超電導電磁石の役割としては、①高エネルギーを蓄積し瞬時に放出する、②強い電磁場で物体に運動エネルギーを与える、③プラズマを制御する、④物体同士の接触による接触抵抗・摩擦を防ぐ、という4つに大別できる。

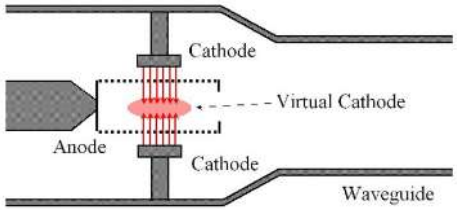
①高エネルギーの蓄積と瞬時の放出による利用（図7-5-13）

民生用・軍事用を問わず、社会のインフラストラクチャーが電気・電子機器によって支えられている現在、一瞬でこれらの機器を破壊することのできる電磁パルス（EMP）攻撃は戦闘における有効な手段の一つとして考えられている。電磁パルスを発生させる代表的な方法は核爆弾の爆発であるが、核爆発によらず電磁パルスを発生させる方法も既に実用化されている。大電力電磁パルスを発生させる機器の例としてバーチャルカソードオシレータ（バーカトール）が挙げられる。このような電磁パルス発生機器には蓄積されたエネルギーを瞬間的に取り出す手段が必要となるが、そのようなエネルギー蓄積・放出方法の一つとして超電導コイルがある。

大きなエネルギーを瞬間的に取り出せるという超電導コイルの機能は、電磁力により弾丸などの飛翔体を発射する電磁式発射（EML：Electromagnetic launch）技術のエネルギー源として、レールガンへの利用も研究されている。

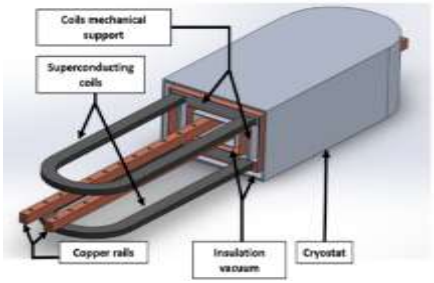
図7-5-13　高エネルギーを蓄積し瞬時に放出するための超電導磁石利用例

【バーカトールの原理とUAV妨害用車載システム】

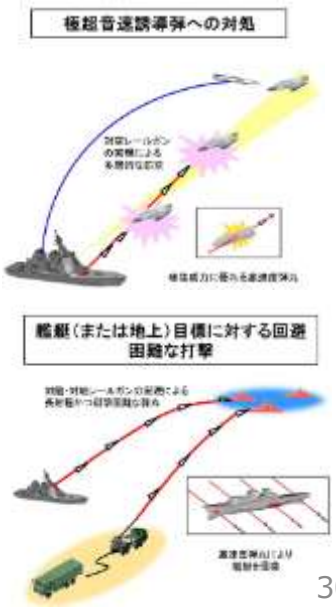




【超電導エネルギー貯蔵システムを用いたレールガン】



【レールガンの運用構想図】



3.品目の主たる用途の調査分析（6）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（6）

②強い電磁場で物体に運動エネルギーを与える用途（図7-5-14）

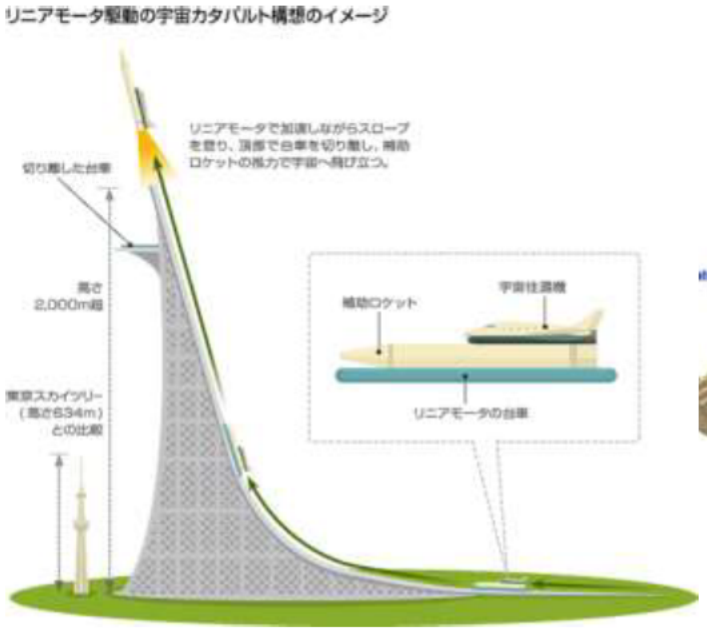
前頁で電磁式発射（EML：Electromagnetic launch）技術のエネルギー源としての超電導電磁石を取り上げたが、超電導電磁石はEML技術において飛翔体を加速する手段としても使われる。リニアモーターとして先に取り上げた鉄道への利用の他、軍事用途で弾丸などの飛翔体を発射する検討が行われてきた。

リニアモーターを使う技術の例としては、宇宙ロケットに初速を与えるための宇宙カタパルトが挙げられる。この構想では、物体に運動エネルギーを与える役割だけでなく、短時間に大電力を供給するために超電導コイルを利用した蓄電システムの利用も考えられているという。

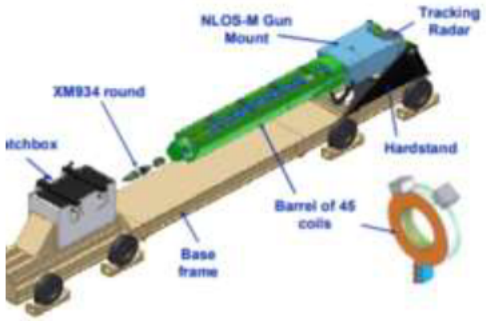
リニアモーターとは異なる方式として、クエンチガンやコイルガンが提案されている。これらは電磁石コイルの形成する電磁場によりコイル内部の弾体に運動エネルギーを与えて射出するものである。

図7-5-14　強い電磁場で物体に運動エネルギーを与えるための超電導磁石利用例

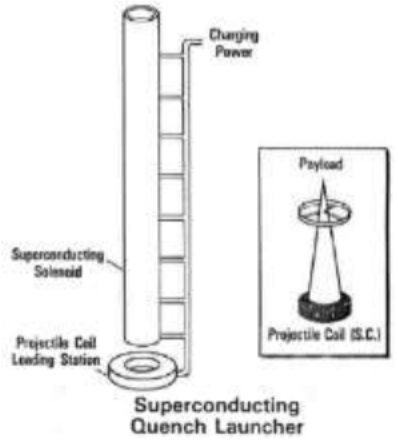
【 宇宙カタパルト】



【コイルガンの模式図】



【 クエンチガンの模式図】



3.品目の主たる用途の調査分析（7）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

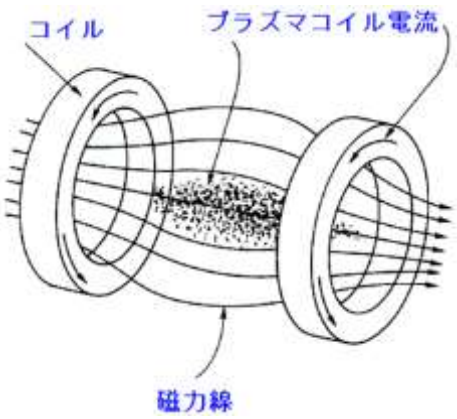
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（7）

③プラズマを制御する用途（図7-5-15）

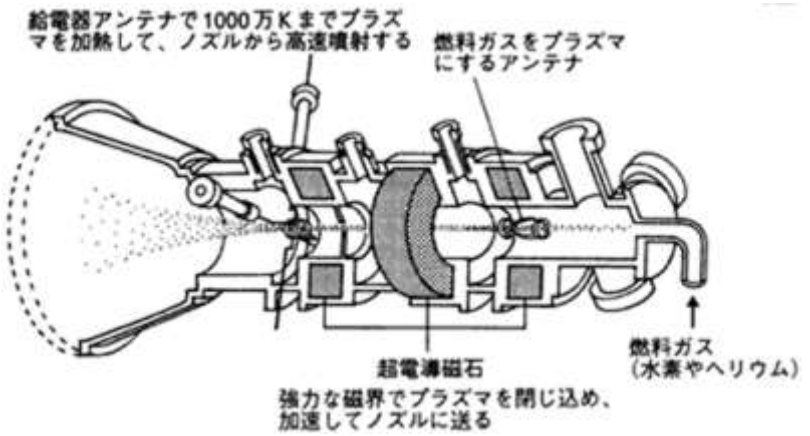
核融合反応の研究などで使う高温高圧のプラズマは固体材料では封じ込められないため、磁場やレーザー光などで封じ込める。強力な磁場を発生させるために超電導磁石が用いられるが、そのような装置の一つであるミラー型磁場装置は構造が単純であるため、プラズマを噴射して推進力を得るプラズマロケットへの利用が研究されている。アメリカ航空宇宙局（NASA）の比推力可変型プラズマ推進機（VASIMR）は有人火星旅行を目指して開発されているが、この技術は軍事用ロケットへの適用も考えられる。

図7-5-15　プラズマを制御するための超電導磁石利用例

【 ミラー型磁場装置の模式図】



【比推力可変型プラズマ推進機】



3.品目の主たる用途の調査分析（8）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

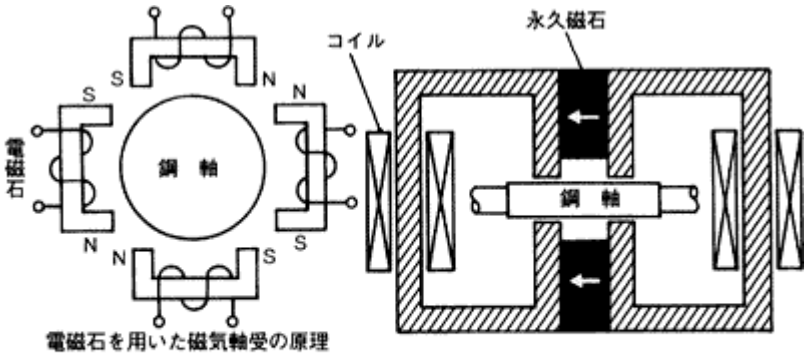
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（8）

④物体同士の接触による接触抵抗・摩擦を防ぐ用途（図7-5-16）

電磁石や永久磁石による磁界の作用によって回転体とそれを支える軸受が接触しないようにすれば、回転体と軸受の摩擦によるエネルギーの消費や部材の摩耗を防ぐことができる。先に図7-5-7で示したフライホイールはその一例である。航空機、ロケット、人工衛星、潜水艦、ロボットなどの姿勢制御に使われるジャイロセンサーでも非接触磁気軸受は使われており、超電導電磁石の利用も考えられる。

図7-5-16　物体同士の接触による接触抵抗・摩擦を防ぐための超電導磁石利用例

【非接触磁気軸受】

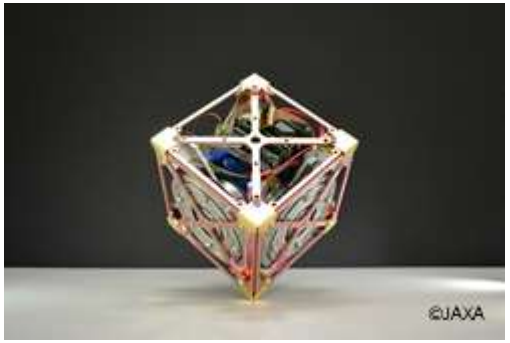


電磁石を用いた磁気軸受の原理

電磁石が鋼軸を周囲から吸引するため非接触な回転が維持される。ただし、ギャップ長や回転速度を検出して、電磁石に流す電流をフィードバック制御する必要がある。

永久磁石をバイアス磁界として利用して効率化を図った磁気軸受。

【 姿勢制御用ジャイロセンサー】



3.品目の主たる用途の調査分析（9）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

本項には、用途に対する規制は無い。

4.品目の技術動向調査（1）

規制パラメータ　輸出令第7項(5)
七　一秒を要しないで磁界を完全に形成させ、又は消失させるように設計した超電導電磁石（ソレノイドコイル形のものを含む。）であって、次のイからハまでのすべてに該当するもの
イ　減磁の際に最初の一秒間で放出するエネルギーが一〇キロジュールを超えるもの
ロ　コイルの内径が二五〇ミリメートルを超えるもの
ハ　定格最大電流密度が三〇〇アンペア毎平方ミリメートルを超えるもの又は定格磁束密度が八テスラを超えるもの

○輸出令7項（5）超電導電磁石

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（1）

輸出令第7項(5)はコイル状の超電導電磁石のうちの一定のパラメータのものを規制している。従ってバルク磁石は規制対象外である。図7-5-8から図7-5-15に挙げたものでは、ジャイロセンサーのうちのバルク磁石を用いたものは規制対象外となる。

さらに、超電導電磁石の中でも短時間に大きなエネルギーを放出できるもののみが規制対象となっている。これはプラズマ推進機やジャイロセンサーに使われる超電導電磁石では必要とされない性能であり、規制対象となる高い性能を持つ超電導電磁石が使われることは考えにくい。従ってプラズマ推進機やジャイロセンサー向けの超電導電磁石は規制対象外と考えられる。

以上から、輸出令第7項(5)で規制対象となる超伝導電磁石の用途例は表7-5-2のようになる。

表7-5-2　規制対象となる超電導電磁石の用途例

種類	用途例	
電磁石	電磁パルス発生装置	規制対象
	レールガン	
	飛行体カタパルト	
	クエンチガン	
	コイルガン	
	プラズマ推進機	
	ジャイロセンサー	
バルク磁石	ジャイロセンサー	

4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（2）

貨物等省令第6条第七号イでは、「減磁の際に最初の1秒間で放出するエネルギーが10kJを超えるもの」を規制対象としている。このような性能を必要とする技術の一つに電磁式発射（EML：Electromagnetic launch）技術が考えられる。

短時間にエネルギーを取り出すエネルギー源としてリチウムイオン電池を用いた軍事用EML技術の研究では、1秒で約5kJのエネルギーを取り出した例が報告されている（図7-5-17）。他に工場等の瞬停対策や電圧安定用のSMES（超電導電力貯蔵装置）も短時間に大エネルギーを供給する能力が求められる。図7-5-18にSMESのエネルギー供給の能力を示す。赤い矢印はイに相当する範囲であるが、エネルギー放出開始の瞬間から最大出力で放出したと仮定した場合である。

1秒間で放出する10kJ超のエネルギーに関して、10kJのエネルギーを物体の質量と速度の関係で示すと図7-5-19のようになる。例えば、10kgの物体の秒速44.7m（時速161km）のエネルギーに相当する。

規制パラメータ　輸出令第7項(5)

七　一秒を要しないで磁界を完全に形成させ、又は消失させるように設計した超電導電磁石（ソレノイドコイル形のものを含む。）であって、次のイからハまでのすべてに該当するもの

イ　減磁の際に最初の一秒間で放出するエネルギーが一〇キロジュールを超えるもの

ロ　コイルの内径が二五〇ミリメートルを超えるもの

ハ　定格最大電流密度が三〇〇アンペア毎平方ミリメートルを超えるもの又は定格磁束密度が八テスラを超えるもの

イの規制パラメータ
減磁の際に最初の1秒間で放出するエネルギーが10kJを超える

図7-5-17　リチウムイオン電池でのエネルギー放出性能の例

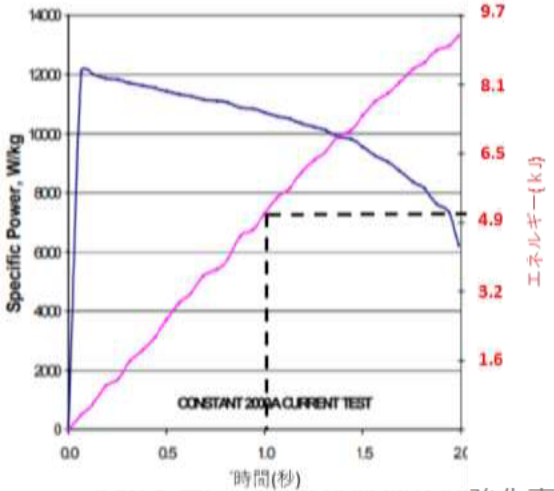


図7-5-18　1秒間で10kJのエネルギーを放出するSMES

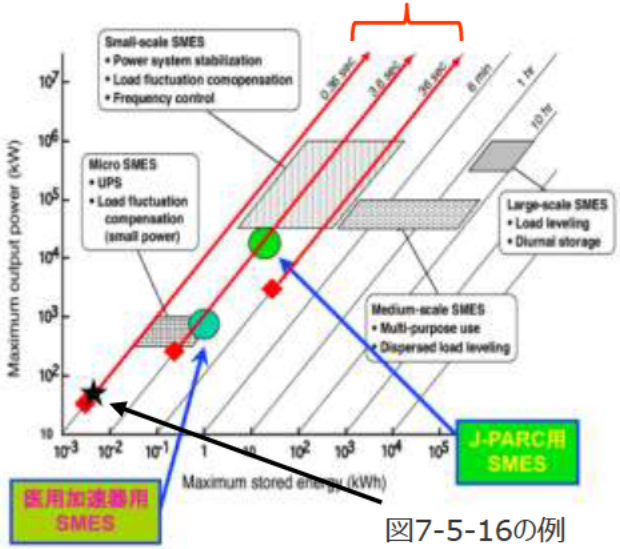
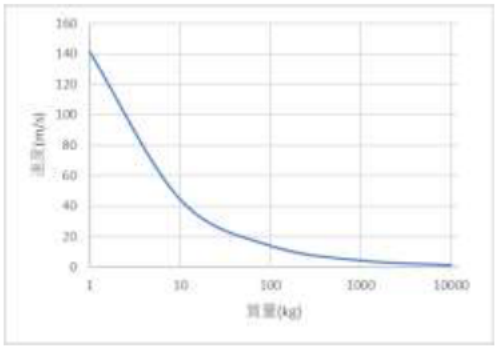


図7-5-16の例

図7-5-19　10kJのエネルギーに相当する質量と速度の関係



4.品目の技術動向調査（3）

規制パラメータ　輸出令第7項(5)
七　一秒を要しないで磁界を完全に形成させ、又は消失させるように設計した超電導電磁石（ソレノイドコイル形のものを含む。）であって、次のイからハまでのすべてに該当するもの
イ　減磁の際に最初の一秒間で放出するエネルギーが一〇キロジュールを超えるもの
ロ　コイルの内径が二五〇ミリメートルを超えるもの
ハ　定格最大電流密度が三〇〇アンペア毎平方ミリメートルを超えるもの又は定格磁束密度が八テスラを超えるもの

○輸出令7項（5）超電導電磁石

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（3）

超電導電磁石の定格最大電流密度や定格磁束密度は個々の電磁石の設計に依存する要素も多く、一概に定量的な議論をすることは困難なため、ここでは超電導材料についての例を示す。

既に述べたとおり超電導材料には固有の臨界磁場や臨界電流密度が存在する。超電導電磁石は流す電流を増加すれば発生する磁束密度は大きくなるが、磁場と電流密度のいずれかが臨界値に達したところで超電導状態が失われるため、電流密度や磁束密度には上限値が存在する。実際には臨界磁場は超電導体の物質定数であり、製造プロセスにほとんど依存しないのに対し、臨界電流密度は製造プロセスの影響を大きく受ける。参考資料として、現在線材として広く使われているNbTiやNb_3Sn、および高温超伝導材料と呼ばれる材料の臨界電流と磁束密度の関係を図7-5-20に示す。また図7-5-21には用途に応じた超電導電磁石の磁場・臨界電流密度に求められる性能の例を示す。

図7-5-20　（参考）超電導材料の磁場と臨界電流密度の関係

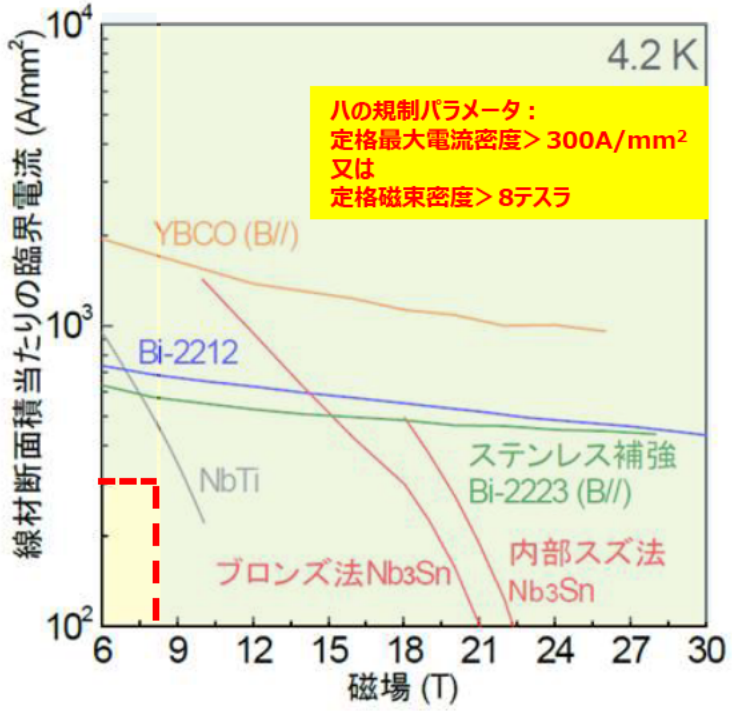
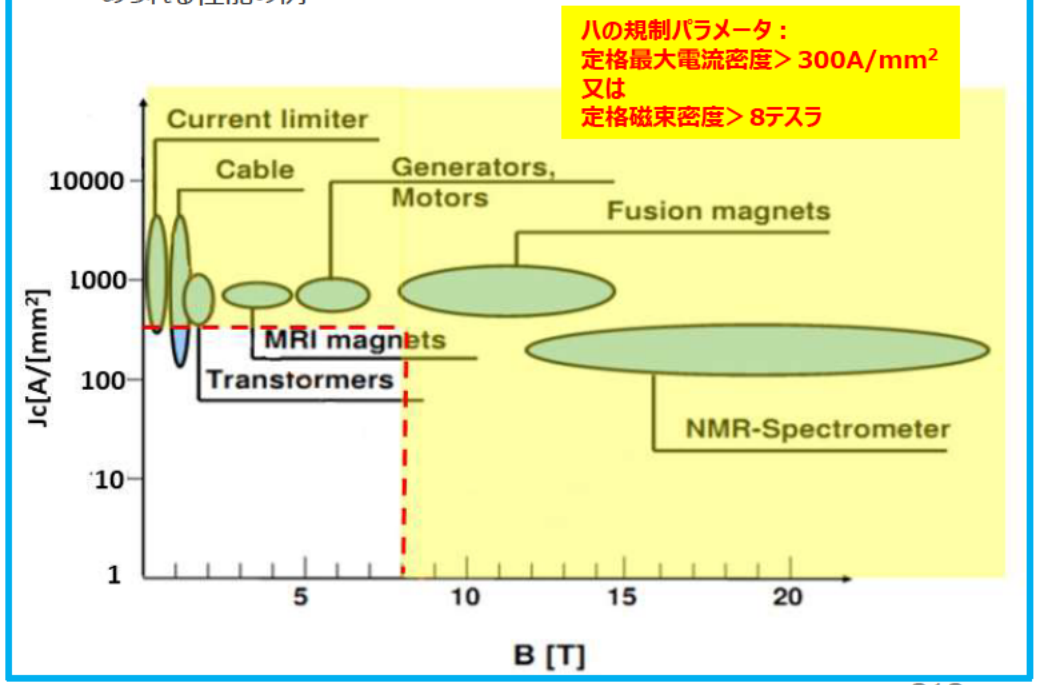


図7-5-21　用途に応じた超電導電磁石の磁場・臨界電流密度に求められる性能の例



4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（4）

電磁石に貯蔵されるエネルギーは、発生磁場の2乗とコイル半径の3乗に比例する。従って、大型のコイルほど大きなエネルギーを貯蔵することができる。一方、コイルを大きくすると、先に図7-5-5で示したような応力が増大するといった問題などが発生するため、コイルの強度を増すような工夫など実現のための技術課題が増す。

貨物等省令第6条第七号イでは、コイルの内径が250mmを超えるものを規制対象としている（7-5-22）。図7-5-23に、Y（イットリウム）系線材コイルの場合のSMES用コイルのコイル径（直径Φ）とおおよその蓄積エネルギーの例を示す。

なお電磁石に貯蔵されるエネルギー量は発生磁場およびコイル半径以外の要素にも影響される。

規制パラメータ　輸出令第7項(5)

七　一秒を要しないで磁界を完全に形成させ、又は消失させるように設計した超電導電磁石（ソレノイドコイル形のものを含む。）であって、次のイからハまでのすべてに該当するもの

イ　減磁の際に最初の一秒間で放出するエネルギーが一〇キロジュールを超えるもの

ロ　コイルの内径が二五〇ミリメートルを超えるもの

ハ　定格最大電流密度が三〇〇アンペア毎平方ミリメートルを超えるもの又は定格磁束密度が八テスラを超えるもの

図7-5-22　コイル形状の規制パラメータ（ソレノイドコイルの例）

ロの規制パラメータ
内径＞250mm

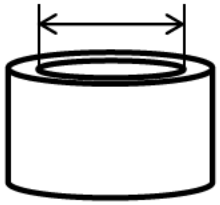
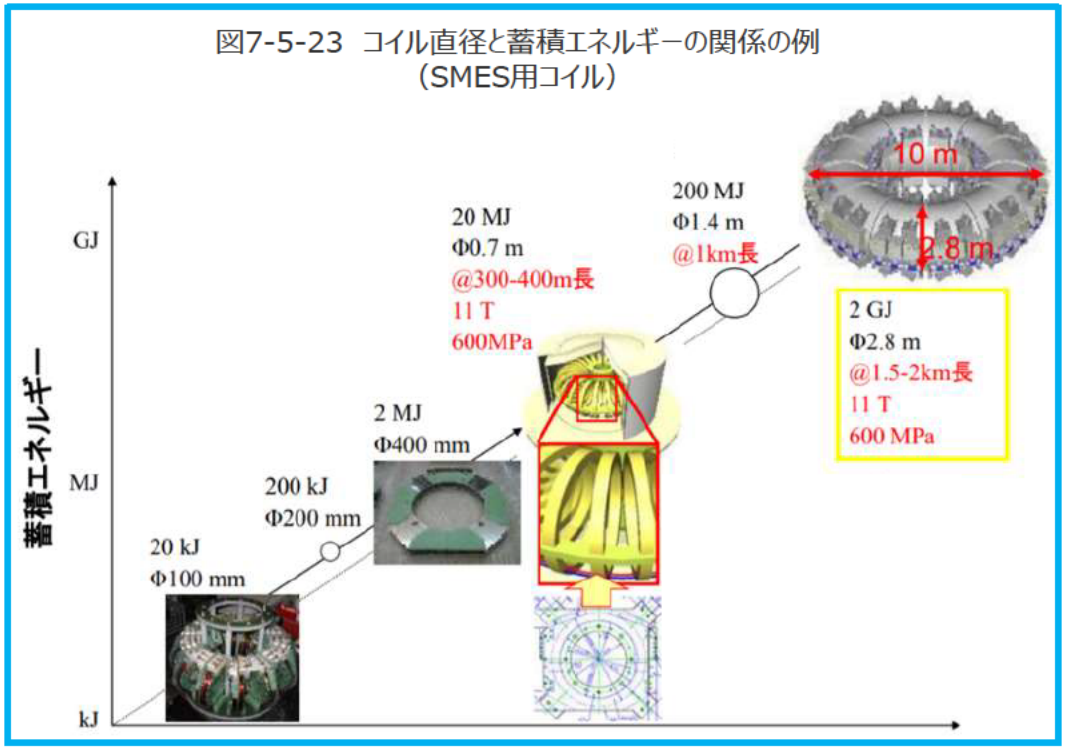


図7-5-23　コイル直径と蓄積エネルギーの関係の例
（SMES用コイル）



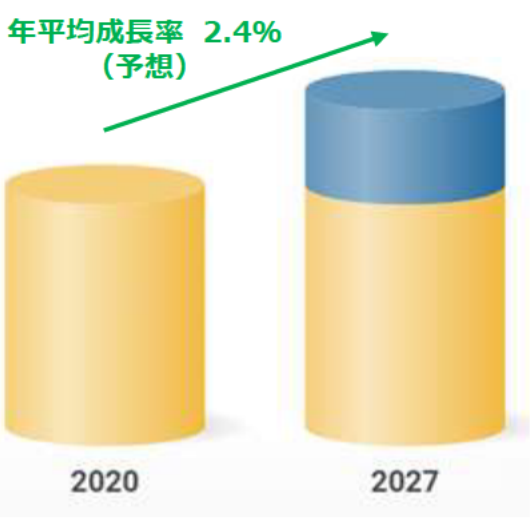
4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（1）

超電導電磁石の市場規模を図7-5-24に示す。

図7-5-24　超電導電磁石の市場規模



4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

	企業	会社概要	装置	磁石・コイル	周辺部品（冷凍機など）	材料	不明
1	SuperPower Incorporated（アメリカ）	SuperPower Inc.は、古河電工（日本）の100%子会社で、第2世代の高温超電導（2G-HTS）ワイヤーの大手メーカーおよびプロバイダーである。2G-HTSワイヤは極低温下で動作する場合、パワーデバイスをジュール熱なしで非常にコンパクトなサイズに縮小できる。このような高出力ケーブルとコイル磁石は、高度な生物医学のための次世代核磁気共鳴（NMR）、気候変動を解決するためのコンパクトな核融合炉などの将来のシステムに役立つ。将来のモビリティは、HTS-ホバー輸送、電気飛行機、または宇宙航空機によって実現される。				○	
2	Intermagnetics General Corporation（アメリカ）	ヘルスケア機器メーカー向けに、核磁気共鳴（NMR）分光計用磁石、核磁気共鳴画像（MRI）診断装置用無線周波数コイル、患者モニターなどの開発、製造、販売を行っている。		○			
3	American Superconductor Corporation (AMSC)（アメリカ）	1987年に設立され、マサチューセッツ州ボストン近郊に本社を置き、アジア、オーストラリア、ヨーロッパ、北米で事業を展開している。Windtec Solutionsを通じて、風力エネルギーのコストを削減する風力タービンの電子制御およびシステム、設計、エンジニアリングサービスを提供しており、また、Gridtecソリューションを通じて、ネットワークの信頼性、効率、パフォーマンスを最適化するエンジニアリング計画サービスと高度なグリッドシステムを提供している。 同社のソリューションは現在、世界中でギガワットの再生可能エネルギーに電力を供給しており、12か国以上で電力ネットワークのパフォーマンスと信頼性を向上させている。 ダイレクトドライブ超電導体発電機の設計では、電力密度の高い超電導体を利用して、設置、運用、保守のコストを削減しながら、より高い定格電力とエネルギー収量を生み出す、より小さく、より軽く、より効率的な機械を作成している。	○				
4	Westinghouse Electric Corporation（アメリカ）	1886年にアメリカでウェスティングハウス・エレクトリック&マニュファクチャリング・カンパニーという名称で設立されたかつての総合電機会社。1962年に世界で初めて商用の超電導線材（Nb-Ti）を開発した。その後超電導発電機などを開発したが、1990年代から主力事業の売却を始め、1997年には放送以外の事業の大半を手放して社名をCBSコーポレーションに変えた。1999年にバイアコムに買収されて消滅した。	○			○	
5	General Electric Company（アメリカ）	1892年設立された世界最大の総合電機メーカー。電力、再生可能エネルギー、航空、ヘルスケア業界の分野で事業を展開している。超電導の分野に関しては、極低温および超電導技術のモデリング、設計、および応用のすべての側面を網羅し、産業およびヘルスケア用途向けのプロトタイプ超電導機械を設計している。これには、電磁気およびマルチフィジックスモデリング、極低温システム設計、システム設計のための超伝導材料特性の習得、および超伝導機械の最適化とプロトタイピングが含まれる。生物医学分野では、この機能を、研究および商用アプリケーション向けの新しい超伝導MRI磁石の設計、製造、および展開に適用している。生物医学の分野を超えて、風力発電、モーター、地震除去用の超電導発電機と磁石の設計とプロトタイプ作成にもこの機能を適用した。	○	○			
6	Bell Labs（アメリカ）	1925年にベル・システム社が設立した研究所であり、2016年からはNOKIA（フィンランド）の垂下となっている。高温超電導体の1種であるイットリウム系超電導体のYBCOやプラスチックの超電導体などの開発を行っている。				○	
7	Bruker Corporation（アメリカ）	1960年にドイツで設立され、当初は核磁気共鳴（NMR）分光計用の常電導磁石と電源の製造から始まった。現在、NMR分光計のシェア世界一である。NMR分光計の他、主に分子や細胞を対象とした分析機器、診断機器の開発、製造、販売を行っており、質量分析技術、ガスおよび液体クロマトグラフィー、X線技術、発光分光法、原子間力顕微鏡、蛍光光学顕微鏡、赤外線分光、ラマン分子分光技術を有する。超電導電磁石を用いたNMR分光計や核磁気共鳴画像（MRI）診断装置の他、金属系低温超電導体をベースにした低温超電導材料・デバイスの開発・製造・販売を行っている。	○			○	
8	Beacon Power, LLC.（アメリカ）	高度なフライホイールベースのエネルギー貯蔵技術を開発するためにSatConのエネルギーシステム部門のスピンオフとして1997年に設立されたBeacon Power Corporationが2011年の破産申請後、プライベートエクイティファームのRockland Capitalの下で2012年にBeacon Power, LLCとなり現在に至っている。 Beaconの最初のフライホイールシステムであるフライホイールテクノロジーの第1世代と第2世代は、電気通信のバックアップ電源アプリケーション用に北米に導入された。 2004年以降、フライホイールの研究開発の焦点を電力網からリアルタイムで電力を「リサイクル」し、需要が減少したときに吸収し、需要が増加したときに注入できるシステムの開発に移った。この技術は2005年から2007年にかけて成功裏に実証され、グリッドスケールのフライホイールシステムの開発につながった。これは現在、ISO-NE、NYISO、およびPJMのグリッド周波数の規制のために商業的に展開されている。	○				

4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

	企業	会社概要	装置	磁石・コイル	周辺部品（冷凍機など）	材料	不明
9	Zenergy Power, Incorporated（アメリカ）	2006年創業の米国カリフォルニアに本拠を置く企業であり、超電導材料と超電導製品の限流器、誘導加熱器、発電機を製造しているが、近年の活動実態が不明である。2010年の同社の資料では以下の通りである。従業員約100人、ロンドン証券取引所の新興企業向けAIMに2006年に上場、時価総額9,000万ポンド。アメリカの他、オーストラリア、ドイツ、イギリスに拠点を有する。	○			○	
10	BAE Systems Land & Armaments Incorporated（イギリス）	イギリスの国営企業であったBAeが1985年の民営化を経て1999年にGEの子会社であるマルコーニ・エレクトロニック・システムズの合併により防衛、航空宇宙産業の会社であるBAE Systems Inc.が発足した。BAE Systems Land & Armaments Inc.は、BAEの子会社である。戦闘車両、弾薬、長距離砲、艦砲、ミサイルなどの設計、開発と製造を行っている。超電導技術との関係ははっきりしないが、2013年にアメリカ海軍と、電磁加速砲のフェイズ2プロトタイプの開発契約を締結したと報じられている。	○				
11	Scientific Magnetics Limited（イギリス）	2000年にOxfordInstruments Ltdからスピンアウトしてできた会社で、学術および商業研究用に特注の超電導マグネットシステムを設計、製造、テスト、および設置してきた。また、エンドユーザーおよびOEMパートナー向けに標準範囲の磁石を製造している。顧客固有の要件に合わせて調整されたWETおよびDRY（Cryogen Free）超電導マグネットソリューションを製造している。		○			
12	Oxford Instruments PLC（イギリス）	産業用・研究用の高度な技術ソリューションを開発・製造し、グローバルに販売・サポートを展開している。次世代半導体・新世代通信・高機能材料・ヘルスケア・ライフサイエンス・量子技術・宇宙科学などアプリケーションは非常に幅広い。中でも低温・超電導事業部は、オックスフォード大学からのスタートアップ企業として創業され、最も長い歴史を誇っている。最先端の超電導マグネットや、無冷媒クライオスタットを用いた低温・極低温環境の設計開発技術により生み出される製品は、革新的な量子技術や先端材料の開発、またデバイス開発などを支え物理学領域の発展に長期にわたり貢献し続けてきた。近年注目される量子コンピュータ用の無冷媒式希釈冷凍機から光学用クライオスタットまで、幅広い製品群を取り扱っている。		○	○		
13	Siemens AG（ドイツ）	1847年に電信設備建設会社として創立。現在は情報通信、交通システム、ヘルスケアなど幅広い事業を手掛ける多国籍企業である。超電導磁気共鳴画像（MRI）診断装置、超電導発電モータ、超電導電導推進システムなどの超電導電磁石製品を幅広く開発しているだけでなく、超電導フィラメントの開発も行っている。	○			○	
14	Royal Philips Electronics of the Netherlands（オランダ）	1891年に電球工場として設立され、第二次世界大戦後は世界有数の総合エレクトロニクスメーカーとなったが、事業の再編成を経て、現在は世界60ヶ国以上に拠点を有し、ヘルスケア、ライティング、コンシューマ・ライフスタイルの3分野の事業を展開している。ヘルスケア分野では、超電導磁気共鳴画像（MRI）診断装置を製造している。	○				
15	Columbus Superconductors S.P.A.（イタリア）	ASG Superconductors、CNR-INFM（イタリア国立研究評議会）、および研究者グループの協力により、2003年にジェノヴァに設立された。二ホウ化マグネシウム（MgB2）超電導体線材の世界的リーダーとして、開発、製造、販売を行っている。				○	
16	CRIOTEC Impianti S.P.A.（イタリア）	1989年に創立した極低温と真空分野で高い技術を有する企業で、大規模ガス生産会社を主な顧客とする。超電導ケーブルの生産で世界的なリーダー企業であり、核融合実験炉の国際プロジェクトITERへ超電導ケーブルを供給する契約を結んでいるICASコンソーシアムにも参加している。				○	
17	住友電気工業株式会社（日本）	1897年創業の日本最大手の非鉄金属メーカーであり、自動車、情報通信、エレクトロニクス、電線・機材・エネルギー、産業素材の5つの分野で事業を展開している。液体窒素温度でも使用可能なビスマス系(BiSrCaCuO)超電導線であるDI-BSCCO®超電導線は、加圧焼成などの先進的なプロセスを用い、世界最高の性能・品質・価格のバランスがとれた実用的な高温超電導線として、世界中の産業用超電導製品や超電導応用製品開発用プロジェクトに採用されている。超電導電磁石や超電導電磁石用コイルも製造している。		○		○	
18	株式会社神戸製鋼所（日本）	1905年に財閥の鈴木商店傘下で鋳鍛鋼事業を行う会社として設立され、鉄鋼アルミ、溶接、素形材、機械、エンジニアリング、建設機械、電力など幅広い分野で事業を展開している。超電導材料では核融合実験炉用の超電導コイル用導体を製造・販売している。また子会社のジャパン スーパーコンダクタ テクノロジー株式会社では超電導線材の製造・販売、超電導マグネットシステムの製造・販売、超電導応用システムの製造・販売を行っている。	○	○		○	
19	ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社（JASTEC）（日本）	株式会社神戸製鋼所の完全子会社で、NbTi超電導線・Nb3Sn超電導線、高分解能核磁気共鳴（NMR）用超電導マグネット、各種核磁気共鳴画像（MRI）用超電導マグネット、産業用・研究用各種超電導マグネット、超電導マグネット周辺機器の製造販売などを行っている。		○		○	

4.品目の技術動向調査（8）

○輸出令7項（5）超電導電磁石

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（4）

	企業	会社概要	装置	磁石・コイル	周辺部品（冷凍機など）	材料	不明
20	株式会社日立製作所（日本）	1920年創業の総合電機メーカー。1950年代後半から発電機器用として超電導の技術開発に着手し、その後、磁気浮上式鉄道用超電導磁石の開発や、核融合、加速器用マグネットなどの超電導化が進み、さらに近年は、医療用のMRI(磁気共鳴断層撮像装置)や電力用の発電機・変圧器・エネルギー貯蔵機器(SMES)、産業・環境機器に組み込まれるものなど、応用範囲の広がりに応じて多くの製品を開発してきた。	○	○			
21	株式会社東芝（日本）	1904年創業の総合電機メーカーであったが、現在は純粋持株会社となっている。1961年から超電導技術の研究を開始し、1985年にMRI用マグネットを日本初の量産化された超電導マグネットとして完成させ、1988年からはシリコン単結晶引き上げ用の超電導マグネットの製造を開始した。他にも超電導分野では導電体、発電機、変圧器、限流器、SMES、核融合用電磁石、加速器用電磁石、浮上式鉄道用電磁石、超電導磁気推進船などの開発実績がある。子会社の東芝エネルギーシステムズ株式会社では、ヘリウムフリー極低温冷却器を販売している。	○	○	○		
22	三菱電機株式会社（日本）	1921年創業の総合電機メーカー。主な事業分野は、重電システム、産業メカトロニクス、情報通信システム、電子デバイス、家庭電器である。核磁気共鳴画像（MRI）装置や半導体製造装置などに使用される超電導磁石を製造・販売している。		○			
23	A. A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials（A.A. Bochvar VNIINM）（ロシア）	ロシアの国営原子力企業Rosatom傘下の持株会社Atomenergopromの完全子会社である核燃料サイクル企業TVELの主要な研究機関の一つであり、元々は1956年に核兵器の製造に関連する材料科学と技術の問題を解決するために設立された。現在は核燃料棒の開発、使用済み核燃料のリサイクルと廃棄物の処理、超伝導体、および非破壊監視に携わっている。				○	
24	Chepetsky Mechanical Plant（ChMZ）（ロシア）	原子力連邦庁の一部であるTVEL Corporationに属する株式会社で、ジルコニウムおよびジルコニウム合金製品の世界的な生産会社の一つである。核融合実験炉の国際プロジェクトITERに参加するため、2004年にロシアで唯一の超伝導体の商業生産を開始した。				○	
25	Vserossiiskii Nauchno-Issledovatelskii, Proektno-Konstruktorskii i Tehnologicheskii Institut Kabelnoi Promyshlennosti OAO（OAO VNIIKP）（ロシア）	70年の歴史を有する、ケーブルに関する研究開発を行っている研究機関である。				○	
26	CRYOTRADE engineering（ロシア）	主に科学研究用のさまざまなクライオスタット（極低温冷却システム）の開発、設計、製造、試運転、保証、および保証後の保守のためのサービスを提供している。同社はまた、他社の製造したクライオスタット、超伝導磁石、クライオバキュームカメラの改造を行っている。2017年には液体窒素と液体ヘリウムのオーバーフローに使用される真空トラップ、オーバーフロー装置、真空パイプラインの事業を立ち上げた。			○		
27	Russian Superconductors（ロシア）	この組織に関する情報は得られなかった。					○
28	CryoMagnet（ロシア）	この組織に関する情報は得られなかった。					○

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（6）
一次セル、二次セル又は太陽電池セル

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

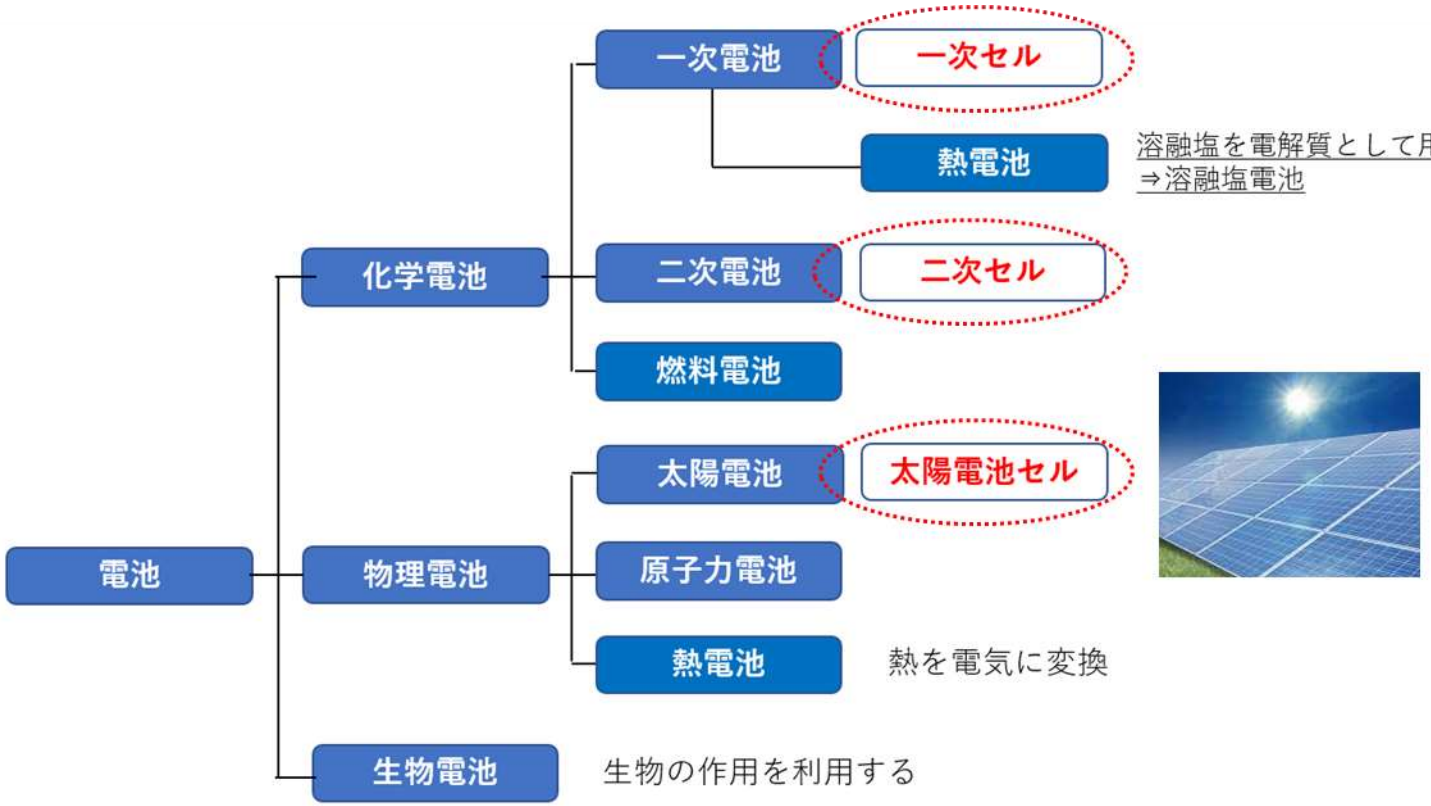
1.対象品目の概要調査（1）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

電池は、エネルギーを電気に変換する装置で、化学反応を利用する「化学電池」と、熱や光といった物理エネルギーを利用する「物理電池」、生物の作用を利用する「生物電池」に分類される。電池の分類を図7-6-1に示す。

本規制の「セル」とはバッテリーの構成要素のことで、図に示したように、各電池の中身を指すものである。

図7-6-1　電池の分類とセル



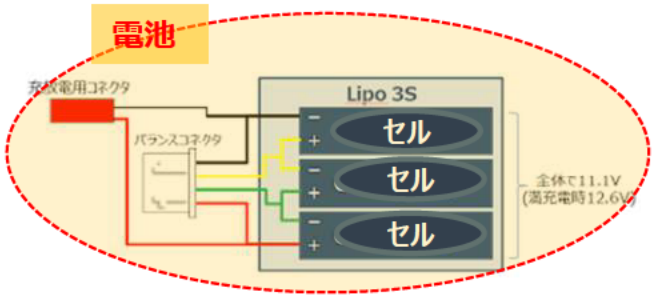
1.対象品目の概要調査（2）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

【セルの定義】
・単一の発電ユニットで、化学エネルギーを蓄えてから電気エネルギーに変換する。
・陰極と陽極を有する。
・電解質、電極と反応し、電流を発生する化学物質を有する。

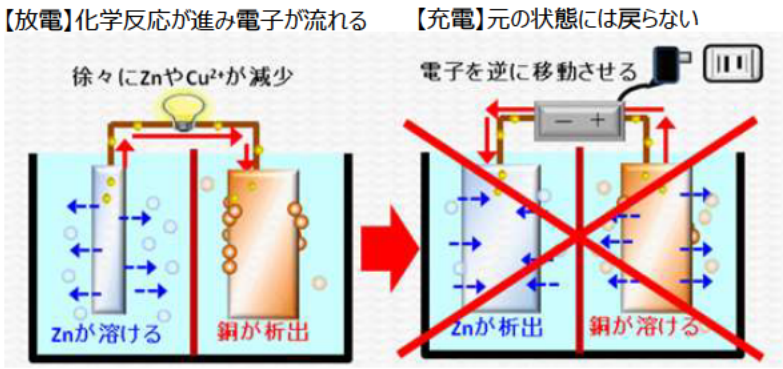
【電池の定義】
・電池はセルのグループである。
セルと電池の関係を図7-6-2に示す。

図7-6-2　セルと電池



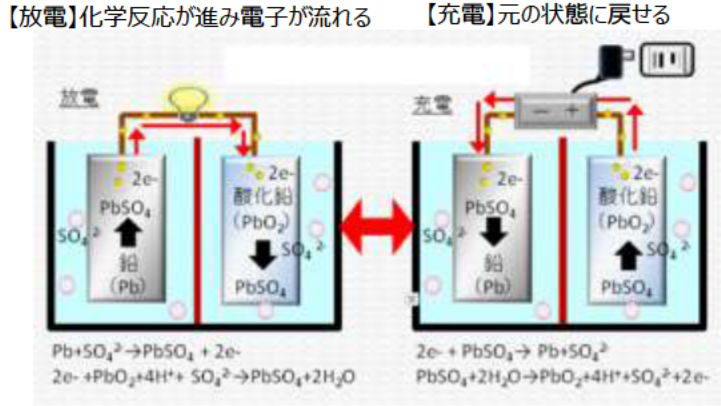
【一次電池と二次電池】
・一次電池は、一度放電すると充電出来ないが、二次電池は充電して繰り返し使える。
・一次電池の原理を図7-6-3に、
・二次電池の原理を図7-6-4に示す。

図7-6-3　一次電池の原理



電子を逆に移動させても、同じ反応は起こらず元に戻らない→**充電できない**

図7-6-4　二次電池の原理（鉛蓄電池の例）



電子を逆に移動させると、元の状態に戻る→**充電できる**

1.対象品目の概要調査（3）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

【太陽電池】

太陽電池は、シリコンなどの素材でできている2つ以上の異なる半導体を貼り合わせた構造をしている。異なる半導体同士が接する面を接合面と呼び、この接合面に光が当たると、衝突した光のエネルギーによって電子と正孔が発生し、これらの電荷を帯びた粒子（荷電粒子）が移動することで電気が流れる。太陽電池の構造を図7-6-5に示す。

太陽電池には非常に多くの種類があり、現在、実用化もしくは研究がすすめられているものだけでも数十種類ある。

流通している主な太陽電池はシリコン系太陽電池と化合物半導体系太陽電池であり、現在のところ歴史の長いシリコン太陽電池が流通量の大半を占める状況で、製造コストの面で強みをもつ化合物半導体系太陽電池も販売量を伸ばしている。

主な種類の太陽電池について、その特徴、変換効率と実用化の状況をまとめたものを表7-6-1に示す。

図7-6-5　太陽電池の仕組み

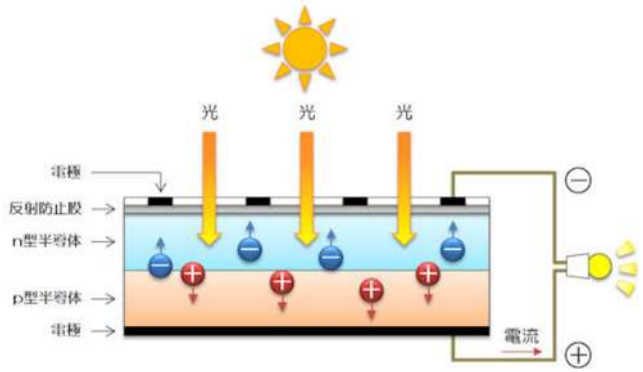


表7-6-1　太陽電池の特徴と変換効率

分類		特徴	モジュール変換効率
シリコン系	単結晶	高純度シリコンを使用するため高価だが変換効率や信頼性も高い。	～20%
	多結晶	小さい結晶が集まった多結晶シリコンを使用するため単結晶のものより低コストで、現在最も普及している。	～15%
	アモルファス	シリコンを結晶化させないため多結晶シリコンよりも低コストだが、変換効率も低い。	～9%
	多接合型	アモルファスシリコンと薄膜多結晶シリコンなど、異なる太陽電池を重ね合わせてタンデム構造にしたもの。	～18%
化合物半導体系	CIS	銅、インジウム、セレンを原料とし、低コストで変換効率も比較的良い。	～12%
	CIGS	CIS太陽電池の3元素にガリウムを加え4元素にしたもの。	～13%
	CdTe	カドミウムとテルルを原材料とし、欧米を中心に普及。	～11%
	GaAs	ガリウムとヒ素を原材料とする。高効率だが高価で人工衛星などの用途が中心。	25%程度
有機系	有機薄膜	有機半導体を材料とする。製造コストが安く、現在研究が盛んに行われている。	～8%
	色素増感	電極の白金以外は非常に低価格な材料で製造可能。製品寿命などの課題に対する研究が行われている。	～11%
ペロブスカイト太陽電池		ペロブスカイト結晶を用いた太陽電池。2021年9月、東芝はフィルム型のペロブスカイト太陽電池で独自の成膜技術を開発し、フィルム型では世界最高のエネルギー変換効率15.1%を達成した。2025年までに、変換効率が20%以上、受光部の面積9平方メートルの実用化に向けて開発を進めており、発電コストは1kwh20円以下を目指す。	～25.5%

1.対象品目の概要調査（4）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

【太陽電池の効率向上】

☆トリプルジャクションセル

異なる半導体材料で作られた複数のp-n接合を備えた太陽電池で、各材料のp-n接合は、異なる波長の光に応答して電流を生成する。複数の半導体材料を使用することで、より広い範囲の波長の吸収が可能になり、セルの太陽光から電気エネルギーへの変換効率が向上する。

太陽光線の波長区分を図7-6-6(a)に、GaInP/GaAs/Geのトリプルジャクションセルの相対変換効率を図7-6-6(b)に示す。

☆放射線の半導体に対する影響のパターン

・トータルドーズ効果(TID)：放射線が入射し、生成された電荷は、固定電荷や界面準位を形成し、半導体素子の諸特性を劣化させる。

・はじき出し損傷効果(DDD)：放射線が入射し、半導体結晶を構成する原子がはじき出されて、半導体素子の諸特性を劣化させる。

・シングルイベント効果(SEE)：1個の粒子が入射し、電離作用により高密度の電荷が生成半導体素子中を流れることによって、一時的もしくは定常的な故障が起こる。

電子・陽子線が太陽電池のDDDを引き起こす。太陽電池には酸化膜がないので、原理的にTIDは起こらない。電離能が低いのでSEEも起こり難い。

図7-6-6(a)　太陽光線の波長区分

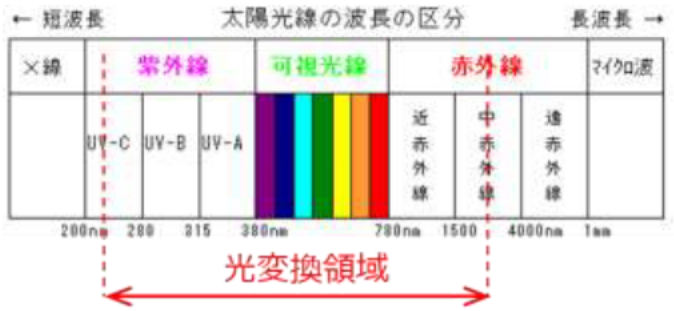
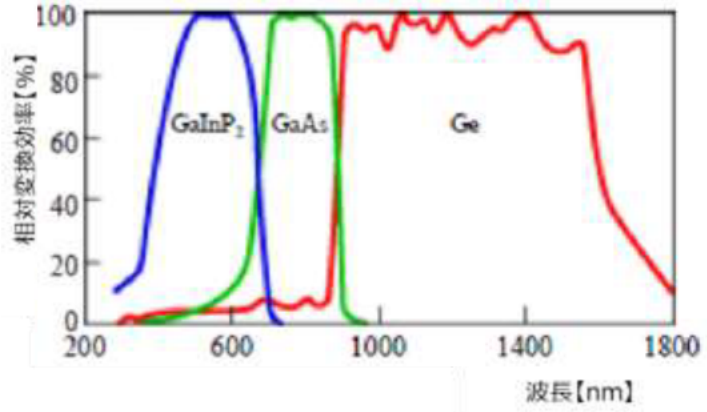


図7-6-6(b)　トリプルジャクションセルの相対変換効率



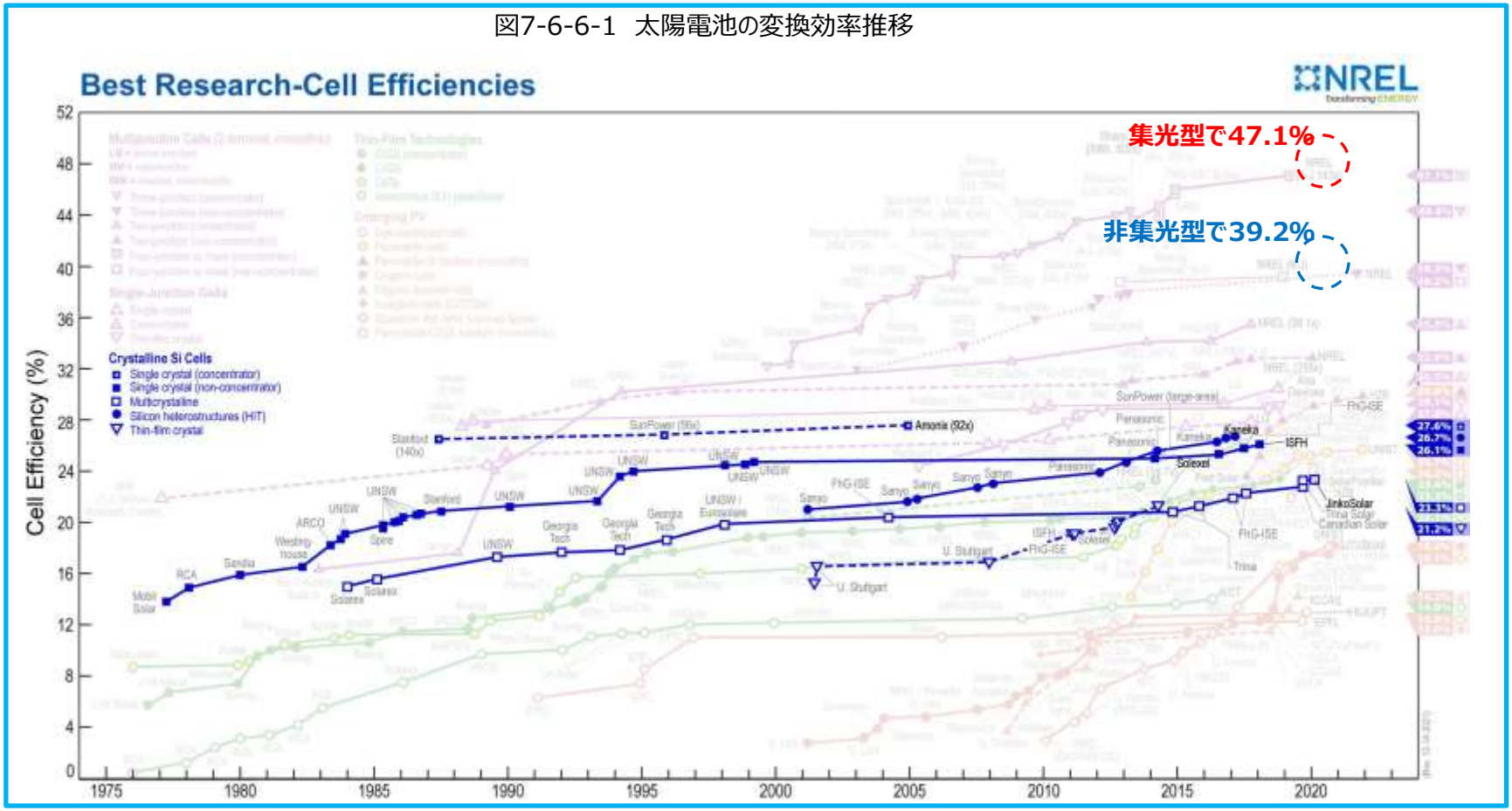
1.対象品目の概要調査（5）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

【太陽電池の変換効率推移】（図7-6-6-1）

アメリカの国立再生可能エネルギー研究所（NREL）の研究チームは、太陽電池のエネルギー変換効率において2つの世界記録を樹立したと発表した。**6種類の材料を積層した「6接合太陽電池」**を開発し、集光型で47.1%、非集光型で39.2%の変換効率を達成した。

図7-6-6-1　太陽電池の変換効率推移



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令					貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号	イロハ	細番		
7(6)	6	1	五			セル(バッテリー(シングルセルバッテリーを含む。)に組み込まれているものを除く。)であって、次のいずれかに 該当するもの	
7(6)	6	1	五	イ		イ 一次セルであって、20度の温度におけるエネルギー密度及び電力密度が次のいずれかに該当するもの	20度の温度におけるエネルギー密度及び電力密度が次のいずれか
7(6)	6	1	五	イ	(一)	(一) エネルギー密度が550ワット時毎キログラムを 超え、かつ、連続的な電力密度が50ワット毎キログラムを超えるもの	エネルギー密度が550ワット時毎キログラムを 超え、かつ、連続的な電力密度が50ワット毎キログラムを超える
7(6)	6	1	五	イ	(二)	(二) エネルギー密度が50ワット時毎キログラムを超え、かつ、連続的な電力密度が350ワット毎キログラムを超えるもの	エネルギー密度が50ワット時毎キログラムを超え、かつ、連続的な電力密度が350ワット毎キログラムを超える
7(6)	6	1	五	ロ		ロ 二次セルであって、20度の温度におけるエネルギー密度が350ワット時毎キログラムを超えるもの	20度の温度におけるエネルギー密度が350ワット時毎キログラムを超える
7(6)	6	1	七号の二			太陽電池セル、セル連結保護ガラス集成品、太陽電池パネル又は太陽光アレーであって、宇宙用に設計したもののうち、エア・マス・ゼロで1,367ワット毎平方メートルの照射を受けたときの最小平均変換効率が、28度の動作温度において20パーセントを超えるもの	エア・マス・ゼロで1,367ワット毎平方メートルの照射を受けたときの最小平均変換効率が、28度の動作温度において20パーセントを超える

Wassenaar規制番号				Wassenaar規制文言（英文）
3桁	細番			
3A001	e	1		e. High energy devices as follows: Note: 3A001.e.1. does not control batteries, including single-cell batteries.
3A001	e	1	a	a. 'Primary cells' having any of the following at 20°C;
				1. 'Energy density' exceeding 550 Wh/kg and a 'continuous power density' exceeding 50 W/kg; or
				2. 'Energy density' exceeding 50 Wh/kg and a 'continuous power density' exceeding 350 W/kg; or
3A001	e	1	b	b. 'Secondary cells' having an 'energy density' exceeding 350 Wh/kg at 20°C;
3A001	e	4		4. Solar cells, cell-interconnect-coverglass (CIC) assemblies, solar panels, and solar arrays, which are "space-qualified", having a minimum average efficiency exceeding 20% at an operating temperature of 301 K (28°C) under simulated 'AM0' illumination with an irradiance of 1 367 watts per square metre (W/m2);

比較原文
・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html
・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

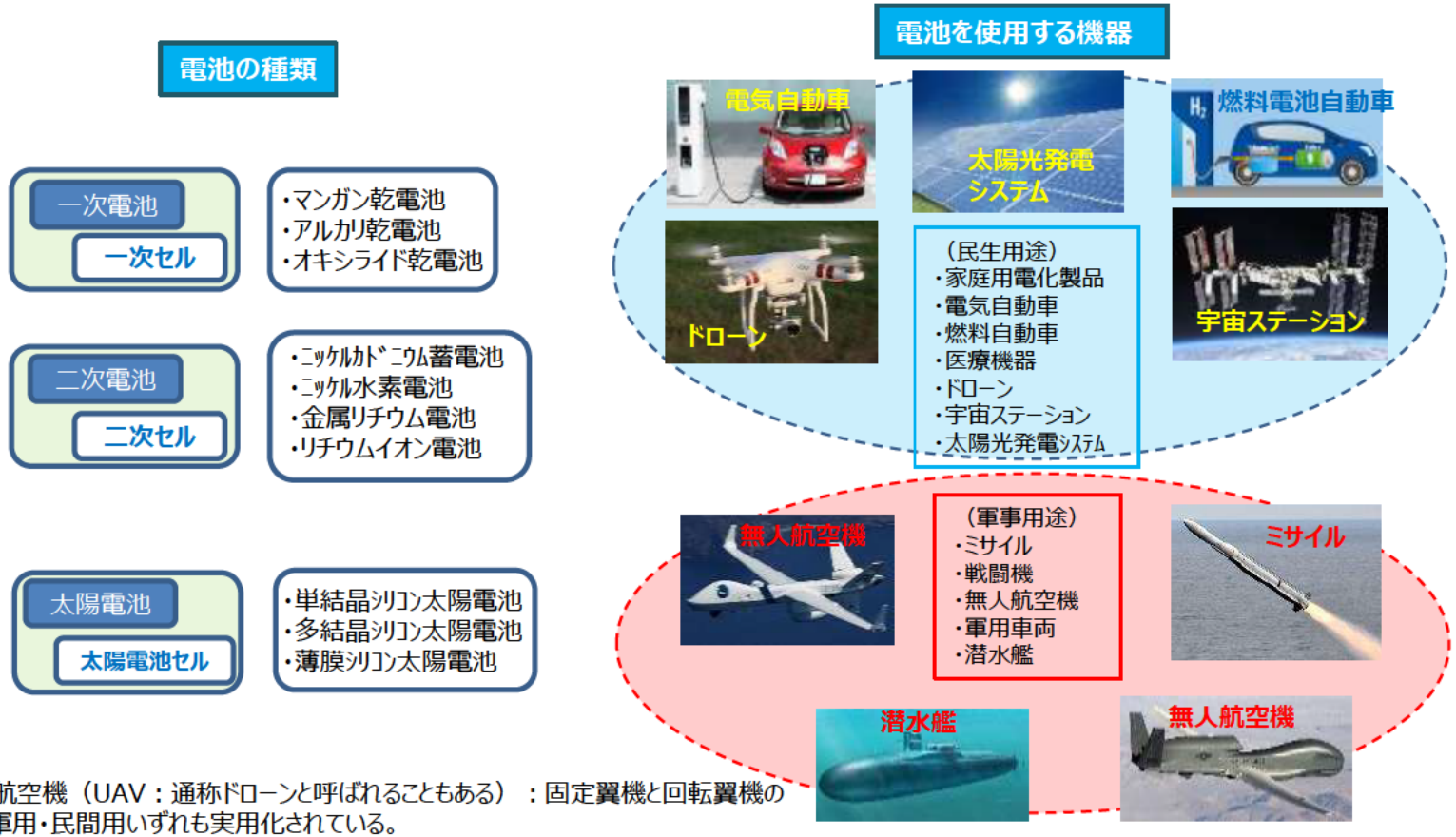
○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

家庭用途では、一次電池や二次電池が単独で用いられるが、産業用途や軍事用途では、電池は単独で用いるより、組み合わせて使用される場合が多い。例えば、太陽光発電システムでは、太陽電池セルで発電した電気を蓄えるために二次電池と組み合わせて使用される。

電池の種類と使用する機器を図7-6-7に示した。

図7-6-7　電池の種類と使用する機器



※無人航空機（UAV：通称ドローンと呼ばれることもある）：固定翼機と回転翼機の両方で軍用・民間用いずれも実用化されている。

3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【参考　民生用途の使用例(1)】

民生用途での電池の使用例として、自動車の場合を図7-6-8に示す。

☆**電気自動車**

電池式電気自動車は、外部からの電力供給によって二次電池に充電し、二次電池でモーターを回して走行する。

かつての二次電池は、出力・エネルギー密度が小さく（電池の重さの割に、使用できる時間が短い）、コスト高、寿命も不十分であった。また、稼働時間に対し長い充電時間が必要なため、交通機関の主流になり得なかった。しかし、出力・エネルギー密度が大きく（電池の重さの割に、使用できる時間が長い）、繰り返しの充放電でも劣化の少ないリチウムイオン二次電池の発展により、電気自動車が注目されるようになった。

☆**ハイブリッドカー**

ガソリンエンジンと電気モーターという、2つの動力源を持つ自動車で、ガソリン供給でエネルギーを補充して走行する。走行時の余剰エネルギーで二次電池に充電して使用することでエネルギー効率を向上させている。

☆**燃料電池自動車**

搭載した燃料電池で発電してモーターを回して走行する電気自動車である。燃料電池に水素やメタノールなどを使用する。燃料電池だけで走行することもできるが、始動性や応答性、エネルギー効率向上の点から、二次電池を併用したハイブリッド型になることが多い。

図7-6-8　民生用途での電池の使用（自動車）

【電気自動車】



【ハイブリッドカー】



【燃料電池自動車】



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【参考　民生用途の使用例(2)】

民生用途での電池の使用例を図7-6-9に示す。

☆**太陽光発電システム**
太陽光発電システムは、太陽光発電モジュール（「太陽電池モジュール」「太陽光パネル」「ソーラーパネル」とも言う）でつくった電気（直流電力）を、パワーコンディショナを通して交流に変換し、送電線へ送る。

☆**宇宙ステーション**
国際宇宙ステーションは、電力を作り出す「太陽電池パドル」において、太陽光発電モジュールで作られた電気を蓄え供給する。太陽光パネルはつねに太陽の方向へ向くように自動で回転している。

☆**ドローン**
動力が大きな機体ではガスタービンエンジンやレシプロエンジンなど有人機と同じ物を搭載するが、軽量な小型機では電動式も存在し、二次電池が使用されている。ドローンは、固定翼機と回転翼機の両方で民生用途・軍用用途いずれも実用化されており、写真は回転翼機である。

☆**無人航空機**（民生用途）
三洋化成工業とソフトバンク子会社は、次世代型リチウムイオン電池「全樹脂電池」を無人航空機に搭載する共同研究を始める。全樹脂電池は従来のリチウムイオン電池に比べて安全性が高く、川崎重工業の無人潜水機にも試験的に採用されている。

図7-6-9　民生用途での電池の使用（その他）

【太陽光発電システム】



【宇宙ステーション】



【ドローン】



【無人航空機】



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

規制対象となる可能性のある用途を図7-6-10に示す。
輸出令において、規制対象となる可能性があるのは、図の赤丸で囲んだ部分である。
（民生用）高エネルギーを必要とする用途（医療機器、宇宙ステーション、太陽光発電システム）における電池が規制対象となる可能性がある。
（軍事用）軍事用途は高エネルギーな電池を必要とするため、図の全てが含まれる。

＜輸出貿易管理令＞

セル(バッテリー(シングルセルバッテリーを含む。)に組み込まれているものを除く。)であって、次のいずれかに 該当するもの

（イ）一次セルであって、20度の温度におけるエネルギー密度及び電力密度が次のいずれかに該当するもの
(一) エネルギー密度が550ワット時毎キログラムを 超え、かつ、連続的な電力密度が50ワット毎キログラムを超えるもの
(二) エネルギー密度が50ワット時毎キログラムを超え、かつ、連続的な電力密度が350ワット毎キログラムを超えるもの

（ロ）二次セルであって、20度の温度におけるエネルギー密度が350ワット時毎キログラムを超えるもの
太陽電池セル、セル連結保護ガラス集成品、太陽電池パネル又は太陽光アレーであって、宇宙用に設計したもののうち、エア・マス・ゼロで1,367ワット毎平方メートルの照射を受けたときの最小平均変換効率が、28度の動作温度において20パーセントを超えるもの

図7-6-10　規制対象となる可能性のある用途



3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

【参考　軍事用途の使用例(1)】

一次セル、二次セルは輸出令において、
エネルギー密度【Wh/kg】と
連続的な電力密度【W/kg】で規制されている。
規制がかかっている用途として「**高エネルギー**」（長時間大きな電気を流し続けられる電池）が要求されるものとなり、さらに軍事用途としては高信頼性が必要となる。

☆**ミサイル**：携帯式防空ミサイルシステム（図7-6-11）
主目標は、低空を比較的低速で飛行するヘリコプター、対地攻撃機、COIN機などであるが、低空飛行中の戦闘機、輸送機、巡航ミサイルなどにも対応できるよう設計されている。このため、誘導方式には高性能な赤外線・紫外線シーカーが採用され、これによって目標熱源追尾能力（発射後の操作が不要な能力）を得ている。
システムは、発射機本体と箱型のIFF、BCU（シーカー冷却用のガスとバッテリーを内蔵したユニット）、ミサイル本体から構成される。引き金を引くと、シーカーが冷却され、ミサイル後部のブースター（Launch Motor ）によりコンテナから打ち出され、本体から9-10m離れたところでロケットモーターが点火、超音速まで加速する。
求められる性能は「瞬時に大電力が必要」で、高出力が要求されることが推測できる。
※シーカー：目標捜索装置

☆**潜水艦**：リチウムイオン電池搭載の新潜水艦（図7-6-12）
潜水艦への使用では、密閉空間であるため、安全性の要求スペックが厳しく、安定的に長時間電力を供給するため、**高エネルギーが要求される**ことが推測できる。

図7-6-11　ミサイル



図7-6-12　リチウムイオン電池搭載の潜水艦



3.品目の主たる用途の調査分析（6）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

【参考　軍事用途の使用例(2)】

☆**軍用無人航空機(UAV)**：（図7-6-13）

衛星通信により遠隔地でもリアルタイムで操縦と映像の取得、気象条件が良ければ完全自動操縦などが可能となり、対テロ戦争が始まった21世紀からはプレデターに代表される偵察機型から攻撃機型への展開が行われた。

長距離を飛行する必要性から、軽量で長時間使える電池が必要である。

なお、人が搭乗しない航空機のことを、通称としてドローンと呼ばれることもある。

図7-6-13　無人航空機

【無人航空機】



☆**個人携行通信機**：（図7-6-14）

携帯型軍用トランシーバーとして、米Associated Industries社製のCombat Net Radio(CNR) 方式を用いたHF帯、及びVHF帯を使用する短距離・双方向の音声通信用携帯無線機がある。

また、イギリス軍が使用している2.4GHz帯、送信出力50mW、6チャンネル(全256CH)のスペクトラム拡散方式デジタルトランシーバーがあり、イギリス陸軍で兵士同士の通信に使われている。筐体は強化樹脂製で、マイクとスピーカーは内蔵しておらず、専用のヘッドセットを接続して通話する。

軽量で長時間使用できる電池が必要である。

図7-6-14　個人携行通信機



3.品目の主たる用途の調査分析（7）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化

☆省令用語の意味

・**<u>セル連続保護ガラス集成品</u>**：インターコネクタ及びカバーガラス付セルを含む。

・**<u>宇宙用に設計した</u>**：地表から100キロメートルを超える高度で動作するよう設計もしくは製造されたこと、または試験に合格して適格とされたことを言う。特定の貨物が試験に合格したことにより、宇宙用に設計したと判定されても、同じ生産工程または一連の型式である他の貨物は、個々に試験されなければ宇宙用に設計したことにはならない。

・**<u>エア・マス・ゼロ</u>**：地球と太陽との距離を一天文単位とした場合の地球の大気圏外における太陽光の分光放射照度を言う。

規制パラメータ 貨物等省令文言
太陽電池セル、セル連結保護ガラス集成品、太陽電池パネル又は太陽光アレーであって、宇宙用に設計したもののうち、エア・マス・ゼロで1,367ワット毎平方メートルの照射を受けたときの最小平均変換効率が、28度の動作温度において20パーセントを超えるもの

【宇宙用に設計した太陽光発電パネル】

省令に記載された「宇宙用に設計した太陽光発電パネル」とは、以下のような工夫が施されている。

・放射線の影響を軽減するために、保護ガラスに特定の波長の光を遮蔽する加工を施したりするが、光線透過率が減少するため発光効率は落ちる。

・高寿命を確保するために、インターコネクタ等に通常より信頼性の高いものを使用したりするが、これも光線透過率が減少するため発電効率は落ちる。

このように、宇宙用に設計したものは、地上で使用するものに比べると、一般的に高価で効率が落ちるものとなる。

3.品目の主たる用途の調査分析（8）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化

【宇宙空間での太陽光パネルに求められる特性】

☆熱光学特性

太陽電池は、温度が高くなると起電力が低下する。地上では空気による放熱ができるが、真空の宇宙空間ではそれが出来ないので、太陽光のうち発電に必要でない光を吸収しないようにコーティングしたり、放射により熱を逃がす工夫が必要となる。

☆耐放射線性

宇宙用太陽電池は、宇宙空間において常に放射線にさらされるため、シリコン結晶基板に欠陥が発生し、それが移動中の電子を捕獲するため、徐々に電気出力が低下するという問題がある。セルの基板を薄くすると、電子の移動距離が短くなるため、欠陥の影響を受けにくくなり長寿命化することができ、さらに軽量化も図れる。

☆耐環境性

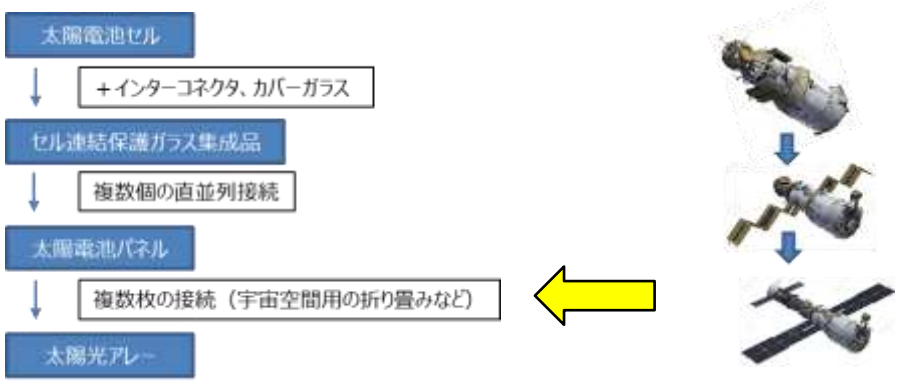
宇宙用太陽電池は、打上げから軌道上までの宇宙環境を模擬した、放射線、熱真空、熱サイクル、振動、衝撃、紫外線などの耐久試験に合格する必要がある。

☆高信頼性

宇宙では容易に修理/交換ができないので、高い信頼性が必要である。

宇宙空間での太陽光パネルを図7-6-15に示す。

図7-6-15　宇宙空間での太陽光パネル



4.品目の技術動向調査（1）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

【一次セル、二次セル】

規制パラメータは、右のように①、②、③の3つの領域に区分される。これを図示したものが図7-6-16である。

エネルギー密度と電力密度との間には，一般に相反する関係があって，一方を大きくしようとすると他方が小さくなる傾向がある。また，実際に電池を使用する場合，一般に低い出力で用いるほど多くの電力量を取り出すことができる。

<規制パラメータ>

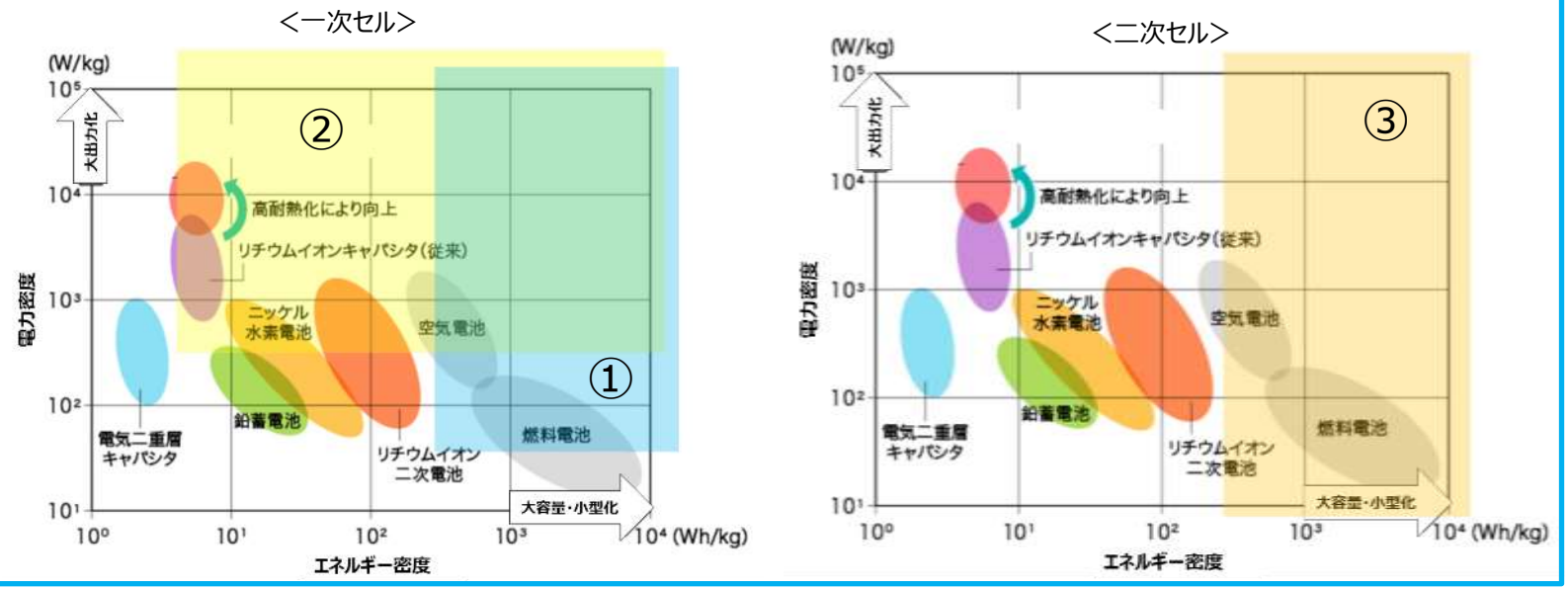
① 一次セル:エネルギー密度550Wh/kg超 かつ 電力密度50W/kg超

② 一次セル:エネルギー密度50Wh/kg超 かつ 電力密度350W/kg超

③ 二次セル:エネルギー密度350W/kg超

【20℃の状態】

図7-6-16 規制パラメータの領域



4.品目の技術動向調査（2）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

以下に、高エネルギー密度（容量が大きく、長時間使用できる）の電池の具体例を記載する。

【一次セル】

☆空気亜鉛電池（Zinc.air）（図7-6-17）

燃料電池の一種で、主にボタン型電池として利用される。正極に空気中の酸素、負極に亜鉛を使用する。電解液にはアルカリ金属水酸化物が使われるが、現在では水酸化カリウムを用いるものが主流である。化学反応は、

- 正極: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4OH^-$
- 負極: $Zn + 4OH^- \longrightarrow Zn(OH)_4^{2-} + 2e^- \longrightarrow ZnO + H_2O + 2OH^- + 2e^-$

・電圧は1.35 - 1.4V

・**重量エネルギー密度：470Wh/kg（実質上）、1370（理論上）Wh/kg**

図7-6-17　空気亜鉛電池



☆塩化チオニルリチウム電池（LiSOCl2）（図7-6-18）

従来電池の有機化合物の代わりに、無機材料が使われ、長期間使用できる。メモリICのバックアップ用、エレクトロニクス機器電源、電力・ガス・水道メーター用電源など、長期間の使用に適している。

・**重量エネルギー密度：500～700Wh/kg**

図7-6-18　塩化チオニルリチウム電池



☆二酸化硫黄リチウム電池（LiSO2）（図7-6-19）

15年間、室温で保存することができる。動作温度範囲：-54～+71℃。

・**重量エネルギー密度：約330Wh/kg**

図7-6-19　二酸化硫黄リチウム電池



4.品目の技術動向調査（3）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

【一次セル】

☆二酸化マンガンリチウム電池 （LiMnO2） （図7-6-20）
正極活物質として二酸化マンガンを用い、負極活物質はリチウム金属を用いている。
化学反応は、

正極反応：$MnO_2+Li^++e^- \rightarrow MnOOLi$
負極反応：$Li \rightarrow Li^++e^-$
全 反 応：$MnO_2+Li \rightarrow MnOOLi$

・**重量エネルギー密度：約550Wh/kg**

図7-6-20 二酸化マンガンリチウム電池



☆リチウム二硫化鉄電池（LiFeS2） （図7-6-21）
一般的なアルカリ乾電池の最大約8倍の容量を持つ、軽量で環境に優しい一次リチウム電池である。携帯機器への使用に適している。
・**重量エネルギー密度：約350Wh/kg**

図7-6-21 リチウム二硫化鉄電池



☆リチウム炭素電池（LICFx） （図7-6-22）
約80℃まで動作し、非常に低い自己放電特性を持つ。航空宇宙用途、軍事用途、心臓ペースメーカー等に使用されている。
・**重量エネルギー密度：360～500Wh/kg**

図7-6-22 リチウム炭素電池



4.品目の技術動向調査（4）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

【二次セル】

☆リチウム硫黄二次電池（LiS）

負極にリチウム(Li)、正極に硫黄(S)を使用した電池である。リチウムの原子量が小さく、硫黄の原子量もコバルトなどの遷移金属より小さいことから、Li-S電池は比較的軽量である。

・**重量エネルギー密度：最高500Wh/kg**

＜次世代電池＞（次世代電池の原理を図7-6-23に示す）

☆リチウムイオン空気電池

空気中の酸素(正極活性物)とリチウム金属(負極活性物)が化学反応することで電力を生成する。
金属リチウムを負極に用いるが、それが析出しやすいため、空気中の水分と反応した際の安全性や特性の悪化が課題である。

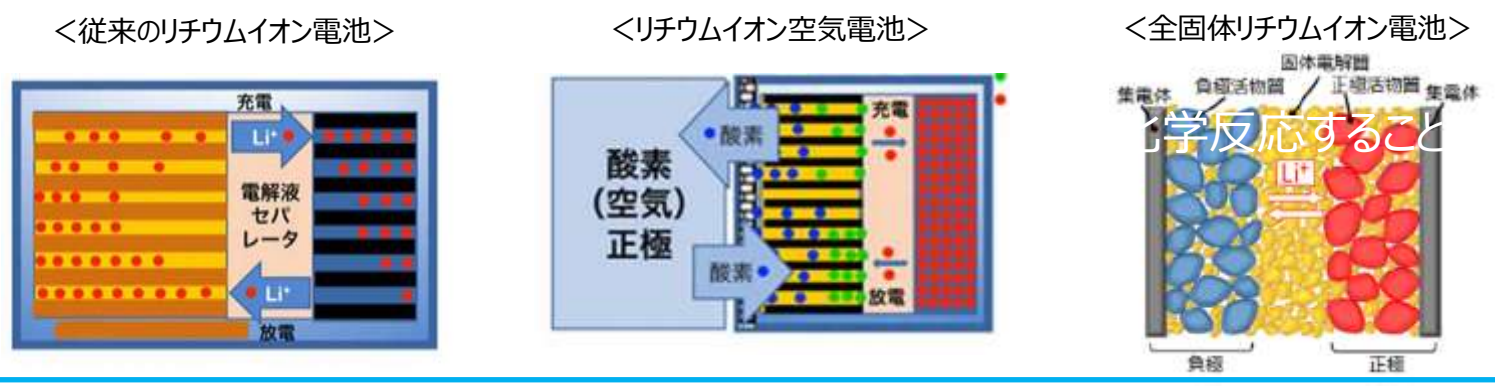
・**重量エネルギー密度：550Wh/kg**、（理論容量密度）は10,000Wh/kgを超える

☆全固体リチウムイオン電池

リチウムイオン電池のような電解液は持たず、固体電解質をセパレータとして用いる。充放電が速く、サイクルを重ねても劣化しにくい。

・**重量エネルギー密度：（理論容量密度）は2,000Wh/kg以上**

図7-6-23 次世代電池



4.品目の技術動向調査（5）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

【太陽電池セル】

太陽光から地上に到達する光エネルギーは、12.6万テラワットに達する。この光エネルギーをすべて電気に変えることができれば、たった1時間の日射量で全人類が消費する1年間のエネルギーをまかなうことができる。

地球の大気圏の外側では、太陽光と垂直な表面における太陽放射は、年間通じてほぼ一定で、その値は現在1,367W/m^2 （エア・マス・ゼロ状態）である。太陽から地球に入射するエネルギーの約30%は大気及びそこに含まれる水蒸気などで宇宙空間に反射され、**地表面に到達するのは残りの約70%**で、**約1,000W/m^2**である。

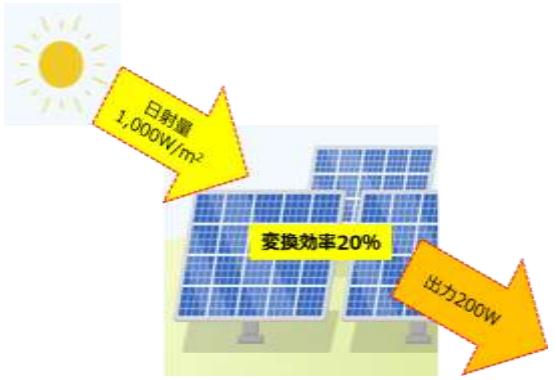
受け取ったエネルギーをどれだけ電気に変換できるかが、**太陽光パネルの変換効率**である。太陽光パネルの変換効率イメージを図7-6-24に示す。

太陽の表面温度は5,800ケルビンに近く、太陽放射の約40%は可視光、10%は紫外線放射であり、50%は赤外線放射である。

変換効率＝[(公称最大出力【W】÷(モジュール面積【㎡】×1,000)]×100【%】

一般的な太陽光パネルの耐用年数は20～30年で、変換効率は年0.27%程度ずつ劣化していくと言われている。

図7-6-24　太陽光パネルの変換効率イメージ



4.品目の技術動向調査（6）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

太陽電池パネルの構成を図7-6-25に示す。

太陽光が太陽電池パネルに当たり太陽電池セルに届くまでには、入射光を減少させる遮蔽物が存在する。

①ガラス

ガラスに当たった太陽光は、すべて透過するわけではなく、吸収と反射による損失を伴う。太陽光には放射線が含まれるため、太陽電池セルへのダメージを防ぐためには、ガラスが厚く損失が大きい方が良いが、発電量は減少する。

②電極

電極は太陽電池セルの一部を隠す構造になるため、入射光の一部はセルまで届かない。

③インターコネクタ材

太陽電池セルは隣接するセルと隙間なく並べられるのが理想であるが、構造上電極をつなぐインターコネクタが必要なこと等で、セル間に隙間ができる。

セルに届く光量を増やすため、反射防止膜を付けることで反射損失を減らす工夫がされている。また、セルへ届く光量を増やすためには、電極とインターコネクタによる無駄を減らす必要がある。これら開発要素により、パネルの性能（変換効率と信頼性）が決まってくる。

これら開発要素の集大成によって出来上がったパネルの特性が、規制パラメータにより規制されている。

太陽電池パネルの構成部材を図7-6-26に示す。

図7-6-25　太陽電池パネルの構成

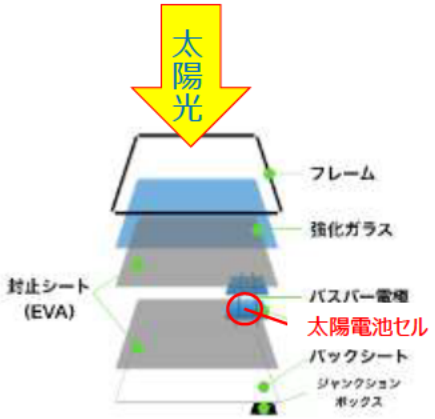
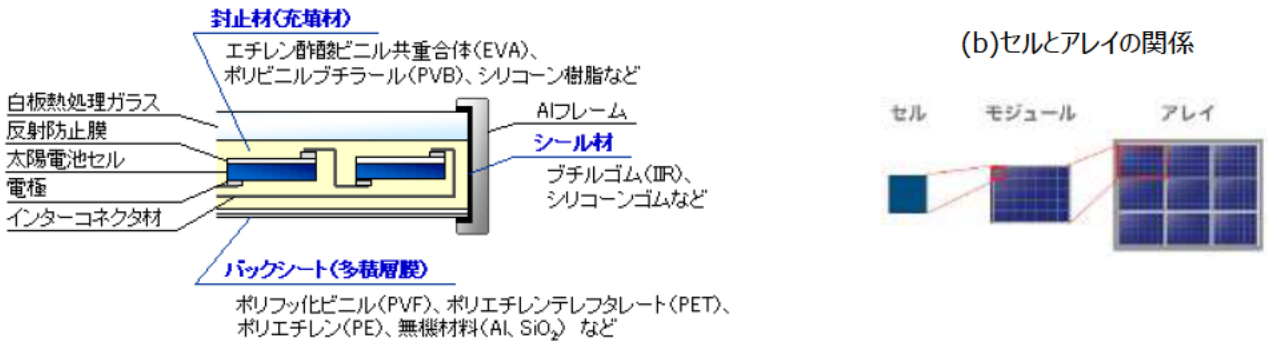


図7-6-26　太陽電池パネルの構成部材



4.品目の技術動向調査（7）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

太陽電池セルの規制パラメータを見ると、宇宙用に設計されたもので、エア・マス・ゼロ状態での効率が20%を超えるものとなっている。仮に変換効率25%でこの条件を満たす太陽光パネルは、太陽定数（1,367W/m^{2}のエネルギーを25%電気に変換するため、

1,367W/m^2 ×0.25=342W の電力が得られることになる。

1976年に単結晶シリコンを用いた宇宙用太陽電池をシャープが開発し、人工衛星「うめ」に搭載された。NEDO「太陽光発電技術研究開発」プロジェクトの下、2002年には同社が開発した化合物3接合型太陽電池が宇宙航空研究開発機構（JAXA）の認定を取得。2005年には小型科学衛星「れいめい」に、2009年には温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」に搭載された。現在、日本製の人工衛星のほとんどがシャープ製の化合物3接合型太陽電池を搭載している。宇宙ステーションの太陽光パネルイメージを図7-6-27に示す。

規制パラメータ 貨物等省令文言
太陽電池セル、セル連結保護ガラス集成品、太陽電池パネル又は太陽光アレーであって、宇宙用に設計したもののうち、エア・マス・ゼロで1,367ワット毎平方メートルの照射を受けたときの最小平均変換効率が、28度の動作温度において20パーセントを超えるもの

NEDOは太陽光パネルの変換効率の将来目標を作成し、太陽光発電普及拡大のためのロードマップを掲示している。NEDOによる太陽光パネル変換効率ロードマップを図7-6-28に示す。図中、赤線の領域が変換効率が20%を超える規制領域である。

汎用の太陽電池においては変換効率が20%台の製品が販売されている。現在市場の約9割を占めるのは、より変換効率の高い結晶型太陽光パネルである。宇宙用太陽光パネルは、地上用に比べ若干変換効率が劣ることがあるが、これは、宇宙の過酷な環境下でも安定して長時間動作できる設計になっているためである。

図7-6-27 宇宙ステーションの太陽光パネルイメージ

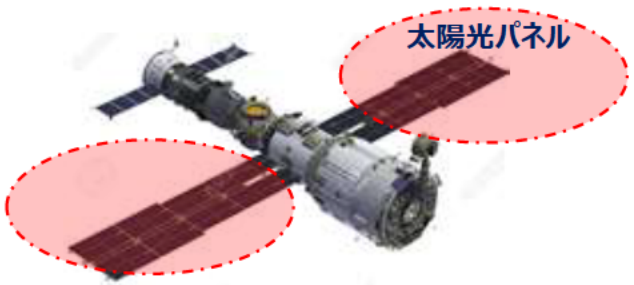
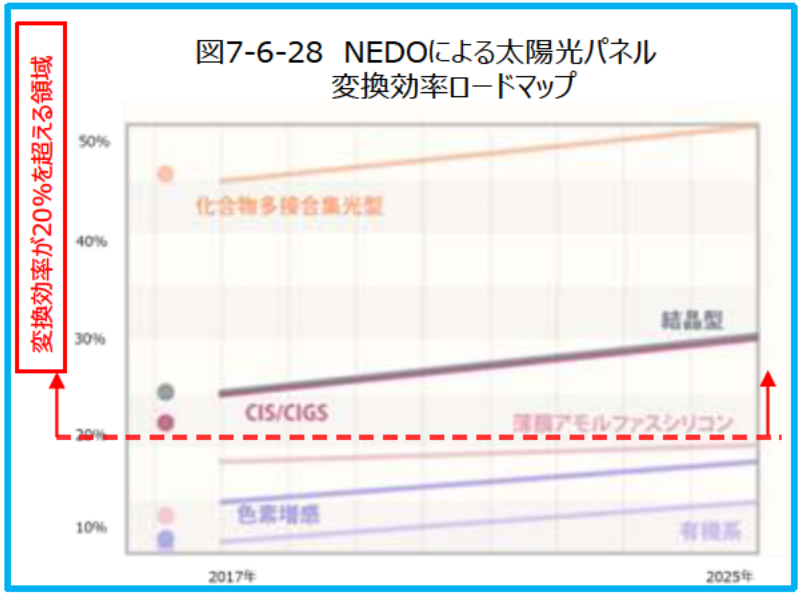


図7-6-28 NEDOによる太陽光パネル変換効率ロードマップ



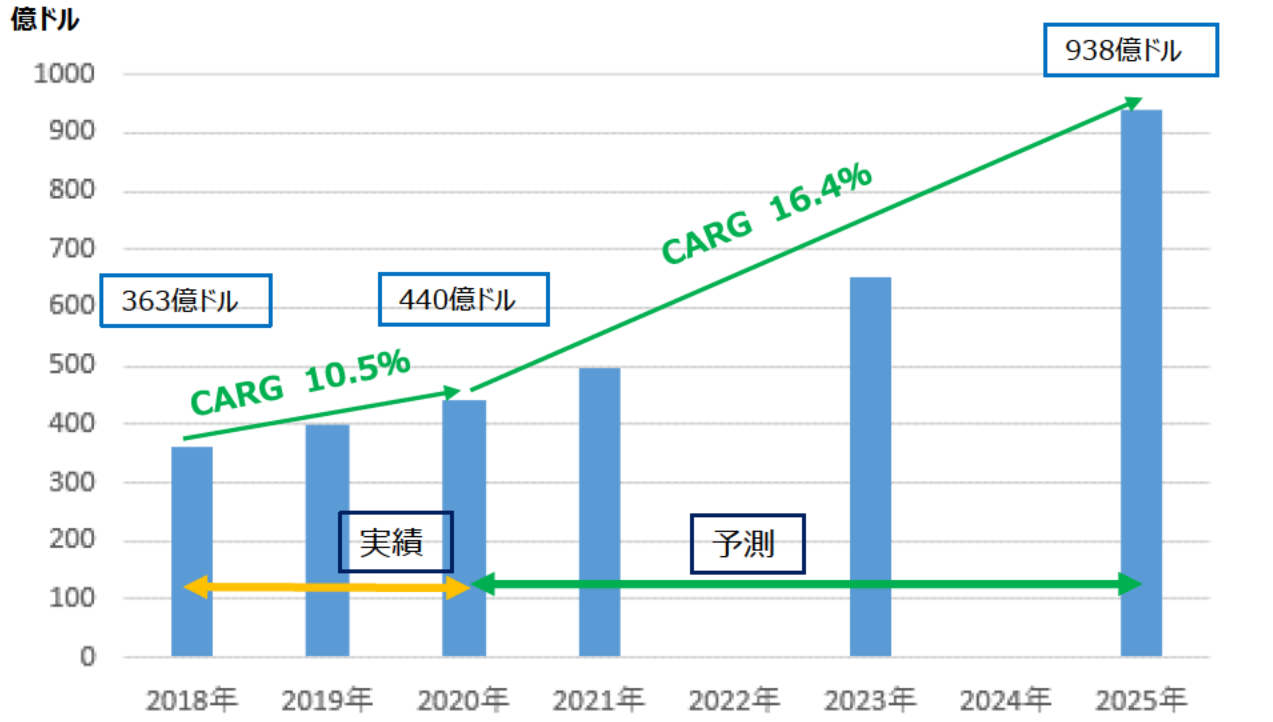
4.品目の技術動向調査（8）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

リチウムイオン電池の世界市場は、電気自動車の需要増に後押しされて、2020年：440億ドルから2025年：938億ドルへと、CARG16.4%で推移すると予想されている。
リチウムイオン電池の世界市場を図7-6-29に示す。

図7-6-29 リチウムイオン電池の世界市場



出典：MarketsandMarkets
Battery Technology Market– GLOBAL FORECAST TO 2025

4.品目の技術動向調査（9）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

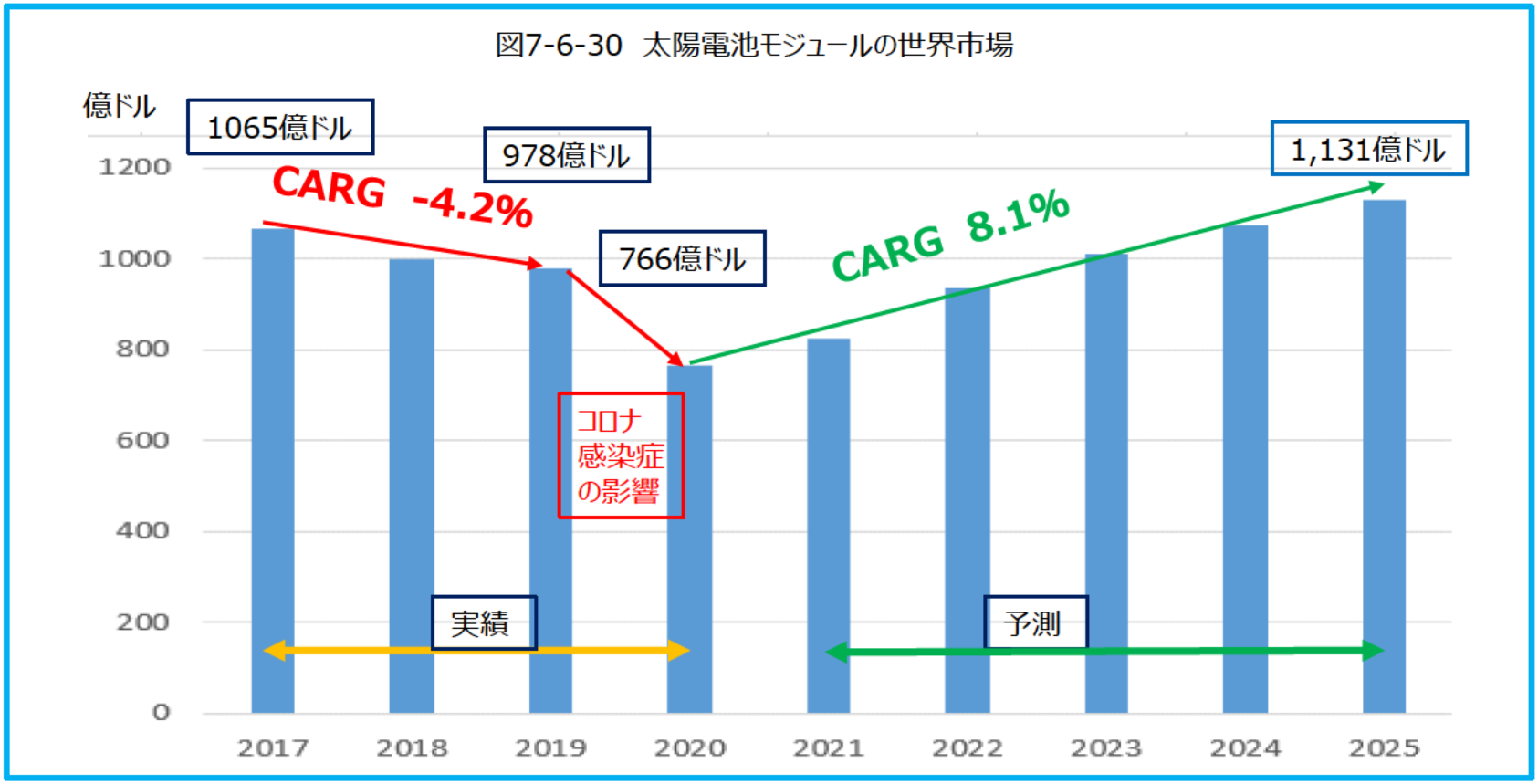
②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

太陽電池モジュールの世界市場は、2017年1065億ドルで、2020年には766億ドル、2025年にはCARG8.1%で成長し、1131億ドルに達すると予測されている。2019-2020の落ち込みはコロナ感染症の影響である。

太陽電池メーカーの世界市場を図7-6-30に示す。

出典：MarketsandMarkets
PHOTOVOLTAIC MARKET WITH COVID-19 IMPACT - GLOBAL FORECAST TO 2025

図7-6-30　太陽電池モジュールの世界市場



4.品目の技術動向調査（10）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

世界の一次電池の売上高を分子に、市場規模を分母にして2020年の一次電池業界の市場シェアを試算すると、世界1位はエナジャイザーの30%、2位はデュラセルの29%、3位はパナソニックの27%となる。乾電池・一次電池業界は上記米国の2社とパナソニックでほぼ市場シェアの9割となっている。（Energizer社によれば、2019年の同業界の市場規模は60億ドル超、2020年で70億ドル）

世界の主な電池メーカーを表7-6-2に示す。

その他のプレーヤーとしては、日本のマクセル、FDK、ソニーの電池事業を買収した村田製作所、中国の南孚や中銀、VinnicブランドのChung Pak Battery Works、HENGWEIブランドの中国Jiaxing Hengwei Battery、韓国のBexel等があるが、いずれも市場シェアは10%以下と考えられる。

また近年は、シンガポールのGP Batteries、インドネシアのABCバッテリー、中国のHi-watt Battery といったプライベートレーベルも、競争力の価格を提示し、勢力を延ばしている。

経済産業省機械統計によれば、2019年の日本国内の1次電池市場規模は987億円である。

乾電池は性能による差別化が難しくなってきており、一方でコイン形リチウム電池はIoTで用いるセンサーへの利用で、今後は成長率の増加が期待されている。

表7-6-2　世界の主な一次電池メーカー

エナジャイザー（アメリカ）	一次電池の世界シェア約25%を持ち、世界165カ国で販売されている。普及価格帯の製品には買収したエバレディブランドを使用している。アメリカ市場では、高性能一次電池の市場において、改良型リチウム電池のe2リチウム電池がパナソニックのオキシライド電池を凌駕した。
デュラセル（アメリカ）	2005年に親会社のジレットがプロクター・アンド・ギャンブルに買収されたため、P&Gのグループ企業となったが、2016年にバークシャー・ハサウェイに売却された。アメリカでは、アルカリ電池、ニッケル水素二次電池と充電器などの乾電池だけでなく、懐中電灯やメモリーカード、自動車用鉛蓄電池なども販売している。
パナソニック（日本）	エアコンや洗濯機などといった白物家電分野をはじめ、照明器具・配線器具などの住宅設備分野や、リチウムイオン二次電池などの車載分野などに重点を置く。旧称、松下電器産業株式会社。長きにわたり商標としてナショナルを用いていた。
FDK（日本）	古河グループの電子部品や電池などを製造するメーカー。パナソニックによる三洋電機子会社化の影響により三洋エナジートワイセルと三洋エナジー鳥取の株式を譲り受けた。

4.品目の技術動向調査（11）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

図7-6-31に示したように、二次電池の種類別シェアは、リチウムイオン電池と鉛蓄電池の合計でで95%を占める。

二次電池の用途別割合を図7-6-32に示す。

世界の主な二次電池メーカーを表7-6-3に示す。 このトップテンメーカーの合計売上高は市場の40～50%を占め、300から400億米ドルである。

二次電池メーカーを表7-6-3に示す。

図7-6-31　二次電池の種類別シェア



図7-6-32　二次電池の用途【億米ドル】



出典：MarketsandMarkets
Battery Technology Market– GLOBAL FORECAST TO 2025

表7-6-3　二次電池メーカー

企業		会社概要
Clarios	米国	自動車産業の年間総生産量の3分の1相当の車両用電池を手掛けており、未来のエネルギー貯蔵産業に進出している。
Panasonic	日本	トヨタ向けに続き、米テスラ　モーターズＥＶ向けにも製品を供給する。
Samsung SDI	韓国	1970年、サムスンNECとして設立され、1974年に商号をサムスン電管工業に変更、1999年に現在の社名となった。ディスプレイ、太陽電池、燃料電池、電気自動車等輸送用バッテリー、電力貯蔵用大容量ストレージなどを製造販売する。
CATL	中国	電気自動車やエネルギー貯蔵システムのリチウムイオン電池の製造を行っている。2017年には出荷量でパナソニックを抜いて電気自動車用の電池メーカーで世界一となった。
Chaowei Power	中国	風力発電や太陽光発電用のリチウムイオン電池や蓄電池も提供している。他に、電気自動車に使用される鉛酸自動車用バッテリーを製造する。
GS Yuasa	日本	電気自動車用リチウムイオン電池を製造。他に、航空　宇宙　海洋開発用にリチウムイオン電池を開発している。
LG Chem	韓国	ヒュンダイ自動車が2009年下半期から量産開始するアバンテのハイブリッドカーにリチウムポリマー電池を単独供給する。また、2010年に販売される米国GMの電気自動車用リチウムイオンバッテリーを単独供給する。
BYD Auto	中国	1995年、電池メーカーとして創業し、2003年に自動車業界に参入した。EVだけでなくハイブリッド車など「新エネルギー車」を販売する。
EnerSys	米国	医療、輸送、防衛等の分野でエネルギー貯蔵システムを手掛ける。
Hitachi Cemical Company	日本	2020年4月28日付で日立化成は昭和電工の連結子会社となった。エレクトロニクス事業では、リチウムイオン電池材料を提供している。

4.品目の技術動向調査（12）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

世界の地域別二次電池のシェアと年平均成長率を図7-6-33に示す。
アジア。太平洋地域が最も大きな市場で今後も高成長が続くと予想されている。

前ページに示した以外の二次電池メーカーを表7-6-4に示す。規制セルを製造するメーカーである。

図7-6-33　世界市場の地域別二次電池シェアと成長率



	APAC	Europe	North America	RoW
2020	39.3	23.3	18.8	10.4
2025	68.1	40.1	29.1	15.0
CAGR	11.6%	11.4%	9.1%	7.6%

出典：MarketsandMarkets
Battery Technology Market– GLOBAL FORECAST TO 2025

表7-6-4　その他の二次電池メーカー

Quallion LLC（アメリカ）	軍事、航空宇宙、医療、自動車産業向けの最先端のリチウムイオン電池を開発、製造している。 医療機器業界では、世界最小の埋め込み型二次電池を開発した。人体埋込型長寿命リチウムイオン電池は、人工内耳、神経刺激装置、ブドウ糖センサー、心調律モニターなどに使用されている。EnerSysグループに属する。
Ampirus Inc（アメリカ）	世界一エネルギー密度が高いリチウムイオン電池を開発した。従来、アノードはグラファイトの形の炭素を用いていたが、ここにシリコンを使用することで、バッテリーのエネルギー密度を大幅に増やすことが出来た。
High Energy Batteries（インド）	軍用バッテリーとして、航空機用、魚雷用、ミサイル用、ヘリコプター用を提供している。商用バッテリーは、自動車に使用されている。

4.品目の技術動向調査（13）

○輸出貿易管理令第7項(6)一次セル、二次セル又は太陽電池セル

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

世界の太陽光発電メーカーシェアランキングを表7-6-5に示す。トップシェアは中国企業であり、上位はほとんどが中国メーカーという状況である。海外の傾向としては、安価で提供できるメーカーへの需要が高まっている。一方、日本の太陽光発電（住宅用）市場は、長期間稼働のため、信頼性と定期的メンテナンスや不具合時のアフターサービスが不可欠であり、日本メーカーが優位になっている。

その他の太陽電池メーカーを表7-6-6に示す。

表7-6-5　太陽光発電メーカーシェアランキング2019

1位	**Jincosolar（中国）**	太陽光発電産業の世界最大手メーカーの一つ。大型のメガソーラー太陽光発電所から住宅用まで手がけている。2020年12月31日において、シリコンウェーハの生産能力が約22GW、太陽電池が11GW、太陽光発電モジュールが31GW となった。
2位	**Trinasolar（中国）**	太陽光発電およびスマートエネルギーのトータルソリューションを提供する会社。2021年末までに、モジュール総生産能力は50GWに達する見通しである。
3位	**Canadiansolar（製造が中国、本社はカナダ）**	太陽光発電モジュールを製造し、大規模な太陽光発電プロジェクトを運営している。これまでに累積46 GWを超えるソーラーモジュールを納入しており、この数量は約1,280万世帯のクリーンエネルギー需要に相当する。
4位	**JAsolar（中国）**	太陽電池、太陽電池モジュール製品を製造、販売し、単結晶および多結晶太陽電池の製造と販売にも携わっている。
5位	**HanWhasolar（韓国）**	太陽光発電関連事業、セキュリティソリューション事業、化学製品、精密機器、鉄網など幅広い産業を展開している。
6位	**GCL－SI（中国）**	太陽光発電の大手で世界中の地域に製品を供給している。2020年12月31日において、シリコンウェーハの生産能力が約22GW、太陽電池が11GW、太陽光発電モジュールが31GW となっている。

表7-6-6　その他の太陽電池メーカー

Emcore（アメリカ）	宇宙用多接合太陽電池セルを製造し、これまで1MW相当のセルを宇宙用として提供してきた。
SpectroLab Inc（アメリカ）	ボーイングの子会社で、宇宙用多接合太陽電池セルを製造している。衛星や宇宙ステーションに採用されている。
Clyde Space (イギリス)	変換効率30.7%のソーラーパネルは、軽量アルミニウム構造で構築され、何十年にもわたる軌道上で実証済み。パネルは低ガス放出材料で構成されている。CubeSat規格に適合している。（※CubeSat規格：小型人工衛星に適した規格で、1999年にカリフォルニア・ポリテクニック州立大学とスタンフォード大学が開発した）
AZUR SPACE Solar Power GmbH (ドイツ)	宇宙用多接合太陽電池の開発製造を行っている。特徴として、高変換効率、小温度係数、高出力密度が挙げられる。
Eneco (ベルギー)	ベルギー最大の太陽電池メーカーである。2,900世帯のエネルギー消費量に相当する年間10.000MWh相当の太陽電池を生産している。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（７）
高電圧用コンデンサ

令和4年 3月

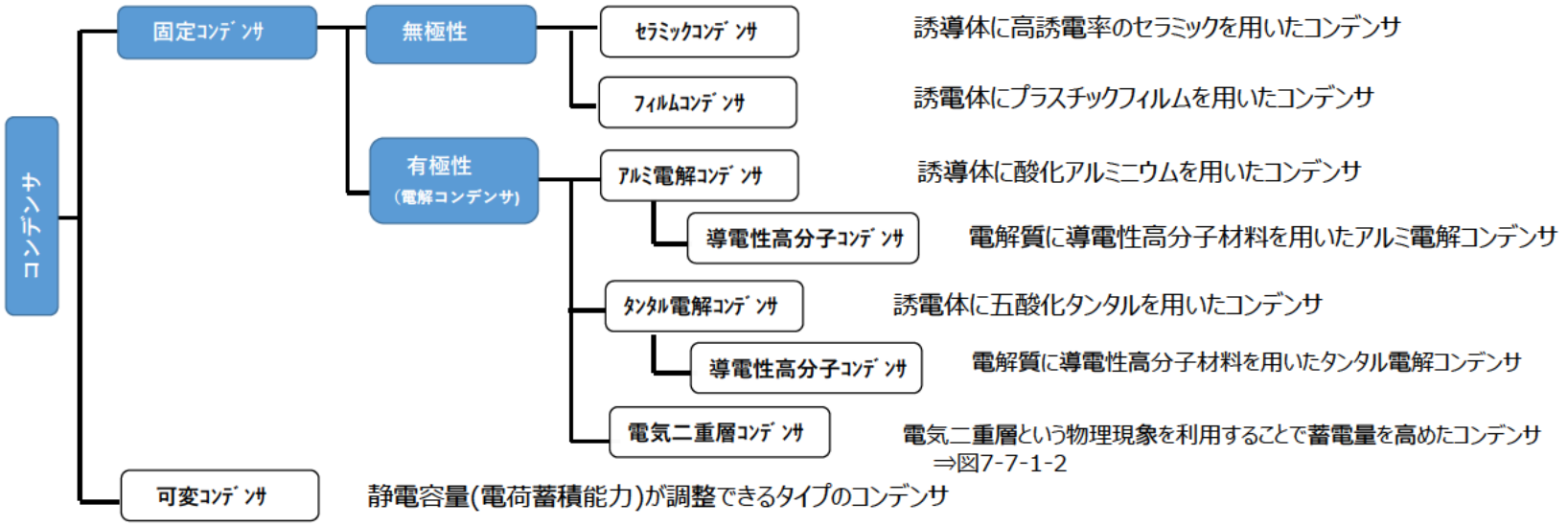
株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査(1)

○輸出令第7項（7）高電圧用コンデンサ

コンデンサは、電気（電荷）を蓄えたり放出したりする電子部品である。コンデンサは使う材料や構造によっていろいろな種類がある。また、種類によって特徴が異なり、設計ではこれらの特徴に基づいて選択する。主なコンデンサの種類を図7-7-1に示す。

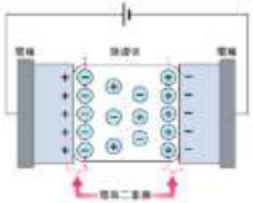
図7-7-1　コンデンサの種類



※電気二重層：流体中の物体の界面に電位が与えられたときに形成される2層の構造

【電気二重層コンデンサ】
☆充放電寿命： 原理的に無制限
☆充放電の制限： 無し
☆充電時間： 数秒
☆使用温度： -40～85℃

図7-7-1-2　電気二重層の模式図



1.対象品目の概要調査(2)

○輸出令第7項（7）高電圧用コンデンサ

以下に主なコンデンサについて説明する。

☆**セラミックコンデンサ**：構造を図7-7-2の上段に示す。

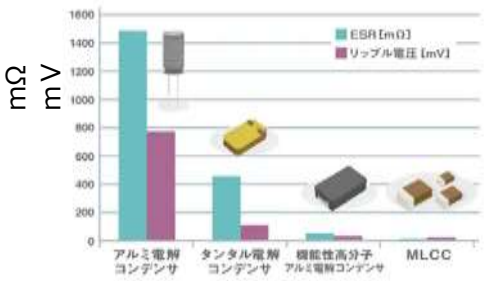
セラミックコンデンサは、誘導体に高誘電率のセラミックを用いたコンデンサで、以下の特徴がある。

・無極性
・優れた高周波特性(低ESR)
・高耐熱
・長寿命

※ＥＳＲとは等価直列抵抗の略で、コンデンサ内に存在する直列抵抗成分を指す。
高周波、高電流、温度限界などの動作条件によっては重大な影響を及ぼす可能性がある。

※積層セラミックコンデンサ（MLCC）は、酸化チタンやチタン酸バリウムなどの誘電体と電極を多数積み重ねたチップタイプのセラミックコンデンサで、 高価ではあるが、優れた高周波特性などのメリットを持ち、小型で大容量を実現できるため、近年、アルミ電解コンデンサの置き換えが行われている。（図7-7-3）

図7-7-3　電解コンデンサのMLCCへの置き換え



ESRが低いコンデンサほど、リップル電圧を小さく抑制することができる。

電解コンデンサの置き換えとして、MLCCは最適パフォーマンスを発揮する。

☆**フィルムコンデンサ**：構造を図7-7-2の下段に示す。

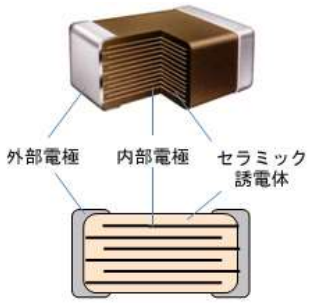
フィルムコンデンサは、誘電体にプラスチックフィルムを用いたコンデンサで、以下の特長がある。

・無極性
・優れた高周波特性(低ESR)
・優れた温度特性(温度による静電容量の変化率が小さい)
・静電容量の高精度対応可能
・長寿命

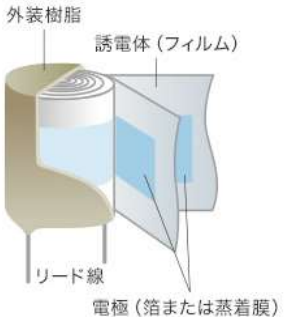
セラミックコンデンサより高性能なコンデンサであるが、形状が大きく高価という短所があるため、セラミックコンデンサではカバーできない電圧・容量域や高性能/高精度用途で使用される。

図7-7-2　コンデンサの構造(1)

【セラミックコンデンサ】



【フィルムコンデンサ】



1.対象品目の概要調査(3)

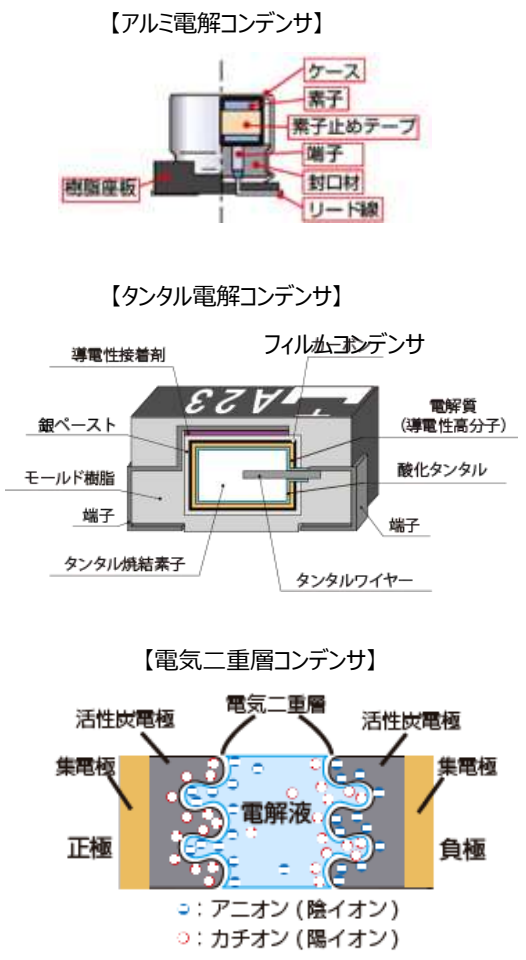
○輸出令第7項（7）高電圧用コンデンサ

☆**アルミ電解コンデンサ**：構造を図7-7-4上段に示す。
アルミ電解コンデンサは、陽極のアルミ箔の表面に誘電体となるアルミ酸化皮膜を形成させ、電解質(陰極)に電解液(溶媒に電解質を溶かした液体)を用いた構造である。
アルミ電解コンデンサは大容量であることが特長で、アルミ箔の表面をエッチングにより凹凸を形成することで電極表面積を大きくし、さらに酸化皮膜の厚みをオングストロームレベルの極薄で形成することで実現している。
※エッチング加工とは、エッチング液などの薬品による腐食作用を利用して金属を溶解加工する技術で、IC の回路を形成する工程で用いられる。

☆**タンタル電解コンデンサ**：構造を図7-7-4中段に示す。
タンタル電解コンデンサの基本構造はアルミ電解コンデンサとほぼ同一であり、陽極となるタンタル金属粉の焼結体の表面に誘電体となる五酸化タンタルを形成させ、電解質として二酸化マンガン(固体)を用いた構造である。
タンタル電解コンデンサはアルミ電解コンデンサよりも小型で周波数特性に優れ、寿命が長い(電解質が固体)という特長があるが、ショートして発火に至る危険性があるため、安全対策が必要である。

☆**電気二重層コンデンサ**：構造を図7-7-4の下段に示す。
電気二重層コンデンサは、アルミ電解コンデンサと二次電池(バッテリー)の中間の容量を持つ特殊なコンデンサで、充放電は、正・負極に用いた活性炭の電極表面のイオンの吸着・脱着を利用したものである。
・充放電サイクル数が特性劣化に殆ど影響しない (メンテナンスフリー)
・充放電が簡単(0Vまで放電可能、端子電圧でエネルギー量が分かる、微少電流・大電流充電可能)
・電池のような規制(回収、廃棄、関税)の対象外
のような特徴があり、停電時のICメモリのデータ保護など、バックアップ用電源として利用される。

図7-7-4　コンデンサの構造(2)



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

〇輸出令第7項（7）高電圧用コンデンサ

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容では赤字の部分に相違が見られる。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(7)	6	1	六	高電圧用のコンデンサであって、次のいずれかに該当するもの	
7(7)	6	1	六	イ　反復サイクルが10ヘルツ未満のコンデンサであって、次の（一）から（三）までのすべてに該当するもの （一）　定格電圧が5キロボルト以上のもの （二）　エネルギー密度が250ジュール毎キログラム以上のもの （三）　総エネルギーが25キロジュール以上のもの	反復サイクルが10ヘルツ未満 定格電圧が5キロボルト以上 エネルギー密度が250ジュール毎キログラム以上 総エネルギーが25キロジュール以上
7(7)	6	1	六	ロ　反復サイクルが10ヘルツ以上のコンデンサであって、次の（一）から（四）までのすべてに該当するもの （一）　定格電圧が5キロボルト以上のもの （二）　エネルギー密度が50ジュール毎キログラム以上のもの （三）　総エネルギーが100ジュール以上のもの （四）　10,000回以上充電及び放電の繰り返しをすることができるように設計したもの	反復サイクルが10ヘルツ以上 定格電圧が5キロボルト以上 エネルギー密度が50ジュール毎キログラム以上 総エネルギーが100ジュール以上 10,000回以上充電及び放電の繰り返しをすることができるように設計

Wassenaar規制番号				Wassenaar規制文言（英文）
3桁	細番			
3A001	e			does not apply to batteries, including single-cell batteries.
3A001	e	2		2. High energy storage capacitors as follows:
3A001	e	2	a	2. High energy storage capacitors as follows: a. Capacitors with a repetition rate of less than 10 Hz (single shot capacitors) and having all of the following: 1. A voltage rating equal to or more than 5 kV; 2. An energy density equal to or more than 250 J/kg; and 3. A total energy equal to or more than 25 kJ;
3A001	e	2	b	2. High energy storage capacitors as follows: b. Capacitors with a repetition rate of 10 Hz or more (repetition rated capacitors) and having all of the following: 1. A voltage rating equal to or more than 5 kV; 2. An energy density equal to or more than 50 J/kg; 3. A total energy equal to or more than 100 J; and 4. A charge/discharge cycle life equal to or more than 10 000;

比較原文
・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html
・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令第7項（7）高電圧用コンデンサ

【関連規制】

☆その他の規制
輸出貿易管理令別表第一関係
第一条四十九　パルス用コンデンサであって、次のいずれかに該当するもの
イ　定格電圧が1,400ボルトを超えるものであって、次の（一）から（三）までのすべてに該当するもの
（一）　総エネルギーが10ジュールを超えるもの
（二）　公称静電容量が0.5マイクロファラドを超えるもの
（三）　直列インダクタンスが50ナノヘンリー未満のもの
ロ　定格電圧が750ボルトを超えるものであって、次の（一）及び（二）に該当するもの
（一）　公称静電容量が0.25マイクロファラドを超えるもの
（二）　直列インダクタンスが10ナノヘンリー未満のもの

☆キャッチオール規制
　輸出しようとする貨物や提供しようとする技術が、大量破壊兵器等の開発、製造、使用又は貯蔵もしくは通常兵器の開発、製造又は使用に用いられるおそれがあることを輸出者が知った場合、又は経済産業大臣から、許可申請をすべき旨の通知（インフォーム通知）を受けた場合には、輸出又は提供に当たって経済産業大臣の許可が必要となる。

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令第7項（7）高電圧用コンデンサ

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

コンデンサは日常生活の様々な分野・機器に使用されている。高電圧用コンデンサ（**5kV以上**）は、瞬時に大電流を得ることが出来るコンデンサの特徴を活かして、産業・医療機器だけではなく、軍事用途にも使用されている。コンデンサの種類・用途・使用機器を図7-7-5に示す。

図7-7-5　コンデンサの種類・用途・使用機器

【コンデンサの種類】
<構造上の分類>
・セラミックコンデンサ
・フィルムコンデンサ
・アルミ電解コンデンサ
・導電性高分子ｺﾝﾃﾞﾝｻ(ｱﾙﾐ電解ｺﾝﾃﾞﾝｻ)
・タンタル電解コンデンサ
・導電性高分子ｺﾝﾃﾞﾝｻ(ﾀﾝﾀﾙ電解ｺﾝﾃﾞﾝｻ)
・電気二重層コンデンサ
・可変ｺﾝﾃﾞﾝｻ



【コンデンサの用途、使用する機器】
<一般用途>
・サーキットブレーカー
・電圧計
・コミュニケーションPLC
・モニタリング
・AC / DVコンバーター

<高電圧用途>
☆軍事用途
・航空機発射用電磁カタパルト
・爆発物の雷管
・レールガン
・電熱砲
☆民生用途
[低反復サイクル]
・電源ケーブル検査装置
・砕石器（膀胱石を砕く機械）
・レーザーショック機
・スポット溶接機
・除細動器
[高反復サイクル]
・医療用X線装置
・粒子加速器
・配電設備
・半導体のパルスイオン注入機

<軍事用途>
レールガン



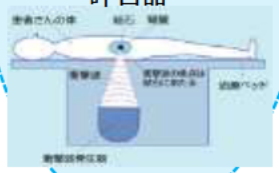
航空機発射用電磁カタパルト



<民生用途 低反復サイクル>
スポット溶接機



砕石器



<民生用途 高反復サイクル>
粒子加速器



医療用X線装置



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令第7項（7）高電圧用コンデンサ

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（１）

【軍事用途に用いられる高電圧コンデンサ（**5kV以上**）の例】

高電圧コンデンサは蓄えた電気を吐き出すことで、瞬時に大電流を流し、高エネルギー密度を得ることができるため、軍事用途にも使用されている。軍事用途としては、・航空機発射用電磁カタパルト、・爆発物の雷管、・レールガン、・電熱法等がある。

☆「**レールガン**」は物体を電磁気力により加速して撃ち出す装置である。推力に電磁力を用いるため、瞬時に大電流が必要とされ、電力をコンデンサバンクに溜めてから放出することで、高速で撃ち出すことが出来る。

※「電磁力Ｆ＝磁束密度Ｂ×電流Ｉ×導体の長さｌ」より、大きな駆動力を得るには大電流が必要になるが、導線の発熱でエネルギーが熱に代わってしまい効率が悪くなるため、超電導材を用いることもある。

☆「**航空機発射用電磁カタパルト**」は、リニアモーターによって航空母艦から固定翼機を発射するシステムである。

レールガンと同じで、瞬時に大電流が必要となるため、高電圧コンデンサを使用する。

超電導エネルギー貯蔵システムを用いたレールガンを図7-7-6に、

航空機発射用電磁カタパルトを図7-7-7に示す。

図7-7-6　超電導エネルギー貯蔵システムを用いたレールガン

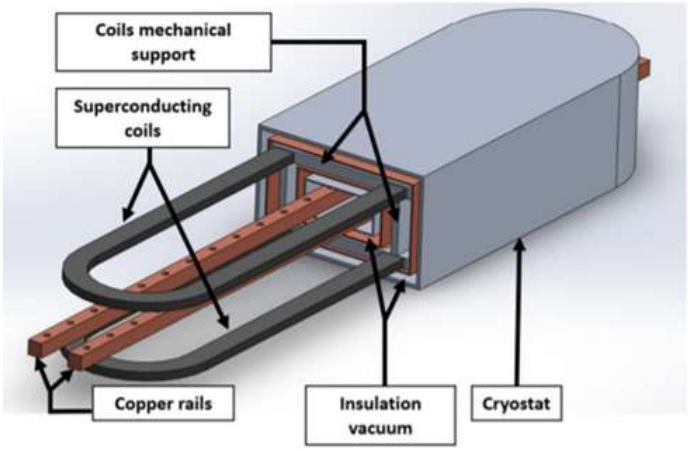


図7-7-7　航空機発射用電磁カタパルト



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令第7項（7）高電圧用コンデンサ

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（２）

【民生用途に用いられる高電圧コンデンサ（**5kV以上**）の例】

＜**低反復サイクル**の例＞輸出令第7項(7)の(イ)

☆**スポット溶接機**

重ね合わせた金属板を電極で挟み、これに大電流を流し、電気抵抗による発熱で接合部を溶融し、更に圧力を加えて接合する溶接方法で、＜加圧・通電・保持＞の３つの工程を経て作業が完了する。反復サイクルは大きくないが、大電流を必要とする。

スポット溶接機を図7-7-8に示す。

＜**高反復サイクル**の例＞輸出令第7項(7)の(ロ)

☆**医療用Ｘ線装置**

産業用Ｘ線装置と異なり、生体を撮影するため被曝線量を抑える必要があり、高速で画像を撮影出来るようになっている。装置には大電流が供給できる高電圧用コンデンサが使用されているが、高速撮影を可能にするために、コンデンサには高反復サイクルが求められる。医療用Ｘ線装置を図7-7-9に示す。

高電圧用コンデンサはリスト規制対象であるため、上記装置（P7,P8）に使用されている高電圧用コンデンサは、「輸出令第7項(7)」に該当する可能性があるため、個別判定が必要である。

図7-7-8　ポット溶接機



図7-7-9　医療用Ｘ線装置



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令第7項（7）高電圧用コンデンサ

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化

規制の対象となる高電圧コンデンサは、**定格電圧が5キロボルト以上**のものであって、反復サイクルにより（イ）、（ロ）に分類されている。

規制パラメータ輸出令第7項(7)を図7-7-10に示す。

定格電圧が**5キロボルト以上**の高電圧用コンデンサについては、以下の項目による個別判定が必要である。

（一）定格電圧
（二）エネルギー密度
（三）総エネルギー
（四）充、放電の繰り返し可能回数

コンデンサの種類と特徴を表7-7-1に示す。

図7-7-10　規制パラメータ輸出令第7項(7)

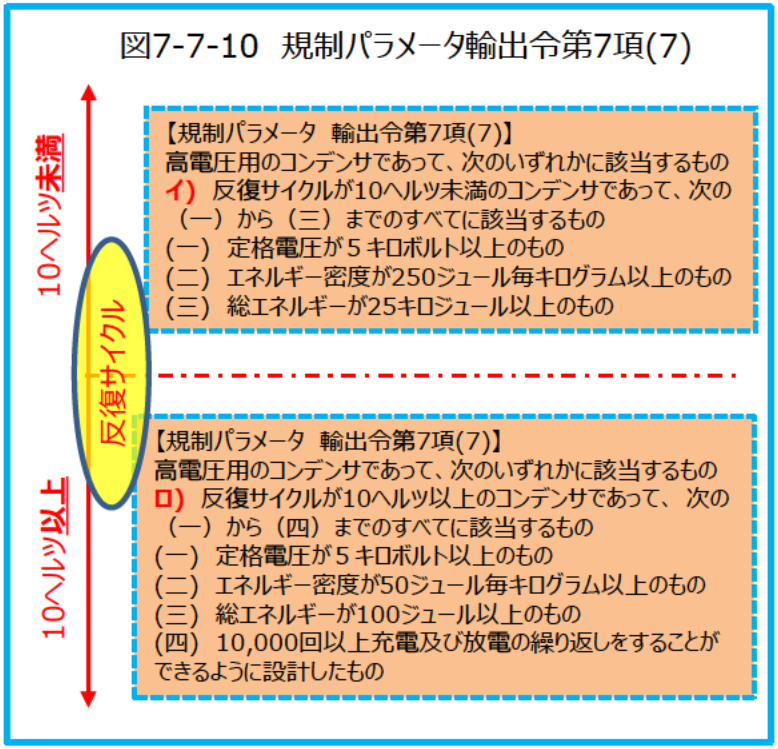


表7-7-1　コンデンサの種類と特徴

項目	ｾﾗﾐｯｸｺﾝﾃﾞﾝｻ	ﾌｨﾙﾑｺﾝﾃﾞﾝｻ	ｱﾙﾐ電解ｺﾝﾃﾞﾝｻ	ﾀﾝﾀﾙ電解ｺﾝﾃﾞﾝｻ
高容量	△	×	○	○
高電圧対応	○	◎	○	△
長寿命	◎	◎	△	○
温度特性	△	◎	△	○
低ESR	◎	◎	×	△
極性	なし	なし	あり	あり
主要用途	カップリング用 デカップリング用 平滑用	電源ノイズ用 放電回路用 共振用	平滑用 デカップリング用	カップリング用 デカップリング用

選定



4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令第7項（7）高電圧用コンデンサ

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

高電圧コンデンサの規制パラメータは、反復サイクルが、(イ)10ヘルツ未満、(ロ)10ヘルツ以上、の二つに分けられている。最初に反復サイクルが(イ)10ヘルツ未満について記述する。該当する用途としてはレールガンがあるが、ここでは、ＪＡＸＡ宇宙科学研究所のレールガンを例に説明する。飛翔体は電源（コンデンサーバンク）よりの大電流が発生させる磁場と飛翔体後部のアーマチャ（コイルの一種）を流れる電流との相互作用で加速される。

最大800kAの大電流をコンデンサーバンク電源より供給した実験では、
①電源エネルギー:150kJ、飛翔体質量:1.1g、飛翔体速度:5.5km/s、変換効率:11%
②電源エネルギー:300kJ、飛翔体質量:1.1g、飛翔体速度:6.6km/s、変換効率:8%
であった。これより、エネルギーの変換効率は10%前後であることが分かる。

※コンデンサバンク：高電圧コンデンサに蓄積した電荷を利用した大電流発生装置

規制パラメータ輸出令第7項(7)の(イ）の領域を図7-7-11に示す。

レールガンは火薬砲では実現できない弾速を得ることができる。米海軍が開発を進めているレールガンは、1分間に10発を発射することができ、2,000m/sで射程は約200kmとされる。

飛翔体をレールガンの砲弾10kgとし、エネルギー変換効率を10%とすると、

運動エネルギーＥ＝1/2質量Ｍ×速度Ｖ^2

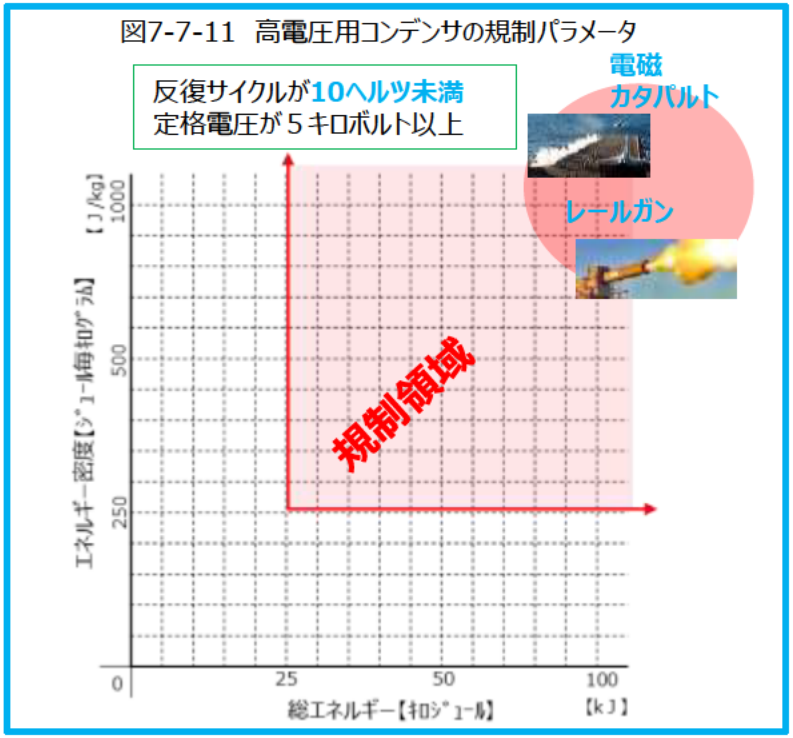
より、速度2,000m/sを得るためには、総エネルギーは200MJ必要である。これはコンデンサバンクとして規制対象であることが図7-7-11より分かる。

※1. コンデンサバンクの使用コンデンサ数が8,000個以下なら個別コンデンサも規制対象。

※2.反復サイクル10ヘルツ以上の規制パラメータ(ロ)では、さらに小さな総エネルギー、エネルギー密度から規制対象となる。

【規制パラメータ　輸出令第7項(7)】
高電圧用のコンデンサであって、次のいずれかに該当するもの
イ）反復サイクルが10ヘルツ未満のコンデンサであって、次の（一）から（三）までのすべてに該当するもの
（一）定格電圧が５キロボルト以上のもの
（二）エネルギー密度が250ジュール毎キログラム以上のもの
（三）総エネルギーが25キロジュール以上のもの

図7-7-11　高電圧用コンデンサの規制パラメータ



4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令第7項（7）高電圧用コンデンサ

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

次に、反復サイクルが(ロ)10ヘルツ以上について記述する。用途としては、・医療用X線装置、・粒子加速器、・配電設備等、・半導体のパルスイオン注入機等がある。

規制パラメータ輸出令第7項(7)の(ロ) の領域を図7-7-12に示す。

粒子加速器を例に挙げて説明する。粒子加速器は、粒子に運動エネルギーを与えて、光の速度近くまで加速する装置で、粒子の加速には、電場を用いる。この電場に大電流を供給するために高電圧コンデンサが使われている。

加速器の種類とエネルギーを図7-7-13に示す。

※電極間の電圧が1ボルトの時、電子の得るエネルギーを1電子ボルトと言い、1電子ボルト＝1eV＝1.602×10^{-19}ジュールである。

Ｊ－ＰＡＲＣのリニアック(線形加速器)の場合、「最大50Hzの繰り返しでパルス運転され、600MeV加速時の最大ビーム出力は200kW」とあるので、200kW/50=4,000Jのエネルギーを消費しており、図7-7-12よりコンデンサバンクとして規制対象であることが分かる。

※粒子加速器の電源ユニットに使用されているコンデンサが40個以内であれば、コンデンサ単体が規制対象になる。

【規制パラメータ 輸出令第7項(7)】
高電圧用のコンデンサであって、次のいずれかに該当するもの
ロ) 反復サイクルが10ヘルツ以上のコンデンサであって、次の（一）から（四）までのすべてに該当するもの
(一) 定格電圧が５キロボルト以上のもの
(二) エネルギー密度が50ジュール毎キログラム以上のもの
(三) 総エネルギーが100ジュール以上のもの
(四) 10,000回以上充電及び放電の繰り返しをすることができるように設計したもの

図7-7-12 高電圧用コンデンサの規制パラメータ

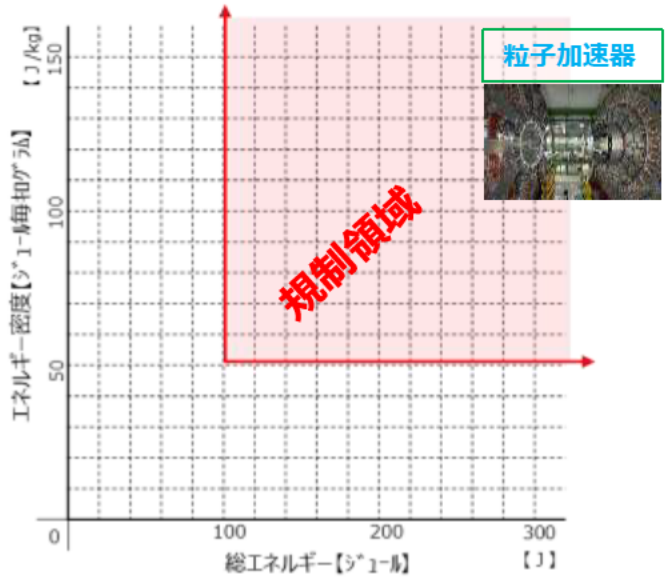


図7-7-13 加速器の種類とエネルギー

加速器の種類(加速粒子)	加速電場	ビーム軌道	エネルギー領域
コックロフト・ウオルトン型加速器(陽子、イオン)	静電場	直線	2~4 MeV
バンデグラーフ型加速器(陽子、イオン)	静電場	直線	10 MeV
サイクロトロン(陽子、イオン)	高周波	ら旋	数十 MeV
ベータトロン(電子)	高周波	円	数十 MeV
シンクロトロン(電子、陽子、イオン)	高周波	円	1 TeV
線形加速器(電子、陽子)	高周波	直線	数十 GeV

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令第7項（7）高電圧用コンデンサ

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【高電圧コンデンサの市場規模と成長性】

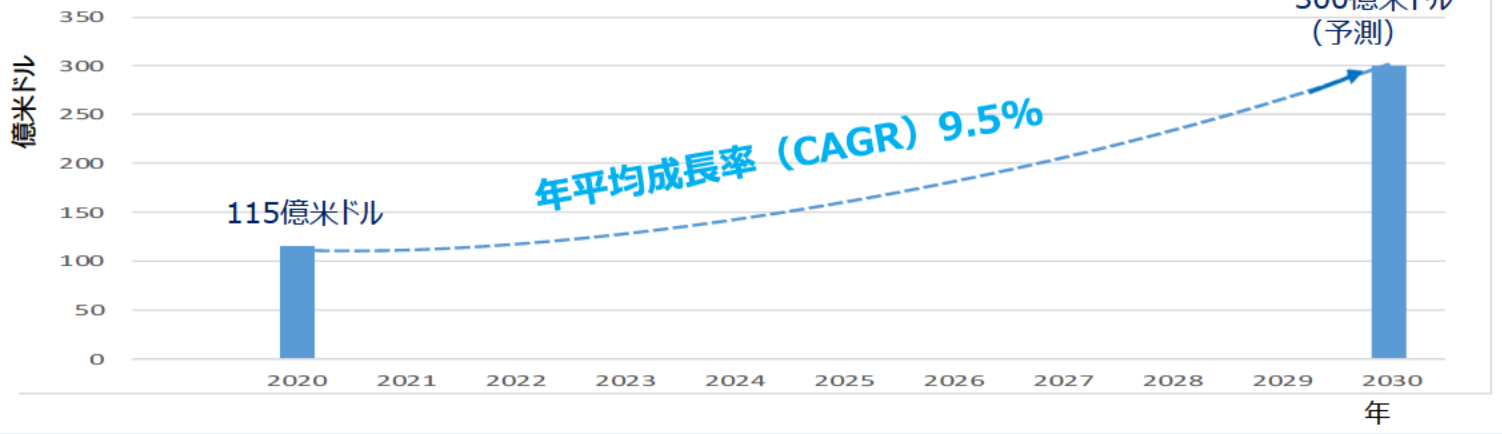
2021年10月26日にREPORTOCEANが発行したレポートによると、2020年の世界の高電圧コンデンサ市場規模は115億米ドルであり、2021年から2030年の予測期間において、9.5%以上の成長率が見込まれていて、2030年には300億米ドルに達すると予測されている。

高電圧コンデンサの世界市場推移を図7-7-14に示す。

成長の要因として、世界的な次世代送電網への投資や、セラミック積層コンデンサの需要増などが挙げられる。

https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000003408.000067400.html

図7-7-14　高電圧コンデンサの世界市場推移



4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令第7項（7）高電圧用コンデンサ

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

世界の高電圧コンデンサメーカーの概要を表7-7-2に示す。

表7-7-2　世界の高電圧コンデンサメーカー

企業	会社概要
API Capacitors （イギリス）	高電圧用コンデンサの専門メーカーで、ヨーロッパ諸国、北米が顧客。顧客ニーズに基づくカスタムデザインのコンデンサを提供する。
General Atomics, Inc.（アメリカ）	高電圧コンデンサ、パルスパワーシステム、エネルギー貯蔵バンクの設計、開発、製造、およびテストにおけるリーダー的企業。
Maxwell Technologies （アメリカ）	自動車、輸送、再生可能エネルギー、バックアップ電源、産業用および家庭電化製品向けエネルギー貯蔵に注力。
Magnewin Energy（インド）	シャントコンデンサメーカーで、エネルギー貯蔵、パルス放電、医療機器、インパルス発生器、分圧器用のコンデンサを提供している。
UCAP Power, Inc.（アメリカ）	再生可能エネルギー関連で強みを持ち、電力分野を広範囲にカバーする世界的企業。風力タービン、発電機、自動車、等にスーパーキャパシタを供給している。
Vishay Intertechnology, Inc.（アメリカ）	ダイオード、整流器、赤外線通信デバイス、オプトカプラー、フィルムコンデンサ等の電子部品を販売しており、産業用機器、コンピュータ、自動車機器、民生機器、通信機器、軍用、航空宇宙、医療用機器などに使用されている。
Eaton Corporation PLC（アメリカ）	電気自動車の電子部品およびシステムを提供している。充電スタンドは日本国内でトップシェア。
TDK株式会社	超高電圧セラミックコンデンサは、40年以上の開発・販売の実績を誇り、配電網の開閉器、変電所の遮断器や、医療および産業用X線画像装置などに多用されている。
日立製作所	タンタルコンデンサ、セラミックコンデンサ、フィルムコンデンサ、アルミ電解コンデンサを製造販売する。成形タンタル表面実装コンデンサの世界最大の企業。
村田製作所	セラミック、高分子アルミ、トリマ、単層マイクロチップ、バリアブル等、様々な種類のコンデンサを提供している。豊富なラインアップを取りそろえ、セラミックコンデンサでは世界最大の企業。
シーメンス社（ドイツ）	ドイツのバイエルン州ミュンヘンの企業。フィルムコンデンサで強みを持つ。
Prosperity Dielectrics（台湾）	ディスク型半導体コンデンサ素子、積層セラミックチップコンデンサ、チップ抵抗器、ダイオード、コイル等を製造する企業。
Walsin Technology Corporation（台湾）	多層セラミックチップコンデンサ、チップ抵抗器、高周波デバイス、無線周波数デバイス等を、主にアジア市場において製品販売している。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（８）エンコーダ

令和 4年3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（１）

○輸出令7項（8）エンコーダ

エンコーダとは、回転位置または直線位置をセンサで測定し機械的な位置の変化を電気信号として出力する装置である。測定する位置の対象は、回転角変位と直線変位で、回転角変位を測定するエンコーダはロータリーエンコーダ、直線変位を測定するエンコーダはリニアエンコーダと呼ばれている。エンコーダは検出方法によって、光学式、磁気式、電磁誘導式に分けられる。

図7-8-1にエンコーダの種類を示す。

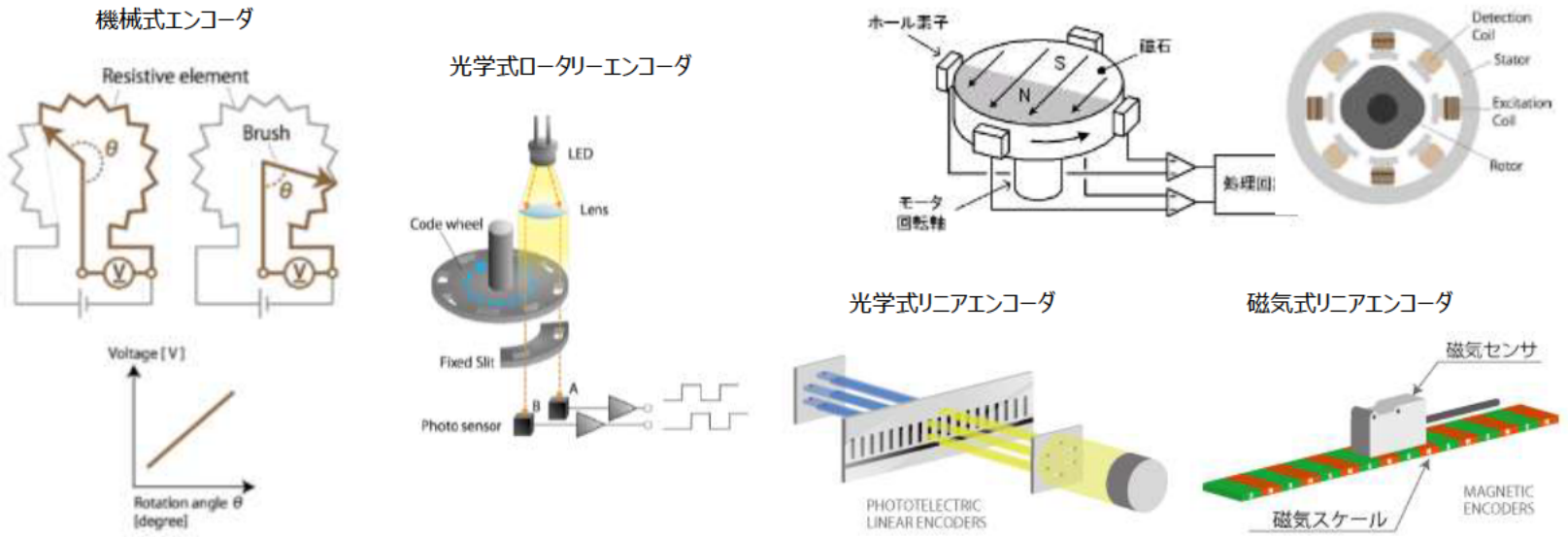
・機械式エンコーダ　：回転角に比例して電気抵抗が変化する可変抵抗で回転位置を検出する方式である。このような機械式のエンコーダーは一般的にポテンショメーターと呼ばれてる。ポテンショメーターは抵抗体の上を摺動子 (しゅうどうし) が動くと、摺動子の移動距離と比例して抵抗値が変化する。

・光学式エンコーダ　：等間隔に穴の開いた盤に光を当てて、穴を通過する光の周期を検出することで、変位を測定する。光は機械に対する影響が少ないため、一般的に広く利用されている。

・磁気式エンコーダ　：回転軸またはスケールに取り付けた磁石の磁界が、回転または移動により変動することを利用して変位の測定を行う。

・電磁誘導式エンコーダ：回転軸の周りに取り付けられたコイルに発生する電磁誘導を検出することで、変位の測定を行う。

図7-8-1　エンコーダの種類



1.対象品目の概要調査（２）

○輸出令7項（8）エンコーダ

一般的に広く使用されている光学式エンコーダは、構造的に「インクリメンタルエンコーダ」と「アブソリュートエンコーダ」に分類できる。例として光学式ロータリーエンコーダで以下に説明する。

「インクリメンタルエンコーダ」は回転速度に比した周波数のパルスを発生し相対的な移動量を電気信号に変換して出力する。「インクリメンタルエンコーダ」の回転角度の相対値出力の例を図7-8-2に示す。発光ダイオードから出力された光を、回転盤に取り付けられた位相が検出できる固定スリットを通してフォトトランジスタで受光し、回転角度の相対値を得る。

「アブソリュートエンコーダ」は、回転角度の絶対値を電気信号に変換して出力する。「アブソリュートエンコーダ」の回転角度の絶対値出力の例を図7-8-3に示す。発光ダイオードから出力された光を、回転盤に取り付けられた絶対値が検出できる固定スリットを通してフォトトランジスタで受光し、回転角度の絶対値を得る。

図7-8-2　インクリメンタルエンコーダの回転角度の相対値出力の例

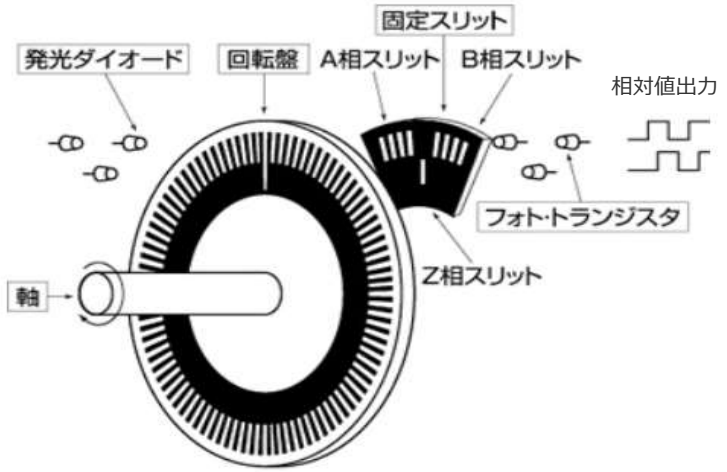
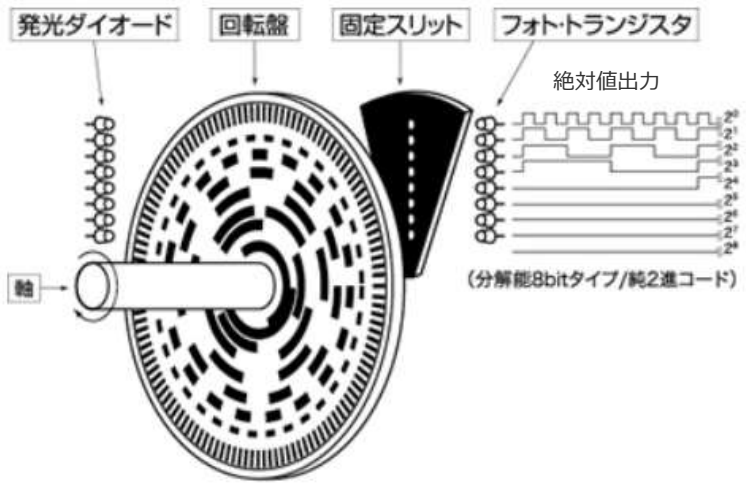


図7-8-3　アブソリュートエンコーダの回転角度の絶対値出力の例



1.対象品目の概要調査（３）

○輸出令7項（8）エンコーダ

コントローラの一時的故障での「インクリメンタルエンコーダ」と「アブソリュートエンコーダ」の違いを図7-8-5に示す。コントローラが一時故障した時、システムの制御ができなくなる。この場合、「アブソリュートエンコーダ」は位置情報を保持しているが、「インクリメンタルエンコーダ」は相対位置しかデータとしてない。

また、電源ON/OFFでの「インクリメンタルエンコーダ」と「アブソリュートエンコーダ」の違いを図7-8-3に示す。「アブソリュートエンコーダ」は電源がOFFの時、位置情報を保持しているが「インクリメンタルエンコーダ」は保持していない。

よって、コントローラが一時的に故障した場合あるいは電源をOFFした場合は、「アブソリュートエンコーダ」は原点復帰が必要なく高速での再起動が可能となる。「アブソリュートエンコーダ」は高精度な位置情報が得られるので工作機械やロボットにあるサーボモータの位置制御等に使われている。

図7-8-4　コントローラの一時的故障における「インクリメンタルエンコーダ」と「アブソリュートエンコーダ」の違い

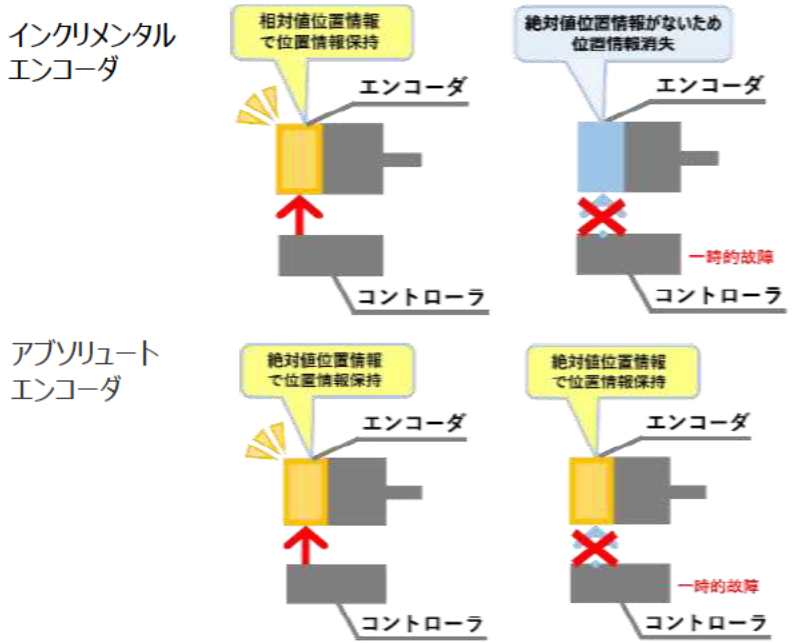
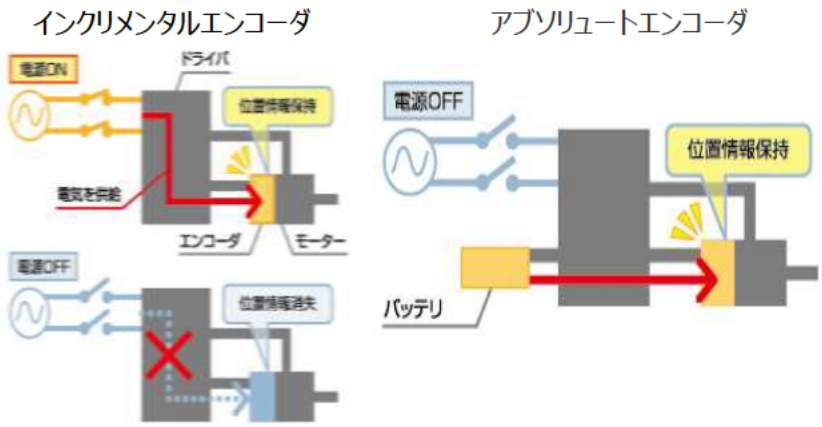


図7-8-5　電源ON/OFFにおけるインクリメンタルエンコーダ」と「アブソリュートエンコーダ」の違い



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令7項（8）エンコーダ

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(8)	6	1	八	回転入力型のアブソリュートエンコーダであって、角度の変換誤差の絶対値が1秒以下のもの及び当該エンコーダ用に設計されたリング、ディスク又はスケール （解釈）モーター等の回転角度、回転速度を検出するセンサー（ロータリーエンコーダ）のうち、絶対値を出力する方式のものをいう。	角度の変換誤差の絶対値が1秒以下

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3A1	f	f. Rotary input type absolute position encoders having an "accuracy" equal to or less (better) than 1,0 second of arc and specially designed encoder rings, discs or scales therefor;

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
貨物・技術のマトリクス表
（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
PUBLIC DOCUMENTS Volume II
List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

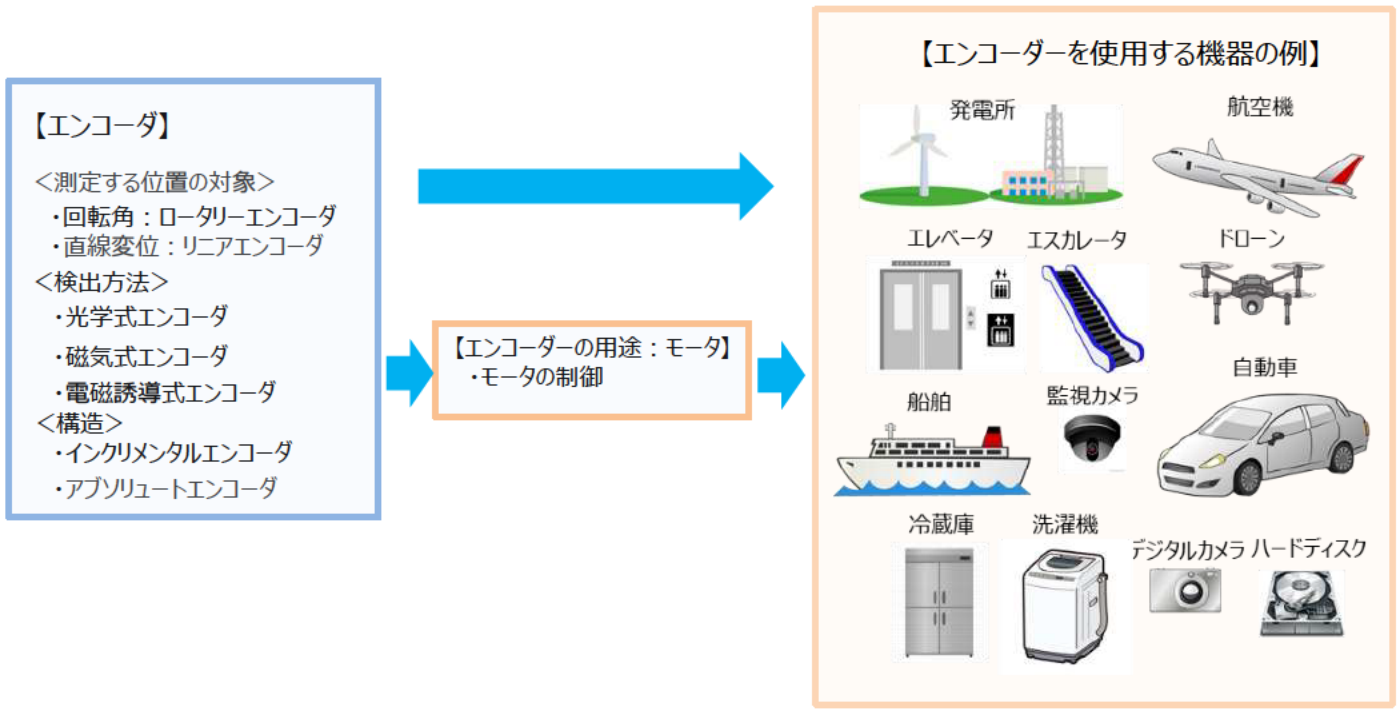
○輸出令7項（8）エンコーダ

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（1）

エンコーダを使用する機器の例を図7-8-6に示す。エンコーダは、位置を把握する用途として機器に使用されるものと、モータの制御のために使用されるものがあり、用途としてこれらを両方を使用している機器も多数ある。同じ機器においてもこれらが使用されている、いないが混在している。エンコーダが使用されている機器は、洗濯機や冷蔵庫、エアコンなどの家電製品、エレベータやエスカレータ、自動ドアなどの社会インフラ機器、自動車や列車、航空機、工作機械、Factory Automation、監視カメラ、医療機器、風力発電、航空、レーダー、宇宙関連機器等とあらゆる機器に使用され、なくてはならない部品となっている。

次頁以降に、エレベータ、工場等のベルトコンベア、レーダーアンテナシステムモータ、無人搬送ロボット用モータモジュールのエンコーダの用途例を説明する。

図7-8-6　エンコーダの用途と使用する機器の例



3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（8）エンコーダ

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（２）【エレベータ】【ベルトコンベア】

エンコーダを使用している具体例として、エレベータと工場などで使用されているベルトコンベアの例を以下に示す。

エレベータでのエンコーダの使用例を図7-8-7に示す。2009年9月の建築基準法の改正によって、新規出荷するエレベータへの戸開走行保護装置の設置が義務付けられている。戸開走行保護装置の主な構成要素として、①一方のブレーキが故障してもかごを保持できる制動装置の二重化、②かごが乗り場床面から上下に特定の距離を移動したことを感知する特定距離感知装置、③戸開走行を感知した時、通常の運転制御から独立して自動的に動力を遮断し、かごを制御する安全制御プログラム、④かごの戸・乗り場の戸が開いていることのかごスイッチ・乗り場スイッチを設置する必要がある。この②の特定距離感知装置においてかごが乗り場床面から上下に特定の距離を移動したことを感知するために、エンコーダは使用されている。また、この巻上機モータにも、エンコーダが使用されることがある。

また、ベルトコンベアでの使用例を図7-8-8に示す。エンコーダとセンサと組み合わせることにより、センサから一定量の移動を制御することができる。センサでワーク検出後のエンコーダのパルス数をカウント開始することで、毎回、センサから一定量の移動を正確に制御できる。

図7-8-7　エレベータでのエンコーダの使用例

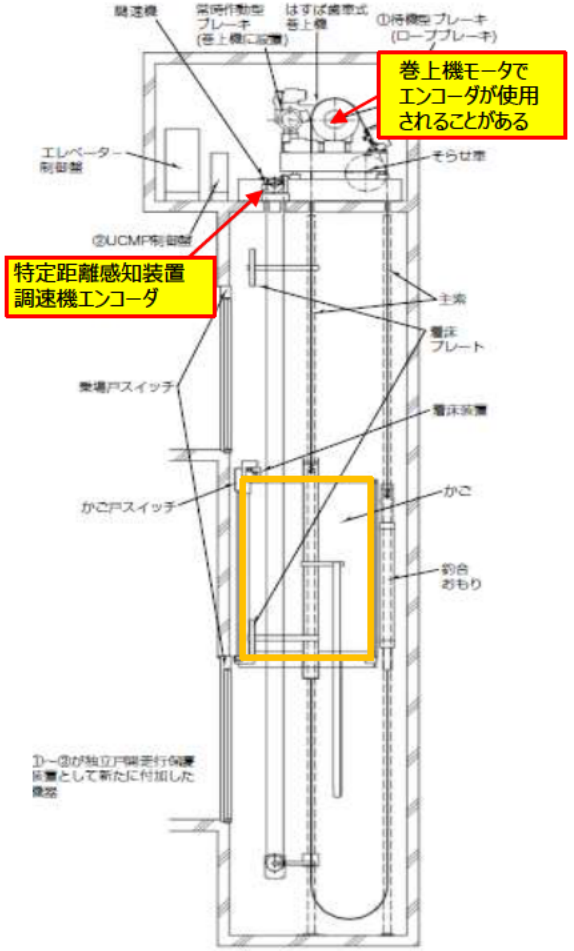
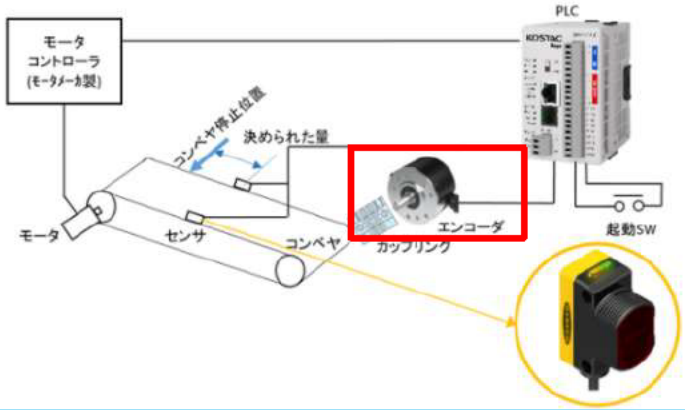


図7-8-8　ベルトコンベアでの使用例



3.品目の主たる用途の調査分析（１）

○輸出令7項（8）エンコーダ

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（３）【レーダアンテナシステム】

天球上の電波源を追尾観測するためのレーダーアンテナシステムの鹿島34m局において、アンテナの角度制御としてAZ角度エンコーダが使用されていた。鹿島34m局のアンテナを図7-8-9に、構造図を図7-8-10に、使用されていたエンコーダを図7-8-11に示す。この34mアンテナは1988年に建設されたアンテナで、鹿島宇宙技術センターのなかで最大のアンテナであった。2019年の台風の強風により大きな損傷を受けて駆動不能になり、2021年3月末までに撤去されている。

図7-8-10　鹿島34m局の構造図

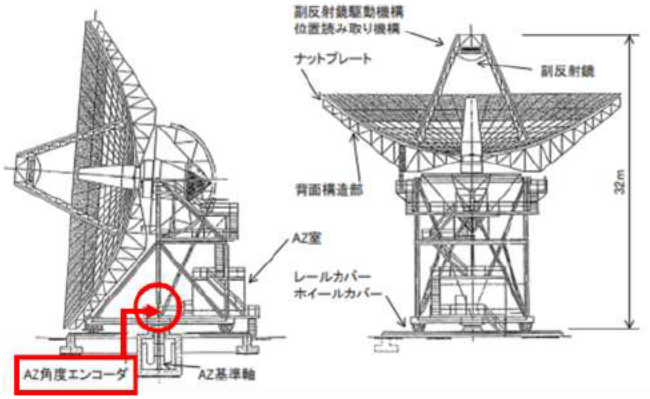


図7-8-9　鹿島34m局のアンテナ



図7-8-11　鹿島34m局のエンコーダ



3.品目の主たる用途の調査分析（1）

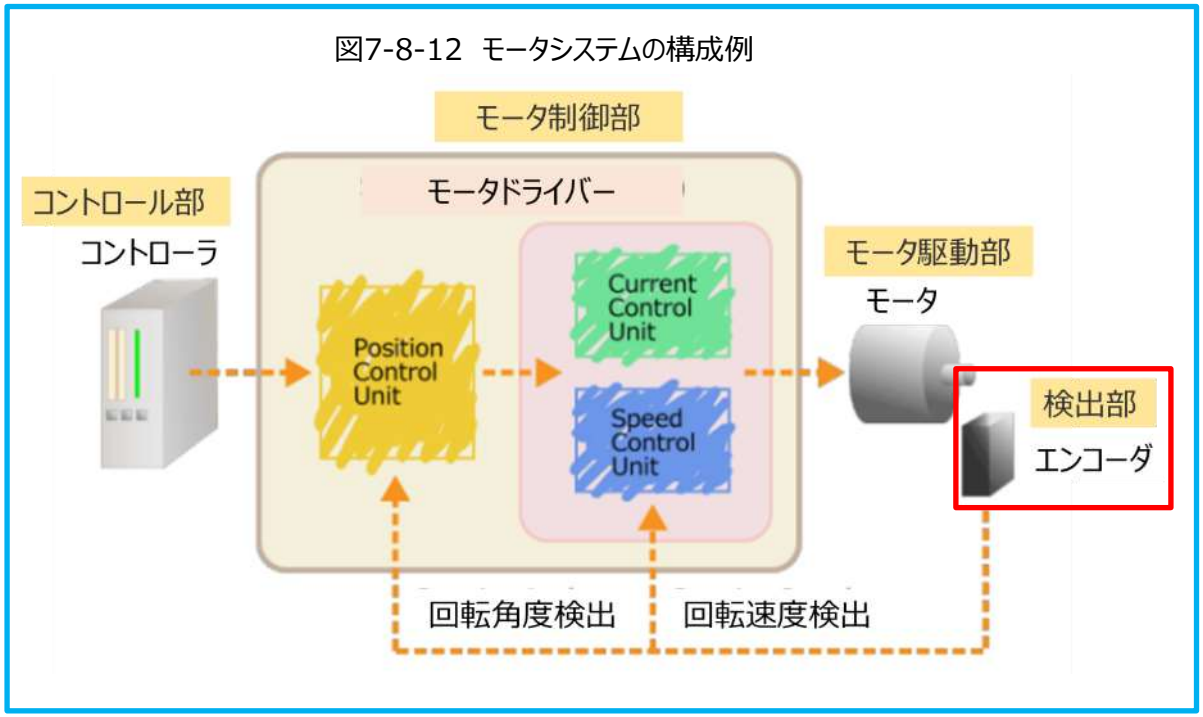
○輸出令7項（8）エンコーダ

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（４）【サーボモータ】

エンコーダは、用途として多くのモータのシステムに使用されている。エンコーダを使用したモータシステムの構成例を図7-8-12に示す。モータシステムはコントロール部、モータ制御部、モータ駆動部、検出部で構成されている。

モータコントロール部ではマイクロプロセッサにより、モータの起動、運転、所望の速度、停止などのコマンドデータをモータ制御部であるモータドライバに送信する。モータドライバはコマンドデータとエンコーダの位置、速度データを比較し差分を補正するためモータの駆動に必要な電流をモータに送る。検出部であるエンコーダは速度、角度の変位を測定する。この測位データをモータ制御部であるモータドライバへフィードバックする。このようにエンコーダを使用し基準となるものと比較し安定となる方向にフィードバックをかけることによって、最適となるように位置／速度等を自動制御するモータは、サーボモータと言われている。

図7-8-12　モータシステムの構成例



3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（8）エンコーダ

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（５）【無人搬送ロボット】

エンコーダを使用している具体例として無人搬送ロボット用サーボモータモジュールの例を以下に説明する。

減速機、モータ、ブレーキ、エンコーダ、モータドライバ、センサなど、モータとその制御に必要な周辺機器を一つに収めたオールインワンモータモジュールを図7-8-13に示す。内部構造からインクリメンタルエンコーダとアブソリュートエンコーダ両方を使用しており、ロボットの位置及び速度制御の精度を求めていることが分かる。

無人搬送ロボット用モータモジュールの使用例を図7-8-14に示す。搬送機器の駆動輪、ロボットの関節、FA機器の送り軸等に使用される。

図7-8-13　無人搬送ロボット用モータモジュールの例

【外観】



【内部構造】

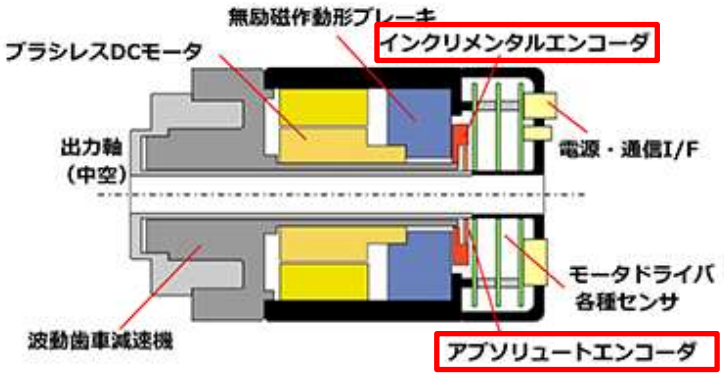
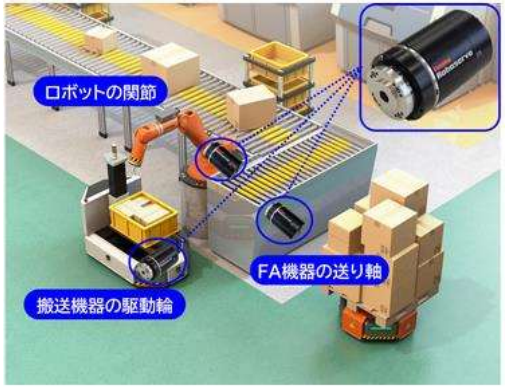


図7-8-14　無人搬送ロボット用モータモジュールの使用例





3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（8）エンコーダ

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（１）【兵器照準システム】

遠隔検知した標的地帯の画像を表示する双方向兵器照準システムの例を図7-8-15に示す。（特願2016-526116） UAV（Unmanned Aerial Vehicle）が標的をカメラ（図中150）で捉え、そのデーターを無線で兵器に送り、兵器はそのデータに基づき兵器の角度や回転角を制御し、標的に向けてミサイルを発射する。エンコーダは兵器において、「①兵器の角度」では常時兵器の角度を制御するために、「②兵器の回転」では常時回転角を制御するために使用されている。また、UAVにおいても、標的の追従において、「③傾き」でカメラの傾きの角度を制御するために、「④首振り」でカメラの方向を制御するために使用されている。 実際にこのシステムに使用される米海兵隊のNMESIS地対艦ミサイル（無人発射車両）を図7-8-16に、角度の回転制御に使用されるHEIDENHAIN社（ドイツ）の角度エンコーダを図7-8-17に示す。

図7-8-15 遠隔検知した標的地帯の画像を表示する双方向兵器照準システムの例

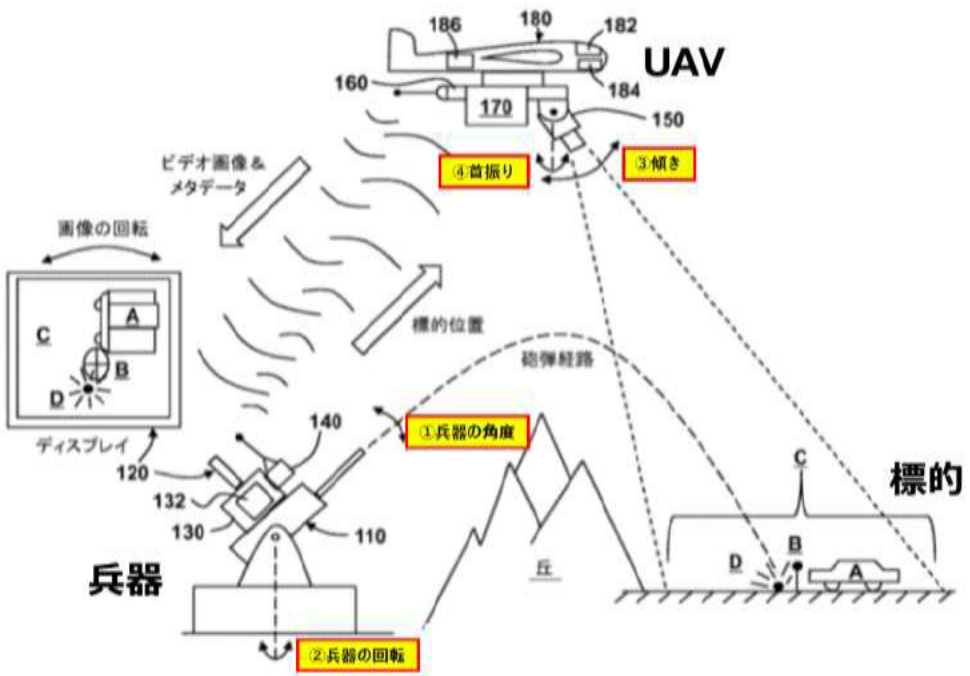


図7-8-16 米海兵隊のNMESIS地対艦ミサイル（無人発射車両）



図7-8-17 HEIDENHAIN社（ドイツ）の角度エンコーダ



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（8）エンコーダ

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（２）【国境監視システム】

エンコーダが用いられる軍事用途の一つとして、レーダやセンサを使用した国境監視システムがある。この国境監視の例を図7-8-18に、使用される国境監視用長距離熱画像セキュリティシステムを図7-8-19に示す。サーボモーターと公差±0.05°と高精度な角度エンコーダーを使用しており、リアルタイムの方向、回転速度、焦点距離、焦点データ、ターゲットの追跡と位置特定が可能としている。実際に使用されているエンコーダ付きサーボモータを図7-8-20に示す。センサの構造は、サーマルカメラ、可視カメラ、NIRレーザーイルミネーター、パンチルト、ハウジング、デコーダーを組み合わせている。

図7-8-18　国境監視の例



図7-8-19　国境監視用長距離熱画像セキュリティシステム



Hope-Wish社（中国）ZTRCシリーズ

図7-8-20　エンコーダ内蔵サーボモータ



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（8）エンコーダ

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（３）【人工衛星のアンテナなど】

人工衛星のアンテナや観測センサの指向制御等に必須である角度検出器としてのエンコーダは、これまで海外品への依存度が高かったが、2003年度から宇宙航空研究開発機構（JAXA）と多摩川精機株式会社が共同で、JAXAの精密機構設計に対する知見を角度検出器の回転系の設計に反映し、国際競争力を有する開発仕様と宇宙環境耐性を実現した。（薄肉軸受の適用による軽量化、合成炭化水素グリースの採用による軌道上15年以上の長寿命化等）これまで国内で採用されてきた角度検出器の海外品を上回る高精度、高信頼性、低消費電力、小型・軽量化を実現することができ、国内の各種人工衛星（温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」（GOSAT）、陸域観測技術衛星2号「だいち2号」（ALOS-2）、気候変動観測衛星「GCOM-C」等）への搭載実績があり、近年の国内人工衛星に継続的に採用されるようになっている。2016年3月に内閣府宇宙戦略室主催の第2回宇宙開発利用大賞において、宇宙航空研究開発機構理事長賞を受賞している。この宇宙用高精度角度検出器としてのエンコーダを図7-8-21に、 海外製品との比較を図7-8-22に示す。分解能が21bitであり、後述のパラメータ規制の対象となっている製品である。（21bit以上が規制対象）

図7-8-21　宇宙用高精度角度検出器
（エンコーダ）

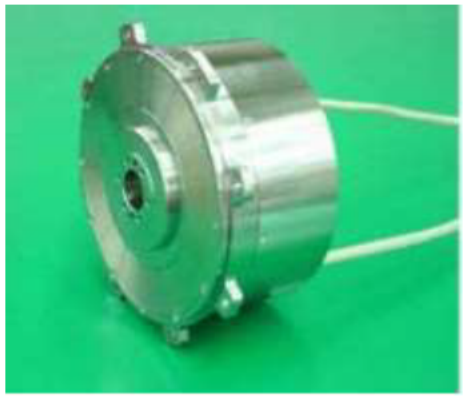


図7-8-22　宇宙用高精度角度検出器
海外製品との比較

項目	国産品	海外品
検出方式	レゾルバ式	光学ｴﾝｺｰﾀﾞ式
角度検出精度	±5 秒角	同左
分解能	21bit	21bit [18bit]
質量	2.0kg以下	1.2ｋｇ [2.2kg以下]
消費電力	1.6W以下	2.4W [5W以下]
入出力	ﾃﾞｨﾌｧﾚﾝｼｬﾙ形式 (EIA RS422準拠)	同左

規制対象

3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（8）エンコーダ

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（４）【サーボモータ、その他】

エンコーダの用途であるサーボモータは、輸出令別表に該当する項番がないため「リスト規制」対象外である。しかしながら2020年4月、用途や需要者によって許可が必要となることを定めた「キャッチオール規制」の対象にサーボモータが追加された。これにより、サーボモータは特定の国や企業に対して輸出する際に経済産業省の許可が必要となっている。近年では、イランの軍事偵察用ドローンに使用されていると国連の報告書で指摘されている。サーボモータは、軍事用途としてドローン以外にもミサイル、UAV、潜水艦、台座、航空機アクチュエータ、軍用車両等に幅広く使用されている。

この他にもエンコーダは、軍事用として“戦車用旋回砲塔、砲耳、照準器位置制御レーダーアンテナ位置制御ミサイル目標探知追尾装置ヘッド砲弾充填システム”“レーダーアンテナ位置制御ミサイル目標探知追尾装置ヘッドレーザーレンジファインダー”“ミサイルシーカー”“艦船アンテナジンバル”“カメラジンバル”“艦船砲塔”等に幅広く使用されている。

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（8）エンコーダ

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（１）

軍事用途のエンコーダにおいて求められる主な内容は以下のとおりである。

・高い性能・信頼性が実証されていること
・一般産業製品より所要数が小さいので、1個から調達が可能なこと
・用途の寿命が長く保守期間も長いため、長期の供給が保証されていること
・製品に関わる各種データの提供が可能なこと(特に宇宙アプリケーション)

規制パラメータ　輸出令第7項(８)
八．回転入力型のアブソリュートエンコーダであって、角度の変換誤差の絶対値が1秒以下のもの及び当該エンコーダ用に設計されたリング、ディスク又はスケール
（解釈）モーター等の回転角度、回転速度を検出するセンサー（ロータリーエンコーダ）のうち、絶対値を出力する方式のものをいう

規制の対象となるエンコーダは、回転入力型のアブソリュートエンコーダである。特にモーター等の回転角度、回転速度を検出するセンサ（ロータリーエンコーダ）のうち、絶対値を出力する方式のものと解釈されている。エンコーダ用に設計されたロータリーエンコーダのリング、ディスク又はスケールも規制の対象である。 これらの規制がかかっているエンコーダを図7-8-23に示す。

図7-8-23　規制のかかっているエンコーダ



4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（8）エンコーダ

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（２）

エンコーダのパラメータとして、回転入力型のアブソリュートエンコーダであって、角度の変換誤差の絶対値が1秒以下のものと規制されている。

ロータリーアブソリュートエンコーダの場合、分解能は 1 回転あたりの測定部分または単位の数に相当する。例えば 分解能 13bit のロータリアブソリュートエンコーダだと、360°1 周の中に 2^{13}=8192 個の測定単位のカウント数がある。

ロータリーエンコーダの分解能の単位は、角度を示す「°（度）」「分」「秒」「グラード」「ラジアン」である。分解能の単位換算表を表7-8-1に示す。

規制は角度の変位誤差の絶対値が1秒以下のものであるので、表7-8-1の分解能単位換算表によると、少なくとも21ビットで2^{21}=2,097,152個の測定単位のカウント数が必要となる。変位誤差はこの分解能による誤差と機械的精度（加工精度、温度による変形誤差など）とAD変換の電気的精度やノイズの誤差を加算したものである。

規制パラメータ　輸出令第7項(８)

八．回転入力型のアブソリュートエンコーダであって、角度の変換誤差の絶対値が1秒以下のもの及び当該エンコーダ用に設計されたリング、ディスク又はスケール

（解釈）モーター等の回転角度、回転速度を検出するセンサー（ロータリーエンコーダ）のうち、絶対値を出力する方式のものをいう

表7-8-1　分解能の単位換算表

2 進数ビット Binary Bit	カウント数 Counts	°（度） (degree)	′（分） (min)	″（秒） (sec)
7	128	2.8125	168.75	10125.00
8	256	1.40625	84.375	5062.50
9	512	0.703125	42.1875	2531.25
10	1,024	0.3515625	21.09375	1265.63
11	2,048	0.17578125	10.546875	632.81
12	4,096	0.087890625	5.2734375	316.41
13	8,192	0.043945313	2.63671875	158.20
14	16,384	0.021972656	1.318359375	79.10
15	32,768	0.010986328	0.659179688	39.55
16	65,536	0.005493164	0.329589844	19.78
17	131,072	0.002746582	0.164794922	9.89
18	262,144	0.001373291	0.082397461	4.94
19	524,288	0.000686646	0.041198730	2.47
20	1,048,576	0.000343323	0.020599365	1.24
21	2,097,152	0.000171661	0.010299683	0.62
22	4,194,304	0.000085831	0.005149841	0.31
23	8,388,608	0.000042915	0.002574921	0.15
24	16,777,216	0.000021458	0.001287460	0.08
25	33,554,432	0.000010729	0.000643730	0.04
26	67,108,864	0.000005364	0.000321865	0.019
27	134,217,728	0.000002682	0.000160933	0.010
28	268,435,456	0.000001341	0.000080466	0.005
29	536,870,912	0.000000671	0.000040233	0.002
30	1,073,741,824	0.000000335	0.000020117	0.001

規制対象
1秒以下

角度換算　ANGLE CONVERSION TABLE

1 ラジアン(radian)＝57.295780°＝3,437.7468′＝206,264.806″

1° ＝.0174533 ラジアン(radian)＝17.4533 ミリラジアン(m rad.)

1′ ＝.000290888 ラジアン(radian)＝.290888 ミリラジアン(m rad.)

1″＝.00000484814 ラジアン(radian)＝.00484814 ミリラジアン(m rad.)

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（8）エンコーダ

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（３）

エンコーダのパラメータとして、角度の変換誤差の絶対値が1秒以下で規制されているが、エンコーダの大きさである直径は、エンコーダの精度に影響を及ぼす一つの大きな要因である。具体的には図7-8-24に示すように直径が1.5倍になると2/3角度毎に位置が検出できるようになり、精度が1.5倍上がる。実際に規制対象となっているRENISHAW社（イギリス）のアブソリュート光学式エンコーダを図7-8-25に、その直径と精度の関係を図7-8-26に示す。精度は取り付けられた製品の偏心やノイズも含まれるため、理論値どうりに精度の絶対値になっていないが、直径が大きいと精度絶対値が上がり、この製品で規制対象である1秒以下の精度が可能であることが分かる。

図7-8-24　エンコーダの直径と角度検出の関係

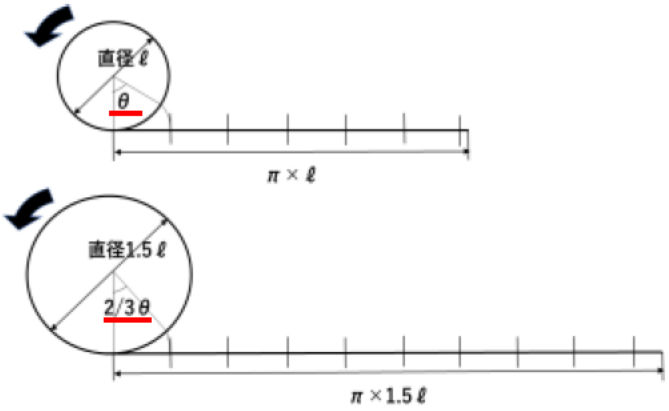
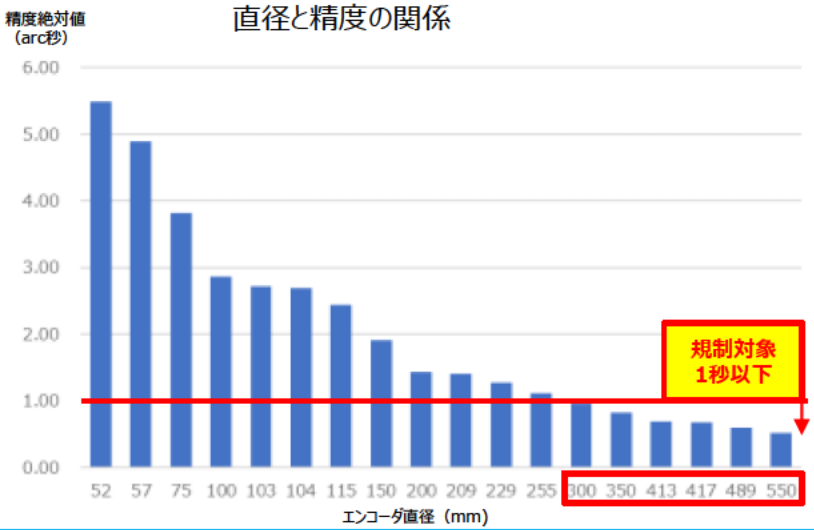


図7-8-25　RENISHAW社
アブソリュート
光学式エンコーダ



直径 (mm)	精度絶対値 (arc 秒)
52	5.49
57	4.89
75	3.82
100	2.86
103	2.72
104	2.69
115	2.44
150	1.91
200	1.43
209	1.4
229	1.27
255	1.11
300	0.95
350	0.82
413	0.69
417	0.68
489	0.59
550	0.52

図7-8-26　RENISHAW社アブソリュート光学式エンコーダ
直径と精度の関係



4.品目の技術動向調査（2）

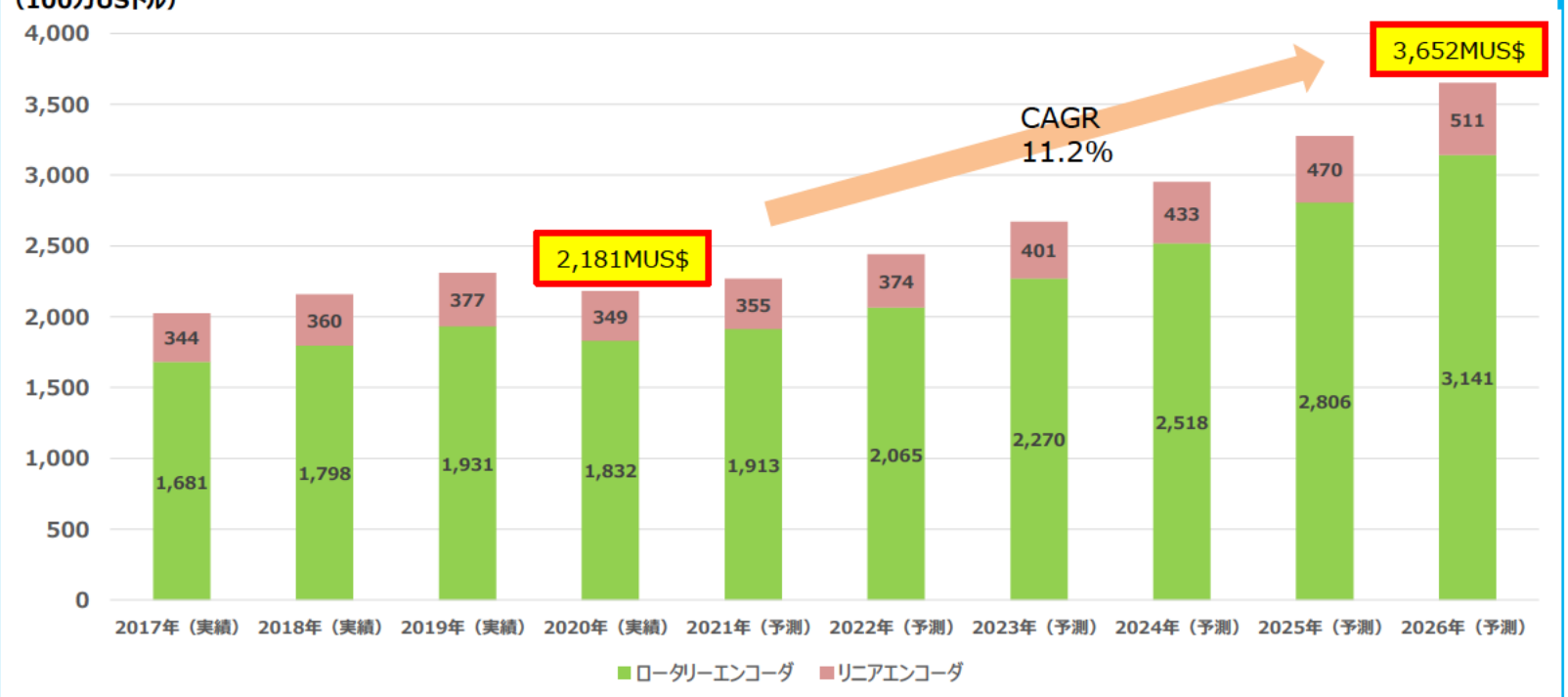
○輸出令7項（8）エンコーダ

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（１）

エンコーダ市場推移（実績/予測）を図7-8-27に示す。

エンコーダ市場は、2019年から2020年にかけてコロナウイルスの影響で一旦縮小するが、以降は2020年から2026年にかけてCAGR11.2%で大きく成長すると予想されている。また、ロータリーエンコーダはリニアエンコーダの5倍以上の市場規模で推移すると予想されている。

図7-8-27　エンコーダ市場推移（実績/予測）



出典：MarketsandMarkets
ENCODER MARKET WITH COVID-19 IMPACT - GLOBAL FORECAST TO 2026

4.品目の技術動向調査（2）

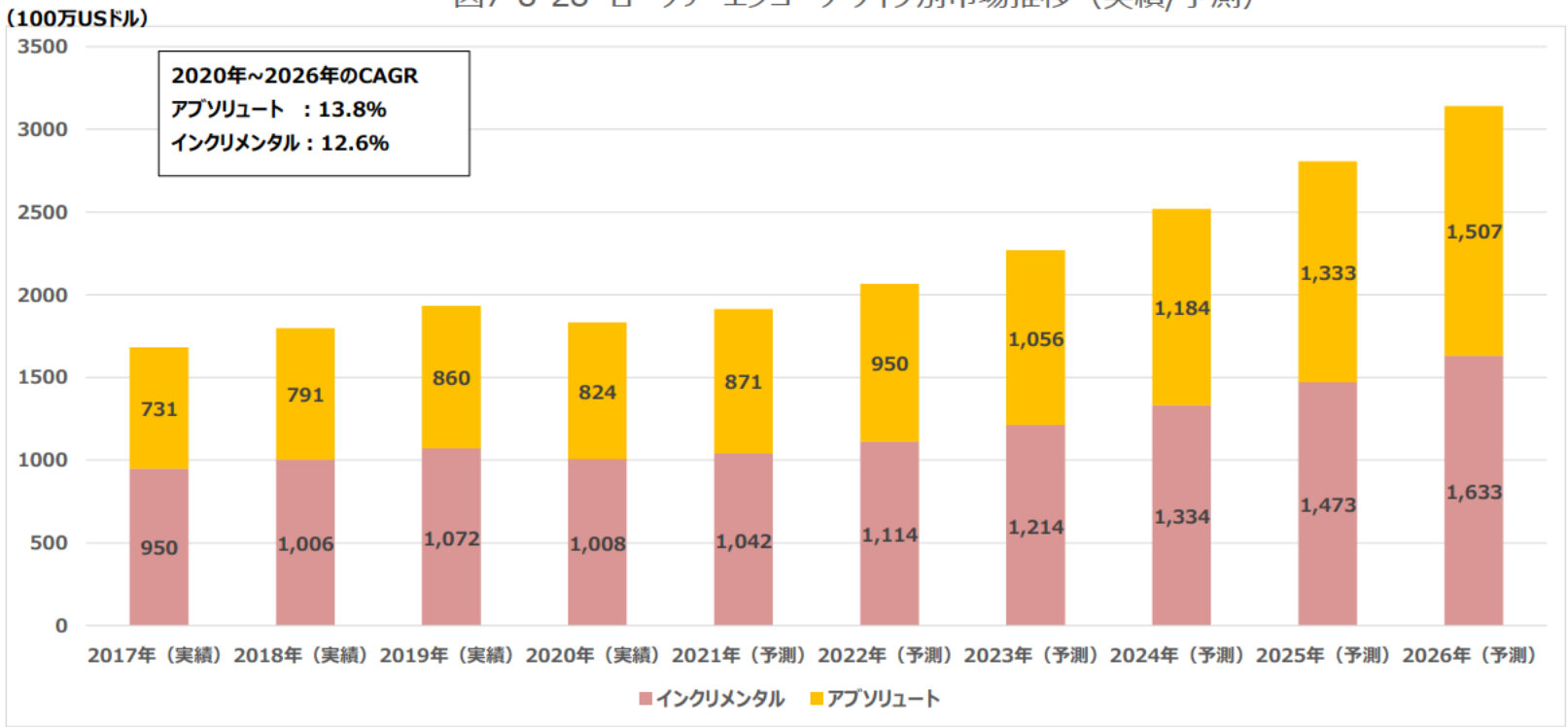
○輸出令7項（8）エンコーダ

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（２）

ロータリーエンコーダのタイプ別市場推移（実績/予測）を図7-8-28に示す。

2020年から2026年のCAGRは、規制対象となっているアブソリュートエンコーダ市場が13.8%、インクリメンタルエンコーダが12.6%と、ともに市場は大きく拡大すると予測されている。

図7-8-28 ロータリーエンコーダ タイプ別市場推移（実績/予測）



出典：MarketsandMarkets
ENCODER MARKET WITH COVID-19 IMPACT - GLOBAL FORECAST TO 2026

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（8）エンコーダ

③市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（３）

エンコーダの市場シェアを表7-8-2に示す。トップ5の合計シェアは60～70%の範囲となっている。上位5社の事業内容は以下のとおりである。

Sensata Technologies（米国）は、自動車、大型輸送車、建機、農機向けセンサーやコントローラなど幅広くビジネスを行っており、モータ用エンコーダを含む産業用センサでは業界をリードしている。エンコーダは、Kavlico、BEI Sensors、Newallなどのブランドを通じて販売されている。

HEIDENHAIN（ドイツ）は、測定制御および駆動システム技術のパイオニアで、工作機械の数値制御と長さおよび角度のメカトロニクス測定装置を製造している。モータ関連では位置決めに必要なリニアエンコーダ、角度エンコーダ、ロータリーエンコーダ、デジタル表示カウンタを開発、製造している。

Fortive（Dynapar）（米国）は、ロータリーエンコーダ、レゾルバ、エンコーダアクセサリ、状態監視、状態監視アプリケーションなど、幅広い製品とソリューションを提供している企業である。石油とガス、紙と鉄鋼、ファクトリーオートメーション、ロボット工学、医療機器など、幅広い業界を対象としてビジネスを展開している。

Renishaw plc（イギリス）は、精密測定とヘルスケア技術を専門とするグローバルグループで、エンコーダ市場の大手企業の1つである。三次元測定機および工作機械市場における高性能位置エンコーダを開発、製造している。

Mitutoyo（日本）は、測定ツールおよび測定関連技術の大手企業の1つである。マイクロメータ、マイクロメータヘッド、キャリパー、高さ測定ツール、深さ測定ツール、内径測定ツール、ゲージブロック、校正機器、ダイヤルインジケータ、ダイヤルテストインジケータ、精密センサシステム、リニアエンコーダなどの幅広い製品ポートフォリオでビジネスを展開している。

表7-8-2　エンコーダの市場シェア（2020年）

COMPANY	MARKET SHARE (%)
DEGREE OF COMPETITION	CONSOLIDATED
Total Market Share of Top-5 Players	60–70%
Sensata Technologies	15–17%
HEIDENHAIN	14–16%
Fortive (Dynapar)	12–14%
Renishaw plc	10–12%
Mitutoyo Corporation	2–4%

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

【輸出令第7項（8の2）】
パルス出力切換サイリスターデバイス･サイリスターモジュール

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

パワー半導体は、電源（電力）の制御・供給を行う半導体で、扱う電圧や電流が大きいことが特徴である。パワー半導体の分類と機能を図7-82-1に示す。

一般に、許容電力が1W以上のものをパワートランジスタ、定格電流が1A以上のものをパワーダイオードと言う。

図中、スイッチングとは、電流制御を行うためのON/OFFスイッチ（ゲート）のことで、スイッチが有るのがパワートランジスタとサイリスタで、スイッチが無いのがﾀﾞｲｵｰﾄﾞである。

サイリスターの回路記号を図7-82-2に示す。

スイッチングとは、ゲートがスイッチでアノードからカソードへの電流をON/OFF出来る機能のことである。

図7-82-2　サイリスター

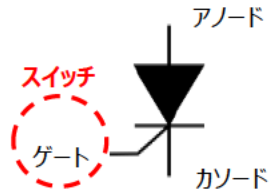
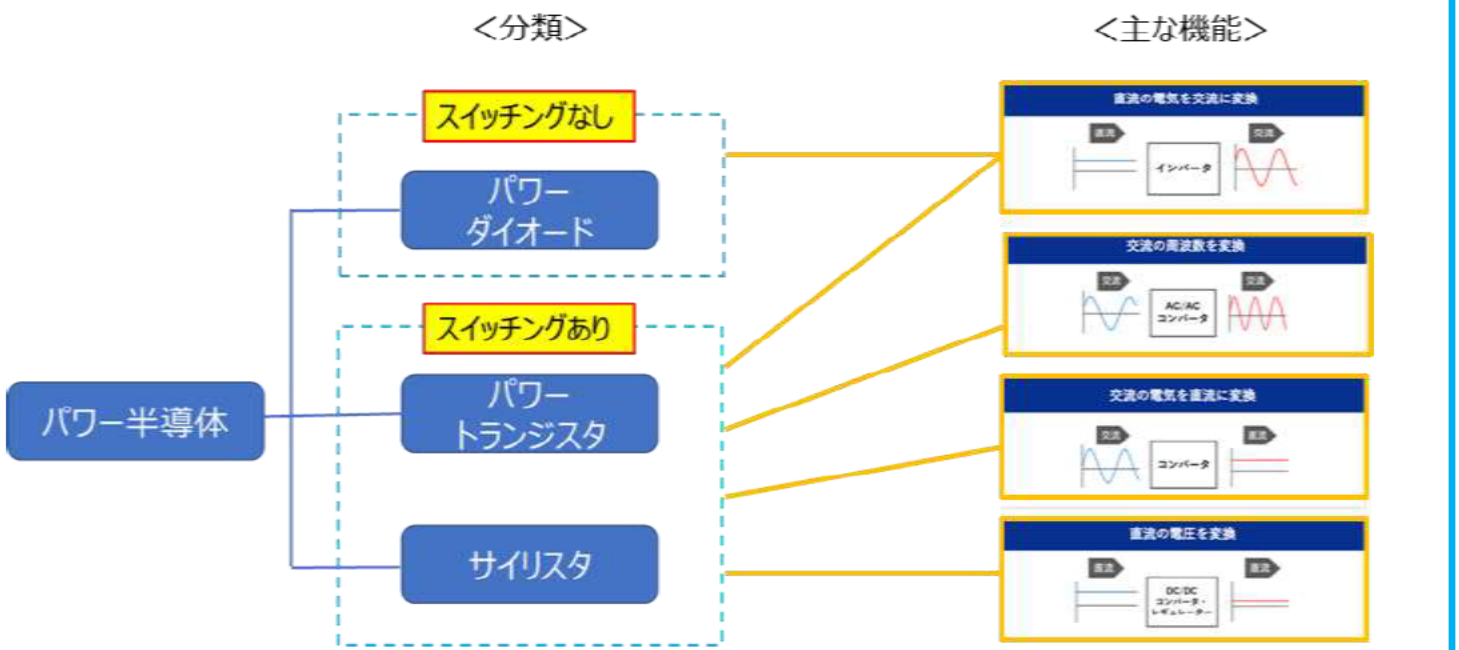


図7-82-1　パワー半導体の分類と機能



1.対象品目の概要調査（2）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

☆サイリスター

サイリスターはシリコン整流素子にゲート（制御電極）を付加したものである。制御電極の電圧を変えることによって、電流を制御する機能をもった半導体素子で、4層以上のp-n-p-n構造から成る。小型で長寿命、小さな制御電力で大電力の制御ができ、スイッチング速度が速い、構造が簡単であるなどの特性をもっている。交流大電力の制御、直流への変換に多く使われている※1逆阻止3端子サイリスター、電鉄車両や電気自動車の駆動制御に使われる直流チョッパ用の※2逆導通3端子サイリスター、※3双方向3端子サイリスター（トライアック）などがある。

※1　逆阻止3端子サイリスター

逆導通3端子サイリスターと区別するために逆阻止3端子サイリスターと呼ばれるが、単にサイリスタと言えばこちらを指す。

※2　逆導通3端子サイリスター

ブリッジ状に個別に配線する還流ダイオードとサイリスタをひとつの基板上に組み込んだもので、配線が単純化するとともに小型化できる。

逆導通3端子サイリスターを図7-82-3に示す。

※3　双方向3端子サイリスター（トライアック）

3端子をもつ半導体スイッチング素子の一種で、双方向に電流を流せることからACスイッチとして広く用いられている。原理的には、一方向の電流を制御できるサイリスターを逆並列に接続して、双方向の電流を制御できるようにしたものである。

双方向3端子サイリスター（トライアック）を図7-82-4に示す。

図7-82-3　逆導通3端子サイリスター

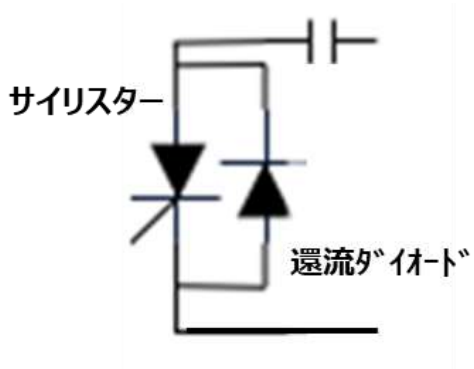
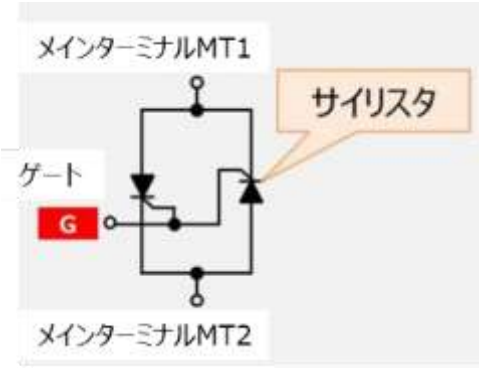


図7-82-4　トライアック



1.対象品目の概要調査（3）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

【サイリスターの動作原理】

サイリスタの動作原理を図7-82-5に示す。サイリスターに交流電圧を印可した場合を考える。

ゲート信号が入力されていない状態では、順バイアス (アノードAが正、カソードKが負)になっても、サイリスタはオンしない。

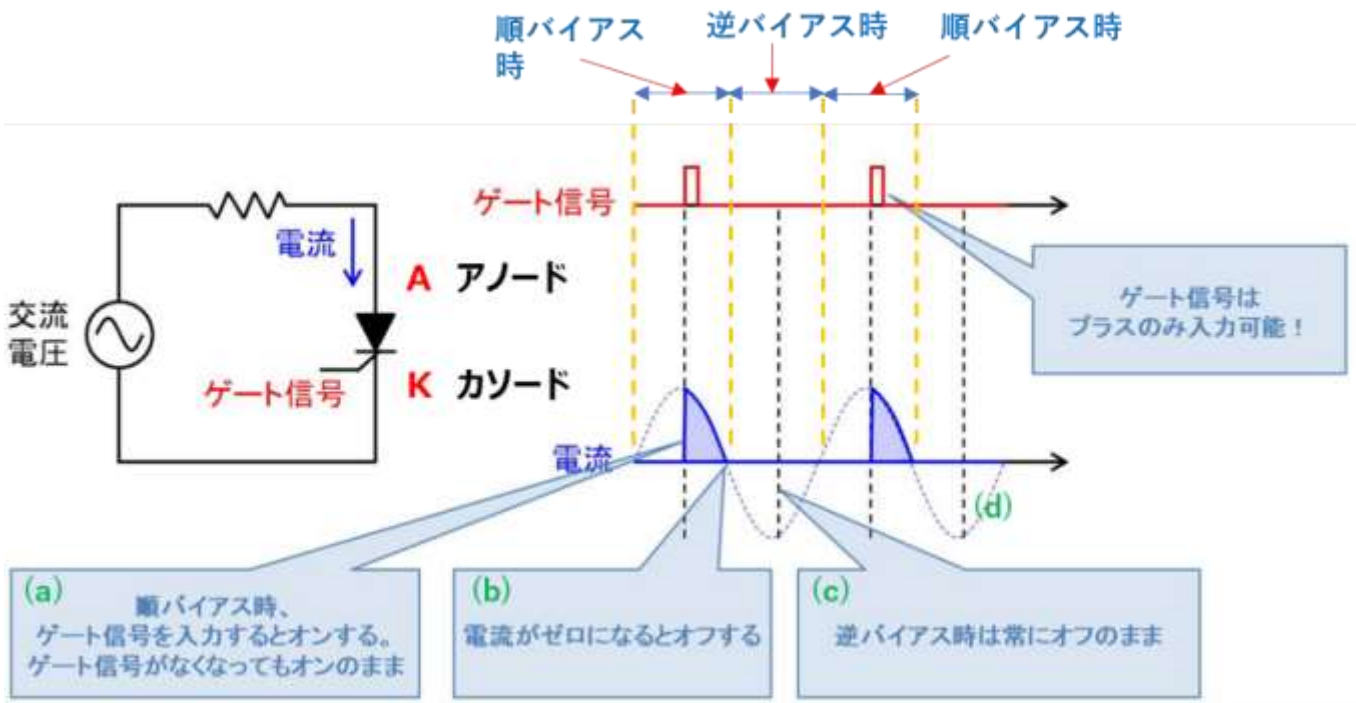
a)順バイアス時に、ゲート信号を入力すると、サイリスタはオンし、アノードからカソードに電流が流れ始める。

b)その後、ゲート信号がなくなっても、サイリスタはオンした状態を保つ。

c)サイリスタに流れる電流がゼロになると、サイリスタはオフする。

d)逆バイアス時(アノードAが負、カソードKが正)の時、サイリスタはオフの状態のままになる。

図7-82-5　サイリスタの動作原理

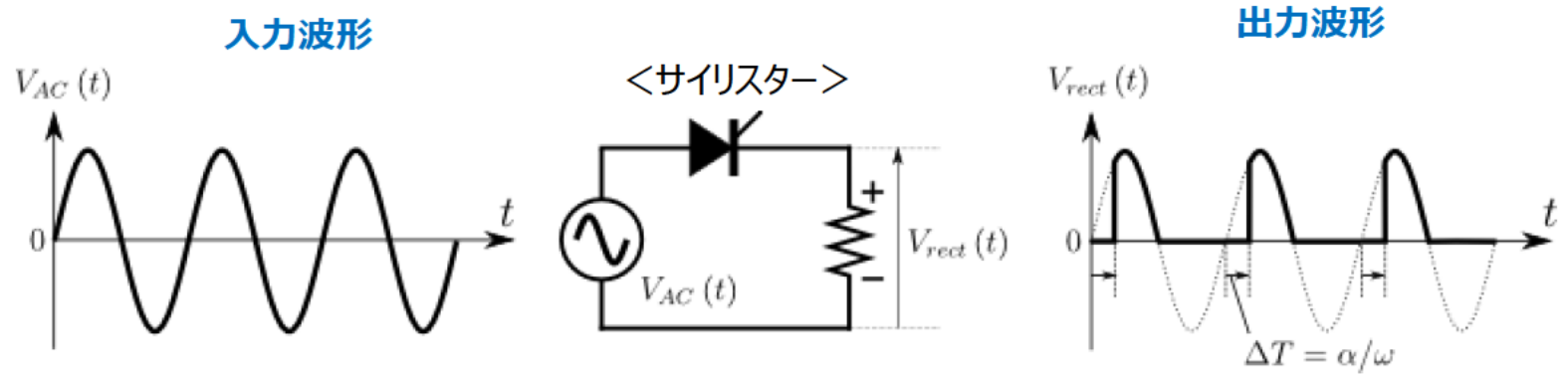


1.対象品目の概要調査（4）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

【サイリスタによる交流の直流への変換】
交流の直流への変換イメージを図7-82-6に示す。
図は、入力波形がサイリスターにより出力波形になることを示している。
前ページの動作原理は、交流から直流への変換（コンバータ）を表していることが分かる。
図の出力波形は直流であるが電圧が変化しているため、整流器ではこの波形を平滑化してから使用される。

図7-82-6　交流の直流への変換イメージ



1.対象品目の概要調査（5）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

【貨物等省令の条文中の語句説明】

※4.**パルス出力の切り換え**
　サイリスターのスイッチであるゲートに、パルス的に電圧をかけることで、出力をON/OFF制御すること。

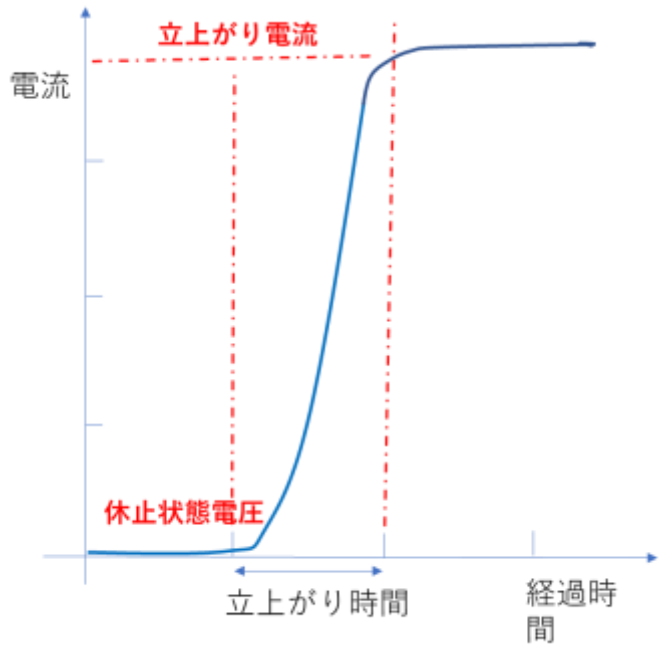
※5.**電気的又は光学的に制御された切り換え方法**
　通常サイリスターは電気信号で制御されるが、光サイリスタは素子に設けられた窓を通して照射される光によって発生する光電流が制御信号となる。

※6.**電子の放射を制御された切り換え方法**光制御静電誘導サイリスタ
　上記光学的制御と同じように、電子線を当てて発生する電流でサイリスタのON/OFFを制御する方法。

※7.**立ち上がり電流値**
　説明図として、休止・立上がりイメージを図7-82-7に示す。
　ゲートに電圧を加えたときのサイリスタに流れる電流値で、
立ち上がり電流値＝「△立上がり電流／△立上がり時間」で表す。

※8.**休止状態電圧**
　サイリスタに電流が流れていない状態のとき、サイリスタにかかる電圧のこと。

図7-82-7　休止・立上がりイメージ

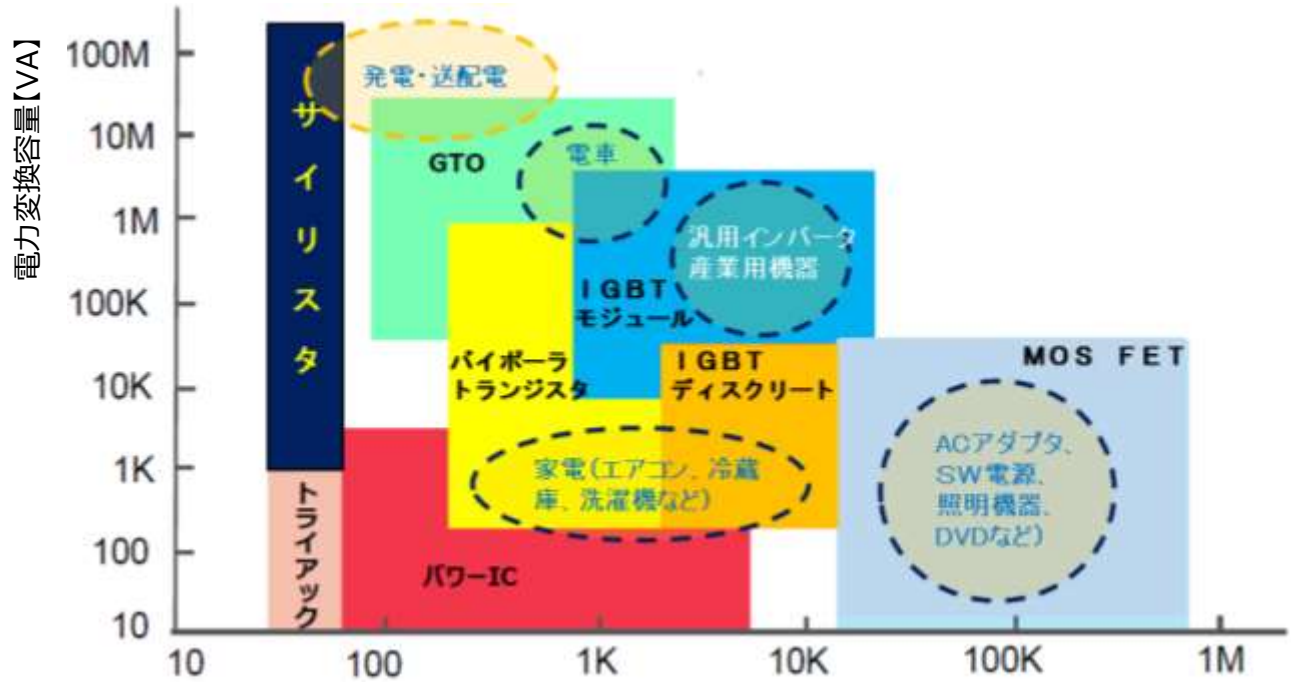


1.対象品目の概要調査（6）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

サイリスターは，電流を制御する機能をもった半導体素子で，小さな制御電力で大電力の制御ができる。
パワー半導体中でのサイリスターの位置づけを図7-82-8に示す。

図7-82-8　サイリスターのパワー半導体内での位置づけ



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令					貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号	イロハ	細番		
7(8の2)	6		八号の二			パルス出力の切換えを行うサイリスターデバイス又はサイリスターモジュールであって、電気的に若しくは光学的に制御された切換え方法又は電子の放射を制御された切換え方法を用いたもののうち、次のいずれかに該当するもの（民生用の鉄道車両又は航空機に使用するように設計された装置に組み込まれたものを除く。）	
7(8の2)	6		八号の二	イ		イ　最大立上がり電流が30,000アンペア毎マイクロ秒を超えるものであって、休止状態電圧が1,100ボルトを超えるもの	最大立上がり電流が30,000アンペア毎マイクロ秒を超えるものであって、休止状態電圧が1,100ボルトを超える
7(8の2)	6		八号の二	ロ		ロ　最大立上がり電流が2,000アンペア毎マイクロ秒を超えるものであって、次の（一）及び（二）に該当するもの	最大立上がり電流が2,000アンペア毎マイクロ秒を超える
7(8の2)	6		八号の二	ロ	(一)	(一)　休止状態電圧が3,000ボルト以上のもの	休止状態電圧が3,000ボルト以上
7(8の2)	6		八号の二	ロ	(二)	(二)　最大電流が3,000アンペア以上のもの	最大電流が3,000アンペア以上

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（英文）
3桁	細番	
3A1	g	g. Solid-state pulsed power switching thyristor devices and 'thyristor modules', using either electrically, optically, or electron radiation controlled switch methods and having any of the following: Note 2: 3A001.g. does not control thyristor devices and 'thyristor modules' incorporated into equipment designed for civil railway or "civil aircraft" applications.
3A1	g 1	1. A maximum turn-on current rate of rise (di/dt) greater than 30,000 A/µs and off-state voltage greater than 1,100 V; or
3A1	g 2	2. A maximum turn-on current rate of rise (di/dt) greater than 2,000 A/µs and having all of the following:
3A1	g 2 a	a. An off-state peak voltage equal to or greater than 3,000 V; and
3A1	g 2 b	b. A peak (surge) current equal to or greater than 3,000 A.

比較原文
・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html
・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

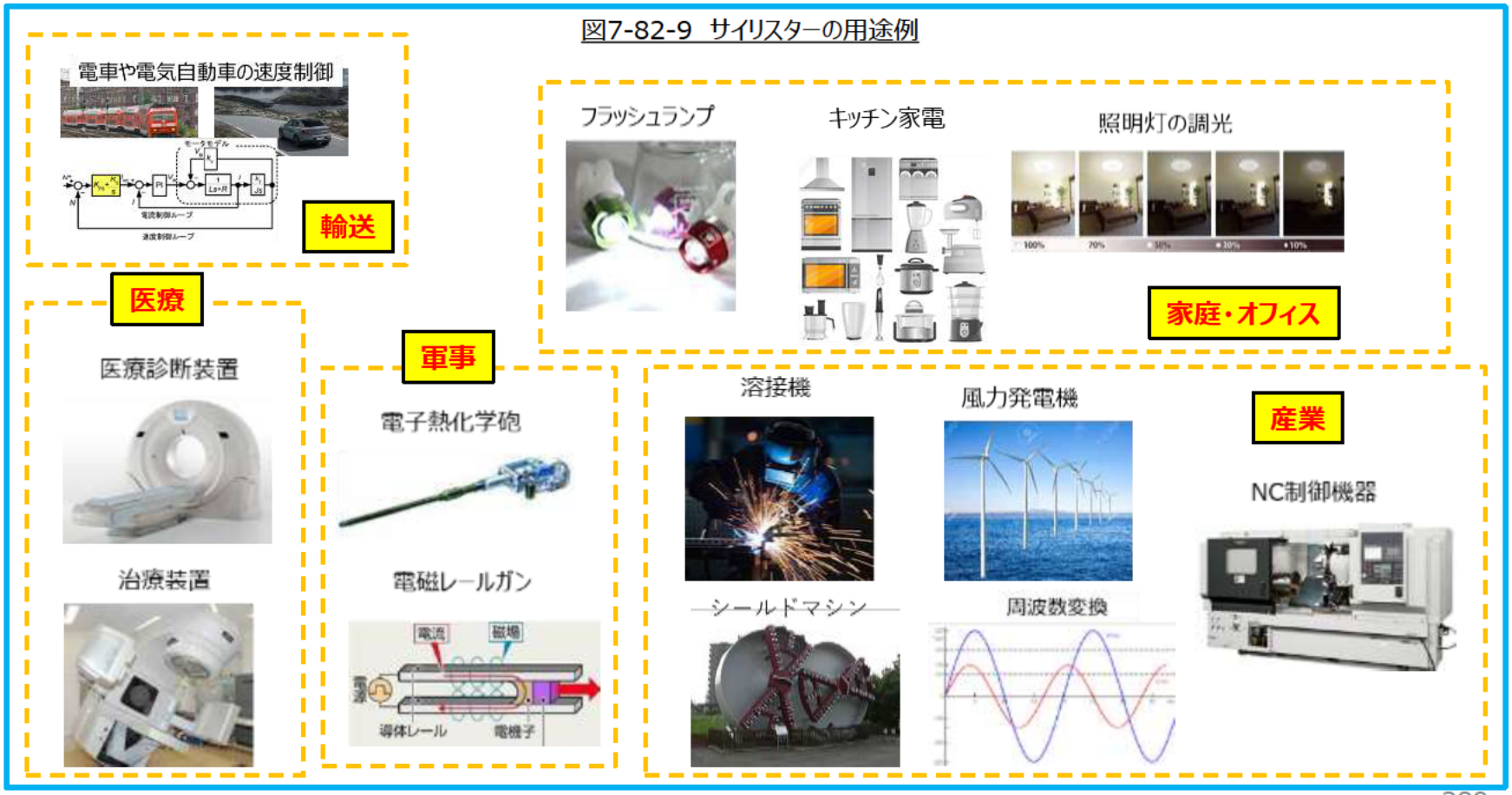
3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

サイリスターは、輸送、医療、軍事、家庭・オフィス、産業分野等で幅広く利用されている。
サイリスターの用途を図7-82-9に示す。

図7-82-9　サイリスターの用途例



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【民生用途１】
民生用途の例(1)を図7-82-10に示す。

☆電動工具やキッチン家電のモータ制御回路
（過電圧バール保護回路、突入電流制限回路等）
☆照明のサイリスタ調光（図7-82-6 (a)）
高速でサイリスタをON/OFFすることで電圧を制御し、調光する。
☆写真用フラッシュランプ（図7-82-6 (b)）
シャッターボタンを押すと、大容量ｺﾝﾃﾞﾝｻに蓄えられていた電荷が放出され、トランスにより数千Vの高電圧が電極にかかり発光する。
☆医療診断（図7-82-6 (c)）
MRI、CTやX線などの最先端の医療診断システムには多くのエネルギーを必要とし、この電流制御にサイリスタが用いられる。スイッチング周波数が高くなると診断性能が向上し、同時に装置の重量と大きさは減少する。
☆治療装置（図7-82-6 (d)）
放射線治療装置：高エネルギーの放射線を作り出し、照射する。
陽子線治療装置：イオン源より発生させた陽子を加速し、がん病巣の位置や形状に応じて適した方向から照射する。（電流制御にサイリスタが用いられる）
☆アーク溶接機（図7-82-6 (e)）
アーク溶接用電源の回路構成は、単相または三相のトランスと出力にチョークコイルを接続した単相または三相の整流器で構成されており、サイリスタを追加して電流制御が可能になる。低い出力電圧で非常に大きな高い直流電流が求められる。
サイリスターのパルス出力切換を用いたハイパワー溶接機は、規制に該当する可能性があるので、注意が必要である。

図7-82-10　民生用途(1)

(a) 照明灯の調光



(b) フラッシュランプ



(c) 医療診断装置



(d) 治療装置



(e) 溶接機



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【民生用途２】
民生用途の例(2)を図7-82-11に示す。

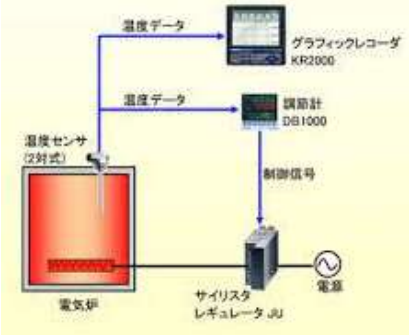
☆シールドマシン（図7-82-7 (a)）
　前方の土砂を削り、後方に土を送り、崩れないように同時にトンネルの壁を組み立てる機械である。円筒状が多く、建設するトンネルの形状や地質などに合わせて作成される特注の機械である。（モータ制御にサイリスターが用いられる）
☆風力発電機
　発電装置から得られる交流を直流に変換するとともに位相制御によって出力電圧の大きさを可変する。
☆高電圧直流送電システム
　送電を高電圧の「直流」で行うシステムで、送電ロスが少なく、長距離でも大量に送電できるうえ、周波数が異なる系統の連系にも適している。（コンバータとしてサイリスターが用いられる）
☆無停電電源装置
　無停電電源装置とは、予期せぬ停電や入力電源異常が発生した際に、電源を供給する機器に対し一定時間電力を供給し続けることで、機器やデータを保護することを目的とした装置である。
☆NC制御機器（数値制御機器）
　数値制御とは、工作機械などを数値データを与えて制御する方式のことで、NC工作機械、NC装置、NC旋盤、NCフライス盤などと呼ばれる。サイリスターにより電圧制御が行われる。
☆電気炉温度制御（図7-82-7 (b)）
　昔の電気炉はON/OFF制御方式で、例えば炉内の温度設定が500℃の場合、500℃に達した時にヒーターがOFFになり、しばらく温度上昇してから冷めるため、狙った温度にはならなかった。それに対して、サイリスターでの制御は、500℃に近づくにつれてヒーターの出力が弱まり、500℃を超えないように調整され、ヒーター出力をコントロールしながら保持するため精度良く設定温度が保たれる。

図7-82-11　民生用途(2)

(a)　シールドマシン



(b)　電気炉の制御



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【軍事用途】

☆電子熱化学砲（図7-82-12）

電子熱化学砲は、プラズマカートリッジを使用して、サイリスタで大電流を発生させて弾薬の推進剤を点火、制御する。電子熱化学技術は、レールガンやコイルガンなどに応用されている。

☆レールガン（図7-82-13）

物体を電磁気力により加速して撃ち出す装置である。推力に電磁力を用いるため、瞬時に大電流が必要とされ、電力をコンデンサバンクに溜めてからサイリスタでコントロールして放出することで、高速で撃ち出すことが出来る。

☆パルスレーザー

時間的に連続して発振する連続発振レーザーに対して，間欠的に短い時間の間だけパルスで発振するレーザーのことで、パルス発振にサイリスタが用いられる.

サイリスタの軍事用途としては、他に☆航空機発射用電磁カタパルト、☆爆発物の雷管等がある。

図7-82-12　電子熱化学砲

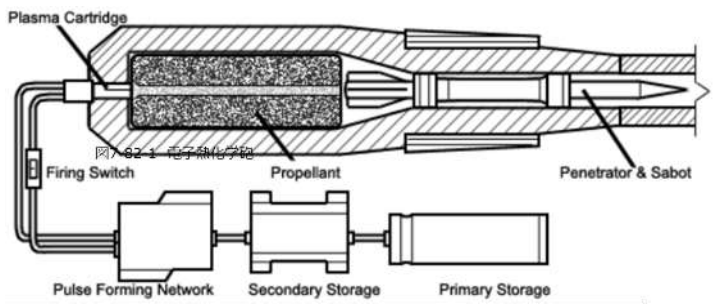
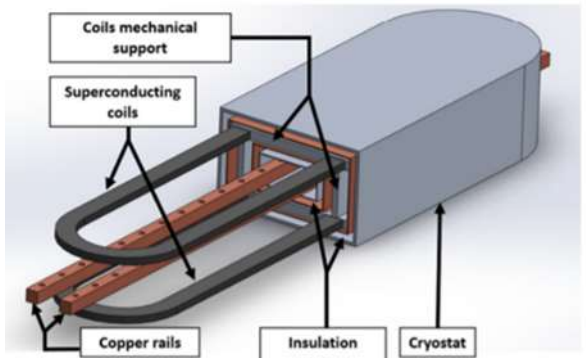


図7-82-13　レールガン



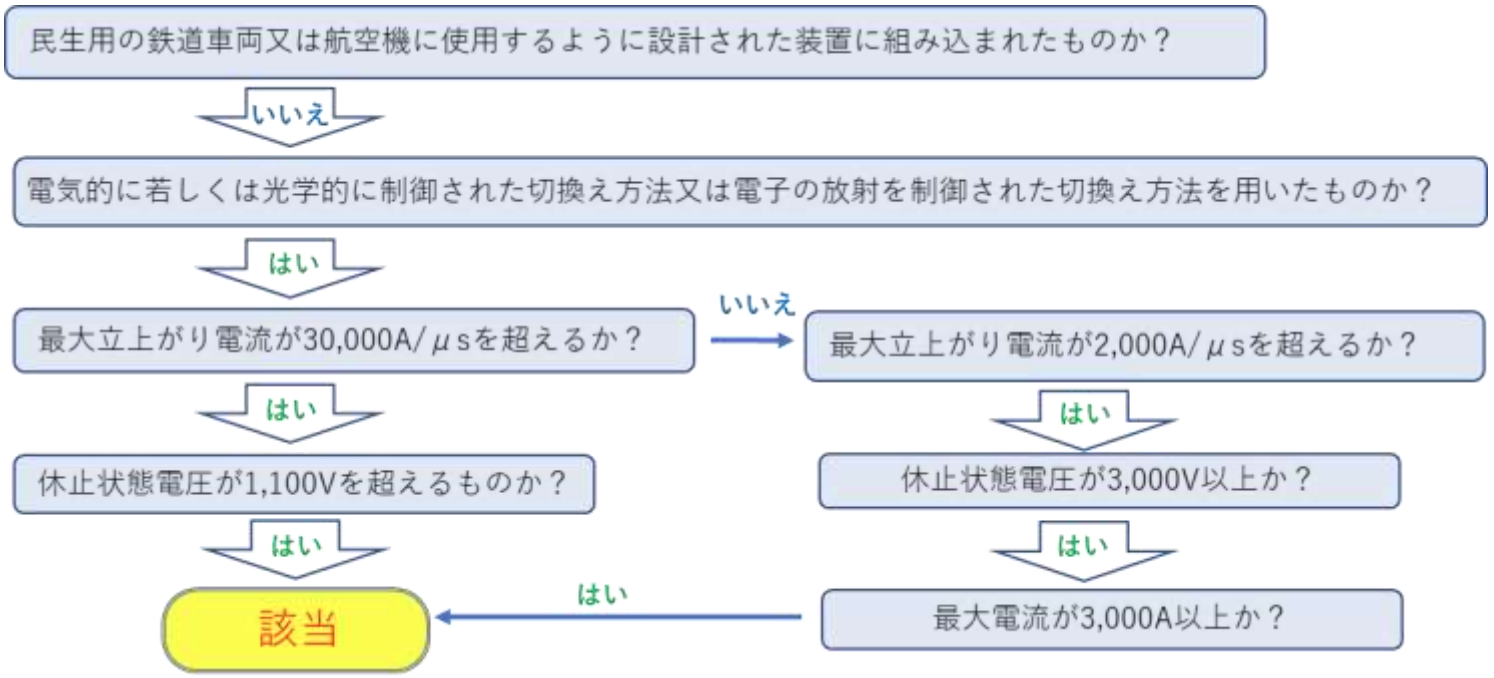
3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

規制省令に基づき、規制に抵触するかどうかを「図7-82-14　規制判定フロー」に示す。

図7-82-14　規制判定フロー



4.品目の技術動向調査（1）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

規制省令のパラメータを図7-82-15、図7-82-16に示す。
規制判定フローに示したように、

・民生用の鉄道車両又は航空機に使用するように設計された装置に組み込まれたもの
・電気的に若しくは光学的に制御された切換え方法又は電子の放射を制御された切換え方法を用いていない

のいずれかに当てはまるものは、規制パラメータに関わらず、規制に該当しない。

図7-82-15　規制パラメータ（イ）

規制パラメータ　輸出令第7項(8の2)
イ　最大立上がり電流が30,000アンペア毎マイクロ秒を超えるものであって、休止状態電圧が1,100ボルトを超えるもの

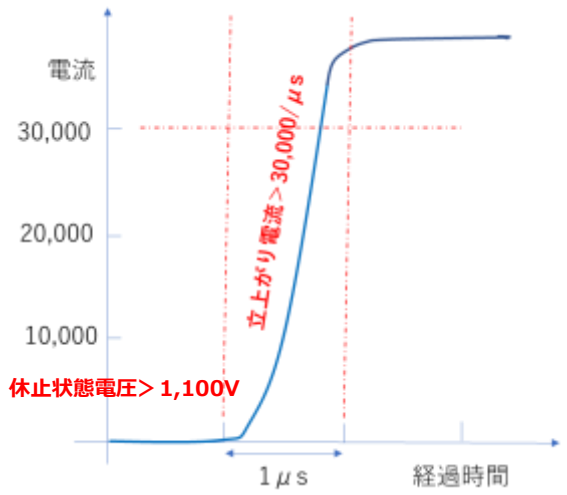
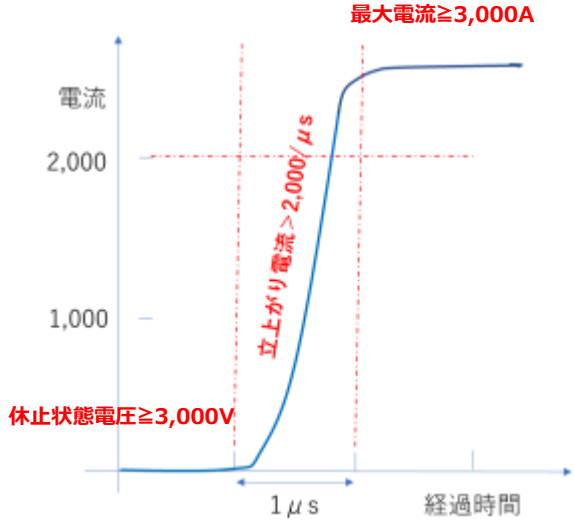


図7-82-16　規制パラメータ（ロ）

規制パラメータ　輸出令第7項(8の2)
ロ　最大立上がり電流が2,000アンペア毎マイクロ秒を超えるものであって、次の（一）及び（二）に該当するもの
（一）休止状態電圧が3,000ボルト以上のもの
（二）最大電流が3,000アンペア以上のもの



4.品目の技術動向調査（2）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

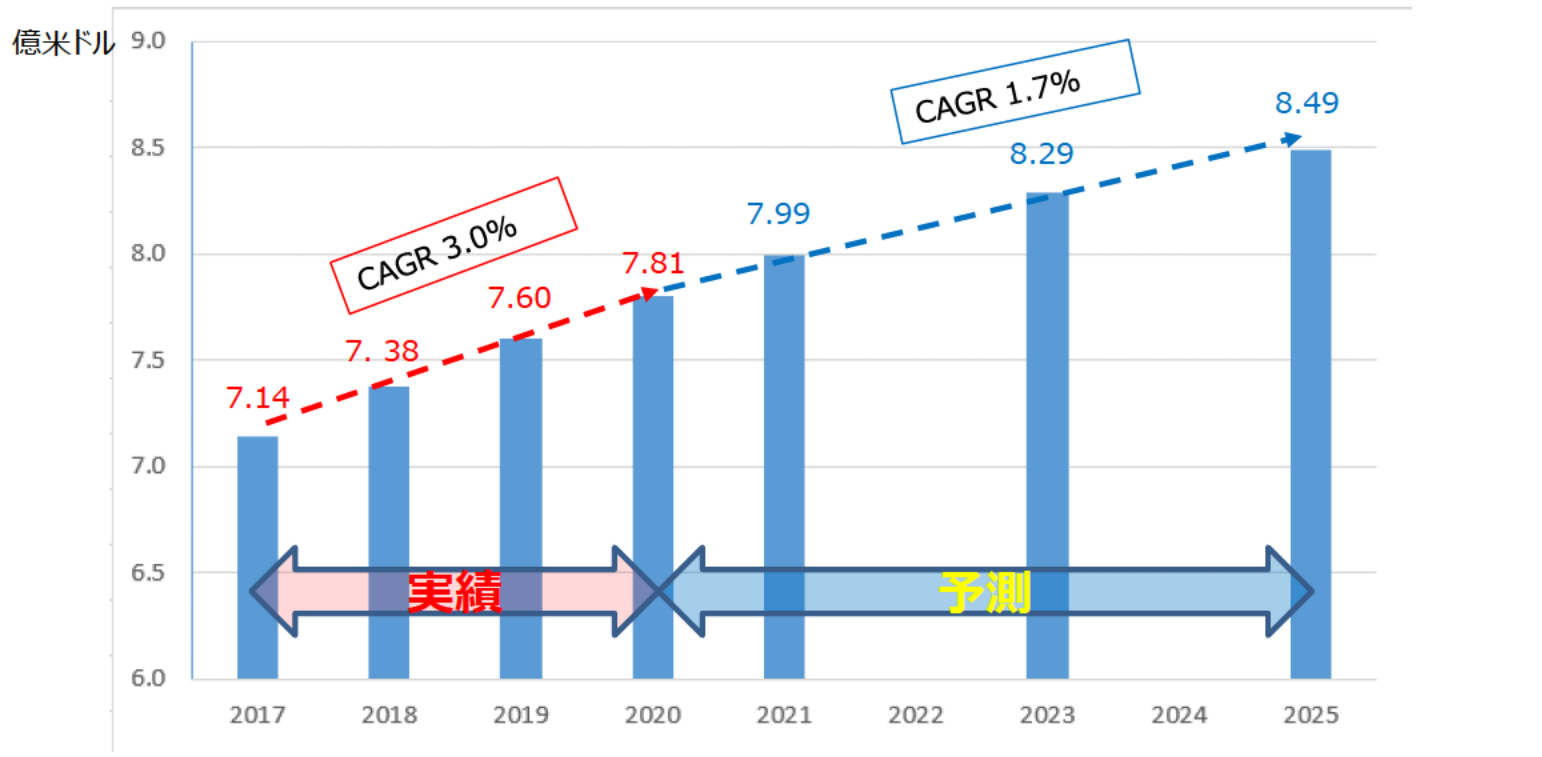
②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

★世界のサイリスター市場を図7-82-17に示す。

サイリスタの世界市場は、2020年の7.81億米ドルから2025年に8.49億米ドルまでCARG1.7%の成長を遂げると予想されている。これは、2017～2020年のCARG3%に比べると成長が鈍化している。

図7-82-17　世界のサイリスター市場　2019(実績)～2026(予測)

出典：MarketsandMarkets
IGBT & THYRISTOR MARKET - GLOBAL FORECAST TO 2025



4.品目の技術動向調査（3）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

世界のサイリスターメーカーを表7-82-1に示す。

表7-82-1　サイリスターメーカー(1)

企業	会社概要
Fairchild Semiconductor International Inc.（アメリカ）	世界で初めて半導体集積回路の商業生産を開始した企業である。2016年にオン・セミコンダクターによって買収された。
Vishay Intertechnology（アメリカ）	個別半導体と受動部品の分野で世界最大のメーカーの1つである。
Sensitron Semiconductor（アメリカ）	防衛、航空宇宙、宇宙、医療、およびその他の高信頼性市場向けの高信頼性パワーエレクトロニクスメーカーである。
Littelfuse（アメリカ）	主に保護回路製品、各種電気スイッチ、自動車用センサーを製造している多国籍電気機器製造企業である 。
IXYS（アメリカ）	パワー半導体、RFパワー半導体、デジタルとアナログの集積回路を製造している。
Dynex Semiconductor Ltd.（イギリス）	パワー半導体デバイスとサファイア集積回路製品に特化した製品群、IGBT、各種サイリスタ、GTOなどを製造している。
セミクロン（ドイツ）	中出力範囲（約2kW～10MW）におけるパワーモジュールを生産する会社である。
インフィニオンテクノロジーズ（ドイツ）	自動車メーカーや各種産業向けに半導体を製造する多国籍企業。パワー半導体、特にIGBTおよびパワーMOSFETにおいて世界トップクラスの市場シェアを有する。
ABB Ltd. (スイス)	スイスに本社を置く多国籍企業で、100カ国以上でビジネスを展開している。1988年にスウェーデンのアセアとスイスのブラウン・ボベリが合併して成立した。ファナック、安川電機、クーカと並んで世界4大産業用ロボットメーカーのひとつ。

4.品目の技術動向調査（4）

○【輸出令第7項（8の2）】パルス出力切換サイリスターデバイス・サイリスターモジュール

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

その他のサイリスターメーカーを表7-82-2に示す。

表7-82-2　サイリスターメーカー(2)

企業	会社概要
富士電機（日本）	古河機械金属・古河電気工業・富士通とともに古河グループの中核企業である。自動販売機の分野では、国内1位のシェアである。発電関連設備にも強く、特に地熱発電分野では、世界で4割のシェアを持ち、世界一である。
日立製作所（日本）	IT、エネルギー、インダストリー、モビリティ、ライフ、日立ハイテク、日立建機、日立金属、その他の9の部門から構成されている。
三社電機製作所（日本）	電源機器と半導体の生産が主の会社で、金属表面処理用電源で国内首位である。半導体はパワー半導体系でニッチ戦略をとっている。
三菱電機（日本）	総合電機大手で、ＦＡ、自動車機器や昇降機が収益の柱である。パワー半導体や家電も取り扱っている。
京セラ（日本）	コンデンサーなど電子部品大手である。太陽電池モジュール、通信機器、複写機など多角化経営を行っている。
ハセテック（日本）	パワーエレクトロニクス、メカトロニクス、アルミ溶接加工の技術で、ダイオード、サイリスタ、IGBT、IEGTなどを駆使した顧客ニーズにマッチした製品を提供している。
トーア紡コーポレーション（日本）	毛織物など衣料老舗で、自動車用内装材や半導体関連部材など多角化経営である。
鞍山雷盛電子（中国）	ダイオード、整流器ブロック、ブリッジ整流器、乗算器、電源を製造する会社である。
Silicon Power (台湾)	メモリーカードなどのメディア関連のメーカーである。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

【輸出令第7項（8の3）】
電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

【パワー半導体】

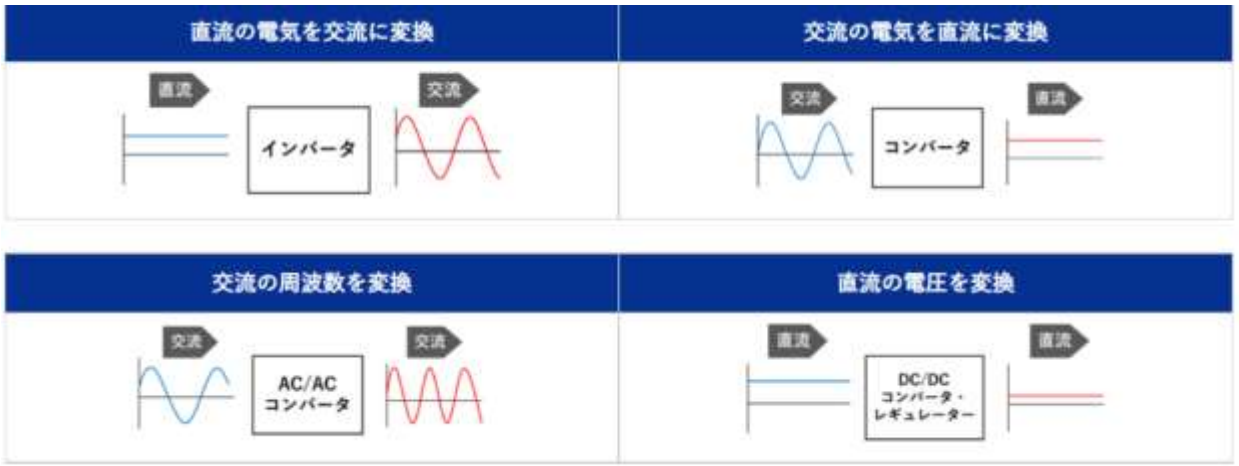
半導体を用いたデバイスの中で、電源などの電力の制御や変換を行うデバイスをパワー半導体と呼ぶ。大きな電圧・電流の電力も取り扱えることが特徴で、一般的には定格電流が1A以上のものとされている。

代表的なデバイスとして、スイッチングを行うサイリスター、MOS FET（金属酸化膜半導体電界効果型トランジスタ）、IGBT（絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ）などと、スイッチングを行わないダイオードがある。

パワー半導体回路の働きを図7-83-1に示す。

現状ではパワー半導体の主力は、シリコンを材料に使ったSi（シリコン）パワー半導体だが、次世代パワー半導体として、
・SiC（炭化ケイ素）パワー半導体、・GaN（窒化ガリウム）パワー半導体、・Ga203（酸化ガリウム）パワー半導体
が注目されている。このうち、SiCパワー半導体やGaNパワー半導体は、既に市場への本格投入が始まっている。SiCパワー半導体は主に自動車関連に用いられ、国内製造業も力を入れている分野で、GaNパワー半導体はサーバーなど情報通信機器への利用が中心で、今後は自動車関連への応用が見込まれている。

図7-83-1　パワー半導体回路の働き

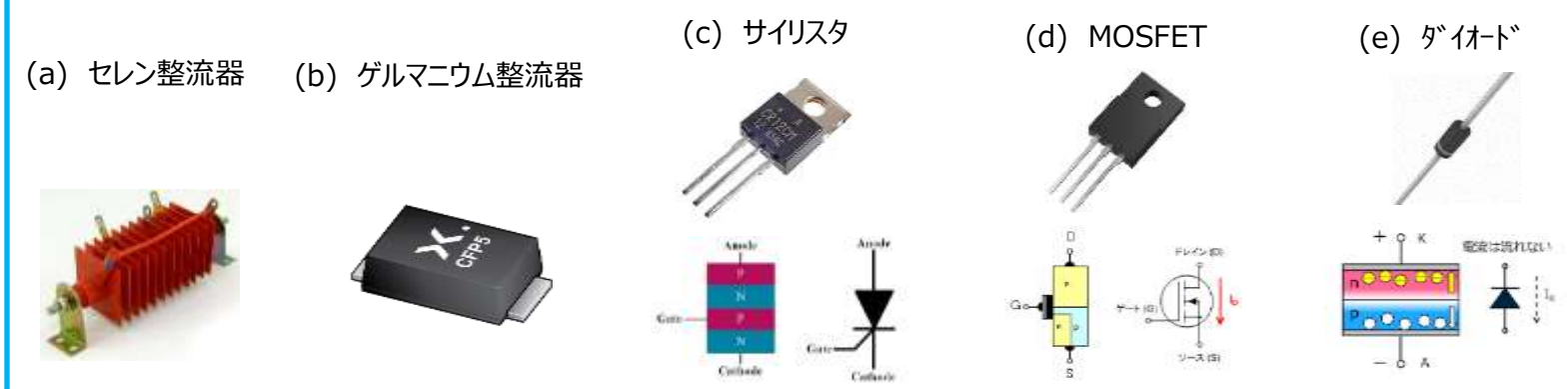


1.対象品目の概要調査（2）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

【整流器】：交流を直流に変換する素子の総称であり、コンバーターともいう。整流の機能をもつ回路は整流回路と呼ばれる。
★半導体以前の整流器
・水銀整流器：ガラス管または鉄製容器の中に封入した水銀と炭素電極間のアーク放電で整流を行なう整流器である。
・熱陰極水銀整流管：ガラス管または鉄製容器の中に封入した水銀と炭素電極間のアーク放電で整流を行なう整流器である。
・真空管ﾀﾞｲｵｰﾄﾞ：最初のダイオードは2極真空管で、後に半導体素子である半導体ダイオードが開発された。
【半導体整流器】
半導体整流器を図7-83-2に示す。
a)セレン整流器：半導体セレンの整流特性を利用した整流器。安価なため，一時期ラジオやテレビなどの整流電源に広く利用されていたが，シリコン整流器の開発に伴って置き換えられ，現在は使用されていない。
b)ゲルマニウム整流器：ゲルマニウムのpn接合を用いた整流器。
c)サイリスタ：シリコン半導体でつくられた電力用3端子スイッチング素子で、オフ状態からオン状態への切り替えを制御電極で行う。
d)MOSFET：電界効果トランジスタ の一種で、LSIの中では最も一般的に使用されている構造である。
e)半導体ﾀﾞｲｵｰﾄﾞ：シリコンにpn接合を作って電極を設けたものが半導体ダイオードで、整流ダイオードとも呼ばれる。

図7-83-2　半導体整流器



1.対象品目の概要調査（3）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

【パワー半導体の種類】

パワー半導体の比較を図7-83-3に示す。

☆スイッチングを行うパワー半導体

・サイリスター

ゲートからカソードへゲート電流を流すことにより、アノードとカソード間を導通させることが出来る3端子の半導体素子である。

・MOS FET（金属酸化膜半導体電界効果型トランジスタ）

電界効果トランジスタの一種で、LSIの中では最も一般的に使用されている構造である。

・IGBT（絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ）

半導体素子のひとつで、MOS FETを主要部に組み込んだバイポーラトランジスタである。電力制御の用途で使用される。

☆スイッチングを行わないパワー半導体

・ダイオード

ダイオードは整流作用を持つ電子素子である。従来、ダイオードは周波数が50/60Hzの商用電源の100VRMS交流出力を整流する素子として利用されていた。スイッチング電源では、100kHzを超える高い周波数で変化する電流を整流する必要がある。しかし従来の一般整流ダイオードでは、このような速い電流の切り替えができず短絡状態となってしまい、整流素子として機能しない。ダイオードのPN接合は、電流が流れると電荷が蓄積される。逆電圧を加えるには、この電荷を排出し、回復電荷を充電しなければならない。そこで誕生したのが，この逆回復電荷、または逆回復時間の規定のある高速整流ダイオードである。逆回復時間が短く，逆回復電荷が少ないダイオードほど高速で、市販品の逆回復時間は100n～1000nsである。

図7-83-3　パワー半導体の比較

種類／分類	サイリスタ	GTO	トランジスタ	IGBT	MOSFET
駆動信号	電　流	電　流	電　流	電　圧	電　圧
自己消弧能力	な　し	あ　り	あ　り	あ　り	あ　り
動作周波数	低	→	→	→	高
主な特徴	・外部に転流回路要	・サイリスタに比べ主回路が簡単	・GTOに比べ高速、高効率	・高速 ・オン抵抗小	・最も高速 ・オン抵抗大

1.対象品目の概要調査（4）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

パワー半導体の中で最も熱が発生する場所は、PN接合部で、ジャンクション温度Tjと呼ばれる。ジャンクション温度を図7-83-4に示す。

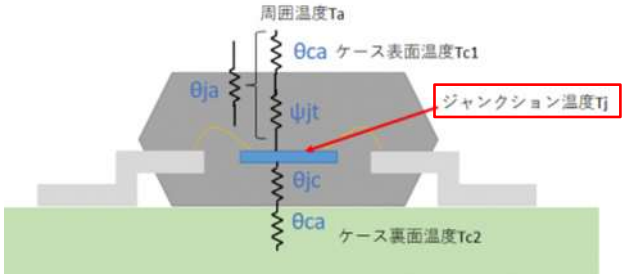
【最大接合部温度】

最大接合部温度（最大ジャンクション温度）とは、半導体が動作する最大の温度を示す。ICの消費する電力による発熱や、周囲温度を考慮した使用、熱設計が必要となる。ジャンクション温度は周囲温度や消費電力から計算できる。

※ジャンクションとはPN接合部のことを指す。

Tj＝Ta＋Rth(j-a)×P
Tj：ジャンクション温度
Ta：周囲温度
Rth(j-a)：ジャンクションと雰囲気間の熱抵抗（実装する基板によって異なる）
P：消費電力

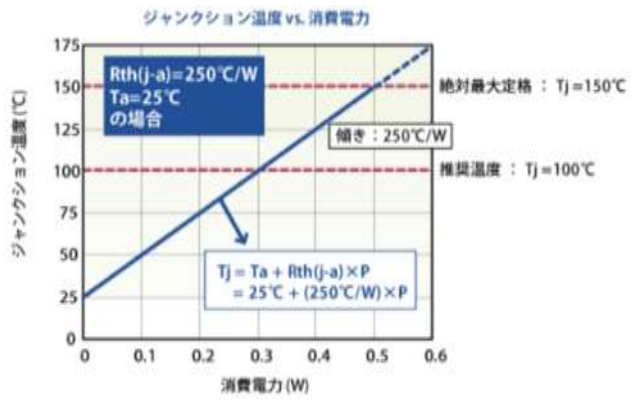
図7-83-4　ジャンクション温度



熱抵抗Rth(j-a)が250℃/Wで周囲温度Taが25℃の時の、消費電力Pとジャンクション温度Tjの関係を図7-83-5に示す。

消費電力に比例してジャンクション温度が上昇する。そのときの比例定数がRth(j-a)である。Rth(j-a)が250℃/Wなので、ジャンクション温度は消費電力が0.1W増えるごとに25℃上がる。消費電力が0.5Wのときにジャンクション温度が150℃になるので、この例では0.5W以上の電力をかけられないことが分かる。

図7-83-5　ジャンクション温度と消費電力の関係



＜規制パラメータ＞

イ　最大動作接合部温度が215度を超えるように設計したもの

最大接合部温度は、設計により決まる。

「最大動作接合部温度が215度を超える」パワー半導体は、特別に設計したもので、輸出に際しては注意が必要である。

1.対象品目の概要調査（5）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

＜規制パラメータ＞

ロ　繰返しピーク休止状態電圧が300ボルトを超えるもの

【繰り返しピークオフ電圧】（繰返しピーク休止状態電圧）
　出力端子間に連続して印加することのできる、繰り返し性のある電圧の最大値のことである。一般に電源電圧の変動や開閉サージなどの異常電圧を考慮して負荷電圧に対する耐圧を考慮して素子を選定する。

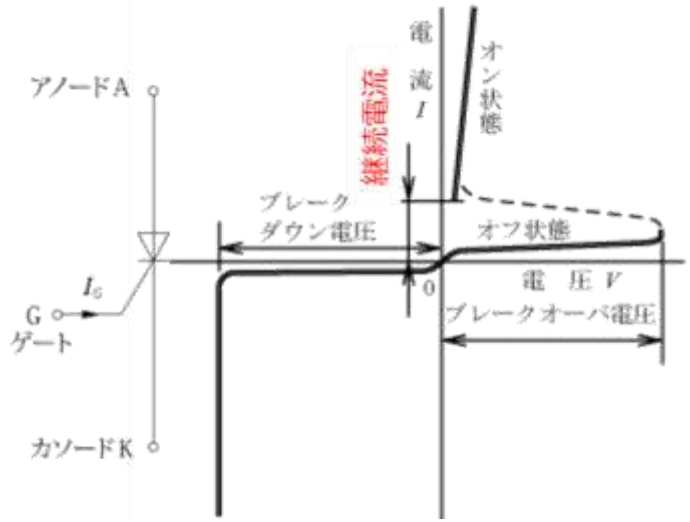
＜規制パラメータ＞

ハ　継続電流が１アンペアを超えるもの

【継続電流】
　サイリスタの特性を図7-83-6に示す。
　オフからオンになることをターンオンという。ターンオンすると、順方向電圧の場合、アノード電流が流れる。いったんターンオンし電流が流れると継続する（継続電流）。このためターンオフするには転流回路が必要である。

　上記省令の規制パラメータ(イ)、(ロ)、(ハ)すべてが該当する場合、輸出規制に該当する。
　高温環境下でも動作可能な大出力機器で、
★電子熱化学砲
★電磁レールガン
★パルスレーザー
★ハイパワー特殊溶接機　等である。

図7-83-6　サイリスタの特性



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令								貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号	イロハ	細番					
7(8の3)	6		八号の三						電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュールであって、次のイからハまでのすべてに該当するもの（民生用の自動車、鉄道車両又は航空機に使用するように設計された装置に組み込まれたものを除く。）	
			八号の三	イ					イ　最大動作接合部温度が215度を超えるように設計したもの	最大動作接合部温度が215度を超えるように設計
			八号の三	ロ					ロ　繰返しピーク休止状態電圧が300ボルトを超えるもの	繰返しピーク休止状態電圧が300ボルトを超える
7(8の3)	6		八号の三	ハ					ハ　継続電流が１アンペアを超えるもの	継続電流が１アンペアを超える

Wassenaar規制番号						Wassenaar規制文言（英文）
3桁	細番					
3A1	h					h. Solid-state power semiconductor switches, diodes, or 'modules', having all of the following: Note 3 3.A.1.h. does not apply to switches, diodes, or 'modules', incorporated into equipment designed for civil automobile, civil railway, or "civil aircraft" applications
3A1	h	1				1. Rated for a maximum operating junction temperature greater than 488 K (215°C);
3A1	h	2				2. Repetitive peak off-state voltage (blocking voltage) exceeding 300 V; and
3A1	h	3				3. Continuous current greater than 1 A.

比較原文
・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html
・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

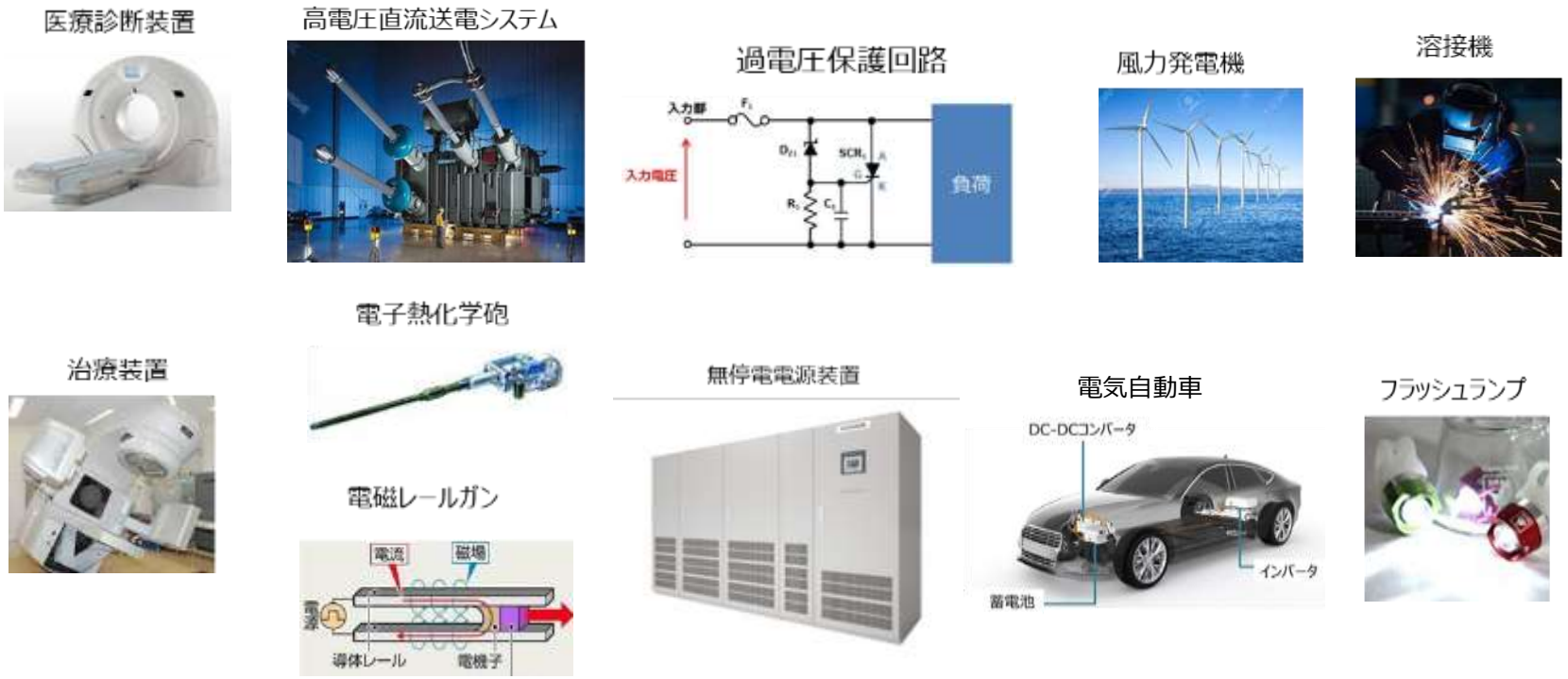
【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

パワー半導体は、電源回路を持つ電子機器に搭載されており、スマートフォンやパソコン、テレビやエアコン、冷蔵庫といった家電製品の電源回路に用いられている。また、大電力の分野では電気自動車や電車、5G基地局、産業機器、太陽光発電などの電力制御、高電圧直流伝送システムの整流機器にも用いられている。

パワー半導体の用途を図7-83-7に示す。

図7-83-7　パワー半導体の用途



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【民生用途１】

☆高電圧直流（HVDC）送電システム
　高電圧では距離が長くなると、交流送電よりも直流送電の方がコストメリットが大きくなる。コストメリットの分岐点を図7-83-8に示す。
・直流は距離によらず交直変換器が必要　×直流
・直流は基本2線でよい　〇直流
・距離が長くなると交流には調相設備が必要　×交流
　各方式の比較を図7-83-9に、
高電圧直流送電システム構成を図7-83-10に示す。

図7-83-9　方式の比較

項　目	直流送電	交流送電
導体数（電線・ｹｰﾌﾞﾙ）	〇 2本(本・帰線)	× 3本（三相）
長距離送電	〇 適	× 不適（ﾌｪﾗﾝﾁ等、系統安定度難）
送電容量	〇 熱制約のみ	× 熱制約あり（導体抵抗ﾛｽ） ＬＣ制約あり（無効電力ﾛｽ）
絶縁設計	〇 低	× 高（最大値ルート２倍）
送電効率	〇 良	×
電圧変換	× 複雑	〇 容易（変圧器）
交直変換設備	× 要	〇 不要
遮断	× 難（ｱｰｸ対策要）	〇 容易（ゼロ点あり）

図7-83-8　コストメリットが生じる分岐点

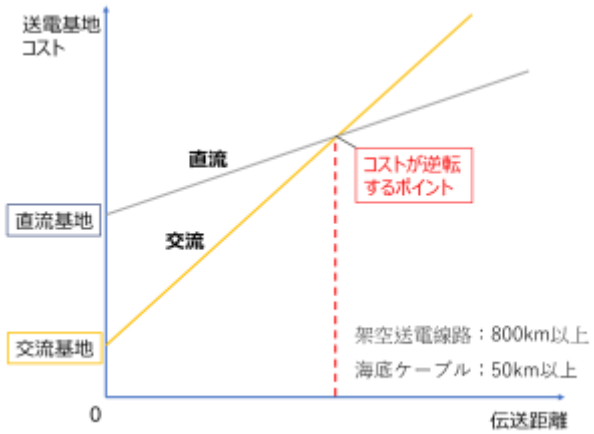
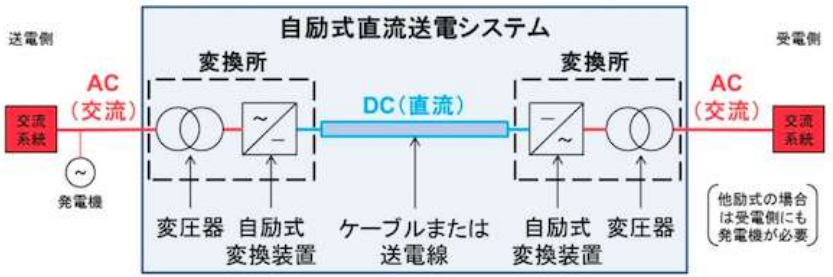


図7-83-10　高電圧直流送電システム



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【民生用途2】

民生用途の例を図7-82-11に示す。

☆過電圧保護回路（図7-82-11(a)）

入力部に過電圧が発生するとサイリスタがオンして、アノードとカソードが導通状態となり、短絡電流が流れるため、ヒューズ（F_1）が溶断する。このような回路をSCRクローバー方式と呼び、過電圧印加時に短絡させてヒューズを溶断することで負荷に過電圧が印加されるのを防止している。

☆写真用フラッシュランプ（図7-82-11 (b)）

シャッターボタンを押すと、大容量ｺﾝﾃﾞﾝｻに蓄えられていた電荷が放出され、トランスにより数千Vの高電圧が電極にかかり発光する。

☆医療診断（図7-82-11 (c)）

MRI、CTやX線などの最先端の医療診断システムには多くのエネルギーを必要とし、この電流制御にサイリスタが用いられる。スイッチング周波数が高くなると診断性能が向上し、同時に装置の重量と大きさは減少する。

☆治療装置（図7-82-11 (d)）

放射線治療装置：高エネルギーの放射線を作り出し、照射する。

陽子線治療装置：イオン源より発生させた陽子を加速し、がん病巣の位置や形状に応じて適した方向から照射する。（電流制御にサイリスタが用いられる）

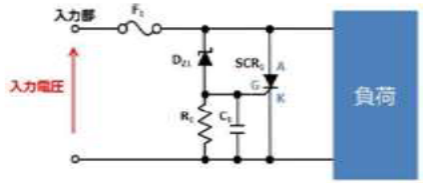
☆アーク溶接機（図7-82-11 (e)）

アーク溶接用電源の回路構成は、単相または三相のトランスと出力にチョークコイルを接続した単相または三相の整流器で構成されており、サイリスタを追加して電流制御が可能になる。低い出力電圧で非常に大きな高い直流電流が求められる。

サイリスターのパルス出力切換を用いたハイパワー溶接機は、規制に該当する可能性があるので、注意が必要である。

図7-83-11　民生用途

(a)過電圧保護回路



(b) フラッシュランプ



(c) 医療診断装置



(d) 治療装置



(e) 溶接機



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【民生用途3】

☆電気自動車

電気自動車で使われる整流素子の主な用途を図7-83-12に示す。

電気自動車では、発電機は交流を出力し、蓄電池は直流を蓄えるため、交流と直流の変換が必要となる。変換方式としては、トランス方式とスイッチング方式がある。トランス方式は低周波の交流電圧をそのままトランスで電圧変換した後に整流平滑するもの、スイッチング方式は高速スイッチング回路により高周波交流にした後にトランスを通して電圧変換し、整流平滑を行うものである。スイッチング方式は高周波で変換を行うために、トランスが小さくて軽く、効率も高い。また安定性も優れているため、車載用ではスイッチング方式が主流である。

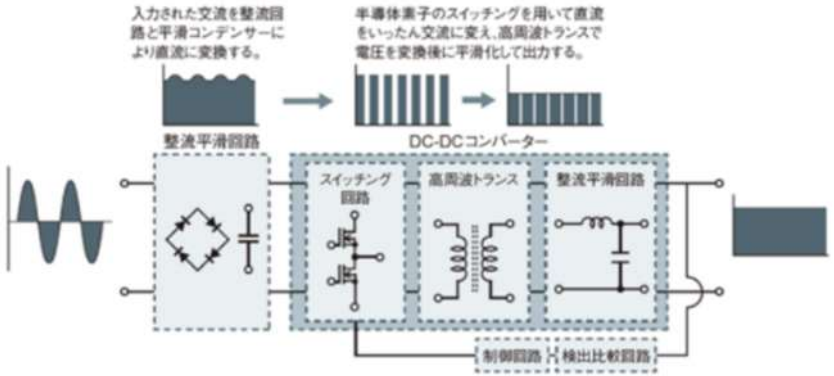
スイッチング方式の回路を図7-83-13に示す。

スイッチング方式は、入力電力を整流素子と平滑コンデンサーで直流に変えた後、半導体スイッチ素子のオン／オフでいったん高周波交流としてから高周波トランスで変圧し、フィルター回路やダイオードなどを用いて整流平滑して出力する。

図7-83-12　電気自動車で使われる整流素子



図7-83-13　スイッチング回路



3.品目の主たる用途の調査分析（5）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【民生用途4】

☆風力発電機（図7-82-14）
　発電装置から得られる交流を直流に変換するとともに位相制御によって出力電圧の大きさを可変する。
☆無停電電源装置（図7-82-15 ）
　無停電電源装置とは、予期せぬ停電や入力電源異常が発生した際に、電源を供給する機器に対し一定時間電力を供給し続けることで、機器やデータを保護することを目的とした装置である。
☆電気炉温度制御（図7-82-16 ）
　昔の電気炉はON/OFF制御方式で、例えば炉内の温度設定が500℃の場合、500℃に達した時にヒーターがOFFになり、しばらく温度上昇してから冷めるため、狙った温度にはならなかった。それに対して、サイリスターでの制御は、500℃に近づくにつれてヒーターの出力が弱まり、500℃を超えないように調整され、ヒーター出力をコントロールしながら保持するため精度良く設定温度が保たれる。

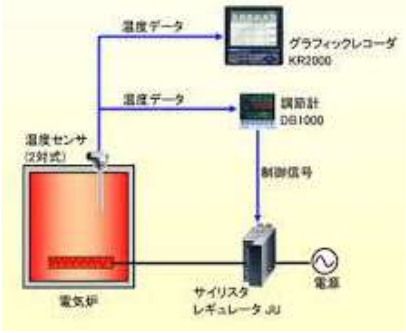
図7-83-14　風力発電



図7-83-15　無停電電源装置



図7-83-16　電気炉の制御



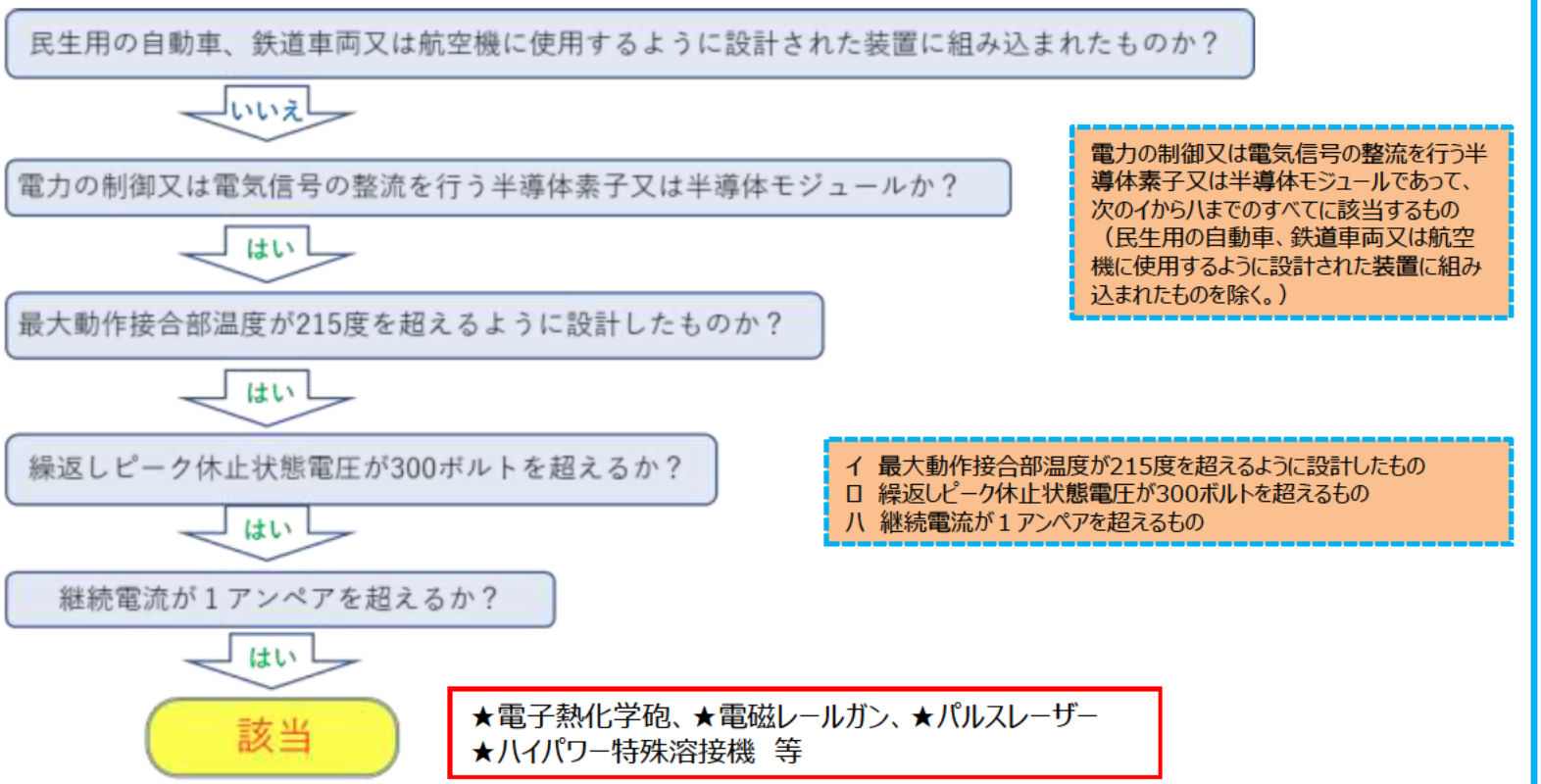
3.品目の主たる用途の調査分析（6）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

規制省令に基づき、規制に抵触するかどうかを図7-83-17　規制判定フロー」に示す。

図7-83-17　規制判定フロー



3.品目の主たる用途の調査分析（7）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

☆電子熱化学砲（図7-83-18）
　電子熱化学砲は、プラズマカートリッジを使用して、サイリスタで大電流を発生させて弾薬の推進剤を点火、制御する。電子熱化学技術は、レールガンやコイルガンなどに応用されている。
☆レールガン（図7-83-19）
　物体を電磁気力により加速して撃ち出す装置である。推力に電磁力を用いるため、瞬時に大電流が必要とされ、電力をコンデンサバンクに溜めてからサイリスタでコントロールして放出することで、高速で撃ち出すことが出来る。
☆パルスレーザー
　時間的に連続して発振する連続発振レーザーに対して，間欠的に短い時間の間だけパルスで発振するレーザーのことで、パルス発振にサイリスタが用いられる。
☆磁気成形
　磁気成形法は被加工材を電磁力により高速変形させることで成形を行う工法である。成形時のスプリングバックが小さく、高精度の成形ができる。また、複雑微細な形状の成形が可能である。
☆航空機発射用電磁カタパルト
　リニアモーターによって航空母艦から固定翼機を発射するシステムである。
☆軍事転用可能なスイッチングデバイス（図7-83-20）
　スイッチング装置は核兵器に使用され、容量点火装置のコンデンサに蓄えた電気エネルギーを、爆縮装置の雷管回路に送出するために使用される。問題となるスイッチング装置の一部は、主点火装置の作動スイッチに必要な点火信号を発するために使用される。

図7-83-18　電子熱化学砲

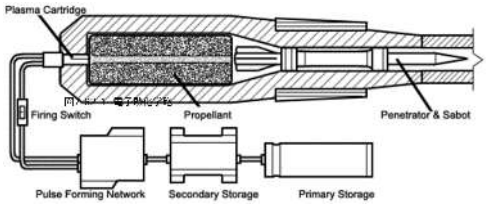


図7-83-19　レールガン

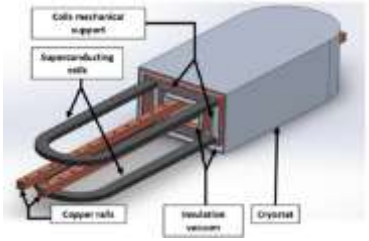


図7-83-20　スイッチングデバイス



4.品目の技術動向調査（1）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

【パワー半導体の技術動向】

Band Gapが大きい材料を使うことによって、高い絶縁破壊電界強度が得られる。すなわち、薄い空乏層で大きな耐圧を出すことができるので、ドリフト層を薄くできることと不純物の濃度を上げることができることの相乗効果で、耐圧とドリフト抵抗のトレードオフを飛躍的に向上することが可能となる。

SiCやGaNなどのWide Band Gap半導体（WBG半導体）を用いた次世代パワー半導体デバイスが注目されている。

Band Gap材料の特性を図7-83-21に、WBG半導体の可能性を図7-83-22に示す。

WBG半導体はON抵抗を大幅に低減可能な半導体材料である。SiCはより高耐圧、大電力化に、GaNはより高周波化に貢献しパワーデバイスの適用領域を広げる。

図7-83-21　Band Gap材料の特性

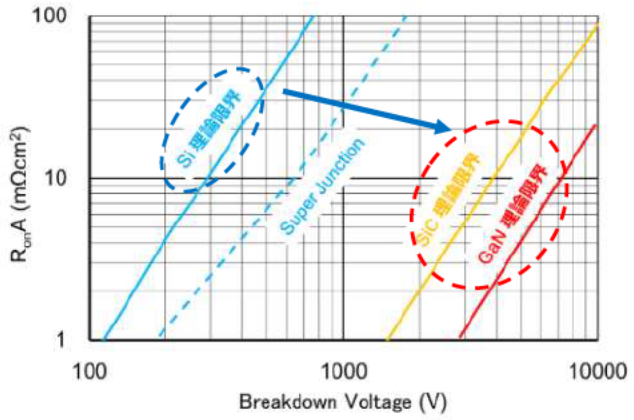
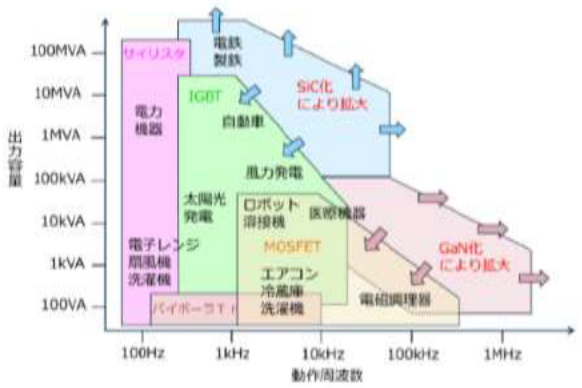


図7-83-22　WBG半導体の可能性



4.品目の技術動向調査（2）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

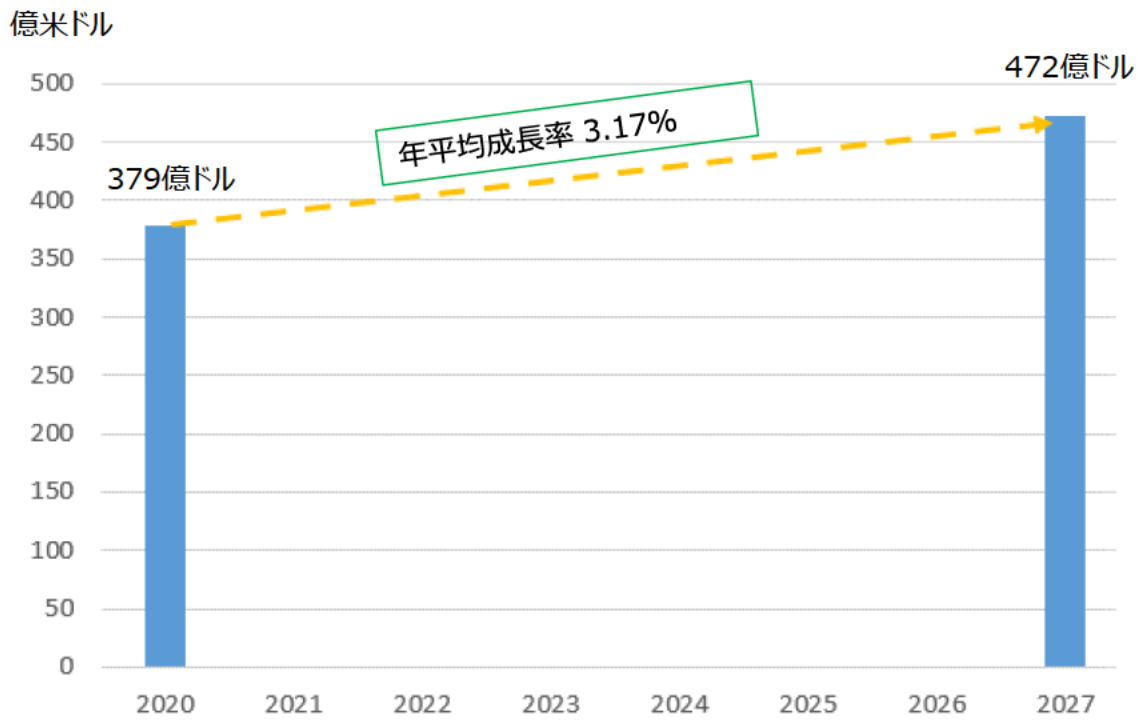
②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

2021年11月17日にREPORTOCEANが発行した新しいレポートによると、世界のパワー半導体市場は2027年までに472億米ドルに達すると予想されている。2020年に約379億米ドルと評価され、2021年から2027年の予測期間において3.17%以上の健全な成長率が見込まれている。

世界のパワー半導体市場の予測を図7-83-23に示す。

図7-83-23　世界のパワー半導体市場　2020(実績)～2027(予測)

REPORTOCEANより



4.品目の技術動向調査（3）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

パワー半導体の世界市場でシェア上位を占めるのは、ドイツのインフォニオンテクノロジーズやアメリカのオンセミコンダクター、スイスのSTマイクロエレクトロニクスといった海外企業で、日本では三菱電機やローム、東芝、ルネサス エレクトロニクス、富士電機といった企業が入っている。パワー半導体は高度な技術を必要とし、多品種少量生産という特徴からも、参入へのハードルが高い分野で、半導体全体の市場では上位の韓国や中国企業も容易に台頭できない分野となっている。

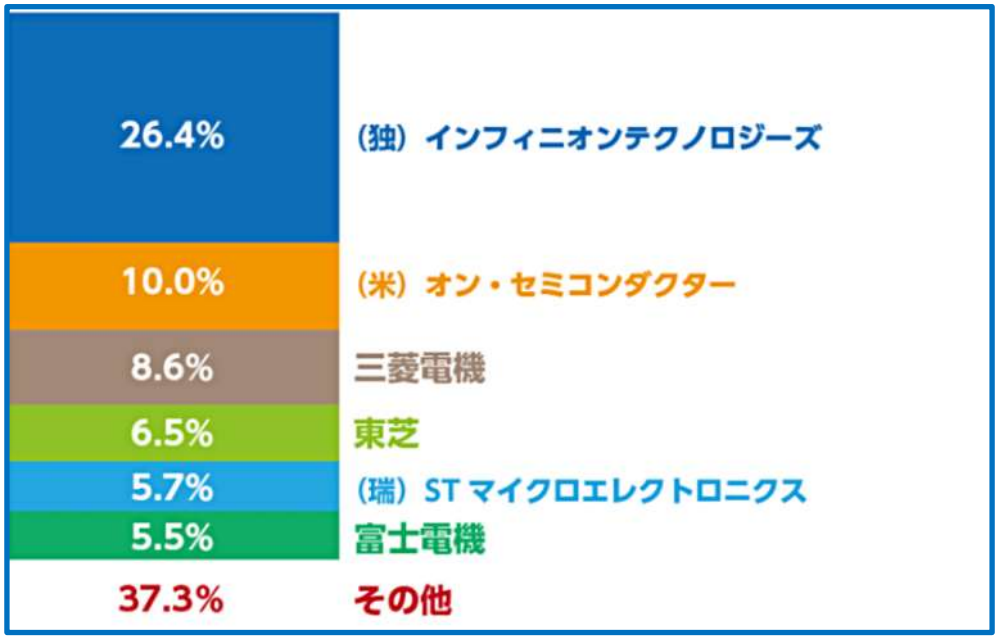
パワー半導体の世界シェアを図7-83-24に示す。

・インフィニオンテクノロジーズ（ドイツ）：自動車メーカーや各種産業向けに半導体を製造する多国籍企業。パワー半導体、特にIGBTおよびパワーMOSFETにおいて世界トップクラスの市場シェアを有する。

・オン・セミコンダクター（アメリカ）：オン・セミコンダクターの前身は、モトローラ社の半導体コンポーネント・グループであった。2006年以降、大規模な事業買収により、急成長をとげている。Fairchild Semiconductor International Inc.（アメリカ）も2016年に買収している。日本における傘下法人としてはオン・セミコンダクター株式会社など複数の法人が存在している。2010年7月、三洋電機から三洋半導体（現オン・セミコンダクター・ホールディングス）の買収を発表した。

・三菱電機（日本）：三菱電機は日本企業の中では、パワー半導体でトップシェアを持つ。産業機器、鉄道車両用インバーターやエレベーターなどの重電システム、家電といったパワー半導体を使用する機器を自社で手掛けていることが強みとなっており、2017年度は1,300億円だったパワーデバイス事業の売上高を、2022年には2,000億円にまで引き上げることを目指している。

図7-83-24　パワー半導体の世界シェア



出典：HIS Markit.

4.品目の技術動向調査（4）

【輸出令第7項（8の3）】電力の制御又は電気信号の整流を行う半導体素子又は半導体モジュール

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

・東芝（日本）：パワー半導体への投資を継続的に行い、今後、データセンターなどでの活用が見込まれるSiCパワー半導体や、GaNパワー半導体の開発・製品化を加速する考えを示している。
・ＳＴマイクロエレクトロイクス（スイス）：半導体の製造・販売を行う多国籍企業である。日本法人として、エス・ティー・マイクロエレクトロニクス株式会社がある。
・富士電機（日本）：自動車や産業機器の分野で使用するパワー半導体を供給している。「2019～2023年度中期経営計画」で、「パワエレシステム・パワー半導体」を成長戦略の中核に位置付けており、5年間でパワー半導体への1,200億円の設備投資を予定している。2023年度のパワー半導体の売上高の目標を2018年度の57%増の1,750億円としており、SiCパワーデバイス市場では、2025年～2026年に2割のシェア獲得を目標に掲げている。

その他のパワー半導体メーカーを表7-83-1に示す。

表7-83-１　その他のパワー半導体メーカー

企業名	概要
ABB Ltd. (スイス)	スイスに本社を置く多国籍企業で、100カ国以上でビジネスを展開している。1988年にスウェーデンのアセアとスイスのブラウン・ボベリが合併して成立した。ファナック、安川電機、クーカと並んで世界4大産業用ロボットメーカーのひとつ。
Fairchild Semiconductor International Inc.（アメリカ）	世界で初めて半導体集積回路の商業生産を開始した企業である。2016年にオン・セミコンダクターによって買収された。
Powerex Semitronics Corp（アメリカ）	輸送、モーター制御、UPS、代替エネルギー、医療用電源、溶接、産業用暖房、電気自動車、航空機、通信などを手掛けるパワー半導体の会社である。
Silicon Power（台湾）	メモリーカード、USBフラッシュドライブ、外付HDD、SSD、モバイルバッテリーなどを手掛けるメーカーである。
日立製作所（日本）	IT、エネルギー、インダストリー、モビリティ、ライフ、日立ハイテク、日立建機、日立金属、その他の9の部門から構成されている。
三社電機製作所（日本）	電源機器と半導体の生産が主の会社で、金属表面処理用電源で国内首位である。半導体はパワー半導体系でニッチ戦略をとっている。
ルネサスエレクトロニクス（日本）	三菱電機および日立製作所から分社化していたルネサス テクノロジと、NECから分社化していたNECエレクトロニクスの経営統合によって、2010年4月に設立された。車載マイコンでは世界シェアの3割を占めトップシェアである。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（8の4）
電気光学効果を利用する光変調器

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

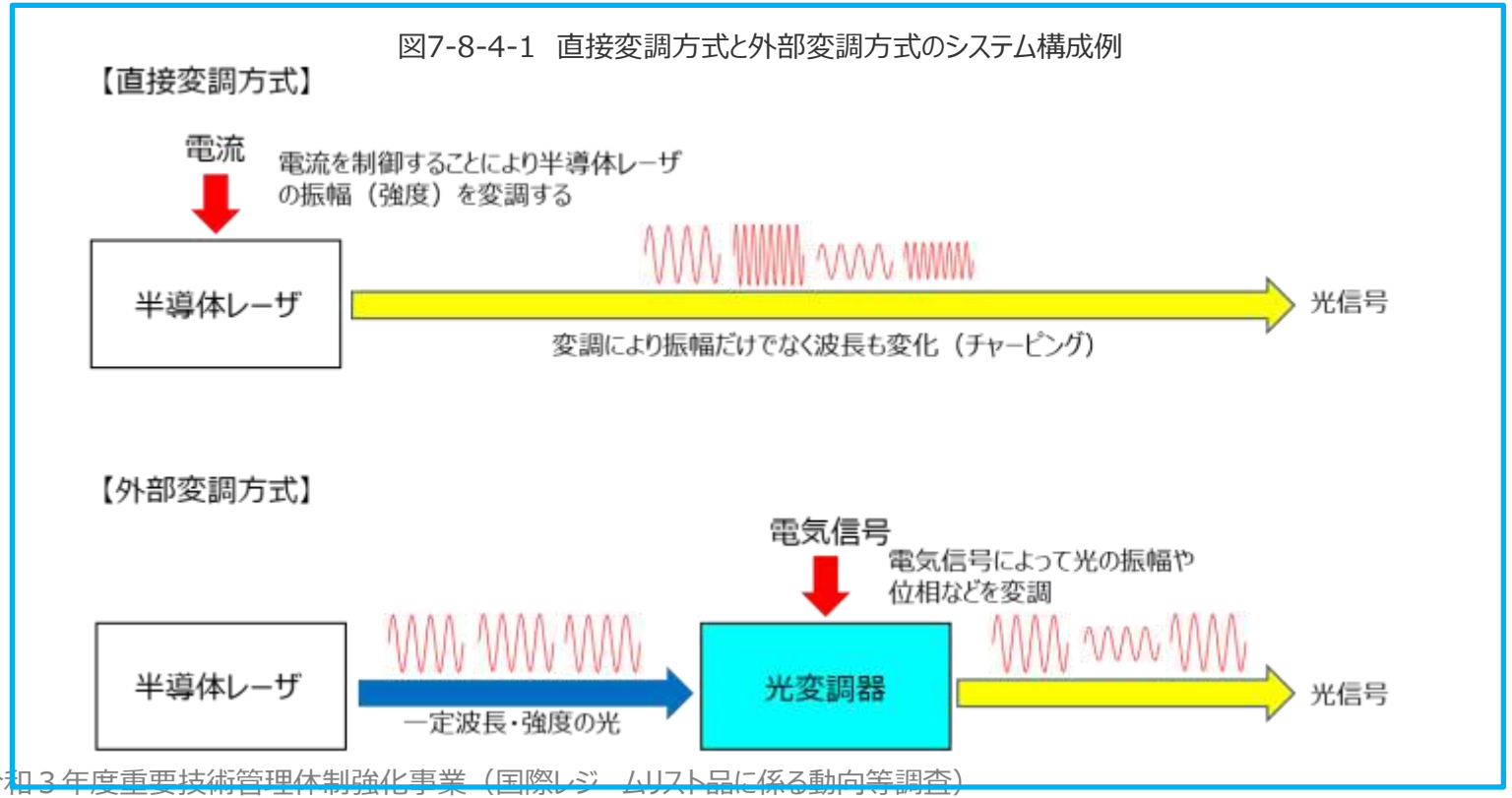
○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

【光変調器と変調方式の種類】

光変調器は、電気信号により光を変調して電気信号を光信号に変換する装置であり、光による情報の伝達に使用される。光の変調は振幅（強度）、周波数、位相のいずれかを用いて行われる。アナログ電気信号をアナログ光信号として出力して用いる場合もあるが、振幅（強度）の変調率100%すなわち最小振幅（強度）を0にするオン・オフ・キーイング（OOK）が使われることが多い。これによりビット値1と0を光信号で表してデジタル信号化する。

これとは別に、 光源光の変調には、光源であるLEDやレーザーダイオードなどの発光素子の出力をを直接制御する直接変調方式と、光源の出力は一定のまま、出力後の光の強度を光変調器で変える外部変調方式がある。直接変調方式と外部変調方式のシステム構成例を図7-8-4-1に示す。光変調器が不要の直接変調方式は高速で変調した場合に光の波長が変動する現象（チャーピング）が発生するため、高速での光変調が必要な場合は、主として外部変調方式が使われている。

図7-8-4-1　直接変調方式と外部変調方式のシステム構成例



1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

【光変調器の原理】

外部変調方式では半導体レーザの光の強度を変えるために光変調器が用いられるが、光変調器で光の強度を変える方法には、電気光学効果を利用する方法、音響光学効果を利用する方法、電界吸収効果を利用する方法、熱光学効果を利用する方法、磁気光学効果を利用する方法がある（表7-8-4-1）。これらのうち、電気光学効果、熱光学効果、磁気光学効果は光の位相あるいは偏光面を制御する手段であるため、これらを光の強度の変化として出力するための変換手段がさらに必要である。

規制の対象である電気光学効果を利用する光変調器で主に用いられているのはマッハツェンダ（Mach−Zehnder interferometer）干渉計である（図7-8-4-2）。マッハツェンダ干渉計は入力光を分岐させて2つの導波路に分け、電気光学効果で片方の導波路の光の位相のみ変化させた後、再び2つの光を合成して干渉光として出力する。片方の光の位相を半波長ずらすと、合成後の出力光は干渉により完全に打ち消し合って0となる。この時加える電圧を半波長電圧という。電気光学効果を全く加えない場合は、理論上出力光は入力光と等しくなる。実際には、部材による光損失により、電気光学効果を全く加えない場合でも出力光は入力光より弱くなる。

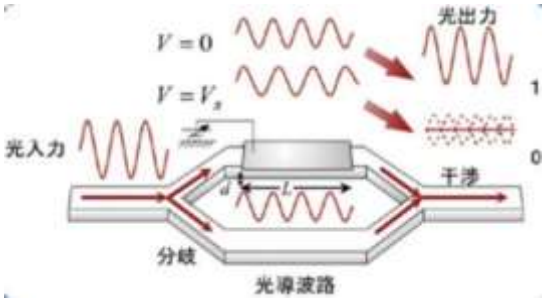
マッハツェンダ干渉計を用いた変調器はチャーピングが非常に小さいため，長距離の基幹系用の光変調器の主流となっている。

表7-8-4-1　干渉計を用いた光変調器の作動原理

方式		作動原理	代表的な材料	光強度出力への変換手段
電気光学	Electro-Optic	電界で屈折率が変化する物質により光の位相を制御	$LiNbO_3$、Si、InGaAsP、有機EOポリマ	干渉計
音響光学	Acousto-Optic	超音波で格子定数が変化する結晶により光の回折を制御	$LiNbO_3$、InP、GaP、TeO_2	不要
電界吸収	Electro-Absorption	電界で光の吸収量が変化する半導体により光の強度を制御	GeSi、InGaAsP	不要
熱光学	Thermo-Optic	熱で屈折率が変化する物質により光の位相を制御	石英ガラス、フッ化ポリイミド、PMMA	干渉計
磁気光学	Magneto-Optic	磁気で透過光の偏光面が回転する磁性体により光の偏光面を制御	磁性ガーネット	偏光子

図7-8-4-2　光変調器マッハツェンダ干渉計の構造と光変調器製品例

【マッハツェンダ干渉計】



【光変調器製品例】



iXblue Photonics社
NIR-MPX800-LNシリーズ

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(8の4)	6		八号の四	八の四　アナログ信号用に設計した光の強度、振幅又は位相を操作する電気光学効果を利用する光変調器であって、次のいずれかに該当するもの（光入出力コネクタを有するものを含む。） イ　最大動作周波数が一〇ギガヘルツ超二〇ギガヘルツ未満であって、光挿入損失が三デシベル以下のもののうち、次のいずれかに該当するもの （一）　一ギガヘルツ以下の周波数で測定した場合の半波長電圧が二・七ボルト未満のもの （二）　一ギガヘルツを超える周波数で測定した場合の半波長電圧が四ボルト未満のもの ロ　最大動作周波数が二〇ギガヘルツ以上のものであって、光挿入損失が三デシベル以下のもののうち、次のいずれかに該当するもの （一）　一ギガヘルツ以下の周波数で測定した場合の半波長電圧が三・三ボルト未満のもの （二）　一ギガヘルツを超える周波数で測定した場合の半波長電圧が五ボルト未満のもの 半波長電圧 光変調器を伝搬する光の波長において180度の位相変化を作るのに必要な印加電圧をいう。	最大動作周波数が10ギガヘルツ超20ギガヘルツ未満であって、光挿入損失が3デシベル以下 1ギガヘルツ以下の周波数で測定した場合の半波長電圧が2.7ボルト未満 1ギガヘルツを超える周波数で測定した場合の半波長電圧が4ボルト未満 最大動作周波数が20ギガヘルツ以上のものであって、光挿入損失が3デシベル以下 1ギガヘルツ以下の周波数で測定した場合の半波長電圧が3.3ボルト未満 1ギガヘルツを超える周波数で測定した場合の半波長電圧が5ボルト未満

Wassenaar規制番号					Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番				
3A1	i				i. Intensity, amplitude, or phase electro-optic modulators, designed for analogue signals and having any of the following: Note: 3A001.i. includes electro-optic modulators having optical input and output connectors (e.g., fibre-optic pigtails). 1. A maximum operating frequency of more than 10 GHz but less than 20 GHz, an optical insertion loss equal to or less than 3 dB and having any of the following: a. A 'half-wave voltage' ('Vπ') less than 2.7 V when measured at a frequency of 1 GHz or below; or b. A 'Vπ' of less than 4 V when measured at a frequency of more than 1 GHz; or 2. A maximum operating frequency equal to or greater than 20 GHz, an optical insertion loss equal to or less than 3 dB and having any of the following: a. A 'Vπ' less than 3.3 V when measured at a frequency of 1 GHz or below; or b. A 'Vπ' less than 5 V when measured at a frequency of more than 1 GHz. Note 3.A.1.i. includes electro-optic modulators having optical input and output connectors (e.g., fibre-optic pigtails). Technical Note For the purposes of 3.A.1.i., a 'half-wave voltage' ('Vπ') is the applied voltage necessary to make a phase change of 180 degrees in the wavelength of light propagating through the optical modulator.
		1			
			a		
			b		
		2			
			a		
			b		

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（１）

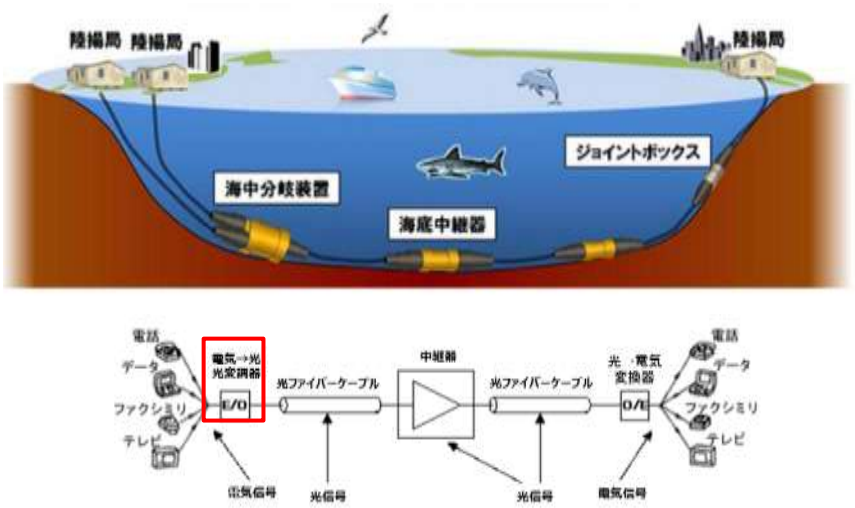
【通信】

光変調器は光信号による情報伝達のための機器の部材として使用される。代表的な用途としては、電気通信より高速に情報を伝達できる光通信が挙げられる。光通信の代表的なものは光ファイバを介した有線通信であり、インターネット・電話の基地局間や海底ケーブルによる大陸間の通信など、幅広く使われている。光通信は、また、光ファイバを介さない無線で行われることもあり、例えば衛星と地上局の間や衛星間の通信に利用されている。

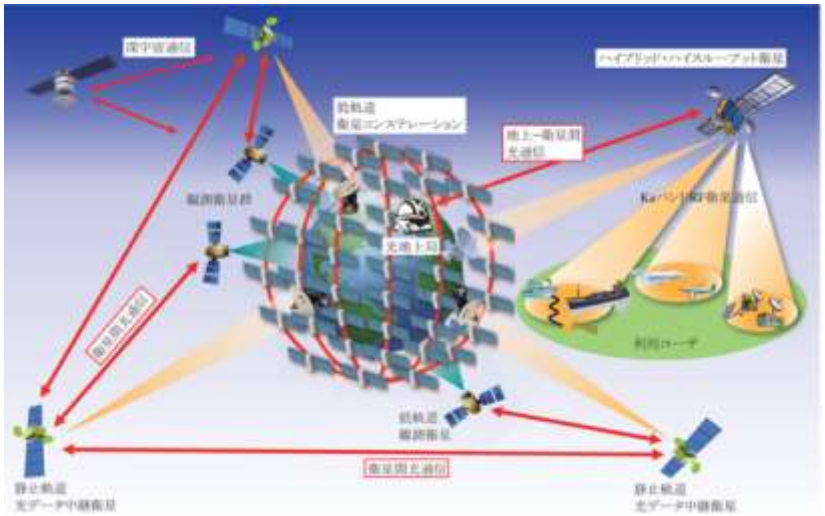
これらの使用例を図7-8-4-3に示す。

図7-8-4-3　光変調器の用途（光通信）

【光ファイバを介した光通信と光変調器の使用箇所】



【無線による光通信】



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

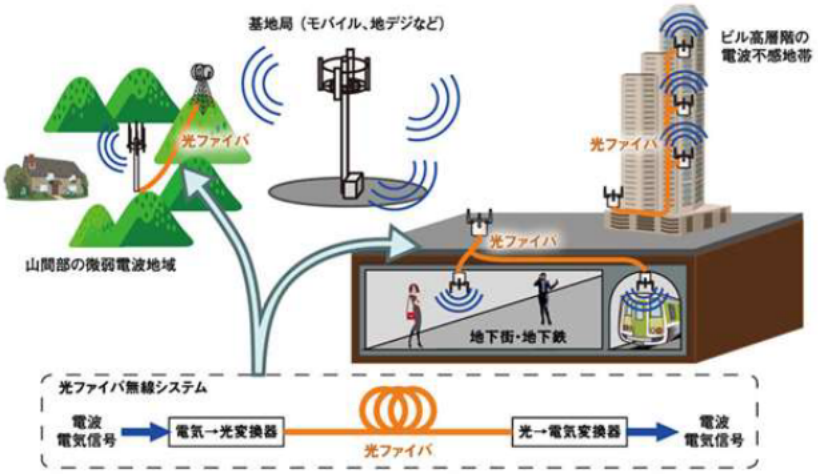
○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（2）

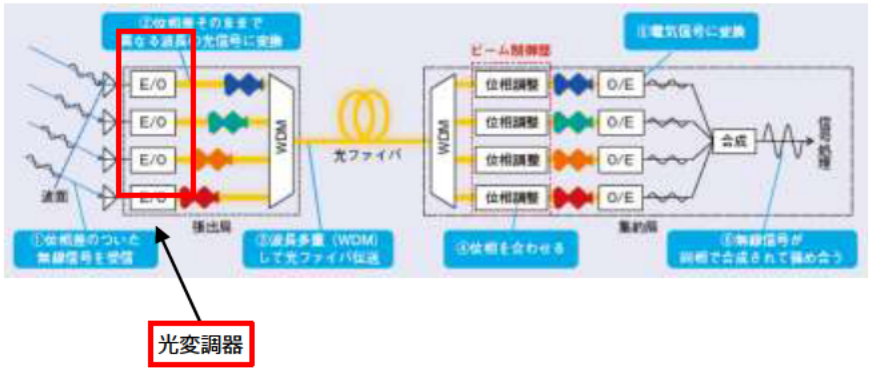
【通信、光量子コンピュータ】
光変調器はさらに携帯端末の不感地と基地局を結ぶ回線や、位相差のついた複数の信号を扱うアレーアンテナでも用いられている。
コンピュータの分野では、電気的ビットを使う従来のコンピュータに対し、より多くの状態を同時に表すことができる量子ビットを用いた光量子コンピュータの開発が進められている。光量子コンピュータでは、組み合わせ問題等の瞬時並列計算が可能となる。
これらの使用例を図7-8-4-4に示す。

図7-8-4-4　光変調器の用途

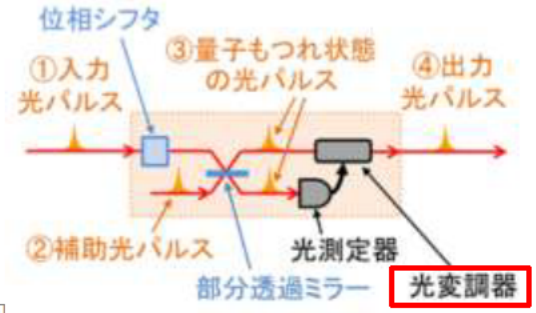
【携帯端末向け不感地システム】



【アレーアンテナの構成】



【光量子コンピュータ回路での光変調器使用例】



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

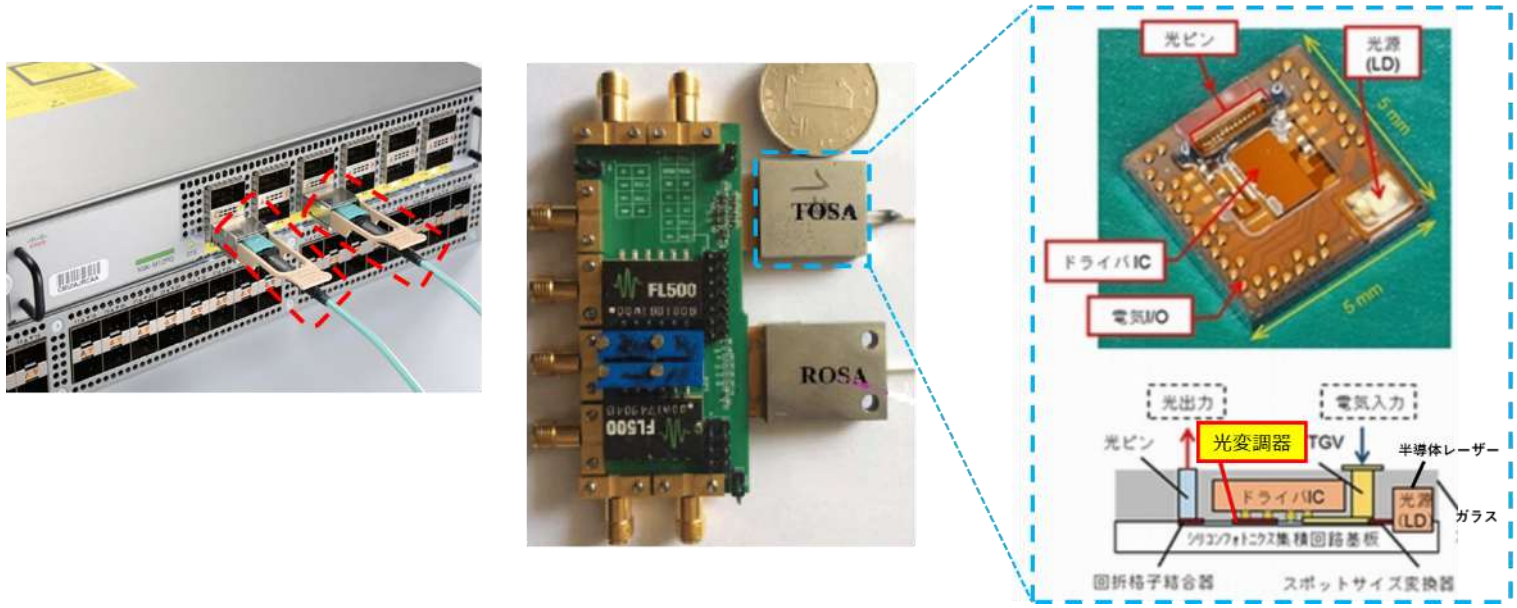
○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（3）

【光トランシーバ】

通信用途において、光変調器は光トランシーバの一部として使用される。光トランシーバは、光変調器、光源である半導体レーザや光導波路、光受信器（フォトダイオード）、光ファイバ、シリコン／フォトニクス集積回路などで構成されている。光トランシーバの内部構造の例を図7-8-4-5に示す。

図7-8-4-5　光トランシーバの内部構造の例



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（4）

【軍事用途】

光変調器が軍事技術に使われている例を図7-8-4-6に示す。

光変調器の代表的な用途である光通信は軍事技術としても使われている。システム構成としては、軍事用途と民生用途で大きな違いはなく、軍事用途ではより高速化、大容量化、信頼性向上、機器の小型化が求められている。将来は、光通信は軍事用途が先行して宇宙光通信による高速宇宙通信ネットワークが発達すると考えられる。

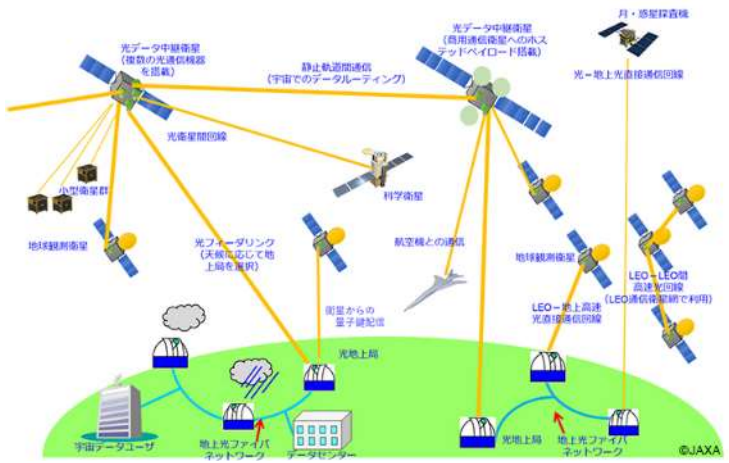
光信号は電磁干渉の影響を受けないことから、有線ミサイル誘導システムや航空機のフライ・バイ・ライトシステム等に光ファイバと共に光変調器が使用されている。

通信の他に、フェーズドアレイレーダーのアンテナ部の変調器など、レーダーシステムやレーダー妨害装置にも使われている。

現在開発が進められている光量子コンピュータも軍民両用技術である。

図7-8-4-6　光変調器を用いた機器の軍事用途への利用例

【宇宙光通信による高速宇宙通信ネットワークの将来像】



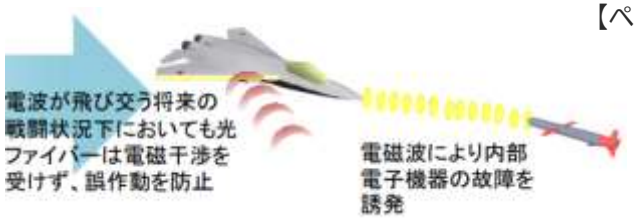
【96式多目的誘導弾システム】



【コンピュータによる軍事演習】



【航空機のフライ・バイ・ライトシステム】



【ペトリオットのフェーズドアレイレーダー】



3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

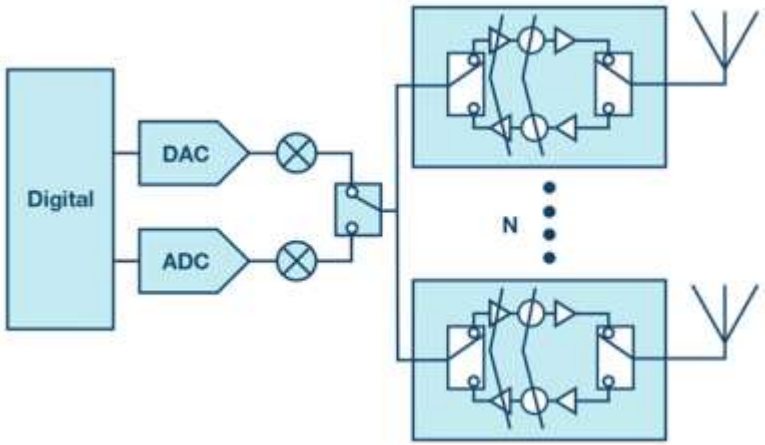
②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

【アナログ信号用】

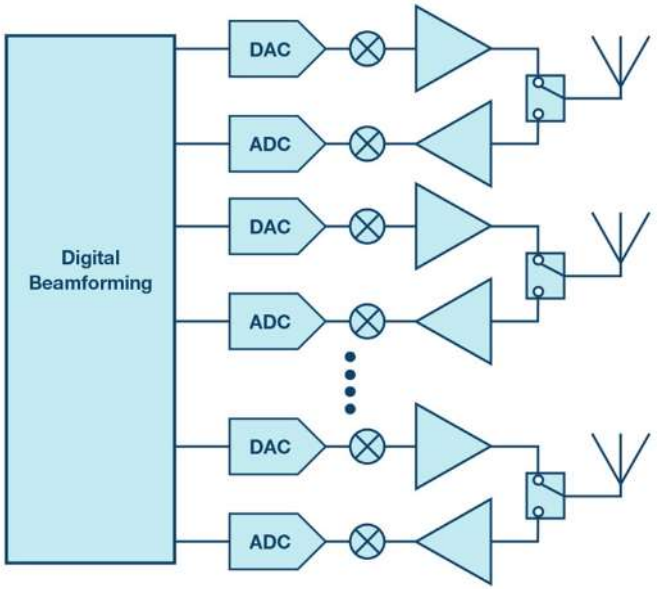
貨物等省令第6条第八号の四では、電気光学効果を利用する光変調器のうち、アナログ信号用に設計したものを規制している。例えばレーダーのようにアナログ信号を送受信する装置においては、送信前あるいは受信後の信号の処理は一般にデジタル信号で行われるため、デジタル/アナログ（D/A）変換器とアナログ/デジタル（A/D）が必要となる。多数のアンテナ素子を並べ、それぞれの素子から送受信する電波の位相と振幅を少しずつずらして電波の向きを変えるフェーズドアレイアンテナにおいては、デジタル式の光変調器の場合、多数の素子のそれぞれにD/A変換器とA/D変換器が必要となり、機器の大型化、消費電力の増大につながる。アナログ式の光変調器の場合は、各素子とやりとりするアナログ信号を一括して変換することができ、各素子ごとのD/A変換器が不要となる（図7-8-4-7）。

図7-8-4-7　フェーズドアレイアンテナの構成比較

【アナログ方式のフェーズドアレイアンテナの構成】



【デジタル方式のフェーズドアレイアンテナの構成】



3.品目の主たる用途の調査分析（6）

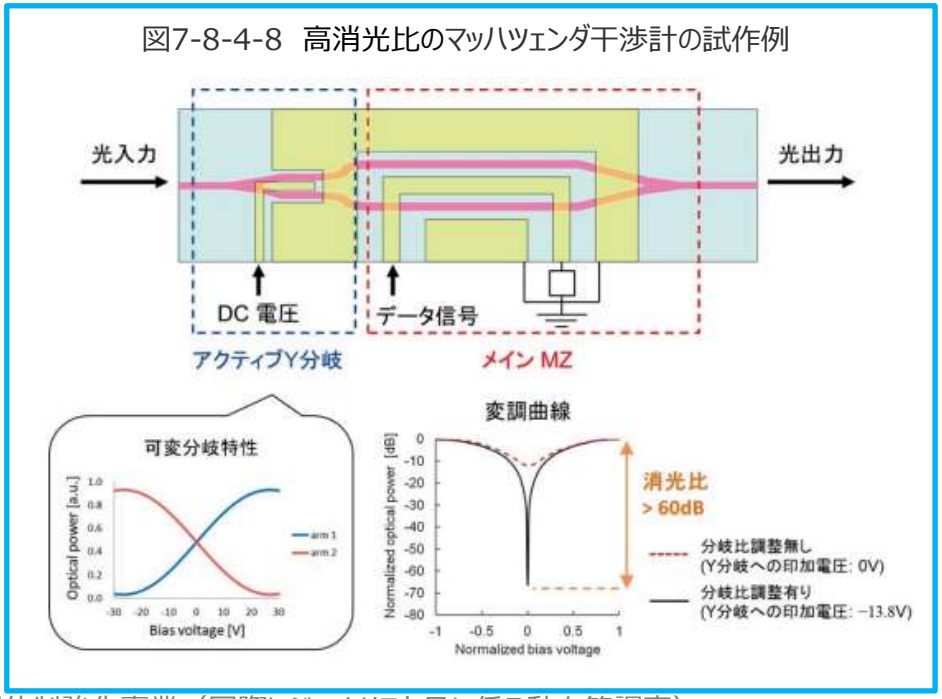
○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化

【アナログ信号用】

マッハツェンダ干渉計に代表される光の干渉を利用した方式では、理論上は無限のON-OFF消光比（ONとOFFの光強度の比）が得られるが、実際には消光比は有限の値である。2値のみを扱うデジタル信号では比較的小さい消光比で問題無いが、アナログ信号を生成する場合には小さい消光比は変調による信号の歪みが問題となる。図7-8-4-8はマッハツェンダ干渉計の電気光学効果で位相を制御する部分より前の分岐部に電圧を印加して高い消光比を実現した例である。アナログ信号用とデジタル信号用の境となる消光比は明確ではない。例えば20～30ｄBの消光比ではアナログ信号生成用途では変調歪みが問題となり得るとしている文献もあれば、アナログ用光変調器の製品の中には消光比が40dBのものがある一方で20dB程度のものもある。アナログ用か否かは個々の製品で確認する必要がある。

図7-8-4-8　高消光比のマッハツェンダ干渉計の試作例



4.品目の技術動向調査（1）

規制パラメータ　輸出令第7項(8の4)
八の四
イ　最大動作周波数が10ギガヘルツ超20ギガヘルツ未満であって、光挿入損失が3デシベル以下のもののうち、次のいずれかに該当するもの
（一）1ギガヘルツ以下の周波数で測定した場合の半波長電圧が2.7ボルト未満
（二）1ギガヘルツを超える周波数で測定した場合の半波長電圧が4ボルト未満
ロ　最大動作周波数が20ギガヘルツ以上のものであって、光挿入損失が3デシベル以下のもののうち、次のいずれかに該当するもの
（一）1ギガヘルツ以下の周波数で測定した場合の半波長電圧が3.3ボルト未満
（二）1ギガヘルツを超える周波数で測定した場合の半波長電圧が5ボルト未満

○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（1）

直接変調方式と外部変調方式のうち、直接変調方式は高速で変調した場合に光の波長が変動する現象（チャーピング）が発生しレーザ自体の応答速度には限界がある。そのため貨物等省令の規制対象となる動作周波数10GHzを超える領域ではもっぱら外部変調方式が用いられてきた（図7-8-4-9）。しかし最近では、直接変調方式でも面発光レーザーを用いたもので製品では10GHzを超えるもの、研究段階では20GHzを超えるものも出てきている。

また、外部変調方式において光の強度を変える方法としては、電気光学効果を利用する方法、音響光学効果を利用する方法、電界吸収効果を利用する方法、熱光学効果を利用する方法、磁気光学効果を利用する方法があるが、輸出令の規制の対象となる光変調方式は、光が通過する媒体に加える電界の強度を変えると媒体の屈折率が変化する電気光学効果を利用する方法と記載がある。外部変調方式の種類と規制対象を表7-8-4-2に示す。このような性質を有する媒体としては、先に表7-8-4-1に示したとおり、$LiNbO_3$に代表される無機誘電体結晶、SiやInGaAsPなどの半導体が挙げられる。光変調器にはこれらの応答速度の速い材料が用いられている。またさらに応答速度の速い有機色素分子を用いた電気光学変調器の開発も進められている。

図7-8-4-9　変調方式の規制対象

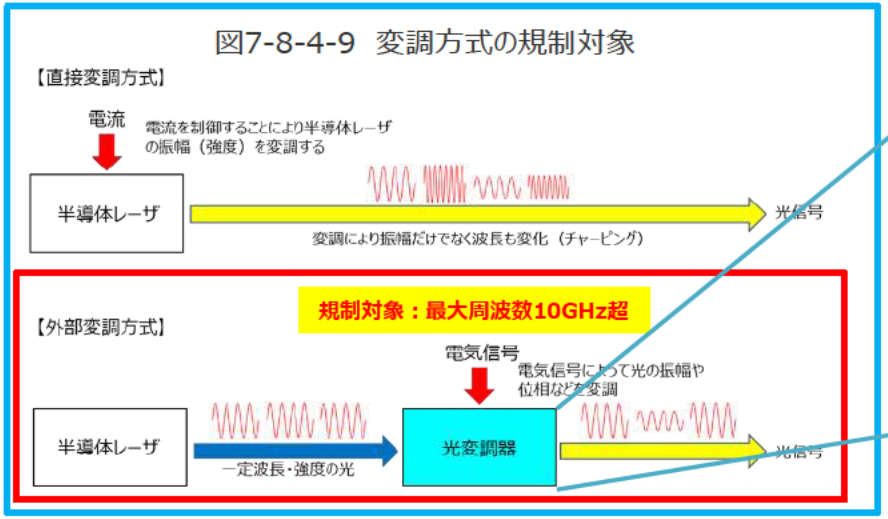


表7-8-4-2　外部変調方式

	規制対象
電気光学	Electro-Optic
音響光学	Acousto-Optic
電界吸収	Electro-Absorption
熱光学	Thermo-Optic
磁気光学	Magneto-Optic

4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（2）

近年の日本におけるインターネット・トラフィックは年率 40%で増加を続けており、動画を中心としたコンテンツの大容量化により、今後も継続的な増加が見込まれている。このトラフィクを支える基幹通信網は大容量光通信技術開発と共に発展してきており、現在、チャネルあたり 10Gb/s の光通信伝送装置が商用化されているが、拡大を続けるトラフィックに対応するために、40Gb/s、100Gb/s に対応した大容量光伝送装置の導入が始まっている。

この大容量通信の趨勢に対応するためには、光変調器の動作周波数の高周波数化と、高効率変換（低損失）が必要である。 また、半波長電圧が低いと、光変調器の低電圧駆動と小型化が可能になる。

規制パラメータ 輸出令第7項(8の4)

八の四

イ 最大動作周波数が10ギガヘルツ超20ギガヘルツ未満であって、光挿入損失が3デシベル以下のもののうち、次のいずれかに該当するもの

（一）1ギガヘルツ以下の周波数で測定した場合の半波長電圧が2.7ボルト未満

（二）1ギガヘルツを超える周波数で測定した場合の半波長電圧が4ボルト未満

ロ 最大動作周波数が20ギガヘルツ以上のものであって、光挿入損失が3デシベル以下のもののうち、次のいずれかに該当するもの

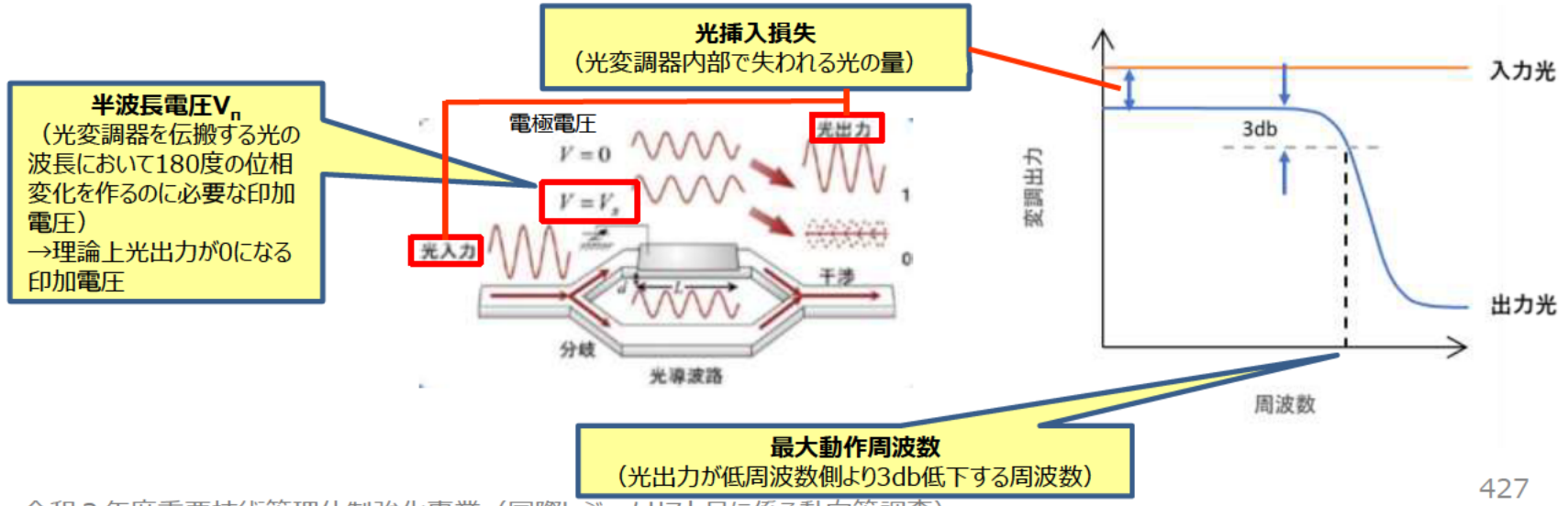
（一）1ギガヘルツ以下の周波数で測定した場合の半波長電圧が3.3ボルト未満

（二）1ギガヘルツを超える周波数で測定した場合の半波長電圧が5ボルト未満

光変調器のこれらの動作周波数の高速化、高効率化及び低電圧駆動は、軍事用光通信の高速化、大容量化、信頼性向上、機器の小型化や軍事用コンピュータの高速化、小型化に必要である。

最大動作周波数、光挿入損失、半波長電圧について、マッハツェンダ光変調器の例を図7-8-4-10に示す。

図7-8-4-10 外部変調方式における光変調信号変換のイメージと規制項目（マッハツェンダ光変調器の例）



4.品目の技術動向調査（3）

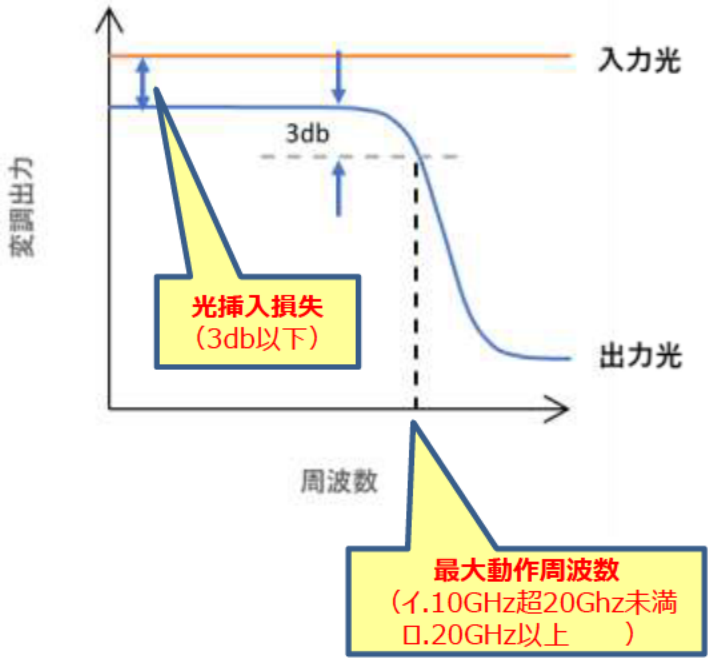
○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

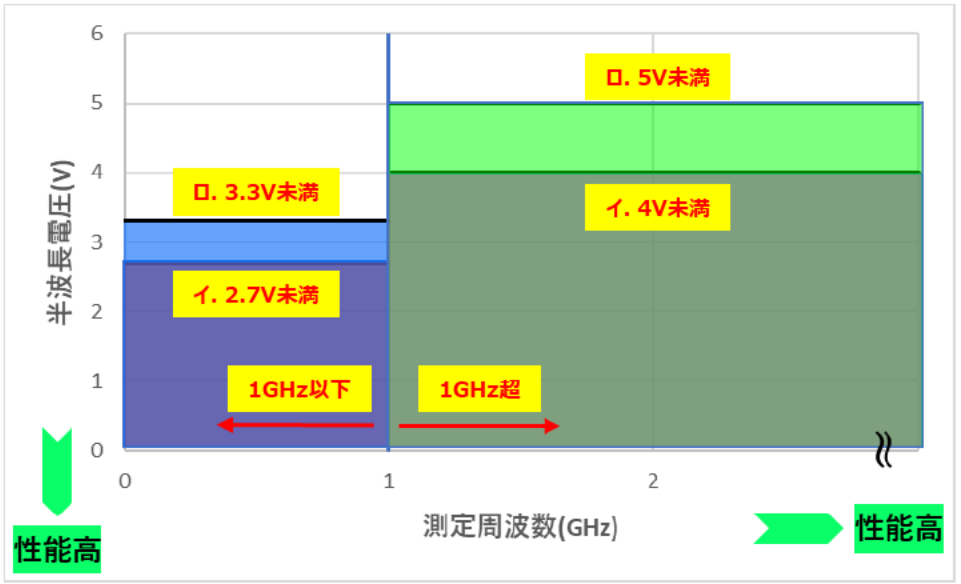
①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（3）

規制パラメータは、光挿入損失について３デシベル以下とし、10ギガヘルツ超20ギガヘルツ未満と20ギガヘルツ以上の二つの最大動作周波数について、測定周波数ごとに半波長電圧が規制パラメータとして定められている（図7-8-4-11）。

規制パラメータ　輸出令第7項(8の4)
八の四
イ　最大動作周波数が10ギガヘルツ超20ギガヘルツ未満であって、光挿入損失が3デシベル以下のもののうち、次のいずれかに該当するもの
（一）1ギガヘルツ以下の周波数で測定した場合の半波長電圧が2.7ボルト未満
（二）1ギガヘルツを超える周波数で測定した場合の半波長電圧が4ボルト未満
ロ　最大動作周波数が20ギガヘルツ以上のものであって、光挿入損失が3デシベル以下のもののうち、次のいずれかに該当するもの
（一）1ギガヘルツ以下の周波数で測定した場合の半波長電圧が3.3ボルト未満
（二）1ギガヘルツを超える周波数で測定した場合の半波長電圧が5ボルト未満

図7-8-4-11　電気光学効果を有する光変調器の規制パラメータ





4.品目の技術動向調査（4）

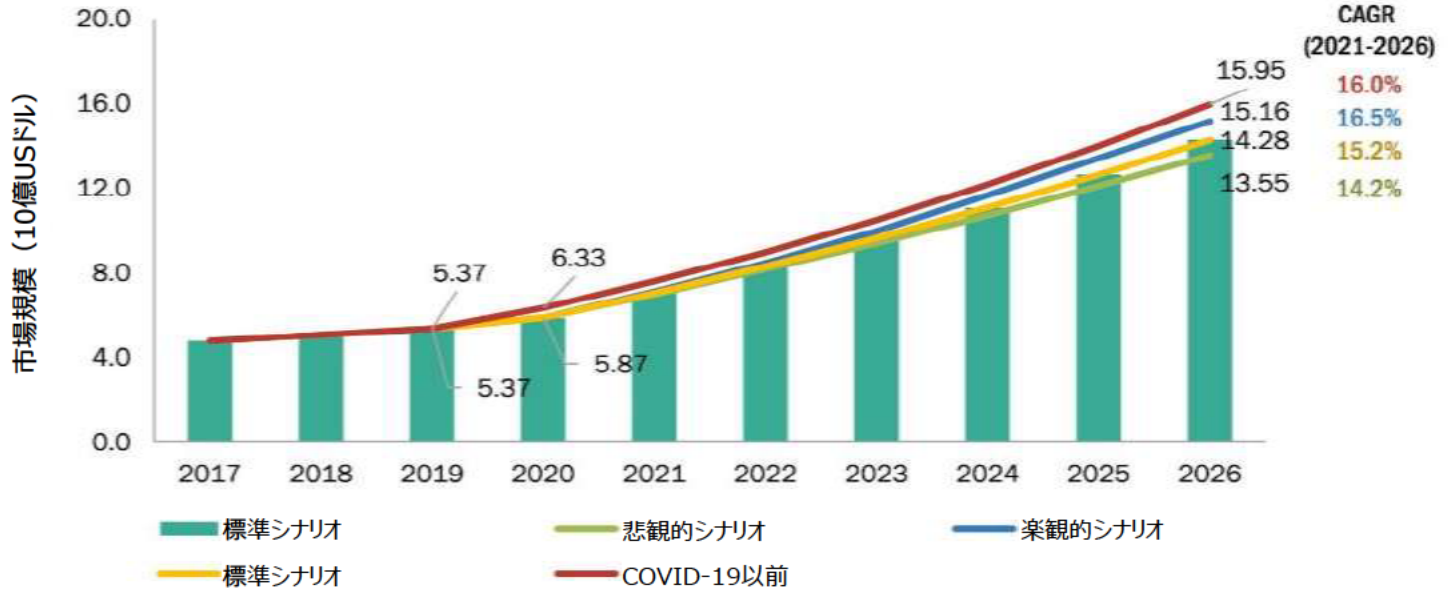
○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（１）

光変調器単体で公表されている市場データは少なく、また半導体に埋め込まれて使用されることもあるので、必ず光変調器が使用され市場の規模が大きい光トランシーバの市場動向を調査する。

光トランシーバ市場の年次推移の実績／予測（金額）を図7-8-4-12に示す。 COVID−19発生以前の予測に対し、2017年から2026年のCAGRで1~2%市場規模が減少するとの予測が示されているが、それでもCAGR14%以上は成長が見込める市場である。この背景には、近年の日本でもみられるように、インターネット・トラフィックが年々増加を続けており、動画を中心としたコンテンツの大容量化により、今後も継続的な増加が見込まれていることが挙げられる。このトラフィックを支える基幹通信網は大容量光通信技術開発と共に発展している。

図7-8-4-12　光トランシーバ市場の年次推移の実績／予測



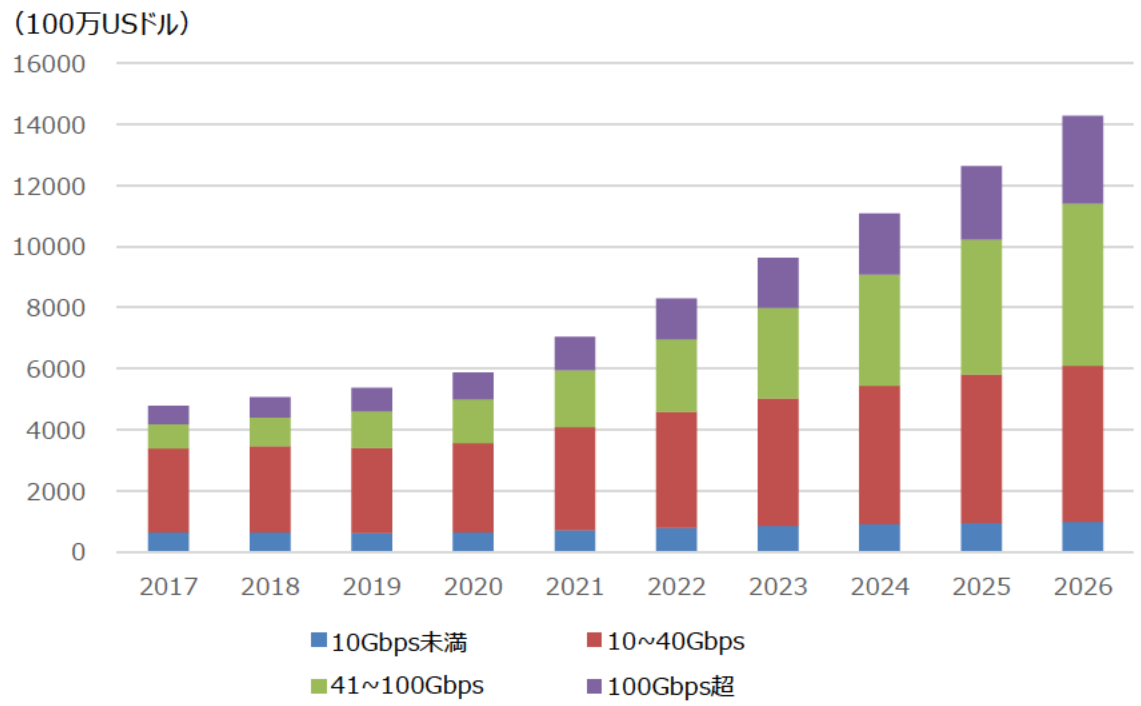
4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

光トランシーバのデータレート別市場規模推移実績／予測を図7-8-4-13に示す。10Gbps未満を除いてそれぞれ規模が拡大すると予想されているが、特に41Gbps~100Gbpsと100Gbps超が増加し一段と高速化することが分かる。

図7-8-4-13　光トランシーバのデータレート別市場規模推移実績／予測



4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

光トランシーバ市場上位5社の売上実績推移（金額）を図7-8-4-14に示す。市場は細分化されており、過去5年間のトップ5の合計シェアは30～40%の範囲にとどまっている。上位5社の事業内容は以下のとおりである。

Broadcom Inc.（米国）は、無線（ワイヤレス、ブロードバンド）および通信インフラ向けの半導体製品、ソフトウェアなどを製造販売するファブレス企業である。高性能産業用光トランシーバの幅広い製品ラインナップにより、各種産業データ・ネットワーキング標準や通信速度に対応している。

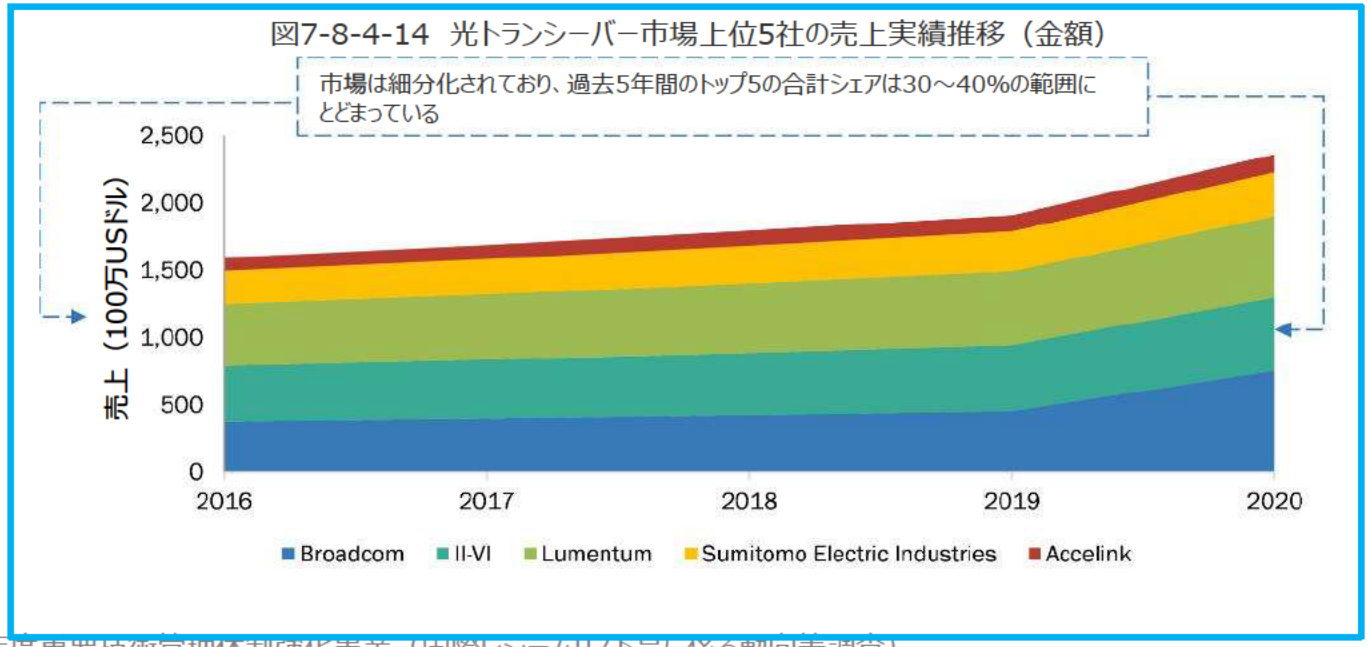
II-VI Inc.（米国）は、産業、光通信、軍事、ライフサイエンス、半導体機器、消費者市場などの多様な用途に向けた革新的な製品を開発、製造する企業である。

Lumentum Holdings Inc.（米国）は、クラウド、ネットワーキング、先進製造技術、3D センシングなどの用途でスケールとスピードを向上させる革新的なフォトニクス製品及び技術を提供している。

住友電工㈱は、自動車関連製品、情報通信機器、電子部品、産業素材など幅広い事業を行っている。近年は従来の電線事業の他に光ファイバの製造技術による光通信システム、粉末冶金、超硬合金、半導体材料などの新素材など、新分野の開発でも多くの実績を残している。

Accelink Technology Co. Ltd.（中国）は、光ファイバコネクタ/アダプタ、光テスト機器、マイクロ光デバイス、分散補償モジュール、サブシステム、光検出器、光ファイバカプラ/スプリッタ、光スイッチ/減衰器、各種光モジュール、光増幅器など幅広く光通信関連製品を製造している。

図7-8-4-14　光トランシーバー市場上位5社の売上実績推移（金額）



4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（4）

光トランシーバ市場において、過去5年間のトップ5のシェアは30～40%であり、60%以上をその他の企業が占めている。その他の企業で光変調器を製造している企業を、以下のリストにまとめた。多くの企業が参画していることが分かる。

	企業	会社概要
1	Agiltron Incorporated（アメリカ）	光スイッチ、光減衰器、光チューナブルフィルタ、高光パワーコンポーネント、およびファイバモニタの世界有数のサプライヤである。20年以上にわたり、光ファイバコンポーネントソリューションを開発および製品化している。Agiltronは、ボストンにある会社である。
2	Cisco Systems, Incorporated（アメリカ）	世界最大のコンピュータネットワーク機器開発会社である。25Gbpsから400Gbpsの光トランシーバのラインアップをそろえている。
3	Conoptics, Incorporated（アメリカ）	レーザアクセサリの世界的な大手メーカーで、研究所、ディスクメーカー、大学、軍事およびレーザメーカーで長年の採用実績がある。電気光学変調器、音響光学変調器、レーザ変調、ドライバーエレクトロニクス、ビームデフレクター、ノイズリダクション、光アイソレーター用の一連のレーザアクセサリなどを幅広く製造している。
4	Optilab LLC（アメリカ）	2001年に設立され、米国アリゾナ州フェニックスに拠点を置く、光通信関連機器やRF over Fiber関連機器を中心に製品展開している企業である。光通信領域では、半導体光アンプ、光変調器、分散補償器、レーザなど、RF over Fiber領域では、RFアンプ、トランスミッタ、レシーバなどを取り扱っており、テスト&計測やファイバセンシングの領域のサービスも提供している。Optilab社の製品は、おもに航空宇宙、通信、センサ、ラスター機器、研究機関などのクライアントから高い評価を受けており、R&Dチームと販売チームの連携により革新的で費用対効果の高い製品を届けられるよう日々製造技術を向上させている。
5	Thorlabs Incorporated（アメリカ）	自由空間型変調器やファイバ結合型LN(ニオブ酸リチウム、$LiNbO_3$)変調器など、さまざまな電気光学(EO)変調器を提供している。フリースペース(自由空間)型の振幅変調器や位相変調器は最大速度100 MHzで駆動可能としている。また、液晶技術をベースにしたEO変調器も速度2.5 kHzまで製品をそろえている。そして、ファイバタイプの強度変調器、位相変調器、QPSK変調器(IQ変調器)は、EO変調器ドライバを使用して最大速度40 GHzで駆動可能である。
6	EOSPACE, Incorporated（アメリカ）	次世代の光通信システムおよびフォトニックシステムの設計者および製造者向けに、最高性能の電気光学（EO）集積回路およびコンポーネントの製造を専門としている。EOSPACE製品は、独自の$LiNbO_3$集積光学デバイスを利用して、非常に低い挿入損失と広帯域幅のデバイスを製造している。最先端の光集積回路技術は、高周波マイクロ波と低損失のフォトニック光ファイバ伝送を必要とする非常に要求の厳しい航空宇宙アプリケーションによって推進され、継続的な研究の下で開発されている。高性能の広帯域商用通信、研究、および航空宇宙アプリケーションも、EOSPACE光IC技術を使用している。
7	International Business Machines（IBM) Corporation（アメリカ）	IBMは1911年にC-T-Rとして創立され、特に1960年代以降はコンピュータ市場で圧倒的な影響力を持ったが、1990年代以降はコンサルティングを含めたサービスとソフトウェア中心に舵を切り、2010年代以降はクラウドコンピューティングとコグニティブコンピューティングを提供する企業と自己定義している。IBMは、2012年に光変調器とGe光検出器（フォトダイオード）を1チップに集積できる90nm世代のCMOSプロセス技術を開発、発表している。
8	Intel Corporation（アメリカ）	主にマイクロプロセッサ、チップセット、フラッシュメモリなどの設計開発・製造・販売を手掛けている。1992年以降から現在に至るまで、世界第1位の半導体メーカーとして君臨し続け、特に世界のPC向けCPU市場では2020年現在60%近いシェアを維持している。光変調器関連では2020年12月に開催された「Intel Labs Day 2020」にて、注力する研究テーマとしてシリコンフォトニクスをあげ、従来のコンポーネントサイズから1000分の1にまで小型化した変調器を紹介している。
9	Fastpulse Technology Incorporated（アメリカ）	FastPulse Technologyとそのレーザーメトリクス部門は、電気光学光変調器、ポッケルスセル、ポッケルスセルドライバー、Qスイッチ、レーザーパルスピッカー、光アイソレーター、チョッパー、および研究および産業向けの抽出システムの設計と製造のリーダーとして認められている。クライアントには、米国および世界中の政府機関、教育機関、研究施設、レーザーメーカーが含まれる。

4.品目の技術動向調査（8）

○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（5）

	企業	会社概要
10	iXBlue Photonics S.A.S. (フランス)	光通信、ファイバーレーザーおよび増幅器、光ファイバーセンサー、宇宙および科学を含むさまざまなアプリケーション向けに、iXblue Photonicsの変調器による特殊ファイバー、ブラッググレーティングおよび光変調のソリューションを提供する。同社はiXblueグループの旧企業であるiXFiberとPhotline、iXblueグループの特殊繊維部門、変調ソリューション部門を買収して成立した。フォトニクスに専業の拡大されたチームは、ファイバープリフォーム処理、ファイバー描画、導波管ウェーハ処理、RF設計、コンポーネントパッケージングなどの主要技術を習得する。単一の組織のこのチームは、その相乗効果を活用し、顧客に新しくより完全な光ファイバーソリューションを提供する。
11	Leysop Limited （イギリス）	電気光学変調器と偏向器の英国で唯一のメーカーであり、40年以上にわたって光学部品の設計と製造に携わってきたスタッフを有する。さまざまな電気光学変調器とドライバー、ファラデー回転子、光学偏光子、偏光子除去器、減衰器を提供している。
12	Gooch & Housego PLC（イギリス）	光技術において、世界のリーディングカンパニである。米国及び英国の11の拠点において、結晶成長・光学材料加工・AO 素子・EO 素子・ファイバオプティクス・DFB レーザ・精密光学部品（薄膜コート・複屈折オプティクス・非線形・平面・非球面）、RF ドライバを研究開発している。Gooch & Housego社では材料選定から最終的なアセンブリやテストまですべての工程を社内で行っており、OEM供給のみならず1回限りの試作やプロトタイプ製造などにも対応するなど、高い製造能力と高品位な保証体制を有している。Gooch & Housego は専門性の高い知識や技術レベルを保有し、航空、防衛、産業、研究、ライフサイエンスといった領域の中で、開発品から大量生産品まで様々な対応を行っている。
13	Jenoptik AG（ドイツ）	光学技術を基盤とするグローバル企業である。顧客は、主に半導体機器、自動車および自動車サプライヤ、医療技術、防衛およびセキュリティ、ならびに航空業界の企業である。2018年には、8億3460万ユーロの収益を上げている。光変調器は電気光学液晶に基づき、高速な電気光学効果を利用している。ギガヘルツ範囲の高い変調周波数の光の位相または振幅の変調に使用可能である。さらに、コンパクトな端末で高い光学出力 安定性を備え、変調電圧を低く抑え、高い消光比を実現している。
14	Qubig GmbH （ドイツ）	学術研究から2008年に設立され、高品質の光変調器の開発と製造を専門とするテクノロジー企業である。これらのハイテクデバイスは、周波数、位相、偏光、強度、位置などのレーザー光の特性を制御および正確に操作することを目的として、主に大規模なレーザーシステムに追加モジュールとしてインストールされる。同社の製品は、変調周波数（DC / HV-15 GHz）、波長UV-LWIR、および光パワー（単一光子-高パワー）の点で幅広い範囲をカバーしている。同社のアプリケーションには、基礎研究（原子/量子物理学）、産業（レーザー材料処理）、軍事、天文学（レーザーガイド星）、生物学（LifeScience Microscopy）が含まれる。
15	Chongqing SMART SCI&TECH Development Company, Limited (中国)	中国の重慶に拠点を構える、音響光学機器の製造会社である。2010年に設立され、ラインナップにはモジュレータ、チューナブルフィルタ、音響光学Qスイッチ、ディフレクタがある。特徴として、低損失、高い消光比、変調速度の速さ、消費パワーを抑え小サイズであること、そして信頼性の高さが挙げられている。
16	Advanced Fiber Resources Limited （AFR）（香港／中国）	2000年に設立されたAFRは、主に電気通信、ファイバレーザ、データセンタ、自動運転車、ファイバセンサ、生物医学機器アプリケーション向けに設計されたパッシブ光コンポーネントの大手プロバイダーである。中国の朱海にあるISO9001認定およびISO14001認定の施設を通じて、高度で費用効果の高いパッシブコンポーネントおよび変調器を設計および製造している。2019年12月、AFR社はLumentumの変調器ラインを買収した。Lumentumはカリフォルニア州サンノゼに本社を置き、世界中に研究開発、製造、販売の拠点を置く、光通信製品、産業用レーザの製造会社である。
17	株式会社フジクラ（日本）	光ファイバケーブルの接続で必要な「光ファイバ融着接続機」で世界首位である。携帯電話・デジタルカメラ等に使われるフレキシブルプリント基板及び光ファイバシェア上位に入っている。電源ケーブル、通信ケーブル、アルミニウム線、エナメル線、光ファイバ、光ファイバケーブル、通信コンポーネント（光トランシーバ含む）、光コンポーネント、光ファイバ機器、ネットワーク機器、設置など幅広く光通信の製品を取り扱っている。
18	住友大阪セメント株式会社（日本）	光電子事業で大容量光ファイバ通信に用いられるLN変調器の開発・製造・販売を行っている。5Gbpsから100Gbpsの光変調器のラインアップをそろえている。

4.品目の技術動向調査（9）

○輸出令7項（8の4）電気光学効果を利用する光変調器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（6）

	企業	会社概要
19	ファイバーラボ株式会社（日本）	KDDI総合研究所（旧KDD研究所）の研究グループがＫＤＤ社内ベンチャー制度により（株）KDDファイバラボを設立し、2002年にファイバーラボ（株）に社名変更した。光通信、レーザ、光計測などの分野の製品を中心に様々な光製品を取り扱っている。特徴は、研究開発、製造、商社機能の三要素を備えていることである。光変調器はOptilab LLCの日本代理店である。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（9）
サンプリングオシロスコープ

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

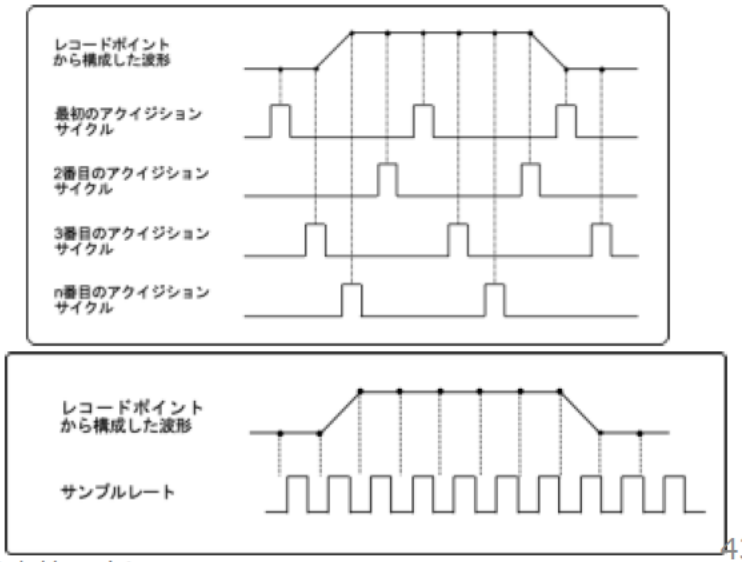
○輸出令7項（9）サンプリングオシロスコープ

【オシロスコープについてとその種類】
　オシロスコープとは、電気信号（電圧）の時間的な変化を波形として観察するための測定器である。2つの信号を入力すれば2つの信号の振幅比、位相差、周波数比を測定することもできる。オシロスコープは図7-9-1のように分類できる。
①アナログオシロスコープは、信号の変化を冷陰極管（CRT）画面上に表示させる。水平方向に一定速度で移動する電子ビームによる輝点が、信号の大きさに応じて垂直方向に振られることによって入力信号波形が描かれる。輝点を画面の左から右へ一定速度で移動させることを掃引という。単発的に発生する信号の観測に向いているが、データの保存方法は画面の撮影程度に限られ、波形の解析もできない。
②デジタルオシロスコープは、信号をA/D変換器でデジタルデータに変換してメモリに記憶させ、画面に波形として表示する。信号のサンプリング方法によってさらに次の2つに分けられる（図7-9-2）。
②-1　等価時間サンプリング
　周期性のある信号を補捉する際に、1回の掃引ごとに信号の一部を捕捉し、複数回の掃引で入力信号波形を構成するものである。単発的に発生する信号の観測には適していないが、周波数の高い信号を観測することができる。
②-2　リアルタイムサンプリング
　1回の掃引で入力信号波形を構成するすべての信号を捕捉するものである。単発的に発生する信号も観察できるが、周波数の高い信号の観測にはサンプリングレートの制約を受けやすい。

図7-9-1　オシロスコープの種類



図7-9-2　等価時間サンプリング（上）とリアルタイムサンプリング（下）



1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令7項（9）サンプリングオシロスコープ

【オシロスコープの仕組みと表示画面】
図7-9-3にアナログおよびデジタルオシロスコープの構成図を示す。
アナログオシロスコープは入力信号を増幅して信号強度を表す垂直方向の信号とし、基準時間発生器で発生させた一定時間で開始点に戻るのこぎり波の水平方向の信号とを合成してディスプレイに表示する。
一方デジタルオシロスコープは、サンプルクロックで発生させたパルスの間隔で入力信号をサンプリングし、A/D変換器でデジタルデータとしてメモリに蓄積する。このデータをプロセッサで呼び出してディスプレイに表示する。
オシロスコープの表示画面は通常図7-9-4に示すように縦横のマス目に区切られている。図は縦8マス、横10マスの例である。縦横1マスの幅を1Div（Division）と呼ぶ。通常はオシロスコープの表示レンジは時間軸、電圧軸とも複数段階に切り替えることができる。例えば図の例の場合、1mV/Divの場合は±4mVの幅で、5V/Divの場合は±20Vの幅で表示できる。

図7-9-3　オシロスコープの構成

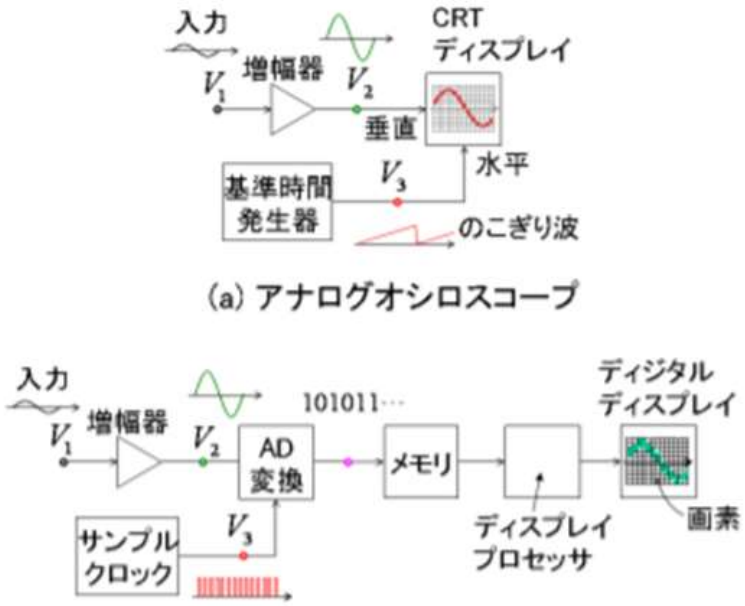
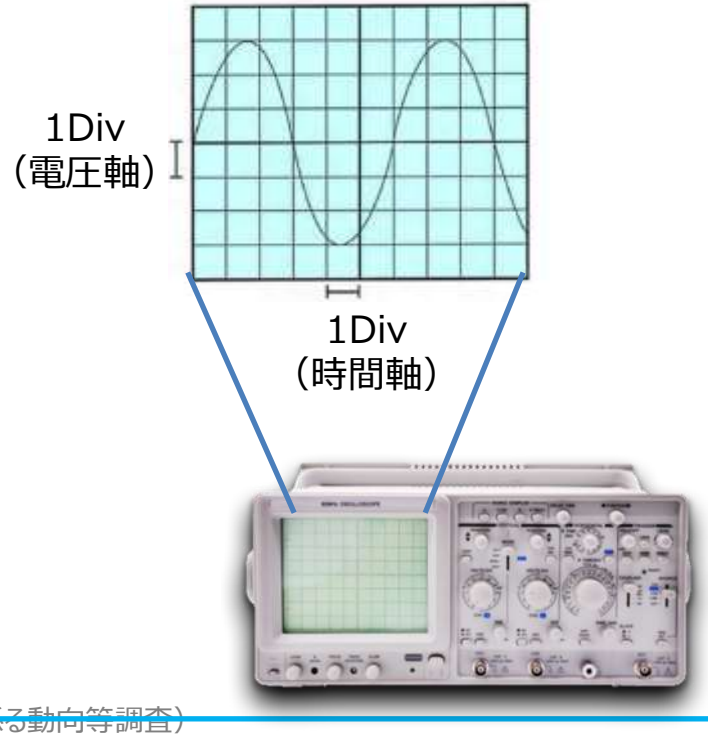


図7-9-4　オシロスコープの表示画面



1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令7項（9）サンプリングオシロスコープ

【オシロスコープの特性：測定周波数帯域とノイズレベル】
　オシロスコープの性能を表す代表的な特性として、測定周波数帯域とノイズレベルがある。
　一般に入力信号は周波数が上がるにつれて減衰するので、3デシベル（約30%）減衰する周波数までを周波数帯域としている（図7-9-5）。貨物等省令第九号の「入力３デシベル帯域幅」はこの値に相当する。しかし実用上は30%の減衰はあまりにも大きく、測定する周波数は周波数帯域の1/5～1/3までにするべきとされている。
　オシロスコープのノイズの大きさを表す際に用いられる数値の一つとして、実効値（Effective Value）あるいはRMS（Root Mean Square Value）と呼ばれるものがある。これはノイズの電圧値の標準偏差（σ）である（図7-9-6）。なおランダムに発生するノイズの電圧は正規分布に従い平均値は0Vとなるため、式1のμは0となる。貨物等省令第九号の「ノイズ電圧の２乗平均平方根」はこの値を意味する。また、オシロスコープには複数の入力チャネルを有し、同時に複数の測定を行うことができるものも多い。一つの測定器においてもチャネルによってノイズの大きさは全く同じではない。また図7-9-3の説明の際に記した通り、表示レンジを複数段階切り替えられる製品も多いが、表示レンジによってノイズの割合（表示レンジに対する割合）も変わることが普通である。貨物等省令第九号では、RMSが表示レンジのフルスケールに対して2%未満のものを規制対象としている。

図7-9-5　入力3デシベル帯域

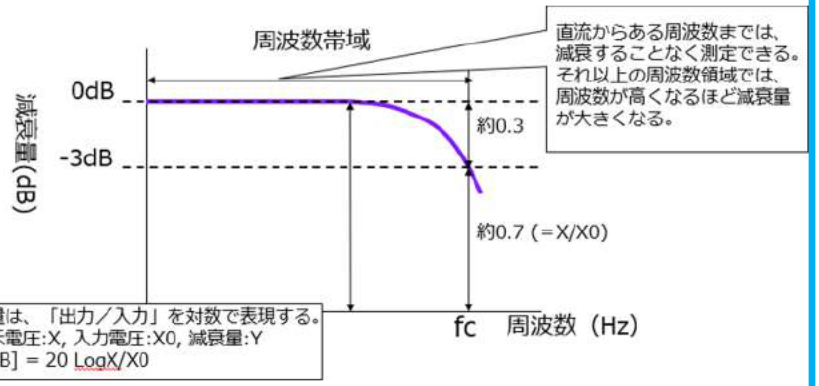
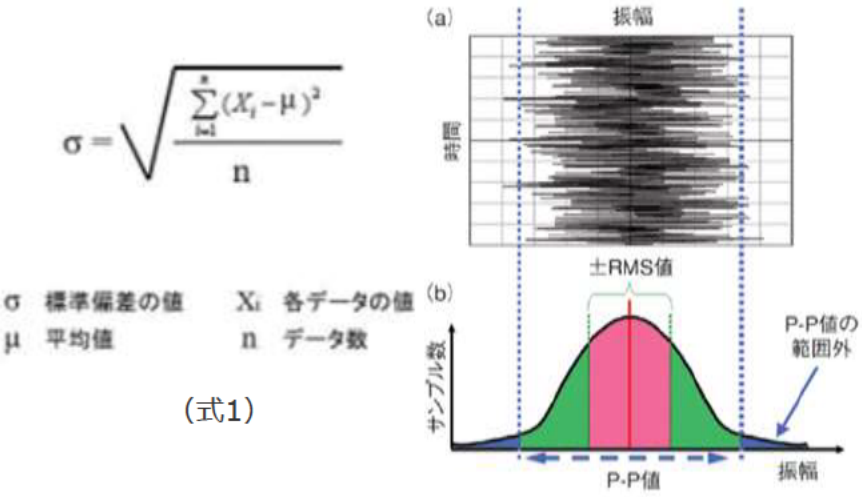


図7-9-6　ノイズのRMS



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令7項（9）サンプリングオシロスコープ

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(9)	6		九	十四　サンプリングオシロスコープであって、リアルタイムサンプリング手法を用いているもののうち、いずれかのチャネルの入力３デシベル帯域幅が60ギガヘルツ以上の場合において、そのチャネルのノイズが最小となる縦軸レンジにおけるノイズ電圧の二乗平均平方根がフルスケールの２パーセント未満のもの サンプリングオシロスコープ 等価時間サンプリング方式を用いたものを除く。	入力３デシベル帯域幅が60ギガヘルツ以上の場合において、そのチャネルのノイズが最小となる縦軸レンジにおけるノイズ電圧の二乗平均平方根がフルスケールの２パーセント未満

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A2	a	7	7. Real-time oscilloscopes having a vertical root-mean-square (rms) noise voltage of less than 2% of full-scale at the vertical scale setting that provides the lowest noise value for any input 3dB bandwidth of 60 GHz or greater per channel; Note 3.A.2.a.7. does not apply to equivalent-time sampling oscilloscopes.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

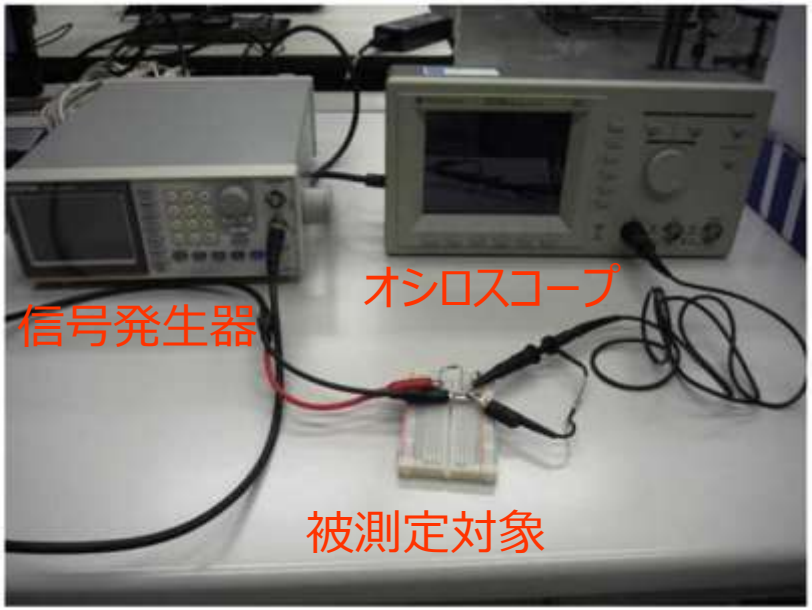
○輸出令7項（9）サンプリングオシロスコープ

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（1）

オシロスコープは電気信号（電圧）の時間的な変化を波形として観察する電気電子回路の基本的な測定器であり、電気電子回路を有する機器の設計、製造、使用のいずれの段階においても使用されるものである。したがってその測定対象は多岐にわたる。

図7-9-7は信号発生器から出力した信号を被測定対象に入力し、被測定対象から出力される信号をオシロスコープで測定している例である。被測定対象が自ら信号を発生する場合は、オシロスコープと被測定対象のみで測定を行うこともある。

図7-9-7　オシロスコープの使用例



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（9）サンプリングオシロスコープ

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（2）

オシロスコープが測定対象とする周波数は製品によりさまざまであるが、最大周波数帯域が100GHzを超える製品も開発されている（図7-9-8）。既に記したとおり、実用上測定可能な周波数は最大周波数帯域の1/3～1/5程度であるが、その場合でもマイクロ波やミリ波に相当する周波数の信号を測定可能である。この範囲の周波数に相当する電波は表7-9-1に示すとおりである。それぞれの電波を扱う機器にはその周波数に対応した回路が存在するため、それに応じたオシロスコープが必要とされる。

貨物等省令第九号では最大動作周波数60GHz以上のものの一部を規制対象としている。これもマイクロ波やミリ波の領域が対象となる。この周波数帯の電波を使う典型的な機器としては、衛星通信、レーダーなどが挙げられる。

図7-9-8　超高周波数帯域オシロスコープ



Keysight Technologies社 UXR1104A
最大周波数帯域：110GHz

表7-9-1　電波の周波数帯と主な用途

電波の呼称	略号	周波数	波長	用途
長波	LF	30～300kHz	10～1km	船舶、航空機用ビーコン
中波	MW	0.3～3MHz	1～0.1km	船舶通信、中波ラジオ、アマチュア無線、船舶航空機ビーコン
短波	HF	3～30MHz	100～10m	国際短波放送、船舶航空機通信、アマチュア無線
超短波	VHF	30～300MHz	10～1m	FM放送、テレビ放送、防災行政無線、消防無線、列車無線、警察無線、ｱﾏﾁｭｱ無線、航空管制無線、コードレス電話
超短波	UHF	0.3～3GHz	1～0.1m	テレビ放送、携帯電話、PHS、タクシー無線、防災行政無線、レーダー、無線LAN、移動体衛星通信、パーソナル無線、アマチュア無線、コードレスお電話、ISM機器
マイクロ波	SHF	3～30GHz	10～1cm	衛星通信、衛星放送、レーダー、マイクロ波中継、電波天文、無線LAN 、ISM機器
ミリ波	EHF	30～300GHz	1～0.1cm	電波天文、衛星通信、簡易無線、レーダー、加入者系無線アクセス

最大動作周波数60Hz以上のオシロスコープの測定対象周波数領域

3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（9）サンプリングオシロスコープ

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

本項には、用途に対する規制は無い。

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（9）サンプリングオシロスコープ

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（1）

図7-9-1でも示したとおりオシロスコープは方式によりいくつかに分類できるが、貨物等省令第九号の規制対象となるのは、デジタルオシロスコープのうち、リアルタイムサンプリング手法を用いているものである（図7-9-9）。なおリアルタイムサンプリング方式のオシロスコープの中には、等価時間サンプリングも可能なものが存在する。

図7-9-9　オシロスコープの種類と規制対象



4.品目の技術動向調査（2）

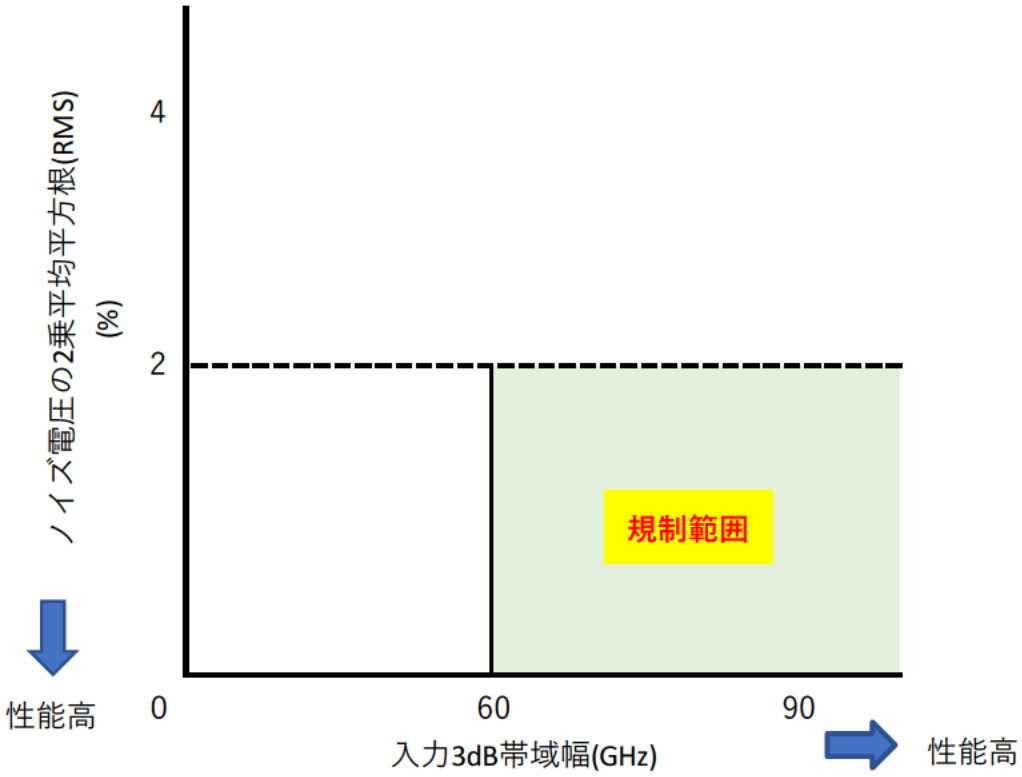
規制パラメータ　輸出令第7項(9)
九　サンプリングオシロスコープであって、リアルタイムサンプリング手法を用いているもののうち、いずれかのチャネルの入力３デシベル帯域幅が６０ギガヘルツ以上の場合において、そのチャネルのノイズが最小となる縦軸レンジにおけるノイズ電圧の２乗平均平方根がフルスケールの２パーセント未満のもの

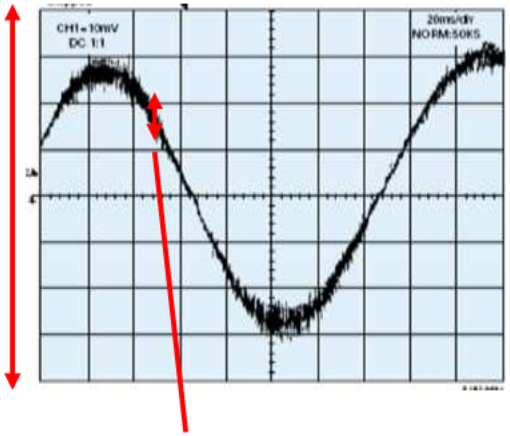
○輸出令7項（9）サンプリングオシロスコープ

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（2）

規制パラメータは3dB帯域幅（最大動作周波数）とノイズ電圧の２乗平均平方根（RMS）である（図7-9-10）。

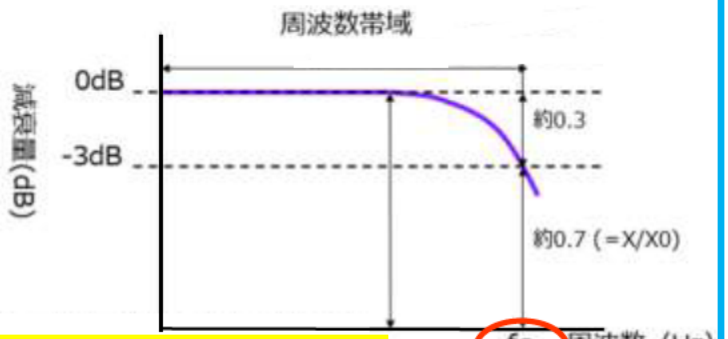
図7-9-10　サンプリングオシロスコープの規制パラメータ





ノイズ電圧のRMSがV_{Full}の2%未満

$$RMS=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} X_i^2}{n}}$$



3dB帯域幅（最大周波数帯域）が60GHz以上

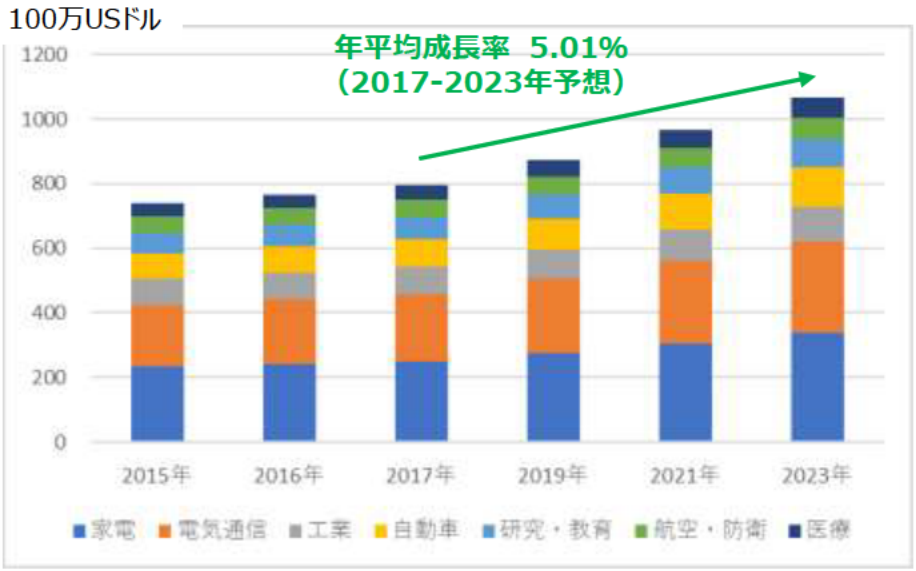
4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（9）サンプリングオシロスコープ

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（1）

サンプリングオシロスコープを含むオシロスコープ全体の分野別の市場規模を図7-9-11に示す。2015、2016年は実績値、2017年以降は予測値である。家電向けの市場規模が最も大きく、電気通信向けがこれに次ぐ。

図7-9-11　オシロスコープの市場規模（分野別）



100万USドル

	2015年	2016年	2017年	2019年	2021年	2023年
家電	232.4	241.0	249.9	275.1	305.0	337.1
電気通信	192.4	199.9	207.6	229.1	254.7	282.3
工業	80.1	82.4	84.7	91.6	99.8	108.3
自動車	77.5	81.6	85.9	97.2	110.7	125.8
研究・教育	66.2	67.7	69.1	74.0	79.6	85.1
航空・防衛	50.6	51.7	52.8	56.3	60.3	64.5
医療	41.7	43.5	45.4	50.5	56.6	63.3
合計	740.9	767.7	795.3	873.8	966.7	1066.3

4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（9）サンプリングオシロスコープ

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

サンプリングオシロスコープを含むオシロスコープ全体の周波数帯別の市場規模を図7-9-12に示す。2015、2016年は実績値、2017年以降は予測値である。6GHzを超える周波数帯向けの市場規模が最も大きく、1~6GHz向けがこれに次ぐが、その差は開いていくものと予想されている。

図7-9-12　オシロスコープの市場規模（周波数帯別）



100万USドル

	2015年	2016年	2017年	2019年	2021年	2023年
1GHz未満	139.6	140.7	141.0	147.3	153.1	156.4
1～6GHz	295.2	301.1	307.1	326.2	348.7	371.8
6GHz超	306.1	325.9	347.2	400.3	464.9	538.1
合計	740.9	767.7	795.3	873.8	966.7	1066.3

4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令7項（9）サンプリングオシロスコープ

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

オシロスコープの主な製造企業を表に示す。この中でもTectronix社、Keysight Technologies社、Teledyne LeCroy社、Rohde & Schwarz社、横河計測社が特に主要な企業である。

	企業	会社概要
1	Tektronix Incorporated（アメリカ）	1946年に創立され、2007年にDanahar Corporation（アメリカ）に買収され同社の子会社となった後、2016年にDanaher社から分社したFortive社の傘下に入った。2022年現在世界21か国に拠点を構え、健康・医療、通信、モビリティ、宇宙の分野向けに信号発生器、オシロスコープ、スペクトラムアナライザなどの測定・試験機器の製造・販売を行っている。信号発生器の代表的な企業の1つである。
2	Keysight Technologies Incorporated（アメリカ）	2014年にAgilent Technologies社（アメリカ）から分離して設立された、エレクトロニクスと無線通信分野の製造企業であり、2022年現在14300人以上の従業員を擁する。信号発生器の代表的な企業の1つである。研究開発にも積極的に投資しており、試験・測定分野の企業のAnite社（イギリス）の買収やNTT DOCOMO社（日本）との５G通信システムに関する提携など、積極的な事業展開を行っている。
3	Teledyne Lecroy, Incorporated（アメリカ）	1964年に創立された、Teledyne Technologies傘下の計測器の企業である。オシロスコープでは世界有数の企業であるが、他にも任意波形発生器、スペクトラムアナライザ、ベクトルネットワークアナライザなど様々な機器を手掛けている。
4	Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG（ドイツ）	1933年に設立され、70か国以上に13000の社員がおり（2022年現在）、売上22億8000万ユーロ（2020/2021会計年度）の企業である。業界、インフラプロバイダ、政府機関の顧客を対象に各種電子資本財の開発、製造、販売にあたっている。無線通信/RFテストおよび測定、放送／メディア、航空交通管制／軍事用無線通信、サイバーセキュリティ／ネットワークテクノロジといったすべての事業分野において、テクノロジとマーケットの両面で主要な地位にある。
5	横河計測株式会社（日本）	1988年設立の横河インスツルメンツ株式会社が1995年に、1954年設立の毛呂山電機株式会社と合併すると同時に1915年設立の横河電機株式会社の事業の一部を移管を受け、その後何回かの社名変更を経て2017年に横河計測株式会社となった。産業のマザーツールである測定器のビジネスを展開している。具体的には、「環境関連の電気エネルギー関連市場」に向けた電力測定器・オシロスコープなどの基本測定器、「光通信関連市場」に向けたOTDR・光スペクトラムアナライザなどの光測定器、「IA関連市場」に向けたキャリブレータなどの現場測定器を3本柱に据えている。
6	Texas Instruments Incorporated（アメリカ）	1930年創設の、アナログ・チップと組込みプロセッシング・チップの設計、製造、テスト、販売に従事している半導体企業。2022年現在、従業員約30000人、世界各地の製造拠点15か所、約80000種類の製品を扱う世界的大企業である。
7	National Instruments Corporation（アメリカ）	1976年に創立された計測・制御機器の製造・販売を行っている会社である。特に自動テストと自動計測システムが中核の事業である。周波数分析については、RFシグナルアナライザ、リアルタイムスペクトラムアナライザ、ベクトルシグナルアナライザなどを製造・販売している。取引対象分野は半導体、モビリティ、航空宇宙・防衛・官公庁、教育・研究、ワイヤレス、エレクトロニクス、エネルギー、産業用機械、重機である。
8	B&K Precision Corporation（アメリカ）	前身のCentral Television Service Companyを経て1951年に設立された。試験・測定機器の設計・製造を行っている企業である。主な製品には、電源とDC電子負荷、信号発生器、コンポーネントテスタ、オシロスコープ、スペクトラムアナライザ、マルチメータなどがある。
9	Fluke Corporation（アメリカ）	Fortive Corporation（アメリカ）の子会社で、1948年に設立された。工業・電子サービスの導入や保守、住宅・工業・プラント・商業ビルのメンテナンス・修理・設計用テスト用に、電力アナライザ、電気テスタ、デジタルマルチメータ、クランプメータ、単一および３フェーズ電力品質メータ、電流クランプ、サーマルイメージャ、デジタルサーモメータなどを製造している。校正用機器としては、標準波形発生器などを製造している。他にバイオメディカル分野向けにも電気安全テスタ、患者シミュレータなどを提供している。

4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（9）サンプリングオシロスコープ

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（4）

オシロスコープの主な製造企業を表に示す。この中でもTectronix社、Keysight Technologies社、Telegyne LeCroy社、Rohde & Schwarz社、横河計測株式会社が特に主要な企業である。

	企業	会社概要
10	Fortive Corporation（アメリカ）	Danaher Corporation（アメリカ）が2015年に事業を科学・技術分野と試験・測定分野の2つに分割し、試験・測定分野の会社として発足したのがFortive Corporationである。2016年には一部がDanaher社傘下に残っていたTektronix Incorporated（アメリカ）を傘下に収めて試験・測定分野の事業をさらに強化した。周波数分析器の代表的な企業の1つである。周波数分析器以外にも、Tektronix社と、同じく傘下にあるKeithley Instrumentsの製品である、オシロスコープ、信号発生器、映像試験装置、スイッチング＆データ取り込みシステム、半導体試験システムなどを製造・販売している。
11	蘇州普源精電科技（中国）	1998年設立の電子計測器の開発・製造を行う企業。ブランド名はRIGOL。オシロスコープ、スペクトラムアナライザ、シグナルジェネレータ、マルチメータ、直流電源などの開発・製造・販売・保証サービスを行っている。
12	Good Will IInstruments Company, Limited（台湾）	1975年に電源の製造会社として創立し、現在では300種以上の電子試験・測定機器を製造している会社である。製品ブランド名はGW Instekである。主な製品は、オシロスコープ、スペクトラムアナライザ、ファンクションジェネレータ、電源や基本的試験・測定装置である。自動車、航空・防衛、半導体、通信、一般消費者、自動化、研究・教育分野などに製品を供給している。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（10）
アナログデジタル変換器

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器（１）

【アナログデジタル変換器】

アナログ電気信号をデジタル電気信号に変換する電子回路装置である。

サンプリング周波数（サンプリングレート）で一定の時間に入力されるアナログ信号を標本化（数値化）し、それを量子化（デジタル値に変換）しデジタルデータを出力する。標本化にともなう折り返し雑音*1は、アナログデジタル変換器にとって重要な技術課題である。

アナログデジタル変換器の方式の種類を表7-10-1に示す。フラッシュ形（並列比較空形）、パイプライン形、逐次比較型、デルタシグマ形、二重積分形などがある。方式によりサンプリングレート、分解能、応答性、消費電力が違い、それらに適した用途に使用されている。

実際のアナログ信号(入力)とデジタル信号(出力)の関係を、図7-10-1に示す。3bitのアナログデジタル変換の例である。3bitのアナログデジタル変換では、アナログ信号を7つの量子化ステップで、8つのデジタル信号で表すことができる。デジタル信号の差として判別できるアナログ信号の最小振幅が最小分解能*2(=1LSB)であり、アナログ信号とデジタル信号の間で生じる誤差を量子化誤差という。

貨物等省令では、これらのアナログデジタル変換を行う機能を有するモジュール、組立品が規制対象となっている。

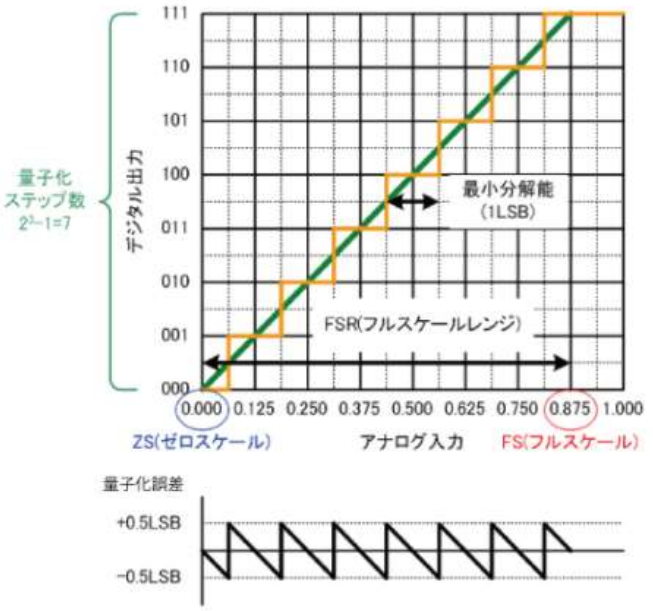
折り返し雑音*1：サンプリングを行なう際、ナイキスト周波数(サンプリング周波数のちょうど半分の周波数)を越えるアナログ信号をA-D変換器に入力した場合、変換されたディジタル信号に混入する雑音。

最小分解能*2：アナログデジタル変換回路の分解能（最小分解能）は、0か1で表されるビット数（bit数）が多いほど、より小さい値のデジタル値を出力できるので、分解能が高くなる。

表7-10-1　アナログデジタル変換器の方式の種類

名称	サンプリングレート(Hz)	分解能(bit)	特徴	用途
フラッシュ形（並列比較形）	10G～10M	12～6	高速・大規模	高速測定器
パイプライン形	200M～10M	14～8		映像、通信
逐次比較形	1M～10k	16～8	低消費電力	マイコン
デルタシグマ形	10M～100	24～12	高分解能	音声処理、計測、通信
二重積分形	1k～10	22～12	高精度	計測

図7-10-1　アナログ信号(入力)とデジタル信号(出力)の関係



1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器（2）

貨物等省令ではアナログデジタル変換を行う機能を有するモジュール、組立品以外に、アナログデジタル変換カード、波形デジタイザー、データ収集カード、信号収集ボード及びトランジェントレコーダーが規制の対象となっている。以下にそれらの説明をする。

【アナログデジタル変換カード】

PC等のスロットに差し込める、カード型のアナログ信号をデジタル信号に変換するカードである。シングルエンド*1 4chのA/D変換PCカードを図7-10-2に示す。ナショナルセミコンダクター（米国）（TI（米国）が2011年に買収）のADコンバータが使用されている。

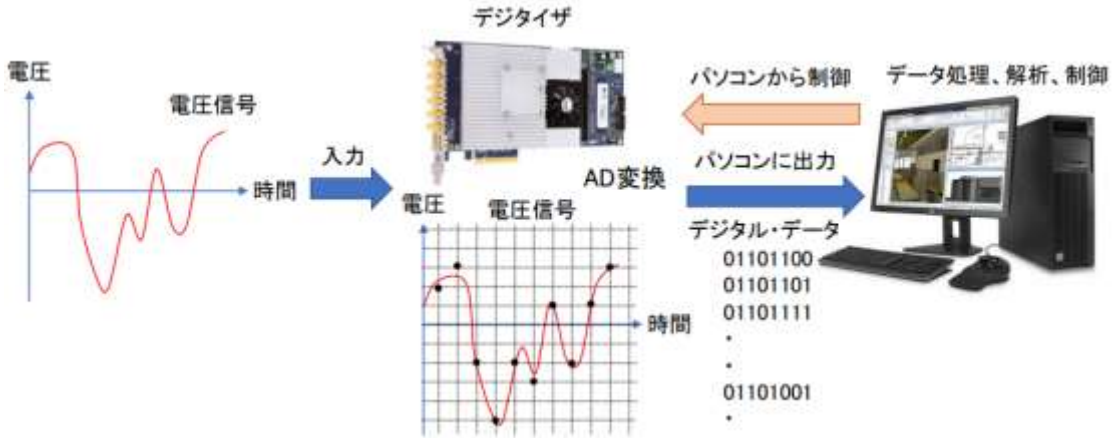
図7-10-2　シングルエンド4chのA/D変換PCカード



【波形デジタイザー】

波形デジタイザーは、アナログ波形信号をデジタルデータに変換する装置で、アナログデジタル変換器、プリアンプ、メモリをパソコンから制御し、パソコンへのデータ転送を可能にする機構を組み込んだ装置を言う。アナログ波形信号をデジタルデータに変換することにより、パソコン上で種々の処理が容易に行えるようになる。波形デジタイザーを使用したアナログデジタル変換の信号の流れを図7-10-3に示す。

図7-10-3　波形デジタイザーを使用したアナログデジタル変換の信号の流れ



シングルエンド*1：
No.7【輸出令第7項（１）】集積回路を参照

1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器（3）

【データ収集カード】

アナログ電気信号を測定してデジタル形式に変換する集積回路を搭載し、データ収集が可能であるカードのことをいう。24ビット8チャンネル高精度データ収集カードを図7-10-4に示す。

【信号収集ボード】

アナログやデジタルのデータ入力及び関連する機能をもち、専用計測器並みのデータ収集能力を備えた組込用ボードのことである。信号収集ボードの例を図7-10-5に示す。 この例では、データ収集のため信号波形や基準電圧などの出力を有しており、入出力部にはAD変換、DA変換、デジタル入出力、などを装備し、大容量のバッファメモリやトリガ機能により、高速・大容量のデータ入出力に対応できる仕様となっている。

図7-10-4　24ビット8チャンネル
高精度データ収集カード

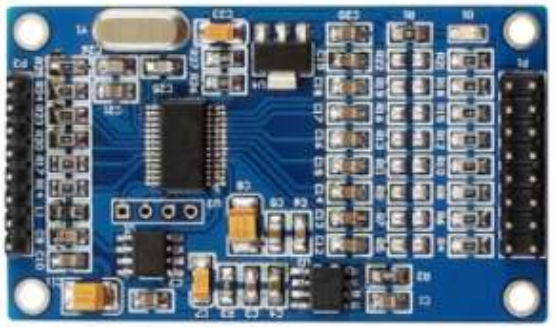


図7-10-5　信号収集ボードの例



1.対象品目の概要調査（4）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器（4）

【トランジェントレコーダー】

機器の挙動や実験の経過などを示すデータを時系列的に記録する装置である。例として、AMO （ドイツ）の電力や構造試験などの電圧信号を高周波数で記録するためのトランジェントレコーダーを図7-10-6に示す。必要なチャンネル数だけボードが増設でき、使用するアナログデジタル変換器のチャンネル数、サンプリング周波数、分解能から、組み込むボードを選択できる仕様となっている。

図7-10-6　AMOのトランジェントレコーダー



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（1）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(10)	6		十	十　アナログデジタル変換器のうち、アナログデジタル変換を行う機能を有するモジュール、組立品又は装置（アナログデジタル変換カード、波形デジタイザー、データ収集カード、信号収集ボード及びトランジェントレコーダーを含む。）であって、次のイ及びロに該当するもの（デジタル方式の記録装置、サンプリングオシロスコープ、スペクトラムアナライザー、信号発生器、ネットワークアナライザー及びマイクロ波用試験受信機を除く。） イ　分解能及びサンプルレートが次のいずれかに該当するもの （一）　分解能が８ビット以上10ビット未満のものであって、サンプルレートが1.3ギガサンプル毎秒を超えるもの （二）　分解能が10ビット以上12ビット未満のものであって、サンプルレートが１ギガサンプル毎秒を超えるもの （三）　分解能が12ビット以上14ビット未満のものであって、サンプルレートが１ギガサンプル毎秒を超えるもの （四）　分解能が14ビット以上16ビット未満のものであって、サンプルレートが400メガサンプル毎秒を超えるもの （五）　分解能が16ビット以上のものであって、サンプルレートが180メガサンプル毎秒を超えるもの ロ　次のいずれかの機能を持つもの （一）　デジタル化されたデータを出力するもの （二）　デジタル化されたデータを記録するもの （三）　デジタル化されたデータを処理するもの	イ　分解能及びサンプルレートが次のいずれかに該当するもの （一）　分解能が８ビット以上10ビット未満のものであって、サンプルレートが1.3ギガサンプル毎秒を超えるもの （二）　分解能が10ビット以上12ビット未満のものであって、サンプルレートが１ギガサンプル毎秒を超えるもの （三）　分解能が12ビット以上14ビット未満のものであって、サンプルレートが１ギガサンプル毎秒を超えるもの （四）　分解能が14ビット以上16ビット未満のものであって、サンプルレートが400メガサンプル毎秒を超えるもの （五）　分解能が16ビット以上のものであって、サンプルレートが180メガサンプル毎秒を超えるもの

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3A2	h	h. "Electronic assemblies", modules, or equipment, specified to perform all of the following: 1. Analogue-to-digital conversions meeting any of the following: a. A resolution of 8 bit or more, but less than 10 bit, with a "sample rate" greater than 1.3 Giga Samples Per Second (GSPS); b. A resolution of 10 bit or more, but less than 12 bit, with a "sample rate" greater than 1.0 GSPS; c. A resolution of 12 bit or more, but less than 14 bit, with a "sample rate" greater than 1.0 GSPS; d. A resolution of 14 bit or more but less than 16 bit, with a "sample rate" greater than 400 Mega Samples Per Second (MSPS); or e. A resolution of 16 bit or more with a "sample rate" greater than 180 MSPS; and 2. Any of the following: a. Output of digitized data; b. Storage of digitized data; or c. Processing of digitized data; Note 3.A.2.h. includes ADC cards, waveform digitizers, data acquisition cards, signal acquisition boards and transient recorders.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（2）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は、赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(10)	6		十	（運用通達解釈） 貨物等省令第６条第十号中のアナログデジタル変換器のうち、アナログデジタル変換を行う機能を有するモジュール、組立品又は装置アナログデジタル変換器のうち、アナログデジタル変換を行う機能を有するモジュール、組立品又は装置については以下のとおりとする。 イ　ｎビットの分解能とは、２ｎレベルに相当する量子化能力をいう。 ロ　ADCの分解能は、測定したアナログ入力を表すADCのデジタル出力のビット数に等しい。有効ビット数（ENOB)はADCの分解能を決定するに当たり、使用しない。 ハ　インターリーブ型でない複数のチャネルを有するモジュール、組立品又は装置については、そのサンプルレートは複数のチャネルを集合させたものではなく、１つのチャネルのうち最大のものをいう。 ニ　インターリーブ型のチャネルを有する複数のチャネルを有するモジュール、組立品又は装置のサンプルレートは、インターリーブに係る全てのチャネルのサンプルレートを集合させた最大のレートをいう。 （判定方法） 複数のチャネルを有するものは、一つのチャネルで実現できる最も性能の高いチャネルで判定する。	

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3A2	h	Technical Notes: 1. A resolution of n bit corresponds to a quantisation of 2n levels. 2. The resolution of the ADC is the number of bits of the digital output of the ADC that represents the measured analogue input. Effective Number of Bits (ENOB) is not used to determine the resolution of the ADC. 3. For non-interleaved multiple-channel "electronic assemblies", modules, or equipment, the "sample rate" is not aggregated and the "sample rate" is the maximum rate of any single-channel. 4. For interleaved channels on multiple-channel "electronic assemblies", modules, or equipment, the "sample rates" are aggregated and the "sample rate" is the maximum combined total rate of all the interleaved channels.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

マイクロプロセッサ等の集積回路のクロック周波数やメモリのアクセス速度が上がり、デジタル信号の処理速度は格段に向上した。その背景には、限られた周波数資源の中で、いつでもどこでも大量のデータをやりとりできるユビキタス社会へのニーズがある。現在では、メガ・ピクセル画像センサの信号処理や高精細画像データの伝送、高速ネットワークやデジタル・テレビのデータ復調処理、大容量ストレージにおけるデータ復号化処理といった用途に、さまざまな高速アナログデジタル変換器が使われている。PCにおけるアナログデジタル変換器の使用イメージを図7-10-7に示す。これらには、アナログデジタル変換を行う機能を有するモジュール、組立品が使用されている。

また、アナログデジタル変換器の主な用途のサンプリングレートと分解能を図7-10-8に示す。

図7-10-7　PCにおけるアナログデジタル変換器の使用イメージ

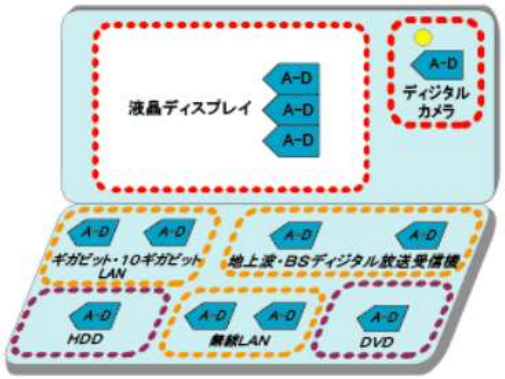
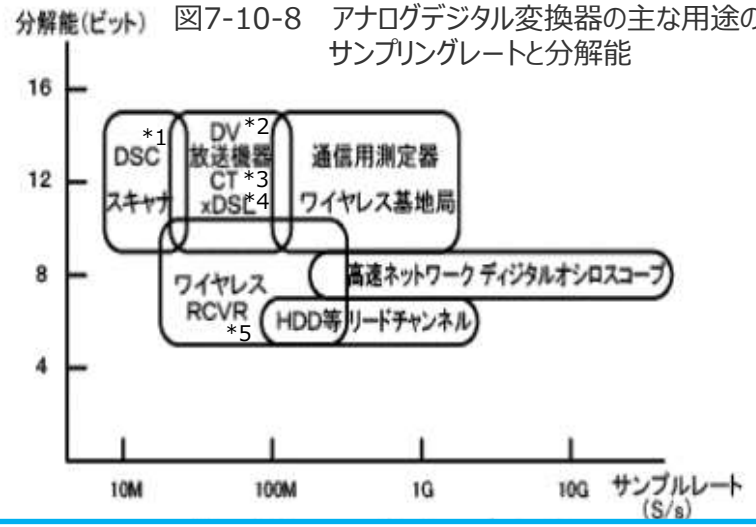


図7-10-8　アナログデジタル変換器の主な用途のサンプリングレートと分解能



DSC[*1]:Digital Still Camera（デジタルスチルカメラ）
DV[*2]：Digital Video（デジタルビデオ）
CT[*3]：Computed Tomography（コンピュータ断層撮影装置）
xDSL[*4]：x Digital Subscriber Line
（ADSL、RADSL、SDSL、HDSL、VDSL等各種デジタル加入者線の総称）
RCVR[*5]：Pronounced Receiver
（伝送媒体<ワイヤレスまたは有線>からの信号を受け取りそれらの信号を、ローカル回路を駆動できる形式にデコードまたは変換する回路。）

3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

アナログデジタル変換器のモジュール、組立品、アナログデジタル変換カード、データ収集カード、信号収集ボード、波形デジタイザー及びトランジェントレコーダーの用途の例について、図7-10-9に示す。現代社会において、家電、情報通信、、自動車、電力、航空、宇宙、分析器、計測器に幅広く使用されている。・

アナログデジタル変換器は、用途に求められる性能に応じて、適したサンプリング周波数や分解能で使用されている。

規制パラメータ　輸出令第7項(10)

十　アナログデジタル変換器のうち、アナログデジタル変換を行う機能を有するモジュール、組立品又は装置（アナログデジタル変換カード、波形デジタイザー、データ収集カード、信号収集ボード及びトランジェントレコーダーを含む。）であって、次のイ及びロに該当するもの（デジタル方式の記録装置、サンプリングオシロスコープ、スペクトラムアナライザー、信号発生器、ネットワークアナライザー及びマイクロ波用試験受信機を除く。）もの

図7-10-9　アナログデジタル変換器の用途の例

アナログデジタル変換器

【モジュール】

【組立品又は装置】

- ・アナログデジタル変換カード
- ・データ収集カード
- ・信号収集ボード
- ・波形デジタイザー
- ・トランジェントレコーダー

用途分野	用途
家電	TV、オーディオ、デジタルカメラ、エアコンなど
情報端末	スマートフォン、タブレット、PCなど
通信	データセンター、通信基地局など
医療	超音波、CT、MRI、SPECTなど
自動車	自動運転：画像、各種センサ（レーダー、レーザー（LiDARなど）、GNSS（GPSなど）、生体モニタ）など エンジン/エアーバック/ABSブレーキシステム/エンジン制御ユニット/燃料噴射システムなど
計測/観測	スペクトラムアナライザー、オシロスコープ、信号発生器 センサーデータ分析器（加速度/重力/圧力/温度/変位/ph/ジャイロ等） レーザー（LiDARなど）、レーダー、超音波など
電力	回路遮断器/フューズ試験/照明衝撃分析/　電力調波分析/電力線欠陥および過渡状態分析など
軍事宇宙	ロケット弾道/推進システム/ミサイルシステム/サテライト試験/物質研究 電子戦力組成装置（EOB：Electric Order of Battle） 電子対策装置(ECM：electronic counter-measure) 対電子対策装置（ECCM：electronic counter-counter　measure） など

3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

アナログデジタル変換器の規制がかかっている用途の例を図7-10-10に示す。アナログデジタル変換器の用途では規制はない。図7-10-10で規制のかかっているアナログデジタル変換器の例を示した。またそれらを使用した規制がかかっている用途例も示している。いずれもアナログデジタル変換器の性能が、用途の性能に大きなウエイトを占めている。

図7-10-10　アナログデジタル変換器の規制がかかっている用途の例

アナログデジタル変換器の用途の例

用途分野	用途
家電	TV、オーディオ、デジタルカメラ、エアコンなど
情報端末	スマートフォン、タブレット、PCなど
通信	データセンター、通信基地局など
医療	超音波、CT、MRI、SPECTなど
自動車	自動運転：画像、各種センサ（レーダー、レーザー（LiDARなど）、GNSS（GPSなど）、生体モニタ）など エンジン/エアーバック/ABSブレーキシステム/エンジン制御ユニット/燃料噴射システムなど
計測/観測	スペクトラムアナライザー、オシロスコープ、信号発生器 センサーデータ分析器（加速度/重力/圧力/温度/変位/ph/ジャイロ等） レーザー（LiDARなど）、レーダー、超音波など
電力	回路遮断器/フューズ試験/照明衝撃分析/ 電力調波分析/電力線欠陥および過渡状態分析など
軍事宇宙	ロケット弾道/推進システム/ミサイルシステム/サテライト試験/物質研究 電子戦力組成装置（EOB：Electric Order of Battle） 電子対策装置(ECM：electronic counter-measure) 対電子対策装置（ECCM：electronic counter-counter measure） など

規制のかかっている
アナログデジタル変換器の例

レーダー向け信号収集ボード
Pentek（米国）Model 6003



波形デジタイザー
keysight technologies
（米国）M9703A



トランジェントレコーダー
AMO（ドイツ）Saturn



規制のかかっている用途例

軍事用レーダー



宇宙ステーション船外実験
プラットフォーム



国境監視システム



ロケット



電子戦機



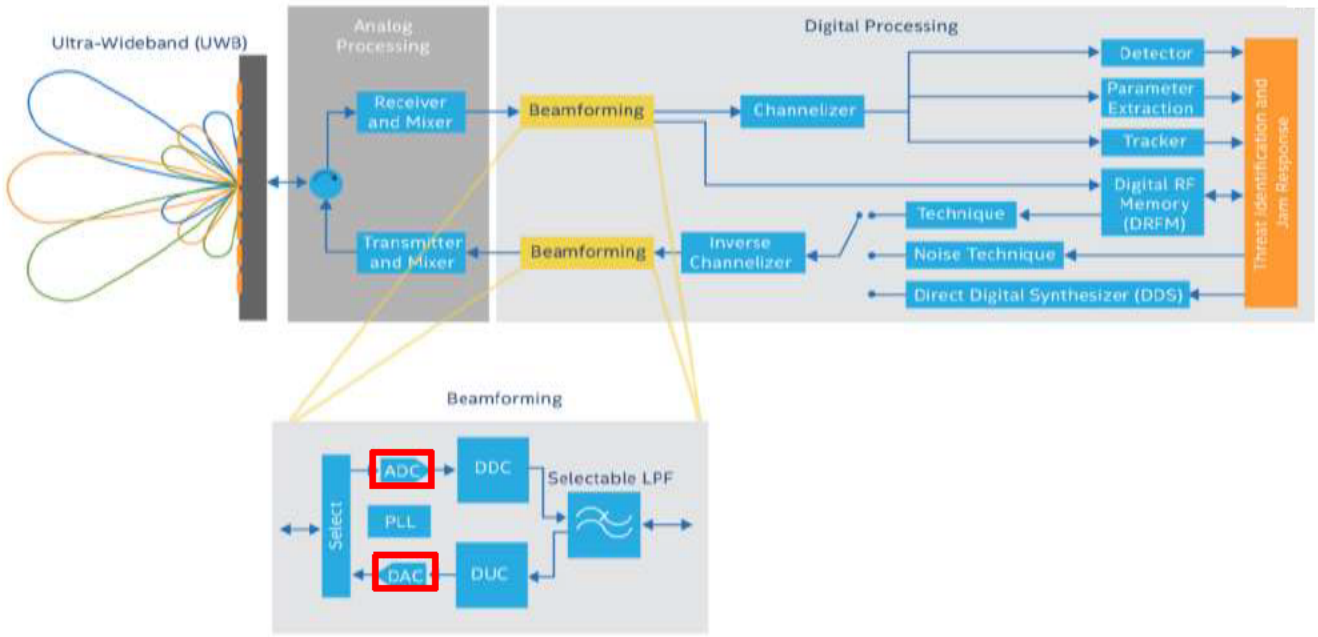
3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化【モジュール】【組立品】

軍事電子戦システムは、短時間で複数の脅威を迅速に分析し、対応する能力が求められる。具体的には複数のソフトウェア生成波形*1を送信して偽物目標を与えると同時に、強力な広帯域信号で全体を秘匿することが必要となる。こうした刻一刻と変化する戦術的対応には機動的な高性能処理が必要で、これに対応できる高速なアナログデジタル変換器／デジタルアナログ変換器が必要となる。電子戦に使用される機器の内部構造の例を図7-10-11に示す。アナログデジタル変換器（図中ADC）とデジタルアナログ変換器（図中DAC）は信号のビームフォーミング（電波または音波、超音波を特定の方向に向けて送信、または特定の方向から受信する技術。図中Beamforming）で使用されており、高速に移動する目標物へ追従、対応するため、高速信号処理及び高分解能が求められる。アナログデジタル変換器はモジュールもしくは組立品として使用されている。

図7-10-11　電子戦に使用される機器の内部構造の例



複数のソフトウェア生成波形*1：
電子戦では、相手に目標物を正確に補足させないために、複数の妨害波形を送信して、かく乱する必要がある。このためにソフトウエアで複数の波形を生成し、それを送信することで偽物目標を相手に与えている。

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

デジタル化されたデータを記録あるいは処理するのアナログデジタル変換器は、アナログデジタル変換の分解能（ビット数）とサンプリングレートで規制されている。

デジタルアナログ変換の分解能及び応答性は、データ処理やデータを記録する機器の性能に重要なパラメータである。

このアナログデジタル変換器の規制パラメータのビット数とサンプルレートの関係を図7-10-12に示す。規制パラメータでは、アナログデジタル変換器のビット数が高く、分解能が高いデータを出力するもの、処理するもの、記録するものを規制している。

前述したタイプ別の規制されているアナログデジタル変換器の装置の分解能（ビット数）とサンプリングレートを表7-10-2に示す。①~③の分解能とサンプルレートを図7-10-12にプロットした。いずれもデジタル化したデータを出力及び記録でき、処理も可能なことと、図7-10-12にプロットした位置からも、規制がかかっていることが分かる。

規制パラメータ　輸出令第7項(10)

十　アナログデジタル変換器のうち、アナログデジタル変換を行う機能を有するモジュール、組立品又は装置（アナログデジタル変換カード、波形デジタイザー、データ収集カード、信号収集ボード及びトランジェントレコーダーを含む。）であって、次のイ及びロに該当するもの（デジタル方式の記録装置、サンプリングオシロスコープ、スペクトラムアナライザー、信号発生器、ネットワークアナライザー及びマイクロ波用試験受信機を除く。）

イ　分解能及びサンプルレートが次のいずれかに該当するもの

（一）　分解能が８ビット以上10ビット未満のものであって、サンプルレートが1.3ギガサンプル毎秒を超えるもの

（二）　分解能が10ビット以上12ビット未満のものであって、サンプルレートが１ギガサンプル毎秒を超えるもの

（三）　分解能が12ビット以上14ビット未満のものであって、サンプルレートが１ギガサンプル毎秒を超えるもの

（四）　分解能が14ビット以上16ビット未満のものであって、サンプルレートが400メガサンプル毎秒を超えるもの

（五）　分解能が16ビット以上のものであって、サンプルレートが180メガサンプル毎秒を超えるもの

ロ　次のいずれかの機能を持つもの

（一）　デジタル化されたデータを出力するもの

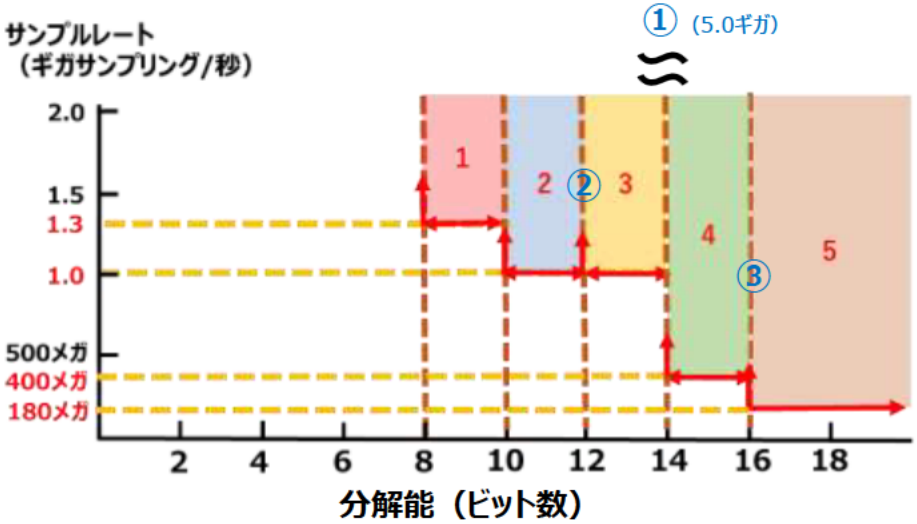
（二）　デジタル化されたデータを記録するもの

（三）　デジタル化されたデータを処理するもの

表7-10-2　規制されているアナログデジタル変換器の装置の分解能（ビット数）とサンプリングレート

No	タイプ	企業	品名	分解能（bit）	サンプルレート（ギガ毎秒）
①	信号収集ボード	Pentek（米国）	Model 6003	14	5.0
②	波形デジタイザー	Keysight（米国）	M9703A	12	1.6
③	トランジェントレコーダー	AMO（ドイツ）	Saturn	16	1.0

図7-10-12　アナログデジタル変換器の規制パラメータのビット数とサンプルレートの関係



4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

【信号収集ボード】

レーダー向けにも使用可能である信号収集ボードPentek（米国）のModel 6003を図7-10-13に、Model 6003のブロック図を図7-10-14に示す。

Model 6003は、無線周波数を信号処理できるF System On Chipで、8ch アナログデジタル変換器及び8chデジタルアナログ変換器とArm CPUコアを内蔵したXilinx（米国）のFPGAデバイスを使用している。プログラマブルデジタルダウンコンバータを装備した8チャンネルのアナログデジタル変換器を内蔵している。（図7-10-14赤枠）

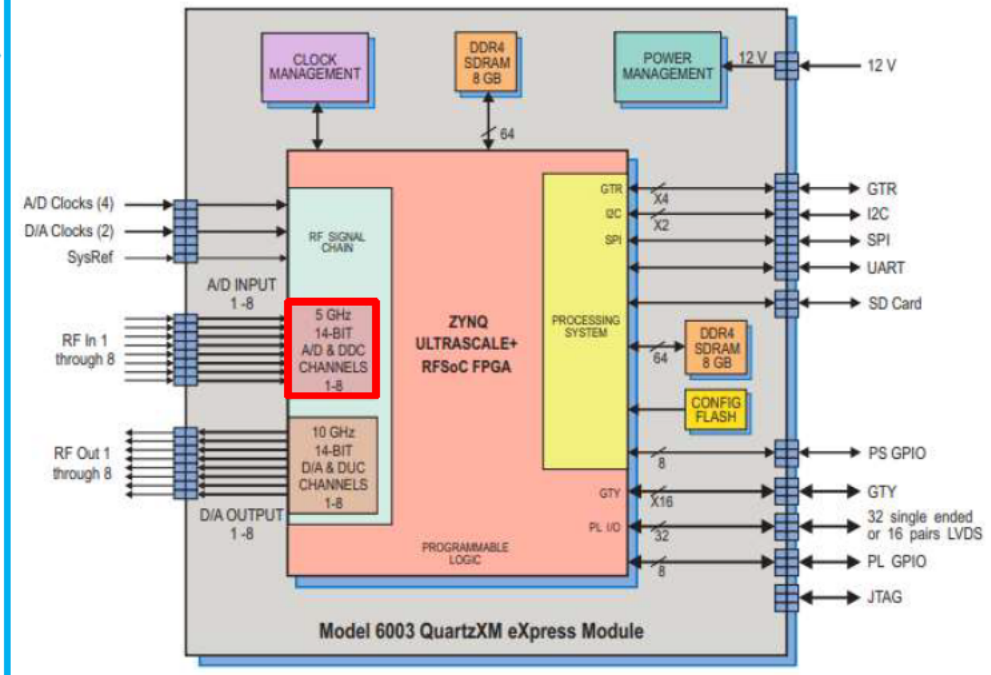
アナログデジタル変換器は14ビットの分解能で5ギガ毎秒のサンプリングレートなので、Model 6003は規制にかかっている。民生機器に使用されるアナログデジタル変換器と比較すると、高分解能で高サンプリングレートである。

図7-10-13

信号収集ボード
Pentek（米国）Model 6003



図7-10-14　Model 6003のブロック図



4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

【波形デジタイザー】

Keysight（米国）の M9703Aを図7-10-15に、M9703Aのブロック図を図7-10-16に示す。

M9703A は、アナログデジタル変換器8チャネル、12ビット（ブロック図緑枠）の広帯域波形デジタイザである。

1.6ギガ毎秒のサンプリングレート、DC~2GHzの信号を捕捉でき、インタリーブ機能を用いれば、2つのチャネルを結合して、4つのチャネルで、1GHzを超える解析帯域幅、3.2ギガ毎秒のサンプリングレートを実現しており、規制にかかっている。

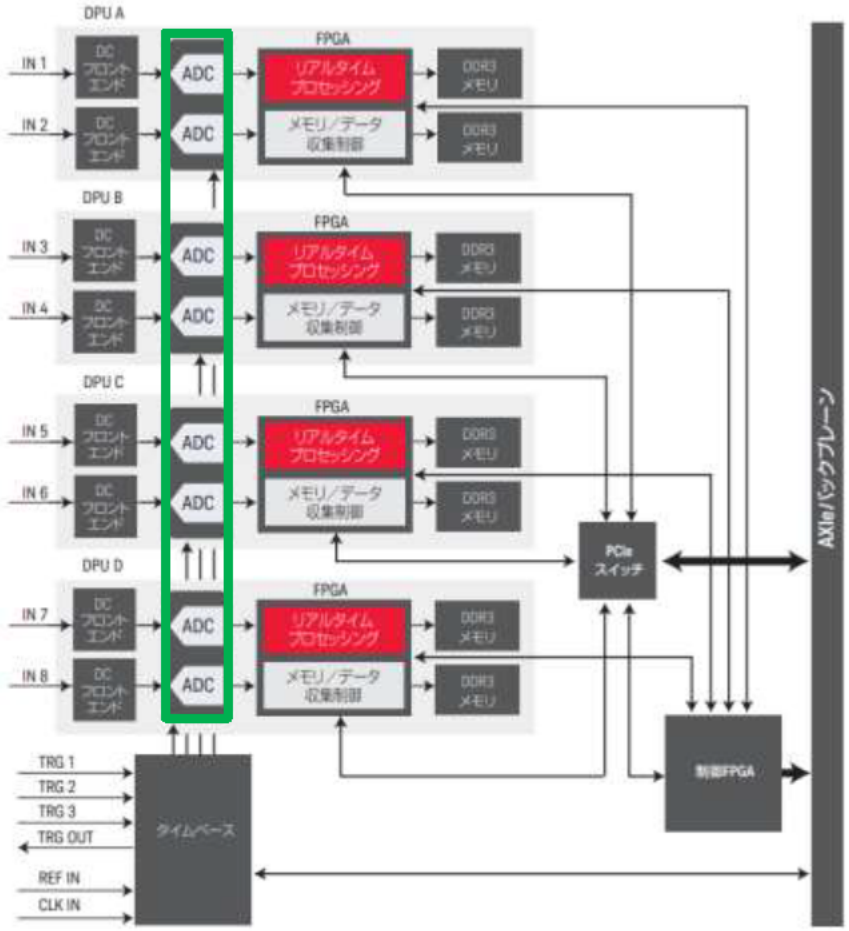
民生機器に使用されるアナログデジタル変換器と比較すると、高分解能で高サンプリングレートである。

用途としては、医療研究機器、環境モニター（レーダーおよびライダー）、化学分析機器、超音波非破壊検査、半導体に使用されており、軍事用途にも実績がある。

図7-10-15　波形デジタイザー
keysight technologies（米国）M9703A



図7-10-16　M9703Aのブロック図



4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

【トランジェントレコーダー】

トランジェントレコーダーであるAMO（ドイツ）Saturnを図7-10-17に示す。

Saturnは、最大20ビットの分解能と200kHz～2GHzのサンプリングレートで高精度の同期測定を可能にしている。これらは、効率のよい過渡信号の高速記録と大量の測定データ処理を可能としている。

アプリケーションに応じて、Saturnには専用の入力モジュールまたは出力モジュールが内蔵されている。Saturnの入力モードを表7-10-2に示す。このようにアナログデジタル変換器のモードを組み合わせることで、アプリケーションに応じた個々の要求を満たすことができる。この表から1Gギガサンプリング毎秒で16ビット等3つのモードで規制がかかっていることが分かる。（表中赤枠）

民生機器に使用されるアナログデジタル変換器と比較すると、高分解能で高サンプリングレートである。

Saturnは、以下のアプリケーションで使用することが可能である。

自動車　：エンジン解析/エアーバック起動/ABSブレーキシステム/エンジン制御ユニット/燃料噴射システム

電力　　：回路遮断器/フューズ試験/照明衝撃分析/電力調波分析/電力線欠陥および過渡状態分析

軍事宇宙：ロケット弾道/推進システム/ミサイルシステム/サテライト試験/物質研究
電子戦力組成装置（EOB：Electric Order of Battle）
電子対策装置(ECM：electronic counter-measure)
対電子対策装置
（ECCM：electronic counter-counter measure）

図7-10-17
トランジェントレコーダー
AMO（ドイツ）Saturn



表7-10-3　SATURNの入力モード

Type	No. of channels	Sample Rate	Resolution
200k-20-8	8	200 kS/s	20 bit
1M-16-3 ISO	3	1 MS/s	16 bit
1M-18-4	4	1 MS/s	18 bit
3M-16-8	8	3 MS/s	16 bit
10M-16-4	4	10 MS/s	16 bit
10M-16-3 ISO	3	10 MS/s	16 bit
20M-16-3 ISO	3	20 MS/s	16 bit
25M-16-4	4	25 MS/s	16 bit
100M-16-4	4	100 / 25 MS/s	16 bit
200M-16-1	1	200 MS/s	16 bit
1G-16-4	4	1 GS/s	16 bit
2G-10	2	2 / 1 GS/s	10 bit

4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（1）

アナログデジタル変換器市場の年次推移を図7-10-18に示す。年々右肩上がりでCAGR6.4%増加している。

また、アナログデジタル変換器用途別市場推移を表7-10-4に示す。規模は通信用途が一番大きいが、伸長率は医療用途が大きくなると予想されている。

図7-10-18　アナログデジタル変換器市場の年次推移

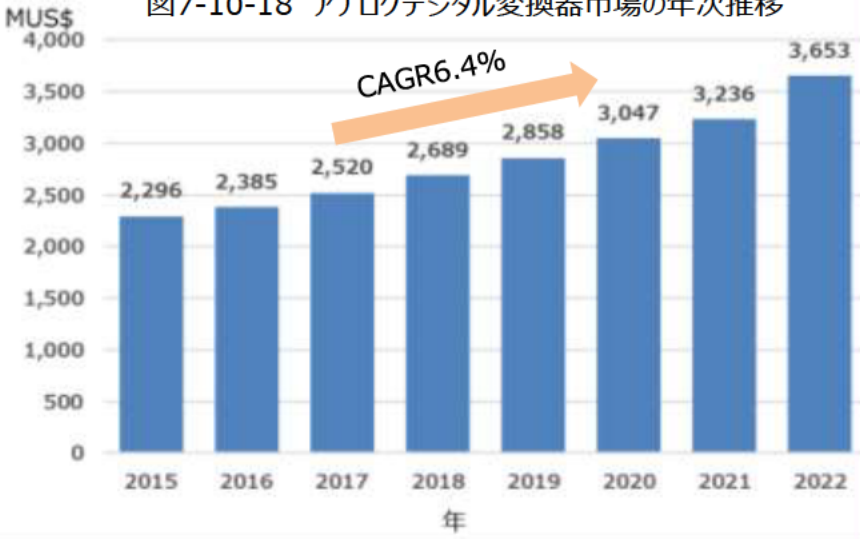


表7-10-4　アナログデジタル変換器用途別市場推移

Application	2015	2016	2017	2019	2021	2023	CAGR (2017-2023)
Communications	770.5	747.0	766.9	869.5	999.2	1,157.3	7.1%
Industrial	539.0	578.7	619.7	704.8	796.3	893.8	6.3%
T&M	329.3	353.3	377.8	429.0	484.3	538.7	6.1%
Automotive	278.7	294.2	310.1	336.3	360.0	383.7	3.6%
Medical	262.5	287.6	314.1	371.6	434.8	503.7	8.2%
Consumer Electronics	116.5	123.9	131.3	146.7	161.6	175.5	4.9%
Total	2,296.4	2,384.7	2,519.9	2,858.0	3,236.2	3,652.7	6.4%

4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器

③市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

アナログデジタル変換器（半導体/組立/モジュール）の製造企業概要を表7-10-5に示す。多数の企業が製造している。

表7-10-5 アナログデジタル変換器（半導体/組立/モジュール）の製造企業概要

	アナログデジタル変換器製造企業（半導体/組込/モジュール）	会社概要
1	Analog Devices（米国）	アナログ・デバイセズは、電子機器で使用される高性能アナログ、ミックスドシグナルおよびデジタルシグナルプロセッシング（DSP）集積回路（IC）を設計および製造している。同社は1965年に設立され、本社はマサチューセッツ州（米国）にある。従業員数は全世界で約10,000人である。
2	Texas Instruments（米国）	テキサスインスツルメンツは1930年に設立され、本社は米国テキサス州にあり、グローバルなアナログおよびデジタル半導体集積回路の製造会社である。 同社は、アナログ、組み込み処理など、ワイヤレス製品やソリューションを含む主要な事業セグメントを中心に事業を展開している。
3	Maxim Integrated（米国）	Maxim Integratedは、1983年に設立され、本社は米国カリフォルニア州にある。同社は、一般にアナログ回路として知られているリニアおよびミックスドシグナル集積回路を設計、開発、製造、および販売している。同社のリニアおよびミックスドシグナル製品は、自動車、通信およびデータセンター、コンピューティング、消費者、および産業の主要市場に提供されている。
4	Microchip Technology（米国）	Microchip Technologyは1989年に設立され、本社は米国のチャンドラーにある。同社は、マイクロコントローラー、アナログ半導体、ミックスドシグナルおよびフラッシュIPソリューションを開発および製造している。
5	Intersil（米国）	1999年8月にHarris Corporationの半導体事業の取得によって発足したグローバル企業である。パワーマネジメントIC製造企業であり、産業、インフラ、モバイル、車載、航空宇宙機器向けの高効率パワーマネジメントと高精度アナログ技術の開発をしている。2017年2月、ルネサス エレクトロニクスにより買収された。
6	旭化成マイクロデバイス（日本）	旭化成マイクロデバイス（AKM）は、2003年に設立され、本社は東京にある。AKMは旭化成株式会社の子会社である。同社は、アナログデジタルミックスドシグナル技術を特徴とする高度な集積回路（IC）製品をベースとしたさまざまな高度なセンシングデバイスを提供している。
7	CIRRUS LOGIC（米国）	集積回路のファブレス企業で、サウンドチップや組み込みプロセッサ等の開発で知られている。1990年代前半には低コストなグラフィックプロセッサの開発で知られたが、2005年5月にグラフィック部門をMagnum Semiconductor, Inc.へ売却し、以降はサウンドチップの開発のみに注力している。2014年にはオーディオ半導体を取り扱っているウォルフソン・マイクロエレクトロニクス社を買収した。
8	ローム（日本）	ロームは1958年に設立され、本社は日本の京都にある。同社は、集積回路（IC）やその他の半導体および電子部品の設計、製造、販売を行っており、IC、ディスクリート半導体デバイス、モジュールの3つの事業セグメントを中心に事業を展開しています。 同社の「IC」セグメントでは、オペアンプ、マルチプレクサ、データコンバータなどの集積回路を提供している。データコンバータの製品ポートフォリオには、ADCとDACが含まれている。

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（10）アナログデジタル変換器

③市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（4）

アナログデジタル変換器（信号収集ボード/デジタイザ/トライジェントレコーダ）の製造企業概要を表7-10-6に示す。軍事関連用途に製造している企業が多い。

表7-10-6 アナログデジタル変換器（信号収集ボード/デジタイザ/トライジェントレコーダ）の製造企業概要

	アナログデジタル変換器製造企業（信号収集ボード/デジタイザ/トライジェントレコーダ））	会社概要
1	Pentek（米国）	Pentekは、ISO 9001認定企業として、DSP、ソフトウェア無線、およびデータ取得用の組み込みコンピュータボードと記録システムを設計している。その中で、アナログデジタル変換器を内蔵した信号収集ボードを製造、販売している。同社は、アメリカ国立標準技術研究所、NASA、アメリカ国家安全保障局、ボーイング、イスラエル政府国防省などへの採用実績がある。
2	Keysight（米国）	米国カリフォルニア州サンタローザに本拠を置き、電子計測機器の開発・製造・販売を行っている。同業では世界最大規模である。 主要製品は、デジタイザ、オシロスコープ、標準信号発生器、周波数カウンタ、デジタル・マルチメータ、スペクトラムアナライザ、ネットワークアナライザ、高周波シミュレータなどがある。
3	AMOtronics（ドイツ）	AMOtronicsは、ハイエンドの測定、制御システム、の開発、製造、販売を行っている。同社のトライジェントレコーダは分析ソリューションとして、世界中のさまざまな研究および産業プロジェクトで使用されている。エネルギー分野だけでなく、航空宇宙、自動車、防衛でも採用実績がある。
4	Spectrum Instrumentation （ドイツ）	Spectrum Instrumentation は、業界標準（PCIe、LXI、PXIe）における500を超えるデジタイザおよびジェネレータ製品を製造するモジュール設計のパイオニアである。これら高性能のPCベースのテスト&メジャーメントデザインは、電子信号の取得・生成および解析に使用されている。同社はドイツのGrosshansdorfに本社を置き、幅広い販売ネットワークを通じて世界中に製品を販売し、設計エンジニアによる優れたサポートを提供している。PCIe（PCI Express）、PXIe、PXI、イーサネットベースのLXIなどのさまざまなバス規格に対応する信頼性の高いPCベースの計測器を製造している。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（11）
デジタル方式の記録装置

令和 3年 10月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査

○輸出令第7項（11）デジタル方式の記録装置

デジタル方式の記録装置の変遷を図7-11-1に示す。

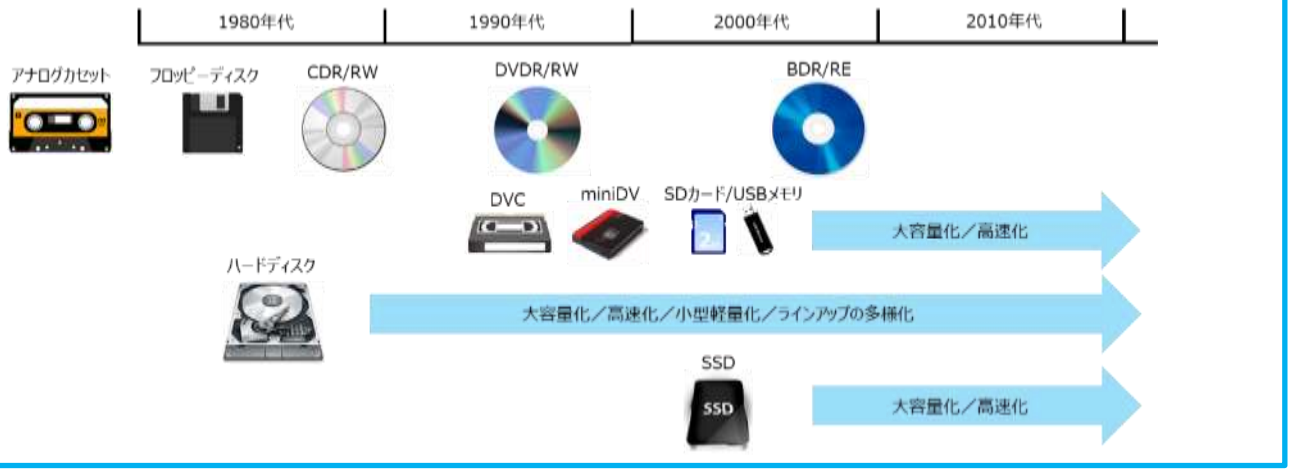
1980年代にフロッピーディスク（磁気ディスク）によりアナログテープ方式の記録装置からデジタル方式の記録装置へ置き換えられた。その後PCの普及に伴い、ハードディスクの需要が増し、小型軽量化、低価格化、記録速度の高速化が進み記録容量も大幅にアップしている。

また、1980年代後半になると、CDの記録メディアとしてのCD-R[*1]/CD-RW[*2]が規格化され、記録媒体として持ち運びの便利さから、PCへドライブ機器が装備され普及した。その後、1990年代から2000年代に記録装置としてディスクメディアはDVD-R[*3]/DVD-RW[*4]、BD-R[*5]/BD-RE[*6]へと発展して大容量化、高速化している。デジタル記録が可能な磁気テープでは、デジタルビデオ画像等を記録するDVC[*7]、ビデオカメラ用のMiniDV等が普及していた。

そして、1990年代後半になると、半導体メモリの技術進歩により、SDカードなどNAND Flashメモリを用いたメモリカードやUSBメモリ等が登場し、PCやデジタルカメラ、携帯電話等の多くの民生用機器に使用されるようになった。さらには、NAND Flashメモリの大容量化や高速化によりSSD（Solid State Drive）が開発され、衝撃に強い及び読み書きが速い等の優位性からハードディスクが一部置き換えられている。

今日では、デジタル方式の記録装置はデータセンターでの需要が大きく、主にハードディスクとSSDが使用されている。また、PC、スマートフォン、DVD／BDレコーダー、デジタルカメラ、TV、ドライブレコーダや自動車、監視カメラ等やドローン等のUAV[*8]、航空機等あらゆる機器に幅広く搭載されている。

図7-11-1　デジタル方式の記録装置の普及の変遷



CD-R[*1] :Compact Disc Recordable　CD-RW[*2] :Compact Disc ReWritable　DVD-R[*3] :Digital Versatile Disc Recordable　DVD-RW[*4]:Digital Versatile Disc ReWritable
BD-R[*5] :Blu-ray Disc Recordable　BD-RE[*6] :Blu-ray Disc Rewritable　DVC[*7] :Digital Video Cassette　UAV[*8] :Unmanned Aerial Vehicle

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令第7項（11）デジタル方式の記録装置

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(11)	6		十一	十一　デジタル方式の記録装置であって、次のイ及びロに該当するもの イ　ディスクメモリ又はソリッドステートドライブメモリへのデータ連続記録速度が6.4ギガビット毎秒を超えて維持可能なもの ロ　記録中の無線周波数信号データを信号処理することができるもの （解釈）デジタル方式の記録装置が、デジタルデータのサンプルレート又はデジタル信号への変換速度を維持した状態で、デジタル信号の情報を欠落なく連続してディスクメモリ又はソリッドステートドライブメモリに出力することができる速度をいい、パラレルアーキテクチャを有する記録装置については、最大ワード転送速度にワードを構成するビット数を乗じたものをいう。	データ連続記録速度が6.4ギガビット毎秒を超えて維持可能

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A2	a	6	6. Digital data recorders having all of the following: a. A sustained 'continuous throughput' of more than 6.4 Gbit/s to disk or solid-state drive memory; and b. "Signal processing" of the radio frequency signal data while it is being recorded; Technical Notes: 1. For recorders with a parallel bus architecture, the 'continuous throughput' rate is the highest word rate multiplied by the number of bits in a word. 2. 'Continuous throughput' is the fastest data rate the instrument can r record to disk or solid-state drive memory without the loss of any information while sustaining the input digital data rate or digitizer conversion rate.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

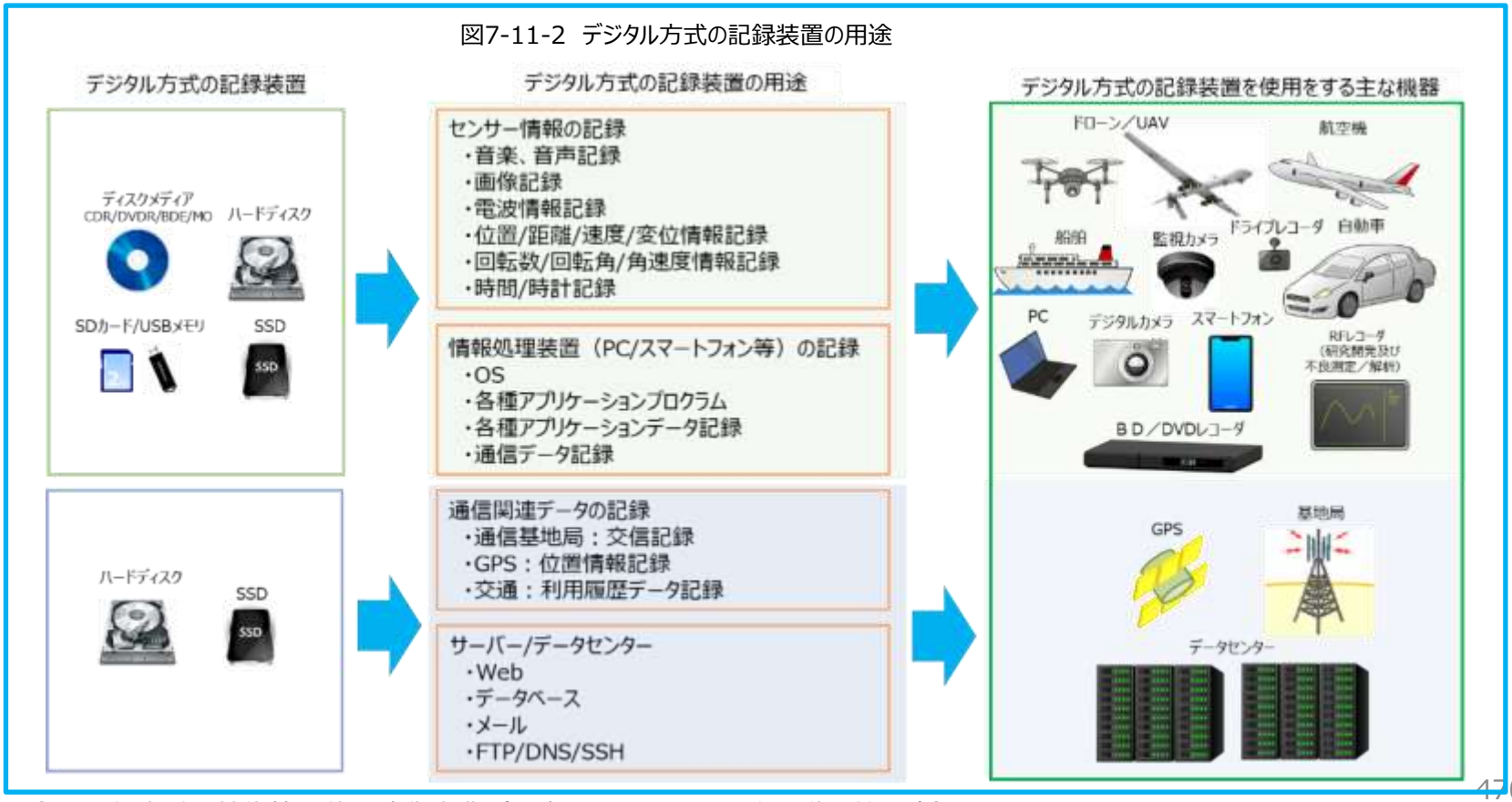
3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令第7項（11）デジタル方式の記録装置

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

デジタル方式の記録装置の用途を図7-11-2に示す。デジタル方式の記録装置は、センサー情報の記録（音楽・音声記録、画像記録、電波情報記録等）、PCやスマートフォン等の情報処理装置の記録（OS、各種アプリケーション、通信データ記録）、通信関連データの記録（通信基地局の交信記録、GPSの位置情報記録、交通の利用データ記録）、サーバー／データセンター情報記録（Web、データベース等）で使用されている。 機器としては、PC、BD／DVDレコーダ、TV、スマートフォン、デジタルカメラ、監視カメラ、ドライブレコーダ、自動車、ドローン／UAV、航空機、RF（Radio Frequency）レコーダ、通信基地局、GPS、サーバ／データセンター等幅広く使用されている。

図7-11-2 デジタル方式の記録装置の用途



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（11）デジタル方式の記録装置

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

デジタル方式の記録装置の規制がかかっている用途を図7-11-3に示す。

デジタル方式の記録装置の用途で、記録中の無線周波数信号データを信号処理することができるものは、「電波情報記録」の装置のみである。

機器としては「RFレコーダ」として、電波を使用する機器の研究開発や不良測定／解析に使用されている。

具体的にはDVB[*1]、ATSC[*2]、ISDB[*3]、DMB[*4]、DBA[*5]、RDS[*6]、Sirius XM[*7]等の放送用電波信号に関する製品及び携帯電話、スマートフォンや基地局の電波を送信／受信する機器の設計、製造に使用されている。

規制パラメータ　輸出令第7項(11)

十一　デジタル方式の記録装置であって、次のイ及びロに該当するもの
イ　ディスクメモリ又はソリッドステートドライブメモリへのデータ連続記録速度が6.4ギガビット毎秒を超えて維持可能なもの
ロ　記録中の無線周波数信号データを信号処理することができるもの

図7-11-3　デジタル方式の記録装置の規制がかかっている用途



DAB[*1]:Digital Audio Broadcast
ATSC[*2]:Advanced Television Systems Committee standards
ISDB[*3]:Integrated Services Digital Broadcasting
DMB[*4]:Digital Multimedia Broadcasting
DBA[*5]:Digital Audio Broadcast
RDS[*6]:Radio Data System
Sirius XM[*7]:Sirius XM Radio Inc.
衛星デジタル音声ラジオサービス会社

3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（11）デジタル方式の記録装置

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化（１）

規制の対象となるデジタル方式の記録装置は、無線周波数データを信号処理しながらリアルタイムに無線周波数データの記録が可能である。

この記録装置がESM（Electronic Support Measures）及びELINT（Electronic Intelligence system）に組み込まれることにより、地上／空中／海上のレーダー送信を探知、傍受、測定、位置特定、分析、分類、監視し、リアルタイムの電子戦力組成（EOB：Electric Order of Battle）を含む諜報データを作成することが可能になる。

米国においてこのシステムは、諜報データベースにシームレスに統合でき、戦術的／戦略的情報の提供をしている。ELINTのデータは、敵の領土近くの沿岸沖の船舶や潜水艦、空域の近くまたは空域内の偵察機／戦闘機などの航空機やUAV、軍用車両などによって収集される。これらの用途例を図7-11-4に示す。

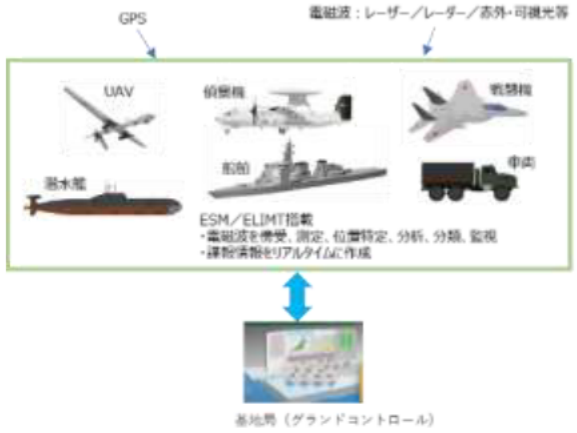
ESM／ELINTシステム構成例を図7-11-5に示す。

ESMは、敵が発する電磁スペクトルについて情報を集める電波探知装置である。レーダーを照射された場合の逆探知等に使用される。

そしてELINTは、核爆発または放射線源以外の発生源から発せられる非通信電磁放射から得られる技術的情報および地理的位置情報を得て、パラメータを分析し、記録する。具体的には、レーダーやその他の電磁装置によって船や航空機を検出し、敵の防衛ネットワークの電子機器、特にレーダー、地対空ミサイルシステム、航空機などの情報を得て分析を行う。

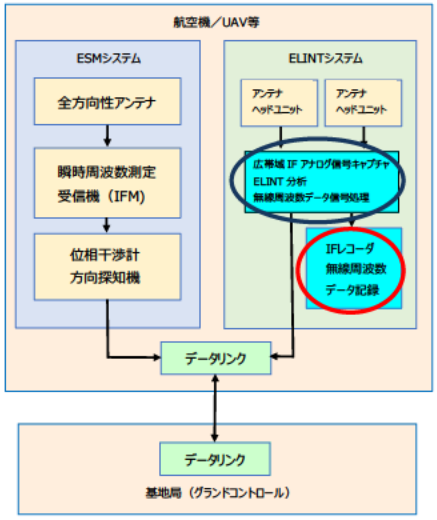
図7-11-5において、ELINTシステムの無線周波数データの記録はIFレコーダ部で（赤丸印）また、無線周波数データの信号処理は広域IFキャプチャ／ELINT分析部において行われる。（青丸印）

図7-11-4　軍事用途におけるESM／ELINT搭載例



出典：調査会社が各種情報を基に作成

図7-11-5　ESM／ELINTシステム構成例



出典：調査会社が各種情報を基に作成

3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（11）デジタル方式の記録装置

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化（２）

航空自衛隊の国産輸送機C-2でのELINTシステムの実用性評価の様子を図7-11-6に示す。 2018年６月にELINTシステム搭載のための改修を行い、実用試験を開始し2019年度末に終了している。

また、Telemus社（米国）の「ALR-510 ELINT/ESMシステム」（UAV用）を図7-11-7に、このシステムに使用されているPentek社 （米国）の「Talon RTX Rugged IFレコーダ RTX2589 」を図7-11-8に示す。このシステムは北大西洋条約機構（NATO）の軍事組織に採用されている。

図7-11-6
C-2に搭載したELINTの実用性評価の様子



出典：航空自衛隊 航空開発実験集団

図7-11-7
Telemus社（米国）「ALR-510 ELINT/ESMシステム」（UAV用）



図7-11-8
Pentek社（米国）
「Talon RTX Rugged IFレコーダ RTX2589」



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（11）デジタル方式の記録装置

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化

デジタル方式の記録装置において規制がかかっている用途の品目は、デジタルデータを入力し、入力されたデジタル信号を信号処理しながらディスクメモリ又はソリッドステートドライブメモリに記録する装置で「データ記録部」と「信号処理部」から構成される。その構成図を図7-11-9に示す。

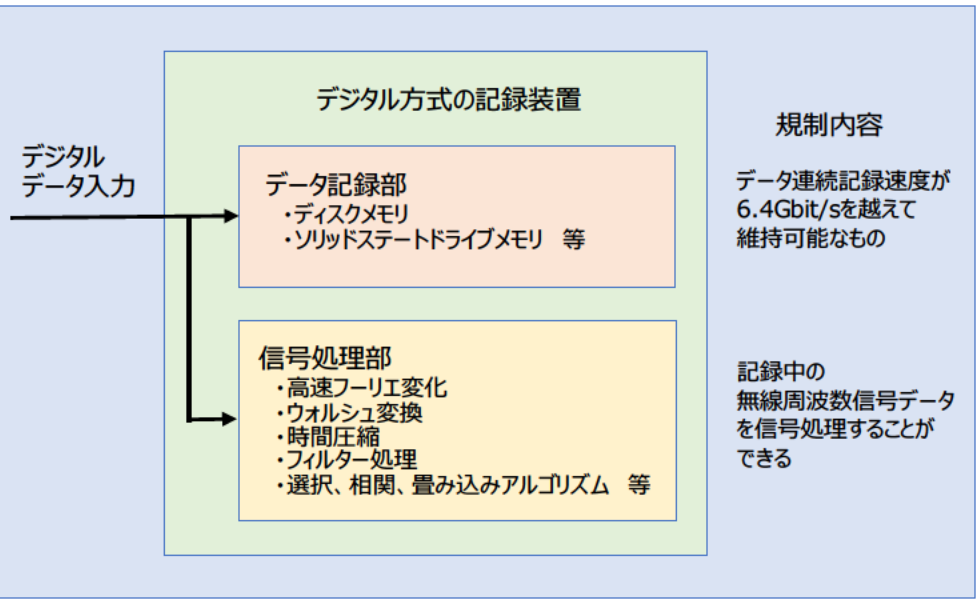
データ記録部は、データの連続記録速度が6.4Gbit/sを超えて維持されることが保証されている装置が規制対象となっている。記録中の無線周波数信号データ（記録中のデータ）を信号処理することができないハードディスク、サーバ用メモリ、フラッシュメモリ等は判定対象にはならない。

信号処理部は、外部から情報を伝送する信号を処理し、高速フーリエ変換、ウォルシュ変換その他の領域間変換、時間圧縮、フィルター処理、抽出、選択、相関、畳み込みその他これらに類するアルゴリズムを用いるものが対象となる。

対象となるデジタル方式の記録装置は、この2つの機能により、記録中の無線周波数信号データを信号処理するものである。

記録中にいったん信号処理を止めるものは規制の対象外である。記録中のデータを記録を止めずに並行して信号処理するデジタル方式の記録装置が、規制の対象となる。

図7-11-9　デジタル方式の記録装置の規制がかかっている用途の品目の構成



4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（11）デジタル方式の記録装置

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（１）

デジタル方式の記録装置において、記録速度を決める技術要素として記録メディア、伝送規格、プロトコル規格がある。

民生用途の記録メディアの最高書き込み速度を図7-11-10に示す。CD/DVD/BD/HDD等の最高書き込み速度は、規制パラメータの6.4Gb/s以下である。

SSDのPCIe3.0及びPCIe5.0が規制にかかっている。実際、SSDでは14GB/sを実現した業界初のPCIe 5.0対応SSDコントローラが2021年5月に開発されている。

しかしながら、これらは無線周波数信号を信号処理しながら記録することができないため単独製品では非該当である。

規制にかかるレコーダは、無線周波数信号（RF信号）を信号処理しながら、不揮発性メモリを使用した書き込み速度6.4Gb/s超の記録が可能である。

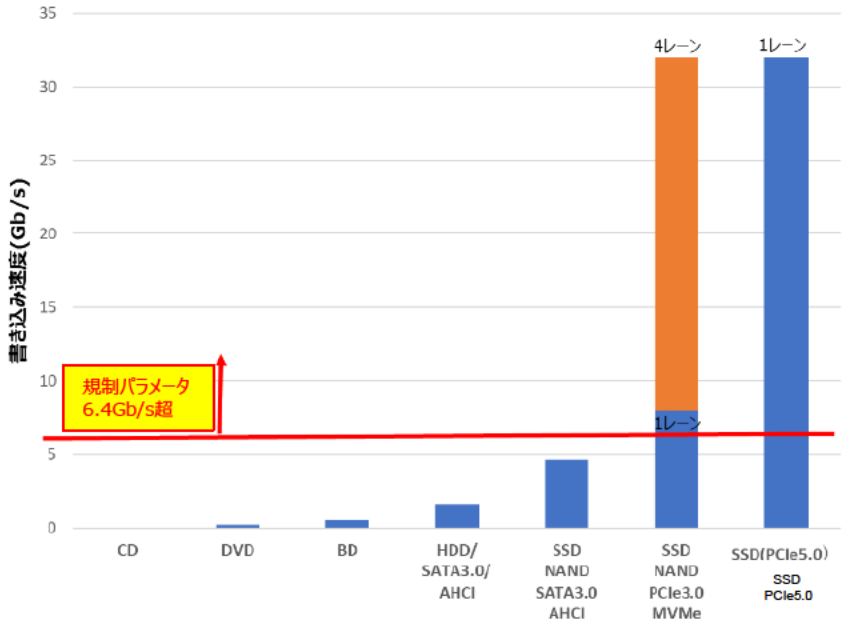
規制パラメータ　輸出令第7項(11)

十一　デジタル方式の記録装置であって、次のイ及びロに該当するもの

イ　ディスクメモリ又はソリッドステートドライブメモリへのデータ連続記録速度が6.4ギガビット毎秒を超えて維持可能なもの

ロ　記録中の無線周波数信号データを信号処理することができるもの

図7-11-10　民生用途の記録メディアの最高書き込み速度



4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（11）デジタル方式の記録装置

②規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（２）

デジタル方式の記録装置において、無線周波数信号（RF信号）を信号処理できる機器（RFレコーダ）は、PCやスマートフォン、ディスクメディア等の民生機器で使用される記録装置と比べて、高速記録であり、かつ記録データの高い品質／信頼性が求められる。

そのためにRFレコーダでは、RAID（Redundant Arrays of Inexpensive Disks、又は Redundant Arrays of Independent Disks、レイド）という複数台のハードディスクを組み合わせることで仮想的な1台のHDD/SSDとして運用し、冗長性を向上させる技術を使用している。

この技術では、あるHDD/SSDが故障したとしても、そのHDD/SSDを交換するだけですぐ元通りにデータを復旧できる。また、特定のHDD/SSDが故障をしたり復旧をしていたりしている最中でも、他のHDD/SSDは正常に動作し、データには問題なくアクセスすることができデータの信頼性を高めることを可能としている。また、RAIDには、送られてきたデータを自動で分散し、複数のHDD/SSDへ一度に書き込む機能もあり、1台のHDD/SSDに順番にデータを書き込むより高速化が可能となる。

RAIDは機器として高速で高い品質や信頼性が要求されるRFレコーダ、サーバー/データセンターのHDD/SSDに使用されている。

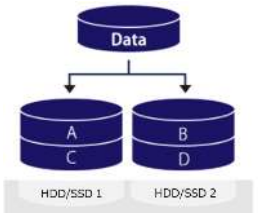
RAIDは、HDD/SSDへのデータの割り振り方やデータの冗長化の方法により、RAID0、RAID１、RAID5、RAID６、RAID10、RAID50と、さまざまな方法がある。主に使用されているRAID0、RAID1、RAID5、RAID6の特徴を図7-11-11に示す。

サーバー/データセンターでは、RAID1とRAID5がよく使用されている。規制対象となるRFレコーダは、主にRAID０とRAID1が使用されているが右図のRAID0~RAID6を選択可能な機器もある。

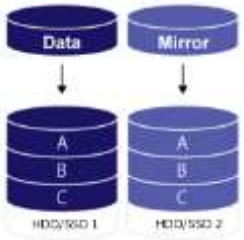
また、これらのシステムにおいて衝撃に強く読み書きが早い、発熱が少ない等の優勢性から、HDDからSSDへの置き換えが進んでいる。

図7-11-11　RAIDの種類とその特徴

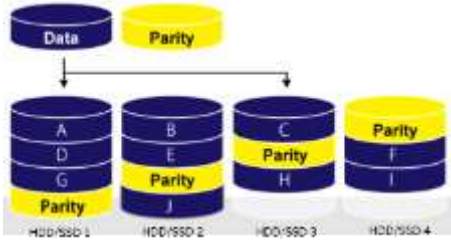
RAID0:
データをブロック単位に分割し、複数のディスクに分散して配置することで、読み込み・書き込み速度が高まる。ただし、冗長性がないことから、RAID内のHDD/SSDが1台でも故障したときには、ファイルの復旧ができない。データ書き込みの高速化というメリットは得られるが、安全性の向上は実現できない。



RAID1:
同じデータを複製して、2つのディスクに書き込む方式で、「ミラーリング」とも呼ばれている。どちらかのHDD/SSDが故障したとしても、すべてのファイルが残り信頼性が高い。しかし、同じデータを2台のHDD/SSDに書き込むことから、容量コストが倍になる。



RAID5:
HDD/SSD1台分の容量の「パリティ」と呼ばれるデータを常に付加して保存しておくことで、いずれかのHDDが故障したときでも、そこで失われた分のデータをパリティから生成することが可能である。パリティは、HDDに障害が発生したあとにデータを復元するために使われる符号で、RAIDにデータを書き込む際に、自動的に生成される。1台のHDD/SSDが壊れた状態でも稼働が可能で、故障への耐性は高まる。しかしパリティを演算する際、CPUに負荷がかかる。



RAID6:
RAID 5と同様の技術でパリティを二重で生成し、異なるディスクに記録することによって、RAID5より耐障害性等の信頼性を向上させている。

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（11）デジタル方式の記録装置

③市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（１）

デジタル方式の記録装置市場推移（実績/予測）を図7-11-12に示す。

軍事用途の市場は、民生用途の市場に対し10倍以上の市場規模である。

軍事用途では、2016年に572MillionUS$から2022年には1146.10MillionUS$と、市場規模が2倍近くになると予想されている。

民生用途も市場規模は小さいものの、2016年に32.5 MillionUS$から2022年には76.1MillionUS$と、市場規模が2倍以上になると予想されている。

デジタル方式の記録装置地域別シェア推移（実績/予測）を図7-11-13に示す。

北米は、他の地域に対し2倍以上の市場規模があることが分かる。

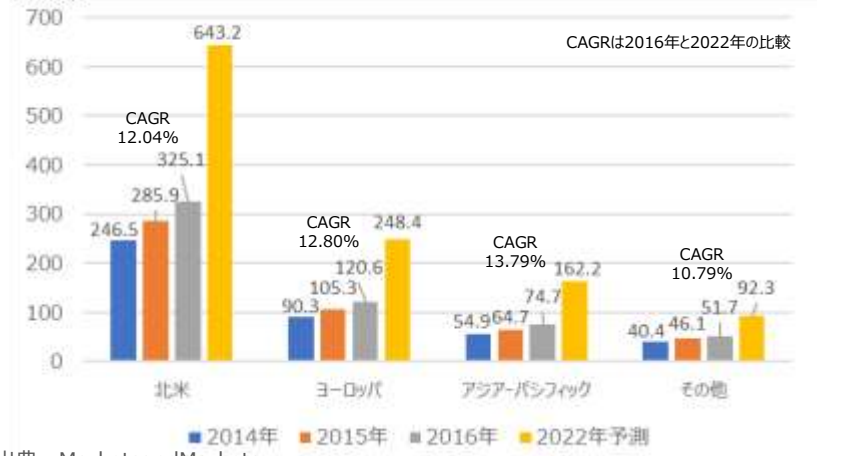
2016年から2022年のGAGRは、各地域とも10%から14%と予測されており、今後の市場の成長が期待されている。

図7-11-12　デジタル方式の記録装置市場推移（実績/予測）



出典：MarketsandMarkets
DIGITAL RADIO FREQUENCY MEMORY MARKET – GLOBAL FORECAST TO 2022

図7-11-13　デジタル方式の記録装置地域別シェア推移（実績/予測）



出典：MarketsandMarkets
DIGITAL RADIO FREQUENCY MEMORY MARKET – GLOBAL FORECAST TO 2022

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（11）デジタル方式の記録装置

③市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（２）

デジタル方式の記録装置の市場シェアを図7-11-14に示す。民生用途に対し軍事用途の市場規模が10倍以上あることからも、軍事産業に携わる企業が上位を占めている。

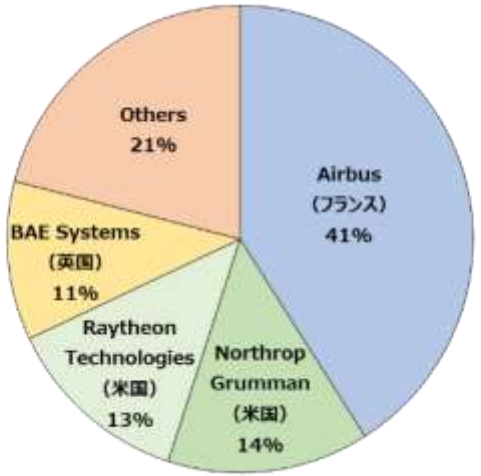
シェアトップのAirbus （フランス）は41%のシェアを占めており、北米、ヨーロッパ、アジア太平洋、中東、ラテンアメリカで幅広く事業を展開している。

シェア2位のNorthrop Grumman（米国）は、2015年に14%を占めていたが、その後2018年に、オービタルATK（米国）を92億ドルで買収し航空宇宙・防衛事業を強化している。

シェア3位のRaytheon Technologies（米国）は、航空宇宙・防衛産業を代表する巨大軍需企業であり、多くは米国政府の軍事関連のビジネスである。

シェア4位のBAE systems（英国）は、イギリスの国防・情報セキュリティ・航空宇宙関連企業で、2020年も防衛関連企業として世界7位の事業規模となっている。

図7-11-14 デジタル方式の記録装置市場シェア（2015年）



出典：MarketsandMarkets
DIGITAL RADIO FREQUENCY MEMORY MARKET – GLOBAL FORECAST TO 2022

Othersの企業を、次頁以降の表7-11-1及び表7-11-2に示す。10社を超える企業が軍事用途を中心に「デジタル方式の記録装置」について製造、販売していることが分かる。民生用途では、グローバルポジショニング（GNSS /GPS）、マイクロ波、レーダー等の電磁波のテストやスペクトルモニタリング等の用途で電波受信、送信する機器の開発、テストで使用されている。

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（11）デジタル方式の記録装置

③市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

表7-11-1　デジタル方式の記録装置　Othersの企業概要

	企業	会社概要	採用実績
1	Pentek（米国）	Pentekは、データ取得、デジタル信号処理、およびソフトウェア無線アプリケーションにおける最も要求の厳しい要件に対応する最先端のシステムレベルおよびボードレベルのソリューションを組み込みコミュニティに提供している。	アメリカ国立標準技術研究所 アメリカ航空宇宙局 アメリカ国家安全保障局 ボーイング イスラエル政府国防省
2	Hypres（米国）	HYPRESは、政府および商用アプリケーションに超伝導集積回路及びシステムを開発、商品化していいる。フラッグシップ製品は、超電導デジタルおよびミックスドシグナルICで構成されるAdvanced Digital-RF Receiver（ADR）である。Digital-RFテクノロジーベースを使用して、電磁スペクトル全体にわたるさまざまなアプリケーション向けのセンサーとプロセッサーの開発（R＆D）活動に取り組んでいる。	米国海軍
3	Kratos Defense & Security Solutions（米国）	Kratos Defense＆Security Solutionsは、米国の国家安全保障関連の顧客、同盟国、および営利企業向けに、無人航空機システム、衛星通信、サイバーセキュリティ/戦争、マイクロ波電子機器、ミサイル防衛、超音速システム、トレーニング、および戦闘システムの開発をして提供している。	米国海軍／陸軍／空軍
4	SPACE & DEFENCE TECHNOLOGIES（トルコ）	SDT Space＆Defense Technologiesは、2005年2月以来、防衛、宇宙、航空分野向けの固有のソフトウェア、ハードウェア、統合ソリューションを開発しているトルコの民間企業である。レーダーEW信号処理、画像処理/パターン認識、組み込みソフトウェア/システム、アビオニクスシステム、陸上システム電子ユニット、RF妨害システム、衛星技術、シミュレーションおよびトレーニングシステムに関する技術を有している。	NATO加盟国 トルコ政府
5	Reach Technologies Inc.（カナダ）	ReachTechnologiesは、衛星地上局でのPCMデータ取得と飛行試験に使用されるテレメトリレコーダーなどを開発している。また、潜水艦のテストや演習中にソノブイのテレメトリーを取得するために設計されたレコーダーなどが、造船、輸送、その他多くのアプリケーションで使用されている。	カナダ海軍 米国機密顧客
6	NOVATOR SOLUTIONS（スウェーデン）	Novator Solutionsは、スウェーデンのストックホルムを拠点としており、テストおよび測定システムを開発し、コンサルタントサービスを行っている。	スウェーデン政府
7	Safran Data Systems（フランス）	Safran Data Systemsは、パリ郊外に本社を置く、航空宇宙・防衛・通信分野を主体とするサフラングループ傘下のフランス企業である。 2019年までは旧ゾディアック・データ・システムズ社(Zodiac Data Systems)の名称で活動しており、航空機搭載用機器や衛星通信関連装置の開発・製造に長年の経験と実績を持っている。 航空機搭載用機器分野では、シグナルコンディショナー、データレコーダ、ミッションレコーダーなどを手掛けており、エアバスやボーイングなど多くの実績がある。	フランス空軍 エアバス ボーイング

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（11）デジタル方式の記録装置

③市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（4）

表7-11-2 デジタル方式の記録装置 Othersの企業概要

	企業	会社概要	採用実績
8	Conduant（米国）	Conduant Corporationは、リアルタイムの長時間デジタル録音および再生システムを設計および製造している。大量の高速データが生成される環境（電波天文学、ビデオイメージング、レーダー、電子監視など）では、ConduantのStreamStor®製品はエラーのない記録と再生に優れている。汎用データストレージ製品とは異なり、業界で比類のない、信頼性が高く、保証された、持続的なパフォーマンスを保証している。	軍事用途、民生用途
9	Daqscribe（米国）	Daqscribeは、ハイパフォーマンスコンピュータ（HPC）およびフルレートイーサネットパケットキャプチャ、記録、および再生ソリューションのプロバイダーである。Daqscribeのレコーダーは、データ、圧縮、またはフィルタリングを失うことなく、パケットを100%キャプチャすることができる。Daqscribeの高速ネットワークレコーダは、防衛から自動車産業、航空宇宙から大気科学の研究、LTEから5Gまで、高い信頼性を得られている。	アメリカ航空宇宙局 ボーイング
10	Chroma ATE(台湾)	Chromaは、商業、自動車、軍事、政府業界向けの完全な電子テストおよび測定ソリューションの世界有数のメーカーである。自動処理および製造実行システム（MES）の専門知識を活用して、半導体、オプトエレクトロニクス、太陽電池/モジュール、バッテリー形成、テストおよびグレーディング生産ソリューションなどのテクノロジー向けの統合された完全自動ターンキー電子テストおよび製造ソリューションを専門としている。	軍事用途、民生用途
11	Bird（米国）	Birdは、75年以上にわたって無線周波数製品の信頼性の業界標準となっている。IQC91000Aは、ワイドバンドRF記録および再生システムで、12ビットの忠実度で1000MHz幅の波形を90分間連続して記録が可能である。	軍事用途、民生用途
12	Per Vices（カナダ）	PerVicesは、複数の業界にワイヤレス通信ソリューション（RFおよびデジタルシステムなど）を提供している。 防衛、民間、航空宇宙、医療、電気通信、低遅延ネットワーク、グローバルポジショニング（GNSS /GPS）、レーダー、テストと測定、スペクトルモニタリング、放送とワイヤレス管理業界等が対象である。	軍事用途、民生用途
13	DynamicSignals LLC（米国）	DynamicSignalsは、FPGAデジタル信号処理デジタイザー、連続信号データ記録装置の開発、製造メーカーである。高度なレーダー、SIGINT、超音波、イメージング、およびその他の高速通信向けのシステムを手頃な価格で提供している。	軍事用途、民生用途
14	MDL Technologies（英国）	MDL TechnologiesのADIVIC MP7300 RFレコーダーおよびプレーヤーシステムは、300KHzから3GHzまでの周波数スペクトルをカバーし、小型で軽量な設計でフィールドテストに理想的である。	軍事用途、民生用途
15	Rohde & Schwarz（ドイツ）	Rohde & Schwarzは、高度な技術的専門知識を有し、業界をリードする企業であり、通信、情報、セキュリティー分野を専門としている。政府機関を対象に各種電子機器の開発、製造、販売にあたっている。無線通信/RFテストおよび測定、放送／メディア、航空交通管制／軍事用無線通信、サイバーセキュリティー／ネットワークテクノロジーといったすべての事業分野において、テクノロジーとマーケットの両面でリーダーの役割を果たしている。	ドイツ政府機関 各国政府機関

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（12）
信号発生器

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令7項（12）信号発生器

【信号発生器の種類と特徴】
　信号発生器は、周波数・電力・変調などの一部あるいは全てを制御した電気信号を出力できる電気機器である。電気・電子機器、電気・電子回路、部品、材料の試験をする際に必須の装置であり、被測定対象を動作させるために使用する信号源である。使用する信号は被測定対象を目的通りに動作させる信号とは限らず、歪みのある信号を発生させて被測定対象の応答を観察するといった目的でも使われる。古くから利用されておりさまざまな用途・機能に分かれてきた。現在使われている信号発生器は表7-12-1に示すような種類がある。図7-12-1に製品の例を示す。

表7-12-1　信号発生器の種類と特徴

種類	特徴	主な用途
発振器	変調しない正弦波やパルス波形を一定の周波数で連続して発生する。安価。	・製造工程での検査 ・学校教育
音響映像用信号発生器	超低歪な低周波を発生することが可能である。	・音響機器、映像機器用信号源
雑音発生器	幅広い周波数成分を持つノイズ波形を発生する。	・雑音指数（Noise Figure）測定 ・音響特性測定
掃引信号発生器	設定した範囲の周波数や振幅を連続して変化させることができる。	・部品、製品の周波数特性評価
標準信号発生器	変調が可能な搬送波を出力できる。	・通信機、放送機器の評価
周波数シンセサイザ	水晶振動子などから供給される基準周波数を基に分周器や位相比較器を用いて所望の周波数の信号を発生する。	・基準周波数信号源
パルス信号発生器	パルス波形を発生できる。	・通信機器、半導体の試験
ファンクションジェネレ	正弦波やパルス波以外に三角波、ランプ波、ノイズ波、任意波形を発生できる。メカトロ機器から電子回路まで幅広い用途で使われている。	・電気機器、電子機器全般の評価
任意波形発生器	クロック信号源の任意の周波数を設定でき、波形メモリに記録された波形データを途切れることなくすべて出力できる。	・電気機器、電子機器全般の評価

図7-12-1　信号発生器の製品例

【据え置き型】



アンリツ社
MG3710E

【携帯型】



キャンドックシステムズ社
CDX-TMS138C

1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令7項（12）信号発生器

【主流であるファンクションジェネレータと任意波形発生器の比較】
　表7-12-1に示した信号発生器のうち、汎用性があり性能の高いもので現在最も一般的なものは、ファンクションジェネレータと任意波形発生器である。ファンクションジェネレータはかつてはアナログ式であったが、現在ではデジタル式のものが主流となっている。ただしファンクションジェネレータは簡易任意波形発生器と呼ばれる場合もあり、また、両者を含めてファンクションジェネレータと呼ばれる場合もある。表7-12-2にデジタル式のファンクション・ジェネレータと任意波形発生機の比較を示す。

表7-12-2　ファンクションジェネレータと任意信号発生器の比較

	ファンクションジェネレータ	任意波形発生器
主な方式	DDS(Direct digital synthesis)方式	AWG(Arbitrary waveform generator)方式
クロック周波数	固定	可変
出力波形の再現性	任意波形発生器ほど高くはない	高い
	データに対し一部報復・欠損が生じるケースもある	データを忠実に再現する
主な用途	低周波数での電子テスト用途	厳密な波形制御が求められる電子テスト用途
価格	低価格	高価格

1.対象品目の概要調査（3）

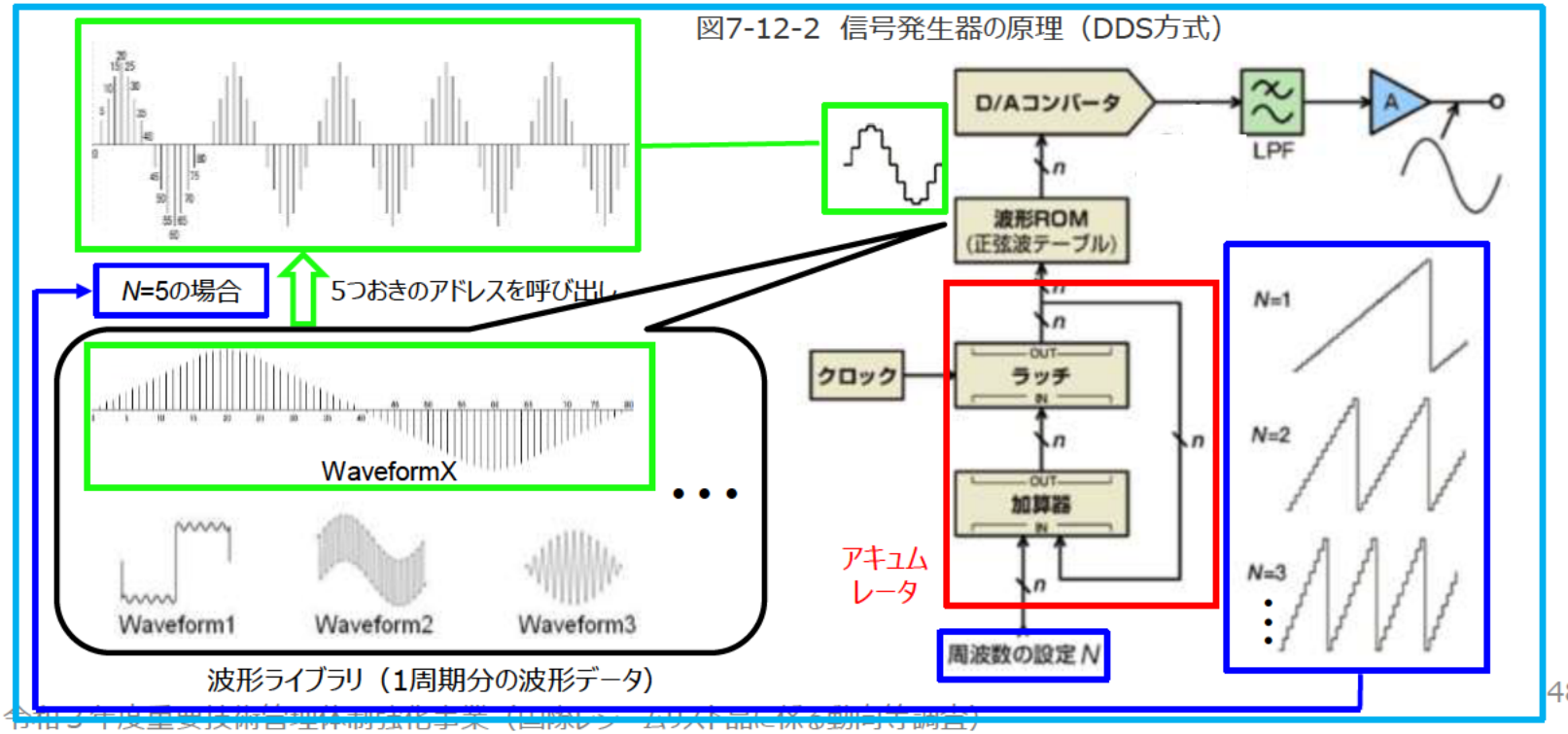
○輸出令7項（12）信号発生器

【ファンクションジェネレータの概要】

ファンクションジェネレータの原理について代表的なDDS方式につき図7-12-2に従って説明する。波形ROMには正弦波、方形波、三角波などさまざまな信号が1周期分、それぞれ先頭から最後までアドレスを付けて予め保存されている（波形ライブラリ）。アキュムレータ（赤枠内）は設定周波数Nに比例した速度で増大するデジタルデータを出力する。このデジタルデータに基づき波形ライブラリの信号を呼び出す。例えばN=5の場合、選んだ波形ライブラリの信号（図ではWaveformX）は5アドレス毎に呼び出される。クロック周波数すなわち波形ライブラリの信号の信号間隔と呼び出した信号の信号間隔は固定なので、5アドレス毎に呼び出した結果の信号周波数はWaveformXの信号周波数の5倍になる。この信号がD/Aコンバーターでアナログ信号に変換されてファンクションジェネレータの出力信号となる。出力波形の品質は、主に波形ROMのアドレスビット数（周期方向の細かさ）と波形ROMのデータビット数（振幅方向の細かさ）で決まる。

アキュムレータのデータを生成するクロックの周波数が固定であるため、波形ROM中から読み出したい信号のデータの大きさ（周期方向の細かさ）と出力したい信号の周波数の積がクロック周波数より大きい場合には、波形ROMから読み出される信号の一部が間引かれ、設定した信号を正確に再現することができない。

図7-12-2　信号発生器の原理（DDS方式）



1.対象品目の概要調査（4）

○輸出令7項（12）信号発生器

【任意波形発生器の概要】
図7-12-2で示したファンクションジェネレータでは、クロック周波数が固定であるため、設定通りの信号が出力されないなどの欠点がある。また波形ROMの波形データが予め定められた比較的少数の種類に限られているなどの制約があった。これに対し、任意波形発生器ではクロック周波数を変えることができ、マイクロプロセッサによって波形メモリの波形データを都度書き込んで読み出したりできるため、ファンクションジェネレータよりもはるかに自由に出力信号を設定できる。図7-12-3にファンクションジェネレータと任意波形発生機のブロック図の比較を示す。
図7-12-4に任意波形発生器の製品外観を、図7-12-5に任意波形発生器の出力波形のデモの例を示す。

図7-12-3　信号発生器のブロック図の例

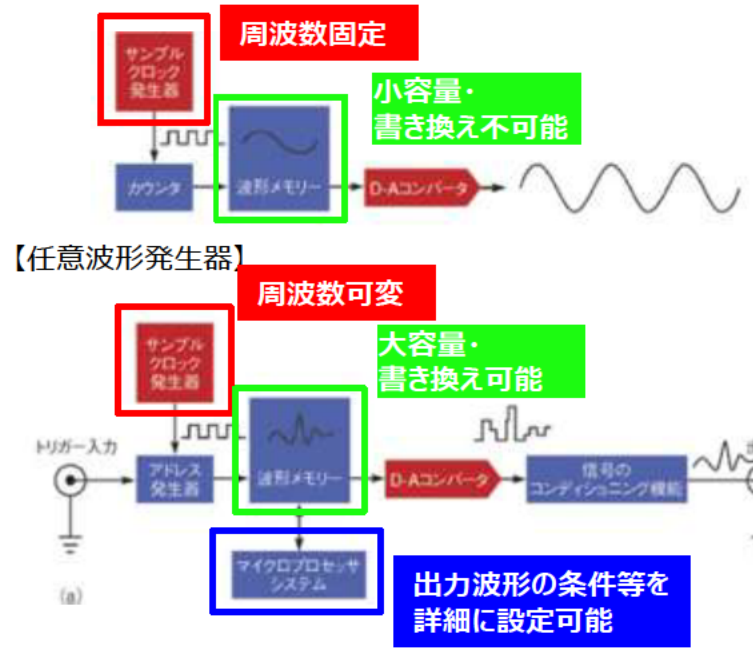


図7-12-4　任意波形発生器の製品の例（OWON社）



図7-12-5　任意波形発生器の出力波形デモの例



1.対象品目の概要調査（5）

○輸出令7項（12）信号発生器

以下、輸出規制における信号発生器の性能パラメータを理解する上で重要な用語について細部を説明する。

【パルス変調信号、オン・オフ比】
信号発生器の出力する信号のうち、パルス変調信号は図7-12-6のように分類できる。
パルスの幅および立上り、立下り時間、オン・オフ比は図7-12-7に示すとおりである。

図7-12-6　パルス変調信号の種類

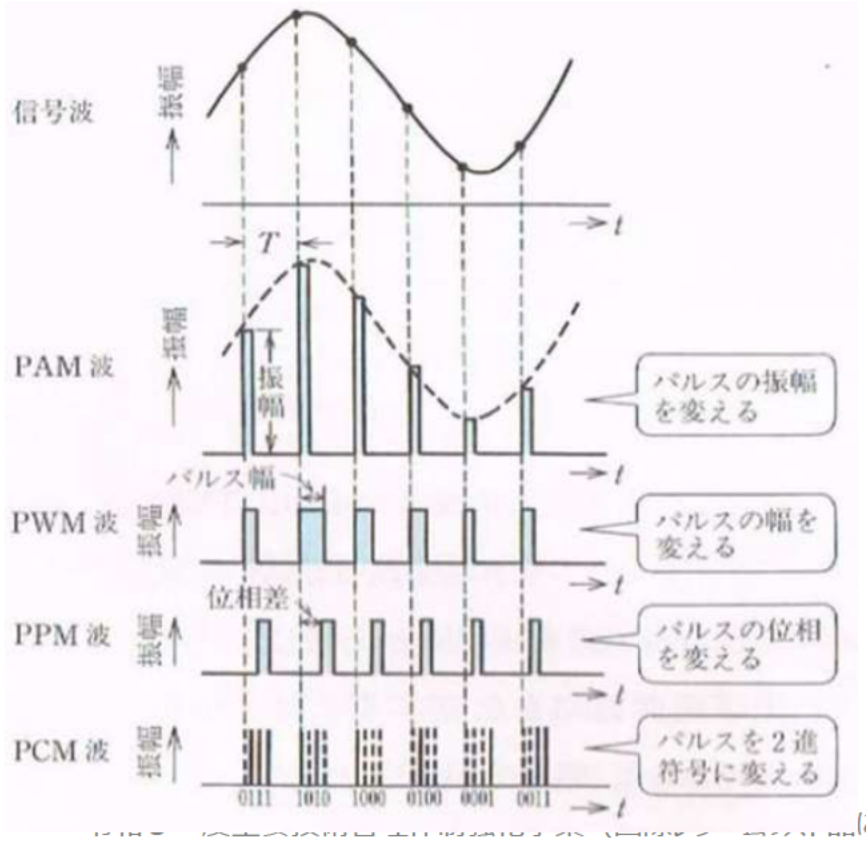
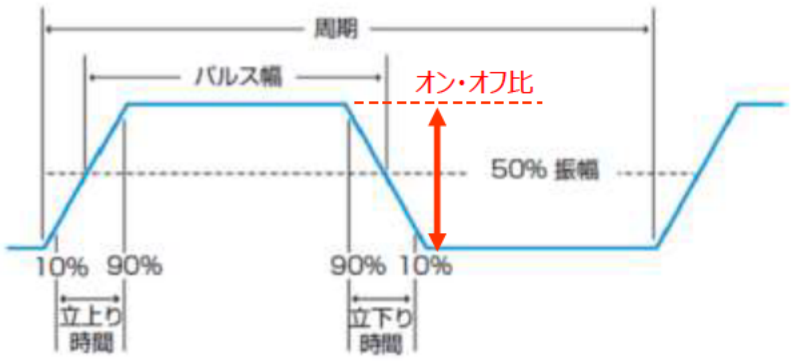


図7-12-7　パルス形状の評価



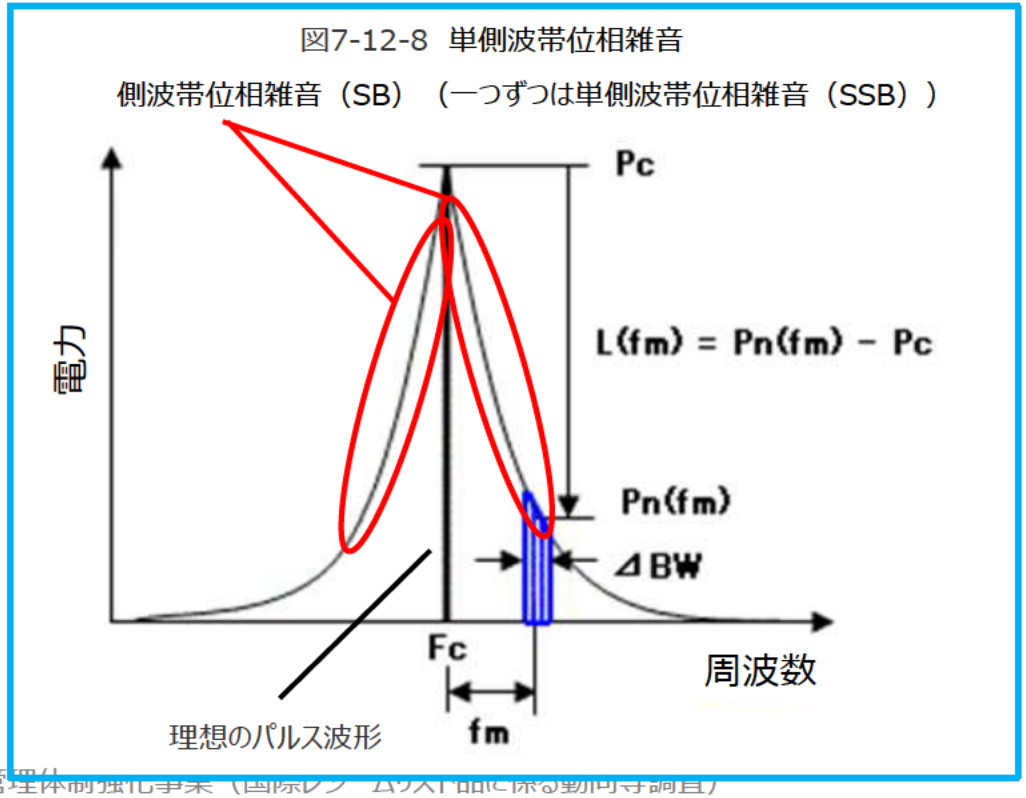
PAM：パルス振幅変調（Pulse-amplitude modulation）
PWM：パルス幅変調（Pulse-width modulation）
PPM：パルス位相変調（Pulse-phase modulation）
　　または
　　パルス位置変調（Pulse-position modulation）
PCM：パルス符号変調（Pulse-code modulation）

1.対象品目の概要調査（6）

○輸出令7項（12）信号発生器

【単側波帯位相雑音】
一般に、信号発生器は雑音源のランダムな信号により位相の変調を受けて、本来発振すべき中心周波数の近傍に裾状の周波数成分も出力する。これを側波帯（SB：Side Band）位相雑音という。この雑音の大きさを評価するために単側波帯（SSB：Single Side Band）位相雑音の値が用いられる。
SSBは7-12-8に示すように、側波帯の一方の中心周波数からfm離れた位置での1Hzあたりの雑音の電力量（dB/Hz）と中心周波数の1Hz帯域幅の電力量（dB/Hz）の比で表される。中心周波数信号（キャリア信号）に対する比であるため、単位はキャリアのcをつけて、dBc/Hzで表される。fmには統一の規格は無く、メーカーなどによって定められる。

図7-12-8　単側波帯位相雑音



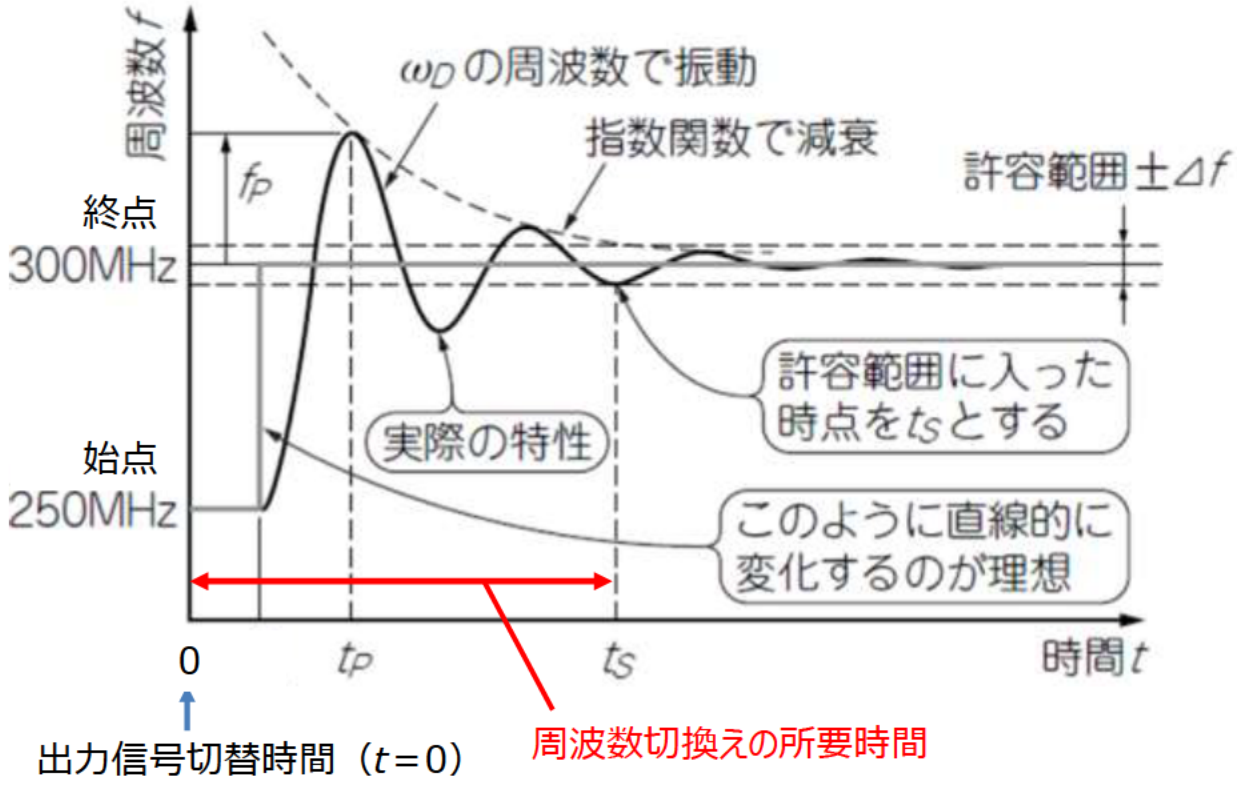
1.対象品目の概要調査（7）

○輸出令7項（12）信号発生器

【周波数切換えの所要時間】

図7-12-9に示すとおり、信号発生器はある周波数（始点）から別の周波数（終点）に切り換える際に一定の時間を要する。出力信号が切り替えられた時点（t=0）から、終点の周波数を中心とした一定の幅の周波数以内（±⊿f）に達するまでの時間（t_s）を周波数切換えの所要時間という。±⊿fについて、貨物等省令第6条第十三号では、終点の±100Hz以内（出力周波数1GHz未満）、又は終点の±0.1ppm以内（出力周波数1GHz以上）を規制値としている。

図7-12-9　周波数切換えの所要時間

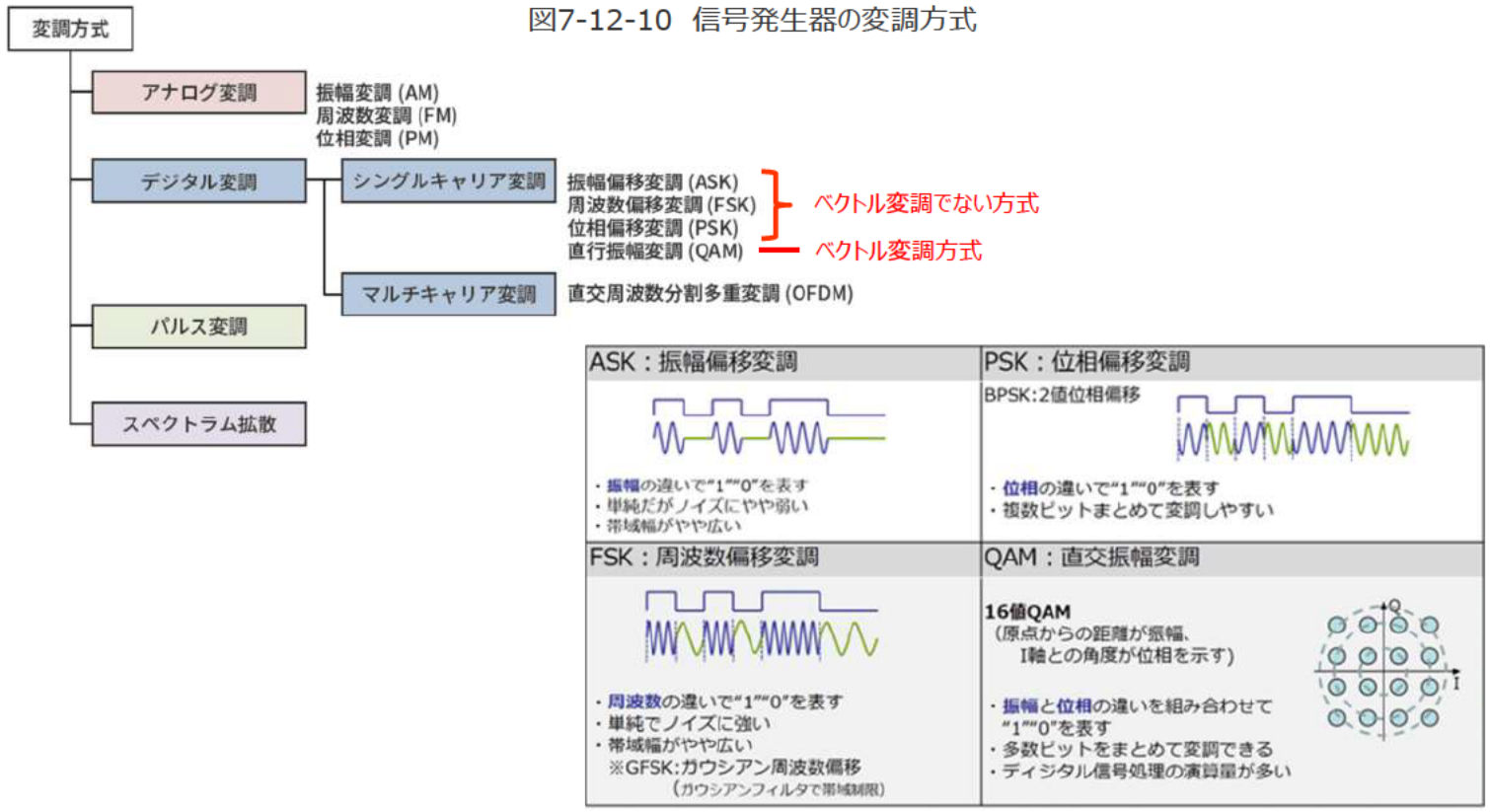


1.対象品目の概要調査（8）

○輸出令7項（12）信号発生器

【ベクトル変調】
信号発生器がデジタルベースバンド信号を変調して所望の出力信号とするためのデジタル変調方式には、図7-12-10に示すような方式がある。
このうちのQAM方式は、PSK方式の位相変調に加え、振幅も同時に変調する方式である。このように位相と振幅のベクトル量を共に変調する方式をベクトル変調方式という。

図7-12-10　信号発生器の変調方式



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（1）

○輸出令7項（12）信号発生器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令や輸出貿易管理令の運用についての解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	貨物等省令 項	貨物等省令 号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(12)	6		十三	十三　信号発生器であって、次のいずれかに該当するもの（２以上の水晶発振器の周波数を加算した値、減算した値又はこれらの値を逓倍した値によって出力周波数を規定する装置を除く。） 信号発生器 任意波形発生器及びファンクションジェネレーターを含む。任意波形発生器又はファンクションジェネレーターの最大出力周波数は、次のいずれかに従って評価する。 イ　カタログ等に最大出力周波数が表記されている場合は当該仕様 ロ　カタログ等に最大出力周波数が表記されていない場合はサンプル毎秒で表したサンプルレートを２．５で除して算出されるもの	

Wassenaar規制番号 3桁	Wassenaar規制番号 細番	Wassenaar規制文言（全文）
3A2	d	d. Signal generators having any of the following: Note 1 For the purpose of 3.A.2.d., signal generators include arbitrary waveform and function generators. Technical Notes 1. The maximum frequency of an arbitrary waveform or function generator is calculated by dividing the sample rate, in samples/second, by a factor of 2.5.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（2）

○輸出令7項（12）信号発生器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令や輸出貿易管理令の運用についての解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では一致している。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(12)	6		十三	イ 31.8ギガヘルツ超37ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、次の（一）及び（二）に該当するパルス変調信号を発振するもの （一）パルス幅が25ナノ秒未満のもの 貨物等省令第6条第十三号イ（一）中のパルス幅 立ち上がりエッジにおける振幅の50パーセントの時点から立下りエッジにおける振幅の５０パーセントの時点までの時間間隔をいう。 （二）オン・オフ比が65デシベル以上のもの ロ 43.5ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、出力100ミリワット（20ディービーエム）を超えるもの	31.8ギガヘルツ超37ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域 パルス幅が25ナノ秒未満 オン・オフ比が65デシベル以上 43.5ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、出力100ミリワット（20ディービーエム）を超える

Wassenaar規制番号 3桁	細番			Wassenaar規制文言（全文）
3A2	d	1		1. Specified to generate pulse-modulated signals having all of the following, anywhere within the frequency range exceeding 31.8 GHz but not exceeding 37 GHz:
			a	a. 'Pulse duration' of less than 25 ns; and Technical Notes 2. For the purposes of 3.A.2.d.1.a., 'pulse duration' is defined as the time interval from the point on the leading edge that is 50% of the pulse amplitude to the point on the trailing edge that is 50 % of the pulse amplitude.
			b	b. On/off ratio equal to or exceeding 65 dB;
		2		2. An output power exceeding 100 mW (20 dBm) anywhere within the frequency range exceeding 43.5 GHz but not exceeding 90 GHz;

比較原文

・経済産業省 安全保障貿易管理
貨物・技術のマトリクス表
（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
PUBLIC DOCUMENTS Volume II
List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（3）

○輸出令7項（12）信号発生器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令や輸出貿易管理令の運用についての解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分では一致している。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(12)	6		十三	ハ　次のいずれかに該当するもの (一) 削除 (二) 4.8ギガヘルツ超31.8ギガヘルツ以下の出力周波数帯域で、2.2ギガヘルツを超えるいずれかの周波数切換えの所要時間が100マイクロ秒未満のもの 周波数切換えの所要時間 デジタルコード化された電気信号により出力周波数を切換えたときに、出力周波数が１ギガヘルツ未満の場合は終点の±１００ヘルツ以内、又は１ギガヘルツ以上の場合は終点の±０．００００１パーセント（±０．１ｐｐｍ）以内に達する時間（例えば遅延時間）をいう。 (三) 削除	4.8ギガヘルツ超31.8ギガヘルツ以下の出力周波数帯域2.2ギガヘルツを超えるいずれかの周波数切換えの所要時間が100マイクロ秒未満

Wassenaar規制番号 3桁	細番		Wassenaar規制文言（全文）
3A2	d	3	3. A "frequency switching time" as specified by any of the following: "Frequency switching time" The time (i.e., delay) taken by a signal when switched from an initial specified output frequency, to arrive at or within any of the following: a. ±100 Hz of a final specified output frequency of less than 1 GHz; or b. ±0.1 part per million of a final specified output frequency equal to or greater than 1 GHz. a. Not used since 2012 b. Less than 100 μs for any frequency change exceeding 2.2 GHz within the frequency range exceeding 4.8 GHz but not exceeding 31.8 GHz; c. Not used since 2014
		a	
		b	
		c	
		d	
		e	

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（4）

○輸出令7項（12）信号発生器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令や輸出貿易管理令の運用についての解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(12)	6		十三	ニ **搬送波に対する**１ヘルツ当たりの単側波帯位相雑音の比が次のいずれかに該当するもの （一）3.2ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下のいずれかの出力周波数帯域で、動作周波数とオフセット周波数の隔たりが10ヘルツ以上10キロヘルツ以下のいずれかの周波数帯域において、次に掲げる式により算定した値未満のもの 20log10（メガヘルツで表した動作周波数）－20log10（ヘルツで表した動作周波数とオフセット周波数の隔たり）－126 （二）3.2ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下のいずれかの出力周波数帯域で、動作周波数とオフセット周波数の隔たりが10キロヘルツ超100キロヘルツ以下のいずれかの周波数帯域において、次に掲げる式により算定した値未満のもの 20log10（メガヘルツで表した動作周波数）－206	搬送波に対する１ヘルツ当たりの単側波帯位相雑音の比が次のいずれか 3.2ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下のいずれかの出力周波数帯域で、動作周波数とオフセット周波数の隔たりが10ヘルツ以上10キロヘルツ以下のいずれかの周波数帯域において、次に掲げる式により算定した値未満 20log10（メガヘルツで表した動作周波数）－ 20log10（ヘルツで表した動作周波数とオフセット周波数の隔たり）－126 3.2ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下のいずれかの出力周波数帯域で、動作周波数とオフセット周波数の隔たりが10キロヘルツ超100キロヘルツ以下のいずれかの周波数帯域において、次に掲げる式により算定した値未満のもの 20log10（メガヘルツで表した動作周波数）－206

Wassenaar規制番号 3桁	細番			Wassenaar規制文言（全文）
3A2	d	4		4. Single sideband (SSB) phase noise, in dBc/Hz, specified as being any of the following:
			a	a. Less (better) than -(126 + 20log10F - 20log10f) anywhere within the range of 10 Hz ≤ F ≤ 10 kHz anywhere within the frequency range exceeding 3.2 GHz but not exceeding 90 GHz; or Technical Note: In 3A002.d.4., F is the offset from the operating frequency in Hz and f is the operating frequency in MHz;
			b	b. Less (better) than -(206- 20log10f) anywhere within the range of 10 kHz< F≤ 100 kHz anywhere within the frequency range exceeding 3.2 GHz but not exceeding 90 GHz; or

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（5）

○輸出令7項（12）信号発生器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	貨物等省令 項	貨物等省令 号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(12)	6		十三	ホ　デジタルベースバンド信号をベクトル変調する機能を有するもので、ベクトル変調帯域幅が次のいずれかに該当するもの ベクトル変調帯域幅 無線周波数信号がデジタルベースバンド信号により変調された際の、無線周波数信号の帯域幅をいい、情報帯域幅ともいう。Ｉ／Ｑ変調を用いたデジタル変調は無線周波数ベクトル変調信号を生成するための技術的な手法であり、その出力信号は一般的にベクトル変調帯域幅を有するものとして仕様化されている。 (一) 4.8ギガヘルツ超31.8ギガヘルツ以下の出力周波数帯域で、2.2ギガヘルツを超えるもの (二) 31.8ギガヘルツ超37ギガヘルツ以下の出力周波数帯域で、550メガヘルツを超えるもの (三) 37ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下の出力周波数帯域で、2.2ギガヘルツを超えるもの ヘ　最大出力周波数が９０ギガヘルツを超えるもの	ベクトル変調帯域幅が次のいずれか 4.8ギガヘルツ超31.8ギガヘルツ以下の出力周波数帯域で、2.2ギガヘルツを超える 31.8ギガヘルツ超37ギガヘルツ以下の出力周波数帯域で、550メガヘルツを超えるもの 37ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下の出力周波数帯域で、2.2ギガヘルツを超える 最大出力周波数が９０ギガヘルツを超える

Wassenaar規制番号 3桁	Wassenaar規制番号 細番	Wassenaar規制文言（全文）
3A2	d 5	5. An 'RF modulation bandwidth' of digital baseband signals as specified by any of the following:
	a	
	b	Technical Note 'RF modulation bandwidth' is the Radio Frequency (RF) bandwidth occupied by a digitally encoded baseband signal modulated onto an RF signal. It is also referred to as information bandwidth or vector modulation bandwidth. I/Q digital modulation is the technical method for producing a vector-modulated RF output signal, and that output signal is typically specified as having an 'RF modulation bandwidth'.
	c	a. Exceeding 2.2 GHz within the frequency range exceeding 4.8 GHz but not exceeding 31.8 GHz; b. Exceeding 550 MHz within the frequency range exceeding 31.8 GHz but not exceeding 37 GHz; or c. Exceeding 2.2 GHz within the frequency range exceeding 37 GHz but not exceeding 90 GHz; or 6. A maximum frequency exceeding 90 GHz;

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

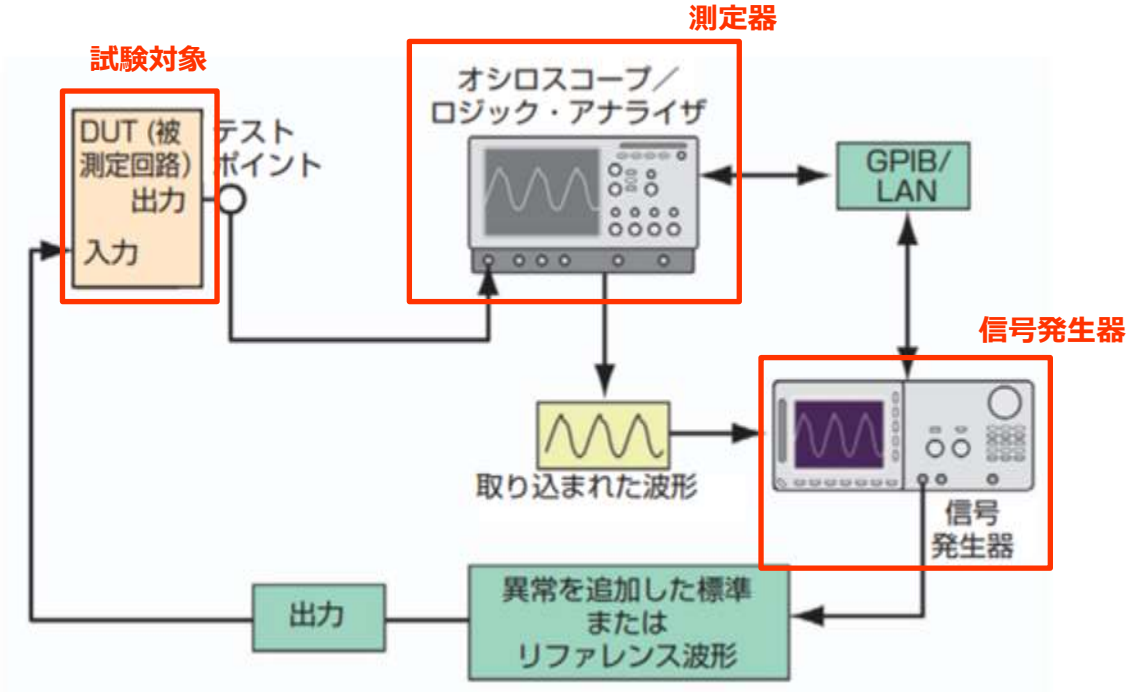
3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（12）信号発生器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（1）

信号発生器は、DUT（被測定回路）に信号を出力する装置である。出力された信号によりDUT自体で動作を確認したり、図7-12-11に示すようにDUTから出力された信号をさらにオシロスコープなどの測定器で測定し、DUTの性能を評価する。

図7-12-11　信号発生器の用途



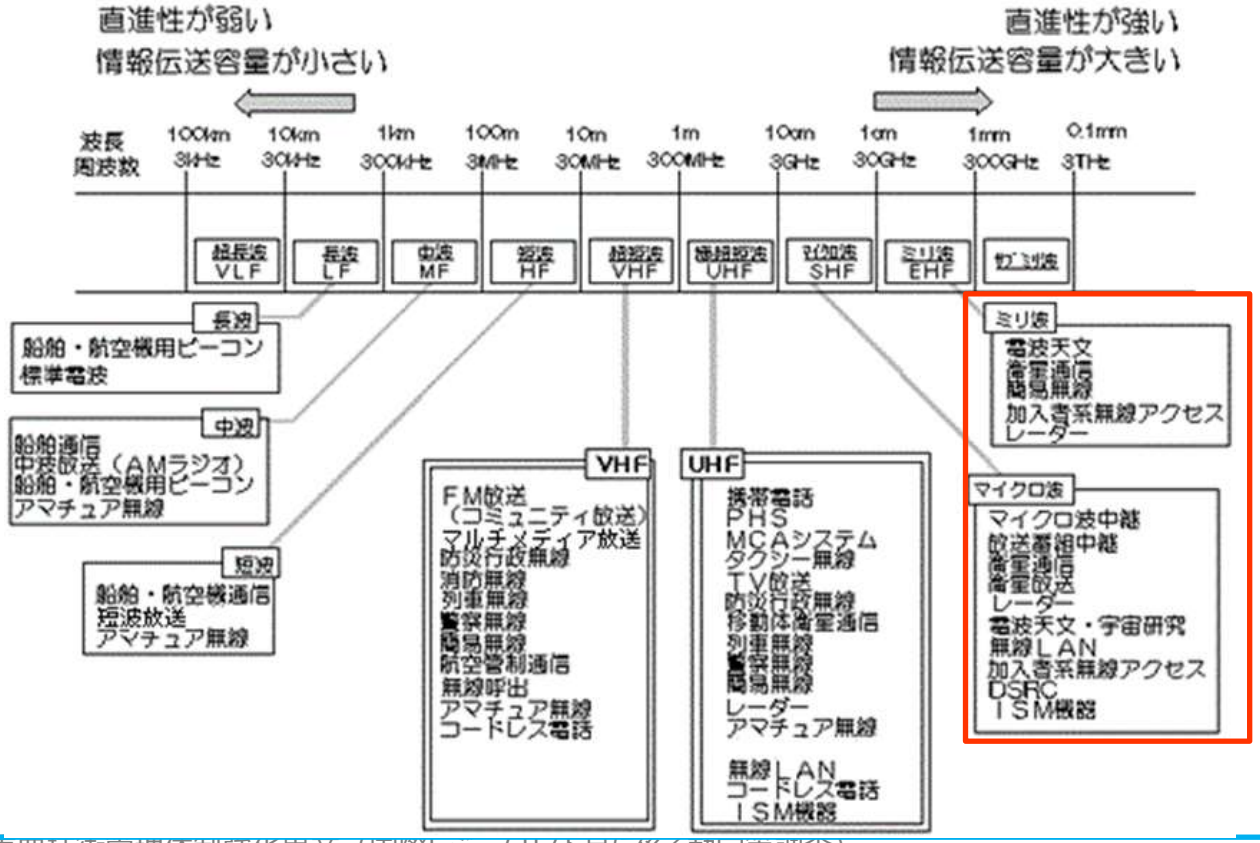
3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（12）信号発生器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（2）

貨物等省令第6条第十三号では3.2GHzを超える周波数帯域での性能を規制している。この周波数帯は、マイクロ波、ミリ波やそれよりも短い波長の電磁波の領域であり、放送・通信やレーダーなどがこの波長帯を利用している（図7-12-12）。

図7-12-12　電波の種類と代表的な用途



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（12）信号発生器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（3）

マイクロ波を中心とした高周波電磁波の利用例を表7-12-3に示す。これらの用途で使われる機器の設計・製造・検査等で信号発生器が使われる。

表7-12-3　高周波電磁波の利用例

分野	原理別の用途例					
	誘電体加熱	プラズマ生成・加熱	通信・放送	センシング・イメージング	電磁エネルギー授受・伝送	電磁波探知
産業	乾燥、加熱、滅菌、防黴、粉末冶金、ゴム加硫、セラミックス焼結	プラズマエッチング、プラズマアッシング、人工ダイヤ生成				
通信・放送			衛星通信、地上波放送、衛星放送、見通し通信、モバイル端末通信			
交通		ロケット推進（イオンエンジン）		航空レーダー、船舶レーダー、自動車レーダー、気象レーダー、速度取締用レーダー、自動ドアセンサー、スピードガン	ロケット推進（EMドライブ、ビーミング推進）	
医療	医療器具滅菌、電気メス、電子線治療			心拍・呼吸・離床センサー、乳がん検出		
エネルギー		核融合炉用プラズマ			無線給電	
有害物処理	放射線廃棄物減容、アスベスト処理、プラスチック廃棄物の油化・ガス化	フロン分解、ダイオキシン分解				
安全				ボディーチェック		
研究	マイクロ波化学	質量分析器			粒子加速器	地球観測衛星、電波天文

3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令7項（12）信号発生器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（4）

信号発生機を必要とする技術を用いた軍事技術の例を図7-12-13に示す。

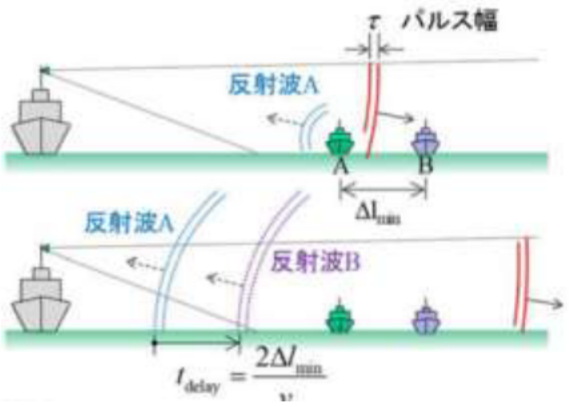
パルスレーダーはパルス波を発信して対象物からの反射波を受信して対象物までの距離や方位を測定する。この時、同じ方向に並んでいる2つの対象物の反射波が重ならない距離がレーダーの距離分解能になるが、これはパルス幅が狭いほど分解能は高くなる。またレーダーの最小探知距離もパルス幅が狭いほど小さくなる。このようにパルス信号の狭さはパルスレーダーの性能に関する重要な要素であるため、パルスレーダーの電子回路の設計や評価には狭いパルス信号を発振できる信号発生器が必要である。

またフェーズドアレイレーダーの中核であるフェーズドアレイアンテナは、多数のアンテナ素子を平面上に複数配列し、各素子の位相を電子的に制御することで、アンテナを機械的に動かすことなく指向性の高いマイクロ波ビームを高速で走査できる。しかし多数の素子から出力される信号の位相や振幅強度の特性のわずかなばらつきが発生すると性能が著しく低下するため、その設計や評価には制度の高い信号発生器が必要とされる。

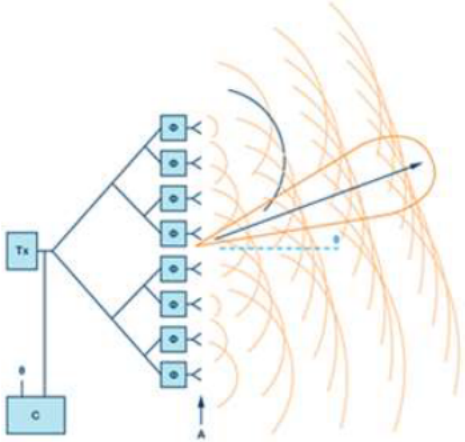
また妨害や傍受に強いとされる通信方式であるスペクトラム拡散方式のうち、直接拡散方式では送信する信号にスペクトル拡散信号と呼ばれる信号を掛け合わせて送信周波数帯域を広げ、受信側は拡散復調用信号により元の送信信号を復元する。このような装置の開発・評価では高精度の信号発生器が必要である。

図7-12-13　高機能の信号発生器を必要とする軍事技術の例

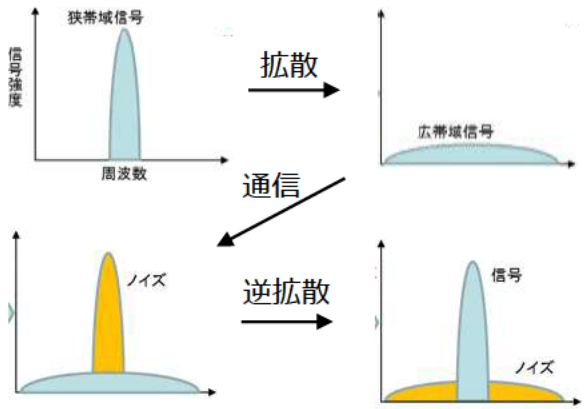
【パルスレーダー】



【フェーズドアレイレーダー】



【直接拡散方式通信の原理】



3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○輸出令7項（12）信号発生器

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

本項には、用途に対する規制は無い。

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（12）信号発生器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（1）

貨物等省令第6条第十三号のイはパルス変調信号を発振可能なもの、ニも単側波帯位相雑音の値を規制していることからパルス信号を発振可能なものを規制対象としており、ホはデジタルベースバンド信号をベクトル変調する機能を有するものを規制対象としているが、ロ、ハ、ヘは種類による規制はしておらず、3.2GHzを超える周波数帯域での性能パラメータのみの規制である。発振器や音響映像用信号発生器は一般に低い周波数信号や純度の低い信号を発生するものであるため、規制対象外と考えられる（表7-12-4）。

表7-12-4　規制対象となり得る信号発生器

種類	特徴
発振器	変調しない正弦波やパルス波形を一定の周波数で連続して発生する。安価なため、生産ラインや学校教育で使われる。
音響映像用信号発生器	超低歪な低周波を発生することが可能である。音響機器や映像機器専用の信号源である。
雑音発生器	幅広い周波数成分を持つノイズ波形を発生する。雑音指数（Noise Figure）測定や音響特性測定などに用いられる。
掃引信号発生器	設定した範囲の周波数や振幅を連続して変化させることができる。部品や製品の周波数特性を測定する場合に使われる。
標準信号発生器	変調が可能な搬送波を出力できる。主に通信機や放送機器を評価するために使われる。
周波数シンセサイザ	水晶振動子などから供給される基準周波数を基に分周器や位相比較器を用いて所望の周波数の信号を発生する。
パルス信号発生器	パルス波形を発生できる。通信機器や半導体の試験などに使われる。
ファンクションジェネレータ	正弦波やパルス波以外に三角波、ランプ波、ノイズ波、任意波形を発生できる。メカトロ機器から電子回路まで幅広い用途で使われてい
任意波形発生器	クロック信号源の任意の周波数を設定でき、波形メモリに記録された波形データを途切れることなくすべて出力できる。

規制対象となり得る

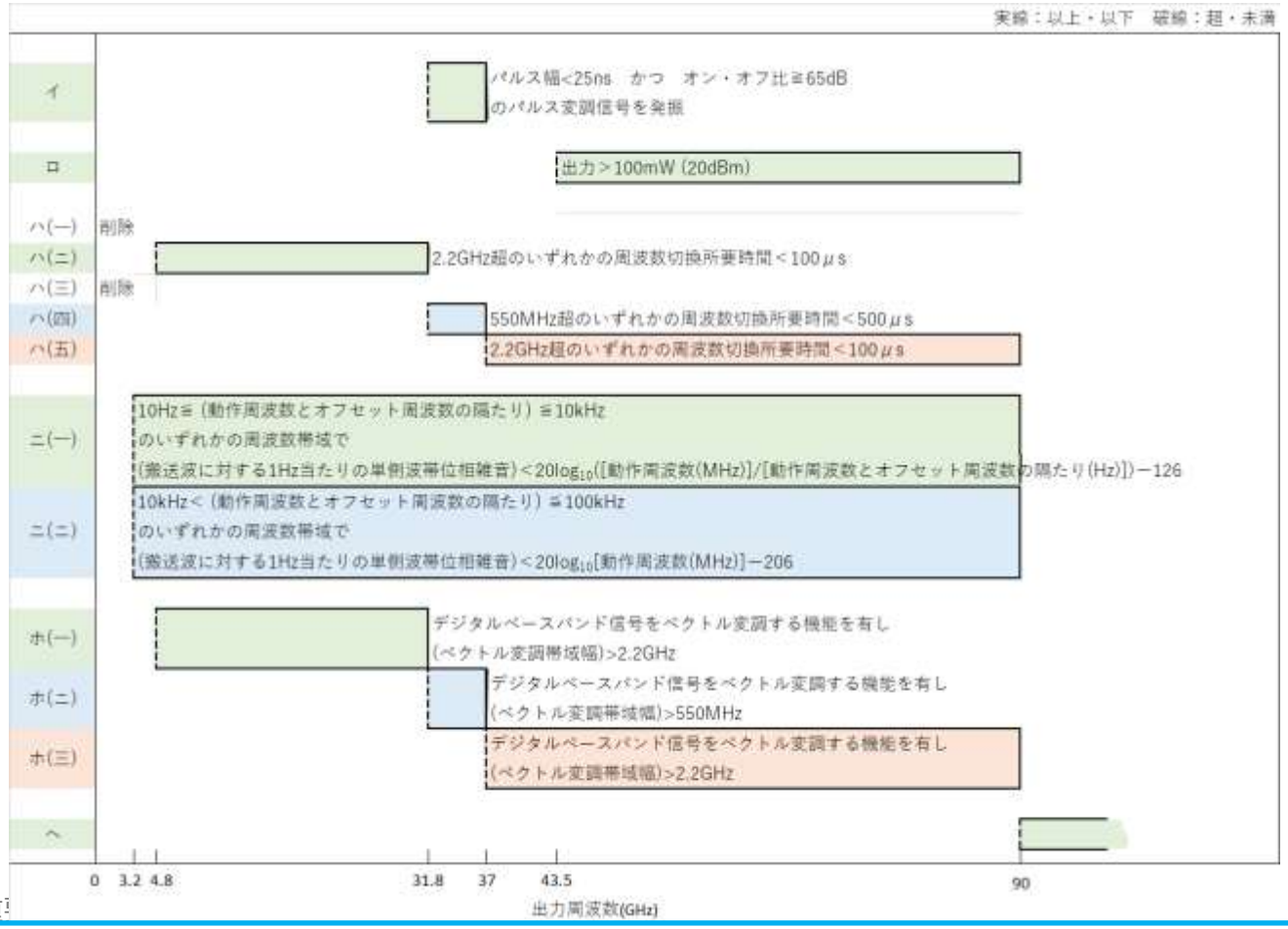
4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（12）信号発生器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（2）

貨物等省令第6条第十三号全体の規制パラメータについて、初めに全体像を示す。出力周波数に応じて図7-12-14のように定められている。次頁以降でイ、ハ～ホの規制パラメータを個別に示す。

図7-12-14　信号発生器の規制パラメータ



4.品目の技術動向調査（3）

規制パラメータ　輸出令第7項(12)
十三　信号発生器であって、次のいずれかに該当するもの（２以上の水晶発振器の周波数を加算した値、減算した値又はこれらの値を逓倍した値によって出力周波数を規定する装置を除く。）
イ　３１．８ギガヘルツ超３７ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、次の（一）及び（二）に該当するパルス変調信号を発振するもの
（一）　パルス幅が２５ナノ秒未満のもの
（二）　オン・オフ比が６５デシベル以上のもの

○輸出令7項（12）信号発生器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（3）

貨物等省令第6条第十三号イの規制範囲を図7-2-15に示す。規制パラメーターのパルス幅とオン・オフ比は図7-12-16に示す値である。

図7-12-15　貨物等省令第6条第十三号イの規制パラメータ

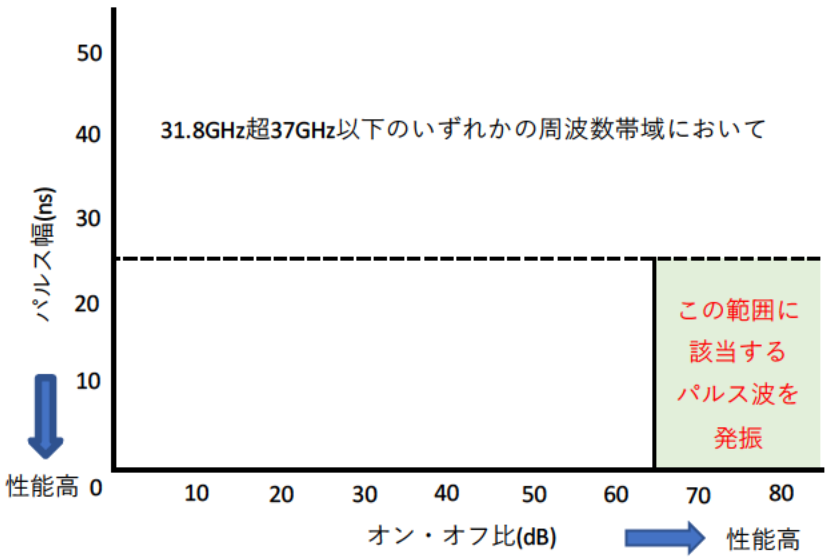
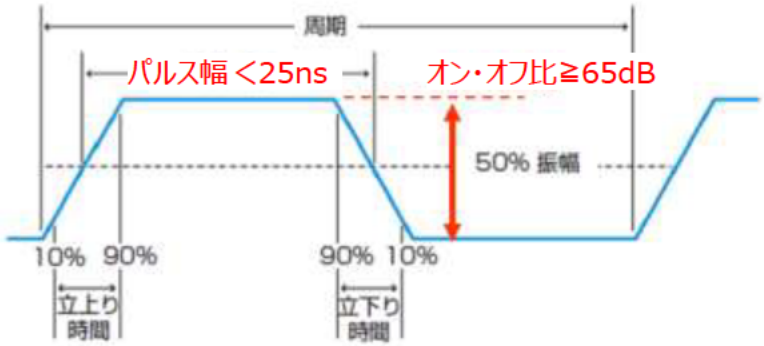


図7-12-16　パルス信号のパルス幅とオン・オフ比



4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（12）信号発生器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（4）

貨物等省令第6条第十三号ハの規制範囲を図7-2-17に示す。周波数切換えの所要時間とは、図7-12-18に示すtsの値である。貨物等省令の運用解釈では出力周波数1GHzを境に所要時間の定義が異なるが、貨物等省令第6条第十三号ハは出力周波数が4.8GHz超であるので所要時間の規制値は図7-12-18に示した値のみとなる。

規制パラメータ　輸出令第7項(12)

十三　信号発生器であって、次のいずれかに該当するもの（２以上の水晶発振器の周波数を加算した値、減算した値又はこれらの値を逓倍した値によって出力周波数を規定する装置を除く。）

ハ　次のいずれかに該当するもの

（一）　削除

（二）　４．８ギガヘルツ超３１．８ギガヘルツ以下の出力周波数帯域で、２．２ギガヘルツを超えるいずれかの周波数切換えの所要時間が１００マイクロ秒未満のもの

（三）　削除

（四）　３１．８ギガヘルツ超３７ギガヘルツ以下の出力周波数帯域で、５５０メガヘルツを超えるいずれかの周波数切換えの所要時間が５００マイクロ秒未満のもの

（五）　３７ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下の出力周波数帯域で、２．２ギガヘルツを超えるいずれかの周波数切換えの所要時間が１００マイクロ秒未満のもの

図7-12-17　周波数切換えの所要時間の値

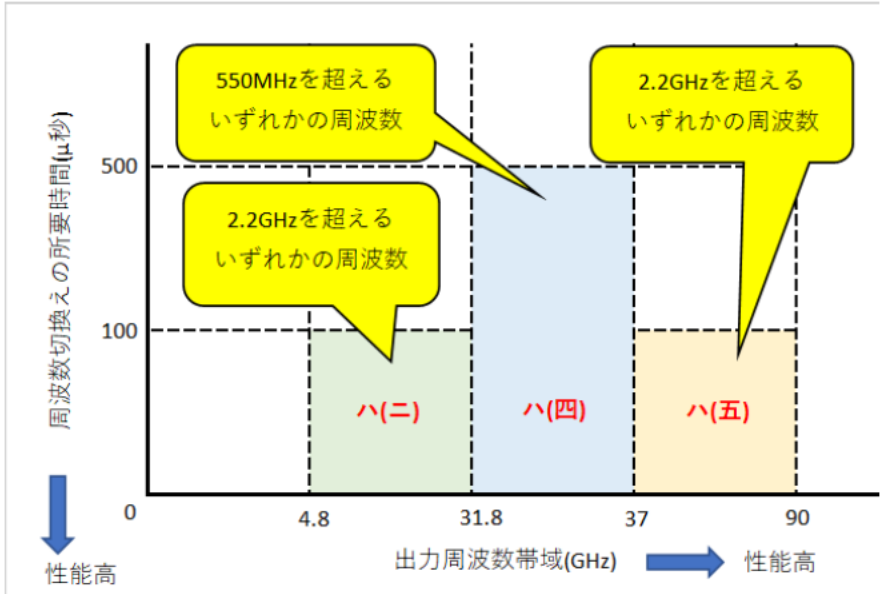
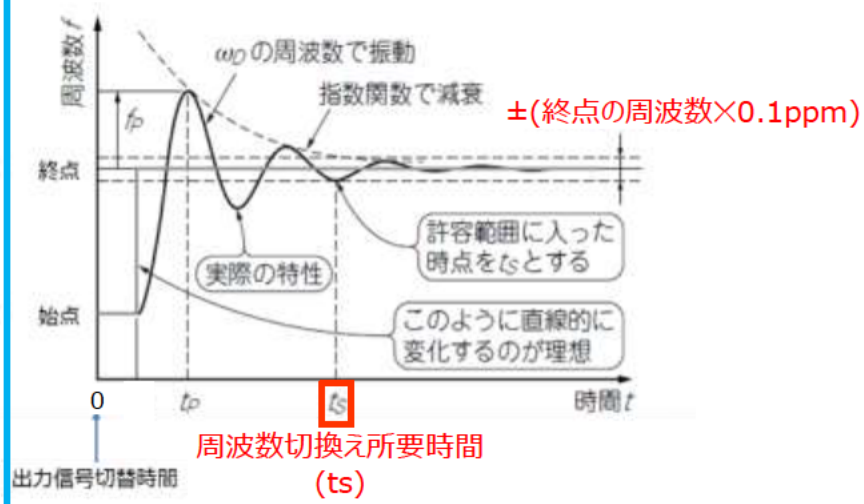


図7-12-18　周波数切換えの所要時間の値



4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令7項（12）信号発生器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（5）

貨物等省令第6条第十三号ニは、3.2GHz超90GHz以下の出力周波数に応じて、動作周波数とオフセット周波数の隔たりに対する単側波帯位相雑音（SSB）の値で規制している（図7-12-19）。信号発生器のSSBは一般にオフセット周波数の低い領域では基準信号発生器の基準信号源の影響が支配的であり、オフセット周波数の高い領域ではローカル発振器の影響が支配的である。その点を考慮して1kHzを境に規制値の算出式が変わっている。

規制パラメータ　輸出令第7項(12)

十三　信号発生器であって、次のいずれかに該当するもの（２以上の水晶発振器の周波数を加算した値、減算した値又はこれらの値を逓倍した値によって出力周波数を規定する装置を除く。）

ニ　搬送波に対する１ヘルツ当たりの単側波帯位相雑音の比が次のいずれかに該当するもの

（一）　３．２ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下のいずれかの出力周波数帯域で、動作周波数とオフセット周波数の隔たりが１０ヘルツ以上１０キロヘルツ以下のいずれかの周波数帯域において、次に掲げる式により算定した値未満のもの

２０log10（メガヘルツで表した動作周波数）－２０log10（ヘルツで表した動作周波数とオフセット周波数の隔たり）－126

（二）　３．２ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下のいずれかの出力周波数帯域で、動作周波数とオフセット周波数の隔たりが１０キロヘルツ超１００キロヘルツ以下のいずれかの周波数帯域において、次に掲げる式により算定した値未満のもの

２０log10（メガヘルツで表した動作周波数）－206

「搬送波に対する1Hz当たりの単側波帯位相雑音」は図7-12-20に示す値である。なお「1Hz当たりの単側波帯位相雑音の比」は、dB単位で表された対数値である搬送波電力と雑音においては両者の差で算出される。搬送波（キャリア波）に対する比であることを示すためにキャリア波を意味するcを付して単位はdBc/Hzとなる。

図7-12-19　貨物等省令第6条第十三号ニの規制範囲

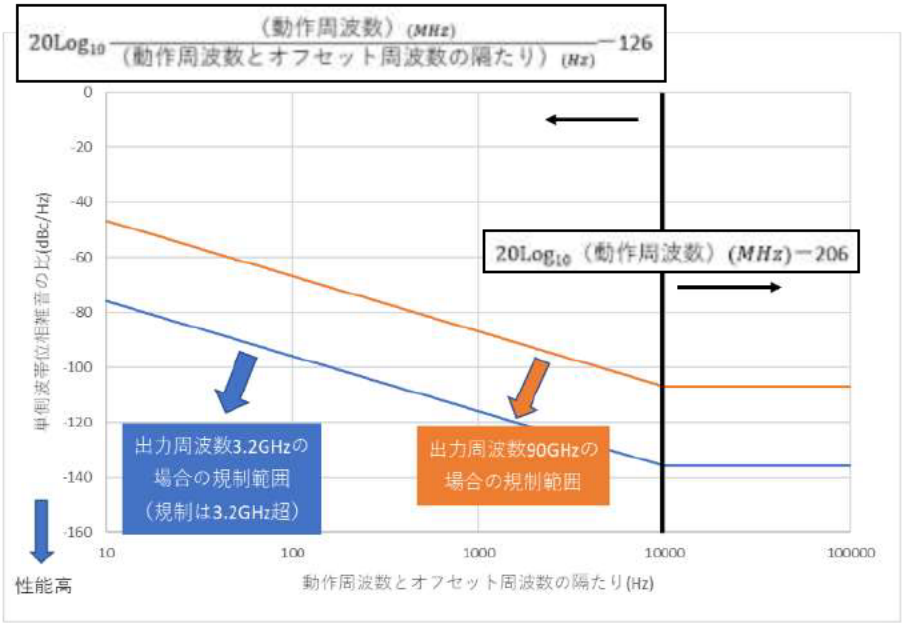
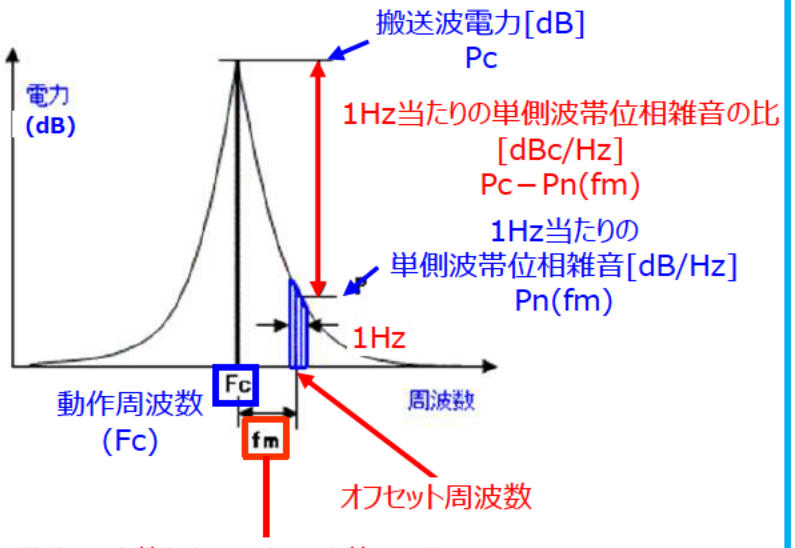


図7-12-20　動作周波数とオフセット周波数の隔たり、搬送波に対する1Hz当たりの単側波帯位相雑音の比



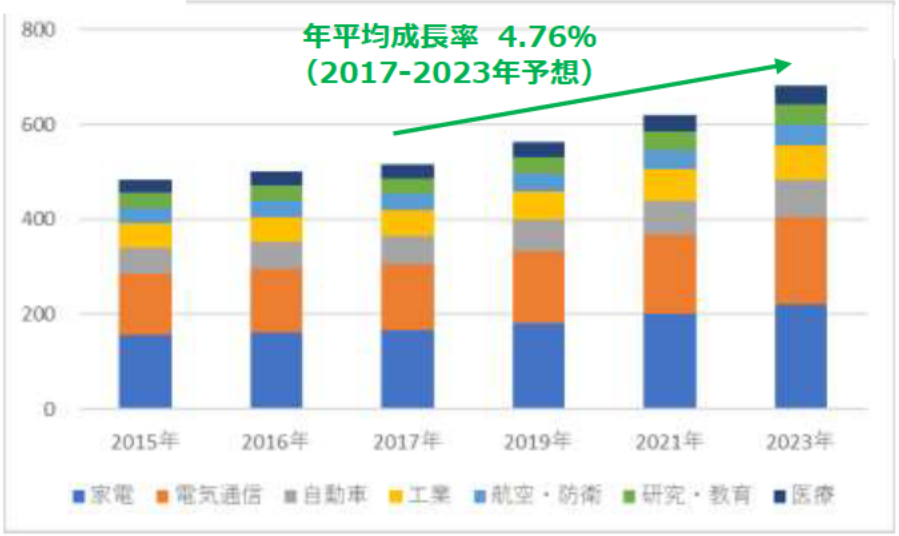
4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（12）信号発生器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（1）

信号発生器の用途別の市場規模を図7-12-21に示す。2015,2016年は実績値、2017年以降は予測値である。家電向けの市場規模が最も大きく、電気通信向けがこれに次ぐ。

図7-12-21　信号発生器の市場規模（用途別）



100万USドル

	2015年	2016年	2017年	2019年	2021年	2023年
家電	155.6	160.7	165.7	181.2	199.8	219.5
電気通信	129.6	133.9	138.2	151.3	167.0	183.6
自動車	55.2	57.2	59.3	65.5	72.9	80.8
工業	51.6	53.2	54.7	59.5	65.2	71.2
航空・防衛	32.8	33.7	34.6	37.4	40.8	44.4
研究・教育	31.8	32.6	33.4	36.0	39.1	42.3
医療	27.5	28.4	29.4	32.3	35.8	39.5
合計	484.1	499.7	515.4	563.2	620.5	681.2

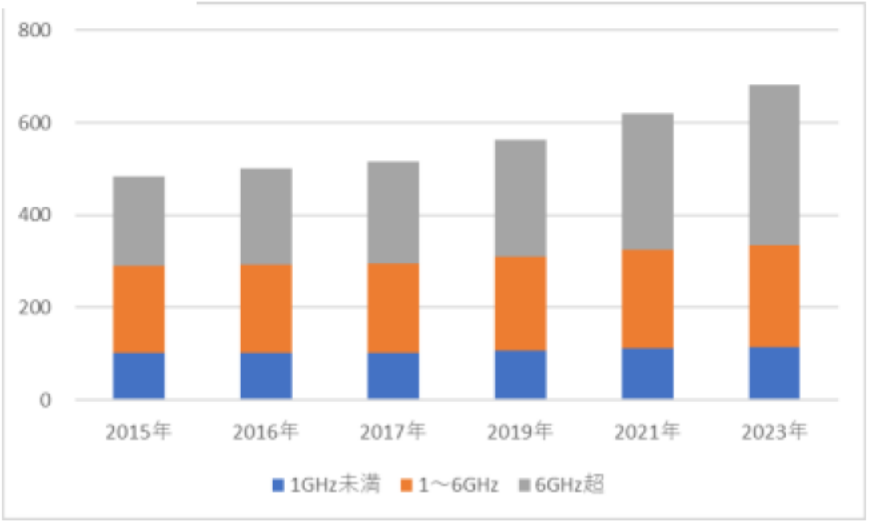
4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令7項（12）信号発生器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

信号発生器の周波数帯別の市場規模を図7-12-22に示す。2015,2016年は実績値、2017年以降は予測値である。6GHzを超える周波数帯向けの製品の割合が最も大きく、伸びも最も大きいために、その占める割合はますます大きくなると予想されている。

図7-12-22　信号発生器の市場規模（周波数帯別）



100万USドル

	2015年	2016年	2017年	2019年	2021年	2023年
1GHz未満	100.9	101.6	101.5	106.5	111.1	113.5
1～6GHz	190.1	192.1	194.1	202.2	212.5	222.4
6GHz超	193.1	206.0	219.8	254.4	296.9	345.2
合計	484.1	499.7	515.4	563.2	620.5	681.2

4.品目の技術動向調査（8）

○輸出令7項（12）信号発生器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

信号発生器の主な製造企業を表に示す。これらの中でも、Keysight Technologies社、National Instruments社、アンリツ社の３社が市場で主要なシェアを占めている。

	企業	会社概要
1	Keysight Technologies Incorporated（アメリカ）	2014年にAgilent Technologies社（アメリカ）から分離して設立された、エレクトロニクスと無線通信分野の製造企業であり、2022年現在14300人以上の従業員を擁する。信号発生器の代表的な企業の1つである。研究開発にも積極的に投資しており、試験・測定分野の企業のAnite社（イギリス）の買収やNTT DOCOMO社（日本）との５G通信システムに関する提携など、積極的な事業展開を行っている。
2	National Instruments Corporation（アメリカ）	1976年に設立され、航空宇宙/防衛/官公庁、半導体、運輸、エレクトロニクスの産業向けに、測定、組み込みシステム、自動化の分野の設計、試作、設置を行っている。信号発生器の代表的な企業の1つである。
3	Tektronix Incorporated（アメリカ）	1946年に創立され、2007年にDanahar Corporation（アメリカ）に買収され同社の子会社となった後、2016年にDanaher社から分社したFortive社の傘下に入った。2022年現在世界21か国に拠点を構え、健康・医療、通信、モビリティ、宇宙の分野向けに信号発生器、オシロスコープ、スペクトラムアナライザなどの測定・試験機器の製造・販売を行っている。信号発生器の代表的な企業の1つである。
4	Teledyne Technologies Incorporated（アメリカ）	1960年にteledyne Incorporatedとして設立され、1996年から1999年の間、Allegheny Teledyne Incorporatedの傘下にあったが1999年に他の2つの事業体と共に独立してTeledyne Technologiesが発足した。航空宇宙・防衛、工場の自動化、大気および水質環境モニタリング、電子機器の設計・開発、海洋学研究、エネルギー、医用画像、製薬研究などの分野向けの測定、送信、分析機器の製造会社である。具体的な製品には、デジタルイメージングセンサー、可視・赤外線・X線スペクトルのカメラとシステム、海洋および環境アプリケーション向けの監視および制御機器、過酷な環境下の相互接続機器、電子試験および測定機器、航空機情報管理システム、防衛用電子機器、衛星通信サブシステムなどがある。
5	B&K Precision Corporation（アメリカ）	前身のCentral Television Service Companyを経て1951年に設立された。試験・測定機器の設計・製造を行っている企業である。主な製品には、電源とDC電子負荷、信号発生器、コンポーネントテスター、オシロスコープ、スペクトラムアナライザー、マルチメーターなどがある。
6	Keithley Instruments Incorporated（アメリカ）	1946年に設立され、2010年にDanahar Corporation（アメリカ）に買収され、同社の子会社のAegean Acquisition Corporation（アメリカ）と合併した。製品にはデジタルマルチメーター、信号測定器、DC電源、信号発生器などがある。
7	Vaunix Technology Corporation（アメリカ）	2005年に設立され、電気・電子信号の測定・試験などの分野の製造会社である。デジタル減衰器、信号発生器、RFスイッチ、位相シフタ、USBハブなどの製品がある。
8	Rohde & Schwarz GmbH & Company KG（ドイツ）	1933年に設立され、70か国以上に13,000の社員がおり（2022年現在）、売上22億8000万ユーロ（2020/2021会計年度）の企業である。業界、インフラプロバイダー、政府機関の顧客を対象に各種電子資本財の開発、製造、販売にあたっている。無線通信/RFテストおよび測定、放送／メディア、航空交通管制／軍事用無線通信、サイバーセキュリティー／ネットワークテクノロジーといったすべての事業分野において、テクノロジーとマーケットの両面で主要な地位にある。
9	アンリツ株式会社（日本）	1895年に設立され、売上高1059億円（2021年）、従業員数3954名（2021年、連結）、事業内容は電子計測器、食品・医薬品の品質保証システム、環境計測機器、デバイスなどの開発・製造・販売の会社である。電子計測器の製品にはシグナルアナライザ/スペクトラムアナライザ、ネットワークアナライザ、信号発生器などがある。信号発生器の代表的な企業の1つである。
10	リーダー電子株式会社（日本）	1954年に設立され、電気測定機器の製造・販売を行っている。製品分野は、RFレベルメーター、放送、プラズマ/液晶プロジェクター、光ディスク、RF機器（信号発生器、オシロスコープ、ファンクションジェネレータなど）である。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（13）
周波数分析器

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令7項（13）周波数分析器

【周波数分析器についてとその種類】

周波数分析器は、スペクトル分析機、スペクトラムアナライザーなどとも呼ばれ、周波数ごとの電力あるいは電圧を測定する装置である。電気信号や電磁波に含まれる周波数を分析し、縦軸で電力あるいは電圧、横軸で周波数の二次元表示を行う。

スペクトラムアナライザーはアナログ型とデジタル型の2種に分類できるが、現在使われているものはほとんどがデジタル型であるため、ここではデジタル型のスペクトラムアナライザーについて記載する。

デジタル型のスペクトラムアナライザーはさらにヘテロダイン（掃引同期）方式、マルチプル（フィルタバンク）方式、FFT（高速フーリエ変換）方式に分けられる（表7-13-1）。図7-13-1に周波数分析器の製品例を示す。

なお周波数分析器には、対象とする周波数のn倍あるいは１/ｎ倍（nオクターブ、1/nオクターブ）に通過周波数の中心帯域を固定した単数または複数のフィルター（定比幅フィルター、オクターブフィルター、分数オクターブフィルター）を用いて帯域ごとの信号を解析する分析器（オクターブ分析器）がある。オクターブは人間の感じる音の高さとの感覚と対応させやすいため、騒音測定などに用いられることが多い。表7-13-1のマルチフィルタ方式に該当するが、定比幅フィルターのみを用いたものは貨物等省令第6条第十二号の対象外である。

表7-13-1　周波数分析器の種類

	ヘテロダイン方式（掃引同期方式）		マルチフィルタ方式（フィルタバンク方式）		FFT（高速フーリエ変換）方式	
アナログ型	・広帯域の信号が1度の掃引で観測できる ・ダイナミックレンジが広い	・高価な部品が必要 ・測定中に変化する信号の測定には適さない ・測定データの保存・解析ができない	・測定中に変化する信号が測定できる	・高価な部品が必要 ・回路が大規模になる ・測定データの保存・解析ができない		
デジタル型	・広帯域の信号が1度の掃引で観測できる ・ダイナミックレンジが広い ・測定データの保存・解析ができる	・測定中に変化する信号の測定には適さない	・測定中に変化する信号が測定できる ・測定データの保存・解析ができる	・高価な部品が必要 ・回路が大規模になる	・測定中に変化する信号が測定できる ・測定データの保存・解析ができる	・解析周波数範囲が切り出した範囲に限られる

図7-13-1　周波数分析器の製品例



1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令7項（13）周波数分析器

【周波数分析器の使用例】
　高周波用のスペクトラムアナライザーは電気信号の高周波数成分の分布を表示する機器であり、高周波を扱う機器の性能を測定する基本的な機器の一つである。そのため用途は高周波を扱う機器の関係で多岐にわたるスペクトラムアナライザーの使用例を図7-13-2に示す。

図7-13-2　スペクトラムアナライザーの使用例

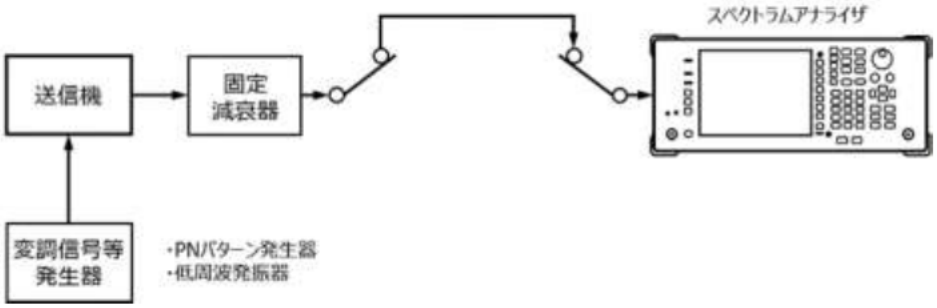
【電波環境の測定】



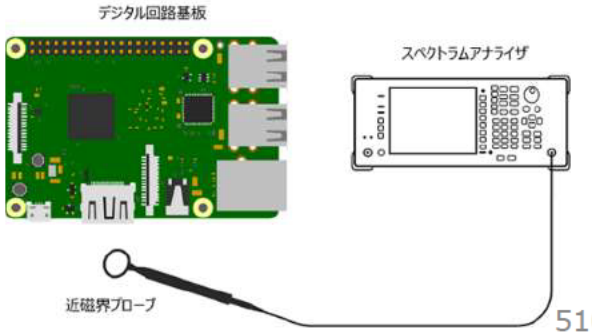
【水晶発振器の性能測定】



【外部から変調信号を入力して送信機の測定】



【デジタル回路基板のノイズ測定】



1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令7項（13）周波数分析器

【スペクトラム・アナライザーの構成（ヘテロダイン方式とFFT方式）】

図7-13-3にヘテロダイン方式とFFT方式のスペクトラムアナライザーのブロック図を示す。IFフィルタの後の構成について、緑枠内のような処理を行うものをヘテロダイン方式、赤枠内のように高速フーリエ変換（FFT)処理を行うものをFFT方式という。

典型的なヘテロダイン方式の動作は以下の通りである。

①測定対象となる入力信号と測定器内のローカルオシレーターで周期的に周波数の変わるローカル信号を合成して中間周波数（IF：Intermediate Frequency）信号を得る。

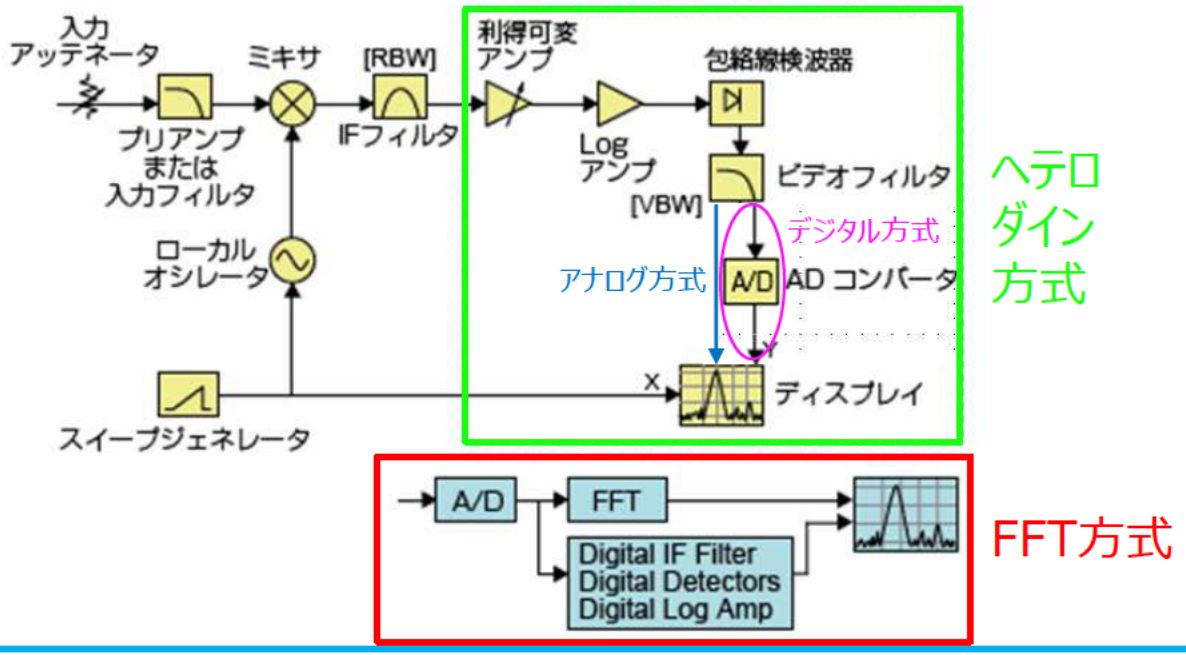
②IF信号を、中心周波数固定の狭い周波数帯のみ通過させるフィルタ（IFフィルタ）に通す。

③表示画面の分解能や見やすさを考慮して測定信号を間引く検波処理後、アナログ方式の場合は横軸の周波数を表すローカルオシレータの信号と組み合わせてディスプレイに2次元表示する。デジタル方式の場合は検波後ADコンバータでデジタル信号への変換を経て、同様にディスプレイ表示する。

なお検波処理の際に入力信号の位相情報は失われる。ヘテロダイン方式ではミキサ以降は特定の中間周波数のみ扱うため、広い周波数範囲の信号を広いダイナミックレンジで測定することができ、またIFフィルタは固定周波数用の高性能のものをつかうことができる。一方IFフィルタを通過するのは一定時間の信号のみのため、単発信号を見落とす可能性がある。

FFT方式の場合は、IFフィルタ通過後の信号をADコンバータでデジタル信号化してFFT処理をすることで入力信号のスペクトルデータが得られる。この場合は検波を行わないため、入力信号の位相情報も得ることができる。

図7-13-3　スペクトラム・アナライザーの構成（ヘテロダイン方式とFFT方式）

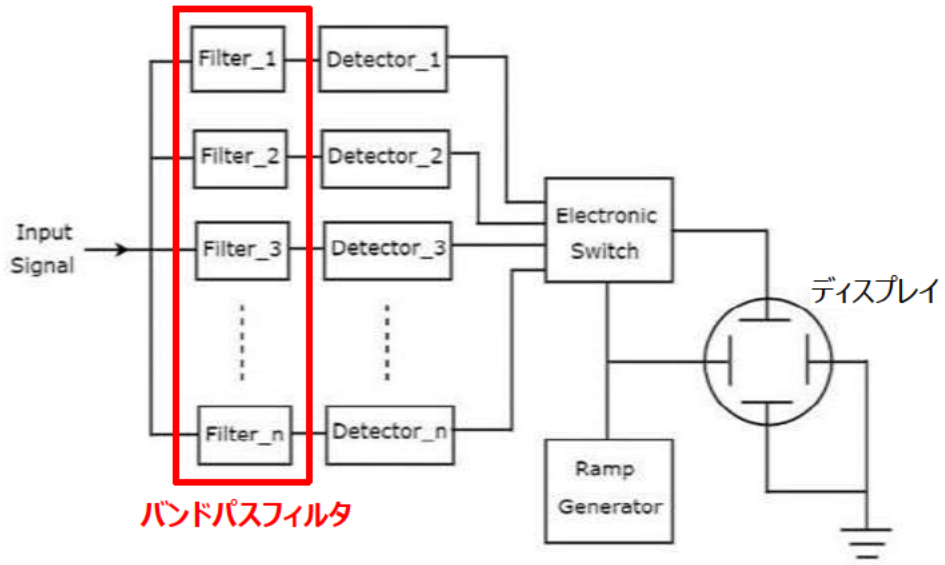


1.対象品目の概要調査（4）

○輸出令7項（13）周波数分析器

【スペクトラム・アナライザーの構成（フィルタバンク方式）】
図7-13-4にバンク方式のスペクトラムアナライザーのブロック図を示す。フィルタバンク方式では、入力信号を複数のバンドパスフィルタに通して周波数帯ごとに分離する。周波数分離された信号（強度：縦軸）はRamp Generatorの掃引信号（時間：横軸）と組み合わされてディスプレイ上に2次元表示される。

図7-13-4 スペクトラム・アナライザーの構成（フィルタバンク方式）



1.対象品目の概要調査（5）

○輸出令7項（13）周波数分析器

【3dB分解能帯域幅、表示平均ノイズレベル】

スペクトラムアナライザーの特性に大きく影響するものの一つがIFフィルタである。IFフィルタの周波数特性の通過中心周波数でのピークレベルから一定の値低下した位置でのバンド幅を分解能帯域幅（RBW：Resolution Band Width）という。図7-13-5は3dB低下した位置の例であり、この場合は3dB分解能帯域幅という。。

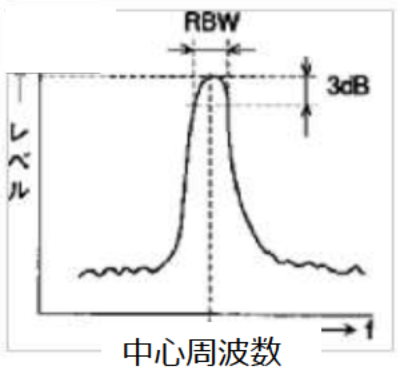
RBWは通常可変である。RBWを狭くすると周波数分解能が向上する（図7-13-6）。またノイズ強度が減るためダイナミックレンジが向上する。その反面、RBWを狭めると応答が遅くなるため掃引速度を緩めなければならず、測定に時間がかかる。そのためRBWは目的に応じて最適な値に設定する必要がある。

【表示平均ノイズレベル（DANL）】

周波数分析器の主な性能の一つに、どこまで微弱な信号を測定できるかがある。微弱な信号の測定の妨げとなるのは周波数分析器自体から発生するノイズである。ディスプレイ上に表示されるノイズの値を表示平均ノイズレベル（DANL：Displayed Average Noise Level）という。

ノイズの大きさには、電気電子回路の自由電子の熱運動により発生する雑音（KTB雑音）による理論的下限値が存在する。このKTB雑音の電力量は式1で計算でき、温度290K（17℃）ではKTB雑音は-174dBm/Hzとなる。実際には各部品などから発生するノイズが加わりさらに大きい値となって最終的にディスプレイ上に表示される。なお雑音の値は帯域幅によって変わるため、1Hzあたりの量（dBm/Hz）が使われる。

図7-13-5　3dB分解能帯域幅(RBW)



式1　KTB雑音の算出式

KTB雑音＝k×T×B[W]

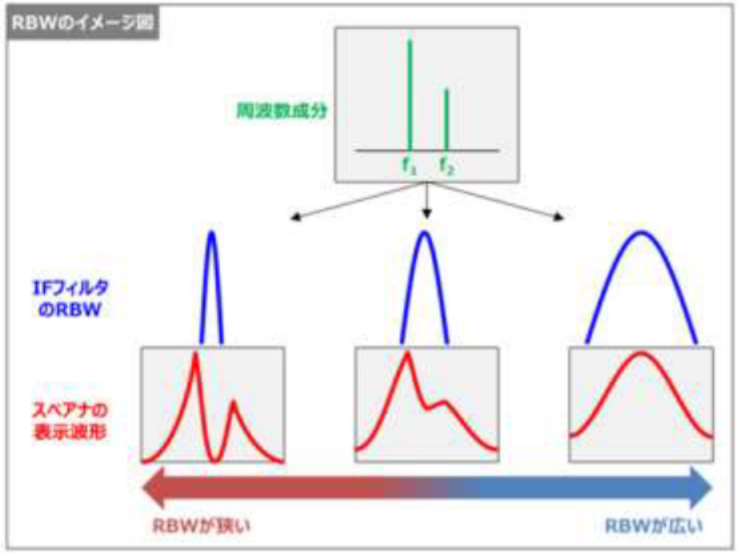
$=10\log_{10}(1000k\times T\times B)$[dBm]

k:ボルツマン定数

T:絶対温度(K)

B:帯域(Hz)

図7-13-6　RBWによる表示波形の変化



1.対象品目の概要調査（6）

○輸出令7項（13）周波数分析器

【高速フーリエ変換（FFT）】
　時間とともに変化するデータ（時間の関数）は全て、sin関数の和で表現できる。フーリエ変換とは、この時間の関数をsin関数の和に変換する処理である。周波数分析器の測定対象である電気信号も時間とともに振幅が変化するデータであるので、フーリエ変換により周波数ごとに振幅変化を表すsin関数に分解することができる（図7-13-7）。
　フーリエ変換は本来、－∞から∞までの連続した時間の関数を対象としたものである。しかし高速フーリエ変換（FFT：Fast Fourier Transform）方式のスペクトラムアナライザーでは連続した入力信号（連続時間信号）を扱う際に、一定時間幅ごとに切り取った信号（離散時間信号）を変換処理してsin関数信号に分解する。切り取った時系列データを時間窓、時間窓の時間幅を時間窓長という（図7-13-8）。FFTも含め、離散信号をsin関数に分解するアルゴリズムを総称して離散フーリエ変換（DFT：Discrete Fourier Transform）といい、厳密にはフーリエ変換とは異なるものである。FFT方式のスペクトラムアナライザーではFFTを経た信号を表示している。連続時間信号である入力信号をFFTで処理する場合、以下の2つの問題が発生する。

図7-13-7　フーリエ変換

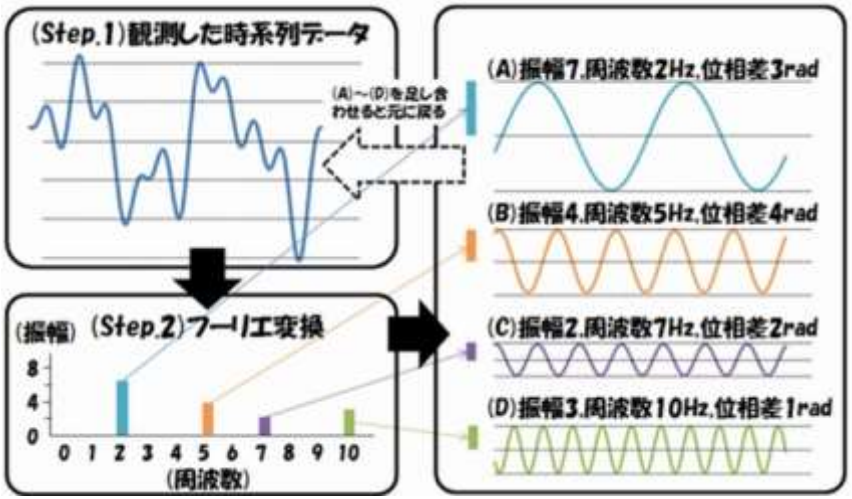
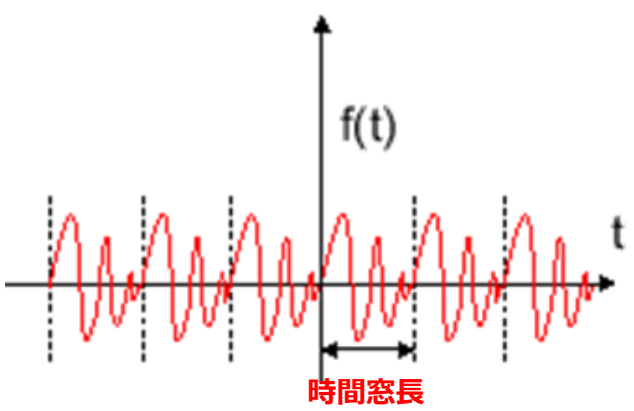


図7-13-8　離散フーリエ変換の時間窓長



1.対象品目の概要調査（7）

○輸出令7項（13）周波数分析器

【高速フーリエ変換（FFT）の問題点：ギャップ、実時間帯域幅】

①入力信号の取りこぼし

高速フーリエ変換（FFT）方式のスペクトラムアナライザーでは離散時間信号の取り込みと離散時間信号の離散フーリエ変換（DFT）処理を行う必要がある。図7-13-9のa)に示すとおり、離散時間信号の取り込み時間幅よりもDFTの時間が長い場合は離散時間信号のギャップ（取りこぼし時間帯）が発生する。またギャップが存在しない場合でも取り込み時間が重なっていない場合は、b)に示した斜線部分のように信号ピークの一部が取り込めず、表示される信号が実際のピークより低くなってしまう場合がある。このような信号の取りこぼしを避けるためにはc)に示すとおり離散時間信号の取り込み時間帯が重なるようにする。スペクトラムアナライザーが入力信号を取りこぼさずに処理できる最短時間を周波数に換算した周波数範囲を実時間帯域幅（Real-Time Bandwidth）という。信号の一部取りこぼしは図7-13-10に示すようにDFT処理後の信号強度の低下につながる。

経済産業省の「輸出貿易管理令の運用について」では実時間帯域幅を、元の信号からの信号強度（振幅）の低下が3dBを超えない最大周波数範囲に限定している。

図7-13-9　DFT処理の際の信号の取りこぼし

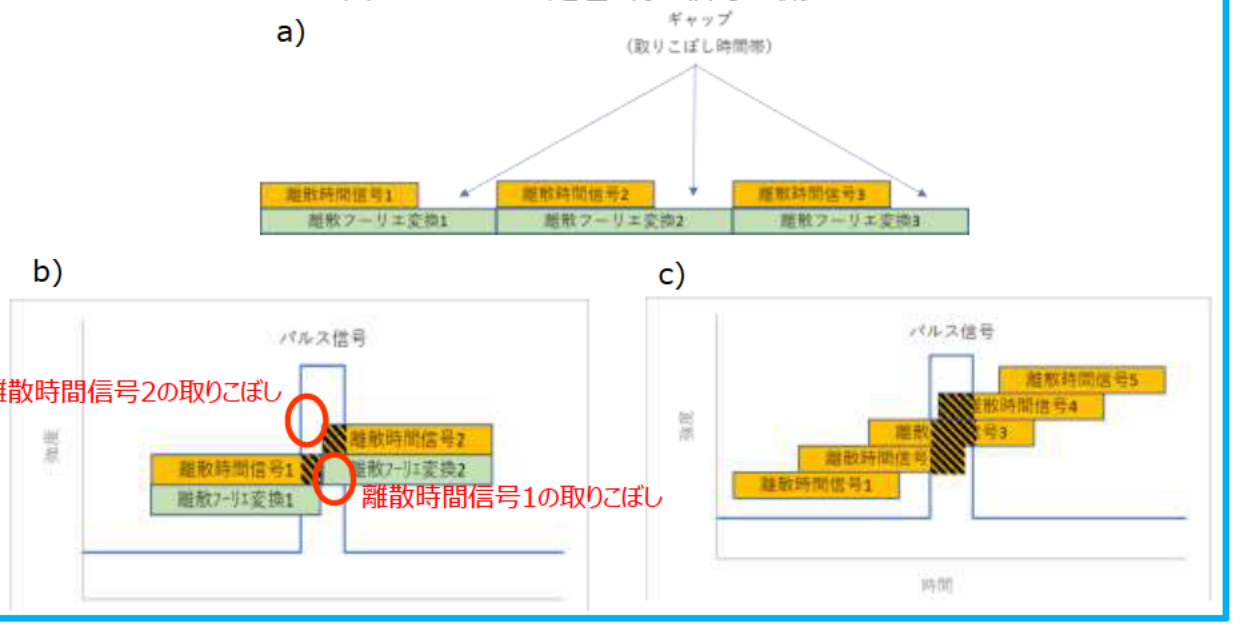
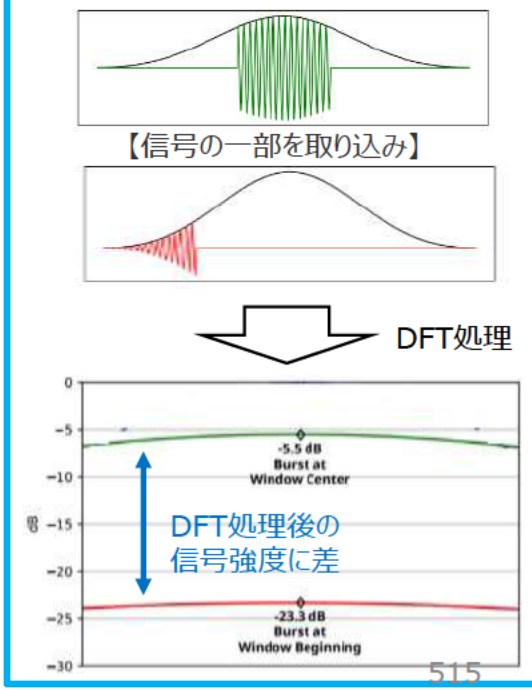


図7-13-10　信号の一部取りこぼしによる観測信号強度の低下の例

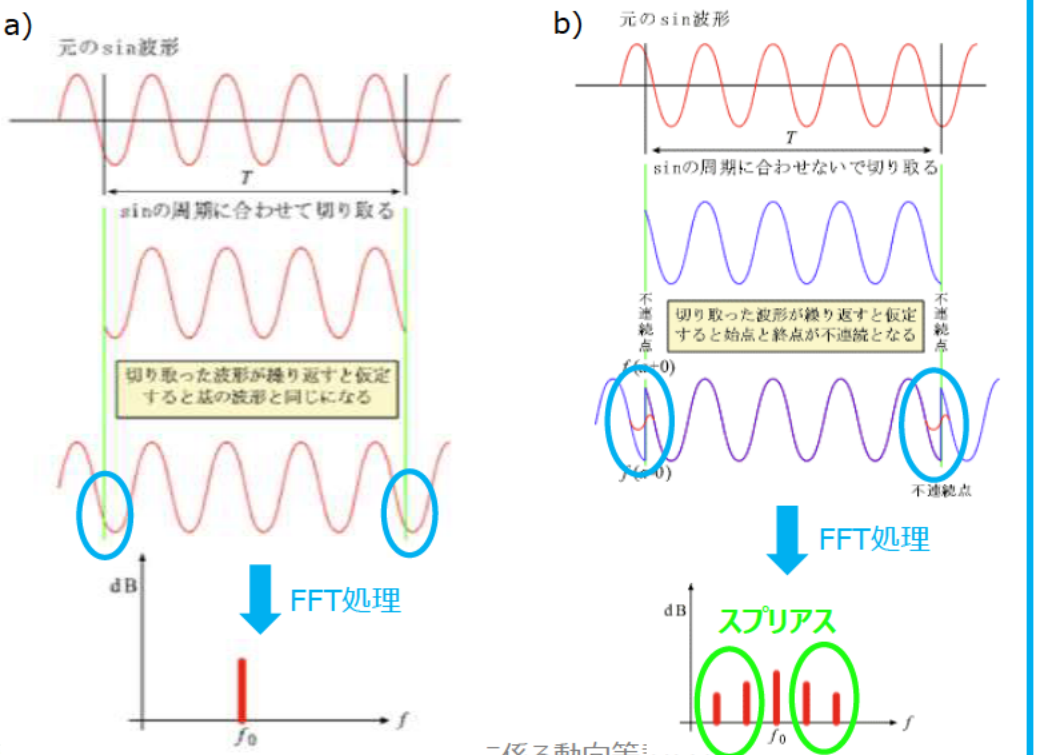


1.対象品目の概要調査（8）

○輸出令7項（13）周波数分析器

【高速フーリエ変換（FFT）の問題点：スプリアス】
②信号の不連続による不要な信号の発生
FFT方式では無限の時間周期的に繰り返されていると見なせる測定対象の入力連続信号を一定の時間幅の分だけ切り取り（これを離散時間信号という）、この切り取った信号が無限の時間、周期的に繰り返しているものと仮定してFFT処理をする。
離散時間信号の信号幅が入力連続信号の周期の整数倍の場合は、離散時間信号をつないだ信号は図7-13-11のa)に示すように、元の信号波形と同じになるが、これは例外的な場合である。ほとんどの場合、b)に示すように離散時間信号の信号幅が入力連続信号の周期の整数倍にならないため、離散時間信号をつないだ信号はつなぎ目で不連続点が発生する。この不連続点はFFT処理によって目的以外の信号が生成する原因となる。ランダムノイズとは異なるこのような不要な信号をスプリアスという。スプリアスはb)に示すように目的のスペクトルの両側になだらかな裾状のサイドローブとして現れる。

図7-13-11　離散時間信号の不連続の影響



1.対象品目の概要調査（9）

○輸出令7項（13）周波数分析器

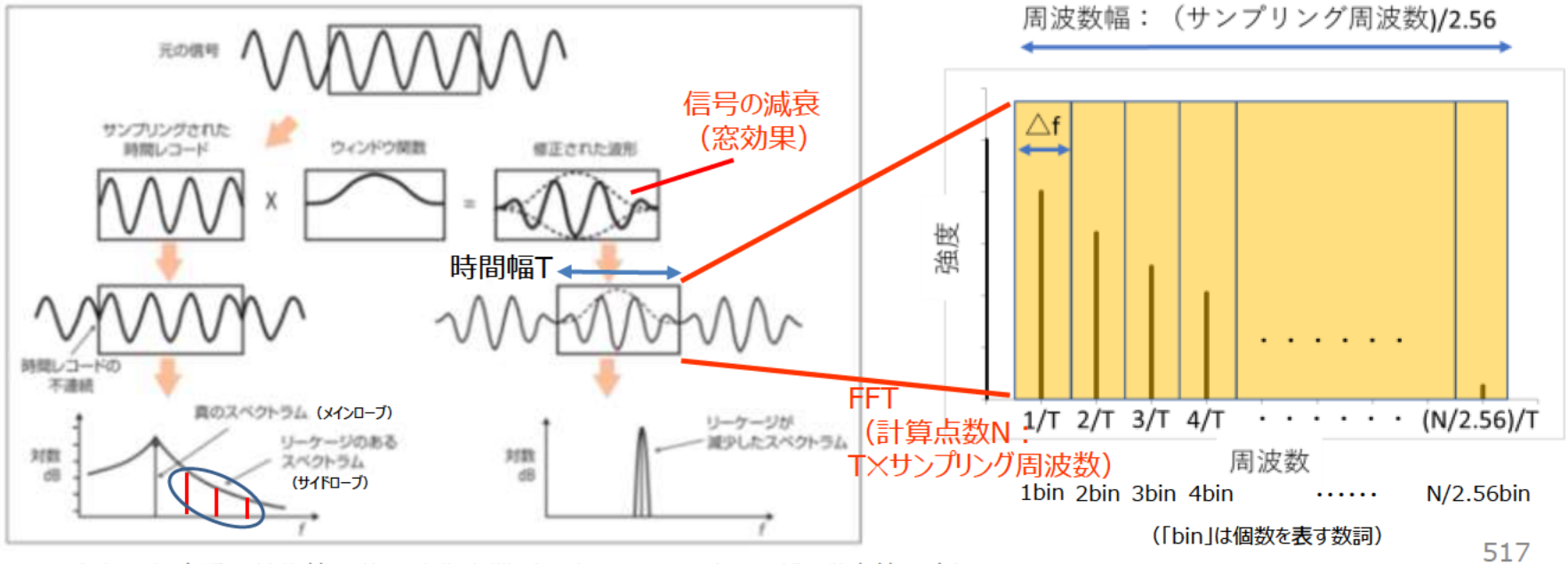
【高速フーリエ変換（FFT）の問題点：窓効果】

スプリアスの原因となる離散時間信号間の不連続点は、先に図7-13-11で示したとおり、離散時間信号の両端を同じ値であれば無くなる。切り取った離散時間信号データを数学的に処理して両端を同じ値にするために使う関数を窓関数（ウィンドウ関数）という（図7-13-12）。窓関数の処理では離散時間信号の一部を数学的処理で減衰させることになるため、信号強度が低下する。これを窓効果という。

先に説明したギャップと窓関数の処理はいずれも信号を減衰させる可能性があるが、このような減衰は扱う信号データの量が増える（入力周波数が高くなる）ほど大きくなる。FFT方式で表示される信号が入力信号から大きくかけ離れたものとならないようにするためには、信号の減衰を一定以下に抑える必要があるため、入力する最大周波数も制約を受ける。

なお時間幅Tの離散時間信号のFFT処理においては、時間幅Tとサンプリング周波数の積の数の計算点数（N）となる。この計算点数Nは後で説明する100%捕捉確率に関係する値である。

図7-13-12　離散時間信号の処理方法

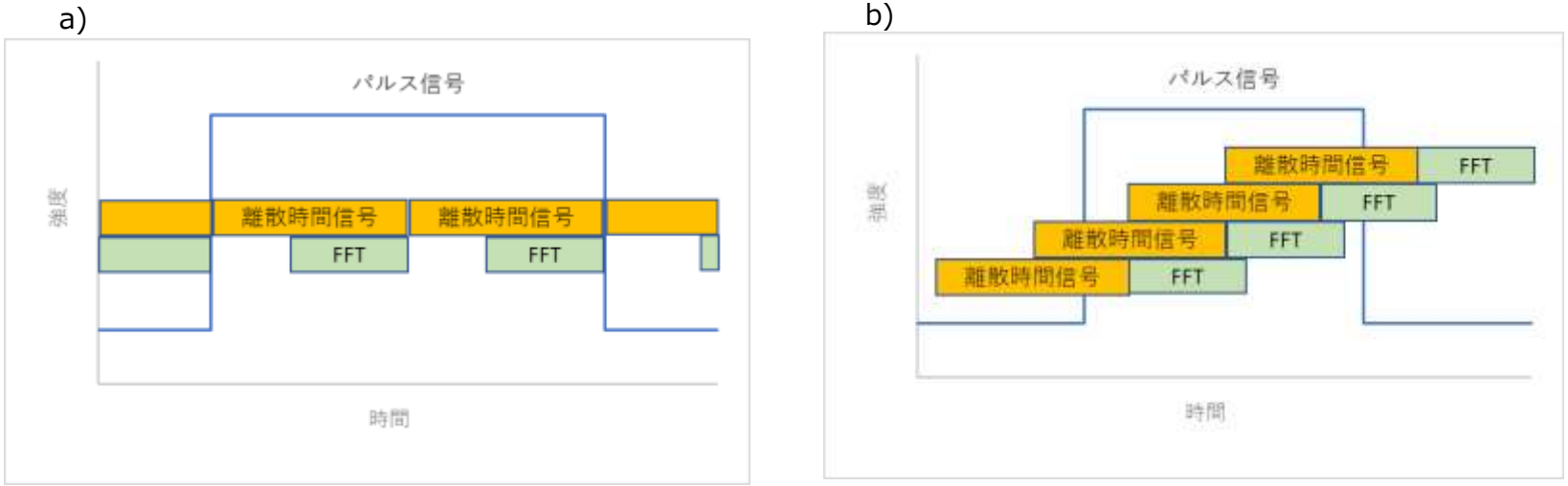


1.対象品目の概要調査（10）

○輸出令7項（13）周波数分析器

【信号を100%の確率で検出する】
FFT方式で信号を確実に捉えられる最小のパルス信号の長さは、離散時間信号が重なりを持たない場合、図7-13-13のa)に示すとおり離散時間信号の2倍の長さ（正確には2倍より1bin短い長さ）のスペクトルである。なおここでいう「信号を確実に捉えられる」とは、1つの時間窓長の全体がパルス信号の時間幅内に入ることをいう。先の図7-13-9で示したような信号の取りこぼしとは異なる概念である。a)に対し、離散時間信号に重なりがある場合は、b)に示すとおり離散時間信号幅の2倍から重なりの時間を引いた長さに相当するスペクトルとなる。このFFT方式で信号を確実に捉えられる最小の信号の長さを100%捕捉確率（POI：Probability of Intercept）といい、式2で計算される。式2のN_{FFT}は、前頁の図7-13-12に示した、FFTの時間幅（時間窓長）とサンプリング周波数で決まる値Nに相当する。

図7-13-13　離散時間信号幅と100%の確率で検出するパルス信号幅の関係



式2　100%捕捉確率の算出式

$$t_{100\%POI} = \left(2 - P_{overlap}\right) \cdot \frac{N_{FFT}}{f_s}$$

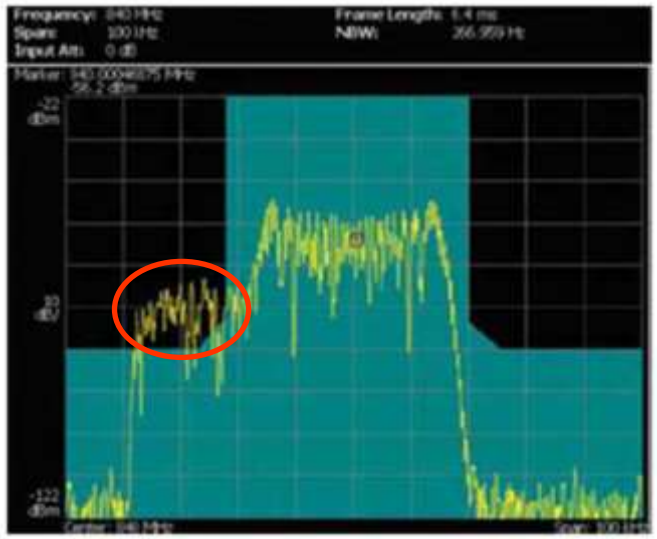
$P_{overlap}$：離散時間信号の重なり（0～1）
N_{FFT}　：離散時間信号のFFT計算点数
fs　　：サンプリング周波数

1.対象品目の概要調査（11）

○輸出令7項（13）周波数分析器

【周波数マスクトリガー機能】
　スペクトラムアナライザーは散発的な異常信号を捉えるための機能として周波数マスクトリガーと呼ばれる機能がある。これは予め設定した周波数帯域や信号強度の範囲の信号が入力した場合、自動的に画面表示を固定する機能である。図7-13-14は、緑色の範囲以外の信号に対して周波数マスクトリガーをかけた結果、緑色の領域から外れた信号（赤丸の中）を検出して画面表示が固定された例である。より短い信号まで捉えられるほど周波数マスクトリガーの性能は優れていることになる。

図7-13-14　マスクトリガーによるスペクトルの捕捉例



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（1）

○輸出令7項（13）周波数分析器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令や輸出貿易管理令の運用についての解釈の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(13)	6		十二	十二　スペクトラムアナライザーであって、次のいずれかに該当するもの スペクトラムアナライザー 多周波数信号の中から単一周波数成分の基本的な特性を測定し、かつ、表示することができる装置をいう。 イ　31.8ギガヘルツ超37ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、３デシベルの分解能帯域幅が40メガヘルツを超えるもの ロ　43.5ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、表示平均ノイズレベルがマイナス150ディービーエム毎ヘルツ未満のもの ハ　90ギガヘルツを超える周波数を分析することができるもの ニ 次の(一)及び(二)に該当するもの (一) 実時間帯域幅が170メガヘルツを超えるもの	31.8ギガヘルツ超37ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、３デシベルの分解能帯域幅が40メガヘルツを超える 43.5ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、表示平均ノイズレベルがマイナス150ディービーエム毎ヘルツ未満 90ギガヘルツを超える周波数を分析することができる 実時間帯域幅が170メガヘルツを超える 15マイクロ秒以下の長さの信号を、ギャップ又は窓効果による全振幅からの減衰が3デシベル未満で,100パーセントの確率で検出する 15マイクロ秒以下の長さの信号を100パーセントの確率で捉える

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A2	c		c. "Signal analysers" as follows: "Signal analysers" Apparatus capable of measuring and displaying basic properties of the single-frequency components of multi-frequency signals.
		1	1. "Signal analysers" having a 3 dB resolution bandwidth (RBW) exceeding 40 MHz anywhere within the frequency range exceeding 31.8 GHz but not exceeding 37 GHz;
		2	2. "Signal analysers" having Displayed Average Noise Level (DANL) less (better) than -150 dBm/Hz anywhere within the frequency range exceeding 43,5 GHz but not
		3	3. "Signal analysers" having a frequency exceeding 90 GHz;
		4	4. "Signal analysers" having all of the following:
		a.	a. Real-time bandwidth exceeding 170 MHz; and

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（2）

○輸出令7項（13）周波数分析器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令や輸出貿易管理令の運用についての解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(13)	6		十二	実時間帯域幅 周波数分析器が変換後のデータを外部に出力又は表示しながら、ギャップ又は窓効果による実振幅からの減衰が３デシベルを超えずに全ての入力信号を処理するフーリエ変換又は他の離散時間変換により、タイムドメインデータの全てを周波数ドメインに連続的に変換することができる最大周波数範囲をいう。 （二）次のいずれかに該当するもの 1 15マイクロ秒以下の長さの信号を、ギャップ又は窓効果による全振幅からの減衰が3デシベル未満で,100パーセントの確率で検出するもの 2 周波数マスクトリガー機能を有するものであって,15マイクロ秒以下の長さの信号を100パーセントの確率で捉えるもの	31.8ギガヘルツ超37ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、３デシベルの分解能帯域幅が40メガヘルツを超える 43.5ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、表示平均ノイズレベルがマイナス150ディービーエム毎ヘルツ未満 90ギガヘルツを超える周波数を分析することができる実時間帯域幅が170メガヘルツを超える 15マイクロ秒以下の長さの信号を、ギャップ又は窓効果による全振幅からの減衰が3デシベル未満で,100パーセントの確率で検出する 15マイクロ秒以下の長さの信号を100パーセントの確率で捉える

Wassenaar規制番号 3桁	細番			Wassenaar規制文言（全文）
3A2	c			Technical Notes 1. 'Real-time bandwidth' is the widest frequency range for which the analyser can continuously transform time-domain data entirely into frequency-domain results, using a Fourier or other discrete time transform that processes every incoming time point, without a reduction of measured amplitude of more than 3 dB below the actual signal amplitude caused by gaps or windowing effects, while outputting or displaying the transformed data. b. Having any of the following: 1. 100% probability of discovery with less than a 3 dB reduction from full amplitude due to gaps or windowing effects of signals having a duration of 15 µs or less; or 1. 100% probability of discovery with less than a 3 dB reduction from full amplitude due to gaps or windowing effects of signals having a duration of 15 µs or less; or 2. A 'frequency mask trigger' function with 100% probability of trigger (capture) for signals having a duration of 15 µs or less;
		b	1	
			2	

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（3）

○輸出令7項（13）周波数分析器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令や輸出貿易管理令の運用についての解釈とWassenaarアレンジメントの内容は本頁部分は一致している。

輸出令	貨物等省令 条	貨物等省令 項	貨物等省令 号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(13)	6		十二	貨物等省令第６条第十二号ニ中の１００パーセントの確率で検出する １００パーセントの確率で検出するための時間は、仕様にあるレベルの測定の不確かさに必要な最小信号持続時間に相当する。 周波数マスクトリガー 設定した周波数帯域幅内でトリガーする周波数帯域の範囲を選択することができ、その範囲以外の信号が当該周波数帯域幅内に存在しても無視する機能をいう。 １つ以上の独立したリミットを含む。 貨物等省令第６条第十二号ニに該当するスペクトラムアナライザー 定比幅フィルター（オクターブフィルター又は分数オクターブフィルターともいう。）のみを用いたものを除く。	

Wassenaar規制番号 3桁	Wassenaar規制番号 細番	Wassenaar規制文言（全文）
3A2	c	Technical Notes 2. Probability of discovery in 3.A.2.c.4.b.1. is also referred to as probability of intercept or probability of capture. Technical Notes 3. For the purposes of 3.A.2.c.4.b.1., the duration for 100% probability of discovery is equivalent to the minimum signal duration necessary for the specified level measurement uncertainty. Technical Notes 4. A 'frequency mask trigger' is a mechanism where the trigger function is able to select a frequency range to be triggered on as a subset of the acquisition bandwidth while ignoring other signals that may also be present within the same acquisition bandwidth. A 'frequency mask trigger' may contain more than one independent set of limits. Note 3.A.2.c.4. does not apply to those "signal analysers" using only constant percentage bandwidth filters (also known as octave or fractional octave filters).

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（13）周波数分析器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（1）

【高周波信号機器の主な用途】

高周波用のスペクトラムアナライザーは電気信号の高周波数成分の分布を表示する機器であり、高周波を扱う機器の性能を測定する基本的な機器の一つである。そのため用途は高周波を扱う機器の関係で多岐にわたる。高周波を扱う用途の例を表7-13-2に、機器の例を図7-13-15に示す。

表7-13-2　スペクトラムアナライザーの用途の例

対象機器	測定対象
放送機器	電波の強さ
携帯端末	雑音・高調波の歪み
無線機器	電波障害（EMI）
通信機器	位相ノイズ
探知機器	変調
	不要な輻射
	不明電波の調査

図7-13-15　高周波信号を扱う機器の例

【放送機器】



【携帯電話】



【無線・通信器】



【電波望遠鏡】



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（13）周波数分析器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（2）

【レーダー】

探知機器であるレーダーは高周波を扱う代表的な機器の一つである。アメリカ合衆国の国家電気通信情報管理庁（NTIA）によると、レーダーは用途に応じて表7-13-3のような周波数帯が使われている。

表7-13-3 レーダーの用途と周波数帯の関係

設置場所	特徴	周波数帯（GHz）	用途	利点
地上	大電力により長距離まで探索でき、大口径により低周波数でも高い角度分解能を実現できる	0.03-3	宇宙監視　早期警戒レーダー	大気による減衰と自然ノイズがほとんど無視できる
		8-12	ミサイル防衛レーダー	大気による減衰が少ない
船舶	さまざまな気象条件、低い仰角で使われる	2.7-10.5	地表探索、低空飛行ターゲットの検出、船舶の操縦	目標からの反射波のうち、地面　水面で反射する成分（マルチパス）で直接反射信号がキャンセルされにくい周波数
航空機	探索距離、角度分解能、大きさの兼ね合いが求められる	0.4-1	航空機用レーダー	航空機に搭載可能な大きさ
		2-4		
		4.2-4.4	レーダー高度計（対地高度測定）	
		5.2-5.9	大型航空機用気象レーダー	嵐の奥深くまで浸透する能力と機器の大きさ重さの兼ね合い
		8.5-11	小型航空機用気象レーダー	
		8.5-11	戦闘機用攻撃　偵察レーダー	大気による減衰が少なく、ビーム幅が狭い（角度分解能が高い）
		13-18	戦闘機用攻撃　偵察レーダー	
		31-36	地上探索、地形追従、地形回避用航空機レーダー	高い角度分解能、小型
宇宙	消費電力、大きさの制限が大きい	1-11	合成開口イメージングレーダー	省電力、小型
		2-18	宇宙搭載高度計	
		5-36	衛星搭載スキャトロメーター（海面近くの風速　風向き測定）	
		13-18	降水レーダー	

3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（13）周波数分析器

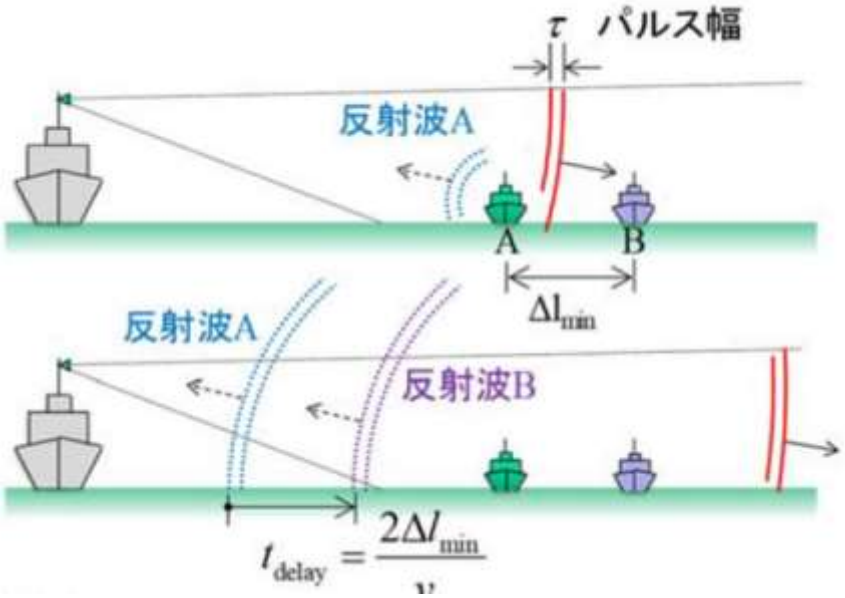
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（3）

【レーダー】

高性能の周波数分析器はまた、ジャミング信号や、突発的に短時間発せられるパルスレーダー信号などの解析にも有効である。

パルスレーダーはパルス幅が短いほど分解能が高くなるため（図7-13-16）、傍受のように発生する時期や周波数が予期できない信号の解析には短いパルスの信号まで捉えられるリアルタイムスペクトラムアナライザーが必須である。一方、アンテナやスペクトラム拡散用の機器などの機器の設計、製造にもスペクトラムアナライザーは必須であるが、リアルタイム性能などは必ずしも必要ではない。

図7-13-16　パルスレーダー



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令7項（13）周波数分析器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（4）

【通信】

マイクロ波は直進性が高く、電離層による減衰が小さいため、地上と衛星間、衛星同士の通信に適している（図7-13-17）。直進性の高さは傍受されにくさにもつながる。マイクロ波の中でも大気や降雨による減衰も小さいX帯（8～12GHz）は特に軍事用でよく利用されている。

通信やレーダー探知の傍受や妨害を受けにくくする技術として重要な技術にスペクトラム拡散がある。スペクトラム拡散はさらに直接拡散と周波数ホッピング・チャープ変調に分けられる（図7-13-18）。

直接拡散は狭帯域の送信信号を広帯域の信号に変換した後に送信し、受信後に再び本来の狭帯域に戻す方式である。広帯域信号にすることで周波数あたりの信号強度が弱まるため、傍受が難しくなる。また通常は狭い帯域で発生するノイズが混入しても、最終的には広帯域に渡る周波数あたりの信号強度の弱いノイズとなるため、ノイズの妨害を受けにくいという利点もある。直接拡散の他に、送信信号の周波数を一定時間ごとに不連続に変えていく周波数ホッピングと、送信信号の周波数を連続的に変えていくチャープ変調がある。周波数の変化パターンを予め知らないと傍受が難しくなる。また特定の周波数帯域に固定したノイズにも強くなる。周波数ホッピングでは短い周期で周波数を切り替える技術が必要である。

図7-13-17　衛星によるマイクロ波通信のイメージ

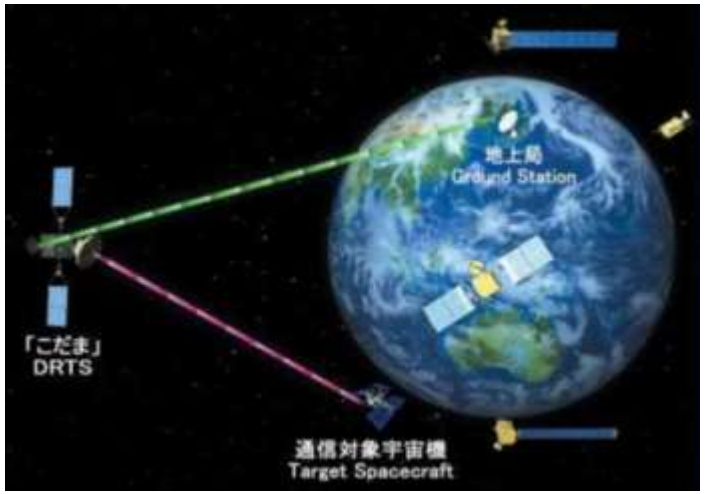
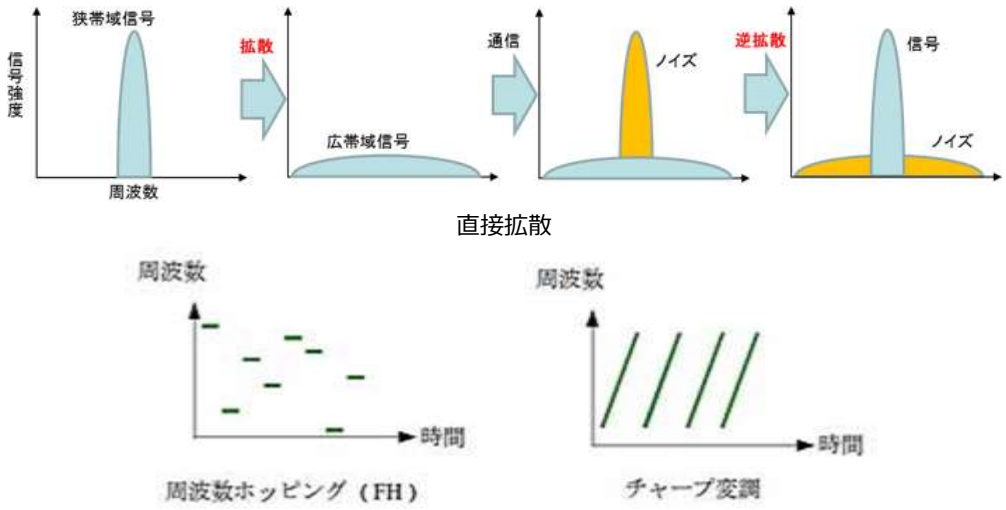


図7-13-18　スペクトラム拡散の種類



3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○輸出令7項（13）周波数分析器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（5）

【軍事・治安維持に特化した用途】

ここまで挙げてきた用途は民生用・軍事用ともに使われるものであったが、図7-13-19ではもっぱら軍事・治安維持用に使われる高周波機器の例を示す。これらの機器の設計・開発・評価などにも周波数分析器が使われる。

社会のインフラストラクチャーが電気・電子機器によって支えられている現在、一瞬でこれらの機器を破壊することのできる電磁パルス（EMP）攻撃は戦闘における重要な攻撃・防御手段となっている。電磁パルスを発生させる代表的な方法は核爆弾の爆発であるが、核爆発によらず電磁パルスを発生させる方法も既に実用化されている。電磁パルス兵器の開発プログラムの例としてはアメリカ軍のCHAMP（Counter-electronics High-powered Microwave Advanced Missile Project）がある。電磁パルスはまた防御手段としても使われる。例えばドローンの制御信号を妨害して無効化する手段として用いられており、またミサイルなどに直接マイクロ波を照射して破壊するLight speed weaponの一種として使うことが検討されている。

対人向けの用途としては、ミリ波の誘導加熱で皮膚の表面温度を上げる指向性エネルギー兵器（Active Denial System）が開発されている。またマイクロ波の照射は体表や頭蓋骨などに損傷を与えずに外傷性脳損傷を起こすことが動物実験で示されており、アメリカ軍もかつてこれに関連した技術としてV2K（Voice-to Skull）技術を使った兵器に触れていたという。

図7-13-19　マイクロ波の軍事分野の利用例

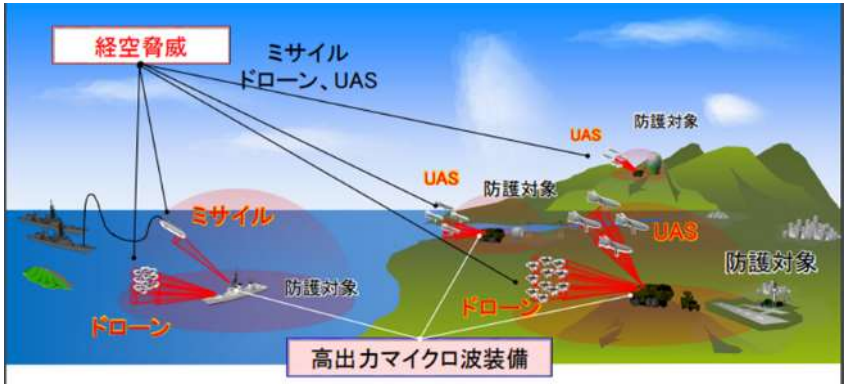
【"CHAMP"ミサイル】



【Active Denial System】



【マイクロ波による防御構想】



3.品目の主たる用途の調査分析（6）

○輸出令7項（13）周波数分析器

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

本項には、用途に対する規制は無い。

4.品目の技術動向調査（1）

規制パラメータ　輸出令第7項(13)
イ　３１．８ギガヘルツ超　３７ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、３デシベルの分解能帯域幅が４０メガヘルツを超えるもの
ロ　４３．５ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、表示平均ノイズレベルがマイナス１５０ディービーエム毎ヘルツ未満のもの
ハ　９０ギガヘルツを超える周波数を分析することができるもの
ニ　次の（一）及び（二）に該当するもの
（一）　実時間帯域幅が１７０メガヘルツを超えるもの
（二）　次のいずれかに該当するもの
１　１５マイクロ秒以下の長さの信号を、ギャップ又は窓効果による全振幅からの減衰が３デシベル未満で、１００パーセントの確率で検出するもの
２　周波数マスクトリガー機能を有するものであって、15マイクロ秒以下の長さの信号を100パーセントの確率で捉えることができるもの

○輸出令7項（13）周波数分析器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（1）

現在使われている周波数分析器の多くはデジタル型である。しかしながら貨物等省令第6条第十二号イ、ロ、ハからは表7-13-4に示した方式による該当・非該当の判定はできず、いずれの方式も該当し得る。

ニの規定には実時間帯域幅や窓効果、周波数マスクトリガー機能等のデジタル型の規定があることから、デジタル型のFFT方式を対象としたものである。

表7-13-4　規制対象となる周波数分析器

イ、ロ、ハの規制対象となり得る

	ヘテロダイン方式（掃引同期方式）		マルチフィルタ方式（フィルタバンク方式）		FFT（高速フーリエ変換）方式	
アナログ型	広帯域の信号が1度の掃引で観測できるダイナミックレンジが広い	高価な部品が必要 測定中に変化する信号の測定には適さない 測定データの保存・解析ができない	測定中に変化する信号が測定できる	高価な部品が必要 回路が大規模になる 測定データの保存・解析ができない		
デジタル型	広帯域の信号が1度の掃引で観測できるダイナミックレンジが広い 測定データの保存・解析ができる	測定中に変化する信号の測定には適さない	測定中に変化する信号が測定できる 測定データの保存・解析ができる	高価な部品が必要 回路が大規模になる	測定中に変化する信号が測定できる 測定データの保存・解析ができる	解析周波数範囲が切り出した範囲に限られる

ニの規制対象となり得る

4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（13）周波数分析器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（2）

規制パラメータは、周波数帯域を指定したもの（イ、ロ、ハ）と、実時間帯域幅および100%POI最小時間を指定したもの（ニ）の2通りに分かれる。（図7-13-20）。周波数分析器製造企業の代表的な製品の性能を図上にプロットして示す。100%POI最小時間の値はTectronix社の製品しか判明しなかった。記載した製品は全てマスクトリガー機能を有している。

規制パラメータ　輸出令第7項(13)

イ　３１．８ギガヘルツ超　３７ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、３デシベルの分解能帯域幅が４０メガヘルツを超えるもの

ロ　４３．５ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下のいずれかの周波数帯域で、表示平均ノイズレベルがマイナス１５０ディービーエム毎ヘルツ未満のもの

ハ　９０ギガヘルツを超える周波数を分析することができるもの

ニ　次の（一）及び（二）に該当するもの

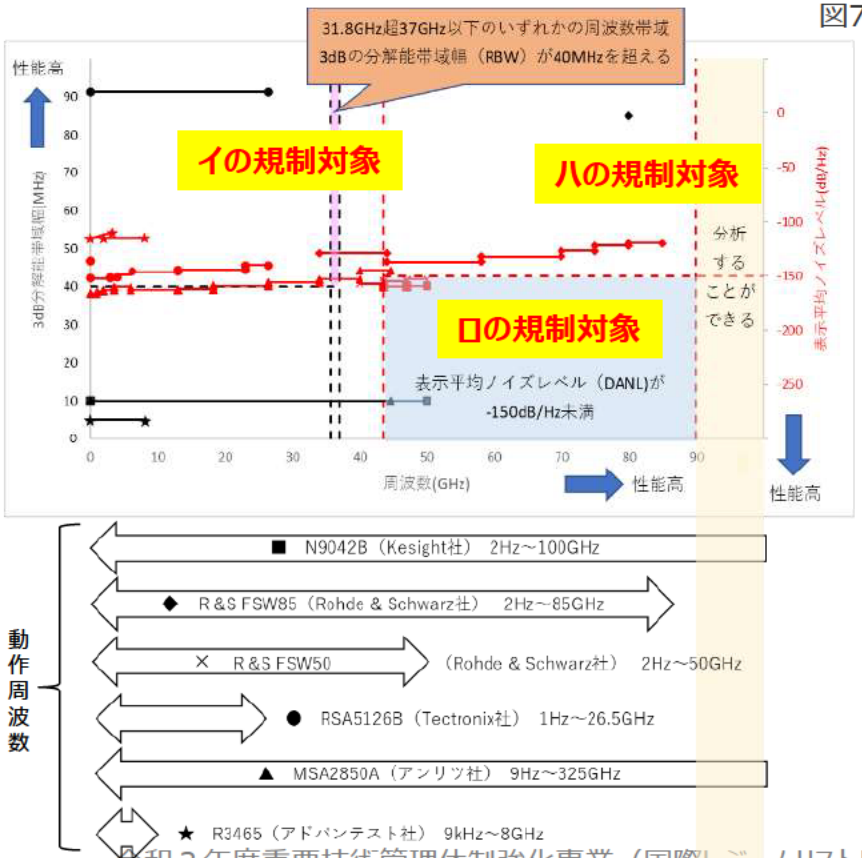
（一）　実時間帯域幅が１７０メガヘルツを超えるもの

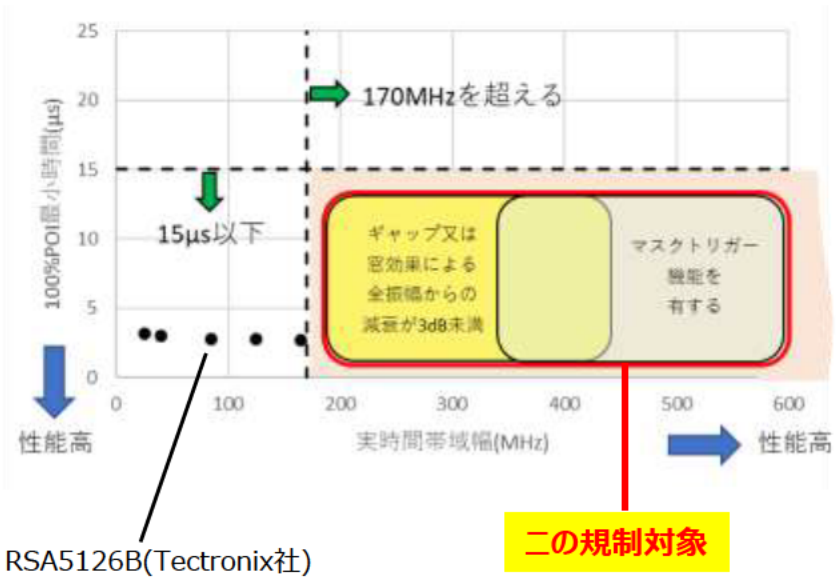
（二）　次のいずれかに該当するもの

１　１５マイクロ秒以下の長さの信号を、ギャップ又は窓効果による全振幅からの減衰が３デシベル未満で、１００パーセントの確率で検出するもの

２　周波数マスクトリガー機能を有するものであって、15マイクロ秒以下の長さの信号を100パーセントの確率で捉えることができるもの

図7-13-20　周波数分析器の規制パラメータ





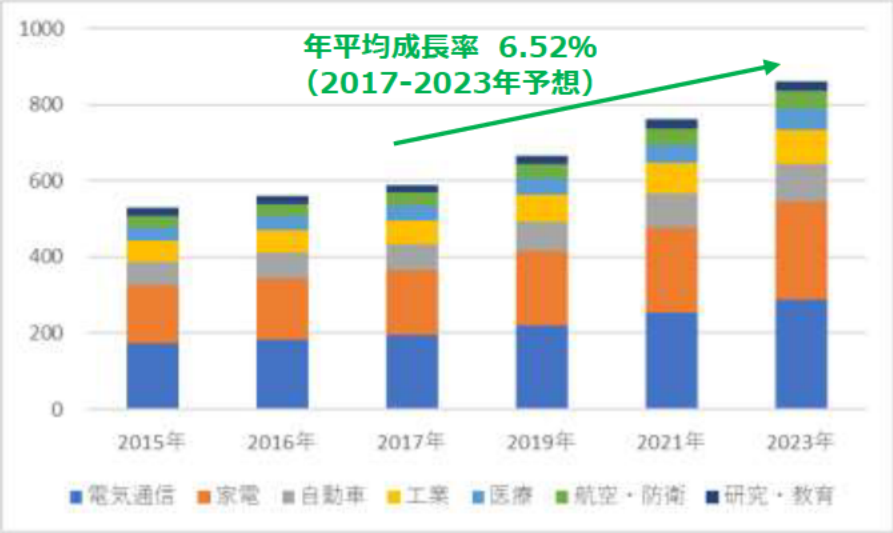
4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（13）周波数分析器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（1）

周波数分析器の用途別の市場規模を図7-13-21に示す。2015年、2016年は実績値、2017年以降は予測値である。電気通信と家電向けが市場規模、伸び率とも大きい。

図7-13-21　周波数分析器の市場規模（用途別）



	2015年	2016年	2017年	2019年	2021年	2023年
電気通信	173.4	184.0	194.5	220.8	253.3	288.1
家電	151.8	161.4	171.0	194.9	224.5	256.4
自動車	62.5	66.1	69.6	78.5	89.5	101.0
工業	55.9	59.1	62.2	70.1	79.8	90.1
医療	34.4	36.2	38.0	42.5	48.0	53.7
航空・防衛	31.5	33.0	34.4	38.0	42.4	46.9
研究・教育	19.2	19.9	20.6	22.4	24.5	26.4
合計	528.8	559.8	590.4	667.2	762.0	862.5

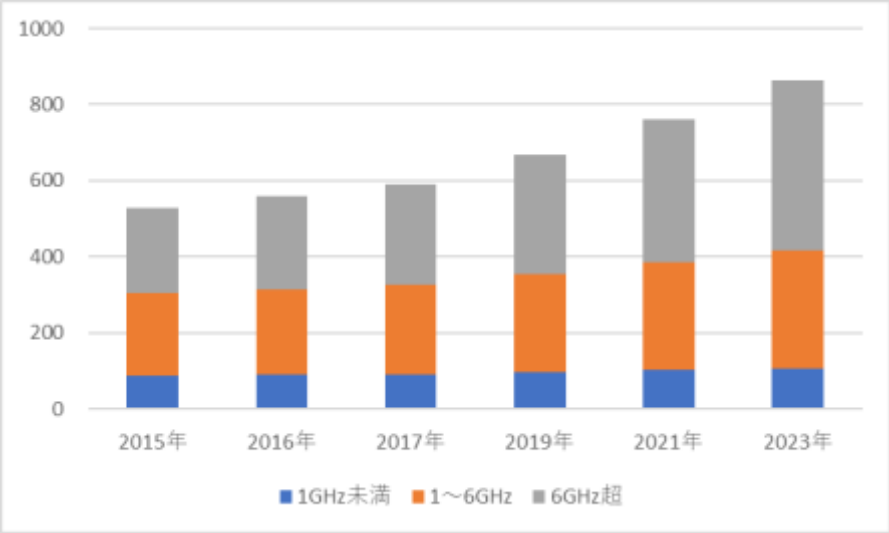
4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（13）周波数分析器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

周波数分析器の周波数帯別の市場規模を図7-13-22に示す。2015年、2016年は実績値、2017年以降は予測値である。6GHzを超える周波数帯向けの製品の割合が最も大きく、1~6GHzの周波数帯向けの製品がこれに次ぐが、6GHzを超える周波数帯向けの製品の伸びが大きく、1~6GHzの周波数帯向けの製品との差は開くと予想されている。

図7-13-22　周波数分析器の市場規模（周波数帯別）



	2015年	2016年	2017年	2019年	2021年	2023年
1GHz未満	88.0	90.2	91.4	97.1	102.8	105.9
1～6GHz	215.9	225.2	234.1	256.3	283.6	311.1
6GHz超	224.9	244.5	264.9	313.7	375.5	445.5
合計	528.8	559.8	590.4	667.2	762.0	862.5

4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令7項（13）周波数分析器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

周波数分析器の主な製造企業を表に示す。これらの中でも、Keysight Technologies社、Rohde & Schwarz社、Fortive社、アンリツ社、Advantest社の5社が市場で主要なシェアを占めている。

	企業	会社概要
1	Keysight Technologies Incorporated（アメリカ）	2014年にAgilent Technologies社（アメリカ）から分離して設立された、エレクトロニクスと無線通信分野の製造企業であり、2022年現在14300人以上の従業員を擁する。周波数分析器の代表的な企業の1つである。研究開発にも積極的に投資しており、試験・測定分野の企業のAnite社（イギリス）の買収やNTT DOCOMO社（日本）との５G通信システムに関する提携など、積極的な事業展開を行っている。
2	Rohde & Schwarz GmbH & Company KG（ドイツ）	1933年に設立され、70か国以上に13,000の社員がおり（2022年現在）、売上22億8000万ユーロ（2020/2021会計年度）の企業である。業界、インフラプロバイダー、政府機関の顧客を対象に各種電子資本財の開発、製造、販売にあたっている。無線通信/RFテストおよび測定、放送／メディア、航空交通管制／軍事用無線通信、サイバーセキュリティー／ネットワークテクノロジーといったすべての事業分野において、テクノロジーとマーケットの両面で主要な地位にある。周波数分析器の代表的な企業の1つである。
3	Fortive Corporation（アメリカ）	Danaher Corporation（アメリカ）が2015年に事業を科学・技術分野と試験・測定分野の2つに分割し、試験・測定分野の会社として発足したのがFortive Corporationである。2016年には一部がDanaher社傘下に残っていたTektronix Incorporated（アメリカ）を傘下に収めて試験・測定分野の事業をさらに強化した。周波数分析器の代表的な企業の1つである。周波数分析器以外にも、Tektronix社と、同じく傘下にあるKeithley Instrumentsの製品である、オシロスコープ、信号発生器、映像試験装置、スイッチング＆データ取り込みシステム、半導体試験システムなどを製造・販売している。
4	アンリツ株式会社（日本）	1895年に設立され、売上高1059億円（2021年）、従業員数3954名（2021年、連結）、事業内容は電子計測器、食品・医薬品の品質保証システム、環境計測機器、デバイスなどの開発・製造・販売の会社である。電子計測器の製品にはシグナルアナライザ/スペクトラムアナライザ、ネットワークアナライザ、信号発生器などがある。周波数分析器の代表的な企業の1つである。
5	株式会社アドバンテスト（日本）	1954年に創立された、電子測定機器と半導体テストシステムの製造・販売を行っている会社である。周波数分析器の代表的な企業の1つである。日本、アメリカ、ドイツに主要なR&D拠点を持ち、日本、韓国、マレーシアに主要生産拠点を有する。
6	Cobham Limited（イギリス）	1934年に創立された、エレクトリックソリューション、航空サービス、通信・接続などの事業を行う会社である。防衛用の無人機システムなどの事業も行っている。
7	Giga-tronics Incorporated（アメリカ）	1980年に創立された、電子戦やレーダー向け機器用の試験・測定装置を製造・販売している会社である。Giga-tronics DivisionとMicrosourceの2つのセグメントに分かれ、周波数分析器はGiga-tronics Divisionで扱っている。
8	National Instruments Corporation（アメリカ）	1976年に創立された計測・制御機器の製造・販売を行っている会社である。特に自動テストと自動計測システムが中核の事業である。周波数分析については、RFシグナルアナライザ、リアルタイムスペクトラムアナライザ、ベクトルシグナルアナライザなどを製造・販売している。取引対象分野は半導体、モビリティ、航空宇宙・防衛・官公庁、教育・研究、ワイヤレス、エレクトロニクス、エネルギー、産業用機械、重機である。
9	LP Technologies, Incorporated（アメリカ）	1997年に創立され、創立以来、衛星検知と干渉監視のためのマルチポートリモート制御スペクトラムアナライザハードウェアとソフトウェアの開発を続けてきた会社である。1997年に小型で入手しやすいスペクトラムアナライザを最初に発表して以来、マルチポートモデルなどの製品を次々と開発している。軍事用の監視ソフトウェアもアメリカ軍や国際連合平和維持軍に納入している。

4.品目の技術動向調査（6）

〇輸出令7項（13）周波数分析器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（4）

	企業	会社概要
10	Teledyne Lecroy, Incorporated（アメリカ）	1964年に創立された、Teledyne Technologies傘下の計測器の企業である。オシロスコープでは世界有数の企業であるが、他にも任意波形発生器、スペクトラムアナライザ、ベクトルネットワークアナライザなど様々な機器を手掛けている。
11	AVCOM of VIRGINIA, Incorporated（アメリカ）	1976年に創立され、衛星通信業界向けの衛星受信機の事業を開始した。その後の衛星受信機向けの製品開発を経てスペクトラムアナライザの開発に成功し、現在は遠隔監視型、ラックマウント型、ポータブル型のスペクトラムアナライザの製品を展開している。
12	B&K Precision Corporation（アメリカ）	前身のCentral Television Service Companyを経て1951年に設立された。試験・測定機器の設計・製造を行っている企業である。主な製品には、電源とDC電子負荷、信号発生器、コンポーネントテスター、オシロスコープ、スペクトラムアナライザー、マルチメーターなどがある。
13	Stanford Research Systems, Incorporated（アメリカ）	1980年創立の、研究および産業向けの試験機器の設計・製造を行っている会社である。スペクトラムアナライザ以外の製品には、ロックインアンプ、原子時計、質量分析計、RF信号発生器、デジタル遅延発生器、クロックシンセサイザなどがある。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（14）
ネットワークアナライザー

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

【ネットワークアナライザーとは】
　電気信号は周波数が高くなるほど信号電流が導体の中心より表面に近い部分にばかり流れるようになり、交流抵抗が増大する。これを表皮効果という。また高周波信号は波長の短い信号であるため、電気回路の回路の長さや部品の大きさの影響が無視できなくなる。このように一般にUHF以上の周波数では低周波回路と同じような測定が難しいため、高周波信号の回路の特性を測定するためにはネットワークアナライザーと呼ばれる装置が使用される。表皮効果の影響などで高周波デバイスや回路では入力信号の反射や減衰が起きやすいため、ネットワークアナライザーではそれらの度合いを測定して高周波デバイスや回路の特性を把握する。具体的な測定対象には、電子部品（コンデンサ、インダクタ、ノイズ対策用部品など）や回路網（携帯電話や無線LAN機器に搭載されるアンプモジュール、フィルターなど）、伝送路（ケーブルやプリント基板上の信号経路）などがある。
図7-14-1は市販のネットワークアナライザーの製品の例である。

図7-14-1　ネットワークアナライザーの製品例

【据え置き型】



アンリツ社
MS4640Bシリーズ

【携帯型】



Rohde & Schwarz社
ZNH

1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

【ネットワークアナライザーが測定する信号（ベクトルネットワークアナライザーとスカラネットワークアナライザーについて）】

前のページでも触れたが、ネットワークアナライザーは高周波電気回路、マイクロ波回路のインピーダンスと回路内部での信号の減衰量を測定して回路網を解析する装置である。なおインピーダンスとは図7-14-2に示すとおり、交流回路における電流の流れにくさを示す電圧Vと電流Iの比V/Iである。直流回路では抵抗値に相当するが、交流回路ではコイルに相当する誘導性リアクタンスとコンデンサに相当する容量性リアクタンスの影響を加味する必要があり、インピーダンスが使われる。

ネットワークアナライザーでは正弦波の信号を用いる。正弦波の信号は図7-14-3に示すとおり、長さが振幅、角度θが位相を表すベクトル（赤い矢印）で表現することができる。そのため、振幅（大きさ）と位相（周期信号の位置）の両方を解析できるものをベクトルネットワークアナライザーという。一方、用いる正弦波信号の振幅（大きさ）のみを解析できるものをスカラネットワークアナライザーという。スカラネットワークアナライザーは高周波信号への対応が比較的用意であるが、現在ネットワークアナライザーと呼ばれるものはほとんどがベクトルネットワークアナライザーである。

ネットワークアナライザーは自身が出力した既知の信号を被測定回路に入力した結果得られる信号を解析するものである。この点が、信号源を持たず、外部からの妨害信号など未知の信号を測定する輸出令7項(13)の規制対象の周波数分析器（スペクトラムアナライザー）との大きな違いである。

図7-14-2　交流回路のインピーダンス

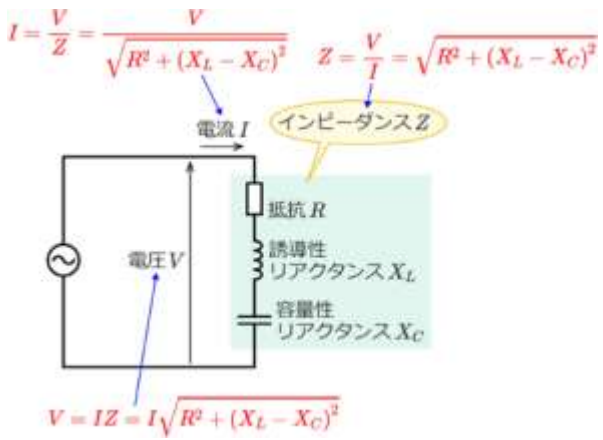
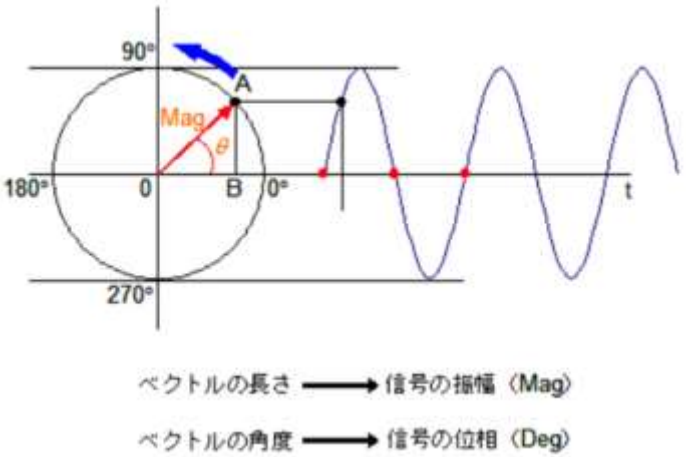


図7-14-3　正弦波信号の振幅と位相のベクトル表現



1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

【測定の仕組み、Sパラメータ】

ネットワークアナライザーは、まず接続した被測定物（DUT：Device Under Test）に信号を入力する。この信号は、①DUTの入力端で反射される、②DUTの内部で減衰する、③DUTを通過する、のいずれかである。ネットワークアナライザーは①、③を直接測定し、②を①と③の測定結果から間接的に測定するものである。

高周波回路の場合は寄生容量や寄生インダクタンスの影響があるため、電圧や電流を正確に測定することが難しい。そこで電力を基にしたSパラメータ（Scattering Parameter）でDUTの伝送特性と反射特性を評価する。Sパラメーターは「反射信号と入射信号の比」および「伝送信号と入射信号の比」の値であるSパラメータS11,S12,S21,S22で表される（図7-14-4）。Sに続く2桁の数字は1桁目がネットワークアナライザーに入力したポート番号、2桁目がネットワークアナライザーから出力したポート番号を示す。すなわちS11とS22は反射、S12とS21は伝送を意味する（表7-14-1）。

市販のネットワークアナライザーには図7-14-5のように多数のポートを備えたものも多い。

図7-14-4　ネットワークアナライザーのSパラメータ

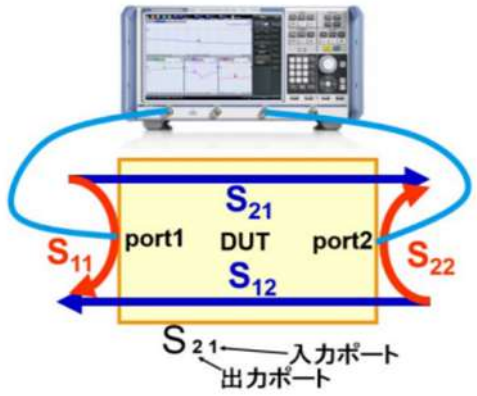


図7-14-5　24ポートネットワークアナライザーの例



表7-14-1　ネットワークアナライザーのSパラメータ

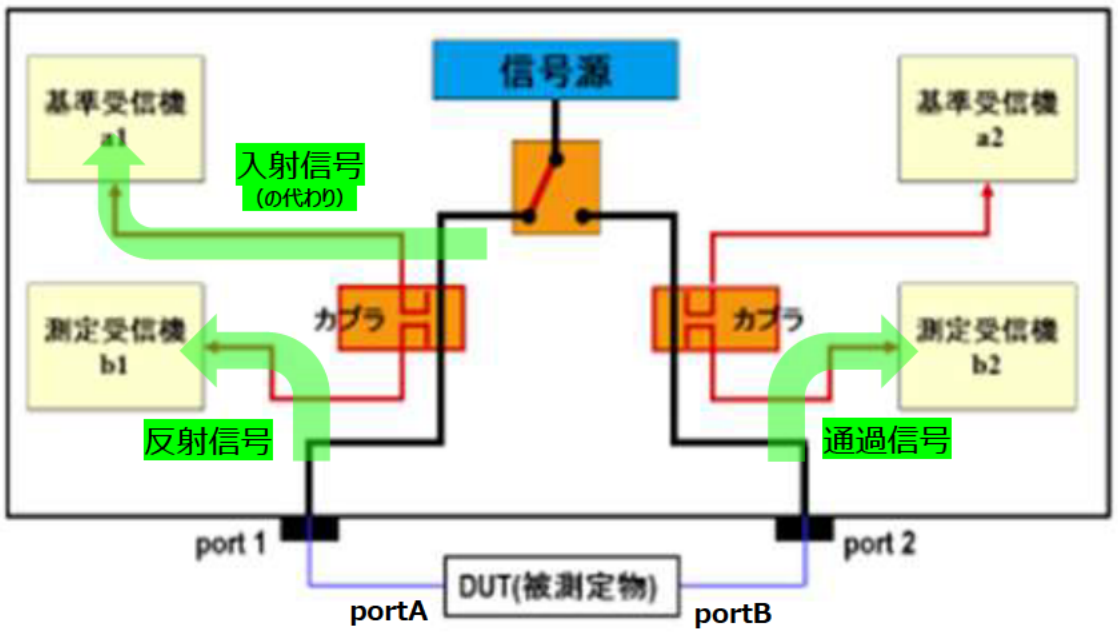
S11	反射信号	（ポート1からDUTに入射した信号の一部がDUTで反射されてポート1から戻ってきた信号）/（入射信号）
S21	伝送信号	（ポート1からDUTに入射した信号の一部がDUTを通過してポート2から帰ってきた信号）/（入射信号）
S22	反射信号	（ポート2からDUTに入射した信号の一部がDUTで反射されてポート2から戻ってきた信号）/（入射信号）
S12	伝送信号	（ポート2からDUTに入射した信号の一部がDUTを通過してポート1から帰ってきた信号）/（入射信号）

1.対象品目の概要調査（4）

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

【ネットワークアナライザーの基本構成】
ネットワークアナライザーの内部の基本構成は図7-14-6の通りである。図はport1から信号を出力し、port2から入力する場合を示している。

図7-14-6　ネットワークアナライザーの基本構成



1.対象品目の概要調査（5）

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

【線形の系、非線形の系】

入力信号に対して出力信号は振幅と位相のみが変わり、入力信号強度と出力信号強度が比例関係にある場合を線形の系という。線形素子には抵抗、コンデンサ、コイル、トランスなどがある。図7-14-7に線形の系の例を示す。この図の例もそうであるが、全ての電圧範囲で線形の系になるとは限らない。

一方、入力信号に対して出力信号が振幅と位相以外にも変わる範囲を非線形の系という。この時、入力信号強度と出力信号強度は比例関係にはない。非線形素子にはダイオード、サイリスタ、トランジスタなどがある。非線形特性は必ずしも非線形素子によるとは限らず、入力信号の整数倍の周波数成分である高調波が発生したり、大きな入力信号により回路の温度が上昇するなどの理由で非線形を示すこともある。このため、図7-14-8に示すとおり一つの系でも線形を示す領域と非線形な領域を示す場合が共に存在することが普通である。貨物等省令第十四号では非線形特性を示しやすい信号が大きい領域（ドメイン）や、実際に非線形歪みを示す領域で現れる非線形ベクトルの試験・解析ができることを規制の条件の一つとしている。

図7-14-7　線形の系の入出力信号

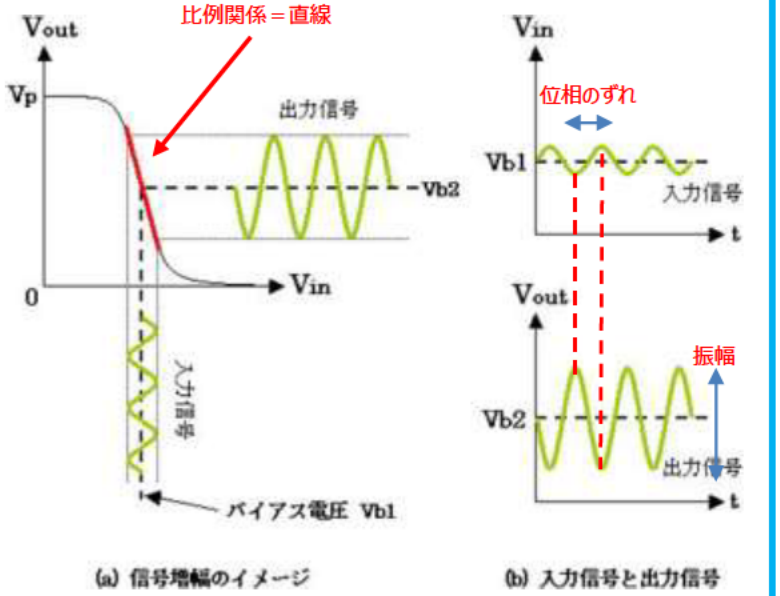
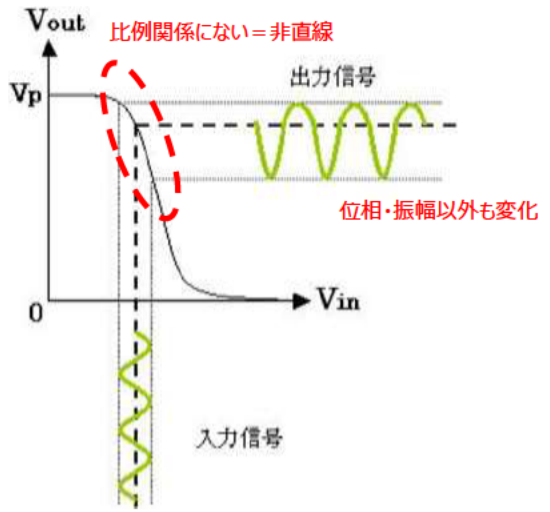


図7-14-8　非線形の系の入出力信号例



1.対象品目の概要調査（6）

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

【ネットワークアナライザーの種類】
ネットワークアナライザーは、測定可能な対象により、表7-14-2のように分類できる。

表7-14-2 ネットワークアナライザーの種類

スカラネットワークアナライザー（SNA）		回路の電力を測定可能
ベクトルネットワークアナライザー（VNA）	線形ベクトルネットワークアナライザー	線形状態の回路の電力と位相を測定可能
	非線形ベクトルネットワークアナライザー（NVNA）	線形状態と非線形状態の回路の電力と位相を測定可能

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(14)	6		十四	十四　ネットワークアナライザーであって、次のいずれかに該当するもの イ　43.5ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下のいずれかの動作周波数帯域において、出力が31.62ミリワット（15ディービーエム）を超えるもの ロ　90ギガヘルツ超110ギガヘルツ以下のいずれかの動作周波数帯域において、出力が１ミリワット（０ディービーエム）を超えるもの ハ　50ギガヘルツ超110ギガヘルツ以下の周波数帯域における非線形ベクトルの計測機能を有するもの（イ又はロに該当するものを除く。） 非線形ベクトルの計測機能 計測対象の装置を大信号ドメイン又は非線形歪みの領域に追い込んで試験し、その結果を解析することができるネットワークアナライザーの機能をいう。 ニ　最大動作周波数が110ギガヘルツを超えるもの	43.5ギガヘルツ超90ギガヘルツ以下のいずれかの動作周波数帯域において、出力が31.62ミリワット（15ディービーエム）を超える 90ギガヘルツ超110ギガヘルツ以下のいずれかの動作周波数帯域において、出力が１ミリワット（０ディービーエム）を超える 50ギガヘルツ超110ギガヘルツ以下の周波数帯域における非線形ベクトルの計測機能を有する

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A2	e		e. Network analysers having any of the following:
		1	1. An output power exceeding 31.62 mW (15 dBm) anywhere within the operating frequency range exceeding 43.5 GHz but not exceeding 90 GHz;
		2	2. An output power exceeding 1 mW (0 dBm) anywhere within the operating frequency range exceeding 90 GHz but not exceeding 110 GHz;
		3	3. 'Nonlinear vector measurement functionality' at frequencies exceeding 50 GHz but not exceeding 110 GHz; or Technical Note 'Nonlinear vector measurement functionality' is an instrument's ability to analyse the test results of devices driven into the large-signal domain or the non-linear distortion range.
		4	4. A maximum operating frequency exceeding 110 GHz;

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

ネットワークアナライザーは電気電子機器の特性や不具合の確認、 ノイズの検出など、電気電子計測の幅広い用途に使われる。
図7-14-9に示す例を始め、さまざまな機器・部品の評価に使われている（図7-14-10）。

図7-14-9 ネットワークアナライザーの使用例
（アンテナの特性評価）

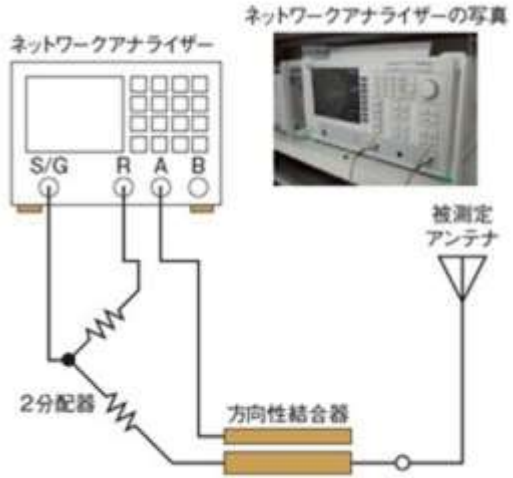
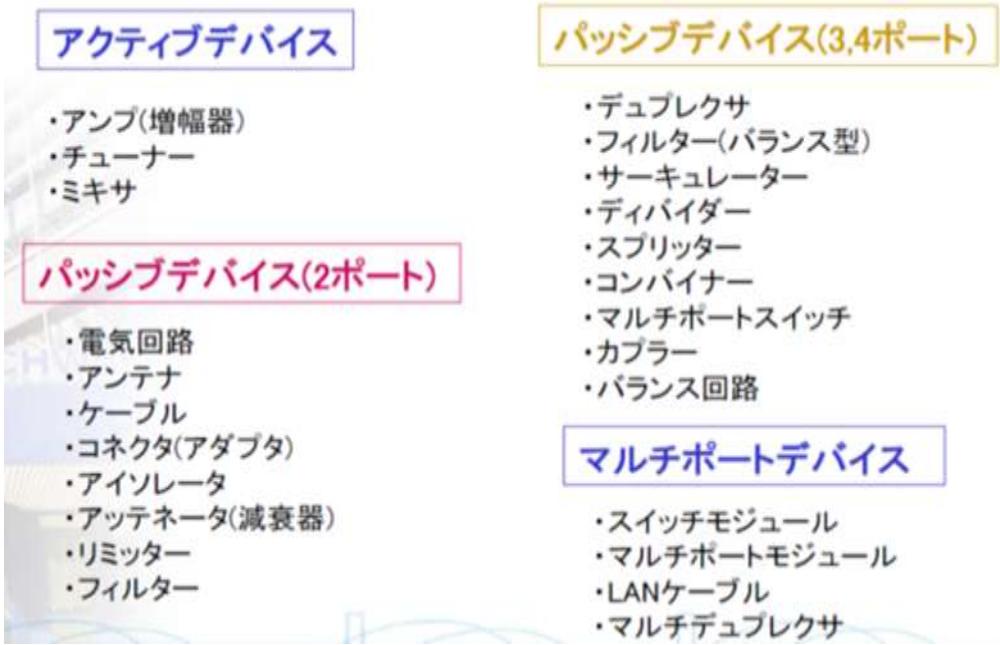


図7-14-10 ネットワークアナライザーの測定対象の例



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

〇輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

本項には、用途に対する規制は無い。

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（1）

ネットワークアナライザーが測定対象とする周波数は製品によりさまざまであるが、全体ではkHzから数百GHzまで幅広い範囲に及ぶ。

この範囲の周波数に相当する電波は表7-14-1に示すとおりである。それぞれの電波を扱う機器にはその周波数に対応した回路が存在するため、それに応じたネットワークアナライザーも必要とされる。典型的な軍事用機器としては、衛星通信、レーダーなどが挙げられる。

規制パラメータが設定されているのは43.5GHzを超える動作周波数は、ミリ波の領域である。その帯域の無線波の主な用途は衛星通信やレーダーである（表7-14-3）。

表7-14-3　ネットワークアナライザーの測定対象周波数帯の無線使用例

電波の呼称	略号	周波数	波長	用途
長波	LF	30～300kHz	10～1km	船舶、航空機用ビーコン
中波	MW	0.3～3MHz	1～0.1km	船舶通信、中波ラジオ、アマチュア無線、船舶航空機ビーコン
短波	HF	3～30MHz	100～10m	国際短波放送、船舶航空機通信、アマチュア無線
超短波	VHF	30～300MHz	10～1m	FM放送、テレビ放送、防災行政無線、消防無線、列車無線、警察無線、ｱﾏﾁｭｱ無線、航空管制無線、コードレス電話
超短波	UHF	0.3～3GHz	1～0.1m	テレビ放送、携帯電話、PHS、タクシー無線、防災行政無線、レーダー、無線LAN、移動体衛星通信、パーソナル無線、アマチュア無線、コードレスお電話、ISM機器
マイクロ波	SHF	3～30GHz	10～1cm	衛星通信、衛星放送、レーダー、マイクロ波中継、電波天文、無線LAN 、ISM機器
ミリ波	EHF	30～300GHz	1～0.1cm	電波天文、衛星通信、簡易無線、レーダー、加入者系無線アクセス

43.5GHzを超える周波数帯の用途

4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（2）

表7-14-1で示した通り、ネットワークアナライザーにはスカラネットワークアナライザー、ベクトルネットワークアナライザー、ベクトルネットワークアナライザーの一種である非線形ベクトルネットワークアナライザーに分類できる。

輸出令7項（14）ではいずれの方式のものも規制対象となり得る。その中でハの規制対象となり得るのは非線形ベクトルネットワークアナライザーのみである（表7-14-4）。

表7-14-4　規制対象となるネットワークアナライザー

スカラネットワークアナライザー（SNA）		回路の電力を測定可能
ベクトルネットワークアナライザー（VNA）		線形状態の回路の電力と位相を測定可能
	非線形ベクトルネットワークアナライザー（NVNA）	非線形状態の回路の電力と位相を測定可能

規制対象となり得る

ハの規制対象となり得る

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（3）

規制パラメータは動作周波数と出力である。ただし一部に非線形ベクトルの計測機能を有することが規制条件となっている領域がある（図7-14-11）。ベクトルネットワークアナライザー6社の代表的な製品の性能をプロットした。

規制パラメータ 輸出令第7項(14)

十四 ネットワークアナライザーであって、次のいずれかに該当するもの

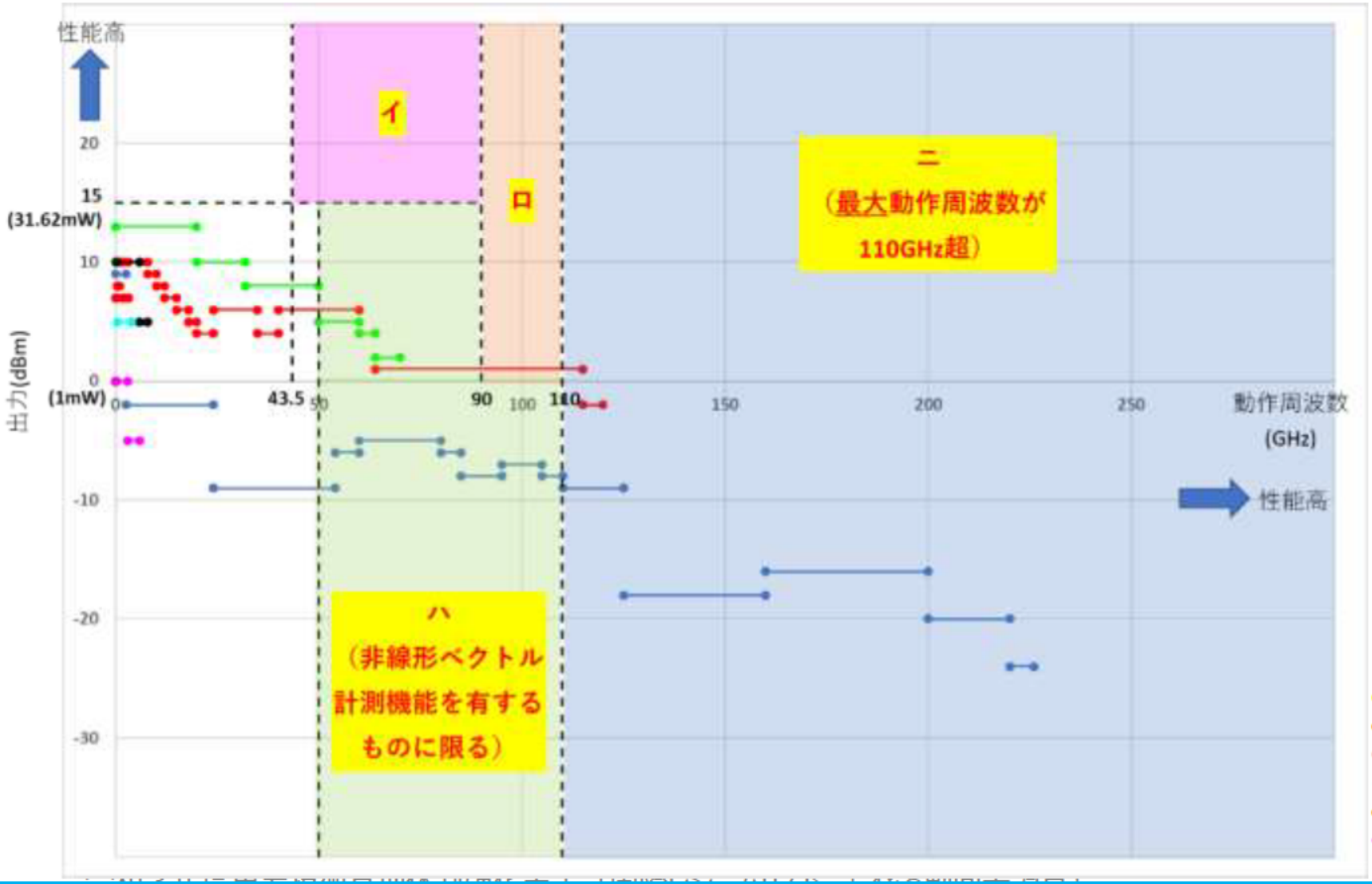
イ ４３．５ギガヘルツ超９０ギガヘルツ以下のいずれかの動作周波数帯域において、出力が３１．６２ミリワット（１５ディービーエム）を超えるもの

ロ ９０ギガヘルツ超１１０ギガヘルツ以下のいずれかの動作周波数帯域において、出力が１ミリワット（０ディービーエム）を超えるもの

ハ ５０ギガヘルツ超１１０ギガヘルツ以下の周波数帯域における非線形ベクトルの計測機能を有するもの（イ又はロに該当するものを除く。）

ニ 最大動作周波数が１１０ギガヘルツを超えるもの

図7-14-11 ネットワークアナライザーの規制パラメータと製品性能



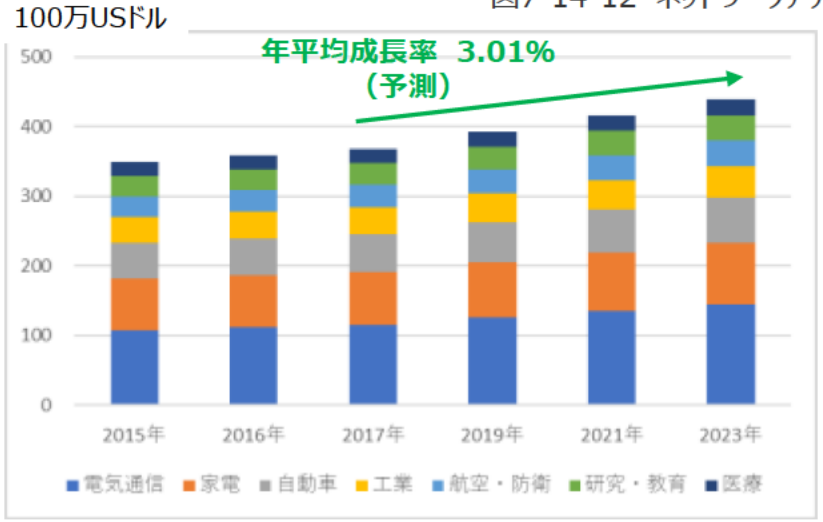
4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（1）

ネットワークアナライザの用途別市場規模を図7-14-12に示す。2015,2016年は実績値、2017年以降は予測値である。電気通信向けが最も大きく、家電向けがこれに次ぐ。ネットワークアナライザ全体の市場の2017年から2023年までのCAGRは3.01%と予想されている。

図7-14-12　ネットワークアナライザーの市場規模（用途別）



100万USドル

	2015年	2016年	2017年	2019年	2021年	2023年	CAGR(%) (2017-2023)
電気通信	108.2	112.0	115.8	125.5	135.2	145.2	3.85
家電	73.2	74.6	76.0	80.0	83.7	87.3	2.35
自動車	51.0	52.5	53.9	57.8	61.6	65.4	3.26
工業	37.9	38.6	39.2	41.1	42.9	44.6	2.15
航空・防衛	30.0	30.8	31.5	33.5	35.4	37.2	2.83
研究・教育	29.5	30.2	30.9	32.9	34.8	36.5	2.85
医療	20.2	20.5	20.8	21.8	22.6	23.5	2.02
合計	350.0	359.2	368.0	392.7	416.2	439.7	3.01

4.品目の技術動向調査（5）

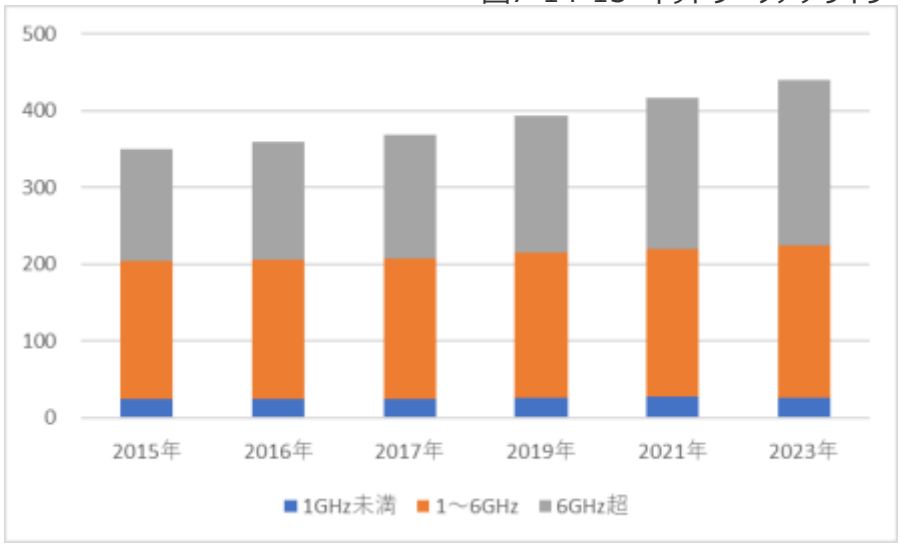
○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

ネットワークアナライザの用途別市場規模を図7-14-13に示す。2015,2016年は実績値、2017年以降は予測値である。6GHz超の周波数帯向けの製品の伸びが他に比べ大きく、1～6GHzの周波数帯向けの製品を超えると予想されている。

100万USドル

図7-14-13　ネットワークアナライザーの市場規模（動作周波数別）



100万USドル

	2015年	2016年	2017年	2019年	2021年	2023年	CAGR(%) (2017-2023)
1GHz未満	25.1	25.3	25.2	26.4	26.9	26.8	1.04
1～6GHz	178.5	180.5	182.2	188.1	192.9	197.3	1.33
6GHz超	146.3	153.4	160.7	178.2	196.3	215.6	5.02
合計	350.0	359.2	368.0	392.7	416.2	439.7	3.01

4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

ネットワークアナライザを製造している主な企業を表に示す。これらの中でもTektronix社、Rohde & Schwarz社、Keysight Technologies社、Transcom Instrument社、アンリツ株式会社が主要な地位を占めている。

	企業	会社概要
1	Tektronix Incorporated（アメリカ）	1946年に創立され、2007年にDanahar Corporation（アメリカ）に買収され同社の子会社となった後、2016年にDanaher社から分社したFortive社の傘下に入った。2022年現在世界21か国に拠点を構え、健康・医療、通信、モビリティ、宇宙の分野向けに信号発生器、オシロスコープ、スペクトラムアナライザなどの測定・試験機器の製造・販売を行っている。信号発生器の代表的な企業の1つである。
2	Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG（ドイツ）	1933年に設立され、70か国以上に13,000の社員がおり（2022年現在）、売上22億8000万ユーロ（2020/2021会計年度）の企業である。業界、インフラプロバイダー、政府機関の顧客を対象に各種電子資本財の開発、製造、販売にあたっている。無線通信/RFテストおよび測定、放送／メディア、航空交通管制／軍事用無線通信、サイバーセキュリティー／ネットワークテクノロジーといったすべての事業分野において、テクノロジーとマーケットの両面で主要な地位にある。
3	Keysight Technologies Incorporated（アメリカ）	2014年にAgilent Technologies社（アメリカ）から分離して設立された、エレクトロニクスと無線通信分野の製造企業であり、2022年現在14300人以上の従業員を擁する。信号発生器の代表的な企業の1つである。研究開発にも積極的に投資しており、試験・測定分野の企業のAnite社（イギリス）の買収やNTT DOCOMO社（日本）との５G通信システムに関する提携など、積極的な事業展開を行っている。
4	Transcom Instrument Company, Limited（中国）	2005年設立の、無線通信テスト機器の大手メーカー。セルラーネットワークや無線通信、高周波コンポーネント製造、各研究機関を主なマーケットとし、大学や半導体工場、通信分野等様々なフィールドでの運用実績を持つ。主な製品はネットワークアナライザの他、スペクトラムアナライザ、信号発生器などである。
5	アンリツ株式会社（日本）	1895年に設立され、売上高1059億円（2021年）、従業員数3954名（2021年、連結）、事業内容は電子計測器、食品・医薬品の品質保証システム、環境計測機器、デバイスなどの開発・製造・販売の会社である。電子計測器の製品にはシグナルアナライザ/スペクトラムアナライザ、ネットワークアナライザ、信号発生器などがある。信号発生器の代表的な企業の1つである。
6	Teledyne Lecroy, Incorporated（アメリカ）	1964年に創立された、Teledyne Technologies傘下の計測器の企業である。オシロスコープでは世界有数の企業であるが、他にも任意波形発生器、スペクトラムアナライザ、ベクトルネットワークアナライザなど様々な機器を手掛けている。
7	National Instruments Corporation（アメリカ）	1976年に創立された計測・制御機器の製造・販売を行っている会社である。特に自動テストと自動計測システムが中核の事業である。周波数分析については、RFシグナルアナライザ、リアルタイムスペクトラムアナライザ、ベクトルシグナルアナライザなどを製造・販売している。取引対象分野は半導体、モビリティ、航空宇宙・防衛・官公庁、教育・研究、ワイヤレス、エレクトロニクス、エネルギー、産業用機械、重機である。
8	AEA Technology, Incorporated（アメリカ）	医療施設から政府機関、軍隊に至るまでの市場向けのRFおよびケーブルテスト機器の大手メーカー。ベクトルネットワークアナライザー、時間領域反射率計（TDR）、SWR、反射減衰量計などを専門としている。
9	AWT Global LLC（アメリカ）	2002年にAceWavetech社（韓国）によって設立され、ワイヤレス製品を設計および製造している企業。本社をアメリカに置く。AceWavetech（AWT）製品のグローバルマーケティング、販売、サポートなども単独で行っている。製品にはパッシブ相互変調（PIM）テスター、RFIDアナライザー、波形アナライザー、レーダー信号発生器、レーダーターゲットシミュレーター、高速信号サンプリングおよび記録システムなどがある。
10	Copper Mountain Technologies（アメリカ）	世界約100か国に向けて、ベクトルネットワークアナライザとその周辺機器の製造・販売を行っている。2011年に計測グレードのUSBベクトルネットワークアナライザを世に先駆けて開発した。

4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令7項（14）ネットワークアナライザー

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（4）

ネットワークアナライザを製造している主な企業を表7-14-4に示す。これらの中でもTektronix社、Rohde & Schwarz社、Keysight Technologies社、Transcom Instrument社、アンリツ株式会社が主要な地位を占めている。

	企業	会社概要
11	B&K Precision Corporation（アメリカ）	前身のCentral Television Service Companyを経て1951年に設立された。試験・測定機器の設計・製造を行っている企業である。主な製品には、電源とDC電子負荷、信号発生器、コンポーネントテスター、オシロスコープ、スペクトラムアナライザー、マルチメーターなどがある。
12	MegiQ BV（オランダ）	回路とアンテナの測定機器を製造する企業。主な製品はベクトルネットワークアナライザとアンテナ放射特性測定システムである。
13	GS Instech Company, Limited（韓国）	2016年創業。テレコム関連機器およびテスト測定機器の研究開発、製造およびマーケティングを行っている企業。RFアナライザ製品にはベクトルネットワークアナライザの他、VSWRアナライザ、スペクトラムアナライザ、アンテナ・ケーブルアナライザなどがある。
14	株式会社アドバンテスト（日本）	1954年、タケダ理研工業株式会社として創業。1985年に社名をアドバンテストに変更。半導体デバイスの測定器などの大手メーカー。事業部門は半導体・部品テストシステム事業、メカトロニクス関連事業、サービス他の事業の3つである。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（15）
原子周波数標準器

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

【セシウム原子を基準とした秒の定義とセシウム原子周波数標準器】
　国際度量衡委員会で定義された現在の秒は、セシウム原子の特定の2つの超微細構造の準位間のエネルギー差に基づき次のように定義されている。
「セシウム133 原子の基底状態の2つの超微細準位間の遷移に対応する放射の 9 192 631 770周期の継続時間」
　この2つの準位間（エネルギー差）に相当する電磁波は、図7-15-1に示す、セシウム133原子のさまざまなエネルギー状態（超微細準位）の中の特定のエネルギー状態間のエネルギー差に相当する9,192,631,770Hzの電磁波すなわち約9.2GHzのマイクロ波である。
　図7-15-2に国際度量衡委員会の定義する1秒を作り出すためのセシウム原子一次周波数標準器の構造を示す。緑枠の部分が原子周波数標準器である。
　セシウム炉から放たれたセシウム原子に共振器中でマイクロ波を照射して、定められた超微細準位間の遷移が最も効率よく起こる周波数を標準周波数として求める。なお原子周波数標準器自体は秒の長さを定めるものであるが、長期間連続して動かすのに適した装置ではないため、時刻を定めるものではない。時刻を定めるためには水晶のように長期間動作可能な発振器と組み合わせ、発振器を原子周波数標準器で随時補正することにより精度の高い時刻を定めている。これが図7-15-2の赤枠で囲んだ部分に相当する原子時計である。

図7-15-1　秒を定義するセシウム原子の
超微細構造間の遷移エネルギー

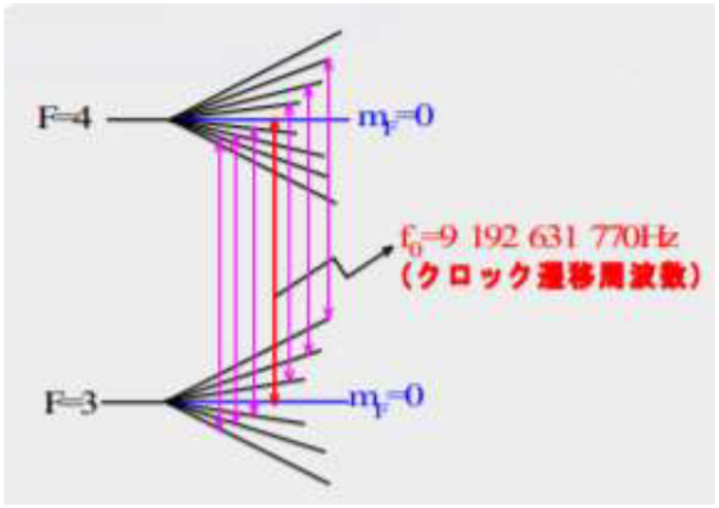
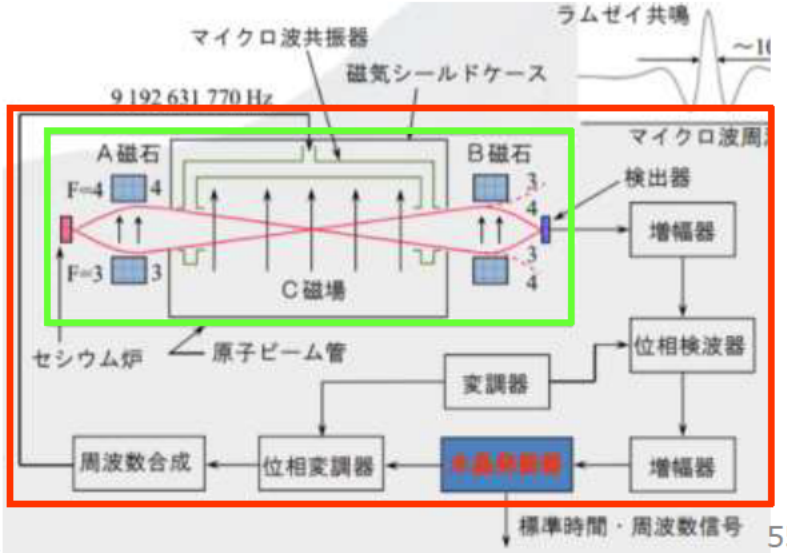


図7-15-2　セシウム原子周波数標準器と原子時計の構造



1.対象品目の概要調査（2）

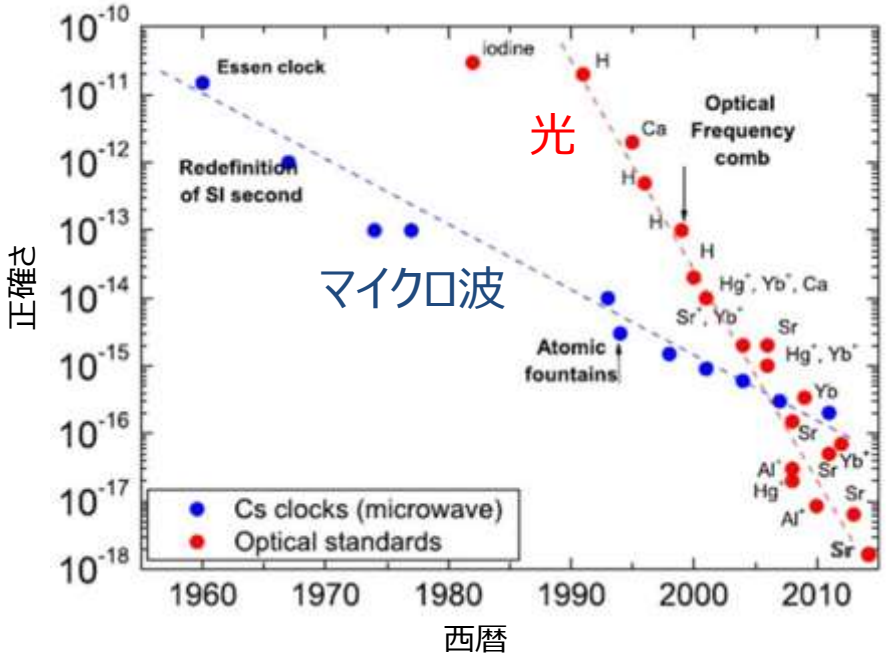
○輸出令7項（15）原子周波数標準器

【原子周波数標準の正確さ向上の歩み】

原子周波数標準器の精度を決める、原子の遷移エネルギーと共鳴するマイクロ波の共鳴周波数は、種々の要因でシフトしてしまう。主な要因は、磁場の影響、原子の運動によるドップラー効果、原子の速度分布、励起用マイクロ波の純度、装置の黒体輻射、重力の影響などであり、精度を上げるための様々な対策が検討されている。

一方で、正確さは共鳴する電磁波の周波数と関連するため、原子の遷移エネルギーを検出する電磁波をマイクロ波から周波数νがはるかに大きい光に変えたり、測定する原子数を増やすことにより、精度を何桁も上げることが可能である。光はマイクロ波より周波数が5桁高いため、原理上は光を用いることにより正確さを5桁上げることが可能である。なお既に記したとおり秒はセシウム原子の準位間遷移に基づき定義されているため、それ以外の方法により決められる秒の値は、たとえ原理上精度が向上したものであっても、セシウム原子による秒の正確さ以上の桁数で表現することはできない。そのためこれらの値は「秒の二次表現」、すなわち新しい秒の定義の候補という扱いになる。図7-15-3にマイクロ波および光を用いた原子周波数標準器の正確さ向上の歩みを示す。

図7-15-3　原子周波数標準の正確さ向上の歩み



1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

【実用的な原子周波数標準器（CPT方式、ガスセル方式）】

図7-15-2で示したような原子一次周波数標準器は定義と実際の測定条件の差を考慮した正確さを重視した装置であり、連続して運用するには適さない。それに対し、正確さをある程度犠牲にして、安定性と連続運用を重視し、さらに価格、大きさ、消費電力などの面でもより使いやすい原子周波数標準器の開発も進められてきた。

原子周波数標準器を構成するのは、主に電磁波発生部、原子ビーム発生部、温度制御部、電磁波・原子共鳴部、電磁波検出部である。また原子時計として使う場合にはさらに水晶発振器や周波数逓倍装置などが組み合わせられる。これらのそれぞれで小型化、省電力化を目指した開発が行われてきたが、ここでは特に原子周波数標準器に特徴的な技術として、コヒーレント・ポピュレーション・トラッピング（CPT）方式とガスセル方式について説明する。

原子周波数標準器ではマイクロ波に相当するエネルギー差を基に秒を定義するため、マイクロ波が使われてきた。しかし周波数約9.2GHzのマイクロ波の波長は約3cmであり、これを扱うには少なくとも1cmを超える導波路を必要とし、全体では数百cm^3もの体積になってしまうため、小型化の妨げとなっていた。この問題を解決したのがCPT方式である。これは2種類のレーザー光の周波数差が原子のマイクロ波遷移の周波数に一致した時に原子の光吸収が見られなくなる現象を利用したものである。これによりマイクロ波を用いずにマイクロ波遷移の周波数を測定することが可能になった。

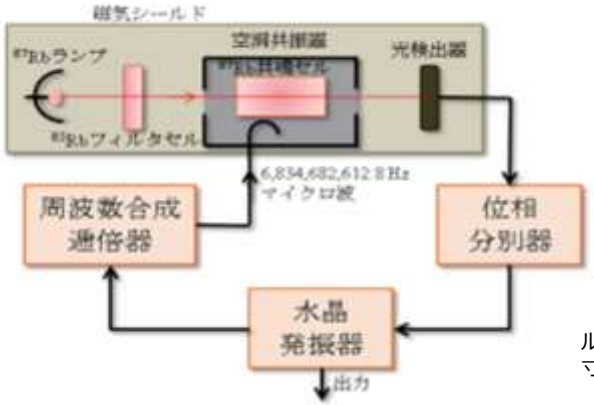
図7-15-2でも示したような原子周波数標準器ではセシウム原子のビームを作ってこれに励起光やマイクロ波を照射していたが、セシウム原子などをガラスなどのセルに封じ込めたガスセル方式では原子ビームを扱う必要がなくなり、装置を簡易にすることが可能になり、設置場所の制約も少なくなる。

これらの技術や、温度制御部など他の部分の改良、水晶発振器や周波数逓倍装置などを使わない工夫なども進み、原子周波数標準器・原子時計の小型化、省電力化などが進んでいる。

原子周波数標準器で現在最も広く使われているのはルビジウム原子である。セシウム原子よりも室温での蒸気圧が高く加熱用ヒーター無しでも蒸気になる省スペース・消電力性や、共鳴波長780nmはコンパクトディスクプレーヤーのピックアップの波長と同じでありレーザーダイオードが安価に入手できるなどの利点の他、連続運転に適するなどの特徴を持つ。図7-15-4にルビジウム原子周波数標準器を用いた発振器の模式図と製品例を示す。

さらにチップスケール原子時計と呼ばれるような、半導体チップ並みの大きさの原子時計も実用化されており、小型化、省電力化の検討も続けられている（図7-15-5）。

図7-15-4　ルビジウム原子周波数標準器を用いた発振器の模式図と製品例





ルビジウム周波数標準発振器XPRO（丸文株式会社）
寸法 ： 12.7mm（W） x 9.4mm（L） x 38.1mm（H）

図7-15-5　チップスケールセシウム原子時計の製品例



超小型原子周波数発振器（Microchip社）
寸法 ： 40mm（L） x 35mm（W） x 12mm（H）
消費電力：125mW以下

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（1）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令や輸出貿易管理令の運用についての解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(15)	6		十六	原子周波数標準器であって、次のいずれかに該当するもの イ ルビジウムを用いていないものであって、30日間連続して発振したときの安定度が1,000億分の１未満のもの ロ 宇宙用に設計したもの 宇宙用に設計した 地表から１００キロメートルを超える高度で動作するよう設計若しくは製造されたこと又は試験に合格して適格とされたことをいう。特定の貨物が試験に合格したことにより宇宙用に設計したと判定されても、同じ生産工程又は一連の型式である他の貨物は、個々に試験されなければ宇宙用に設計したことにならない。	30日間連続して発振したときの安定度が1,000億分の１未満 30日間連続して発振したときの安定度が1,000億分の１未満 消費電力が１ワット未満

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3A2	g	1	Atomic frequency standards being any of the following: 1. "Space-qualified"; "Space-qualified" Designed, manufactured, or qualified through successful testing, for operation at altitudes greater than 100 km above the surface of the Earth. Note A determination that a specific item is "space- qualified" by virtue of testing does not mean that other items in the same production run or model series are "space-qualified" if not individually tested.

比較原文

・経済産業省 安全保障貿易管理
貨物・技術のマトリクス表
（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
PUBLIC DOCUMENTS Volume II
List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（2）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(15)	6		十六	ハ　宇宙用に設計していないものであって、次の（一）から（三）までのすべてに該当するもの （一）　ルビジウムを用いたもの （二）　30日間連続して発振したときの安定度が1,000億分の１未満のもの （三）　消費電力が１ワット未満のもの	30日間連続して発振したときの安定度が1,000億分の１未満 消費電力が１ワット未満

Wassenaar規制番号					Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番				
3A2	g	2			2. Non-rubidium and having a long-term stability less (better) than 1 x 10^-11/month; or
		3			3. Non-"space-qualified" and having all of the following:
			a		a. Being a rubidium standard;
			b		b. Long-term stability less (better) than 1 x 10^-11/month; and
			c		c. Total power consumption of less than 1 Watt;

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（１）

【民生用途】

秒は国際単位系（SI）で他の単位の基となる単位であるため、秒を定める原子周波数標準器は基本物理量を決めたり、相対性理論を検証するためなどに使われるが、ここではより一般的な用途について記す（表7-15-1）。

原子周波数標準器は、通常はクオーツ時計の水晶発振器と組み合わせて水晶発振器の発振周波数を安定化させることにより、正確な時計として使われる。これが原子時計である。原子時計は、全球測位衛星システム（GNSS）に使われており、GNSSを利用することによって航空機や船舶などの航法支援、カーナビゲーションなど移動体の測位に使われる。自動運転には高精度の測位が必須である。なおGNSSによる時刻同期はGNSSから受信器への片方向通信であるため通信経路の大気などによる遅延変動の影響を受けるが、地球の局間で静止衛星の双方向で時刻同期を行うことで信号の伝播経路の変動要因の影響を相殺して除くことができ、より高精度の時刻同期が可能となる。

放送・通信分野では時刻合わせと周波数合わせに利用されている。デジタル通信では送信側・受信側の周波数誤差を減らすことで隣接周波数との混信防止の周波数帯を狭くすることができ高速大容量のデータ伝送が可能になる。デジタル機器では入力信号のサンプリングレートの基準となるマスタークロックに用いることにより、高品質な信号を扱うことが可能になる。携帯電話などの電波によるデータ送受信では雑音や干渉の悪影響を少なくし、秘匿性を増すために、スペクトラム拡散という方式が使われるが、その一つである周波数ホッピング方式にも使われる。これは送信信号の周波数を予め受信側と定めたパターンに従って次々と変えて送信するもので、特定の周波数で発生するノイズの影響が少なくなり、秘匿性にも優れ、複数のデータを並行して送ることもできる。原子時計で送受信機の時刻同期を精密に行って周波数の切り替えを高精度・高頻度に行うことにより、 より多くのデータを送り、秘匿性も増すことができる（図7-15-6）。

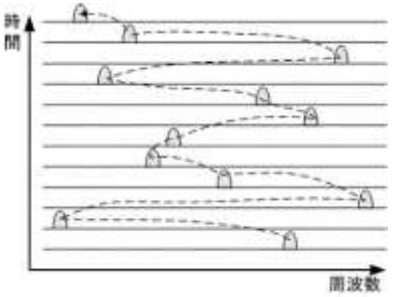
高精度の原子時計は高度による重力差を時間の進み方の差として検知できるため、測量や地殻変動監視、資源探査への利用が検討されている。

超長基線電波干渉法は、複数の電波望遠鏡で受けた信号を時刻を基準に重ね合わせて巨大な望遠鏡に相当する信号を得る方法である。

表7-15-1　原子周波数標準器の用途（民生用途）

目的	用途	
測位	全球測位衛星システム（GNSS）	航法支援（航空機、船舶）
		ナビゲーション（乗用車）
		自動運転（自動車、建設機器、農業機器）
	重力センサー	土木測量（高さ測定）、測地測量（標高測定）、資源探査、地殻変動監視
放送、通信	電波時計基地局	時刻同期、周波数合わせ
	携帯電話基地局	時刻同期、スペクトラム拡散（周波数ホッピング）
	放送局	電波周波数同調
	高速大容量デジタル通信網	時刻同期
	ﾃﾞｼﾞﾀﾙ機器ﾏｽﾀｰｸﾛｯｸ	サンプリングレート合わせ
時刻合わせ	超長基線電波干渉法（VLBI）	時刻同期
	深宇宙探査機	時刻同期、位置決定

図7-15-6　周波数ホッピングのイメージ



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（２）

【軍事用途】

表7-15-2に軍事用途の例を示す。

衛星に原子周波数標準器を搭載して地表や空中での測位をするためのシステムであるGNSSは、もともと米国が軍事利用を目的に開発したものであり、2000年に当時唯一のGNSSの保有国であった米国が衛星からの電波にスクランブルをかけることを止めて民間でも精密な測位ができるようになるまでは、もっぱら軍事目的で使われていた。現在も軍事用途で民間向けより高精度の信号を利用して世界各国で軍用機、軍用船舶、軍用車両、歩兵などの航法管制や測位に使われている。さらに、スマート爆弾、巡航ミサイル、大陸間弾道弾などの精密誘導兵器にも使われる。

また無線通信や有線を含むデジタル通信においても民間の場合と同様、時刻や周波数の同期のために原子周波数標準器が使われており、高速大容量通信を支えている。データ通信では周波数ホッピングにより外部からの電磁波などによる妨害や傍受への耐性を高めている。

送受信装置が振動に弱いドップラーレーダーでは、ドップラーレーダーの送受信装置の分離により、例えば受信器のみを搭載した軍用機は電磁的に無音となり、また送信器は振動の影響の小さく戦闘地域からも離れた場所に置くことができる。また受信器は送信器由来の位相ノイズに妨害されることがなくなるため感度を大幅に上げることができる。送信器と受信器を分離するためには送信器がいつパルスを発するかを受信器が正確に認識する必要があり、送受信機の時刻同期が重要である。

敵味方識別システムでは秘匿性を増すため周波数ホッピングを用いるとともに、コード（いわゆる合言葉）を一定期間で頻繁に変えて信頼性を増すため、精密な時刻同期が重要である。

表7-15-1の超長基線電波干渉法と同様に、軍事の無線探知でも離れた複数の受信器で探知することで感度を高めることができる。

レーダーや電子戦機器、妨害電波装置などから発せられる電磁波の情報（電子インテリジェンス：ELINT）を収集する場合には、広範囲の周波数の微弱な信号を正確に測定する必要があり、また、複数の受信器間の同期を精密に行うために、安定して正確な周波数源が必要である。

地中や海中の構造物の探査には、重力センサーの利用が検討されている。

表7-15-2　原子周波数標準器の規制対象となり得る用途

目的	用途	
測位・測距	全球測位衛星システム（GNSS）	航法支援（航空機、船舶）
		ナビゲーション（車両、兵員）
		自動運転（無人飛行機、無人船舶、無人車両）
		誘導（スマート爆弾、巡航ミサイル、弾道弾）
	GNSSに頼らない自立航行	時刻同期（潜水艦）
	ドップラーレーダー	分解能改善
	重力センサー	地中・海中構造物探査
通信	高速大容量デジタル通信網	時刻同期
	データ通信の妨害・傍受耐性	スペクトラム拡散（周波数ホッピング）
	敵味方識別システム（IFF）	時刻同期、スペクトラム拡散（周波数ホッピング）
	無線探知	時刻同期
	電子インテリジェンス（ELINT）収集	周波数合わせ

3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

【宇宙用に設計した】

貨物等省令第6条第十六号ロでは、宇宙用に設計した原子周波数標準器をすべて規制対象としている。通商産業省の通達「輸出貿易管理令の運用について」によれば、「宇宙用に設計した」とは「地表から１００キロメートルを超える高度で動作するよう設計若しくは製造されたこと又は試験に合格して適格とされたことをいう。」とされている。

宇宙用の性能に関する具体的な規制内容は示されておらず、また共通の規格も存在しないため、宇宙用に設計したか否かは製品ごとに確認する必要がある。例えばMicrochip社の宇宙用製品のカタログでは表7-15-3のような項目が仕様として掲載されている。その他重量、大きさ、消費電力などにも制限があることが予想される。

表7-15-3　宇宙用原子周波数標準器の仕様項目の例

耐電離放射線総量（耐TID）		入射した全放射線の累積による影響
耐シングルイベント効果（耐SEE）	シングルイベントトランジエント（SET）	一過性の放射線照射の影響
	シングルイベントラッチアップ（SEL）	
	シングルイベントアップセット（SEU）	
	シングルイベントゲートラプチャ（SEGR）	
温度安定性		
動作温度レンジ		
耐衝撃		
耐振動		

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（１）

原子周波数標準器は、観測対象の原子やイオンの制御方法、観測する電磁波の種類に応じて表7-15-4のように分類できる。記載した原子・イオン種は代表例である。

しかし規制は原子周波数標準器の方式から該否を一律に判断することはできず、個別の製品の仕様にあたって判断することが必要である。

規制パラメータ　輸出令第7項(15)

原子周波数標準器であって、次のいずれかに該当するもの

イ　ルビジウムを用いていないものであって、３０日間連続して発振したときの安定度が１,０００億分の１未満のもの

ロ　宇宙用に設計したもの

ハ　宇宙用に設計していないものであって、次の（一）から（三）までのすべてに該当するもの

（一）　ルビジウムを用いたもの

（二）　３０日間連続して発振したときの安定度が１，０００億分の１未満のもの

（三）　消費電力が１ワット未満のもの

表7-15-4　原子周波数標準器の方式と使われる原子・イオンの例

原子・イオンの電磁波発生形態			受動型			能動型
原子・イオンの制御方法 ＼ 観測に使う電磁波			マイクロ波	CPT	光	マイクロ波（メーザー）
受動型	原子ビーム	金属を熱して飛び出した原子ガスを制御してビームにする	セシウム原子			
	原子泉	原子の動きををレーザーで遅くした後、垂直に打ち上げて自由落下させる	セシウム原子 ルビジウム原子			
	ガスセル	密閉セル中に気体の原子を封じ込める		セシウム原子 ルビジウム原子		
	単一イオントラップ	1つのイオンを四重極電場中の電場ゼロ点に捉える	イッテルビウムイオン		アルミニウムイオン カルシウムイオン ストロンチウムイオン インジウムイオン 水銀イオン イッテルビウムイオン	
	光格子	光の定在波中に多数の原子を捉える			水銀原子 ストロンチウム原子 カドミウム原子 イッテルビウム原子	
能動型	原子ビーム	分子ガスを高周波放電で原子ガスにした後ビームにする				水素原子

いずれの方式も規制対象となり得る。規制対象か否かは個別の製品の仕様で判断する必要がある

4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査（２）

規制の範囲の例を図7-15-7に示す。安定度測定時のゲート時間(τ) は規定されていない。

また実際の原子周波数標準器に規制を当てはめた例を図7-15-8に示す。

規制パラメータ　輸出令第7項(15)

原子周波数標準器であって、次のいずれかに該当するもの

イ ルビジウムを用いていないものであって、３０日間連続して発振したときの安定度が１,０００億分の１未満のもの

ロ 宇宙用に設計したもの

ハ 宇宙用に設計していないものであって、次の（一）から（三）までのすべてに該当するもの

（一） ルビジウムを用いたもの

（二） ３０日間連続して発振したときの安定度が１，０００億分の１未満のもの

（三） 消費電力が１ワット未満のもの

図7-15-7　輸出令第7項(15)の規制対象

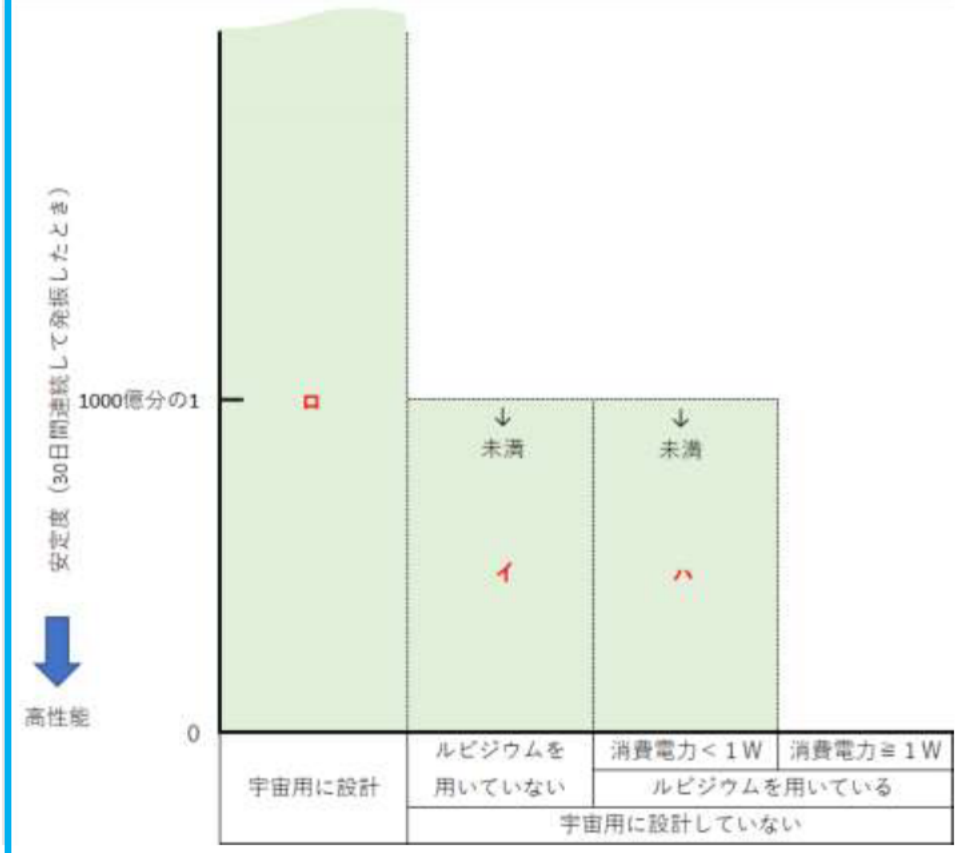
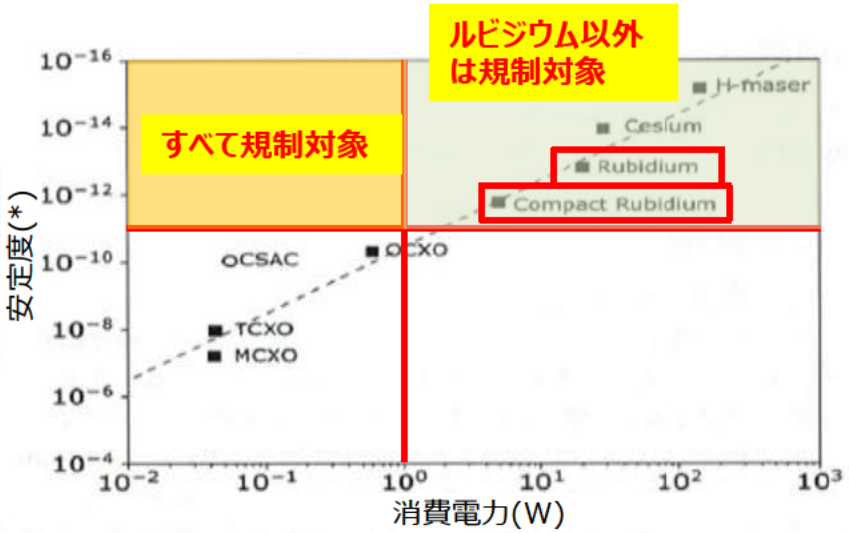


図7-15-8　発振器･原子周波数標準器の典型値と宇宙用以外の規制パラメータとの関係



(*)このグラフの安定度は30日間連続して発振したときの値とは限らない

MCXO：ﾏｲｸﾛｺﾝ補償水晶発振器
TCXO：温度補償水晶発振器
CSAC：ﾁｯﾌﾟｽｹｰﾙ原子時計
OCXO：温度制御型水晶発振器

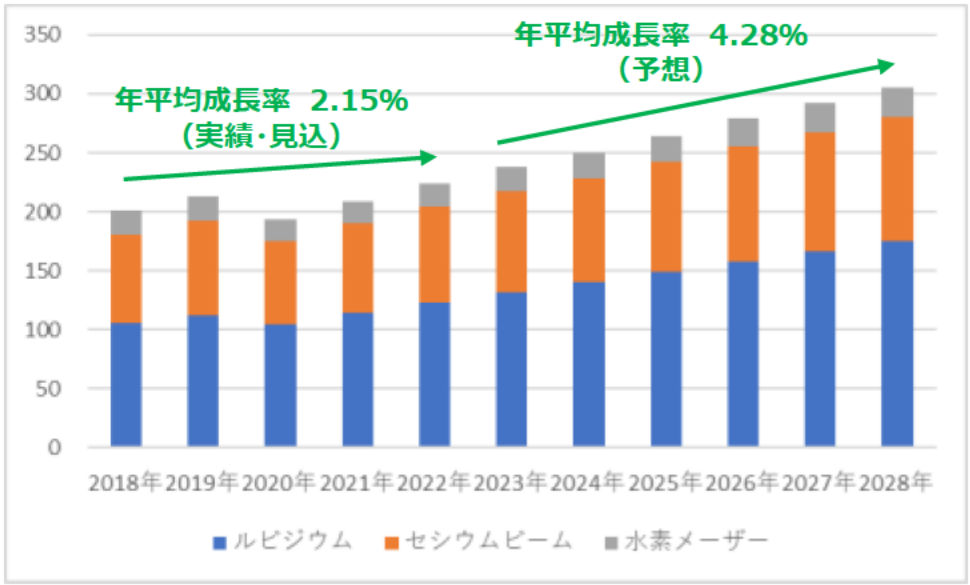
4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（1）

原子周波数標準器を搭載した原子時計としての方式別市場規模を図7-15-9に示す。2018年から2022年までが実績値および見込値、2023年以降は予想値である。

図7-15-9　原子時計の市場規模（方式別）



百万USドル

	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年
ルビジウム	105.29	112.25	104.70	114.29	123.56	132.03	139.97	149.02	158.27	166.52	175.59
セシウムビーム	75.83	79.76	70.47	75.57	80.45	84.96	88.84	93.04	97.55	101.17	105.33
水素メーザー	20.19	21.15	17.92	18.84	19.89	20.86	21.64	22.51	23.46	24.24	24.95
合計	201.31	213.16	193.09	208.70	223.90	237.85	250.45	264.57	279.28	291.93	305.87

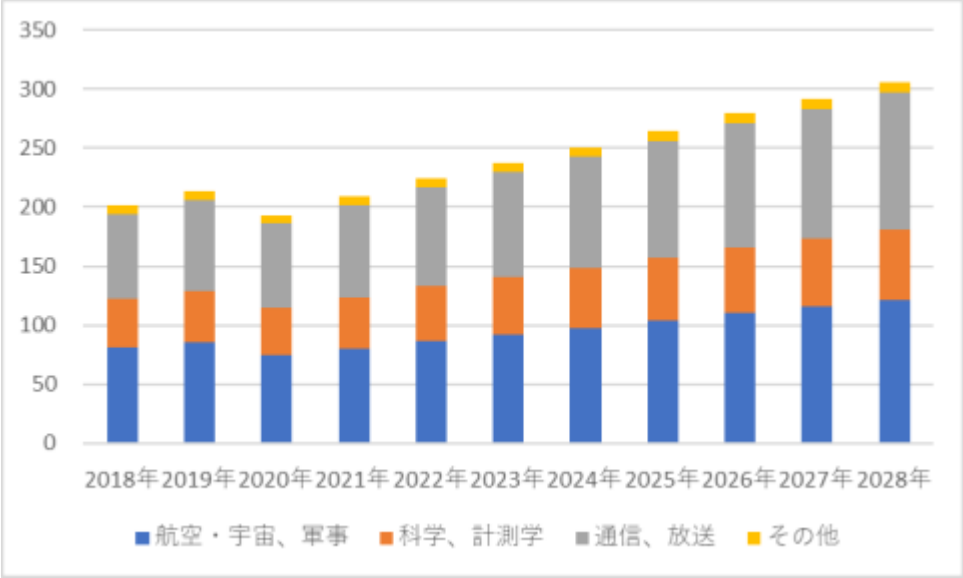
4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

原子周波数標準器を搭載した原子時計としての分野別市場規模を図7-15-10に示す。2018年から2022年までが実績値および見込値、2023年以降は予想値である。

百万USドル　　図7-15-10　原子時計の市場規模（分野別）



百万USドル

	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年
航空・宇宙、軍事	80.81	85.44	74.11	79.98	86.74	91.85	97.38	103.93	109.96	115.81	121.42
科学、計測学	41.43	43.55	41.03	43.65	46.57	49.10	51.25	53.40	55.46	57.46	59.33
通信、放送	71.93	76.76	71.34	78.07	83.24	89.24	93.87	98.92	105.25	109.80	116.05
その他	7.15	7.42	6.62	7.00	7.36	7.67	7.95	8.32	8.62	8.86	9.08
合計	201.31	213.16	193.09	208.70	233.90	237.85	250.45	264.57	279.28	291.93	305.87

4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

原子周波数標準器の主な企業を表に示す。概要に記載した通り、既に買収された企業も含まれる。

	企業	会社概要
1	Microsemi Corporation（アメリカ）	1959年設立の航空宇宙・防衛、通信、データセンタ、産業向けの半導体とシステムソリューションを提供する企業。2018年にMicrochip社（アメリカ）に買収された。
2	Teledyne Technologies Incorporated（アメリカ）	1960年にTeledyne Incorporatedとして設立され、1996年から1999年の間、Allegheny Teledyne Incorporatedの傘下にあったが1999年に他の2つの事業体と共に独立してTeledyne Technologiesが発足した。航空宇宙・防衛、工場の自動化、大気および水質環境モニタリング、電子機器の設計・開発、海洋学研究、エネルギー、医用画像、製薬研究などの分野向けの測定、送信、分析機器の製造会社である。
3	Stanford Research Systems, Incorporated（アメリカ）	1980年創立の、研究および産業向けの試験機器の設計・製造を行っている会社である。ルビジウム周波数標準器、ルビジウム発振器以外の製品には、ロックインアンプ、スペクトラムアナライザ、質量分析計、RF信号発生器、デジタル遅延発生器、クロックシンセサイザなどがある。
4	Microchip Technology Incorporated（アメリカ）	1989年設立の半導体製造業者であり、産業、自動車、消費者、航空宇宙および防衛、通信、コンピューティングの各市場向けにマイクロコントローラ、メモリ、アナログICなどを主に製造販売している。製品には実験室グレードのシステム原子時計と、原子共振技術に基づく小型のPCB搭載型原子発振器がある。2018年にMicrochip社（アメリカ）を買収した。
5	Frequency Electronics, Incorporated（アメリカ）	1962年設立。子会社とともに、地上、海上、空中、宇宙のターミナルおよびプラットフォーム向けのPrecision Time and Frequency（PT&F）製品の世界的な主要サプライヤーであり、商業および政府/軍事システムのサプライヤーが使用している。製品にルビジウム周波数標準器、軍事用ルビジウム推奨発振器がある。
6	Excelitas Technologies Corporation（アメリカ）	Perkin Elmer社（アメリカ）のスピンオフ企業として2010年に設立。自動車、消費者製品、防衛および航空宇宙、産業、医療、安全およびセキュリティ、科学の各セクター向けに、フォトニックイノベーションを提供する企業。製品には宇宙用のルビジウム原子周波数標準器がある。
7	SpectraDynamics, Incorporated（アメリカ）	1994年設立。時間および周波数アプリケーション向けの高性能計装を専門としている企業。製品にはルビジウム原子時計がある。
8	AOSense, Incorporated（アメリカ）	スタンフォード大学で開発された革新的な研究をスピンオフし、2004年設立。精密ナビゲーション、重力測定、および計時のための原子光学デバイスの開発・製造を行う企業。製品には、ジャイロスコープ、加速度計、慣性測定装置（IMU）、重力計、重力勾配計、および原子周波数標準が含まれる。アメリカのDARPA（国防高等研究計画局）、空軍、陸軍、海軍、NASA（航空宇宙局）、NSF（国立科学財団）、DTRA（国防脅威削減局）、および諜報機関が資金提供する多数の政府支援プログラム向けに、最先端のコールドアトム技術を設計および構築してきた。
9	Muquans（フランス）	2011年フランスの科学アカデミーから独立して発足した企業。高性能重力センシング、時間と周波数のアプリケーション、およびレーザーソリューションを専門とするハイテク企業。産業スケールでレーザ冷却量子操作技術を利用する世界初の企業となった。このブレイクスルー技術をベースにして、量子重量計、原子時計、、ファイバを使った周波数伝達システム、超高性能レーザシステムなどを提供している。Absolute Quantum Gravimeterはレーザー冷却法でトラップしたルビジウム原子を真空中で自由落下させて重力加速度Gの計測を行う。2021年、iXblue社（フランス）に買収されて同社の子会社となった。

4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（4）

原子周波数標準器の主な企業を表に示す。概要に記載した通り、既に買収された企業も含まれる。

	企業	会社概要
10	Orolia SAS（フランス）	2006年設立。政府、軍事・防衛、民間航空市場を対象とし、測位、航法、タイミング（PNT）の製品を扱う企業。主な製品は、ルビジウムと水素メーザーの発振器や原子時計など。
11	IQD Frequency Products Limited（イギリス）	1973年設立。低コストの商用グレードの製品から、信頼性の高い産業および自動車アプリケーションで使用される製品まで、包括的な周波数製品を提供している企業。製品の例として、クォーツクリスタル、時計発振器、自動車用水晶振動子および発振器、VCXO、TCXO、VCTCXO、OCXO、ルビジウム発振器などがある。
12	Spectra Time S.A.（スイス）	1995年設立。電気通信、防衛、ナビゲーション、放送、計装、宇宙セクター向けに、高性能クロックおよびテストセットソリューションを提供している。製品にはルビジウム原子時計がある。Orolia Group（スイス）の傘下にある。
13	Oscilloquartz S.A.（スイス）	1949年設立。ネットワーク同期技術に関する製品を提供している。現在はADVA Optical Networking SE（ドイツ）の傘下にある。製品にはセシウム原子時計がある。
14	T4Science S.A.（スイス）	Neuchatel天文台（スイス）のメーザー時計技術を買収して2006年に設立された。コンパクトなメーザー製品の製造とマーケティング、サービスを提供している。
15	AccuBeat Limited（イスラエル）	1993年設立の半導体、電子部品製造会社。製品には、ルビジウム周波数標準器、GPS関連製品、なりすまし防止・サイバー製品、重要インフラ向けファイアウォール、NTP/PTPタイムサーバ、宇宙製品、携帯型原子時計などがある。
16	Vremya-CH JSC（ロシア）	1993年設立。計時と周波数比較のための高精度無線測定装置の開発と製造を行う企業。製品は、宇宙用途の水素メーザー、水素の周波数と時間の基準、ルビジウム発振器、 周波数および位相コンパレータ、電気通信ネットワーク用の一次基準発振器、原子時計アンサンブルシステムなどである。
17	Chengdu Spaceon Electronics Corporation, Limited（中国）	2004年設立。時間周波数製品と北斗衛星測位システムアプリケーションの研究開発、設計、製造、販売に携わってきた。製品は主にルビジウム原子時計、水晶部品、マイクロ波アセンブリ、時間周波数ボードとモジュール、時間同期システム、北斗衛星アプリケーション製品などである。
18	中国航天科工集団有限公司（CASIC）（中国）	1950年設立。国有企業で中国の宇宙計画の主要請負業者。傘下の組織とともに、宇宙船、ロケット、戦略および戦術ミサイルシステム、地上設備を設計、開発、製造している。製品にはルビジウム原子時計があり、中国のGNSS衛星の北斗にも搭載されている。

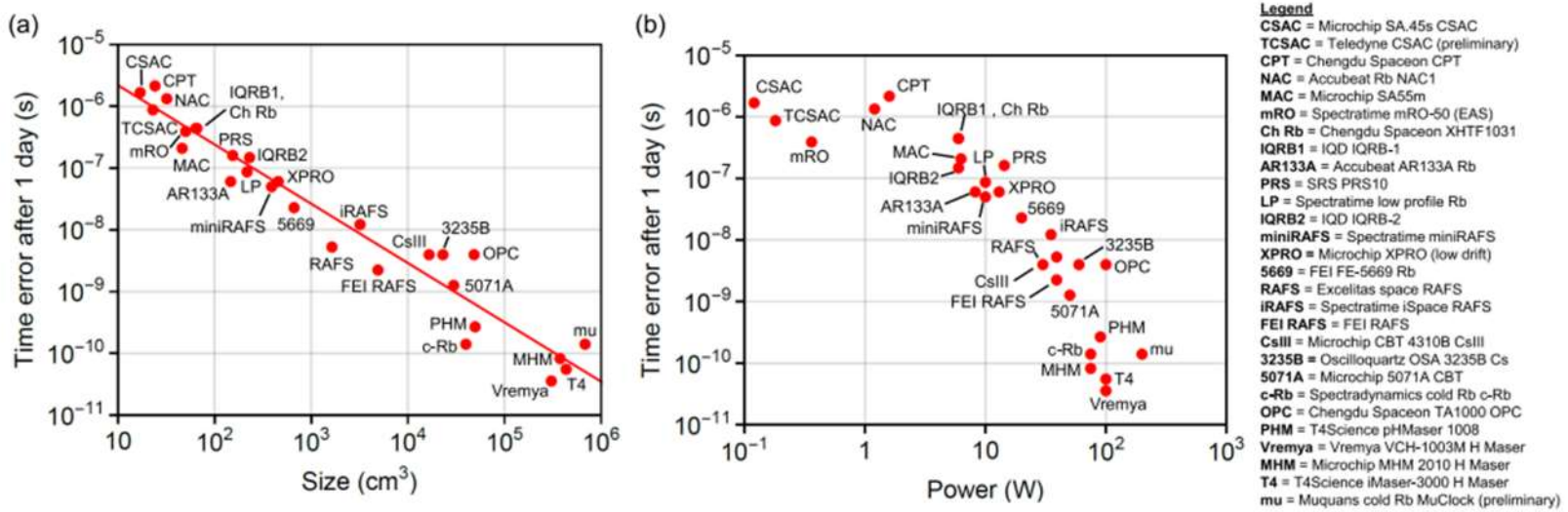
4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（5）

2021年時点での、原子時計各社の主な製品の性能比較を図7-15-11に示す。

図7-15-11　原子時計製品の性能比較



参考資料

1.対象品目の概要調査

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

全ての原子は各原子に固有の複数のエネルギー状態（準位）を有している。例えば原子を構成する電子がよりエネルギー準位の高い外側の軌道に遷移するには外部からのエネルギーの吸収を伴い、反対にエネルギー準位の低い内側の軌道に遷移するには外部へのエネルギーの放出を伴う（図7-15-12）。このような電子の存在する軌道の位置（軌道角運動量）は原子のエネルギー準位を決める最も大きい要素であり、電子が最も安定な軌道に存在する場合を基底状態というが、原子のエネルギー状態を決める要素にはその他に原子を構成する電子、陽子、中性子のスピン（固有角運動量）がある。固有角運動量のエネルギー状態への影響は、軌道角運動量の影響よりもはるかに小さいため、原子のエネルギー状態は、軌道角運動量によるエネルギー準位を中心に、電子のスピンと電子の軌道角運動量の相互作用によるエネルギー準位の分裂である微細構造と、さらに電子スピンと核スピンの磁気モーメント間の相互作用によるエネルギー準位の分裂である超微細構造で表される。原子が磁場の中に置かれた場合には、超微細構造はさらに細かい準位に分裂する。（図7-15-13）。

図7-15-12　原子のエネルギー準位の変化

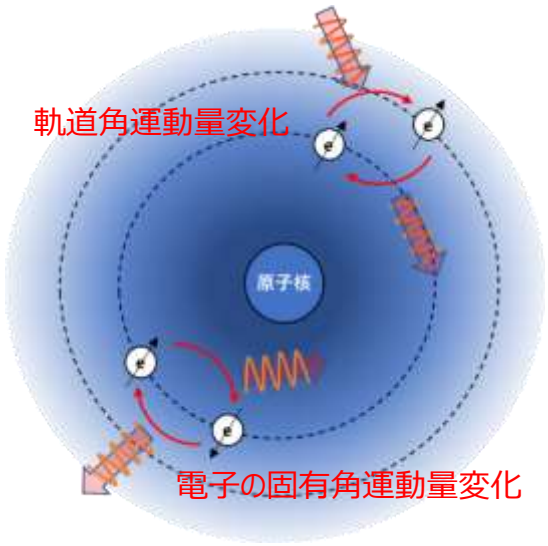
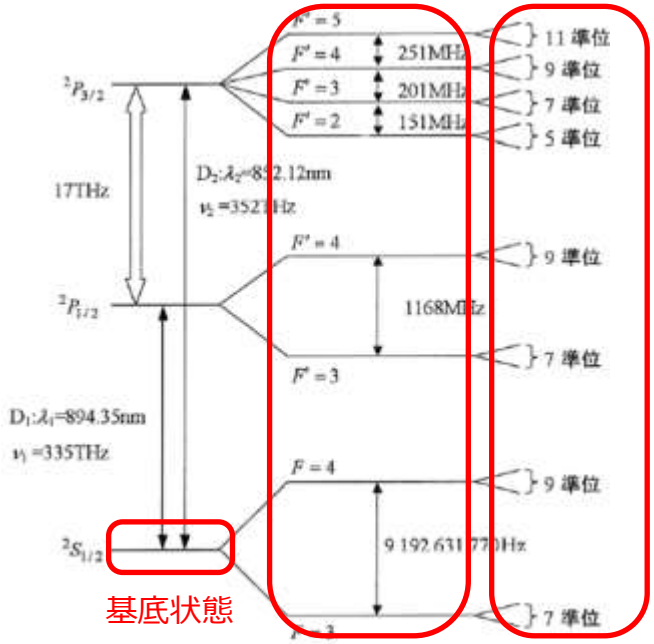


図7-15-13　原子のエネルギー準位の構造
（セシウム原子の例）



1.対象品目の概要調査

○輸出令7項（15）原子周波数標準器

この原子のエネルギー準位の値は連続しておらず飛び飛びの一定の値をとる。すなわち量子化されている。従って、原子があるエネルギー準位から別のエネルギー準位に遷移する際には、2つのエネルギー準位の差に応じた一定のエネルギーを吸収または放出する（図7-15-14）。

国際度量衡委員会で定義された現在の秒は、セシウム原子の特定の2つの超微細構造の準位間のエネルギー差に基づき次のように定義されている。

「セシウム133 原子の基底状態の2つの超微細準位間の遷移に対応する放射の 9 192 631 770周期の継続時間」

この2つのエネルギー差に相当する電磁波は、図7-15-13に示す特定の超微細準位間のエネルギー差に相当する9,192,631,770Hzの電磁波すなわち約9.2GHzのマイクロ波である。

図7-15-15に国際度量衡委員会の定義する1秒を作り出すためのセシウム原子一次周波数標準器の構造を示す。

セシウム原子はまず軌道角運動量を揃えられる。軌道角運動量間のエネルギー差に相当する電磁波は光であるためレーザー光を照射して軌道角運動量を揃える（①）。さらにマイクロ波を照射して、定められた超微細準位間の遷移が最も効率よく起こる周波数を標準周波数として求める（②）。なお図7-15-13に示したとおり超微細準位は磁場の影響でさらに細かい準位に分裂するため、測定はこの磁場で分裂するさらに細かい準位の中の特定の準位間の遷移を測定するため、一定の磁場の磁気シールド内で行われる（③）。

秒の定義は、電磁場がないことの他にも、海抜0m、真空中、絶対零度、セシウム原子が静止していることという条件下での定義となっており、実際の測定条件と合わない場合が多いため、必要に応じて測定条件を近づけたり、補正をしている。現在用いられているセシウム原子一次周波数標準器ではレーザー光照射でセシウム原子の軌道角運動量を揃える光励起方式の代わりに、セシウム原子の運動速度をレーザー光で抑えた後に上方に打ち上げ、重力で落下する比較的長い時間でマイクロ波を照射して測定することにより周波数精度を向上させた原子泉方式が使われており、2007年から運用されている。

図7-15-14　秒を定義するセシウム原子の超微細構造間の遷移エネルギー

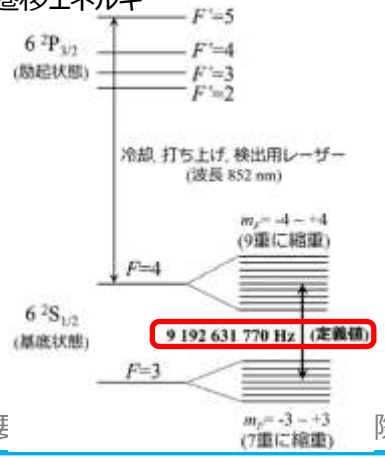
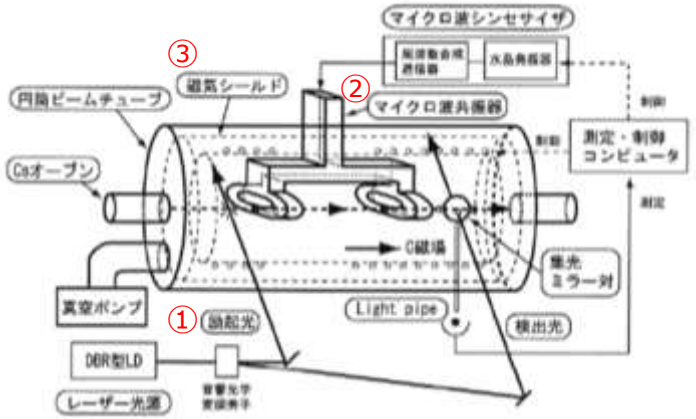


図7-15-15　セシウム原子一次周波数標準器の構造



1.対象品目の概要調査

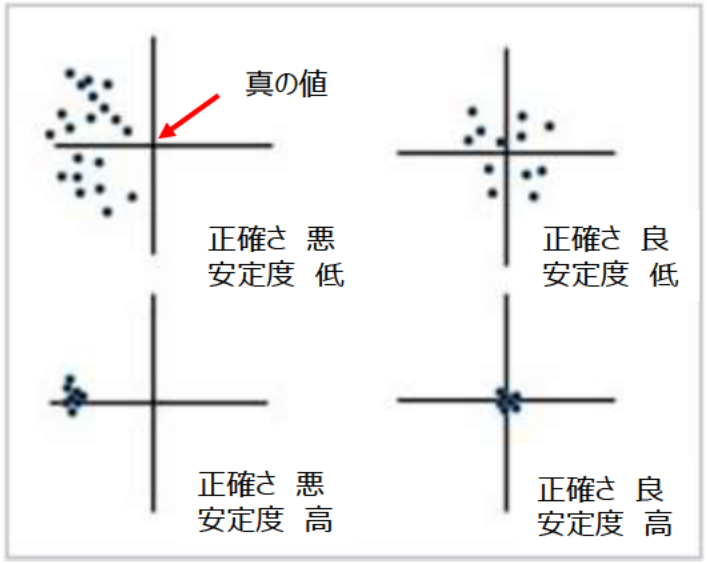
○輸出令7項（15）原子周波数標準器

原子周波数標準器が原子の遷移周波数を測定する値は、原子への外部からの撹乱要因に起因するばらつきがある。原子周波数標準器の測定性能を表す指標として、正確さあるいは確度あるいは精度（系統的不確かさ）と安定度（統計的不確かさ）の2つがある（図7-15-16）。

正確さは遷移周波数の測定値の平均値が原子の真の遷移周波数からどれくらいずれているかを表す。

安定度は測定値がどれくらいばらついているかを示す。換言すると安定度は真の周波数からのずれではなく周波数の変動を示す指標である。原子周波数標準器の安定度の評価に計測値と平均値の差を基にした通常の分散（標準偏差）を用いると、周波数が長期にわたって一定方向にずれていく場合には一定の値に収束せず発散してしまう。また、平均値は全ての測定が終了しないと得られないため、分散値も全ての測定が終了しないと得られないことになる。そのため、長期間にわたる原子周波数標準器の安定度の評価には、計測値と一つ前の計測値の差を基にしたアラン分散$\sigma^2_y(\tau)$（式1）が使われ、値が小さいほど安定度が優れていることを示す。大まかに言うと、アラン分散は測定時間τ間の周波数の平均値を繰り返して測定した場合、連続する2回の平均値の違いがどれくらい小さいかを示す目安である。一般にτが1秒程度の場合を短期安定度、τが100秒以上の場合を長期安定度という。短期安定度は共鳴スペクトルの線幅とコントラスト（S/N比）により決まり、長期安定度は装置の経年劣化による共鳴周波数のシフトにより悪化する。原子周波数標準のアラン分散の典型例を図7-15-17に示す。原子周波数標準器においては、どれくらい早く安定度が一定以下の数値になるかも重要な性能である。

図7-15-16　正確さと安定度

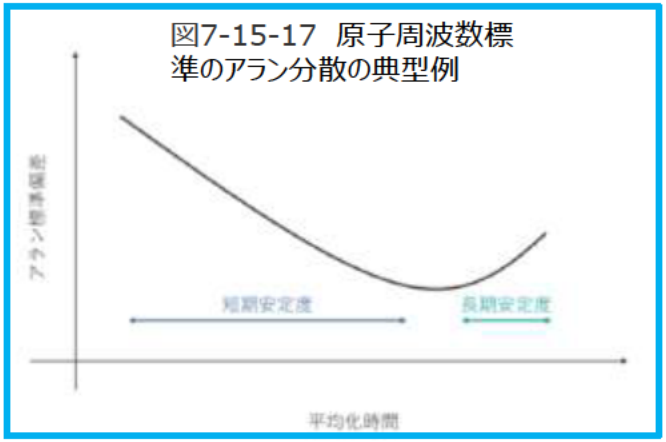


式1　アラン分散

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \left[y(i+1) - y(i) \right]^2$$

τ：周波数測定器の測定時間間隔（ゲート時間）
M：測定値yの数
y_i：i番目の測定値

図7-15-17　原子周波数標準のアラン分散の典型例



目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（15の2）

スプレー冷却方式の熱制御装置

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出貿易管理令第7項（15の2）スプレー冷却方式の熱制御装置

【熱制御】

熱制御とは、許容し得る範囲内に温度を制御することである。

熱制御には，幾何学的形状や材料の熱物理特性の選択により、伝導及び放射の伝達路を調整して許容温度範囲内に収めようとする受動型の熱制御と，ヒータや冷却装置などを用いる能動型熱制御がある。

ヒータや冷却装置による能動型温度制御では、出力のON・OFFのタイミングと出力量により、表7-152-1に示したような種類がある。

実際の熱制御装置を図7-152-1に示す。

図7-152-1　熱制御装置



表7-152-1　温度制御の種類と特徴

制御の種類	長所	短所
ON・OFF動作	制御が簡単。オフセットの発生がない。	オーバーシュート、ハンチングがおきる。
比例動作	オーバーシュート、ハンチングが小さい。	安定制御まで時間がかかる。オフセットが発生する。
積分動作	オフセットを打ち消す。	比例動作より、さらに安定になるまで時間がかかる。
微分動作	応答を早くする。	単独では制御できない。（比例動作と組み合わせて使用する）
PID動作	最もよい制御特性が得られる。	PIDパラメータの設定が必要

1.対象品目の概要調査（2）

○輸出貿易管理令第7項（15の2）スプレー冷却方式の熱制御装置

【冷却方式の種類】

1.気体冷却式

空気、水素ガス、SF6（六フッ化硫黄）ガス等を熱交換機或いは対象物に吹き付けて冷却と熱移動を行う方式である。気体冷却方式の例として、CPUの冷却を図7-152-2に示す。CPUの熱をヒートシンクに移し、CPUファンで風を送って空気で冷やす構造である。

2.相変化冷却式

媒体の相変化（液体からの気化）の気化熱により対象物から熱を奪う方式で、密閉容器に媒体を封入したパイプで冷却と熱移動を行うヒートパイプがある。ヒートパイプの原理を図7-152-3に示す。

3.液冷却式

水や絶縁油を用いて、熱交換機或いは直接対象物の冷却と熱移動を行う。液冷却方式の例として、エンジンの冷却を図7-152-4に示す。水冷エンジンでは、温度が上昇しやすい吸・排気弁やシリンダー周りに水通路を設けて、冷却水を循環させている。エンジン内部を冷却して高温になった冷却水は、フロントグリルのすぐ後ろに設置されたラジエターに送られ、車のの走行風によって冷却水を冷やしてからエンジンに戻して、循環させながらエンジン水温を80～85℃に制御する。

図7-152-2　CPUの冷却



図7-152-3　ヒートパイプの原理

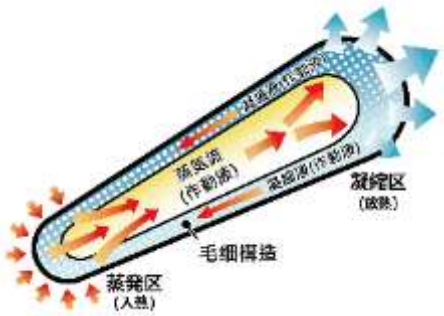
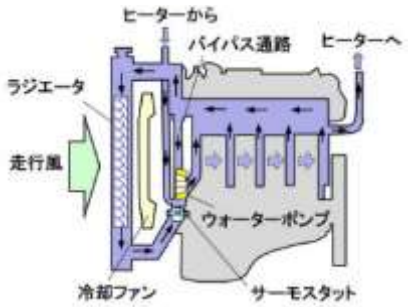


図7-152-4　エンジンの冷却



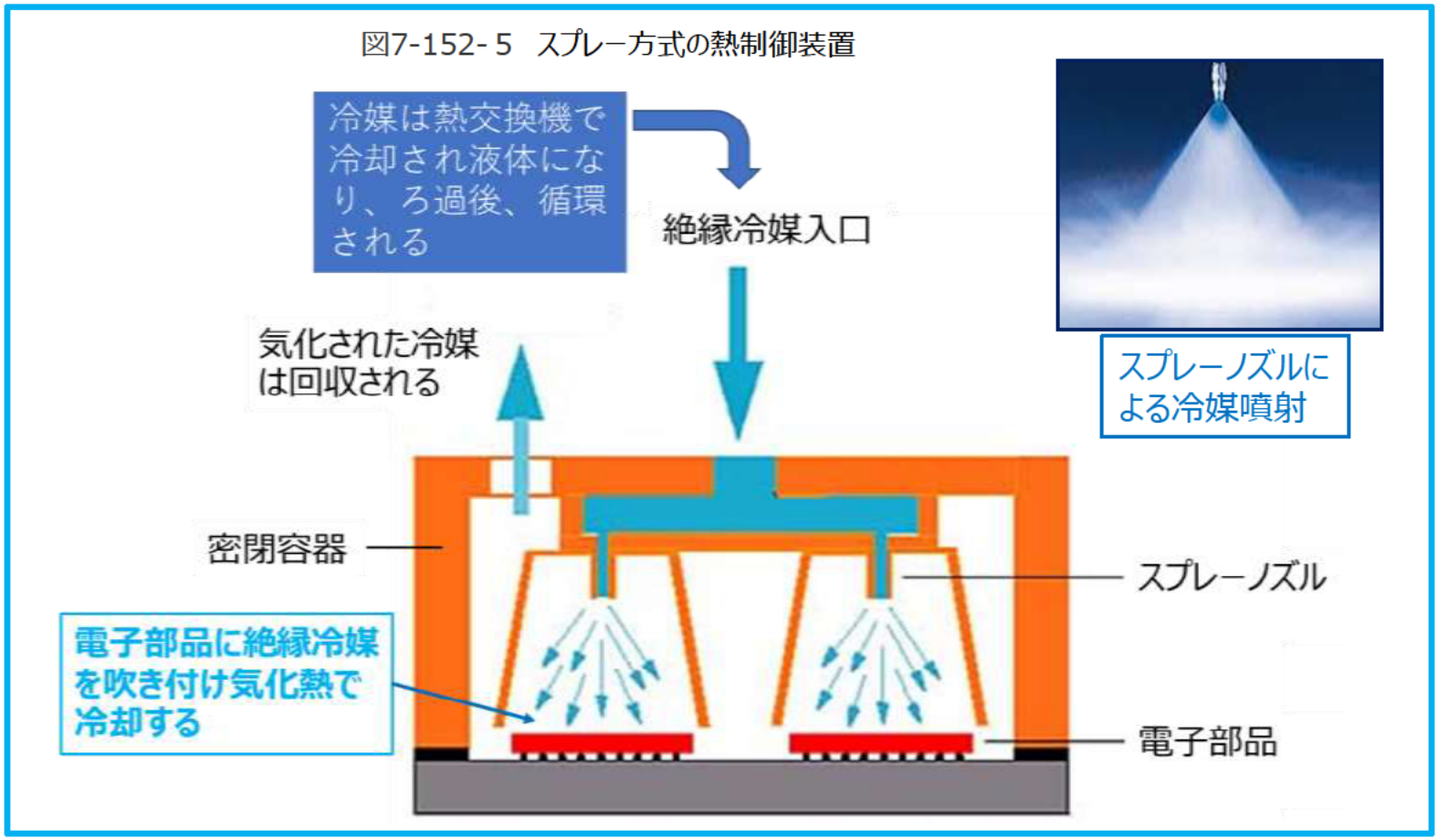
1.対象品目の概要調査（3）

○輸出貿易管理令第7項（15の2）スプレー冷却方式の熱制御装置

【スプレー冷却方式の熱制御装置】

電気部品に絶縁冷媒を吹き付けて温度調整を行うもので、コンピュータやサーバー、通信機器その他の機器の熱制御に用いられる。冷媒をこれら機器に噴射することで、高温時の冷却のみならず、低温時にも機器を一定の温度に保ちパフォーマンスを維持する役割を果たす。また、気化熱を利用するため、ファンで冷却する空冷式や冷媒を循環させる水冷式よりも冷却効果が高く、かつコンパクトな設計が可能である。スプレー方式の熱制御装置を図7-152-5に示す。

図7-152-5　スプレー方式の熱制御装置



1.対象品目の概要調査（4）

○輸出貿易管理令第7項（15の2）スプレー冷却方式の熱制御装置

【スプレー冷却の冷媒と原理】

状態の変化が起こらずに水の温度だけを変化させるのに使われる熱のことを顕熱といい、温度変化が起こらずに状態変化をするのに使われる熱のことを潜熱と言う。水の状態変化と必要熱量を図7-152-6に示す。

水の温度を0℃から100℃にするのに必要な熱量を100とした場合、凝固・融解の潜熱は80、気化熱は540となる。物質は蒸発するときは多量の熱を周囲から奪い、凝縮するときは多量の熱を周囲に放出する。

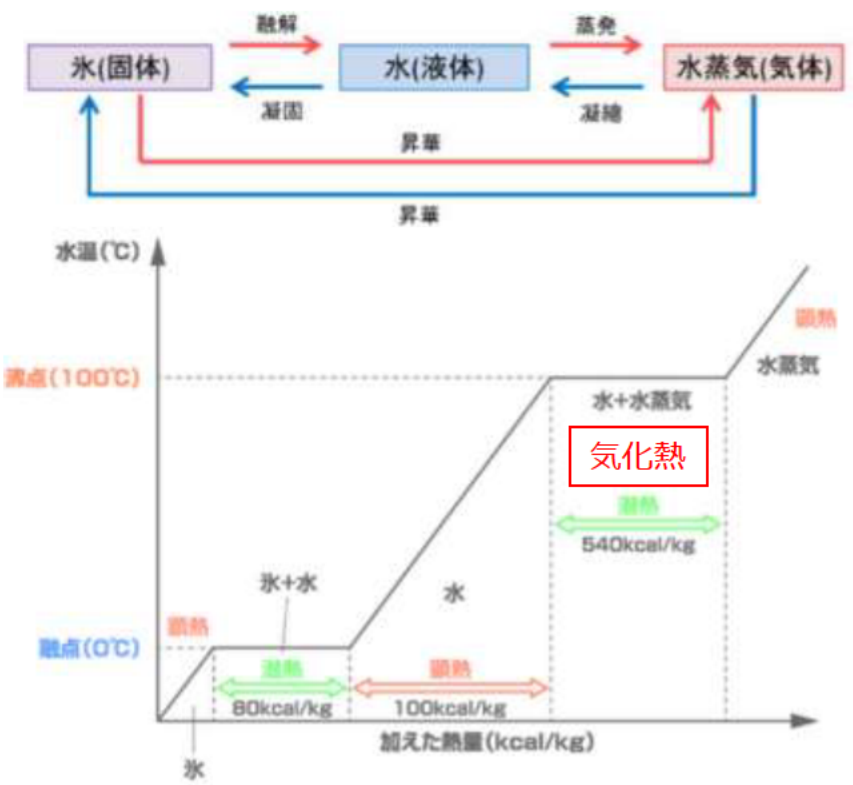
水の状態変化の中で最も大きな熱量が気化熱で、気化熱を利用した冷却方法が、水をスプレー噴射して対象物から熱を奪う水冷却である。水は、化学的に安定で比熱が大きい特徴を持つため、冷媒として用いられることが多い。

一方、エアコンなどで使用される冷媒は、現時点での主流は水素とフッ素と炭素の化合物（代替フロン）である。

フロリナートは、3Mによって販売される冷媒で、化学的に安定した絶縁体であることから主に電子機器の冷却などに使用される。分子構造の違いにより様々な沸点のものが提供されており、液体のまま扱う用途にも、沸騰させて気化熱で冷却する用途にも利用できる。

フロリナートと特性がほとんど同じで、フロリナートよりも地球温暖化係数が大幅に低い冷媒にノベックがある。スパコンやサーバーの冷却用途として用いらっれている。ノベックはフロリナートよりも沸点が低いという欠点があるが、フロリナートなどの代替フロンは、環境に放出されないように強い制限があるのに対し、ノベックは特定フロン代替物リストの洗浄・冷媒分野で「制限なしに利用可」に指定されている。

図7-152-6　水の状態変化と必要熱量



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出貿易管理令第7項（15の2）スプレー冷却方式の熱制御装置

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）
	条	項	号	
7(15の2)	6		十六号の二	スプレー冷却方式の熱制御装置であって、密閉された装置の中で冷媒の循環利用ができるもののうち、電気部品に絶縁冷媒を吹き付けて部品の温度を一定の範囲に収めるために特に設計した噴霧ノズルを有するもの又はそのために特に設計した部分品

Wassenaar規制番号				Wassenaar規制文言（英文）
3桁	細番			
3A3				3A003 Spray cooling thermal management systems employing closed loop fluid handling and reconditioning equipment in a sealed enclosure where a dielectric fluid is sprayed onto electronic components using specially designed spray nozzles that are designed to maintain electronic components within their operating temperature range, and specially designed components therefor.

比較原文
・経済産業省　安全保障貿易管理　貨物・技術のマトリクス表（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html
・Wassenaar Arrangement　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出貿易管理令第7項（15の2）スプレー冷却方式の熱制御装置

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【スプレー冷却装置の要素技術】
・冷却媒体：対象物に吹き付けて、熱を奪い移動するための液体である。
・噴射ノズル：冷却媒体を対象物に効率よく吹き付けるためのノズルである。
　噴射ノズルを図7-152-7に示す。
・冷却水循環装置：冷却媒体を循環させて冷却する装置である。
【用途1】
☆ビル用エアコン室外機の冷却
　エアコン室外機の冷却イメージを図7-152-８に示す。
☆ミスト冷却
　スプレーノズルを用いて空気と液体を混合し、微粒化させた液体を発熱物に噴霧することで、冷却を行う方式である。従来の空冷、水冷などの冷却方式では単位面積あたりに除去できる熱量には限界があった。ミスト冷却では顕熱に加え、媒質の液体から気体への相変化に伴う「潜熱」（気化熱）を利用することで、単位面積あたりに除去できる熱量を大きくすることが可能な方法となる。
　ミスト冷却の熱移動を図7-152-9に示す。

図7-152-7　噴射ノズル



図7-152-8　エアコン室外機の冷却

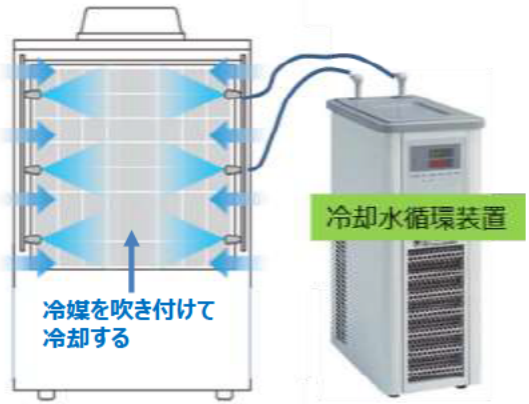
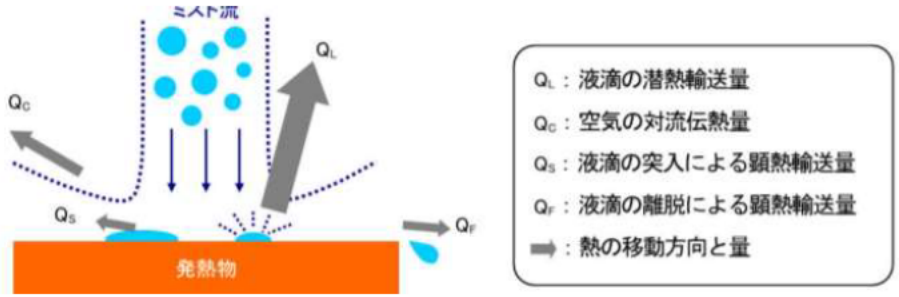


図7-152-9　ミスト冷却の熱移動



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出貿易管理令第7項（15の2）スプレー冷却方式の熱制御装置

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【用途2】

☆ガスタービン発電設備のスプレー冷却

ガスタービン発電設備では、温度上昇により吸込空気の密度が低下することで空気圧縮機吸込流量が減少し、出力が減少する。夏季の電力不足を補うために、吸込空気を冷却する吸気冷却装置が搭載されており、ここにスプレーノズルが使用されている。（図7-152-10）

☆熱延鋼帯の冷却

熱延高張力鋼板の品質と特性は、圧延直後の冷却過程の温度管理に大きく影響される。熱延における仕上圧延後、ホットランテーブル上にある鋼板の温度は、圧延直後、中間、巻取温度と、３カ所で放射温度計を使用して計測され、それを使って冷却制御が行われる。（図7-152-11）

☆ダイカスト製品の冷却

スプレーによるダイカスト製品の冷却を図7-152-12に示す。

図7-152-10　ガスタービン発電設備

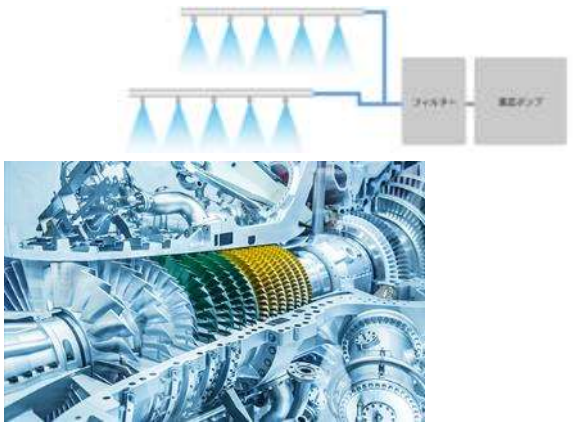


図7-152-11　熱延鋼帯の冷却

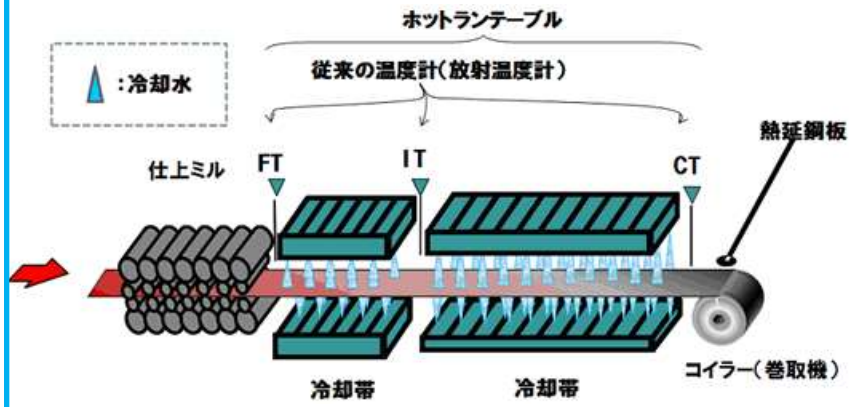


図7-152-12　ダイカスト製品の冷却



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出貿易管理令第7項（15の2）スプレー冷却方式の熱制御装置

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

☆C4Iシステム

C4Iシステムとは、軍隊における情報処理システムのことで、指揮官の意思決定を支援して、作戦を計画・指揮・統制するための情報を提供し、決定された命令を部隊に伝達するシステムである。

アメリカ海軍C4Iシステム（空母打撃群）のイメージを図7152-13に示す。

図の中心部が空母打撃群で、強固なセキュリティーシステム下で、多くの情報を送受信、分析が行われる。システムには高度な信頼性が要求され、多大な電力消費による発熱が問題となる。このようなシステムの冷却に、スプレー冷却方式の熱制御装置が用いられる。スプレー冷却は、温度制御だけでなく、電気ノイズの低減と動作寿命の延長、電磁干渉を低減する効果が期待される。

また、航空機の電子機器には通信機器、航法システム、自動操縦装置、飛行管理システムなどがあり、適切な温度制御により出力の増大が可能となる。航空機の電子機器イメージを図7-152-14に示す。

図7-152-13　アメリカ海軍C4Iシステム



図7-152-14　航空機の電子機器



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出貿易管理令第7項（15の2）スプレー冷却方式の熱制御装置

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化

Parker HannifinのSprayCoolエンクロージャーは、特許取得済みの直接スプレー技術と誘電性流体を使用した気化熱冷却を利用している。

航空宇宙、地上戦闘車両、無人航空機において、過酷な環境下で電子機器を動作可能な環境に保つことが出来る。

SprayCoolエンクロージャーを図7-152-15に示す。

【諸元】（寸法等は特注）

<温度制御範囲>

-55℃～71℃

<出力>

80W

<稼働高度>

～22km（旅客機の飛行高度は、7.5km～11km）

SprayCoolの軍用利用分野を図7-152-16に示す。

<貨物等省令文言>

スプレー冷却方式の熱制御装置であって、密閉された装置の中で冷媒の循環利用ができるもののうち、電気部品に絶縁冷媒を吹き付けて部品の温度を一定の範囲に収めるために特に設計した噴霧ノズルを有するもの又はそのために特に設計した部分品

図7-152-15　SprayCoolエンクロージャー



図7-152-16　利用分野



電子戦　レーダー処理　シギント

※シギントとは、通信、電磁波、信号等の、主として傍受を利用した諜報・諜報活動のこと。

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出貿易管理令第7項（15の2）スプレー冷却方式の熱制御装置

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

規制対象を図7-152-17に示す。

規制文言は以下のa)からd)で表現されており、図はすべての条件が満たされているため規制対象となる。装置を構成する「特別に設計された部品」も規制対象となる。

a)スプレー冷却方式の熱制御装置
b)密閉された装置の中で冷媒の循環利用ができるもの
c)電気部品に絶縁冷媒を吹き付けて部品の温度を一定の範囲に収めるために特に設計した噴霧ノズルを有するもの
d)電気部品に絶縁冷媒を吹き付けて部品の温度を一定の範囲に収めるために特に設計した部分品

電気部品に絶縁冷媒を吹き付けて部品の温度を一定の範囲に収めるために特に設計した部分品

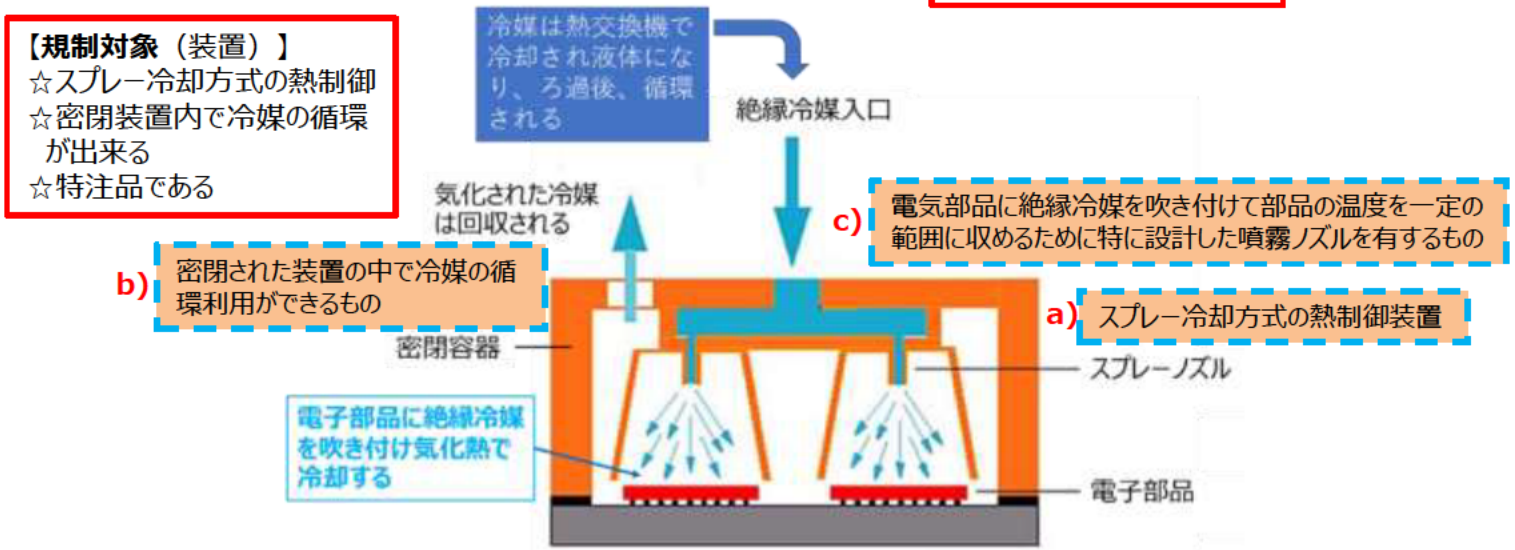


d)

【規制対象（部分品）】
☆ノズル
☆循環装置
☆冷媒　等

図7-152-17　規制対象

【規制対象（装置）】
☆スプレー冷却方式の熱制御
☆密閉装置内で冷媒の循環が出来る
☆特注品である



4.品目の技術動向調査（2）

○輸出貿易管理令第7項（15の2）スプレー冷却方式の熱制御装置

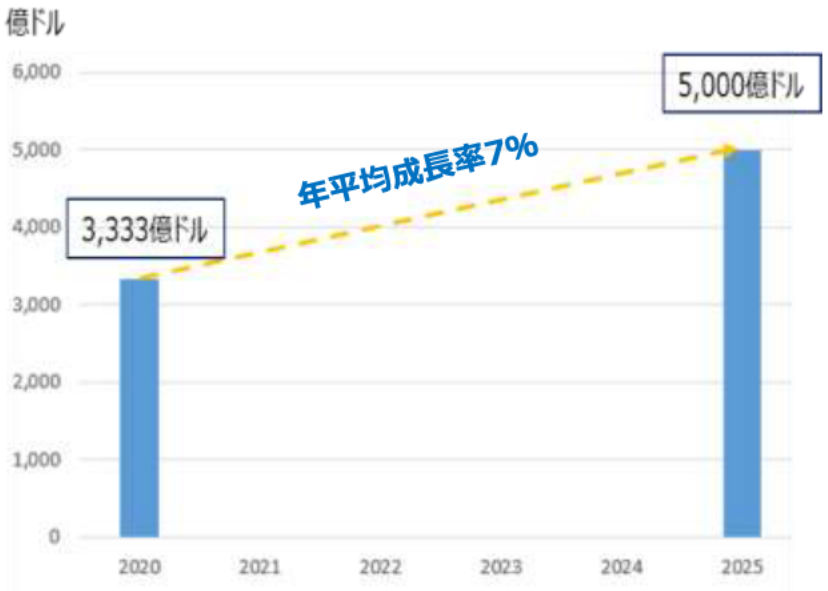
②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【熱制御・放熱部材の市場規模】
　自動車の電動化や第5世代移動規格通信・5Gの本格展開などから、熱制御・放熱部材の世界市場は今後も成長し、2025年には2020年比で約5割増の5,000億円近くになると予測される。今後も、インバーターや電子制御ユニット、リチウムイオン電池といった車載電装部品やスマートフォン、通信基地局関連の伸びが、熱制御・放熱部材市場の成長を後押しすると予測されている。
熱制御・放熱部材の世界市場を図7-152-18に示す。

（富士経済）

【熱制御メーカー】
・**Parker Hannifin**（アメリカ）：モーションコントロール技術分野で多角経営を行う会社で、航空・宇宙、温度調節、電気機械、フィルター、液体およびガス処理、水圧、空気圧、プロセス制御、シーリングの主要なモーションコントロール技術を提供している。
・**Rini Technologies**（アメリカ）：熱管理システムを開発、提供する会社で、軍事、医療、自動車レース分野を市場としている。
・**3M**（アメリカ）：世界有数の化学企業である。日本では、3M社が75%、住友電気工業が25%出資の合弁会社「住友スリーエム」を設立、3Mの中で最大の系列会社となる。
・**オリオン機械株式会社**（日本）：液体と空気を高精度かつスピーディに温度制御するための装置を開発。半導体、FPD製造プロセス、検査装置の温度制御を手掛ける。
・**ヤマト科学株式会社**（日本）：科学・産業機器、分析・計測・試験装置、研究施設、生産機器の開発を行っている。
・**株式会社池田理化**（日本）：冷却水循環装置の開発を行っている。

図7-152-18　熱制御・放熱部材の世界市場



目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（16）
半導体製造装置若しくは試験装置

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

主な半導体製造装置と試験装置は、以下の半導体製造工程に使用されている。次頁以降にこの製造工程順に沿って説明をする。また、規制対象となっている半導体製造装置と試験装置を赤字で示した。

洗浄　洗浄装置	①ウェットステーション
	②ワンバス型ウェットステーション
成膜　成膜装置	①スパッタ装置
	②CVD（Chemical Vapor Deposition：化学気相成長）装置
	③熱酸化炉
	④赤外線ランプアニール装置
	⑤フラッシュランプアニール装置
	⑥レーザーアニール装置
	⑦ALD装置（Atomic Layer Deposition:原子層エピタキシー法）
	⑧エピタキシャル成膜装置
ウエハ研磨	CMP装置
ウェハ表面検査	ウェハ表面検査装置
微小寸法測定	微小寸法測定装置
クリーンルームの性能評価	パーティクルカウンター
リソグラフィ	①コーター/スピンコーター
	②露光装置
	③現像装置
エッチング	①ウェットエッチング装置
	②ドライエッチング装置
イオン注入	イオン注入装置
直接描画	直接描画装置
アニール	アニール装置（熱処理装置）
ウエハー搬送	ウエハー搬送装置
バックグラインド	バックグラインド装置
プローバ/テスタ	プローバ装置/テスタ装置

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

主な半導体製造装置と試験装置は、以下のものがある

（１）洗浄装置

①ウェットステーション

製造前のウエハーのゴミ、金属汚染、有機汚染、油脂、自然酸化膜を取り除く洗浄装置として最も普及しているのはウェットステーションである。ウェットステーションとは薬液の入った槽や純水の入った槽が並んだ装置で、これらの槽の中に多数のウェーハ（通常は50 枚）をまとめて浸して、汚染物を溶かしたり中和したり洗い流したりしたあと、乾燥させる。（図7-16-1）

②ワンバス型ウェットステーション

高い洗浄度が求められる成膜工程直前の洗浄などでは、「ワンバス型ウェットステーション」が使われる。これは、１つの槽で薬液洗浄と純水による水洗の両方を行う装置である。通常のウェットステーションではウェーハを槽と槽の間で搬送するとき、その表面が空気中の微量な不純物に触れてかすかに汚染されるリスクがある。しかしワンバス型ウェットステーションは図7-16-2のようにまずウェーハを薬液で洗浄したあと、その薬液を純水で押し出してから水洗を行うという方法をとっているので、ウェーハが大気に触れない。

図7-16-2　洗浄装置　ワンバス型ウェットステーション

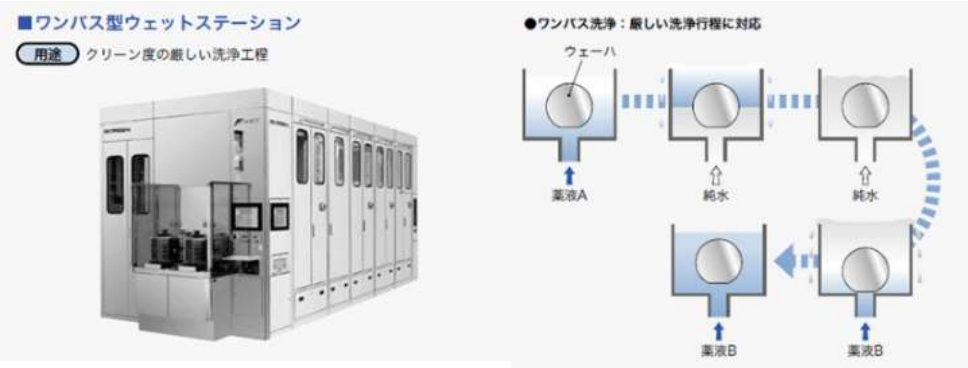
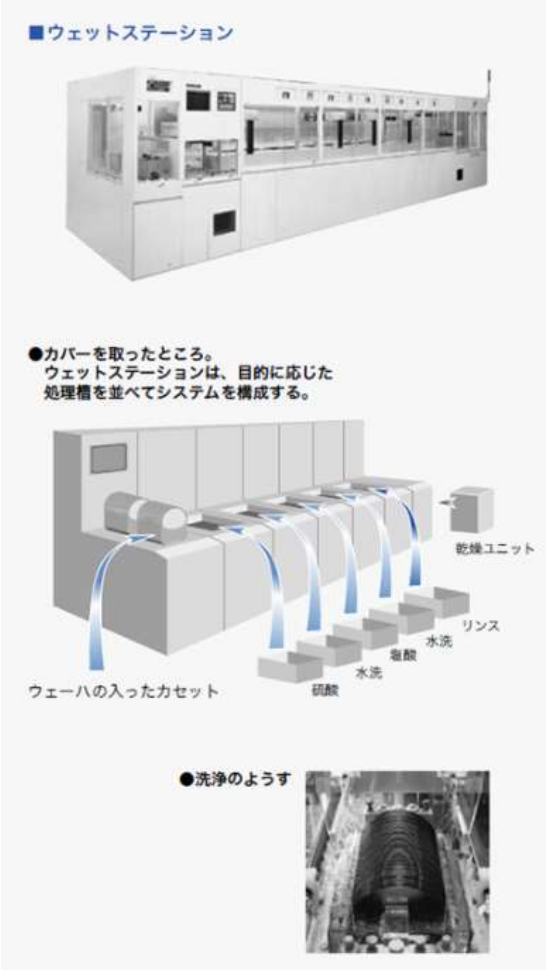


図7-16-1　洗浄装置　ウェットステーション



1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

（２）成膜装置

ウェーハの上に回路を作るとき、まずその回路の素材となる酸化シリコンやアルミニウムなどの層を作る工程がある。これを成膜工程と呼ぶ。（図7-16-3）成膜の方法は大きく分けて3 つある。それは「スパッタ」、「CVD」、「熱酸化」である。（図7-16-4）

①スパッタ装置

アルミニウムなどのメタル配線材料の膜を作る場合、アルミニウムの塊（専門用語では「ターゲット」という）にイオンをぶつけてアルミ原子を剥がし、これをウェーハに積もらせて層を作る。このような方法を「スパッタ」という。スパッタ処理は通常枚葉方式で行われる。

②CVD（Chemical Vapor Deposition：化学気相成長）装置

ウェーハ表面に特殊なガスを供給して化学反応を起こし、その反応で生成された分子の層をウェーハの上に形成する技術である。化学反応を促進するには、熱やプラズマのエネルギーが使われる。この方法は酸化シリコン層や窒化シリコン層のほか、一部の金属層や金属とシリコンの化合物の層を作るときにも使われる。

③熱酸化炉

熱酸化とは、酸素などのガスが入った処理室にウェーハを入れて加熱することでウェーハの表面に酸化シリコンの膜を作る方法である。この熱酸化はバッチ処理で行えるため、生産性が高い。

図7-16-3　成膜の方法

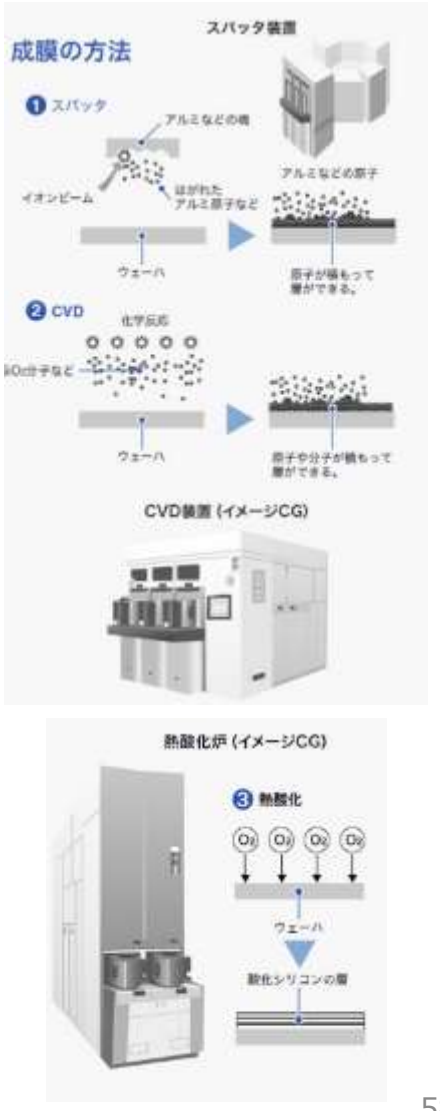
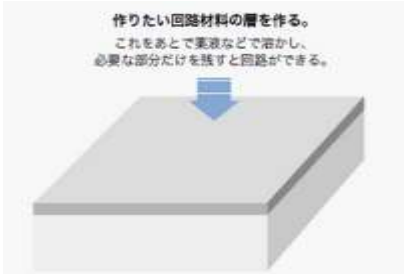


図7-16-4　成膜



1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

（２）成膜装置

④赤外線ランプアニール装置（図7-16-5上）

赤外線ランプアニール装置とは、加熱処理装置で、その特長は短い時間でウェーハを急速に加熱（数十秒で1,000℃）できる装置のことである。このような加熱処理装置のことを業界ではRTP（rapid thermal process：急速加熱処理）という。RTP の利点は厚さ10nm以下の超薄型シリコン酸化膜が作れることにある。またこれはウェーハを1 枚づつ加熱する枚葉処理装置なので、システムLSI をはじめとする多品種小ロットIC の生産にも適している。

⑤フラッシュランプアニール装置（図7-16-5下）

半導体製造プロセスでは、10nm を大きく下回る極めて薄い膜を作るニーズがある。そこで赤外線ランプアニール装置よりも短時間で熱処理をする装置が製品化されている。その代表例はフラッシュランプアニール装置である。これはカメラのフラッシュと同じ原理の光源を使い、100 万分の数十秒で瞬間的にウェーハを高温に加熱できる装置である。そのため、赤外線ランプアニール装置よりもさらに薄い数nm レベルの薄膜がウェーハ上に形成できる。また、フラッシュランプアニール装置は一瞬の光で処理をするためウェーハの表面部分だけを加熱することができることから、加熱後のウェーハを常温に戻すことも早くできる。

⑥レーザーアニール装置

レーザ光を照射することで結晶化などの材料改質をおこなう装置である。パルスレーザー光の照射、あるいはCWレーザー光のスキャン照射によりおこなわれる。高温炉のアニールと比較して昇温および冷却が短時間でできることや、材料や結晶状態に対して使用するレーザー波長を選ぶことにより、表面層だけでなく、深さ方向の必要部分のみを選択的に改質できるなどの特長を持っている。多結晶Siの形成に代表される結晶性の改善、Si中の不純物活性化など広く用いられている。主にはTFTトランジスタ用のSi薄膜の結晶化に用いられる。

⑦ALD装置（Atomic Layer Deposition:原子層エピタキシー法）（図7-16-6）

ALD装置は、反応室に有機金属原料と酸化剤を交互に供給し、表面反応のみを利用して成膜する装置である。ALD装置は基板上に原料の供給と余剰原料の除去を繰り返すことで原子層1層ずつを成膜する手法である。例えば酸化膜や窒化膜の成膜において、原料ガスが表面反応により1層形成され成長が止まる自己停止機能により、1層ごとの膜形成を繰り返すLayer by layerのナノレベルの成膜が可能である。次世代パワーデバイスのゲート高耐圧膜を製造することが可能である。

図7-16-5　ランプアニール装置



図7-16-6　ALD装置



1.対象品目の概要調査（4）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

（２）成膜装置

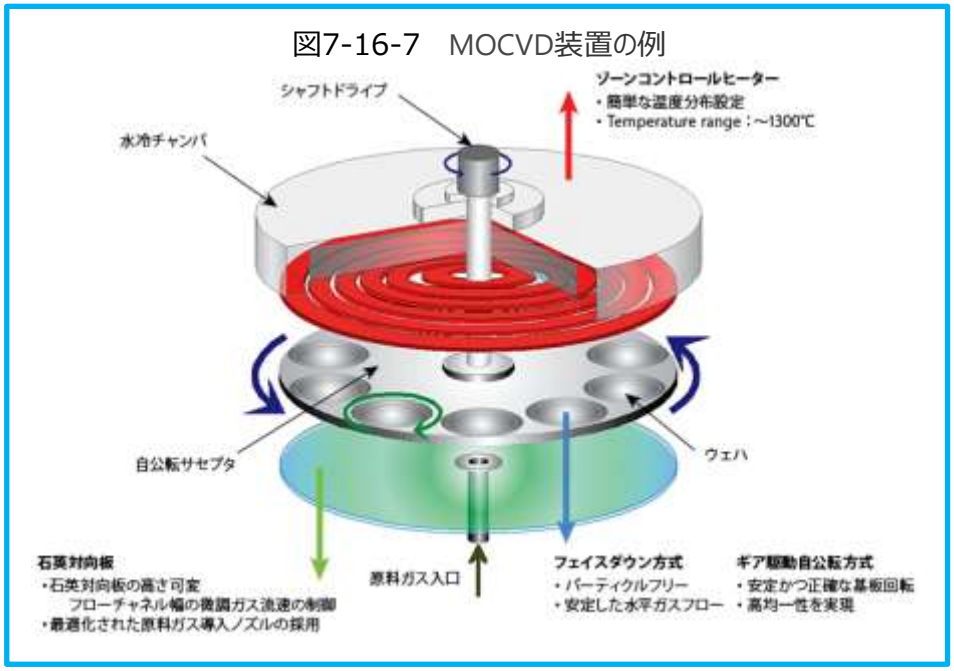
⑧エピタキシャル成膜装置

エピタキシャル成長とは、半導体製造の薄膜結晶成長技術のひとつで、半導体の単結晶の基板上に、新しく単結晶の薄膜を成長させることである。基板結晶の上に基板結晶と同じ格子定数を持つ結晶を成長させる場合をホモエピタキシャル成長と呼び、格子定数が一致しているため、最も欠陥の少ない良質の結晶が得られる。

エピタキシャル成長の方法には、気相中の成分を基板結晶表面に堆積させる気相エピタキシャル成長（VPE：Vapor Phase EpitaxyまたはCVD：Chemical Vapor Deposition（前述））と、過飽和溶液から基板結晶表面に結晶成分を析出させる液相エピタキシャル成長（LPE：Liquid Phase Epitaxy）、基板結晶表面に堆積する材料を電子ビーム照射などにより加熱して、基板結晶と同じ結晶構造に変える固相エピタキシャル成長（SPE：Solid Phase Epitaxy）などがある。

また、LEDやパワー半導体の製造には、サファイアやシリコンなどの基板にGaAs、GaP、GaNなどの薄膜を成長させたエピタキシャルウェハが必要不可欠で、GaAs、GaP、GaNは、主に有機金属気相成長法（MOCVD：Metal Organic Chemical Vapor Deposition）で成膜される。（図7-16-7）

図7-16-7　MOCVD装置の例



1.対象品目の概要調査（5）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

（３）CMP装置

ウェーハの表面を平らに磨く技術である。研磨材の入った薬品（chemical）と砥石で機械的（mechanical）にウェーハの表面を磨く（polishing）ため、その頭文字をとってCMP という。この技術は多層配線（小さなスペースを有効活用するために配線を何層にも重ねる技術）をするときに使われる。ウェーハの表面に凸凹があると、その上に配線をするのが困難となるので、1 層の配線ごとにウェーハの表面を平らに磨くことが必要となる。STI *1の酸化膜の平坦化、トレンチの埋め込PolySiアモルファスSiの平坦化にも使用される

CMPの工程で使う装置は「ケミカル・メカニカル・ポリシャ」または単に「CMP装置」と呼ばれている。また、研磨をしたあとのウェーハには研磨材のカス、研磨材に含まれる薬品のカス、削られたウェーハの屑などが残るため、これを専用の洗浄装置で取り除く。ここで使う洗浄装置は、「薬液スプレイができるスピンプロセッサ」と「ブラシでゴミを掻き出すスクラバ」の機能を備えた装置である。（図7-16-8）

STI*1：Shallow Trench Isolationの略である。
半導体製造工程における素子分離法の一つである。シリコン基板上に浅い溝を形成した後、酸化膜などの絶縁物で埋め戻して素子分離領域を形成する。具体的には、Si基板に薄いSiO2を形成し、さらに窒化膜(Si3N4)などをマスキングし、エッチングでSi基板に浅い溝を形成する。
エッチング部分に酸化膜を形成し、それを絶縁分離膜として用いる。埋め込み酸化膜とも呼ばれる。STIはLOCOSに比べて横方向へ広がりがなく、微細化が可能である。

図7-16-8　CMP処理と装置



1.対象品目の概要調査（6）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

（４）ウェハ表面検査装置
　シリコンウェーハ上に存在する微小異物や欠陥を検査する装置である。レーザー散乱技術を用い、パターン形成前及びパターン形成後の半導体ウェーハ上の微小異物やさまざまな欠陥を検査するための装置である。（図7-16-9）

（５）微小寸法測定装置
　各工程の膜厚、配線幅や長さなどの寸法や異常の欠陥を検査するための装置である。

（６）パーティクルカウンター
　ウエハ表面のパーティクル(微小粒子)、および各成分による汚染量を調査し、製品歩留まりの向上や、半導体製造装置またはクリーンルームの性能評価を行なうことを目的とした装置である。

（７）リソグラフィ装置（リソグラフィ工程：図7-6-19））

①コーター/スピンコーター
　コーターにはスピン型と塗布型が使われている。ウェハにレジストをナノ単位で極めて均一に塗布するための装置であ　る。主に材料をバキュームチャックして回転させ、遠心力によってレジストを均一に伸ばすスピン式（スピンコーター）が用いられる

②露光装置
　複雑で微細な電子回路のパターンを大きなガラス板に描いたフォトマスクを、極めて高性能なレンズで縮小して、シリコンウェハと呼ばれるシリコンの板に焼き付ける装置である。露光の方式は以下の2つがある。

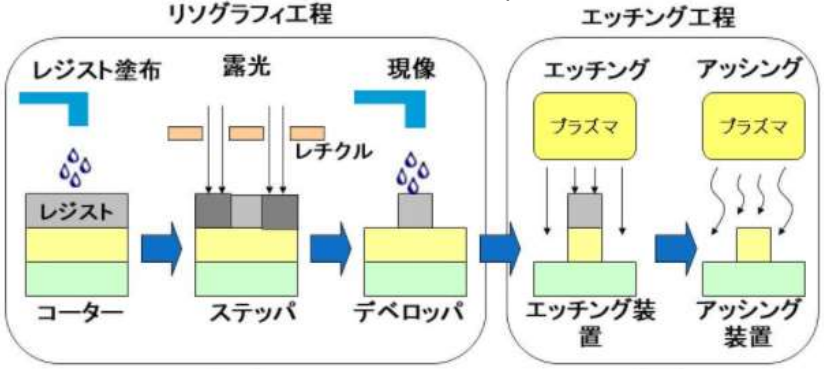
A)ステップアンドリピート方式
　マスク上のパターンをウエハ上の一部に縮小投影し静止露光、その後ウエハを載置したステージを順次ステップ移動させて、ウエハの隣接箇所の静止露光を順次繰り返す。縮小投影を採用することでマスク起因誤差は縮小されるが、ウエハステージのステップ回数が増えるため、ウエハ露光処理速度が律速される。

B)ステップアンドスキャン方式
　マスク上のパターンの一部をウエハ上の一部に縮小投影しつつマスク位置とウエハ位置を同期させて走査露光。その後、ウエハを載置したステージを順次ステップ移動させて、ウエハ上の隣接箇所の走査露光を順次繰り返す。マスク上の走査方向のパターン領域の長さを最大限に取ると共に投影倍率（縮小倍率）を下げることで、ウエハ上の１回の走査露光面積を拡大できる。その結果、ウエハステージのステップ回数が減り、ウエハ露光処理速度が向上。現在の主流の露光方式で、装置はスキャナーとも呼ばれる。

図7-16-9　ウエハ表面検査装置



図7-16-10　リソグラフィ工程/エッチング工程



1.対象品目の概要調査（7）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

（７）リソグラフィ装置

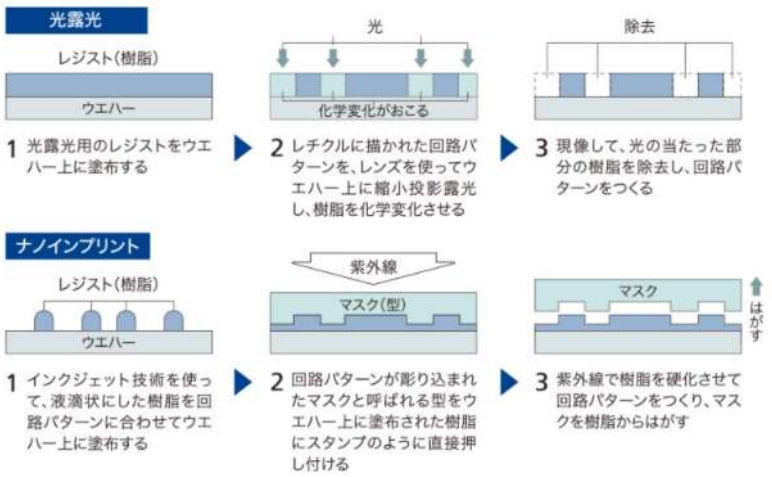
②露光装置

露光の方法で、プリント技術を使用した装置は以下の種類がある。

A：ナノインプリントリソグラフィ装置

ナノインプリントリソグラフィ技術は、回路パターンを刻み込んだマスクを樹脂に押し当てるというシンプルな原理でパターンを形成する。製造工程の簡略化による大幅なコストダウンが見込め、しかも、非常にシャープな回路パターンを形成できることから、チップの不良率の低減も期待されている。光露光とナノインプリントの違いを図7-16-11に示す。

図7-16-11　光露光とナノインプリントの違い



B：マイクロコンタクトプリンティング装置

従来法の光リソグラフィーや電子線リソグラフィーによって作製したマイクロメートルの構造の形状パターン(マスター)をゴム状プラスチックスに写し取り作製する。マイクロコンタクトプリンティングは、このスタンプ凸部表面に分子を塗布し基板に密着(コンタクト)することで、パターン化した分子の膜を基板上に作製する方法である。このスタンプの使用により、マイクロパターンを安価で簡便にコピーすることができる。この際、分子と基板表面との化学反応を利用することにより、安定した単分子厚さの膜(自己組織化膜)を基板上にパターン化することができる。

C：ホットエンボシング装置

ウェーハ上に塗布した熱可塑性樹脂を、樹脂のガラス転移点より少し高い温度に加熱する。この状態で金型を押し付けて加圧し、金型に形成した微細構造に樹脂を正確に充填した後、ガラス転移点以下の温度に冷却する。そして金型と基板上の樹脂を剥離することで、微細な3次元構造をウェーハ上で転写することを可能にする装置である。転写できるパターンのサイズはμmオーダーが中心となるが、熱可塑性樹脂やガラスに高アスペクト比の形状を転写できる。

D：ステップアンドフラッシュインプリントリソグラフィ装置

ＵＶ硬化性樹脂にテンプレートをインプリントし、テンプレートを介してＵＶ光を「フラッシング」してテンプレートの真下のＵＶ硬化性樹脂を硬化させ、テンプレートを除去し、基板の隣接する領域へステッピングさせ、且つ、以上の動作を繰り返すことによって基板の微小領域を一度ずつ印刷するリソグラフィ装置である。

1.対象品目の概要調査（8）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

（７）リソグラフィ装置

③現像装置

ウェーハ上のレジストの露光された部分を薬液で溶かす工程は「現像工程」と呼ばれる。またこの工程で溶けずに残ったレジストを「レジストマスク」という。レジストマスクの下の層はエッチング工程で腐食されずに残り、これが最終的に回路となる。

現像工程では現像装置としてスピンデベロッパ（図7-6-12）という装置を使う。

スピンデベロッパの動作は、

①ウェーハに現像液をかける
②低速回転して現像液をウェーハ全面に広げる
③現像液が広がったらウェーハの回転を止めてレジストが現像液に溶 けるのを待つ
④現像が終わったらウェーハを高速回転させて現像液を取り除く
⑤回転を維持したまま純水でウェーハ上に残った微量の現像液を洗い流す
⑥高速回転でウェーハを水切りして乾燥させる

の6つである。

図7-16-12　スピンデベロッパ



1.対象品目の概要調査（9）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

（８）エッチング装置

薬品やイオンの腐食作用を使ってIC の回路を形成する装置である。現像工程でレジストが溶けた部分の下にある層を溶かすあるいは削り、回路を作る。

エッチングの方法にはウェット式とドライ式の2つがある。

A：ウェットエッチング

硫酸、硝酸、りん酸、フッ酸などの薬液で腐食を行う方法である。装置としては薬液洗浄のときと同じウェットステーションが利用できる。また、小ロットのウェーハをエッチングするときや、1 枚1 枚のウェーハに特殊なエッチングをするときには、スピンプロセッサを使う。

ウェットエッチングのメリットはコストが安くて生産性が高いことである。装置価格は1 億円～3億円程度で、薬液も半導体関連材料としては安いうえ、1 度に50 枚などのバッチ処理も可能である。

B：ドライエッチング（図7-16-13）

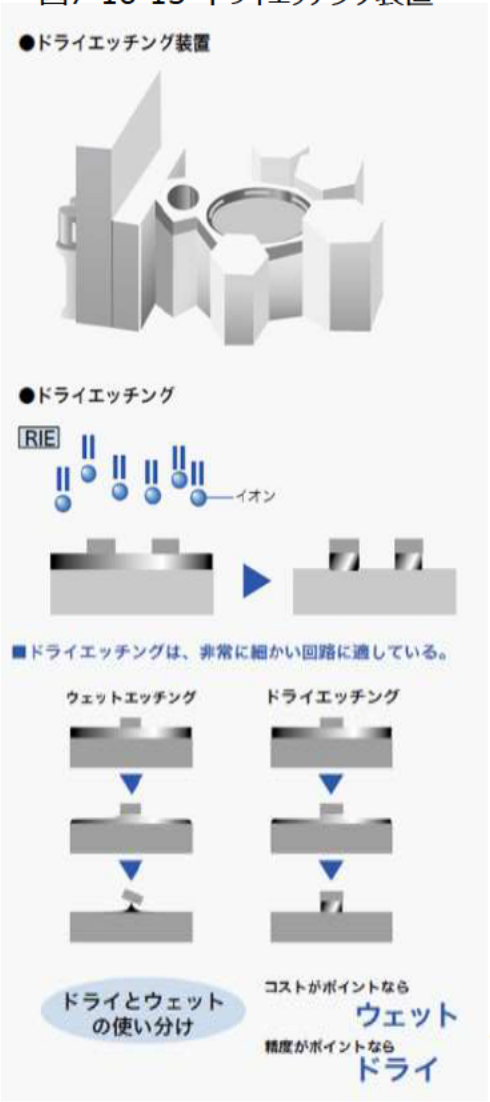
液体の薬品を使わないで腐食を行うものである。代表的な例としてはRIE（reactive ion etching：反応性イオンエッチング）がある。これは、酸のように腐食性のあるイオンをぶつけて、レジストに覆われていない部分を削り取る方法である。

ドライエッチングの利点は細かい回路を作るのに適していることである。右図のように、ウェットエッチングは横方向にも進むため、あまり細かい回路をエッチングするとレジストが落ちてしまう。しかしドライエッチングは垂直方向だけに腐食が進むので、微細な回路も確実に作れる。ただし、ドライエッチング装置は価格がウェットの2 倍以上で高い。また、ドライではウェーハのまとめ処理ができず、1 枚ずつエッチングしなくてはならない。

以上のことから業界では、ラフな回路はウェットエッチング、微細な回路はドライエッチングという使い分けをしている。

なお、半導体回路は微細化が進んでラフな回路が減っているため、現在のエッチング工程の9割以上はドライエッチングで行われている。

図7-16-13 ドライエッチング装置



1.対象品目の概要調査（10）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

（９）イオン注入装置（図7-16-14）

半導体に電子が流れる素子を作る装置である。具体的には、シリコンウェーハにボロンや砒素などのイオンを注入する。これにより、ウェハに適度な不純物を導入することができ、電子の移動が可能になり電気を流すことができるようになる。また、イオン注入の量の制御により、適した半導体デバイス特性を得ることが可能になる。この不純物を入れることをドーピング（doping）と呼び、熱拡散とイオン注入の二つの方法が知られている。（図7-16-15 ドーピングの方法）

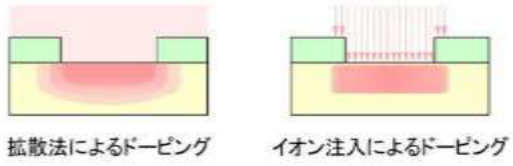
A:拡散法

二種類以上の異なる物質が移動可能な状態で接しているとき、濃度の高い領域から低い領域に高濃度物質が移動する原理を利用する。

B：イオン注入

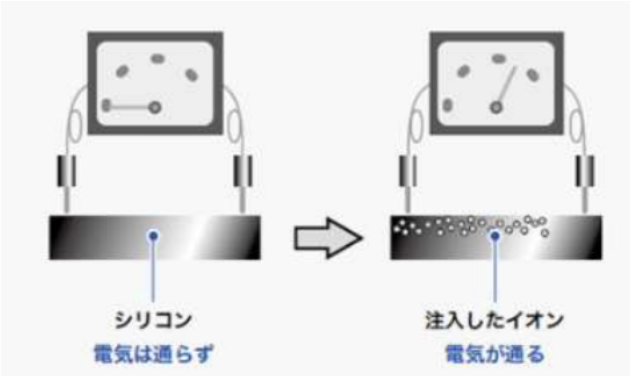
イオン化した原子／分子をイオンビームとし半導体に打ち込む。イオンビームをマスク越しに打ち込む方法と、イオンビームが磁界によって方向を制御できることを利用してマスクなしに直接描画する方法がある。

図7-16-15 ドーピングの方法



ドーピング法	レジストパターン
熱拡散	あり
イオンビーム	あり
	なし（直接描画）

図7-16-14 イオン注入装置



●イオン注入装置（イメージCG）



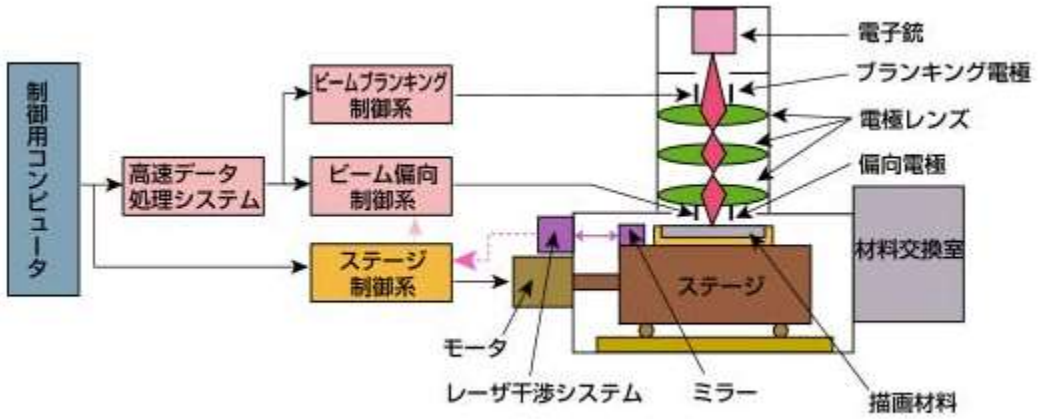
1.対象品目の概要調査（11）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

（10）直接描画装置

電子銃から発せられた電子線を電子レンズや、偏向器などを通し、微細に制御されるX-Y-Zステージ上の試料に照射して目的のパターンを描画する装置である。通常、ビーム径はnmオーダーであり、数十nm～数nmの微細パターン描画が可能である。直接描画装置は露光用マスク（レチクル）の作製に使われるが、研究開発用や少量生産用のウエハーの直接描画に適しており、次世代半導体素子の研究開発用や高周波半導体素子、光半導体素子などの生産用として使用されている。直接描画装置の構成例を図7-16-16に示す。

図7-16-16　直接描画装置の構成例



（11）アニール装置（熱処理装置）

イオン注入では高いビームエネルギーを使うため、結晶欠陥が発生しやすい。結晶欠陥があると、シリコンと不純物イオンが混ざっているだけで、p型半導体やn型半導体としては機能しない。半導体に熱が加わると、不純物が結晶構造内を移動しやすくなるため、結晶欠陥の修復が行われる。イオン注入時に熱処理（アニール）することで、イオンが結晶構造内で移動して、シリコンの格子点に不純物が正しく収まる。熱処理の温度としては、通常550～1100 ℃の間で行われる。アニール処理のイメージを図7-16-17に示す。

アニール装置の種類には以下のものがある。

①抵抗加熱炉アニール（分単位）
②タングステンハロゲンランプアニール（秒単位）
③フラッシュランプアニール（ミリ秒単位）
④レーザアニール（ナノ秒単位）
⑤急峻なドーピングプロファイルや再結晶化を目的としたプロセスにも使われる。

図7-16-17　アニール処理のイメージ



1.対象品目の概要調査（12）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

（12）ウエハー搬送装置

配線工程、薄膜形成工程などにおいて、個々の異るプロセスを適当に組合せ、且つ一貫した雰囲気で処理することにより、プロセスのトータル機能を向上させる目的で構成された多室の真空装置である。搬送室を中心にそのまわりにプロセス室を配置する放射状タイプと、中央の搬送室とその両側にプロセス室を配置した線型タイプがある。高価な搬送ロボットを複数の処理室（プロセスチャンバ）が共用でき、場所（フットプリント）をとらないことから、放射状タイプが現在は主流となっている。

真空状態でウエハーの加工を行う放射型半導体製造装置（図7-16-18）を例にその構成を説明する。

A：真空側

真空搬送室の中心には真空中でウエハを搬送する真空用ロボットが設置され、空搬送室を中心に複数の下記チャンバが設けられる。

・真空ロックチャンバ ・・大気側とのウエハー搬入と搬出を行う

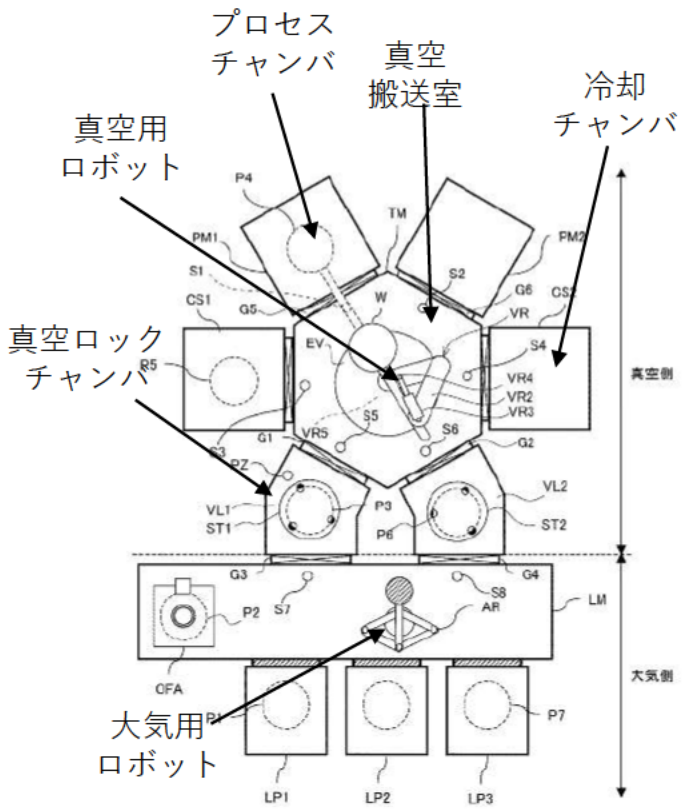
・プロセスチャンバ　・・熱化学反応（CVD)などによる成膜機能など備える

・冷却チャンバ・・・・・ ウエハーの冷却を行う

B：大気側

大気搬送室には大気中でウエハーを搬送する大気用ロボットが設置される。大気側ロボットはウエハー収納容器からウエハーを取り出し、真空ロックチャンバへ搬入する。また、その逆の搬出も行う。

図7-16-18　放射型半導体製造装置



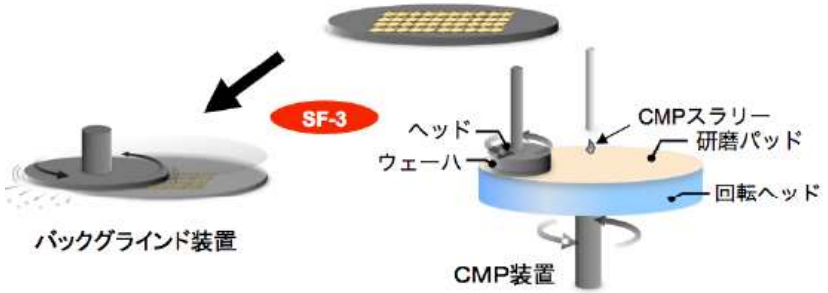
1.対象品目の概要調査（13）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

（13）バックグラインド装置

ウェーハ表面にパターンが完成した後、集積回路の積み重ねや高密度なパッケージングができるようにそのウェーハの裏面全体を研削し、厚さを薄くする装置である。バックグラインド装置の工程のイメージを図7-16-19示す。

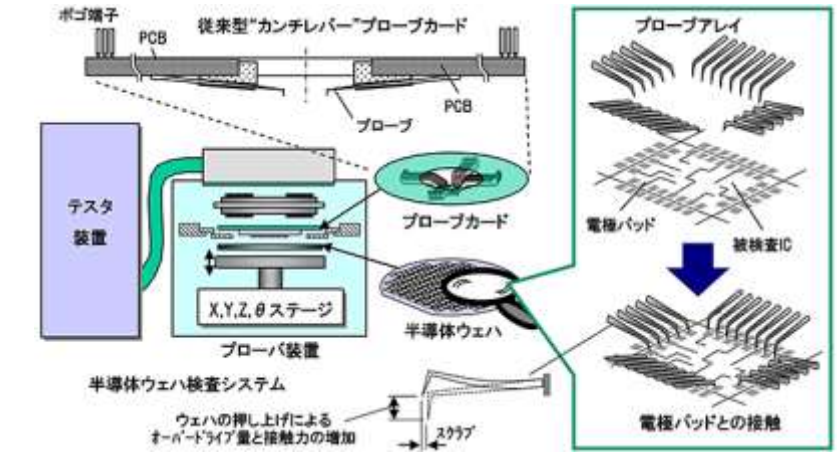
図7-16-19　バックグラインド装置の工程のイメージ



（14）プローバ装置/テスタ装置

ウェーハ上に形成された全てのチップの電気的特性を試験する装置である。このウェーハテストにより、チップの良品、不良品の選別を行う。プローバ装置/テスタ装置の構成例を図7-16-20に示す。プローブアレイをウエハの電極パッドに接触させ、テスタ装置でテストを行う。一つのチップのテストが終了すると、プローバ装置は次のチップへプローブアレイを移動させてテストを行う。このようにウエハ内のチップのテストを順次行う。

図7-16-20　プローバ装置/テスタ装置の構成例



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（1）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容とnotesは、赤字の部分がWassenaarになく相違がある。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(16)	6		十七	半導体素子、集積回路若しくは半導体物質の製造用の装置（ホにおいて「半導体製造装置」という。）若しくは試験装置若しくは集積回路の製造用のマスク若しくはレチクルであって、次のいずれかに該当するもの又はこれらの部分品若しくは附属品 イ　結晶のエピタキシャル成長装置であって、次のいずれかに該当するもの （一）75ミリメートル以上の長さにわたり膜の厚さの許容差の絶対値が2.5パーセント未満のシリコン以外の膜を形成するように設計又は改造したもの （二）有機金属化学的気相成長反応炉であって、アルミニウム、ガリウム、インジウム、砒素、燐、アンチモン又は窒素のいずれか２以上の元素を有する化合物半導体をエピタキシャル成長させるもの （三）ガス源又は固体源を用いた分子線エピタキシャル成長装置 注）貨物等省令第６条第十七号イ（一）中のシリコン以外の膜を形成できるもの原子層エピタキシー法を用いた装置を含む。	イ　結晶のエピタキシャル成長装置であって、次のいずれかに該当するもの （一）75ミリメートル以上の長さにわたり膜の厚さの許容差の絶対値が2.5パーセント未満のシリコン以外の膜を形成するように設計又は改造したもの

Wassenaar規制番号				Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番			
3B1	3	B	1	Equipment for the manufacturing of semiconductor devices or materials, as follows and specially designed components and accessories therefor: a. Equipment designed for epitaxial growth as follows: 1. Equipment designed or modified to produce a layer of any material other than silicon with a thickness uniform to less than ± 2.5% across a distance of 75 mm or more; 2. Metal Organic Chemical Vapour Deposition (MOCVD) reactors designed for compound semiconductor epitaxial growth of material having two or more of the following elements: aluminum, gallium, indium, arsenic, phosphorus, antimony, or nitrogen; 3. Molecular beam epitaxial growth equipment using gas or solid sources; Note3.B.1.a.1. includes atomic layer epitaxy (ALE) equipment.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（2）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(16)	6		十七	ロ　イオン注入装置であって、次のいずれかに該当するもの （一）削除 （二）水素、重水素又はヘリウムを注入する場合において、ビームエネルギーが20キロ電子ボルト以上、かつ、ビーム電流が10ミリアンペア以上で作動するように設計し、最適化したもの （三）直接描画を行うことができるもの （四）加熱された半導体材料の基板へ酸素を注入する場合において、ビームエネルギーが65キロ電子ボルト以上、かつ、ビーム電流が45ミリアンペア以上のもの （五）600度以上の温度に加熱された半導体材料の基板へシリコンを注入する場合において、ビームエネルギーが20キロ電子ボルト以上、かつ、ビーム電流が10ミリアンペア以上で作動するように設計し、最適化したもの	（二）水素、重水素又はヘリウムを注入する場合において、ビームエネルギーが20キロ電子ボルト以上、かつ、ビーム電流が10ミリアンペア以上で作動するように設計し、最適化したもの （三）直接描画を行うことができるもの （四）加熱された半導体材料の基板へ酸素を注入する場合において、ビームエネルギーが65キロ電子ボルト以上かつ、ビーム電流が45ミリアンペア以上のもの （五）600度以上の温度に加熱された半導体材料の基板へシリコンを注入する場合において、ビームエネルギーが20キロ電子ボルト以上、かつ、ビーム電流が10ミリアンペア以上で作動するように設計し、最適化したもの

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3B1	3	B	b. Equipment designed for ion implantation and having any of the following: 1. Not used since 2012 2. Being designed and optimized to operate at a beam energy of 20 keV or more and a beam current of 10 mA or more for hydrogen, deuterium or helium implant; 3. Direct write capability; 4. A beam energy of 65 keV or more and a beam current of 45 mA or more for high energy oxygen implant into a heated semiconductor material "substrate"; or 5. Being designed and optimized to operate at a beam energy of 20 keV or more and a beam current of 10 mA or more for silicon implant into a semiconductor material "substrate" heated to 600°C or greater;

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（3）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(16)	6		十七	ホ　自動的にウエハーの装填を行うことができるマルチチャンバー対応ウエハー搬送中央装置であって、次の（一）及び（二）に該当するもの ※ウエハー搬送中央装置 複数のウエハーに対し同一処理を同時に行うように設計したもの（ロボットを用いたものも含む。）を除く。 （一）　イ（一）から（三）まで又はロ（二）から（五）までのいずれかに該当する半導体製造装置であってそれぞれ異なるものを３台以上接続することができるように設計したウエハーの出し入れ用の接続部を有するもの（異なる機能を有するものを接続することができるものに限る。） ※貨物等省令第６条第十七号ホ中の半導体製造装置であってそれぞれ異なるもの 半導体製造装置であって、機能的に異なる物理的処理（デポジション、イオン注入又は熱処理を含む。）を行うモジュール式装置をいう。 （二）　複数のウエハーの処理を順次行うために真空状態で一体化された装置を構成するように設計したもの ※貨物等省令第６条第十七号ホ中の複数のウエハー処理を順次行うマルチチャンバー対応ウエハー搬送中央装置により、同一のウエハーを第一の処理を行う装置から第二の処理を行う装置へ、第二の処理を行う装置から第三の処理を行う装置へ搬送することなどにより、同一のウエハーを異なる半導体製造装置で処理することをいう。	それぞれ異なるものを３台以上接続することができるように設計したウエハーの出し入れ用の接続部を有する

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3B1	3	B	e. Automatic loading multi-chamber central wafer handling systems having all of the following: Note3.B.1.e. does not apply to automatic robotic wafer handling systems specially designed for parallel wafer processing. 1. Interfaces for wafer input and output, to which more than two functionally different 'semiconductor process tools' specified in by 3B001.a.1., 3B001.a.2., 3B001.a.3 or 3B001.b. are designed to be connected; and Technical Notes:1. For the purpose of 3.B.1.e., 'semiconductor process tools' refers to modular tools that provide physical processes for semiconductor production that are functionally different, such as deposition, implant or thermal processing. 2. Designed to form an integrated system in a vacuum environment for 'sequential multiple wafer processing'; Technical Notes:2. For the purpose of 3.B.1.e., 'sequential multiple wafer processing' means the capability to process each wafer in different 'semiconductor process tools', such as by transferring each wafer from one tool to a second tool and on to a third tool with the automatic loading multichamber central wafer handling systems.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
貨物・技術のマトリクス表
（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
PUBLIC DOCUMENTS Volume II
List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（4）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(16)	6		十七	ヘ リソグラフィ装置であって、次のいずれかに該当するもの （一）ウエハーの処理のためのステップアンドリピート方式又はステップアンドスキャン方式の露光装置であって、光学方式のもの又はエックス線を用いたもののうち、次のいずれかに該当するもの 1 光源の波長が193ナノメートル未満のもの 2 ナノメートルで表した光源の波長に0.35を乗じて得た数値を開口数の値で除して得た数値が45以下のもの （二）インプリントリソグラフィ装置であって、45ナノメートル以下の線幅を実現することができるもの 注：インプリントリソグラフィ装置 マイクロコンタクトプリンティング装置、ホットエンボシング装置、ナノインプリントリソグラフィ装置、及びステップアンドフラッシュインプリントリソグラフィ装置を含む。	（一）ウエハーの処理のためのステップアンドリピート方式又はステップアンドスキャン方式の露光装置であって、光学方式のもの又はエックス線を用いたもののうち、次のいずれかに該当するもの 1 光源の波長が193ナノメートル未満のもの 2 ナノメートルで表した光源の波長に0.35を乗じて得た数値を開口数の値で除して得た数値が45以下のもの （二）インプリントリソグラフィ装置であって、45ナノメートル以下の線幅を実現することができるもの

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3B1	3	B	f. Lithography equipment as follows: 1.Align and expose step and repeat (direct step on wafer) or step and scan (scanner) equipment for wafer processing using photo-optical or X-ray methods and having any of the following: a. A light source wavelength shorter than 193 nm; or b. Capable of producing a pattern with a 'Minimum Resolvable Feature size' (MRF) of 45 nm or less; Technical Note: The 'Minimum Resolvable Feature size' (MRF) is calculated by the following formula: MRF = (an exposure light source wavelength in nm) x (K factor) / numerical aperture where the K factor = 0.35 2. Imprint lithography equipment capable of producing features of 45 nm or less; Note 3.B.1.f.2. includes: - Micro contact printing tools - Hot embossing tools - Nano-imprint lithography tools - Step and flash imprint lithography (S-FIL) tools

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（5）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容とnotesは、赤字の部分に相違がある。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(16)	6		十七	ヘ リソグラフィ装置であって、次のいずれかに該当するもの （三）マスクの製造をすることができるように設計した装置であって、電子ビーム、イオンビーム又はレーザー光を用いたもののうち、次のいずれかに該当するもの 1 照射面の半値全幅の直径が65ナノメートル未満、かつ、イメージ位置誤差（平均値に３シグマを加えたもの）が17ナノメートル未満のもの 2 削除 3 マスク上の２層目の重ね合わせ誤差（平均値に３シグマを加えたもの）が23ナノメートル未満のもの （四）直接描画方式で半導体素子又は集積回路の製造をすることができるように設計した装置であって、電子ビームを用いたもののうち、次のいずれかに該当するもの 1 照射面の直径が15ナノメートル以下のもの 2 重ね合わせ誤差（平均値に3シグマを加えたもの）が27ナノメートル以下のもの	（三）マスクの製造をすることができるように設計した装置であって、電子ビーム、イオンビーム又はレーザー光を用いたもののうち、次のいずれかに該当するもの １照射面の半値全幅の直径が65ナノメートル未満、かつ、イメージ位置誤差（平均値に３シグマを加えたもの）が17ナノメートル未満のもの ３マスク上の２層目の重ね合わせ誤差（平均値に３シグマを加えたもの）が23ナノメートル未満のもの （四）直接描画方式で半導体素子又は集積回路の製造をすることができるように設計した装置であって、電子ビームを用いたもののうち、次のいずれかに該当するもの １照射面の直径が15ナノメートル以下のもの ２重ね合わせ誤差（平均値に3シグマを加えたもの）が27ナノメートル以下のもの

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3B1	3	B	3. Equipment specially designed for mask making having all of the following: a .A deflected focused electron beam, ion beam or "laser" beam; and b. Having any of the following: 1. A full-width half-maximum (FWHM) spot size smaller than 65 nm and an image placement less than 17 nm (mean + 3 sigma); or 2. Not used since 2015 3. A second-layer overlay error of less than 23 nm (mean + 3 sigma) on the mask; 4. Equipment designed for device processing using direct writing methods, having all of the following: a. A deflected focused electron beam; and b. Having any of the following: 1. A minimum beam size equal to or smaller than 15 nm; or 2. An overlay error less than 27 nm (mean + 3 sigma);

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（6）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容とnotesは、赤字の部分に相違がある。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(16)	6		十七	ヌ　試験装置であって、半導体素子若しくは集積回路又はこれらの半製品用のもののうち、次のいずれかに該当するもの (一) 第二号ニに該当する貨物のエスパラメータを試験することができるように設計したもの (二) 削除 (三) 第二号ハに該当する貨物の試験を行うことができるように設計したもの	

Wassenaar規制番号			Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番		
3B2	3	B	3B002 Test equipment specially designed for testing finished or unfinished semiconductor devices as follows and specially designed components and accessories therefor: a. For testing S-parameters of items specified in 3A001.b.3.; b. Not used since 2004 c. For testing items specified in by 3A001.b.2.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

半導体製造装置若しくは試験装置は、用途として半導体の製造に使用される。

半導体は、現在社会においてスマートフォンやPC等の情報通信機、自動車の自動運転やEVのパワートレイン等、工場のライン自動化や生産管理、電車や交通、エレベータ等の社会インフラ、テレビや洗濯機や冷蔵庫などの家電、CT・MRI・超音波診断などの医療機器、軍事関連機器や航空機や宇宙機器等幅広くあらゆる機器に使用されている。半導体製造装置若しくは試験装置の応用用途例を図7-16-21に示す。

図7-16-21　半導体製造装置若しくは試験装置の応用用途例



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

半導体製造装置と試験装置は、半導体の各製造工程で多数使用されており、目的もそれぞれ違うことから、規制がかかっている用途の分析、可視化として、半導体工程フローを可視化し各工程の概要を示した上で、それぞれの工程で使用されている半導体製造装置及び試験装置を一覧表にした。

半導体の製造工程とそれぞれの製造装置について、次頁以降に示している。

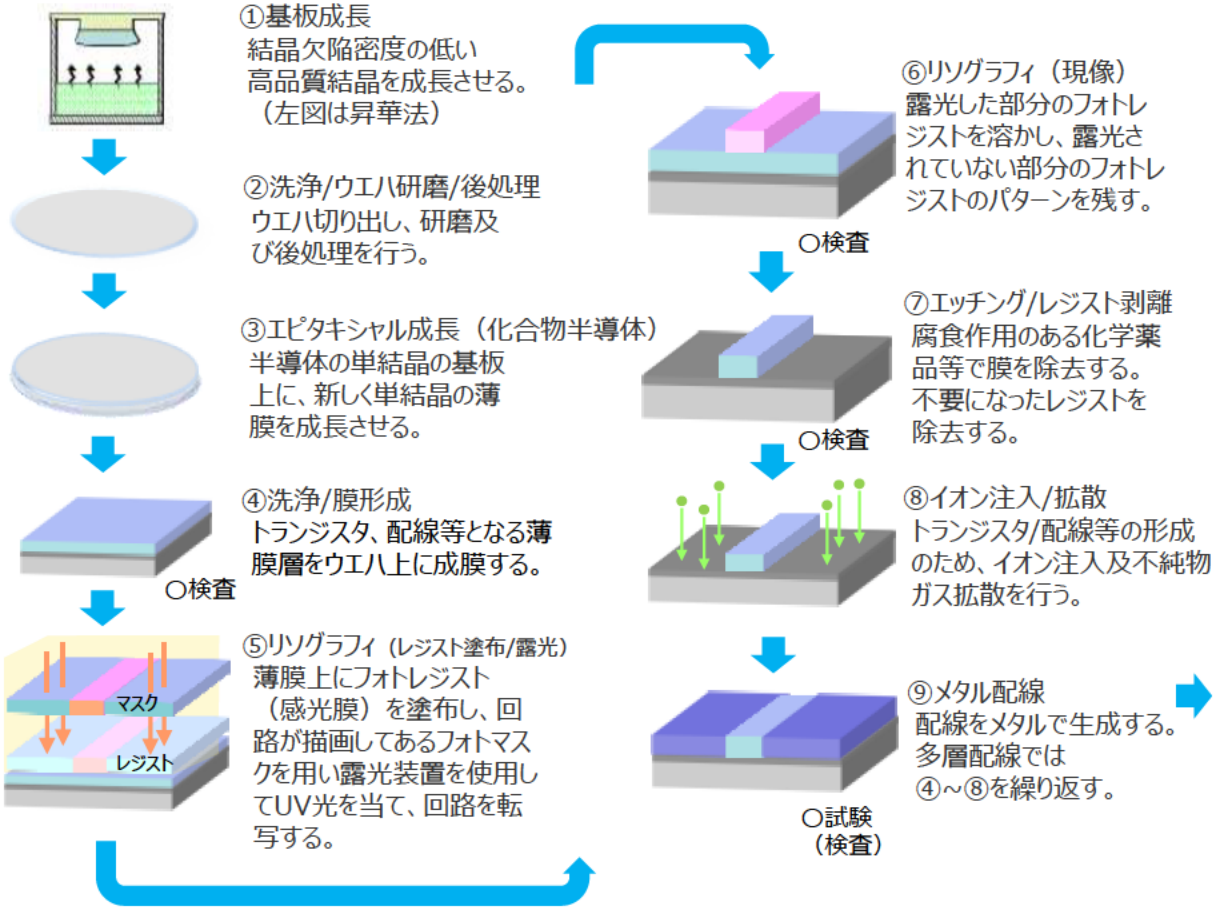
3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

ロジック／メモリ／パワー半導体の製造工程を図7-16-22に示す。

図7-16-22　ロジック／メモリ／パワー半導体の製造工程



半導体工程フロー
①基板成長
②ウエハ研磨/後処理
③エピタキシャル成長
④膜形成
⑤リソグラフィ（レジスト塗布/露光）
⑥現像
⑦エッチング/レジスト剥離
⑧イオン注入/拡散
⑨メタル配線

⑩後工程
- ウエハの極薄化
- ウエハ裏面金属メッキ
- ウエハ上のチップ個片化
- パッケージ基板にチップを固定（チップマウント等）
- パッケージ基板とチップを電気的に接続（ワイヤボンディング等）
- 樹脂封止/一括封止後のパッケージトリム/フォーミング
- 外観検査
- 出荷試験
- 信頼性試験

3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令第7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

ロジック／メモリ／パワー半導体の製造の工程の概要と主な製造装置を表7-16-1に示す。

表7-16-1　ロジック／メモリ／パワー半導体の製造の工程の概要と主な製造装置

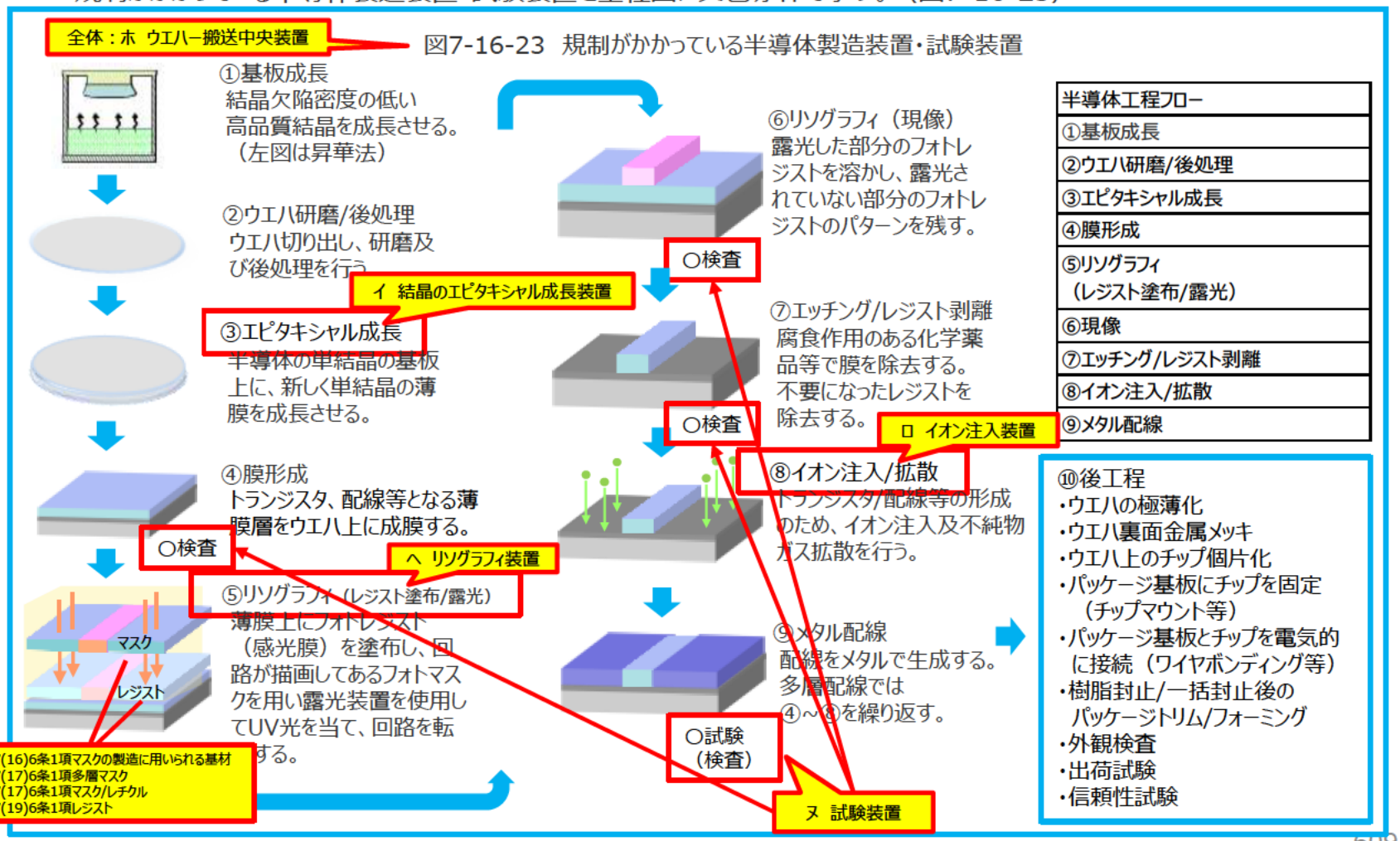
工程名		工程の概要	主な製造装置
①基板成長	種結晶	Bulk基板の種（化合物半導体）	VP又はLP成膜装置
	Bulk結晶	エピタキシャル前Bulk基板成長（化合物半導体）	MO-CVD装置、HVPE装置
②ウエハ研磨/後処理	研磨/後処理	エピタキシャル前基板処理（化合物半導体）	CMP装置
③エピタキシャル成長	Epi成長/処理	基板Epi成長（化合物半導体）	エピタキシャル成膜装置
④洗浄/膜形成	洗浄	ウエハ洗浄	洗浄装置
	ゲート成膜/層間成膜	ゲート材料/層間膜の成膜	酸化拡散炉、CVD/ALD装置、RTP装置、P-CVD
	配線コンタクト	多層配線/コンタクト層間膜の成膜/コンタクト活性化	スパッタ装置、メタルCVD/ALD装置、メッキ装置、レーザーアニール装置
	○成膜後検査	膜厚測定及びウェハ表面のパーティクル・異常検査	ウェハ表面検査装置、微小寸法測定装置、パーティクルカウンター
⑤リソグラフィ（レジスト塗布/露光）	レジスト塗布	露光用のレジスト薄膜形成	コータ
	露光	パターンの形成	露光装置
⑥リソグラフィ（現像）	現像	パターン以外のレジスト除去	現像装置（スピンデベロッパ）
	○現像後検査	ウェハ表面のレジスト残り、及び寸法の検査	ウェハ表面検査装置
⑦エッチング	エッチング／レジスト剥離	パターンの加工	エッチング装置
	○エッチング後検査	ウェハ表面のエッチング異常及び寸法の検査	ウェハ表面検査装置
⑧イオン注入/拡散	イオン注入/気固相拡散	基板及び配線材等への不純物導入	イオン注入装置 熱処理装置 （レーザーアニール装置）
⑨メタル配線	メタル配線	各素子及び回路ブロックの配線及び膜形成（④～⑧の繰り返し）	④～⑧
ウエハーテスト	○ウエハプローブテスト（試験/検査）	パワーデバイス前工程完了後の各チップのテスト、良品と不良品の判別	プロービングマシン/テスター

3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○輸出令7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化

規制がかかっている半導体製造装置・試験装置を工程図に黄色赤枠で示す。（図7-16-23）



4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

イ　結晶のエピタキシャル成長装置であって、次のいずれかに該当するもの

(一)結晶のエピタキシャル成長装置であって、75ミリメートル以上の長さにわたり膜の厚さの許容差の絶対値が2.5パーセント未満のシリコン以外の膜を形成するように設計又は改造したもの

ウエハーサイズと直径及び厚みの関係を表7-16-2に示す。規制パラメータは、75ミリメートル以上の長さなので、3インチ以上の直径を持つウエハー（76ミリメートルプラス0.5）で、その面内で膜の厚さの許容差の絶対値が2.5パーセント未満ものもが、規制の対象となっている。ウエハーの直径は大きいほど量産性が高まり、面内で膜の厚さの許容差の絶対値は小さいほど精度の高いトランジスタが製造でき、シリコン以外の膜、例えば化合物半導体では耐放射線が高くなり、それぞれ軍事用の半導体として、過酷な使用条件下で使用が可能な半導体が製造できるようになる。

（二）有機金属化学的気相成長反応炉であって、アルミニウム、ガリウム、インジウム、砒素、燐、アンチモン又は窒素のいずれか２以上の元素を有する化合物半導体をエピタキシャル成長させるもの

近年、規制対象となっているアルミニウム、ガリウム、インジウム、砒素、燐、アンチモン又は窒素を組み合わせた化合物半導体は、シリコンよりも電子の移動速度がはるかに速いため高速信号処理に優れ、低電圧での動作や、光への反応、マイクロ波の発生等優れた特性を備えているので、課題を克服しつつキーマテリアルとして広く使われ始めている。これらの特徴を生かし軍事用の半導体が開発、製造されている。周期律表から見た化合物半導体の組み合わせを、表7-16-3に示す。規制対象となっている元素を赤枠で囲っている。

規制パラメータに関わる市販のパワーデバイス用のエピタキシャル成長装置は、ウェハーサイズが、75mm,100mm,150mm,200mmの対応可能な装置がある。150μm膜厚で、直径200mm内の膜厚許容差±2.5%未満から±1.5%の装置がある。

規制パラメータ　輸出令第7項(16)

半導体素子、集積回路若しくは半導体物質の製造用の装置（ホにおいて「半導体製造装置」という。）若しくは試験装置若しくは集積回路の製造用のマスク若しくはレチクルであって、次のいずれかに該当するもの又はこれらの部分品若しくは附属品

イ　結晶のエピタキシャル成長装置であって、次のいずれかに該当するもの

（一）75ミリメートル以上の長さにわたり膜の厚さの許容差の絶対値が2.5パーセント未満のシリコン以外の膜を形成するように設計又は改造したもの

（二）有機金属化学的気相成長反応炉であって、アルミニウム、ガリウム、インジウム、砒素、燐、アンチモン又は窒素のいずれか２以上の元素を有する化合物半導体をエピタキシャル成長させるもの

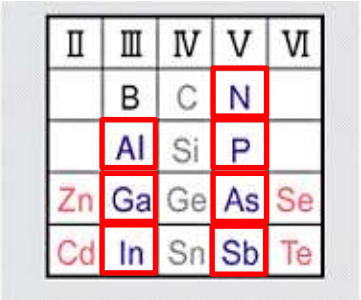
（三）ガス源又は固体源を用いた分子線エピタキシャル成長装置

注）貨物等省令第６条第十七号イ（一）中のシリコン以外の膜を形成できるもの原子層エピタキシー法を用いた装置を含む。

表7-16-2　ウエハーサイズと直径及び厚みの関係

ウエハーサイズ		2"	3"	4"	5"	6"	8"	12"
直　径　(mm)	JEITA	50±0.5	76±0.5	100±0.2	125±0.2	150±0.2	200±0.5	300±0.2
	SEMI	50.8±0.38	76.2±0.63	100±0.5	125±0.5	150±0.2	200±0.2	300±0.2
厚　み　(μm)	JEITA	280±10	380±15	525±15	625±15	625±15	725±25	775±25
	SEMI	279±25	381±25	520±20	625±20	675±20	725±20	775±20

表7-16-3　周期律表から見た化合物半導体の組み合わせ



4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

（三）ガス源又は固体源を用いた分子線エピタキシャル成長装置

成長させるべき材料を10^{-8}～10^{-9}Paの超高真空中で分子ビーム状にして対向するウェーハ上に単結晶層を成長させる装置である。不純物、結晶欠陥の極めて少ない薄膜を低温で作製できる特徴を持っている。成膜中その場で組成分析あるいは結晶性を観察する付属機能が設けられるのが通常である。

規制パラメータ　輸出令第7項(16)

半導体素子、集積回路若しくは半導体物質の製造用の装置（ホにおいて「半導体製造装置」という。）若しくは試験装置若しくは集積回路の製造用のマスク若しくはレチクルであって、次のいずれかに該当するもの又はこれらの部分品若しくは附属品

イ　結晶のエピタキシャル成長装置であって、次のいずれかに該当するもの

（一）75ミリメートル以上の長さにわたり膜の厚さの許容差の絶対値が2.5パーセント未満のシリコン以外の膜を形成するように設計又は改造したもの

（二）有機金属化学的気相成長反応炉であって、アルミニウム、ガリウム、インジウム、砒素、燐、アンチモン又は窒素のいずれか２以上の元素を有する化合物半導体をエピタキシャル成長させるもの

（三）ガス源又は固体源を用いた分子線エピタキシャル成長装置

注）貨物等省令第６条第十七号イ（一）中のシリコン以外の膜を形成できるもの原子層エピタキシー法を用いた装置を含む。

注）貨物等省令第６条第十七号イ（一）中のシリコン以外の膜を形成できるもの原子層エピタキシー法を用いた装置を含む。

ALD装置（Atomic Layer Deposition:原子層エピタキシー法）（図7-16-6）（再掲）

ALD装置は、反応室に有機金属原料と酸化剤を交互に供給し、表面反応のみを利用して成膜する装置である。ALD装置は基板上に原料の供給と余剰原料の除去を繰り返すことで原子層1層ずつを成膜する手法である。例えば酸化膜や窒化膜の成膜において、原料ガスが表面反応により1層形成され成長が止まる自己停止機能により、1層ごとの膜形成を繰り返すLayer by layerのナノレベルの成膜が可能である。次世代パワーデバイスのゲート高耐圧膜を製造することが可能である。

規制パラメータに関わる市販のALD装置は、直径100mmウエハーを25枚一括処理できるタイプの装置や直径200mmウエハーを1枚ずつ処理できるタイプの装置がある。ガス源又は固体源のプリカーサーは、複数種類搭載できるのが一般的である。

図7-16-6　ALD装置



4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

規制パラメータ　輸出令第7項(16)

ロ　イオン注入装置であって、次のいずれかに該当するもの

（一）削除

（二）水素、重水素又はヘリウムを注入する場合において、ビームエネルギーが20キロ電子ボルト以上、かつ、ビーム電流が10ミリアンペア以上で作動するように設計し、最適化したもの

（三）直接描画を行うことができるもの

（四）加熱された半導体材料の基板へ酸素を注入する場合において、ビームエネルギーが65キロ電子ボルト以上、かつ、ビーム電流が45ミリアンペア以上のもの

（五）600度以上の温度に加熱された半導体材料の基板へシリコンを注入する場合において、ビームエネルギーが20キロ電子ボルト以上、かつ、ビーム電流が10ミリアンペア以上で作動するように設計し、最適化したもの

ロ　イオン注入装置であって、次のいずれかに該当するもの

規制パラメータに関わるイオン注入の種類を図7-16-24に示す。

（二）水素、重水素又はヘリウムを注入する場合において、ビームエネルギーが20キロ電子ボルト以上、かつ、ビーム電流が10ミリアンペア以上で作動するように設計し、最適化したもの

イオン注入装置において、図7-16-24のイオン注入物質に水素、重水素、ヘリウムが使用される装置は、規制対象である。半導体基板や半導体素子の特性向上などに使われる。

（三）直接描画を行うことができるもの

イオン注入装置において、、図7-16-24（b）の様に、イオン注入物質をレジスト無しで直接描画できる装置は、規制対象である。

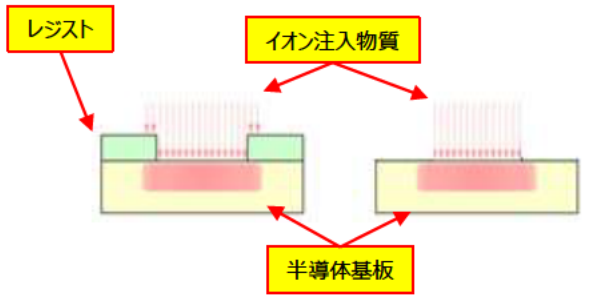
（四）加熱された半導体材料の基板へ酸素を注入する場合において、ビームエネルギーが65キロ電子ボルト以上、かつ、ビーム電流が45ミリアンペア以上のもの

イオン注入装置において、図7-16-24のイオン注入物質が酸素であり、その酸素が加熱された半導体基板中に深く注入できる装置は、規制対象である。用途としては、SIMOX (Separation by IMpIanted OXygen)のように、高濃度の酸素をSi基板にイオン注入し、埋め込みSiO2層を形成した半導体基板作成などに使われる。

（五）600度以上の温度に加熱された半導体材料の基板へシリコンを注入する場合において、ビームエネルギーが20キロ電子ボルト以上、かつ、ビーム電流が10ミリアンペア以上で作動するように設計し、最適化したもの

イオン注入装置において、図7-16-24のイオン注入物質がシリコンであり、そのシリコンが加熱された半導体基板中に注入できる装置は、規制対象である。半導体基板や半導体素子の特性向上などに使われる。

図7-16-24　イオン注入の種類



(a)イオン注入による ドーピング　　(b)直接描画による イオン注入

ドーピング法	レジストパターン
イオンビーム	あり
	なし（直接描画）

規制パラメータに関わる市販のイオン注入装置において、20keV以上の製品は、中電流装置と高エネルギー装置に相当する。中電流装置は20～350keV相当で、高エネルギー装置では8MeVまで対応可能な装置がある。注入イオン種は、B、P、ASだけでなくAl、N 、O 原子など60種類以上対応できる装置がある。レーザー、パワーデバイス向けとして、水素、ヘリウムなどの注入イオン種のイオン注入装置がある。ビーム電流は、注入イオン種によっても変わるが、最大100mA(@200keV)の製品がある。基板温度は、600度が通常であるが、最大800度の装置もある。

4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

ホ　自動的にウエハーの装填を行うことができるマルチチャンバー対応ウエハー搬送中央装置であって、次の（一）及び（二）に該当するもの

※ウエハー搬送中央装置

複数のウエハーに対し同一処理を同時に行うように設計したもの（ロボットを用いたものも含む。）を除く。

図7-15-25にマルチチャンバ型半導体装置の事例を示す。ウェハー搬送中央装置は、図中の真空用ロボット、大気用ロボットである。その周りがチャンバ（赤枠線内）チャンバである。

（一）　イ（一）から（三）まで又はロ（二）から（五）までのいずれに該当する半導体製造装置であってそれぞれ異なるものを３台以上接続することができるように設計したウエハーの出し入れ用の接続部を有するもの（異なる機能を有するものを接続することができるものに限る。）

※貨物等省令第６条第十七号ホ中の半導体製造装置であってそれぞれ異なるもの

半導体製造装置であって、機能的に異なる物理的処理（デポジション、イオン注入又は熱処理を含む。）を行うモジュール式装置をいう。

マルチチャンバ型半導体製造装置において、異なる物理処理ができるチャンバが3台以上を備えるマルチチャンバ型半導体製造装置は、規制対象である。

（二）　複数のウエハーの処理を順次行うために真空状態で一体化された装置を構成するように設計したもの

※貨物等省令第６条第十七号ホ中の複数のウエハー処理を順次行うマルチチャンーバ対応ウエハー搬送中央装置により、同一のウエハーを第一の処理を行う装置から第二の処理を行う装置へ、第二の処理を行う装置から第三の処理を行う装置へ搬送することなどにより、同一のウエハーを異なる半導体製造装置で処理することをいう。

マルチチャンバ型半導体製造装置において、真空ロックチャンバで大気側と区切られ真空側のマルチチャンバ型半導体製造装置は、規制対象である。

規制パラメータに関わる市販のマルチチャンバ型半導体製造装置は、成膜槽と入口槽、出口槽の任意な組み合わせにより、自由なシステム構成が可能である。チャンバ間の搬送には、ゲート弁、大型真空搬送ロボットなど各種ハンドリング装置を、自在にアレンジが可能である。

規制パラメータ　輸出令第7項(16)

ホ 自動的にウエハーの装填を行うことができるマルチチャンバー対応ウエハー搬送中央装置であって、次の（一）及び（二）に該当するもの

※ウエハー搬送中央装置

複数のウエハーに対し同一処理を同時に行うように設計したもの（ロボットを用いたものも含む。）を除く。

（一）　イ（一）から（三）まで又はロ（二）から（五）までのいずれかに該当する半導体製造装置であってそれぞれ異なるものを３台以上接続することができるように設計したウエハーの出し入れ用の接続部を有するもの（異なる機能を有するものを接続することができるものに限る。）

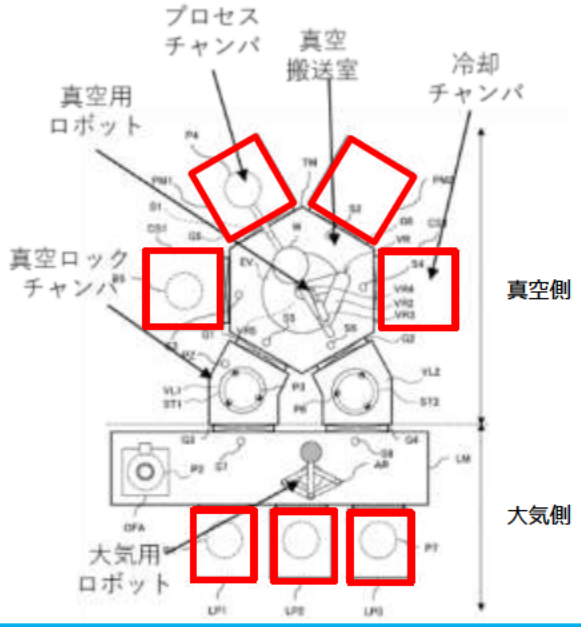
※貨物等省令第６条第十七号ホ中の半導体製造装置であってそれぞれ異なるもの

半導体製造装置であって、機能的に異なる物理的処理（デポジション、イオン注入又は熱処理を含む。）を行うモジュール式装置をいう。

（二）　複数のウエハーの処理を順次行うために真空状態で一体化された装置を構成するように設計したもの

※貨物等省令第６条第十七号ホ中の複数のウエハー処理を順次行うマルチチャンバー対応ウエハー搬送中央装置により、同一のウエハーを第一の処理を行う装置から第二の処理を行う装置へ、第二の処理を行う装置から第三の処理を行う装置へ搬送することなどにより、同一のウエハーを異なる半導体製造装置で処理することをいう。

図7-16-25　マルチチャンバ型半導体製造装置



4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

へ リソグラフィ装置であって、次のいずれかに該当するもの
（一）ウエハーの処理のためのステップアンドリピート方式又はステップアンドスキャン方式の露光装置であって、光学方式のもの又はエックス線を用いたもののうち、次のいずれかに該当するもの
1 光源の波長が193ナノメートル未満のもの
2 ナノメートルで表した光源の波長に0.35を乗じて得た数値を開口数の値で除して得た数値が45以下のもの

リソグラフィ装置において、露光光源の波長と開口数の関係を図7-16-26に示す。レイリーの式からの解像度は示されている。ArF露光光源より短い波長で、解像度45nm以下は、規制対象である。ArF露光の下側は、ArF液浸露光の解像度が45nm以下の事例である。

（二）インプリントリソグラフィ装置であって、45ナノメートル以下の線幅を実現することができるもの
注：インプリントリソグラフィ装置
マイクロコンタクトプリンティング装置、ホットエンボシング装置、ナノインプリントリソグラフィ装置、及びステップアンドフラッシュインプリントリソグラフィ装置を含む。

ナノインプリントの工程フローを、図7-16-27に示す。インプリントリソグラフィ装置は、プリント技術を使用してマスク（型）をパターン形成される側に押し当てて、転写パターンを写し取るものである。

インプリントリソグラフィ装置には、マイクロコンタクトプリンティング装置、ホットエンボシング装置、ナノインプリントリソグラフィ装置、及びステップアンドフラッシュインプリントリソグラフィ装置があり、45nm以下の転写パターンが形成できるものは規制対象である。

規制パラメータに関わる市販のリソグラフィ装置は、ArF液浸縮小露光装置とEUV縮小露光装置である。規制パラメータに関わるインプリントリソグラフィ装置は、試用段階であり、明確なスペック提示のある市販装置はこれからである。

規制パラメータ 輸出令第7項(16)
へ リソグラフィ装置であって、次のいずれかに該当するもの
（一）ウエハーの処理のためのステップアンドリピート方式又はステップアンドスキャン方式の露光装置であって、光学方式のもの又はエックス線を用いたもののうち、次のいずれかに該当するもの
1 光源の波長が193ナノメートル未満のもの
2 ナノメートルで表した光源の波長に0.35を乗じて得た数値を開口数の値で除して得た数値が45以下のもの
（二）インプリントリソグラフィ装置であって、45ナノメートル以下の線幅を実現することができるもの
注：インプリントリソグラフィ装置
マイクロコンタクトプリンティング装置、ホットエンボシング装置、ナノインプリントリソグラフィ装置、及びステップアンドフラッシュインプリントリソグラフィ装置を含む。

図7-16-26 波長と開口数の関係

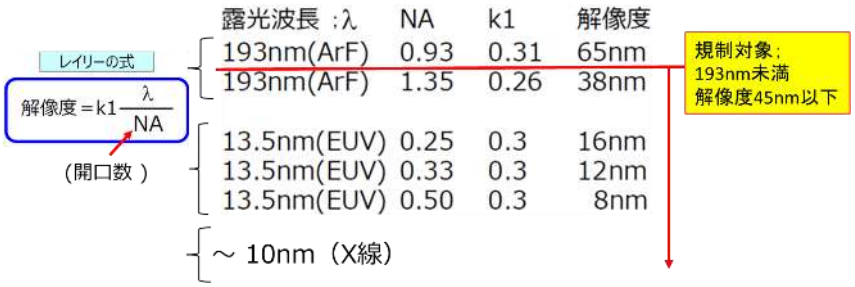
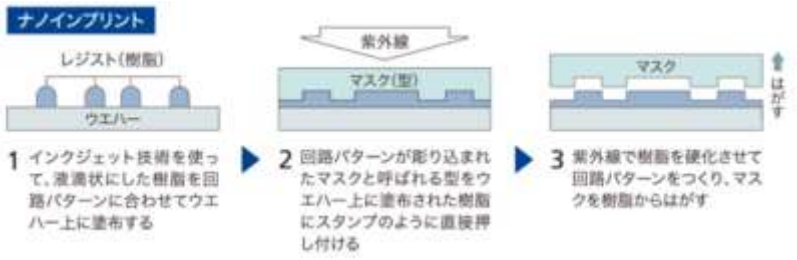


図7-16-27 ナノインプリントの工程フロー



4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

へ リソグラフィ装置であって、次のいずれかに該当するもの

（三）マスクの製造をすることができるように設計した装置であって、電子ビーム、イオンビーム又はレーザー光を用いたもののうち、次のいずれかに該当するもの

1 照射面の半値全幅の直径が65ナノメートル未満、かつ、イメージ位置誤差（平均値に３シグマを加えたもの）が17ナノメートル未満のもの

3 マスク上の２層目の重ね合わせ誤差（平均値に３シグマを加えたもの）が23ナノメートル未満のもの

フォトマスクの製造工程を、図7-16-28に示す。石英ガラスと金属膜（クロム）のマスクフランクスにレジスト膜を塗布して、電子ビーム、イオンビーム又はレーザー光にて回路パターンを描画する。マスクを描画するリソグラフィ装置において、上記1及び3に該当するリソグラフィ装置は、規制対象である。

（四）直接描画方式で半導体素子又は集積回路の製造をすることができるように設計した装置であって、電子ビームを用いたもののうち、次のいずれかに該当するもの

1 照射面の直径が15ナノメートル以下のもの

2 重ね合わせ誤差（平均値に3シグマを加えたもの）が27ナノメートル以下のもの。

直接描画装置の構成例を、図7-16-16（再掲）に示す。電子線直接描画は、研究開発用や少量生産用のウエハーの直接描画に適しており、次世代半導体素子の研究開発用や高周波半導体素子、光半導体素子などの生産用として使用されている。上記1及び2に該当する直接描画装置は、規制対象である。

規制パラメータに関わる市販のマスク描画装置装置は、7nmノード先端マスク量産対応の電子ビームマスク描画装置がある。マスクサイズは6インチマスク対応で、加速電圧は50kV、電流密度は1200A/cm^{2}である。

規制パラメータ　輸出令第7項(16)

へ リソグラフィ装置であって、次のいずれかに該当するもの

（三）マスクの製造をすることができるように設計した装置であって、電子ビーム、イオンビーム又はレーザー光を用いたもののうち、次のいずれかに該当するもの

1 照射面の半値全幅の直径が65ナノメートル未満、かつ、イメージ位置誤差（平均値に３シグマを加えたもの）が17ナノメートル未満のもの

2 削除

3 マスク上の２層目の重ね合わせ誤差（平均値に３シグマを加えたもの）が23ナノメートル未満のもの

（四）直接描画方式で半導体素子又は集積回路の製造をすることができるように設計した装置であって、電子ビームを用いたもののうち、次のいずれかに該当するもの

1 照射面の直径が15ナノメートル以下のもの

2 重ね合わせ誤差（平均値に3シグマを加えたもの）が27ナノメートル以下のもの。

図7-16-28　フォトマスクの製造工程

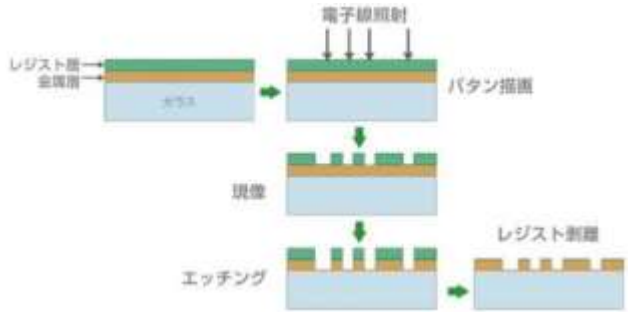
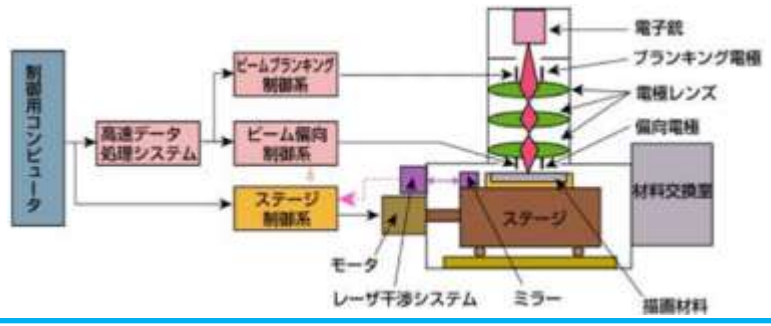


図7-16-16　直接描画装置の構成例



4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

ヌ　試験装置であって、半導体素子若しくは集積回路又はこれらの半製品用のもののうち、次のいずれかに該当するもの

(一) 第二号ニに該当する貨物のエスパラメータを試験することができるように設計したもの

マイクロ波用機器やミリ波用機器の半導体素子のSパラメータ測定を、図7-16-29に示す。ネットワークアナライザーなどの測定装置に、被測定物をケーブル線で接続し、被測定物のSパラメーターなどを測定する。このようなSパラメータ特性や解析できる試験装置は、規制対象である。

(三) 第二号ハに該当する貨物の試験を行うことができるように設計したもの

図7-16-30は、モノリシックマイクロ波集積回路（Monolithic Microwave Integrated Circuit 、略称MMIC）の製品外観である。このようなMMICにおいて、移相器回路機能を有しない送受信モジュール、送受信用モノリシックマイクロ波集積回路、送信モジュール及び送信用モノリシックマイクロ波集積回路であって、動作周波数が2.7ギガヘルツを超えるMMIC増幅器は、規制対象である。

規制パラメータに関わるSパラメータを試験することができる市販の測定装置には、ネットワークアナライザがある。測定周波数範囲は、70kHz～70GHhzで、最大140 dBのダイナミックレンジのネットワークアナライザ装置がある。ミリ波のSパラメータ測定では、測定周波数範囲は、70kHz～110GHhzで、90dB@110GHzのダイナミックレンジのネットワークアナライザ装置がある。

規制パラメータ　輸出令第7項(16)

ヌ　試験装置であって、半導体素子若しくは集積回路又はこれらの半製品用のもののうち、次のいずれかに該当するもの

(一) 第二号ニに該当する貨物のエスパラメータを試験することができるように設計したもの

(二) 削除

(三) 第二号ハに該当する貨物の試験を行うことができるように設計したもの

図7-16-29　Sパラメータ測定

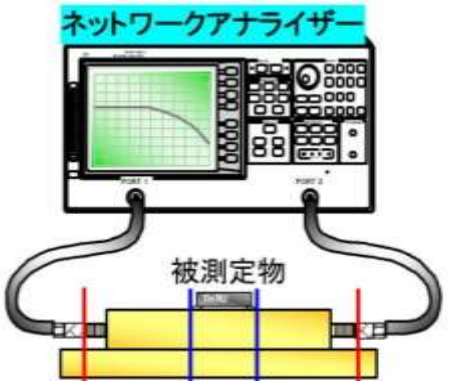


図7-16-30　モノリシックマイクロ波集積回路



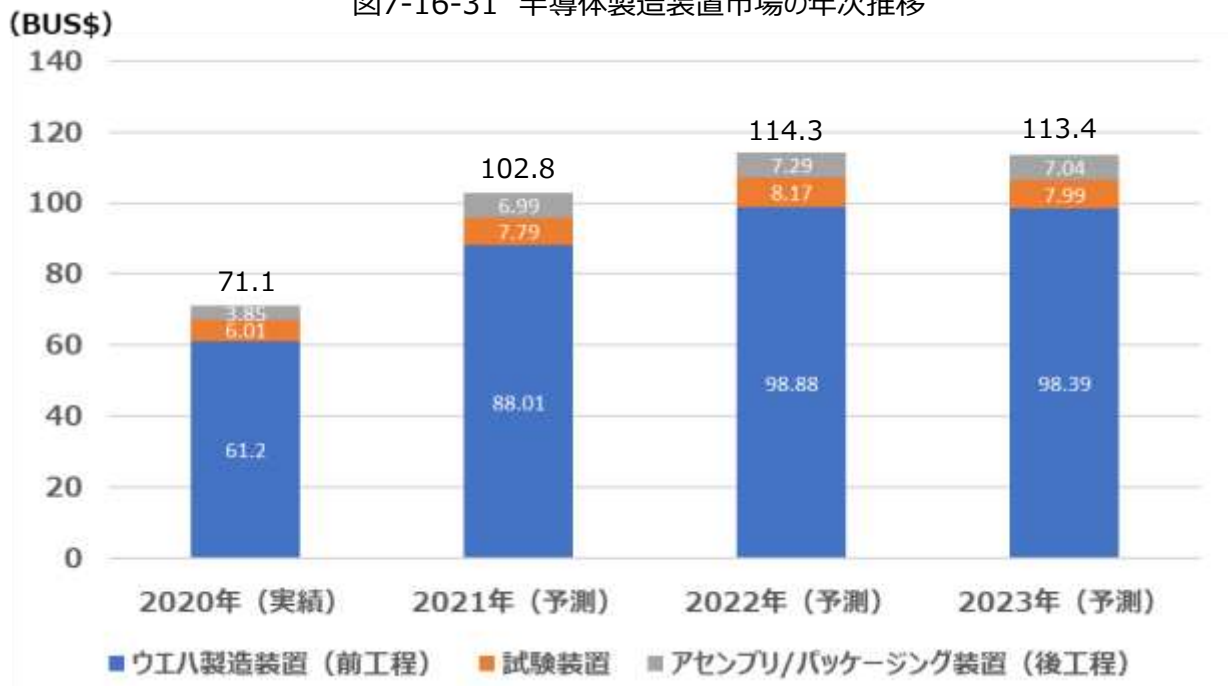
4.品目の技術動向調査（8）

○輸出令7項（16）半導体製造装置若しくは試験装置

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（1）

SEMI（本部：米国カリフォルニア州ミルピタス）の半導体製造装置市場の年次推移を図7-16-31に示す。半導体製造装置の世界市場規模は、過去最高であった2020年の711億ドルから2021年には44.7%増加し1028億ドルとなり、2022年は1143億ドルと連続して記録を更新する見込みである。前工程で使用するウエハー製造装置の市場は、2021年は前年比43.8%増の880億ドルに達する。2022年には前年比12.4%増の約989億ドルになるが、2023年には前年比0.5%減の約984億ドルになると予測されている。

図7-16-31　半導体製造装置市場の年次推移



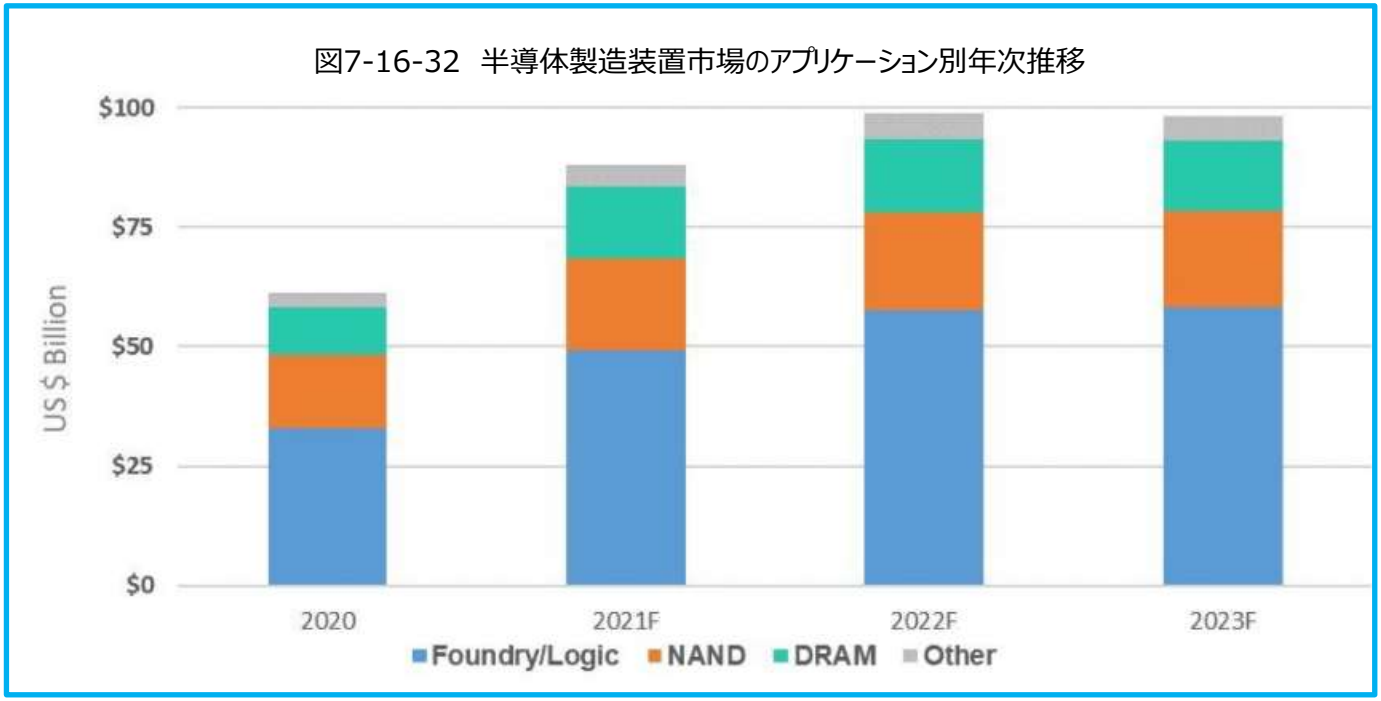
4.品目の技術動向調査（9）

○輸出令7項（11）デジタル方式の記録装置

③市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

SEMIの半導体製造装置市場のアプリケーション別年次推移を図7-16-32に示す。ウエハー製造装置関連市場の中でも、販売額で特に大きな割合を占めるファウンドリとロジック関連市場は、2021年には前年比50%増の493億ドルに達した。既存／最先端ノードへの投資額が大きく増加したためで、2022年もこの傾向は続き、ファウンドリとロジック関連市場の投資額は前年比17%増となる見通しである。NAND、DRAM装置市場も企業とコンシューマーによる需要に後押しされる形で成長した。DRAM製造装置市場は2021年には前年比52%増の約151億ドルに達する。2022年には前年比1%増の約153億ドルになる見通しである。NANDフラッシュ製造装置市場は2021年には前年比52%増の約151億ドルに達し、2022年は前年比8%増の約206億ドルになると予想されている。2023年にはDRAM装置市場が前年比2%減、NAND装置市場が3%減となる見込みである。

図7-16-32　半導体製造装置市場のアプリケーション別年次推移



4.品目の技術動向調査（10）

○輸出令7項（11）デジタル方式の記録装置

③市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

2020年の半導体製造装置の売上企業ランキングを表7-16-4に示す（出所:VLSIresearch）。トップは米Applied Materials（米国）である。

しかし、今後、IntelがEUVを7nm CPUの製造で多用し、新たに建設するアリゾナ州の2つのファブにもEUV露光装置を導入することを宣言しており、1台200億円規模とされるEUV露光装置がTSMC、Samsung Electronics、SK Hynixに続き、Intelでも多数納入されるようになれば、売上高でASML（オランダ）がAMATを抜き、トップに立つ可能性も出てくる。

Applied Materials（米国）、ASML（オランダ）、Lam Research（米国）、東京エレクトロン （日本）の4社が年間売上高100億ドル(約1兆円)を超す4強であり、5位のKLAは4位TELの売り上げの半分以下、6位のアドバンテストになると5位KLAの半分以下の売り上げと、下位に行くほど、売上高の絶対額が大きく減少している。

表7-16-4 半導体製造装置の売上企業ランキング（MUS$）

2020 Rank	AOW	COMPANY	2019	2020	Growth	2020 Share
1	USA	Applied Materials	13,468	16,365	21.5%	17.7%
2	Europe	ASML	12,770	15,396	20.6%	16.7%
3	USA	Lam Research	9,549	11,929	24.9%	12.9%
4	Japan	Tokyo Electron	9,552	11,321	18.5%	12.3%
5	USA	KLA	4,704	5,443	15.7%	5.9%
6	Japan	Advantest	2,470	2,531	2.5%	2.7%
7	Japan	SCREEN	2,200	2,331	6.0%	2.5%
8	USA	Teradyne	1,553	2,259	45.5%	2.4%
9	Japan	Hitachi High-Tech	1,490	1,717	15.2%	1.9%
10	Europe	ASM International	1,261	1,516	20.2%	1.6%
11	Japan	Kokusai Electric	1,127	1,455	29.1%	1.6%
12	Japan	Nikon	1,104	1,085	-1.7%	1.2%
13	Korea	SEMES	489	1,056	116.0%	1.1%
14	ROW	ASM Pacific Technology	894	1,027	14.9%	1.1%
15	Japan	Daifuku	1,107	940	-15.1%	1.0%
		Others	14,294	16,034	12.2%	17.4%
		Total	78,032	92,405	18.4%	100%

4.品目の技術動向調査（11）

○輸出令7項（11）デジタル方式の記録装置

③市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（4）

各工程の半導体製造装置（前工程）の参入企業を図7-16-33に、主な製造装置の企業シェア（2018年）を図7-6-34に示す。

製造装置市場でシェアトップのApplied Materials（米国）は、イオン注入装置、CMP装置、スパッタリング装置で高いシェアを占めている。シェア2位のASML（オランダ）は露光装置で80%のシェアを占めている。日本企業では東京エレクトロン（TEL）、SCREENが、コータ・デベロッパ、洗浄装置などで50%以上のシェアを占めている。

図7-16-34　主な製造装置の企業シェア（2018年）

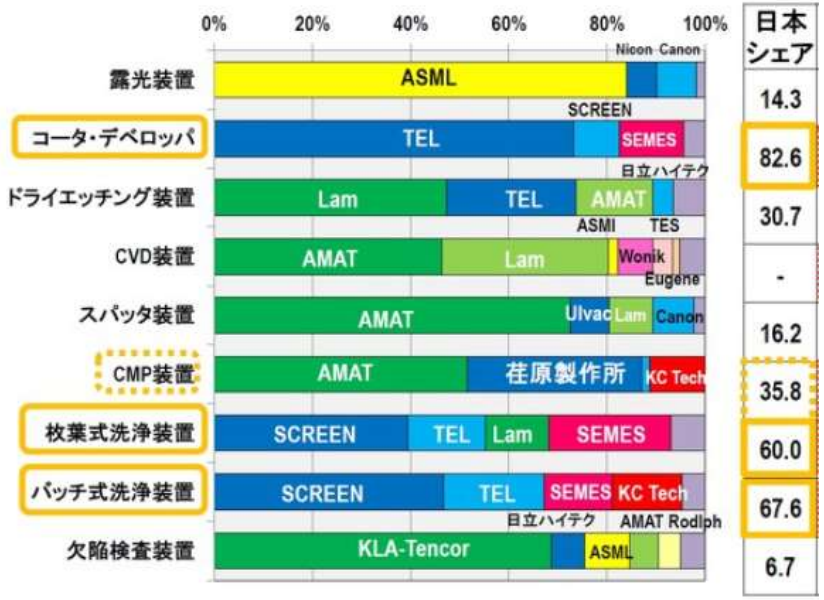


図7-16-33　各工程の半導体製造装置（前工程）の参入企業



目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（17）
マスク又はレチクル

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（１）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

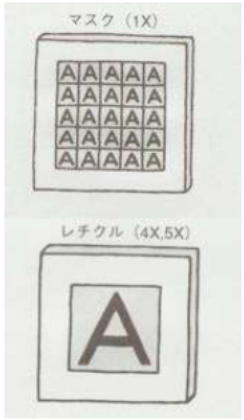
マスク・レチクルとは、集積回路（IC：Integrated Circuit）のトランジスタ、抵抗（電気抵抗）、コンデンサなどの機能を持つ素子のレイアウト情報を、半導体基板上に露光・転写するときに使われる原版である。通常フォトマスクとも呼ばれる。図7-17-1にマスク・レチクルの概要を示す。図7-17-1(a)に示すように、フォトマスクには、4－5倍の寸法でレンズにより縮小する拡大マスクとウェハに同じ寸法のパターンを形成する等倍マスクとがあり、前者をレクチル（reticle 望遠鏡内の標準）と言う。現在は拡大マスクが主流となっており、単にマスクと呼ぶことが多い。マスクは半導体製品を製造する前工程のリソグラフィ工程で使われる。

マスクは、通常等倍で露光・転写するときの原版であり、図7-17-1(b)のように露光によるフォトマスクと押印によるインプリントマスク（テンプレート）に大きく別れる。

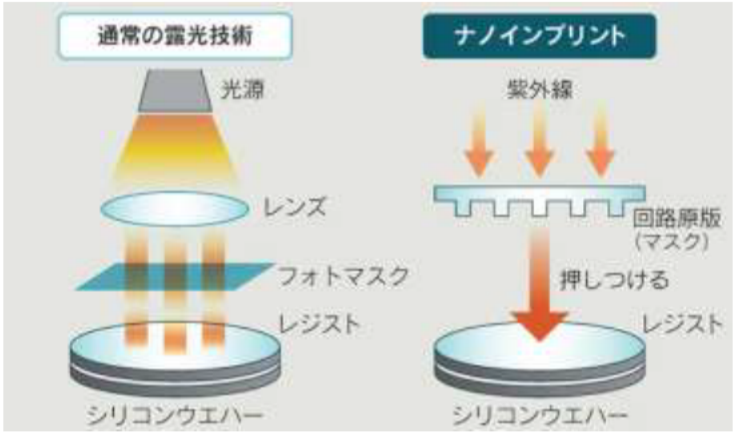
レチクルは、ステッパーやスキャナーと呼ばれる露光装置を使ってウェハ上に縮小露光・転写するときの原版である。図7-171(b)の縮小露光・転写のケースである。主にステッパーで使用するフォトマスクをレチクルという。

図7-17-1　マスク・レチクルの概要

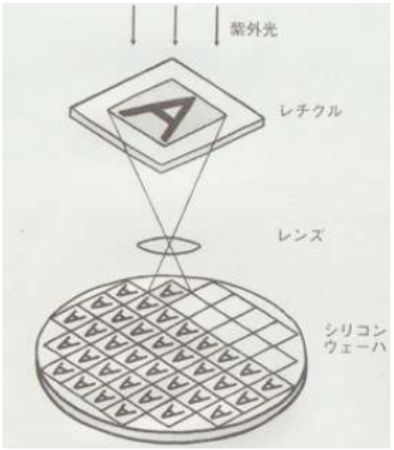
(a)マスクとレチクル



(b)等倍露光・転写のケース



(c)縮小露光・転写のケース



1.対象品目の概要調査（２）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

半導体の微細化には、リソグラフィ技術の進展の貢献が大きい。リソグラフィ技術の進展と共に、それに対応するマスク技術が開発されている。 図7-17-2がリソグラフィの進展の図であり、解像度・寸法を縮小させるために縮小投影露光の光源線として水銀ランプ、エキシマレーザーやEUV（Extreme Ultraviolet）が使われている。光源線の開発ばかりでは無く、それに伴うマスク技術図進展も重要となっている。

図7-17-3は、リソグラフィ技術対応のマスク種類である。光源の波長λの解像度を超えてレジスト上の解像度を上げる超解像度手法を適用した位相シフトマスク、ハーフトーンマスク、グレイトーンマスク、光近接効果補正技術適用マスクや計算機リソグラフィ技術適用マスクなどである。その他、押印によるインプリントマスク（テンプレート）やEUV線光源適用でも使えるEUVマスクがある。以降、それぞれのマスクについて説明する。

図7-17-2　リソグラフィ技術の進展

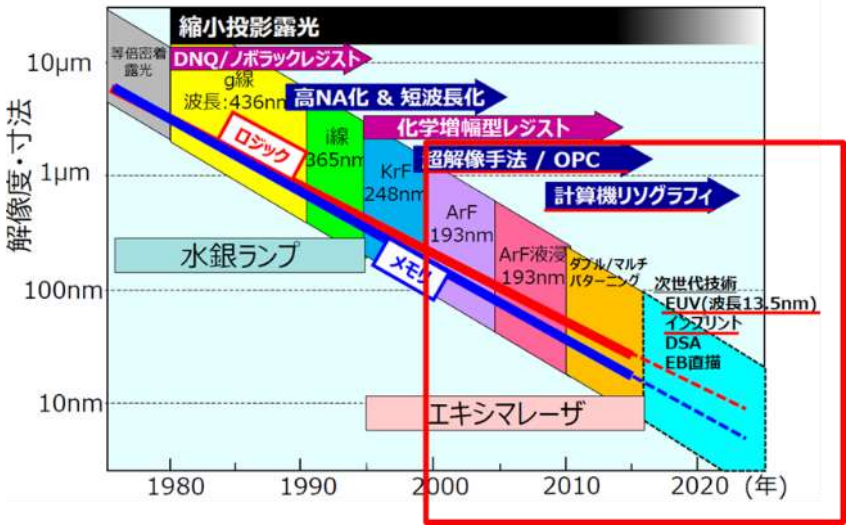
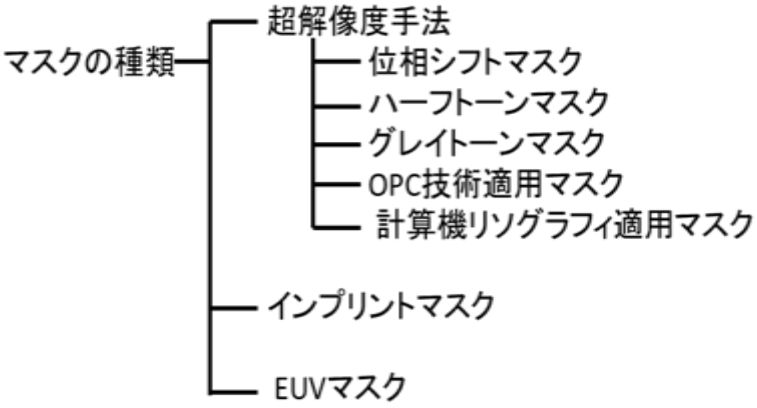


図7-17-3　リソグラフィ技術対応のマスク種類



1.対象品目の概要調査（３）

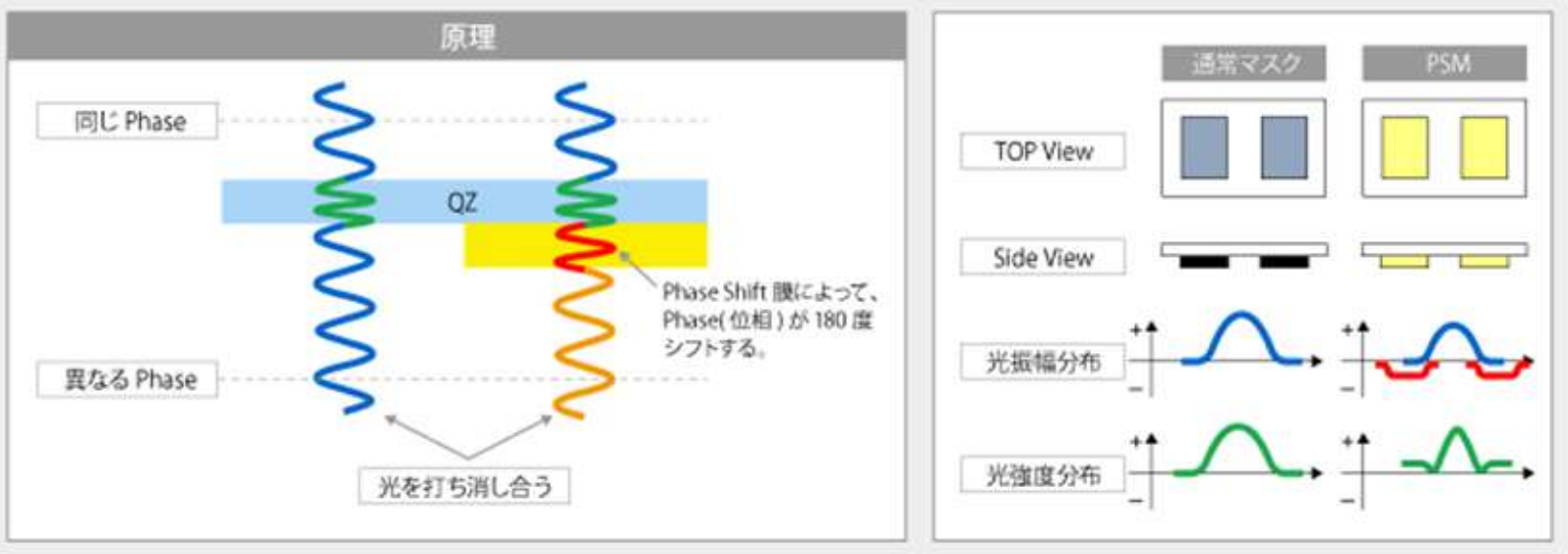
○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

☆位相シフトマスク

位相シフトマスクは、基板の一部に屈折率や透過率の異なる物質を付加することで、その部分を通過する光の位相や強度を変えて、解像度を向上させるフォトマスクである。

図7-17-4は、位相シフトマスクの原理とその光学的比較効果の図である。同じ位相で入射した光が、位相シフトマスク膜の貼られている遮蔽部において光の位相が180度シフトすることで、光が打ち消し合って遮蔽する。通常のマスクと位相マスクとでは、遮蔽部分の境界線で光強度分布がシャープになる。このようにの位相や透過率を制御する事で、ウエハーへの露光時の解像度や焦点深度(DOF：Depth of Focus)を改善し、転写特性を向上させたフォトマスクである。露光波長以下のリソグラフィーで効果が大きい。

図7-17-4　位相シフトマスクの原理とその光学的比較効果



1.対象品目の概要調査（４）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

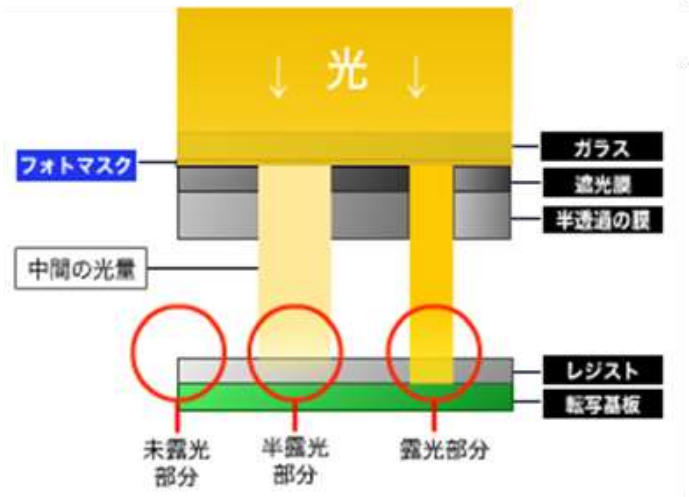
☆多諧調マスク

多階調マスクには、ハーフトーンマスクとグレイトーンマスクの2種類がある。

図7-17-5は、ハーフトーンマスクの事例である。ハーフトーンマスクは、「半透過」の膜を利用し、中間露光を行う。1回の露光で「露光部分」「中間露光部分」「未露光部分」の3つの露光レベルを表現し、2種類の厚さのレジスト（感光剤）を作ることができる。半透明膜の中に開口パターンを設けて、パターン遮光部からもれた光と、主パターン光とが位相反転していることを利用している。パターンのエッジ付近でコントラストが強調されるので孤立パターンの解像力も向上する。

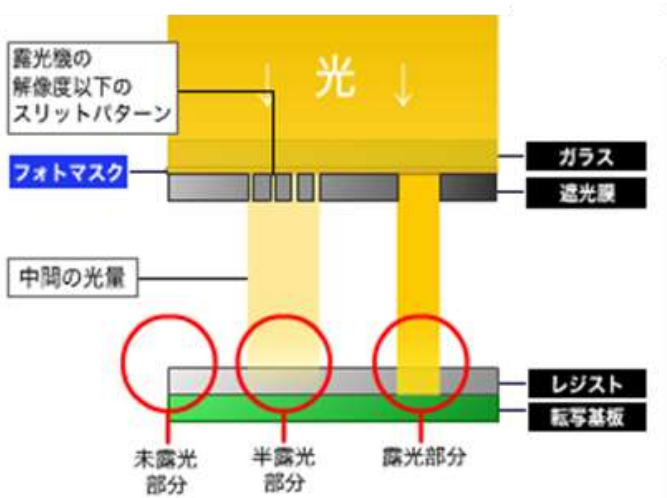
図7-17-6は、グレイトーンマスクの事例である。グレイトーンマスクは、露光機の解像度以下のスリットを作り、そのスリット部が光の一部を遮り、中間露光を実現する。このレジストの厚さの違いを利用して少ない枚数でパネル基板にパターン転写することができ、生産効率向上を実現する。

図7-17-5　ハーフトーンマスク



半透過の膜を利用し、中間露光を実現

図7-17-6　グレイトーンマスク



露光機の解像度以下のスリットを作り、そのスリット部が光の一部をさえぎることで中間露光を実現

1.対象品目の概要調査（５）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

☆光近接効果補正技術適用マスク（OPC技術適用マスク』
☆計算機リソグラフィ技術適用マスク

集積回路の微細化が進むとレジスト上のコントラストの低下が生じる。マスク補正技術として光近接効果補正技術適用マスクや計算機リソグラフィ技術適用マスクがある。図7-17-7は、OPC技術適用マスクの事例である。光の干渉による光近接効果の誤差を光学原理に基づいたシミュレーションで、マスクにその補正値をマスク形状に適用する。

OPCありがそのマスク形状である。ウェハー上のパターンは、設計通りにパターンが形成できる。

図7-17-8は、計算機リソグラフィの事例である。計算機シミュレーションを駆使してマスク形状や光源形状を最適化するのが計算機リソグラフィ技術である。露光装置に設定する光源形状分布と露光するマスクパターンの補正を同時に最適化するのが、光源マスク同時最適化技術である。これによって、リソグラフィプロセスマージンの最大化が行われる。過度なマスクパターンの補正が、最小化できる。

図7-17-7　OPC技術適用マスクの事例

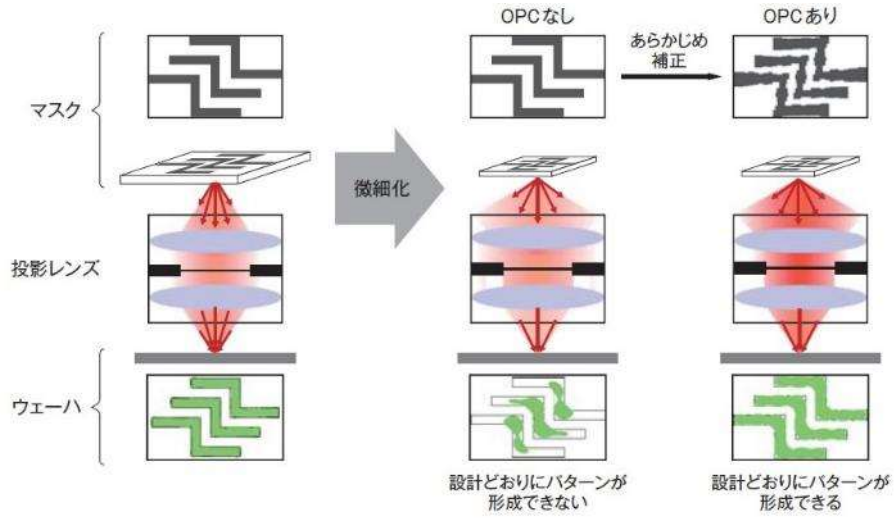
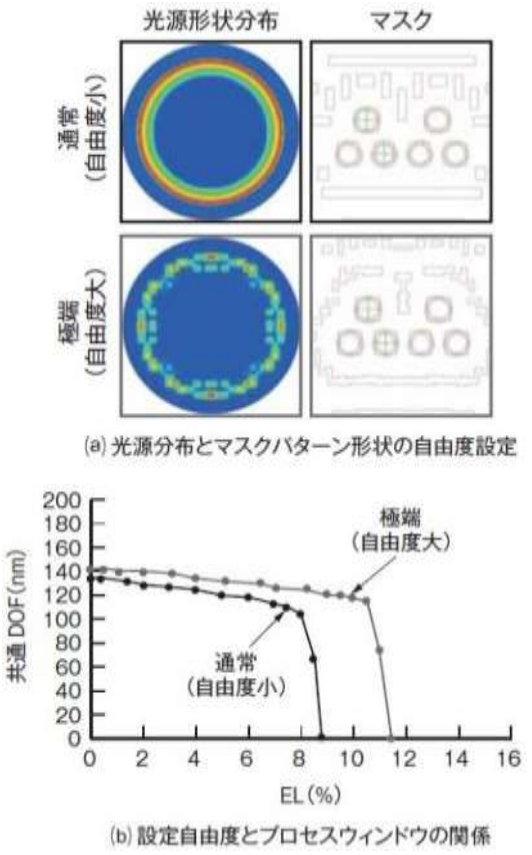


図7-17-8　計算機リソグラフィのSMO事例



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(17)	6	1	十七	ト　マスク又はレチクルであって、第一号から第八号の四までのいずれかに該当する集積回路の製造用のもの チ　位相シフト膜を有する多層マスクであって、光源の波長が245ナノメートル未満のリソグラフィ装置に用いるために設計したもの （トに該当するもの及び第一号から第八号の四までのいずれにも該当しない記憶素子を製造するために設計したものを除く。） リ　インプリントリソグラフィテンプレートであって、第一号から第八号の四までのいずれかに該当する集積回路の製造用のもの	・光源の波長が245ナノメートル未満のリソグラフィ装置に用いるために設計

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3B1	g h i	g. Masks and reticles, designed for integrated circuits specified in 3A001; h. Multi-layer masks with a phase shift layer not specified in 3B001.g. and designed to be used by lithography equipment having a light source wavelength less than 245 nm; Note: 3B001.h. does not control multi-layer masks with a phase shift layer designed for the fabrication of memory devices not specified in by 3A001. i. Imprint lithography templates designed for integrated circuits specified in by 3A001.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

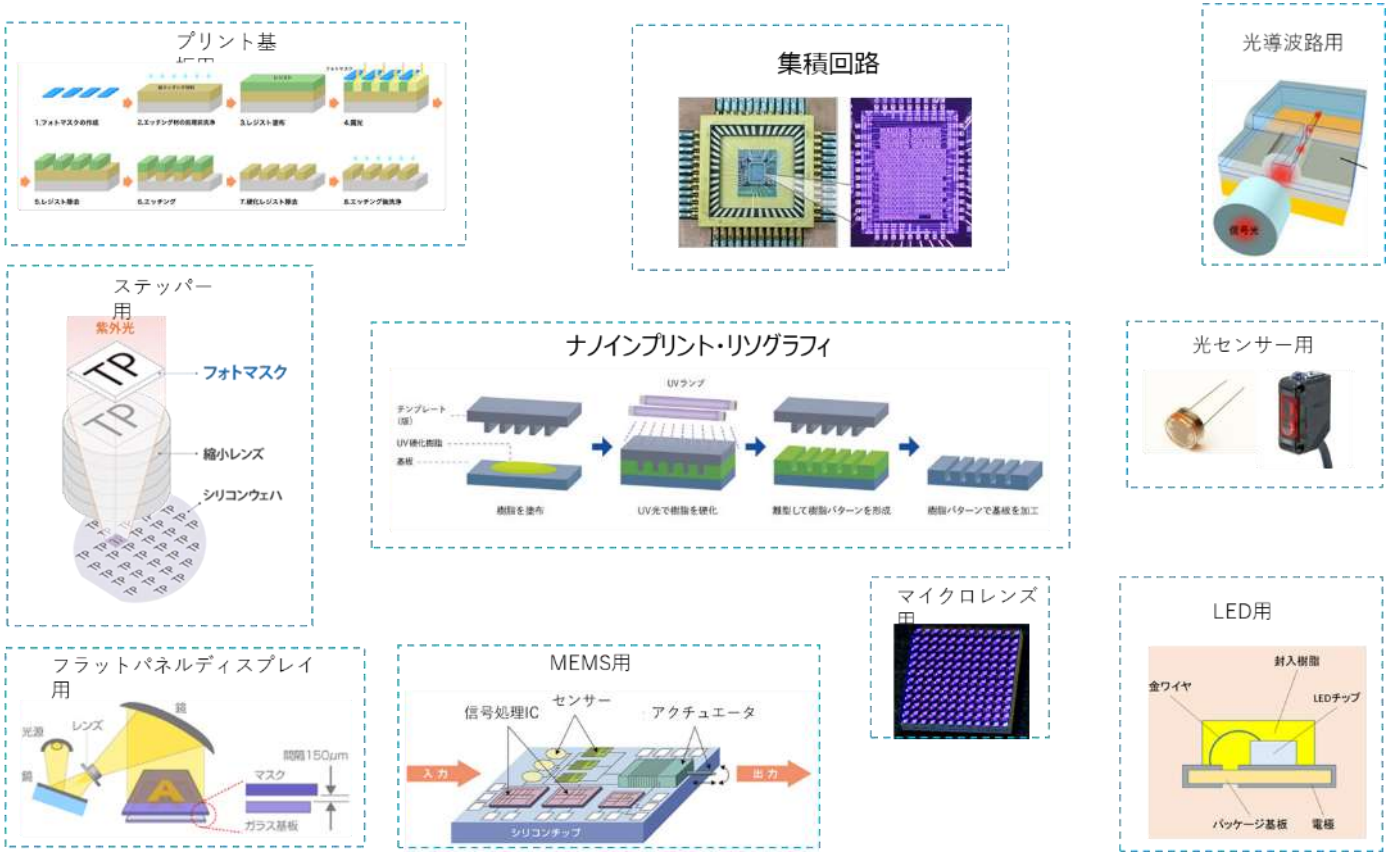
3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

フォトマスク又はレクチルは、半導体/集積回路、受光・発光素子、プリント基板、画像表示デバイス、マイクロマシン、磁気ヘッドなどを製造するときに使用されるツールで、パターニングの原版になるものである。フォトマスク又はレチクルの用途を図7-17-9に示す。

図7-17-9　フォトマスク又はレチクルの用途



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

☆プリント基板（図7-17-10）

基本的なフォトマスクの使用法で、配線層や部品層といった異なる画像を写すために、数枚から数十枚のフォトマスクが使用される。露光工程でフォトレジストにフォトマスクの画像が転写され、現像液で光の当たった部分が除去され、あるいは残存する。これが、次のエッチング工程で被加工対象に対するマスクとなる。エッチング工程で不要部分の除去が終了後、フォトレジストを薬液によって剥離することで工程が終了する。次の層の加工のためにまたフォトレジストが塗布され、同様の処理が繰り返される。

☆LED（図7-17-11）

発光ダイオード（LED）とは、ダイオードの1種で、順方向に電圧を加えた際に発光する半導体素子である。有機エレクトロルミネッセンス（有機EL）も分類上はLEDに含まれる。フォトリソグラフィ工程で、マスクを用いて成膜層を加工する。

☆MEMS（図7-17-12）

機械要素部品、センサ、アクチュエータ、電子回路を一つの基板上にマスク・レチクルを用いたフォトリソグラフィー技術等の微細加工によって集積化したデバイスである。

図7-17-10　プリント基板

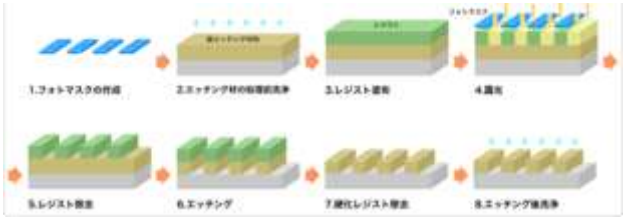


図7-17-11　LED

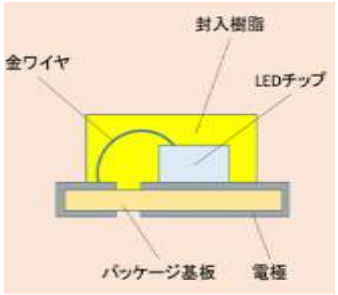
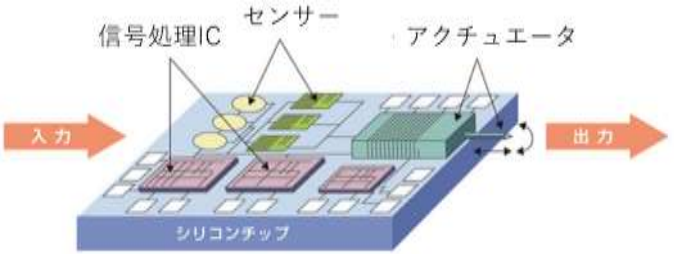


図7-17-12　MEMS



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

☆光導波路

光導波路とは光を局所的に閉じ込め，任意の方向に導くものである。光を特定の領域（コア）に閉じ込めるため、全反射が利用される。

光導波路の構造を図7-17-13に示す。

図のように屈折率の大きな媒質をそれより屈折率の小さな媒質で挟み込み、光が全反射によって伝搬するような光の通り道を作る。屈折率の大きな中央の層をコア層、それ以外の部分をクラッド層という。 基板上にフォトマスクを用いて導波路を作成し、光通信モジュールや光センシング等の各種機能を持たせることが出来る。

☆マイクロレンズ

光量透過を制御することで、マイクロレンズなどの３次元構造を形成することが可能となる。フォトマスクを用いたマイクロレンズの製作を図7-17-14に示す。

☆イメージセンサーは、オンチップレンズとカラーフィルタ、フォトダイオードの3層で形成されている。オンチップレンズは、たくさんのマイクロレンズが1枚のシート状に並べられたもので、これにより集光力が高まり、イメージセンサーの感度が大幅に向上する。

イメージセンサーの仕組みを図7-17-15に示す。

図7-17-13　導波路の構造

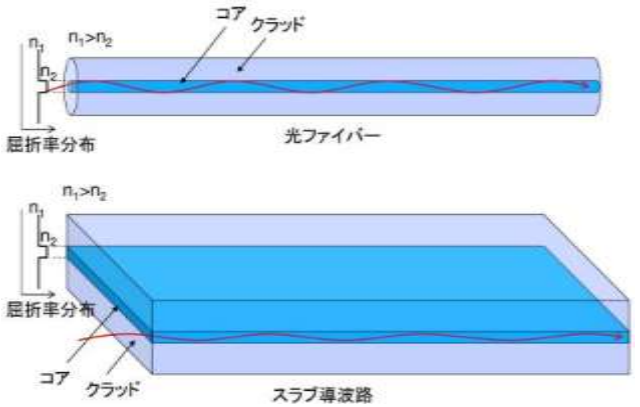


図7-17-14　フォトマスクを用いたマイクロレンズの製作

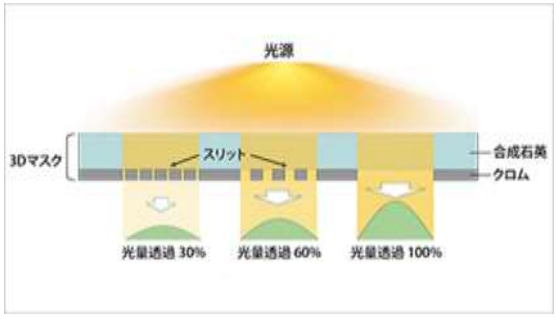
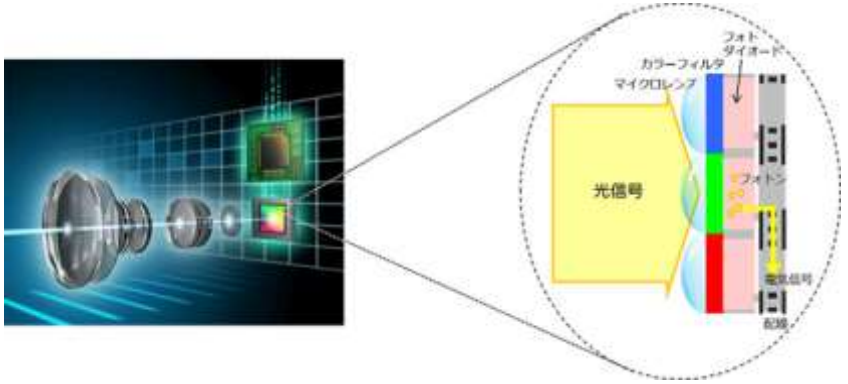


図7-17-15　イメージセンサーの仕組み



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

☆フラットパネルディスプレイ（FPD）

例として、液晶ディスプレイの製造工程について説明する。

製造工程概要を図7-17-16に示す。

基板上の微細なパターンを形成する原理は、カメラ（デジタルカメラではなく、いわゆるスチールカメラ）の写真の作り方と同じで、ガラス基板を洗浄し、感光材（フォトレジスト）を基板に塗布する。次にパターンが描画されたネガフィルムに相当するフォトマスクを通して光をあてガラス基板にパターンを焼き付ける。露光されたガラス基板を現像することにより、焼き付けられたパターンが基板上に残る。FPD露光装置を図7-17-17に示す。

スマートフォンやタブレットではパネルの高精細化への流れが加速している。パネルの高精細化のためには、パネルの画素パターンの微細化が不可欠であり、**フォトマスクの微細化と露光技術の進化**が求められている。

図7-17-16　液晶ディスプレイパネルの製造工程概要

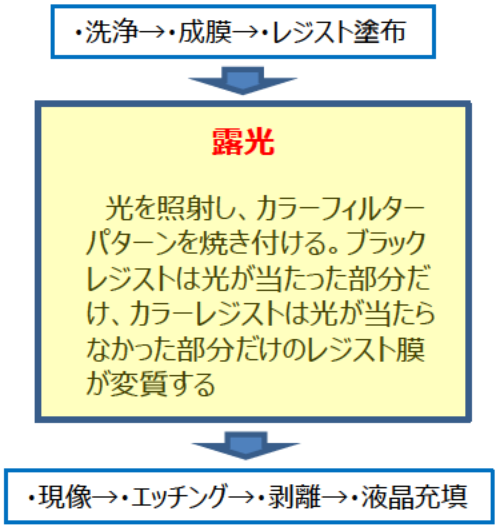
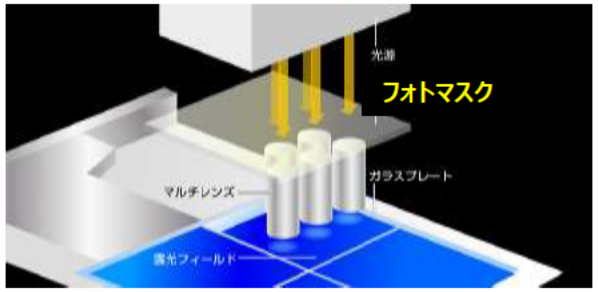


図7-17-17　FPD露光装置（マルチレンズシステム）



3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

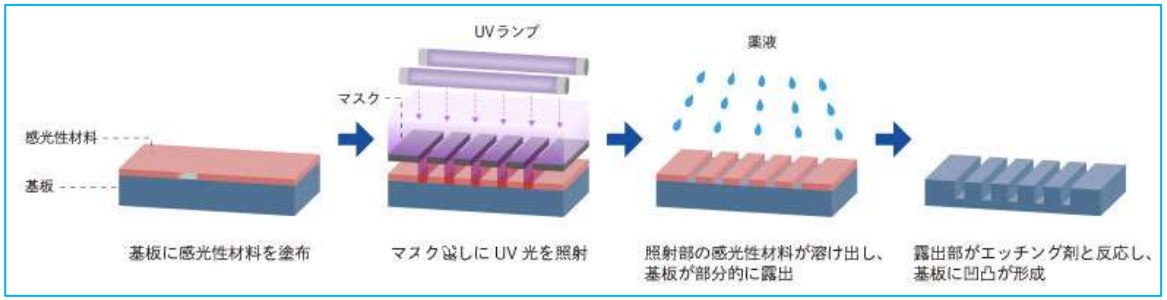
☆ナノインプリント・リソグラフィ

ナノインプリント・リソグラフィとは半導体の微細パターン転写技術である。

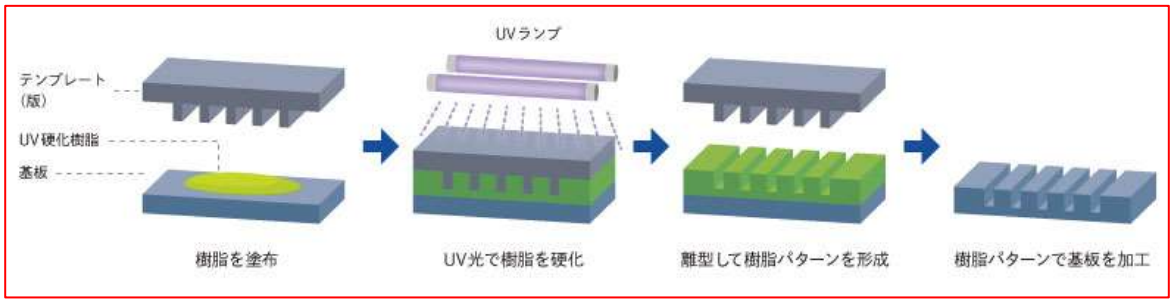
従来の露光技術が光で回路を焼き付けるのに対し、ナノインプリントリソグラフィはパターンを刻み込んだマスク(型)をウエハー上に塗布された樹脂に押し当てて回路を形成する。光学系という介在物がないため、マスク上の微細な回路パターンを忠実にウエハー上に再現できる。しかし、直接転写で回路パターンを形成するには、ナノレベルで正確にマスクとウエハーの位置関係を制御する技術や、微小な粒子の除去など、高度な技術が求められる。ナノインプリント・リソグラフィ工程を図7-17-18に示す。

図7-17-18　ナノインプリント・リソグラフィ工程

＜従来のリソグラフィ＞



＜ナノインプリントリソグラフィ＞



3.品目の主たる用途の調査分析（6）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

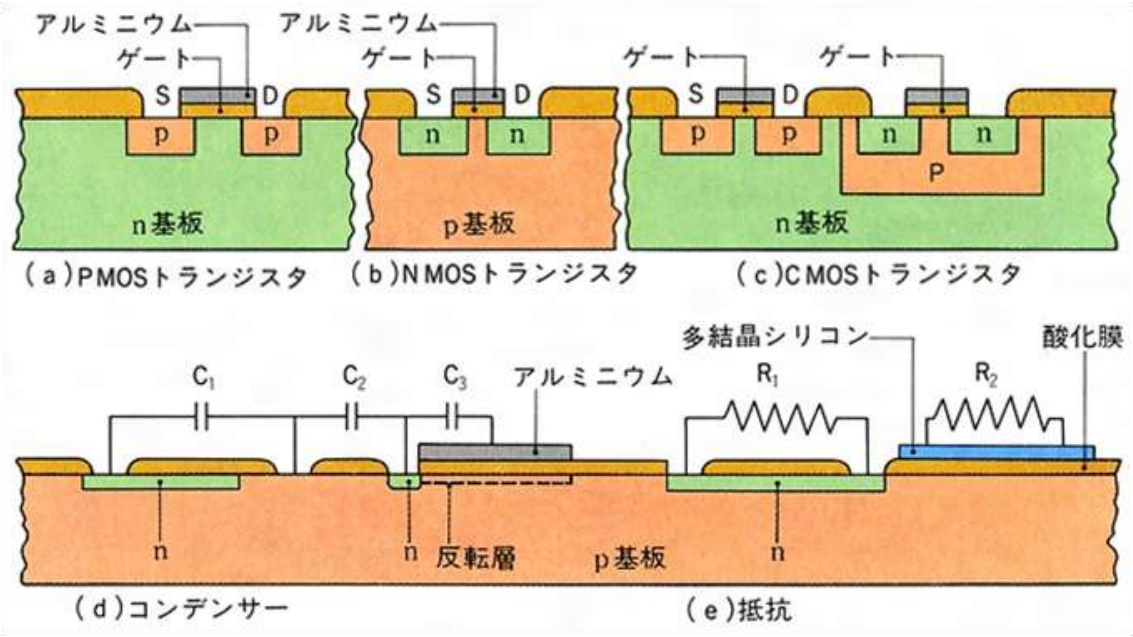
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

☆集積回路

集積回路（IC：Integrated Circuit）とは、ひとつのシリコン半導体基板の上に、トランジスタ、抵抗（電気抵抗）、コンデンサなどの機能を持つ素子を多数作り、まとめた電子部品である。集積回路のトランジスタ、コンデンサ、抵抗の構成例を図7-1-1に示す。基板上にトランジスタ、抵抗、コンデンサが構成されている。

集積回路の種類を図7-17-19に示す。

図7-17-19　集積回路　トランジスタ、コンデンサ、抵抗の構成例



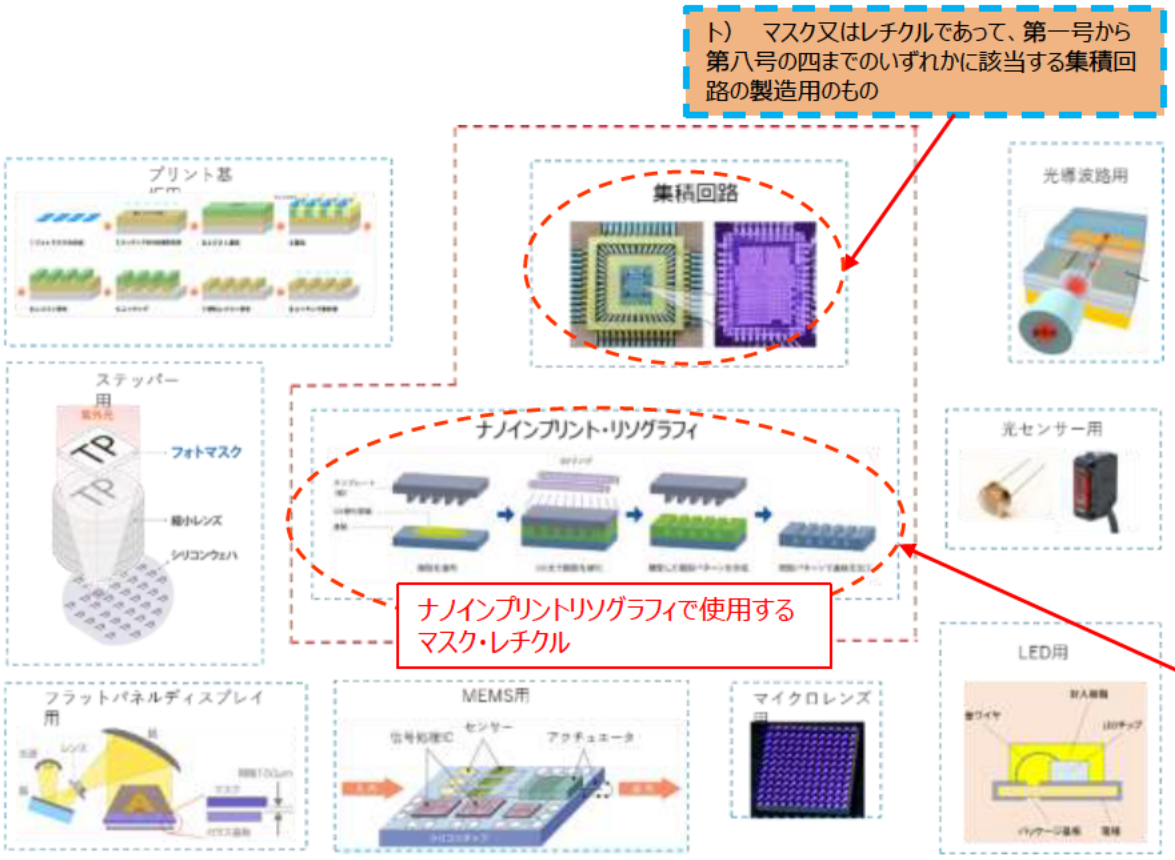
3.品目の主たる用途の調査分析（7）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

規制のかかっている用途を図7-17-20に示す。
ト)集積回路製造用又は、リ)インプリントリソグラフィーで用いるマスク・レクチルが規制対象となる。

図7-17-20　規制のかかっている用途１



ト）　マスク又はレチクルであって、第一号から第八号の四までのいずれかに該当する集積回路の製造用のもの

リ）　インプリントリソグラフィテンプレートであって、第一号から第八号の四までのいずれかに該当する集積回路の製造用のもの

第一号から第八号の四までのいずれかに該当する集積回路

1	耐放射線設計されたもの
2	動作温度範囲がすぐれたもの
3	マイクロプロセッサ／マイクロコンピュータ／マイクロコントローラ
4	アナログデジタル変換器
5	デジタルアナログ変換器
6	アナログデジタル変換機能を有しデジタル化されたデータを記録し、若しくは処理できるもの
7	光IC
8	FPLD（Field Programable Logic Device）
9	ニューラルネットワークIC
10	カスタムIC
11	化合物半導体デジタルIC
12	不揮発性メモリ
13	FFTプロセッサ・ダイレクト・デジタル・シンセサイザ（DDS）IC
14	マイクロ波IC
15	暗号機能を含むIC
16	専用集積回路

3.品目の主たる用途の調査分析（8）

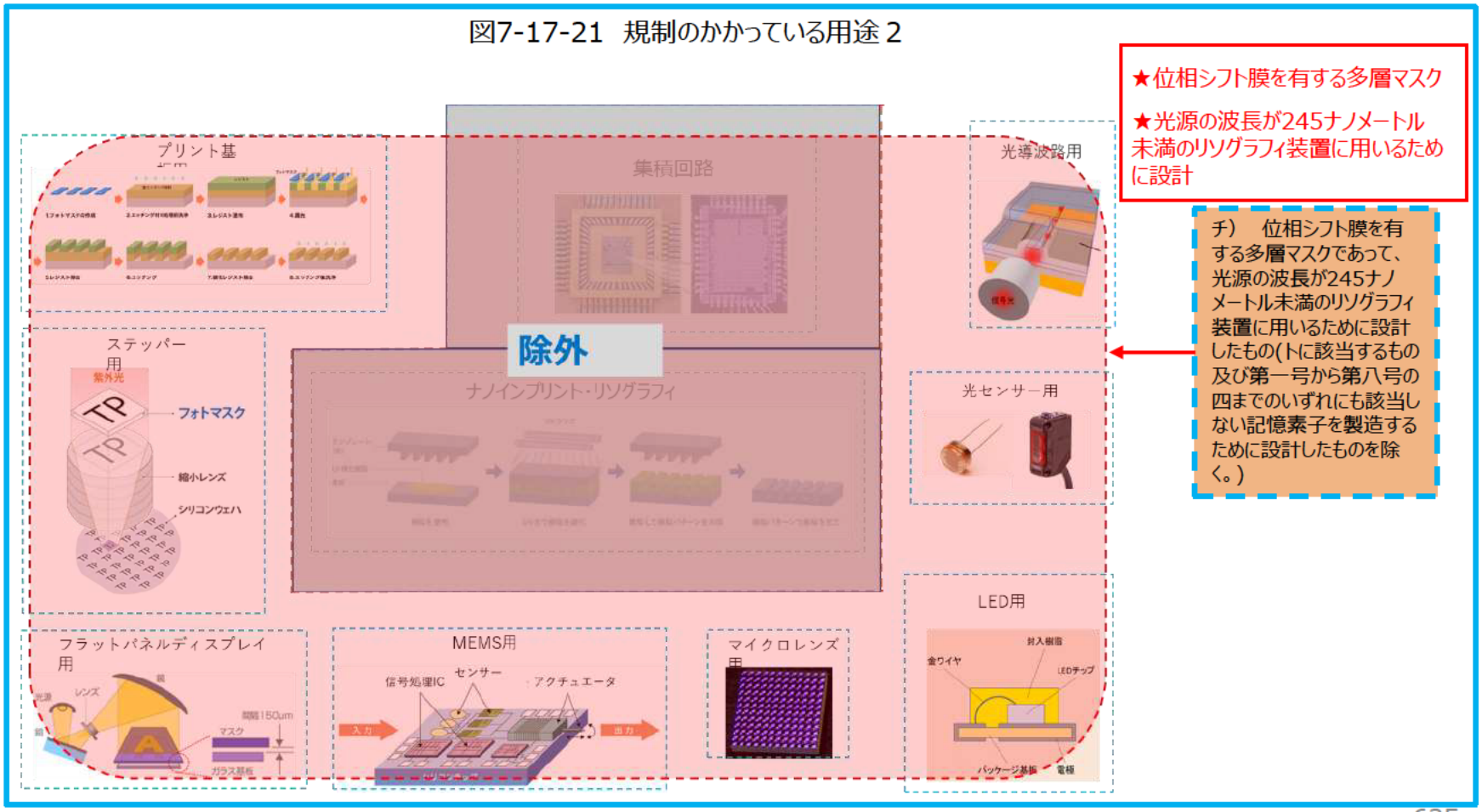
○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

規制のかかっている用途を図7-17-21に示す。

チ)位相シフト膜を有する多層マスクであって、光源の波長が245ナノメートル未満のリソグラフィ装置に用いるために設計したものの内、規制のかかっている用途１を除くものは規制対象となる。

図7-17-21　規制のかかっている用途２



4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

☆規制対象となる集積回路を図7-17-22に示す。

ト） マスク又はレチクルであって、第一号から第八号の四までのいずれかに該当する集積回路の製造用のもの

これに該当するマスク・レチクルは規制対象である。

☆インプリントリソグラフィ技術を図7-17-23に示す。

リ） インプリントリソグラフィテンプレートであって、第一号から第八号の四までのいずれかに該当する集積回路の製造用のもの

この技術で使用されるマスク・レチクルは規制対象である。

☆露光装置の波長

半導体に微細な回路パターンを投影するためには、きわめて波長の短い光源が必要になる。現在の半導体露光装置の光源に使われているのは、波長248ナノメートルのKrF（フッ化クリプトン）エキシマレーザー、あるいは波長193ナノメートルのArF（フッ化アルゴン）エキシマレーザーである。こういった光源で露光できるのは100ナノメートル幅の回路パターンまでといわれており、将来必要とされる50ナノメートル幅の回路パターンに対応するため、現在さまざまな光源の研究が進められている。

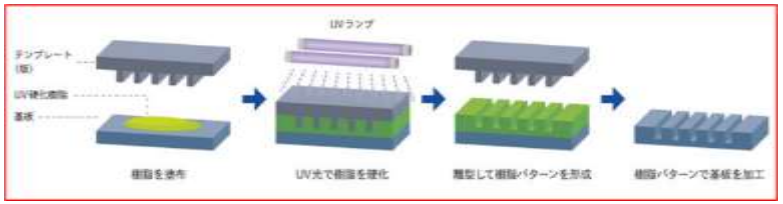
チ） 位相シフト膜を有する多層マスクであって、光源の波長が245ナノメートル未満のリソグラフィ装置に用いるために設計したもの(トに該当するもの及び第一号から第八号の四までのいずれにも該当しない記憶素子を製造するために設計したものを除く。)

上記に該当する位相シフトマスク膜を有する多層マスクは規制対象となる。

図7-17-22 規制対象となる集積回路（第一号から第八号の四までのいずれかに該当する集積回路）

1	耐放射線設計されたもの
2	動作温度範囲がすぐれたもの
3	マイクロプロセッサ／マイクロコンピュータ／マイクロコントローラ
4	アナログデジタル変換器
5	デジタルアナログ変換器
6	アナログデジタル変換機能を有しデジタル化されたデータを記録し、若しくは処理できるもの
7	光IC
8	FPLD（Field Programable Logic Device）
9	ニューラルネットワークIC
10	カスタムIC
11	化合物半導体デジタルIC
12	不揮発性メモリ
13	FFTプロセッサ・ダイレクト・デジタル・シンセサイザ（DDS）IC
14	マイクロ波IC
15	暗号機能を含むIC
16	専用集積回路

図7-17-23 インプリントリソグラフィ技術

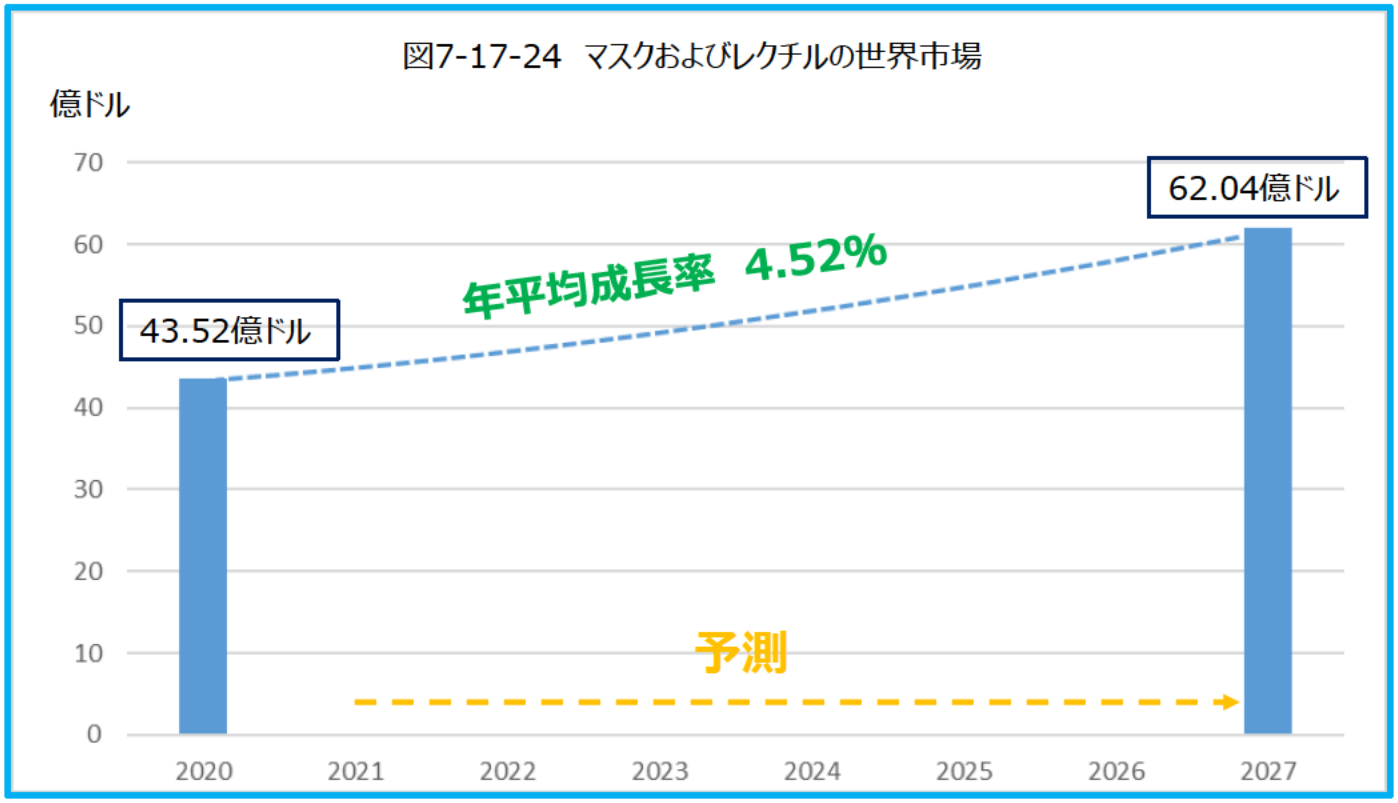


4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

世界の半導体フォトマスク市場は、2020年の43億5,215万米ドルから、2027年末までに62億436万米ドルに達し、2021年～2027年は年平均成長率4.52%が予測されている。
マスクおよびレクチルの世界市場を図7-17-21に示す。



Global Semiconductor Photomask Market Research Report 2021

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

フォトマスクの主要企業を表7-17-1に示す。
世界の半導体フォトマスクの主要プレーヤーは、フォトロニクス、凸版、DNP、HOYA、SK-エレクトロニクスなどで、世界のトップ5メーカーが約45%のシェアを占めている。
市場は、日本が30%以上の最大シェアで、北アメリカと韓国が約30%のシェアで続いている。
製品面では、クォーツマスクが最大で、シェアは約85%である。
用途は、最大の用途がICで、フラットパネルディスプレイ、タッチパネルが続く。

（2021年10月22日、Market Insights Reports）

表7-17-1　フォトマスクの主要企業

企業	会社概要
Hoya（日本）	世界シェアNo.1のHOYAのマスクは、半導体の更なる高集積化により、電子機器の高速、高性能に貢献している。
大日本印刷（DNP）（日本）	日本の総合印刷会社で、国内印刷業界2強（凸版印刷と大日本印刷）の一角。5nmプロセス相当のフォトマスク製造プロセスを開発した。
凸版印刷（日本）	世界最大規模の総合印刷会社である。2021年11月、フォトマスク事業の分社化を発表した。
SK-Electronics（日本）	液晶ディスプレイ製造に用いられるフォトマスクでは世界シェア3位であり、世界唯一の第10世代及び第11世代のフォトマスクを製造可能なラインを持つことを強みとする企業である。
Photronics（アメリカ）	集積回路およびフラットパネルディスプレイ向けのフォトマスク製品を手掛ける。

4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

その他のマスク・レチクル製造企業を表7-17-2、表7-17-3に示す。

表7-17-2　その他のマスク・レチクル製造企業１

企業	会社概要
AA Spectre Corporation（アメリカ）	産業用および航空宇宙用圧力トランスデューサーを制作する会社。流体動力、油圧システム、燃料電池、医療ガス、石油およびガス探査、航空宇宙、科学研究、航空機地上支援、および軍事用途で製品を提供している。
Applied Image Inc.(アメリカ)	光学部品の測定や画像解析を行う会社で、宇宙ステーションで使用できるカスタム製品を提供している。
Abeam Technologies(アメリカ)	半導体製造と超微細加工分野の解析業務を手掛ける。計測、フォトマスク作成、欠陥検査シミュレーション、および半導体装置の設計のためのソフトウェアを提供している。
Advance Reproductions Corporation(アメリカ)	大面積フォトマスクとフォトツールを提供する会社で、半導体、マイクロ波、ナノテクノロジー、医療および電子デバイスの製造メーカーをサポートしている。
Advent Cleaning Technology(アメリカ)	最先端のクラス10クリーンルームを持ち、洗浄、表面処理、プラズマコーティング、および石英製造を提供する。
Biotronics(アメリカ)	医療機関向けに、臨床エンジニアを派遣し、質の高いの医療機器管理サービスを手掛ける。
Intelligent Micro Patterning（アメリカ）	特許取得済みのマスクレスリソグラフィー技術を用いて、最先端のマイクロパターニングを実現する。
Martin Photomask（アメリカ）	レーザーフォトマスク、ステッパーレチクル、大面積フォトマスク等を提供する。
Max Levy Autograph（アメリカ）	グラフィックアート業界向けのハーフトーンスクリーンとエッチングプレートのメーカーで、II-VI Inc.に買収され、軍事および材料事業を展開している。
II-VI Inc.（アメリカ）	光学材料と半導体のアメリカのメーカーである。
Metrigraphics LLC（アメリカ）	電鋳、フォトリソグラフィー、イオンビームミリングなどの最先端の超小型製品を手掛けている。
Noel Technologies（アメリカ）	シリコンバレーを拠点とするファウンドリサービス会社で、プロセス開発と最適化を請け負う。
Precision Optical Imaging（アメリカ）	光学機器の開発および製造を行っている。高品質の医療機器、1ミリメートル未満のサイズのマイクロ光学機器およびアセンブリ、その他の高度な光学システムを設計および製造している。
Universal Semiconductor（アメリカ）	半導体および電子部品製造メーカーで、最先端の露光装置を提供している。

4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

表7-17-3　その他のマスク・レチクル製造企業２

企業	会社概要
Nippon Filcon（日本）	製紙用の網で国内シェア6割を誇る。半導体製造用フォトマスクが成長のけん引役になっている。
Reynard Corporation（アメリカ）	カスタム光学部品と薄膜コーティング(ARコーティング等）を提供する
Teledyne DALSA （カナダ）	集積回路、電子技術、ソフトウェア、半導体ウェーハ処理を手掛ける。
Kelvin Nanotechnology（イギリス）	3Dイオントラップ、グレーティングMOT、MEMS重力計、および専門のDFBレーザーを手掛ける。
SUSS MicroTec (ドイツ)	SUSS MicroTecグループのフォトマスク装置は次世代リソグラフィーを含む、クリーニング、露光後ベーク、現像プロセス等、全てのテクノロジーノードに対応している。
it4ip s.a. (ベルギー)	トラックエッチドメンブレン工法（ビーミング後にエッチング）により高精度の細孔サイズ、細孔密度な製品を提供している。
Taiwan Semiconductor Manufacturing Company	台湾に本社を置く半導体製造会社で、世界の半導体受託生産の5割超を占め、世界最大のファウンドリである。
WIN Semiconductor Corp. (台湾)	GaAs MMIC（モノリシックマイクロ波IC）とRFIC（無線周波数IC）を製造するために、GaAsウェーハファブを設立した。最先端のGaAsテクノロジーを使用して、世界中のIC企業に製造サービスを提供している。

4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（17）マスク又はレチクル

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

多層マスク、インプリントリソグラフィ用マスクの製造企業を表7-17-4に示す。

表7-17-4　多層マスク、インプリントリソグラフィ用マスクの製造企業

企業	会社概要
Ulvac Coating Corporation（日本）	産業・研究機関向け真空装置を製造する企業である。
Mitsubishi Denki（日本）	大手総合電機メーカーである。
Sharp（日本）	日本の電機メーカー。台湾の鴻海精密工業の子会社である。
LSI Logic Corporation（アメリカ）	ASIC、ホストバスアダプタ、RAIDアダプタ、ストレージシステム、ネットワーク機器などを設計・製造している電子機器製造企業である。している。2014年、アバゴ・テクノロジーによって買収された。
Advanced Micro Devices（アメリカ）	インテルx86互換マイクロプロセッサ及び、自社64ビット技術のAMD64対応マイクロプロセッサ、APU (Accelerated Processing Unit)、GPU (Graphics Processing Unit) や、フラッシュメモリ等を生産している。
Rochester Institute of Technology（アメリカ）	アメリカ合衆国ニューヨーク州ロチェスター郊外のヘンリエッタに本部を置く私立の工科系総合大学で、イメージ科学の研究において世界をリードする。
Micron Technology（アメリカ）	半導体製造の多国籍企業で、DRAM、NAND、NORメモリを製造している。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（17の2）
マスクの製造に用いられる基材

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材

【マスクブランクス】

マスクとは、フォトリソグラフィーで使用する、集積回路パターンが形成された原版のことを言う。マスクは、光学系の途中に挿入され、透過もしくは反射した光が、レジストを塗布したウエハ上に結像し、レジストを感光させることによって、パターンを転写する。マスクブランクスは、集積回路パターンを形成する前の原版であり、白紙状態のマスク材料である。それぞれマスクの種類によってマスクブランクスの材料も異なってくる。通常の光露光では、石英ガラスでできた低膨張ガラス基板の表面にクロム膜が張られた製品である。低反射クロム膜マスクブランクスやハーフトーン型位相シフトマスクブランクスなどの種類がある。サイズ規格は、2.5インチ四方から9インチ四方までの規格がある。EUV（Extreme Ultraviolet）露光では、バッファ膜や光吸収膜が塗布された反射型のマスクブランクスである。

図7-17-2-1は、光露光のフォトマスク製造工程である。ガラス基板上にクロム膜を塗布した光露光用の事例である。マスクブランクス上に、回路パターンデータにしたがって電子ビーム描画によって、マスクパターンを形成する。その後エッチング・レジスト剥離・洗浄・測定・検査を経てマスクが完成する。

図7-17-2-2は、EUV露光用マスクブランクスの事例である。低熱膨張ガラス（LTEM）にシリコン膜とモリブデン膜を交互に積層した多層膜反射鏡（40層）を形成し、反射鏡表面にバッファ層を介して光吸収膜を塗布した構造である。裏面の導電膜は、静電チャック用である。

図7-17-2-1　光露光のフォトマスク製造工程

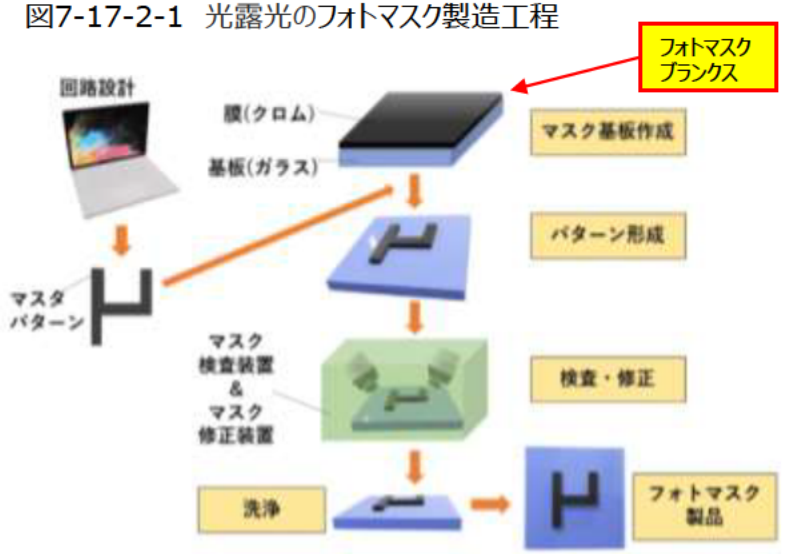
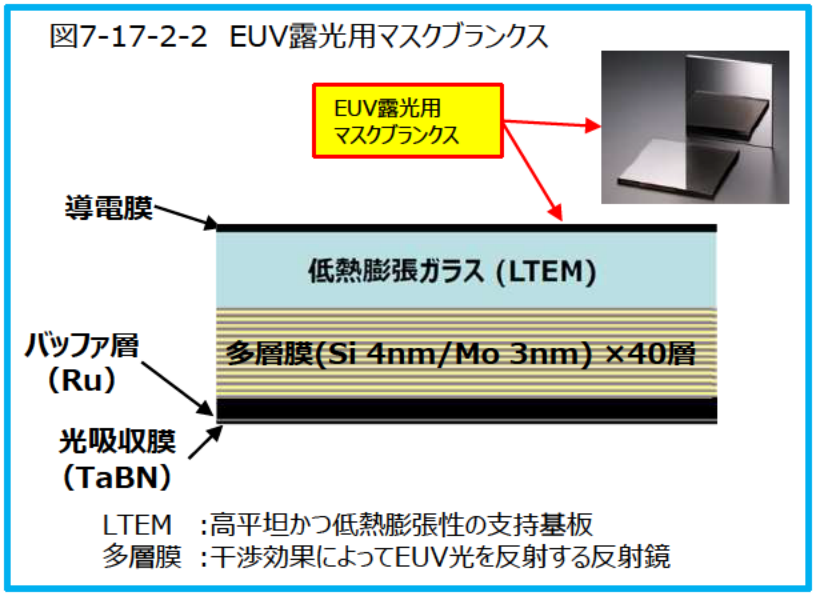


図7-17-2-2　EUV露光用マスクブランクス



LTEM　:高平坦かつ低熱膨張性の支持基板
多層膜　:干渉効果によってEUV光を反射する反射鏡

1.対象品目の概要調査（2）

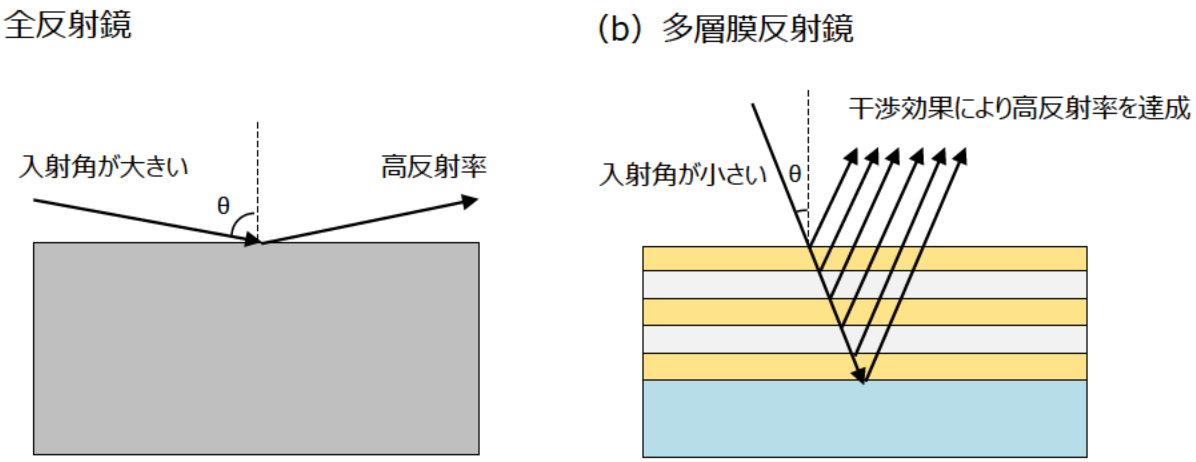
○輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材

【多層膜反射ミラーの原理】

X線に近い波長領域では物質の屈折率は1以下であるため，全反射を利用した鏡がうまく機能する（図7-17-2-3（a））。一方で、入射角を小さくしていくと、反射率が急激に低下するいう欠点がある。入射角が大きいと反射光の集光径が大きくなってしまい、微細パターンの高精度の結像が困難になるため、フォトリソグラフィでは使えない。

多層膜反射鏡は、1/4波長の光路差を有する高屈折率層と低屈折率層を交互に積層することによって、EUV光がほぼ垂直に入射する（6°入射）場合であっても、各層から反射する弱い光を干渉効果によって強め合い、高い反射率（＞67%）を達成することができる（同図（b））。ただし、干渉によって反射光を強め合うためには、回折条件を満たす材料の組み合わせと、指定された膜厚を選ぶ必要があり、波長13.5nmのEUV光では、Si(4nm)/Mo(3nm)の多層膜が適する。

図7-17-2-3　全反射鏡と多層膜反射鏡の違い



1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材

【EUVマスクブランクスの特性指標】

EUVの反射率は、理論値で約70%であり、EUV光のエネルギーの多くは熱に変換される。そのため超低熱膨張性能が求められる。また、EUV光のマスクへの入射角は6°であるため、マスク面での凹凸が焦点ズレや露光パターンの位置シフトの原因になる。それぞれの係数には、高い反射率、超低熱膨張性、超平坦性などが求められる。具体的な指標の一例としては、表7-17-2-1のようになる。

表7-17-2-2は、国際半導体製造装置材料協会（SEMI：Semiconductor Equipment and Materials International)が定めたSEMI規格P37の一覧である。SEMI規格のPシリーズはマイクログラフィーを規定しており、その中でP37はEUVを扱っている。その最新版はSEMI-P37-0613である。 0613は2013年6月に発行されたことを示す。SEMI P37-0613にはEUVマスクブランクスの要件として、前述した熱膨張率、反射率、平坦度などが規定されている。

SEMIは、半導体製造装置メーカーと材料メーカーの国際工業会として1970年に設立され、業界の自主規格である。

表7-17-2-1　EUVマスクブランクスへの特性指標

主要要求特性	要求値
熱膨張係数	＜ 5 ppb/K
平坦度（P-V）	＜ 36 nm
反射層反射率	＞ 67 %
吸収層反射率	＜ 0.5 %

ppb（parts per billion）10億分の1
K（Kelvin） ケルビン温度
P-V（Peak to Valley）平坦度

表7-17-2-2　SEMI P37一覧

Name	Document Status	Language	Description	Member	Non Member
SEMI P37-EN : SEMI P37-0613-EN	インアクティブ	English (US)	Specification for Extreme Ultraviolet Lithography Substrates and Blanks	12,400	16,500
SEMI P37-EN : SEMI P37-1101-EN	旧版	English (US)	Specification for Extreme Ultraviolet Lithography Mask Substrates	12,400	16,500
SEMI P37-EN : SEMI P37-1102-EN	旧版	English (US)	Specification for Extreme Ultraviolet Lithography Mask Substrates	12,400	16,500
SEMI P37-EN : SEMI P37-1109-EN	旧版	English (US)	Specification for Extreme Ultraviolet Lithography Substrates and Blanks	12,400	16,500
SEMI P37-JP : SEMI P37-1102-JP	旧版	Japanese	極紫外線リソグラフィマスク基板の仕様	14,900	19,800

1.対象品目の概要調査（4）

○輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材

【 EUVマスクの欠陥】

超平坦性の実現には、EUVマスクの欠陥も大敵である。図7-17-2-４はEUVマスクの欠陥事例である。EUV露光で形成するパターン線幅は数nm、髪の毛の1万分の1程度の幅である。マスクのゆがみやマスク表面に付着した微小なゴミ、表面の薄膜にできたわずかな欠陥が、加工不良を招く原因となる。積層する薄膜表面の異物も排除することが求められる。また、内部欠陥として、光を反射するための多層膜の周期を乱す欠陥がある。事例としては、付着異物、位相欠陥、パターン欠陥、裏面異物などである。欠陥の原因となる異物を如何に排除するか、欠陥を検査するかは、重要な課題である。付着異物に関しては、マスクハンドリング時にも発生するので、ペリクルでのマスク保護も必要なケースが多い。

図7-17-2-５は、EUVマスクブランクスの欠陥検査方法である。マスクブランクス内部の欠陥を検出するために、EUV反射を観測し、右図のように内部の欠陥を検出できる。EUVには高エネルギーのプラズマ光源が使われる。その光源から発生する直径数十nmの微細な粒子「デブリ」が発生する。EUVにより内部検査を行うと、発生するデブリがマスクブランクス表面を汚染する。この問題は、光源の発光条件や装置内の気体の流量調整などにより解決され、EUVマスクの検査が可能となった。実際に内部欠陥が検出された場合でも、欠陥の数が少ない場合はアブソーバのパターンがその上になるよう位置を調整する。この欠陥隠しにより、内部欠陥があってもマスクブランクスを無駄にしなくてもすむ。

図7-17-2-４　EUVマスクの欠陥

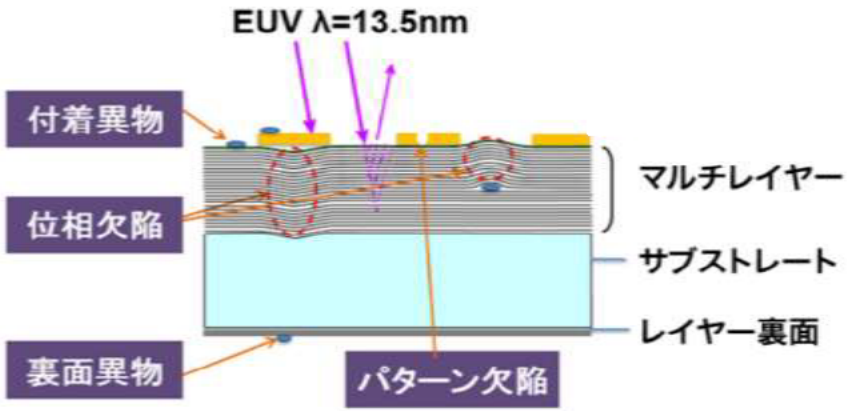
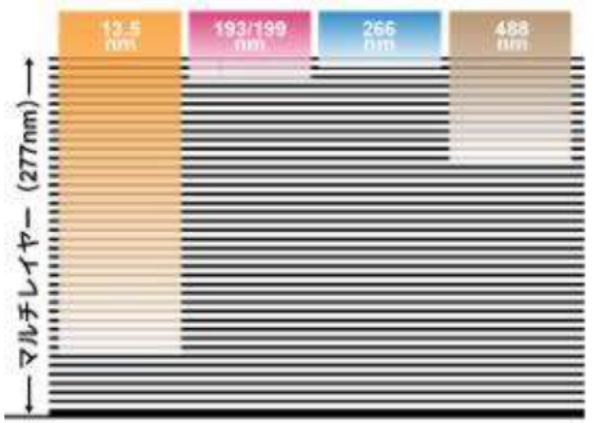


図7-17-2-5　EUVマスクブランクスの欠陥検査方法



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分が異なっている。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(16) 7(17の2)	6		十七号の二	十七の二　マスクの製造に用いられる基材であって、モリブデン及びシリコンからなる多層膜の反射構造を有するマスクブランクのうち、次のイ及びロに該当するもの マスクブランク マスクの製造に用いられるガラスの板その他の材料に薄膜を形成したものをいい、これにレジストが塗布されているかどうかを問わない。 イ　極端紫外を用いて集積回路を製造するための装置用に特に設計したもの 極端紫外 電磁波スペクトルの波長が５ナノメートルを超え、１２４ナノメートル未満のものをいう。 ロ　国際半導体製造装置材料協会が定めたSEMI規格P３７の仕様に準拠したもの	電磁波スペクトルの波長が５ナノメートルを超え、１２４ナノメートル未満

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3B1	j	j. Mask "substrate blanks" with multilayer reflector structure consisting of molybdenum and silicon, and having all of the following: "substrate blanks" Monolithic compounds with dimensions suitable for the production of optical elements such as mirrors or optical windows. 1. Specially designed for 'Extreme Ultraviolet' ('EUV') lithography; and Technical Note 'Extreme Ultraviolet' ('EUV') refers to electromagnetic spectrum wavelengths greater than 5 nm and less than 124 nm. 2. Compliant with SEMI Standard P37.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
貨物・技術のマトリクス表
（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

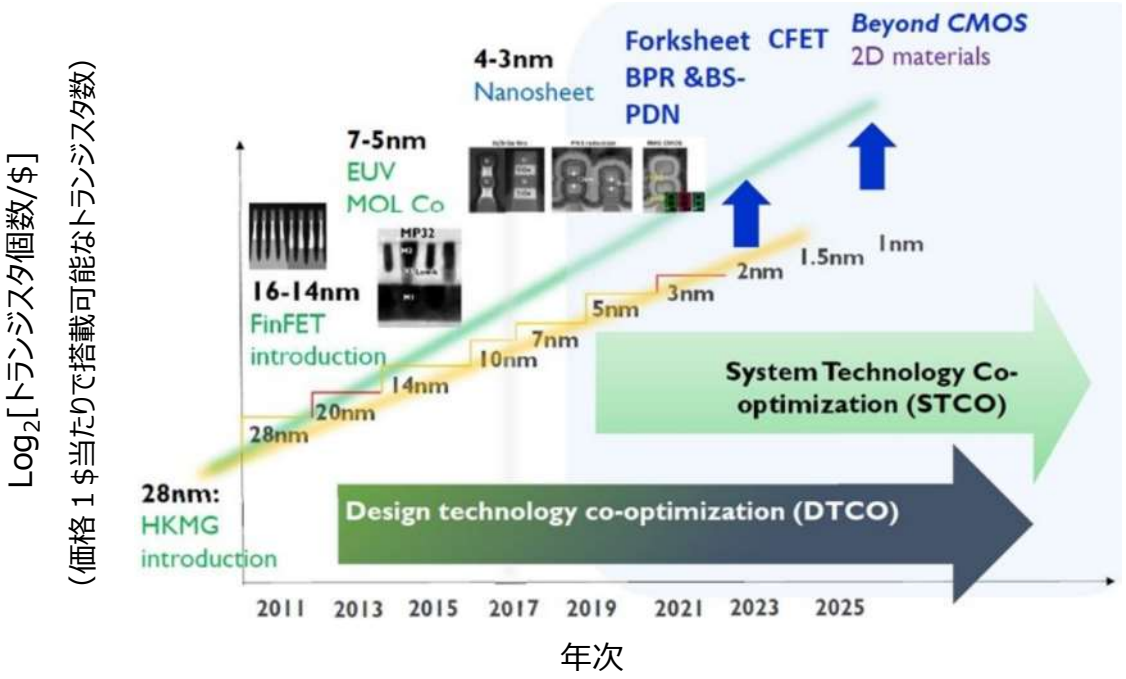
3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（1）

EUVマスクは、マイクロプロセッサ(MCU)、メモリーなどの半導体製品の製造に用いられる。微細化は進んでおり、試作レベルではゲート長3nmのトランジスタも登場している。微細化することによって、1チップに搭載できるトランジスタ数を増やす（高集積化）、寄生容量を減らしトランジスタのスイッチング速度を高める（高速化）、1ウエハ当たりのチップ取得数を増やす（低コスト化）などのメリットがあり、結果的には半導体製品を搭載する電子製品の小型化、高性能化、低価格化がはかれる。

図7-17-2-6　1nmまでの半導体のスケーリング



出典：Myung Hee Na, imec, “Innovative technology elements to enable CMOS”、IEDM2020

【適用製品】



マイクロプロセッサ
AMD EPYC ROME 7742
TSMCの7nm FinFETプロセスで製造される、8コアCPUを集積した最大8つの「CCD（CPU Complex Die）」と、Global Foundriesの12nmプロセスで製造される、DDR4メモリ、PCI Express 4.0、USBコントローラなどのIOを集積した「sIOD（Server I/O Die）」の組み合わせでパッケージを構成する。

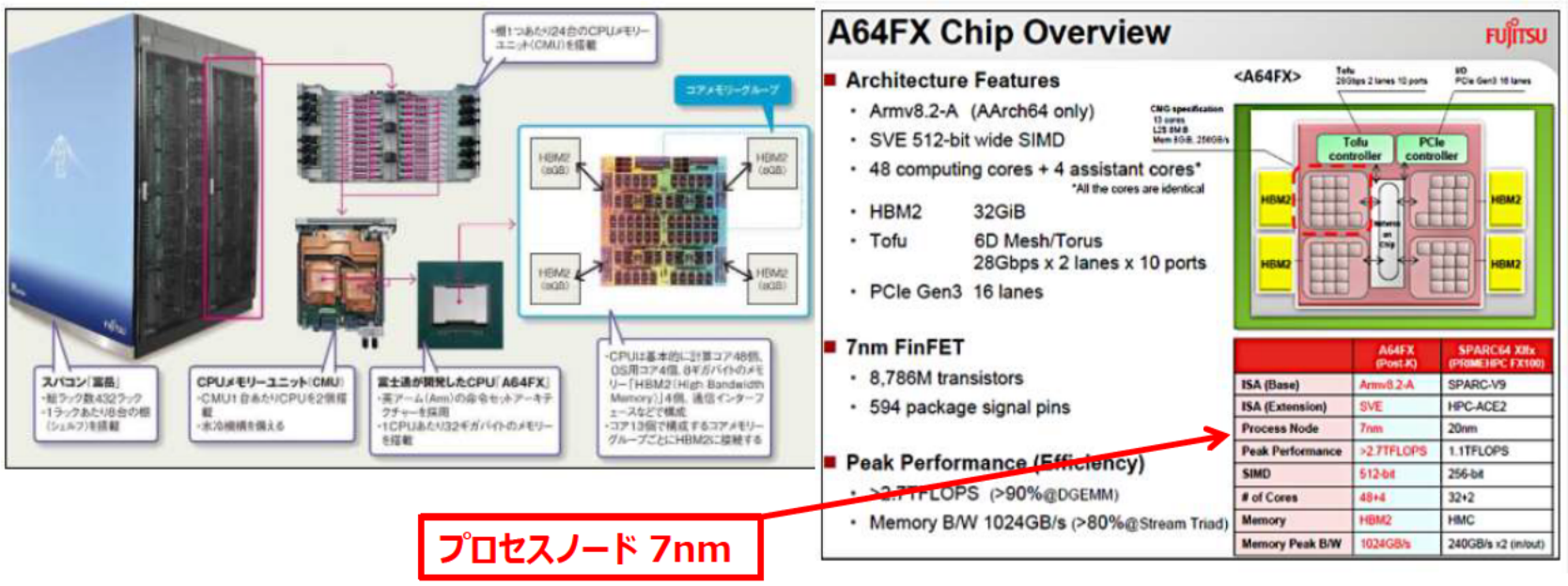
3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（2）

10nm以下まで微細化したMCUは、高性能計算(**HPC**:high-performance computing)に必要なスーパーコンピュータを提供する。HPC技術を使えば、「創薬」，「遺伝子解析による個人に適合する予防薬の開発」，「地震や津波の防災」，「ビッグデータを使った環境変化の予測」，「高効率のエネルギー生成，変換，貯蔵」，「創造的なクリーンエネルギーシステム」，「高性能な機能デバイス」，「製造工業における創造的な設計」，「製造プロセス」，「宇宙の基本的な法則と宇宙の進化の研究」といった研究が可能になる。例えば、「富岳」のCPUチップA64FXは、TSMCの7nm 半導体プロセステクノロジで製造され，約90億個のトランジスタが実装されている（図7-17-2-7）。

図7-17-2-7 スーパーコンピュータ「富岳」のCPU（A64FX）にも使用されている7nm半導体プロセステクノロジ



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（１）

【軍事利用】

10nm以下まで微細化したMCUは、高性能計算(**HPC**:high-performance computing)に必要なスーパーコンピュータを提供する。マスクブランクスが直接的に兵器として用いられることは考えにくいが、HPC技術を使って新兵器を開発する可能性がある。

例えば、平和目的で行われる「創薬」，「遺伝子解析による個人に適合する予防薬」の開発などは、軍事用には**化学兵器**の開発や**生物兵器**の開発に転用される惧れがある。また、「高性能な機能デバイス」，「製造工業における創造的な設計」といった利用は、軍事用にはステルス性を備え戦闘力の高い**戦闘機**の設計や、**軍事衛星**の設計に応用されるかもしれない。

また、情報処理能力の向上は、サイバー戦でも有利になることが考えられる。

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（１）

規制パラメータ　輸出令第7項(17)

イ　極端紫外を用いて集積回路を製造するための装置用に特に設計したもの
極端紫外
電磁波スペクトルの波長が５ナノメートルを超え、１２４ナノメートル未満のものをいう。

【透過型光学系の解像限界】

レンズを使用する透過型光学系の解像度は43nmが限界であり、さらに微細なパターンを得るためには、ダブルパターニングによるか、反射光学系の技術を開発して波長13.5nmの極端紫外光（EUV）を利用することになる。ここでは、透過型光学系の解像度の理論限界値について説明する。

解像度は、レンズの大きさに反比例し光の波長に比例することからRayleighの式（1）で表すことができる。

$$\text{解像度} = k_1 \frac{\lambda}{NA} \qquad (1)$$

ここで、λは光の波長、NAはレンズの大きさを表す開口数、k_1はレジスト材料のコントラストなどリソグラフィのプロセス性能を意味する定数である。

露光装置の波長は、水銀ランプから発光するｇ線（λ=436nm）→ｉ線（λ=365nm）、エキシマレーザーで発光するKrF（λ=248nm）→ ArF（λ=193nm）と短波長化が進められてきたが、さらに短波長化すると光がレンズを透過することが困難になるので、短波長化は193nmで限界となった。

一方、開口数NAは、式（2）で表すことができる。

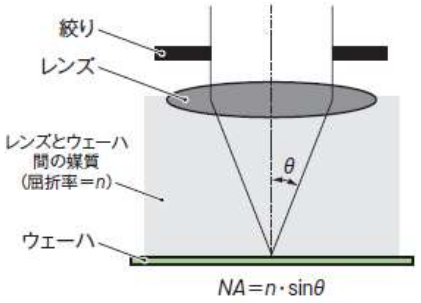
$$NA = n \cdot \sin\theta \qquad (2)$$

右図に示されるように、θはウエハ面に結像する光線の開き、nはレンズとウエハ間の媒質の屈折率である。ArF光に対する空気の屈折率nは1であるが、水の屈折率nは1.44であるため、レンズとウエハの間に水を浸せば、波長を実質的に

193nm/1.44=134nm

まで短波長化できる液浸露光装置が登場したが、それでもNAは1.35で限界となった。

図7-17-2-8　NA定義



また、レジストプロセスが最大のコントラストを出したとしても、k_1ファクタが光の波長の1/4では解像することができないため、理論的にはk_1=1/4=0.25、実際には0.3が限界となる。

以上をまとめると、透過型光学系の限界は、λ=193nm, NA=1.35、k_1=0.3であり、式（1）から、解像度の限界は

$$\text{透過型光学系の解像度の限界} = 0.3 \times \frac{193\text{nm}}{1.35} = 43\text{nm}$$

4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（２）

規制パラメータ　輸出令第7項(17)

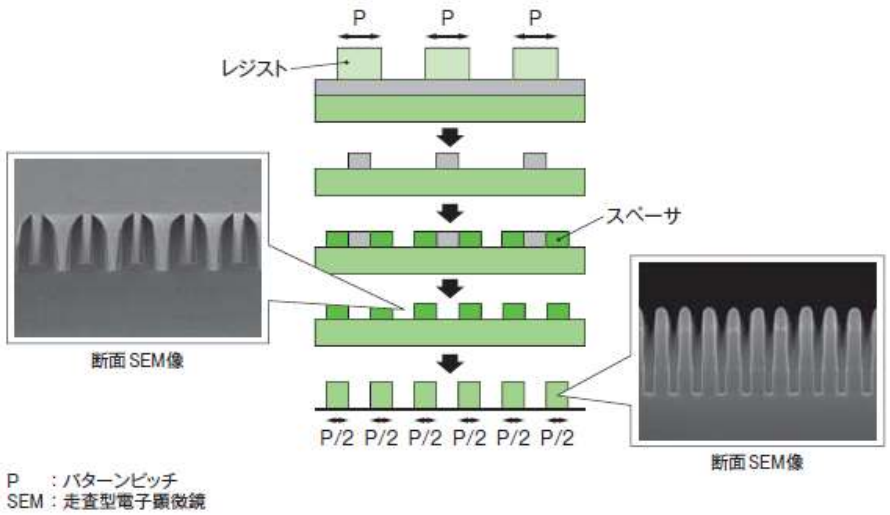
イ　極端紫外を用いて集積回路を製造するための装置用に特に設計したもの
極端紫外
電磁波スペクトルの波長が５ナノメートルを超え、１２４ナノメートル未満のものをいう。

【ダブルパターニングの問題点】

レンズを使用する透過型光学系の解像限界は，前頁で説明したように43nmが限界であるため、この技術の延命策として登場したのが、ダブルパターニングである。この技術には、２倍ピッチでパターンを露光した後にその1/2のピッチだけシフトさせて露光する方法や、スペーサプロセスなどのプロセストリックを用いた後に不要なパターンを除去する方法（図7-17-2-9）など、複数の手法がある。

しかし、ダブルパターニング技術は、微細パターンの形成に多数のプロセスを経る必要があるので、寸法精度の安定化と、TATが長くなることによるプロセスコストの上昇が問題になる。また、単純な平行線パターンには適用し易いが、任意形状には対応が難しいことも問題である。

図7-17-2-9　ダブルパターニングの一例



ハードマスクなどの下層膜上に、１回目の露光プロセスにより1:3の比でパターンを形成し、エッチングを行う。その後、形成されたパターンにスペーサプロセスを施す。ここで形成されたパターンをマスクにして下層膜をエッチングすることで、レジストパターンの1/2のピッチでパターンが形成される。しかし、スペーサプロセスでは、パターン周辺の全ての部分にスペーサが形成されるので、不要な部分を高精度で除去する必要があり、そのために２回目の露光が必要になる。

4.品目の技術動向調査（3）

〇輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材
①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（3）

規制パラメータ　輸出令第7項(17)2

イ　極端紫外を用いて集積回路を製造するための装置用に特に設計したもの
極端紫外
電磁波スペクトルの波長が５ナノメートルを超え、１２４ナノメートル未満のものをいう。

【反射光学系による極端紫外光（EUV）光の利用】

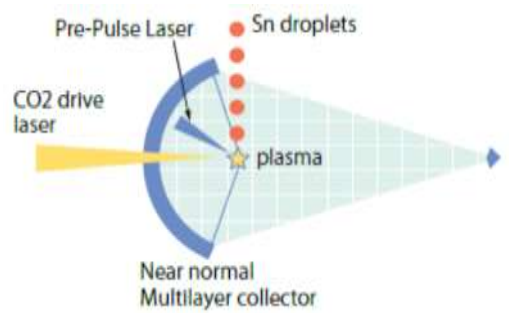
前頁までで、ArFエキシマレーザーの波長は193nmで解像度は43nmであり、トリッキーなプロセスを駆使すれば解像度は20nm以下も実現可能であるが、プロセス安定性やコストの面から量産としては限界であることについて説明した。エキシマレーザーの中では ArFよりも波長の短い、F_2エキシマレーザーがあるが、波長は157nmであり大きな改善ではない。また、波長が短くなるとレンズを透過することが困難になることから、波長157nm以下の電磁波を、透過型光学系による縮小投影露光に利用するには限界がある。これらの理由から、透過型光学系を放棄し、反射型光学系を選択するに至った。

電磁波の種類には電波、赤外線、可視光線、紫外線、X線、ガンマ線が知られているが、これらの境界は明確ではない。一般に、紫外線は10nm～380nm、X線は0.01nm～10nmとされ、輸出令第7項(17)2では5nm～124nmを極端紫外と定義している。反射型光学系では、この極端紫外領域で反射率の高い鏡を必要とする。Si/Mo多層膜は、13.5nmの波長で高い垂直入射反射率（67%以上）を備えており、マスクブランクスの多層膜反射鏡として好適な材料である。

極端紫外リソグラフィーにおいて、もう一つ重要な要素は光源である。波長が極端紫外領域にあることに加えて、コヒレントであり、かつレジストを感光させるのに十分な強度を有するものでなければならない。例えば、スズ（Sn）の液滴にレーザー光を照射してプラズマ化し、DUV発光させている（図7-17-2-10）。

以上述べたように、極端紫外リソグラフィーが成立するためには、様々な周辺技術を必要とする。現状の技術で実現可能な範囲から規格が決められている。13.5nmよりもさらに短波長化するためには、反射率の高いSi/Mo以外の多層反射膜材料と、その波長で十分な発光強度を有する光源の組み合わせを探索する必要があり、そのような組み合わせが見つかれば、SEMI規格P37規格などもより厳しいものに改定されると考えられる。

図7-17-2-10　EUV光源の一例



https://www.ushio.co.jp/jp/technology/lightedge/201203/100428.html

4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材

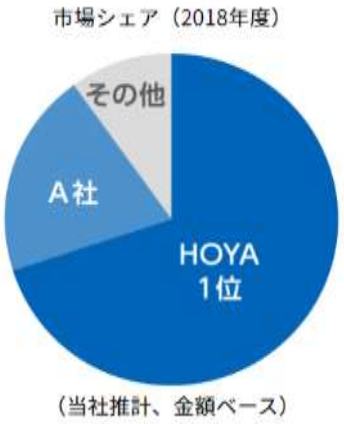
②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（1）

【EUVマスクブランクス】

EUVマスクブランクスの市場プレーヤとしては、Hoya（日本）、AGC（日本）、Photronics（米国）、S＆S Tech（韓国）、Applied Mtaerials（米国）などが挙げられる。2018年当時、市場シェアが最も大きいのはHOYAであったが（図7-17-2-11）、AGCは2020年から建屋を拡張して生産力を増しており、S＆S Techもシェアを伸ばしていると聞く。

マスクブランクスをEUV露光用フォトマスクとして完成させるためには企業間の協力関係が不可欠であり、今は日本のシェアが大きいが、一方で他にもサプライチェーンが生まれつつある（図7-17-2-3）。

図7-17-2-11　EUVマスクブランクスのシェア



https://www.gii.co.jp/report/qyr997109-global-euv-mask-blanks-sales-market-report.html

表7-17-2-3　EUV露光用フォトマスクにおけるサプライチェーン

企業国籍	企業名	生産地
日本	DNP	日本
	凸版印刷	欧州（ドイツ）
	HOYA	日本
米国	Photronics	米国（R&D拠点）

注：半導体露光用フォトマスクのうちEUV露光用フォトマスクについて集計

https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000182.pdf

4.品目の技術動向調査（5）

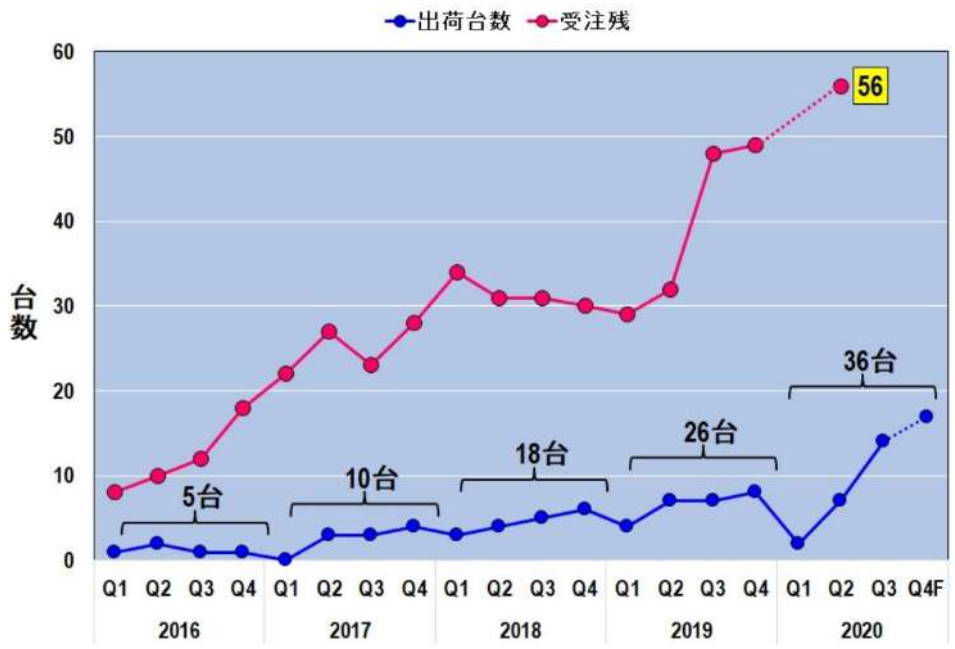
○輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

【EUV露光装置】

EUV露光装置の需要は急増している。生産台数も徐々には増えてきたが、供給メーカーがASML一社のみに限られるため、供給が追いついていない（図7-17-2-12）。

図7-17-2-12　ASMLにおけるEUV露光装置の出荷台数と受注残





出典：「TSMCとSamsungのEUV争奪戦の行方 ～“逆転劇”はあり得るか？」 EE Times Japan
https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2012/10/news046_4.html

4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（17の2）マスクの製造に用いられる基材

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

【EUV露光による半導体チップの生産】

EUV露光用フォトマスクエンドユーザーは、**TSMC（台湾）、SAMSUNG（韓国）、インテル（米国)**であり、生産量は急激に増えている（図7-17-2-13）。

図7-17-2-13　EUV露光装置によるウエハ処理数の伸び



目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（18）
半導体基板

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令第7項（18）半導体基板

半導体基板の定義と特徴を図7-18-1-に示す。半導体とは、その名の通り、導体(金属)と絶縁体の中間の特性をもつ物質であり、外部から加えられる熱、光、電場・電流、磁場や放射線、あるいはその中に含まれる不純物物質の種類や量によって、様々な電気的特性を示すのが、特徴である。高純度に精製し、欠陥を含まない単結晶または多結晶の物質を支持体基板として用いれば、外部からの影響や不純物が及ぼす効果を精密に制御できるようになり、トランジスタなどの電子デバイスを作ることができる。基本的に、元素周期律表のⅣ族元素、またはその両横のⅢ－Ⅴ族化合物が、半導体基板として用いられる。

【半導体基板の定義】

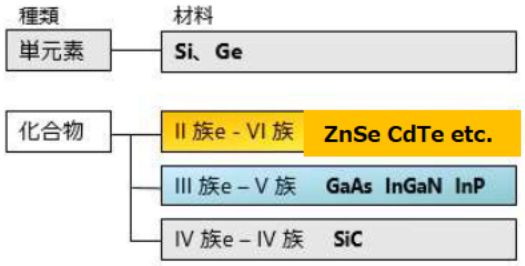
図7-18-1　半導体基板の定義と特徴

半導体とは…

・導体(金属)と絶縁体の中間の特性をもつ物質

・外部からの熱、光、電場・電流、磁場や放射線、あるいはその中に含まれる不純物物質の種類や量によって、様々な電気的特性を示す

・超高純度に精製すれば、外部から受ける影響の度合を精密に制御できる。

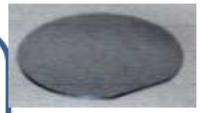


半導体基板とは…

超高純度の半導体物質からなり、その中に欠陥を含まない単結晶または多結晶体であり、通常は円板として供給される。

・単結晶体：ある大きさの円板全体は、一個の結晶だけから構成されている。

・多結晶体：ある大きさの円板全体は、複数の結晶から構成されている。



II 族	III 族	IV 族	V 族	VI 族
Be ﾍﾞﾘﾘｳﾑ	B ﾎｳ素	C 炭素	N 窒素	O 酸素
Mg ﾏｸﾞﾈｼｳﾑ	Al ｱﾙﾐﾆｳﾑ	Si ｼﾘｺﾝ	P ﾘﾝ	S 硫黄
Zn 亜鉛	Ga ｶﾞﾘｳﾑ	Ge ｹﾞﾙﾏﾆｳﾑ	As 砒素	Se ｾﾚﾝ
Cd ｶﾄﾞﾐｳﾑ	In ｲﾝｼﾞｳﾑ	Sn ｽｽﾞ	Sb ｱﾝﾁﾓﾝ	Te ﾃﾙﾙ
Hg 水銀	Tl ﾀﾘｳﾑ	Pb 鉛	Bi ﾋﾞｽﾏｽ	Po ﾎﾟﾛﾆｳﾑ

現在の主流、又は注目されている半導体基板

シリコン基板・炭化シリコン基板・ゲルマニウム基板

Ⅲ－Ⅴ族化合物(ガリウム化合物・インジウム化合物)

1.対象品目の概要調査（2）

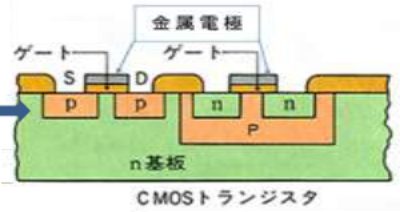
○輸出令第7項（18）半導体基板

半導体基板の要件を図7-18-2に示す。半導体基板は高純度であること、欠陥フリーであることは共通していても、その使われ方が大別して二通りある。良く知られたシリコンベースの集積回路では、シリコン基板内に別の導電型の領域を形成する。このように、基板自体に何らかのパターンを形成する使い方と、全くパターンを形成せずに使う場合がある。後者の場合は、その後のプロセスを進めていくための支持体という役割に近いために、熱的・機械的に安定であることが必須となる。作られるデバイスによっては、基板裏面から電気的コンタクトを取るような種類のものがあるため、それを満たす電気的特性をもっていることも求められる。そうした基板を用いて、その基板上にデバイスを構成する膜を複数形成し、そこに製品となる素子を複数個作成する。それぞれの素子が同一の特性を持つには、成長させる薄膜は単結晶である必要がある。基板上に同種又は異種の単結晶薄膜を形成するエピタキシャル成長用の基板であれば、基板自体が単結晶でなければならず、成長する膜との成長界面の均一性・清浄性の他に、成長膜との結晶の並び方との整合性が強く求められる。

【半導体基板の使い方】　図7-18-2　半導体基板の使い方

<二つの使い方>

① 基板内にパターンを形成する

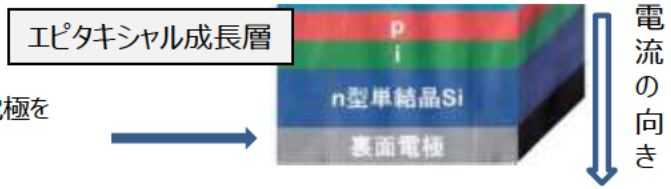


② 基板自体にはパターンを形成しない

<支持基板>

・熱的/機械的安定性

・必要な電気的特性を満たす：例えば、裏面から電極を取出す場合には、低抵抗であること



<エピタキシャル成長基板>

・基板の上に、製品となる素子を複数個形成→全て同じ品質であること→ 単結晶薄膜が必要。
(更に、薄膜が多結晶であると、隣り合う結晶の境界、つまり結晶粒界の影響で素子の特性が劣化する。)

・エピタキシャル成長とは…単結晶基板内での結晶の並び方を引き継ぐようにして、つまり、並び方が一致するようにその上に単結晶の薄膜を成長させる方法を指す。従って、同種の薄膜を成長させる場合には、継ぎ目は分からない。

単結晶半導体基板であること

・基板表面の均一性・清浄性

・結晶の並び方の整合性

1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令第7項（18）半導体基板

半導体をエピタキシャル成長基板として用いる時には、それぞれの基板で結晶を構成する原子の並び方が重要となる。ゲルマニウムと、窒化ガリウムの結晶の並び方を図7-18-3(1)に示す。エピタキシャル成長、或いはエピタキシーは、或る基板結晶上に、基板結晶と一定の結晶方位関係を持って結晶相を成長させる層形成方式を言う。元々は鉱物学の分野で使われていたが、人工的な薄膜成長技術の進歩と相俟って、半導体などの分野でも使われるようになった。シリコンとゲルマニウムは、結晶構造分類上で同じ立方晶系のダイアモンド構造であり、化合物である窒化ガリウムは複雑なウルツ鉱型の構造を示す。ウルツ型構造の結晶面の並び方をある方向からみると、ダイアモンド構造での並び方に近い物がある。

【半導体基板の結晶構造】　図7-18-3　各種半導体基板の結晶構造(1)

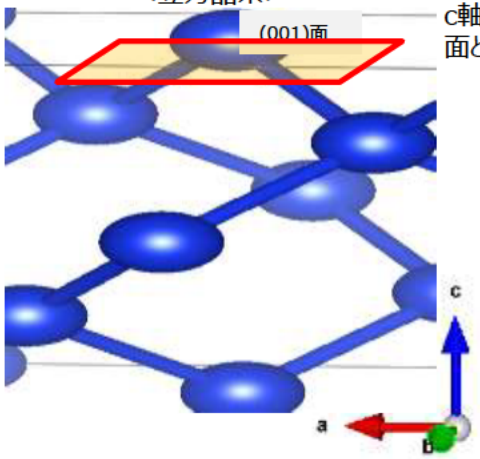
<エピタキシャル成長基板>

シリコンとゲルマニウム基板の結晶の並び方

赤で囲った領域：基板の結晶面

A, b, c：基板の軸方位

<立方晶系>



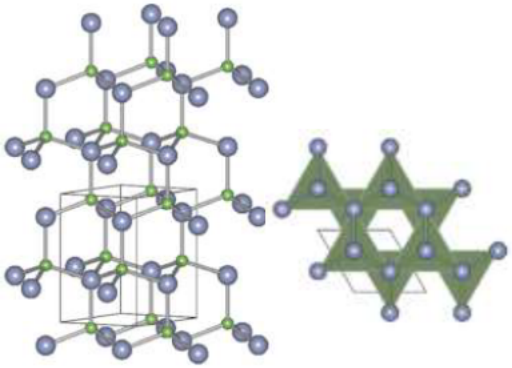
c軸に垂直な面を(001)面と定義する。

シリコンとゲルマニウムの結晶構造は共に、ダイヤモンド構造とよばれる結晶構造で、正四面体の頂点と体心にシリコン原子が配置。面心立方格子が二つ重なった形。

シリコンの結晶構造

窒化ガリウム基板の結晶の並び方

<六方晶系>



窒化ガリウムの結晶構造はウルツ鉱型構造と呼ばれ、六方最密構造が二つずれて重なった構造。面心立方格子の[1 1 1]方向の原子の並びと同じ。

1.対象品目の概要調査（4）

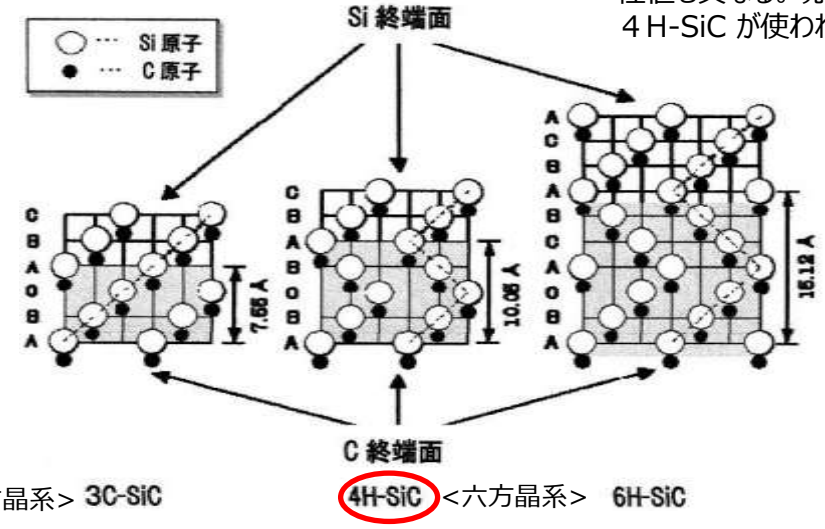
○輸出令第7項（18）半導体基板

炭化シリコンのばあいも、かごうぶつであるため、結晶構造は複雑であり、各々の原子の周りに異なる４個の最近接原子が正四面体配置をした構造であっても具体的な並び方には様々なタイプがある。炭化シリコンの結晶の代表的な並び方を図7-18-3(2)に示す。図の A,B,Cは六方細密充填構造における３種類の原子の占有位置を意味しており、3CはA,B,C, A,B,C,の３周期、 4H は A,B,C,B、A,B,C,B の４周期、6H は A,B,C,A,C,B の６周期の構造を持つ。各タイプによって炭化シリコンの物性値も異なる。現在、デバイス開発の多くは移動度の高い４H-SiC が使われている。

【半導体基板の結晶構造】図7-18-4　各種半導体基板の結晶構造(2)：炭化シリコンの結晶構造

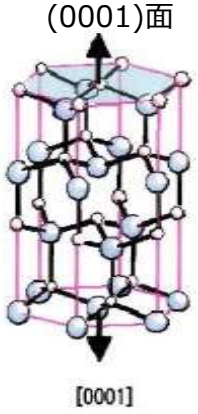
<エピタキシャル成長基板>

炭化シリコン基板の結晶の並び方



炭化シリコンの結晶は、各々の原子の周りに異なる４個の最近接原子が正四面体配置をした構造であり、具体的な並び方は複雑で、様々なタイプがある。各タイプによって物性値も異なる。現在、デバイス開発の多くは移動度の高い４H-SiC が使われている。

４H-SiC の代表面である(0001)面と、[0001]軸を示す。



1.対象品目の概要調査（5）

○輸出令第7項（18）半導体基板

半導体基板上へのエピタキシャル成長を図7-18-(3)3に示す。エピタキシャル成長には、ホモエピタキシーとヘテロエピタキシーの二種類があり、基板とその上に成長させる層が同じ物質の場合をホモエピタキシー、異なる物質の場合をヘテロエピタキシーと定義して、区別する。前者の場合は、基板での結晶の並び方を容易に引き継げられるため、継ぎ目は見えない。一方、後者の場合、基板と成長層の結晶構造が異なっていても両者で整合が取れやすい結晶面と結晶面の向きがあれば、格子間隔が少し異なっていても、数原子層の境界層が存在した後には、本来の格子定数を持った欠陥の無い単結晶薄膜の成長が可能となる。具体的に、シリコン基板、ゲルマニウム基板や窒化ガリウム基板上でヘテロエピタキシーが実現できている例を幾つか示す。この例ではシリコン基板とゲルマニウム基板の場合には、成長層との格子定数のズレは1%以内である。

【半導体基板の結晶構造とエピタキシャル成長 】

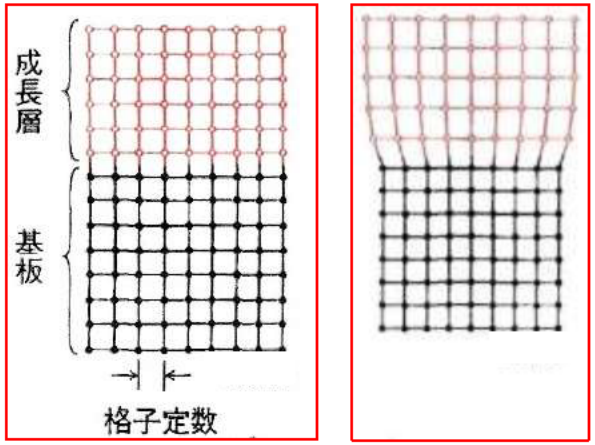
図7-18-5　半導体基板の結晶構造とエピタキシャル成長の関係

ホモエピタキシー：
基板と成長層が同じ物質

基板の面方位・軸方位を合わせられるため、継ぎ目なし。

ヘテロエピタキシー：
基板と成長層が異なる物質

格子定数が近くなるように、基板の面方位・軸方位を合わせる。



格子定数：格子状の結晶の大きさを表す数字。

ヘテロエピタキシャル成長での基板と成長半導体層の組合せ

シリコン基板は、GaP・AlPの成長基板に用いられる。
<ダイアモンド構造と閃亜鉛鉱構造の組合せ>

ゲルマニウム基板は、GaAs・AlAs・ZnSeの成長基板に用いられる。
<ダイアモンド構造と閃亜鉛鉱構造の組合せ>

窒化ガリウム基板は、AlNの成長基板に用いられる。
<ウルツ鉱構造同士の組合せ>

1.対象品目の概要調査（6）

○輸出令第7項（18）半導体基板

半導体基板上に(半導体)薄膜をエピタキシャル成長する技術は、を図7-18-3に示す。エピタキシャル成長、或いはエピタキシーは、或る基板結晶上に、基板結晶と一定の結晶方位関係を持って結晶相を成長させる層形成方式を言う。元々は鉱物学の分野で使われていたが、人工的な薄膜成長技術の進歩と相俟って、半導体などの分野でも使われるようになった。ここでは、下地基板の面方位・軸方位と、それに対応する成長層の面方位・軸方位でのそれぞれの結晶格子定数の対応関係が問題となる。この対応関係を、「格子整合度」といい、整合度が良くない場合を、格子不整合(Lattice Mismatch)と言う。エピタキシャル成長は、シリコンベースの半導体では、高速動作のトランジスタ作成に必須の技術であり、化合物半導体では、GaAsやGaNなどの基板上への多層のエピタキシャル成長膜の形成に用いられている。エピタキシャル成長には、ホモエピタキシーとヘテロエピタキシーの二種類がある。 格子の整合性は、ヘテロエピタキシーの時に、特に問題となる。

【半導体基板の結晶構造とエピタキシャル成長 】

図7-18-6 半導体基板上へのエピタキシャル成長

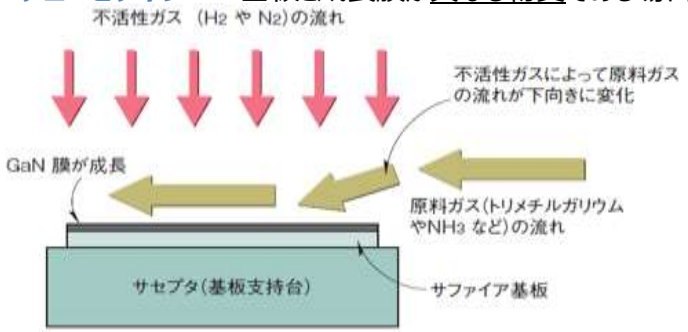
エピタキシャル成長

ヘテロエピタキシーの限定対象

分子線 エピタキ シー (MBE)	有機金属気相成長法 (MOCVD)

分子線エピタキシー：超高真空中で原料原子または分子を分子線として加熱した基板上に衝突させて成長させる。

ヘテロエピタキシー：基板と成長膜が異なる物質である場合

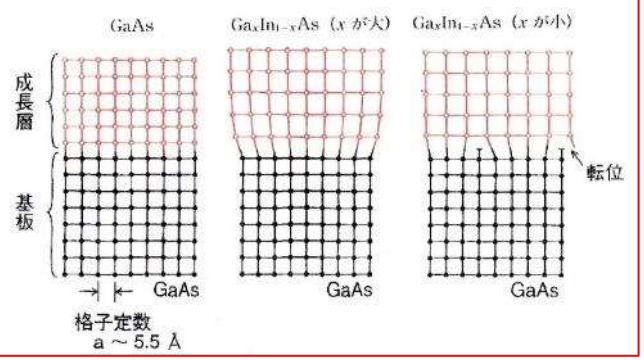


サファイア基板上へのGaN系半導体のエピタキシャル成長の例図。

整合性：格子整合度
格子不整合 → Lattice Mismatch

ヘテロエピタキシャル成長とその問題点

格子整合と格子不整合



格子不整合は、両者の格子定数の違いだけでなく、熱膨張係数の差によっても生じる。

1.対象品目の概要調査（7）

○輸出令第7項（18）半導体基板

次に、基板に関する一連の流れを説明する。ここでは基板の製造から始め、その上への素子形成、モジュールと呼ばれる最終製品(3.用途参照)までを指す。特に、Ⅲ－Ⅴ族化合物の場合には、基板と薄膜成長では、共通した技術が用いられていることは、特記すべき事柄である。最初に、チョクラルスキー法と呼ばれる結晶引き上げ法を説明する。この方法は、シリコン(Si)、ゲルマニウム(Ge)やガリウムひ素(GaAs)などの単結晶の製造で、最も一般的に用いられている。引き上げ後、特定の厚さとなるようにスライシング後、表面の機械研磨を行い、鏡面に仕上げ、最終洗浄を行い、製品となる。

【半導体基板の製造方法】

基板の製造 → 素子形成 → 最終製品

図7-18-7　半導体基板の製造

<シリコン基板>

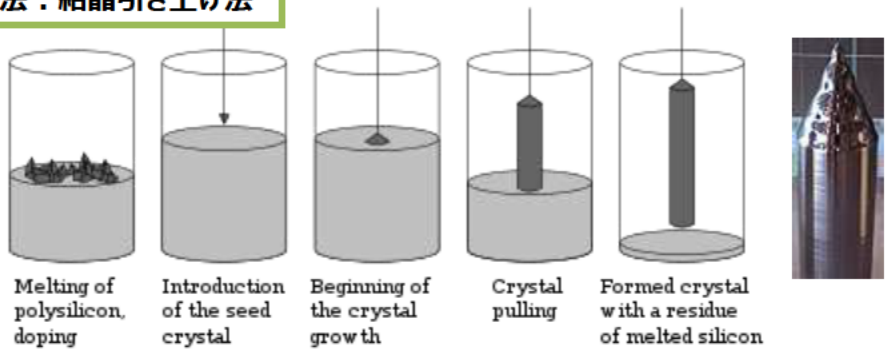
チョクラルスキー法：結晶引き上げ法

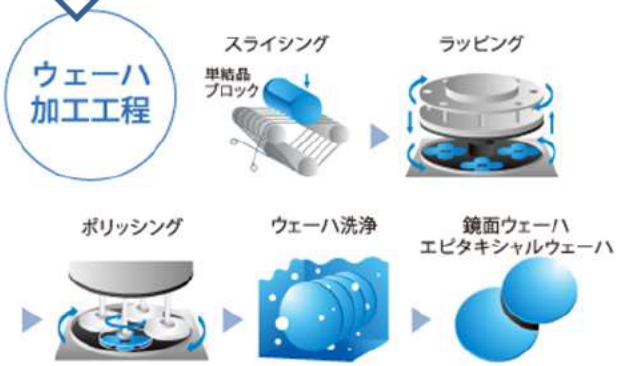
結晶引き上げ

坩堝内で溶融させた原料融液を温度勾配下で上方に引き上げることによって、大型のバルク単結晶を育成する。

長所　・成長状態の直接観察が可能、良否の判定が容易、大型設備対応

短所　・坩堝内壁からの汚染







オリエンテーションフラット

表面の結晶方位が明確に分かるように、オリエンテーションフラット(直線部)或いはノッチ(切欠き)を基板端部に形成。

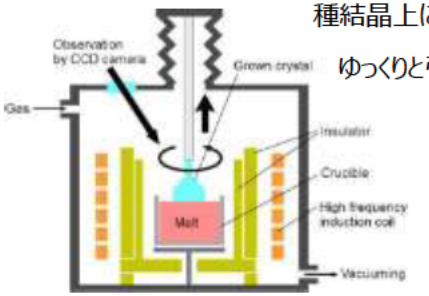
ノッチ

ＣＺ法

石英製坩堝内で原料を溶融

種結晶上に成長

ゆっくりと引き上げる



1.対象品目の概要調査（8）

○輸出令第7項（18）半導体基板

次に、化合物半導体基板である炭化シリコン基板の製造方法を説明する。この場合、製造方法の主流は昇華法である。この方法では、2000℃を越える高温で原料となるSiC粉末を溶融、蒸発させる。低温部に置いたSiCの種結晶に蒸気を触れさせ、凝固させて、単結晶のインゴットを得る. 成長に関わる温度や圧力などの各種パラメータの制御が、基板製造上の重要なファクターである。さらに、SiCは既に説明したような様々な構造をもつために、目的とする構造だけを制御よく製造する技術が必要となる。この材料は非常に硬いため、欠陥を発生させないように表面を研磨するなど、精密な表面加工が大変難しい。このようにSiC単結晶基板は製造がかなり難しく、そのためかなり高価である。別の製造方法の検討も進んでいる。

【半導体基板の製造方法】　図7-18-8　半導体基板の製造

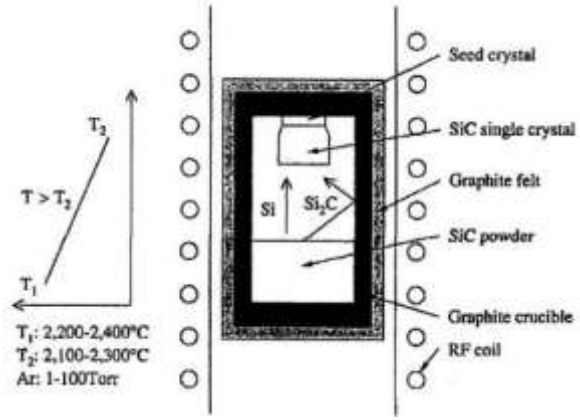
<炭化シリコン基板>

昇 華 法

黒鉛製坩堝中で、原料SiCを～2000℃に高温加熱・熱分解→SiCの蒸気生成

低温部に設けたSiC種結晶上にSiC蒸気を接触させて、単結晶を堆積

課題：温度・圧力の調整、必要とする結晶構造に対する制御性、低欠陥、表面研磨加工



Smart Cut**法**

結晶欠陥の少ないSiCの種基板を作成し、この種基板からスマートカット技術により剥がした厚さ約1μmのSiC層を、ベース基板上のシリコン酸化膜の上に転写して素子基板とする。

1.対象品目の概要調査（9）

○輸出令第7項（18）半導体基板

GaN単結晶基板の製造方法は、大別して気相法、液相法、剥離法の三種類がある。一般に、Ⅲ－Ⅴ族化合物の場合では気相法に関して、基板製造方法とエピタキシャル成長での薄膜成膜方法とは基本的に共通した技術が用いられ、主に①分子線エピタキシー法(MBE)、②有機金属気相成長法(MOCVD)、③ハイドライド気相エピタキシャル成長法(HVPE)の三種類である。量産・低コストでの製造が難しく、そのため基板は高価であるのが、現状である。現時点ではHVPE法とMOCVD法が技術的検討が進んでいる。

【半導体基板の製造方法】

図7-18-9　半導体基板の製造

基板の製造 → 素子形成 → 最終製品

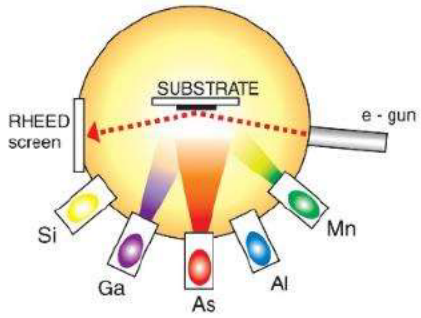
<窒化ガリウム基板>

気 相 法

基板製造方法とエピタキシャル成長での薄膜成膜方法とは基本的に共通

分子線エピタキシー（MBE）法

超高真空中で各々異なった容器に入れた原料を加熱して分子線として、た基板上に衝突させて成長させる。

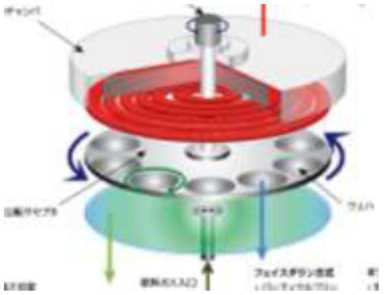


長所　・精密組成制御可能、高純度化

短所　・低成長速度、超高真空が必要

有機金属気相成長（MOCVD）法

有機金属の気体を反応容器に流して、高温での化学反応を利用して基板上に堆積させる。

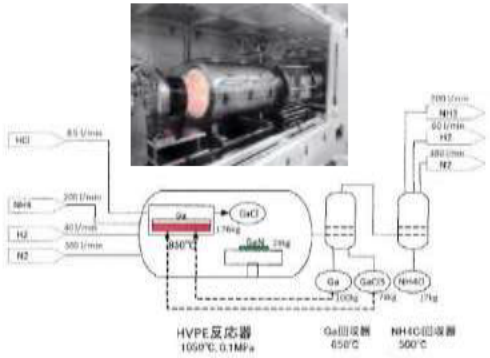


長所　・成長パラメータの制御可能
　　・大面積への均一成膜容易

短所　・炭素系の不純物が多い

ハイドライド気相成長（HVPE）法

塩酸ガスと金属 ガリウムを高温で反応させて生成した GaCl をガリウム源とし、アンモニアガスを窒素源と する。



長所　・高速成長、常圧、大型設備対応

短所　・高温成長、基板に依存(大きさ・欠陥)、

1.対象品目の概要調査（10）

○輸出令第7項（18）半導体基板

GaN単結晶基板の製造方法の液相法として、超臨界アンモニアを利用するアモサーマル法と、高温高圧下で溶融させたガリウムとナトリウムに窒素又はアンモニアを溶解させるフラックス法が開発されている。それぞれの方法は一長一短がある。

【半導体基板の製造方法】

図7-18-10　半導体基板の製造

<窒化ガリウム基板>

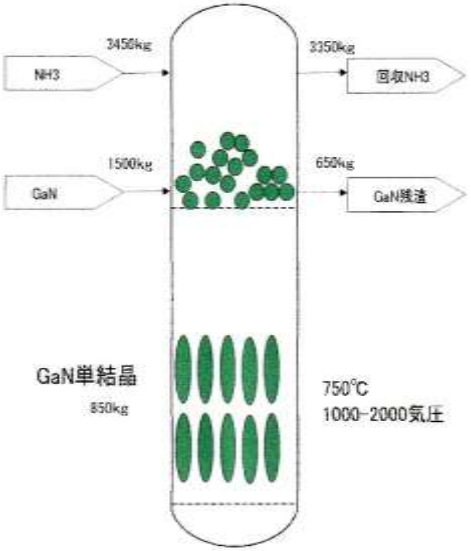
液 相 法

アモサーマル法

超臨界アンモニアへの GaNの溶解度の温度依存性を利用。高音部で溶解し、低温部のGaN種結晶上に析出させる。

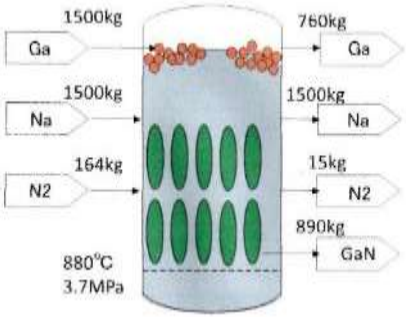
長所　・原料利用効率 良、低欠陥

短所　・高温高圧、低成長速度、種結晶のコストに依存、設備の大型化に難点



フラックス法

GaとNaの溶融物(混合フラックス)に、加圧下で 窒素又はアンモニアをフラックス中に溶け込ませて接触・析出させる



長所　・低欠陥

短所　・高温高圧、溶融Naの発火性、大型設備の安全性に難点

1.対象品目の概要調査（11）

○輸出令第7項（18）半導体基板

ここまで基板自体の製造方法を説明してきた。現在最も完成度の高いシリコン基板の製造技術と比較して、各種半導体基板の製造に関する、課題とそれに対するアプローチを述べる。シリコンと比べて、他の半導体基板は製造が困難なために基板のサイズが小さく、また製造コストも高く、製造技術の改良・改善が強く要請されている。一方、デバイスやモジュールなどの製品に関しては、材料コストが製品コストに占める比重が高いのは、好ましくない。このため、現状はシリコン基板を使って、つまりヘテロエピタキシャル成長で、例えばGaNの素子を作成する傾向が主流となっている。

【半導体基板の製造方法】

図7-18-11　半導体基板の製造

基板の製造 → **素子形成** → **最終製品**

化合物半導体基板の製造上の課題

<各種基板の比較>

	Si	Ge	SiC	GaN
・大口径化	Si 12インチ	Ge 6～8インチ	SiC 6～8インチ	GaN 6～8インチ
・相対価格	Si 1 (12インチ)	Ge 10 (4インチ)	SiC <10(6インチ)	GaN 60 (6インチ)

・製造コストの低減

・製造歩留まり向上

・製造容易化

・共通課題

・低欠陥化

課題に対するアプローチ

・製品コストからの要求

・シリコン基板の活用：GaN on Si

・課題

・成膜プロセスが複雑化：バッファー層など

1.対象品目の概要調査（12）

○輸出令第7項（18）半導体基板

GaNは、レーザー、高輝度LEDやパワー半導体といった素子を作り、幅広い分野で用いられている。比較的低コストで大口径基板を入手できるシリコン基板を用いてGaNのヘテロエピタキシャル層を成膜してデバイスを作成する場合に、成膜プロセスが複雑になってくる。つまり、基板と成長層との格子定数や熱膨張係数が大きくことなっているため、欠陥(転位)、基板全体の反りやクラック(割れ)が発生して、製品歩留りが著しく低下する。

【異種基板を用いたエピタキシャル成長】

図7-18-12　半導体基板上への
ヘテロエピタキシャル成長の課題

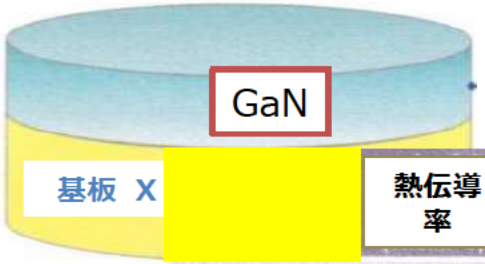
素子形成 → 最終製品

ヘテロエピタキシャル成長の課題

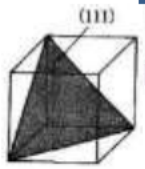
①成長薄膜中への欠陥発生：格子が整合しないために、転位が多量に発生

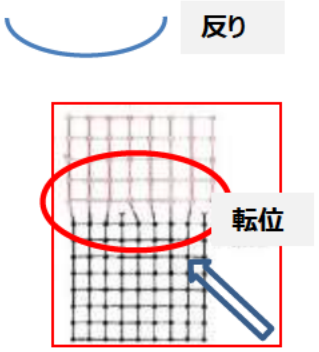
②基板と成長膜との熱膨張係数の差が大きいと、降温時に、反り又はクラックが発生。

⟹ 製品歩留り低下



<基板による違い>	熱伝導率	格子不整合度	熱膨張係数差	GaN中の転位密度
SiC	4.90	3.5%	25%	5.10^6 /cm²
Bulk GaN	1.30	0	0	~10^5 /cm²
Silicon (111)	1.30	17% 大	54%	~10^9 /cm²
Germanium	0.58	20%	5.5%	> 5.10^9 /cm²





1.対象品目の概要調査（13）

○輸出令第7項（18）半導体基板

熱膨張係数の差によって、高温成膜後の冷却時に、構造全体が大きく反ってしまう不具合を解消するため、基板と成長薄膜間の格子定数の調整、或いは熱膨張係数差を調整するように、プロセス上での色々な工夫が成されている。多くの場合、基板と成長層との間に中間層(バッファ層)を設けている。

【異種基板を用いたエピタキシャル成長】　図7-18-13　半導体基板上へのエピタキシャル成長　GaNの欠陥観察の例

ヘテロエピタキシャル成長の課題に対する対策例

熱膨張係数の調整による反りの抑制

多層膜による歪調整

＜対策なし＞

Si基板 – GaN

GaN：$5.6\times10^{-6}K^{-1}$

Si：$4.2\times10^{-6}K^{-1}$

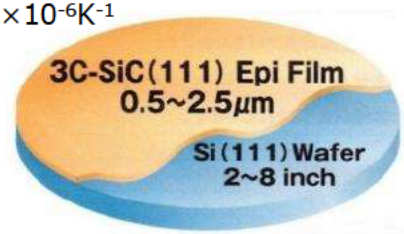


GaN内の欠陥 多数

＜対策後＞

Si基板 – **中間層 SiC** - GaN

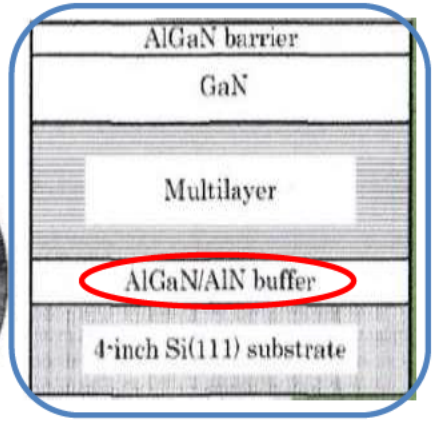
3C-SiC：$4.5\times10^{-6}K^{-1}$



Si基板 – SiC-Epi：イメージ図



GaN内の欠陥 なし



1.対象品目の概要調査（14）

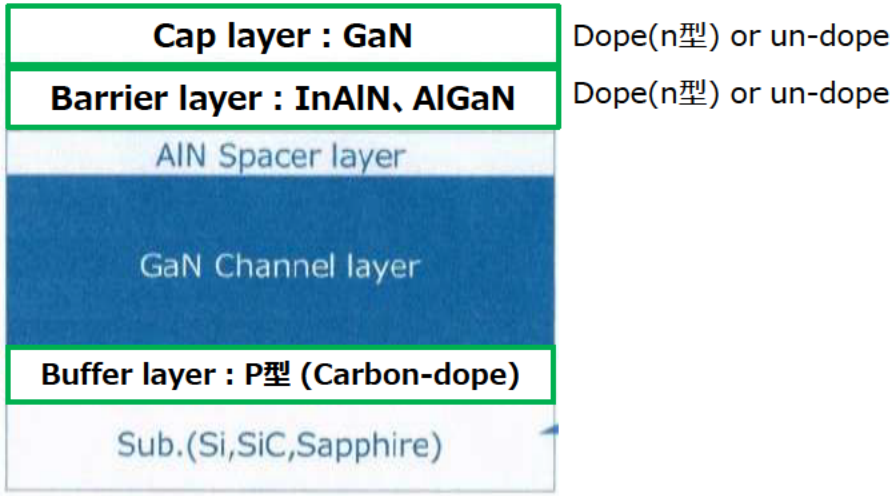
○輸出令第7項（18）半導体基板

シリコンや炭化シリコン上に数種類の膜をヘテロエピタキシャル成長させた積層基板が「エピタキシャル基板、或いはエピ基板」として、製品化されている。下の図は、InAln-GaNのHEMT素子製作に向けた積層構造である。構成する各層の導電型は、必ずしも一定していない。バッファー層とチャネル層をp型に、またスペーサー層やバリア層をn型にすることもある。HEMTや導電型に就いては、用途の項で説明する。

【ヘテロエピタキシャル成長基板】

図7-18-14　HEMT用エピタキシャル基板

In(Ga)AlN-GaN HEMT用基板



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（１）

○輸出令第7項（18）半導体基板

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分で相違がある。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）
	条	項	号	
7(18)	6		十八	基板であって、当該基板の上に次のいずれかに該当する物質の多層膜の結晶を有し、かつ、当該結晶がエピタキシャル成長されているもののうち、ヘテロエピタキシャル材料となるもの(ニに該当する化合物(窒化ガリウム、窒化インジウムガリウム、窒化アルミニウムガリウム、窒化インジウムアルミニウム、窒化インジウムアルミニウムガリウム、リン化ガリウム、砒化ガリウム、砒化アルミニウムガリウム、リン化インジウム、リン化インジウムガリウム、リン化アルミニウムインジウム又はリン化インジウムガリウムアルミニウムに限る。)のP型エピタキシャル層を一層以上有するものであって、当該P型エピタキシャル層がN型層に挟まれていないものを除く。） （運用解釈） 窒化ガリウム、窒化インジウムガリウム、窒化アルミニウムガリウム、窒化インジウムアルミニウム、窒化インジウムアルミニウムガリウム、リン化ガリウム、砒化ガリウム、砒化アルミニウムガリウム、リン化インジウム、リン化インジウムガリウム、リン化アルミニウムインジウム又はリン化インジウムガリウムアルミニウムこれらの化合物における元素（窒素、ガリウム、インジウム、アルミニウム、燐(りん)及び砒素）の順番を問わない。 貨物等省令第６条第十八号、第十九号及び第二十二号から第二十四号まで中の基板個別部品又は集積回路を、基板上若しくはその中に配置できるようになっている薄板上のものであって、相互接続の有無によらないものをいう。 多層膜の結晶を有し、かつ、当該結晶がエピタキシャル成長されているもののうち、ヘテロエピタキシャル材料となるもの異種の半導体物質が同一結晶方位に結晶構造を連続させて積層成長してできた多層の結晶成長層を有する基板をいう。多層膜からなるヘテロエピタキシャル成長結晶を有する基板からなる材料を含む。

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3C1		Hetero-epitaxial materials consisting of a "substrate" having stacked epitaxially grown multiple layers of any of the following: Note 3.C.1.d. does not apply to a "substrate" having one or more P-type epitaxial layers of GaN, InGaN, AlGaN, InAlN, InAlGaN, GaP,GaAs, AlGaAs, InP, InGaP, AlInP or InGaAlP, independent of the sequence of the elements, except if the P-type epitaxial layer is between N-type layers. "Substrate" A sheet of base material with or without an interconnection pattern and on which or within which "discrete components" or integrated circuits or both can be located. "Discrete component" A separately packaged "circuit element" with its own external connections. "Circuit element" A single active or passive functional part of an electronic circuit, such asone diode, one transistor, one resistor, one capacitor, etc.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（２）

○輸出令第7項（18）半導体基板

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は赤字の部分で相違がある。

輸出令	貨物等省令 条	貨物等省令 項	貨物等省令 号	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(18)	6		十八	イ シリコン ロ ゲルマニウム ハ 炭化けい素 ニ Ⅲ－Ⅴ族化合物（ガリウム又はインジウムの化合物 に限る。） （運用解釈） Ⅲ－Ⅴ族化合物 ほう素、アルミニウム、ガリウム、インジウム、タリウム又はこれらの組合せと窒素、燐、砒素、アンチモン、ビスマス又はこれらの組合せとの化合物をいう。	－

Wassenaar規制番号 3桁	Wassenaar規制番号 細番	Wassenaar規制文言（全文）
3C1	a b c d	a. Silicon (Si); b. Germanium (Ge); c. Silicon carbide (SiC); or d. "III/V compounds" of gallium or indium. Note "III/V compounds" Polycrystalline or binary or complex monocrystalline products consisting of elements of groups IIIA and VA of Mendeleyev's periodic classification table (e.g., gallium arsenide, gallium-aluminium arsenide, indium phosphide).

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（１）

半導体基板の用途の例を図7-18-15に示す。半導体基板は、主に①電気信号を扱う半導体素子、②光信号を扱う光学的素子、その両方の信号を扱うエネルギー変換素子として、用いられる。これらの素子は、AIや自動運転システムや携帯機器などを含めて、高電力の変換や電力の送発電領域、情報処理・送受信、照明機器などの光源、太陽電池など、我々の身の回りの領域で幅広く用いられている。基板材料として、Ⅳ族の単元素であるシリコンおよびゲルマニウム、化合物基板としては、Ⅳ族同士の炭化ケイ素とⅢ－Ⅴ族化合物が代表的である。

【半導体基板の主用途と適用領域】

図7-18-15　半導体基板の用途の例

主な用途	＜適用領域と具体例＞
半導体素子 電気信号	**電力** → パワーデバイス **通信** → スイッチングデバイス
光学的素子 光信号	**光源**→ 発光デバイス
エネルギー変換素子 光信号・電気信号	**発電**→ 太陽電池



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（２）

半導体基板材料の特性と用途を図7-18-16に示す。半導体基板は、それぞれの物質の物理的・電気的・光学的物性を最大限に生かして、その上にデバイスを形成後、製品化される。ゲルマニウムは、電子移動度・正孔移動度が共にシリコンと比較して高いために、次世代高速電子デバイス材料として注目されている。化合物半導体太陽電池の基板として使われている。GaN（窒化ガリウム、ガリウムナイトライド）は、シリコンに比べて、バンドギャップが約3倍広く、絶縁破壊電圧も約10倍という特性を持っており、また、青色や緑色といった比較的短い波長の光を発生でき、各種光デバイスにも使用され、SiCと共に次世代パワー半導体デバイスとしても期待される。それぞれの基板は、GaNの成長用基板としても用いられる。

【半導体基板材料の物性とその特徴】　図7-18-16　半導体基板材料の特性と用途

代表的な半導体材料の物性を示す。

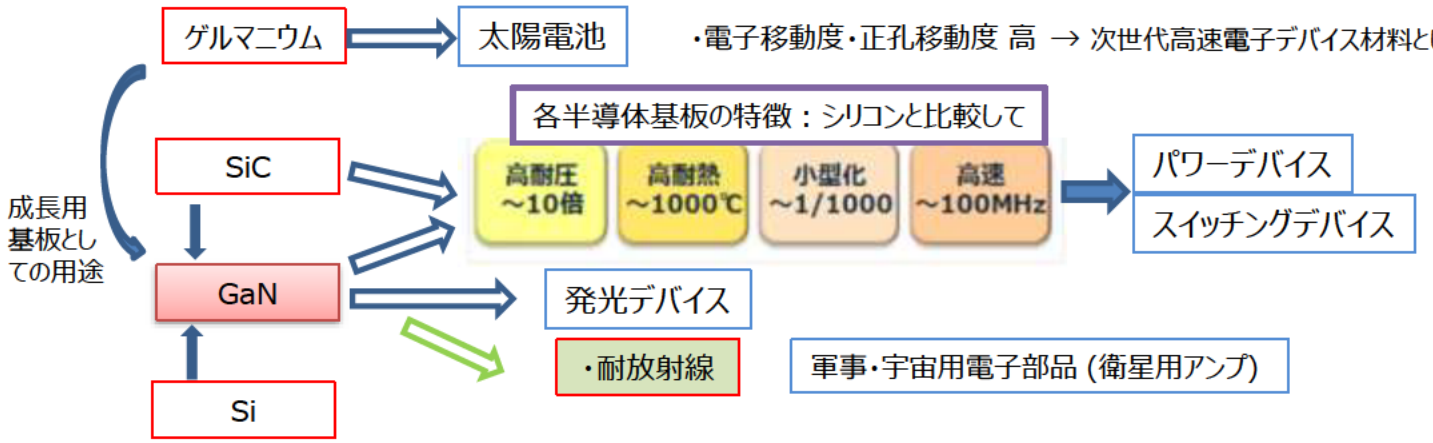
物 性	単 位	Si	SiC	Ge	GaN	Diamond
バンドギャップ	eV	1.12	3.26	0.67	3.39	5.47
電子移動度	cm2/Vs	1400	1000	3800	900	2200
正孔移動度		400		1800		
絶縁破壊電圧	MV/cm	0.3	2.5	0.075	3.3	10
熱伝導度	W/cmK	1.5	4.9	0.6	2	20
バリガ性能指数(参)		1	340	?	650	27000

バンドギャップの値が大きいほど、熱により活性化される電子が少なく、高温動作性が向上する。

移動度の値が大きいほど高速に動作できる。

絶縁破壊する電圧が高ければ、層の厚さを薄くでき、高速動作も可能となる。

熱伝導度が高いほど、熱的に安定で、放熱が容易となる。



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（３）

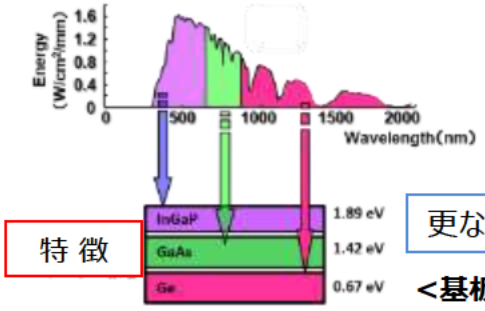
一般家庭用や業務用の太陽電池の光変換効率は理論上29%といわれていて、宇宙空間中の人工衛星のような微弱な光環境では使えない。このため、できるだけ広範囲の光を吸収できるような構造を持った、化合物材料を用いた変換効率の極めて高い太陽電池が提供されている。ゲルマニウム基板上にGaAsとInGaPを順にエピ成長させて作られた3接合型構造で高効率の太陽電池が得られる。さらに効率を上げるために、最下層のゲルマニウム基板をInGaAsに替える方式が考案されている。この場合には、GaAs基板を用いて、また前の方式とは順序を変えて二種の積層後、全体を基板から剥離して、別の支持基板に貼り付ける方法で製作された太陽電池では37%の高い効率が得られている。（図7-18-17）

【半導体基板の具体的応用：太陽電池】　図7-18-17　半導体基板の用途の例（太陽電池）

3接合型
太 陽 電 池

ゲルマニウム基板 ＋ GaAs + InGaP

・エネルギーギャップの異なる3種類の物質で光を効率的に吸収

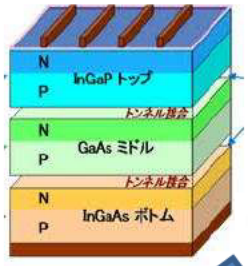


特 徴

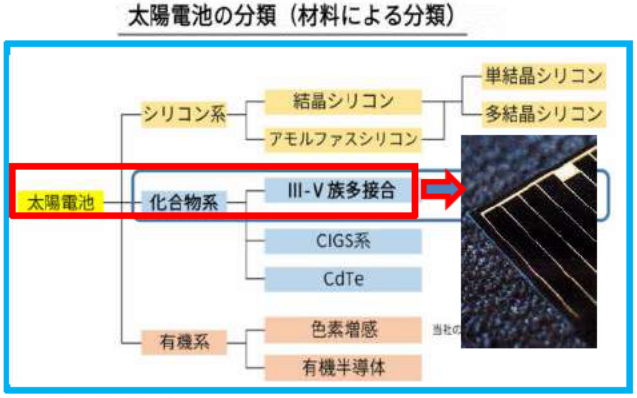
格子の整合性 良 → 高性能
(∵欠陥 少)

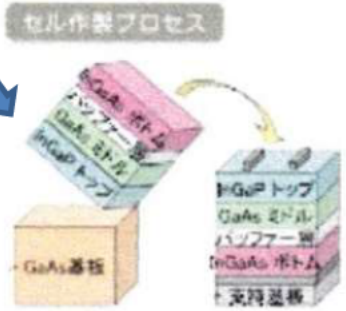
更なる効率化

<基板の変更>
Ge → InGaAs



格子の不整合





変換効率～40%の太陽電池

3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令第7項（18）半導体基板

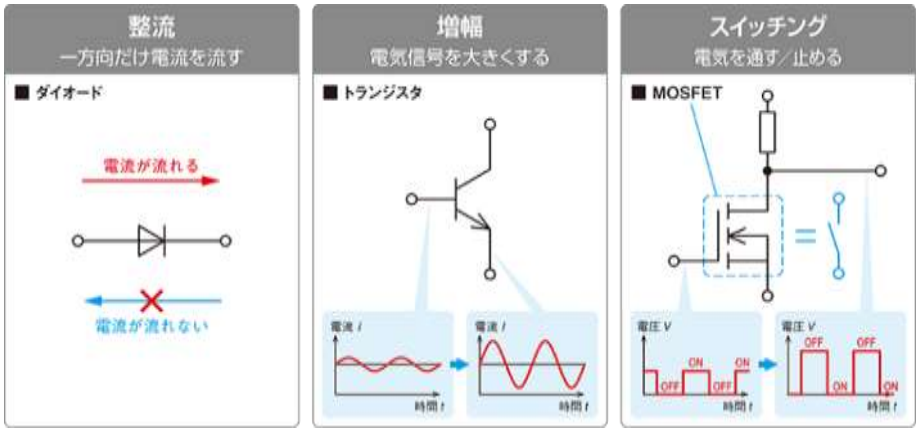
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（４）

IoTや５G、或いはAIなどでの情報通信が広範囲に普及してくると、それに使われる電力量が膨大になり、省エネルギー化・省電力化が最近特に注目されている。このため、効率的な電力の送受信方法や利用方法を実現するために、パワーデバイスが用いられる。トランジスタの基本的な各動作である整流作用・増幅作用・スイッチング作用に関して、高電圧・高電流での動作が必要となる。電圧、周波数を変えたり、直流を交流、交流を直流に変えるなどの電力変換は、民生用だけでなく、車両用、送配電部門などでの利用が拡大している。電流・電圧に線引きは不明確だが、おおむね定格電流が1A以上のものをパワーデバイスと分類している。代表的なデバイスの種類を下図（図7-18-18）に示す。赤字のデバイスに就いては、後で詳しく説明する。

【半導体基板の具体的応用：パワーデバイス・スイッチングデバイス】

高電圧・大電流・高速の半導体動作が可能

図7-18-18　半導体基板の用途（パワーデバイス）



<代表的なパワーデバイス>

ダイオード：整流素子	一般整流ダイオード
	ファストリカバリダイオード
	ショットキーバリアダイオード
	ツェナーダイオード
トランジスタ：増幅素子・スイッチング素子	**バイポーラトランジスタ（HBT）**
	MOSトランジスタ・高移動度トランジスタ（HEMT）
	IGBT
サイリスタ：スイッチング素子	SCR（Silicon Controlled Rectifier）
	シリコンサージ防護素子
	TVS（Transient Voltage Suppressor）
その他	**パワー系のIC（MMIC）**、パワーモジュールなど

3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（５）

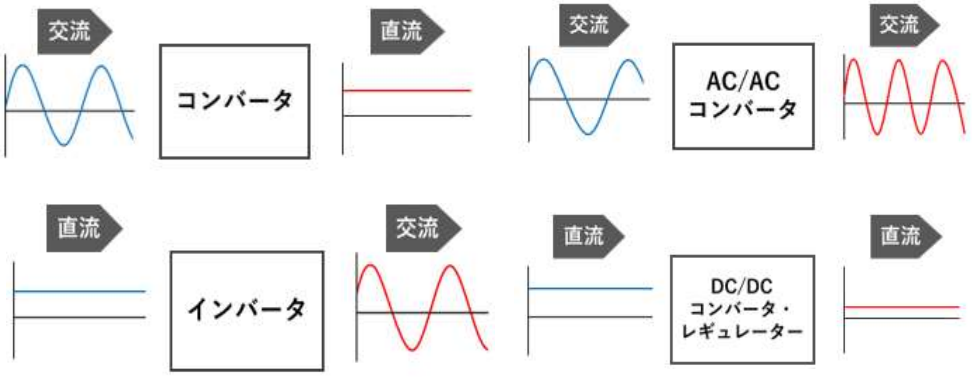
パワーデバイスでは、交流から直流への変換、逆に直流から交流への変換を行うだけでなく、ある周波数の交流を違った周波数の交流に変換したり、直流での電圧値を変化させる働きがある。こうしたそれぞれの働きに応じて、民生用だけでなく、鉄道車両、送配電部門などの様々な分野での利用が拡大している。（図7-18-19）

【半導体基板の具体的応用：パワーデバイス】

図7-18-19　半導体基板の用途（電力変換）

電力変換機能

パワーデバイスの基本動作



<パワーデバイスの応用分野>

モーター駆動分野：自動車、鉄道車両

各種発電分野：太陽光発電、風力発電

安定電源対象：UPS、スイッチング電源、各種民生機器用電源



三菱電機のパワー半導体



3.品目の主たる用途の調査分析（6）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（６）

パワーデバイスの仲間には、トランジスタが含まれる。トランジスタには、電流制御型のバイポーラ・トランジスタと、電圧制御型の電界効果とトランジスタの二種類がある。それぞれ、増福やスイッチング機能を実現している。それぞれのトランジスタは様々な分野での利用されている。（図7-18-20）

【半導体基板の具体的応用：パワーデバイス】

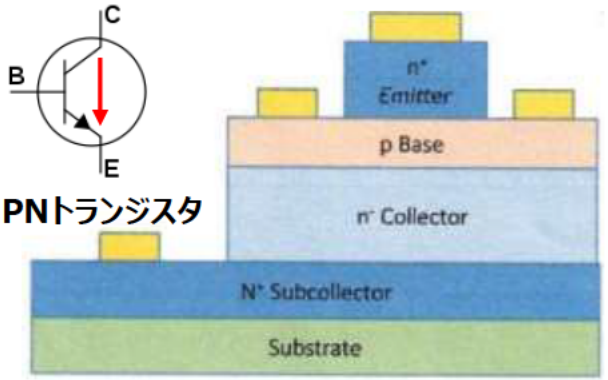
図7-18-20 トランジスタの種類

増 幅 機 能　　スイッチング機能

ヘテロバイポーラトランジスタ (HBT)　　<基本的なトランジスタ構造>　　電界効果トランジスタ (MOSFET)

B-E電流でC-Eに流れる電流を制御

電子と正孔が電流を構成

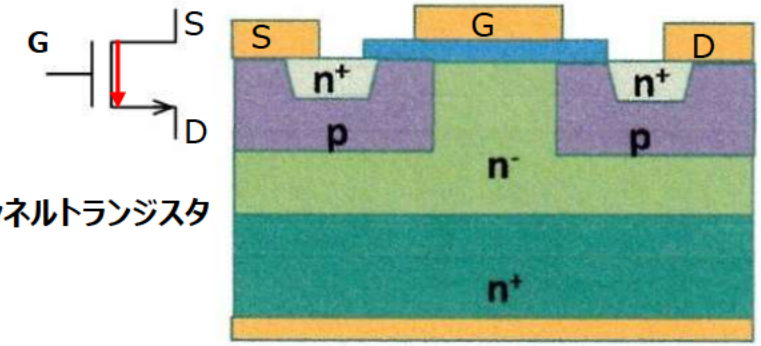


NPNトランジスタ

携帯電話機や無線LANのパワー・アンプなど。

ゲート電圧で流れる電流を制御

電子のみが電流を構成



Nチャネルトランジスタ

記号の説明

N または n 領域：電子の濃度が周辺の濃度よりも多い領域

n+領域，n-領域：同じn領域が接する場合に、両者の相対濃度の大小を明記(+が多く、-は少ない)

P 領域：正孔の濃度が周辺の濃度より多い領域

3.品目の主たる用途の調査分析（7）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（７）

炭化シリコン基板上に窒化物半導体をヘテロエピタキシャル成長させて、ヘテロバイポーラ・トランジスタを作成した例を示す。テラヘルツ級での通信用ヘテロバイポーラパワートランジスタとしては、InPベースが候補となっている。（図7-18-21）

【半導体基板の具体的応用：パワーデバイス】

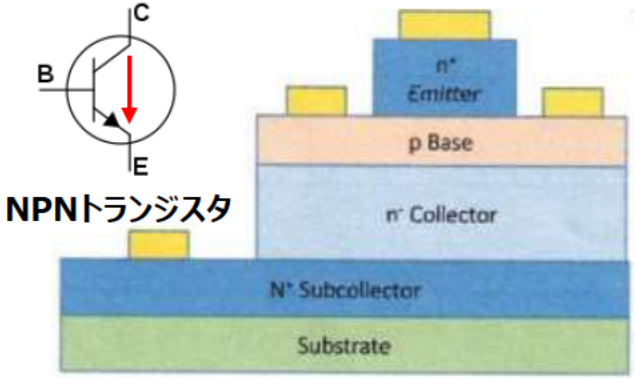
図7-18-21　ヘテロバイポーラトランジスタの例

増 幅 機 能　　スイッチング機能

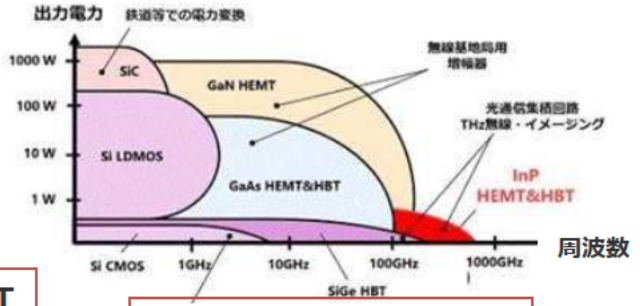
ヘテロバイポーラトランジスタ (HBT)

B-E電流でC-Eに流れる電流を制御

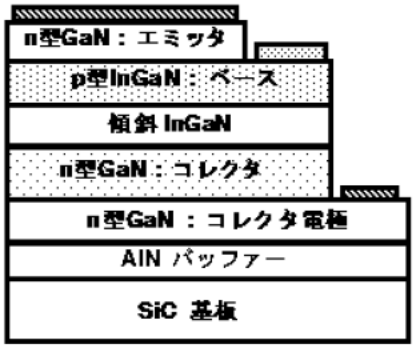
電子と正孔が電流を構成



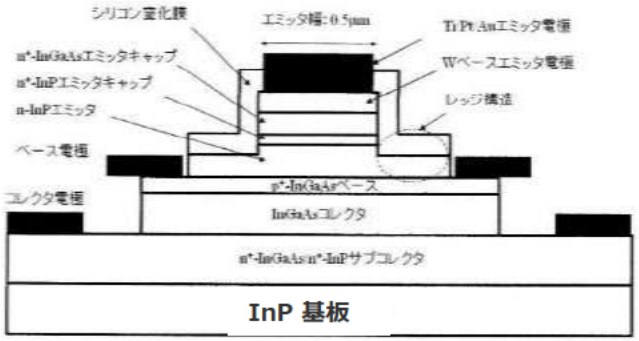
携帯電話機や無線LANのパワー・アンプなど。



SiC-InGaN/GaN HBT



InP-InGaAs/InP HBT



記号の説明

N または n 領域：電子の濃度が周辺の濃度よりも多い領域

n^+領域，n^-領域：同じn領域が接する場合に、両者の相対濃度の大小を明記(+が多く、-は少ない)

P 領域：正孔の濃度が周辺の濃度より多い領域

3.品目の主たる用途の調査分析（8）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（８）

パワーデバイスの中でよく知られているのが、電界効果トランジスタである。この素子は、三つの電極からなり、ゲート電極に掛ける電圧でソースとドレイン電極間に流れる電流を制御するものである。下図の場合には、流れる電流は電子のみから構成される。ゲートに電圧が印加されていない時は、通常、ソース･ドレイン間に電流は流れない(OFF状態)。ある一定の電圧をゲートに電圧を印加した時に、電流が流れる領域(チャネル)が形成される(ON状態)。この時の、チャネルの抵抗値をオン抵抗と言い、熱損失となるので、値は小さい方が良い。ここでは、三つの電極は全て水平方向に配置されている。（図7-18-22）

【半導体基板の具体的応用：パワーデバイス】 図7-18-22 電界効果トランジスタ (MOSFET) の基本構造

<電界効果トランジスタ (MOSFET) の基本構造>

ゲート電極に印加する電圧(電界)によって流れる電流を制御

<横型MOSFET>

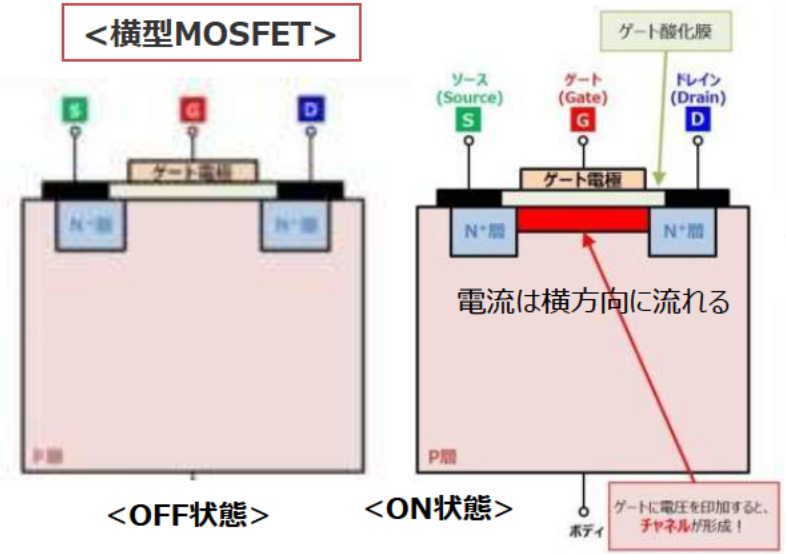
<記 号>

ソース

ゲート

ドレイン

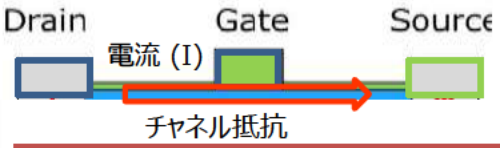
Nチャネル：電子のみが電流を構成



<OFF状態>　<ON状態>

記号の説明

N または n 領域：電子の濃度が周辺の濃度よりも多い領域



チャネル部で消費される電力(W)＝
電流 (I)×電流 (I)×抵抗 (R)

チャネルに電流が流れる時の抵抗R
(**オン抵抗**)は、小さい方が良い。

3.品目の主たる用途の調査分析（9）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（９）

次に、ドレイン電極が基板背面に配置されている素子構造を示す。この縦型MOSFETの場合、横型MOSFETと比べて構造が少し複雑になるが、動作原理は同じで、電流の流れる方向が縦方向になっている。（図7-18-23）

【半導体基板の具体的応用：パワーデバイス】

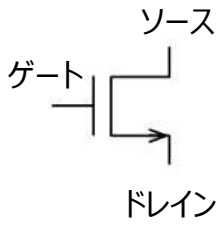
図7-18-23　電界効果トランジスタ（MOSFET）の基本構造

＜電界効果トランジスタ（MOSFET）の基本構造＞

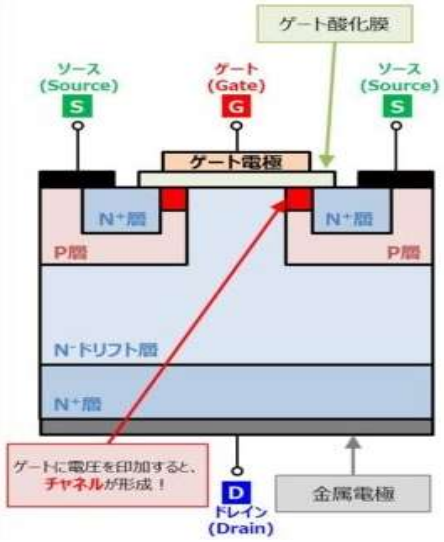
ゲート電極に印加する電圧(電界)によって流れる電流を制御

＜縦型MOSFET＞

＜記号＞



Nチャネル：電子のみが電流を構成



三菱電機のパワー半導体

記号の説明

N または n 領域：電子の濃度が周辺の濃度よりも多い領域

n^+領域，n^-領域：同じn領域が接する場合には、両者の相対濃度の大小を明記(+が多く、-は少ない)

P 領域：正孔の濃度が周辺の濃度より多い領域

動作の説明

ゲート･ソース間電圧V_{GS}を印加すると、ゲート(G)の絶縁膜直下にP層内の電子が引き寄せられ、電子よるNチャネル領域(上図の赤色)が形成される。

Nチャネル領域が形成されることによって、ソース(S) からドレイン(D)に**縦方向**に電流が流れる。

3.品目の主たる用途の調査分析（10）

動作の説明

○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（10）

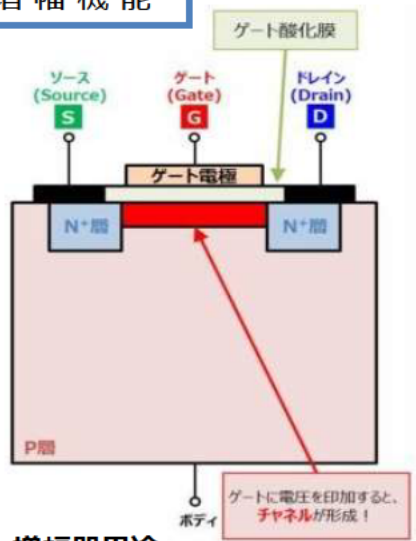
横型MOSFETと縦型MOSFETは、構造が異なっているために、パワーデバイスとしての用途もことなっていて、横型は高周波電力の増幅素子として、他方、縦型は、チップ全体で大きな電流を有効に流せるために、高耐圧のスイッチング素子として用いられる。（図7-18-24）

【半導体基板の具体的応用：パワーデバイス】図7-18-11-24 電界効果トランジスタ（MOSFET）の基本構造

<MOSFETの比較>

<横型MOSFET>

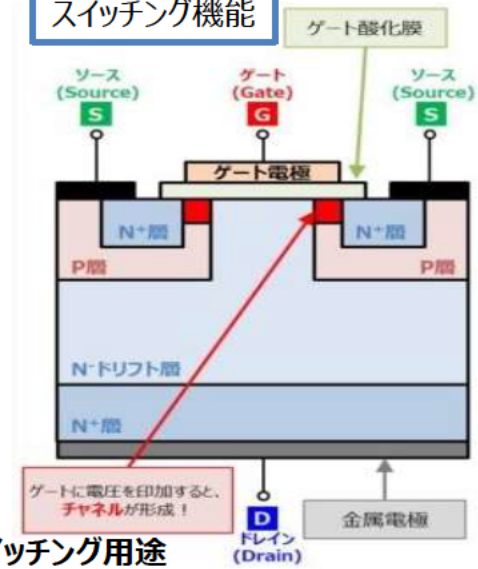
増 幅 機 能



高周波電力増幅器用途

<縦型MOSFET>

スイッチング機能



スイッチング用途

チップ全体に電流を流すことができるため、電流密度が高くなる。その結果、オン抵抗が低くなる。

高耐圧化と低オン抵抗化に適した構造

3.品目の主たる用途の調査分析（11）

動作の説明

○輸出令第7項（18）半導体基板

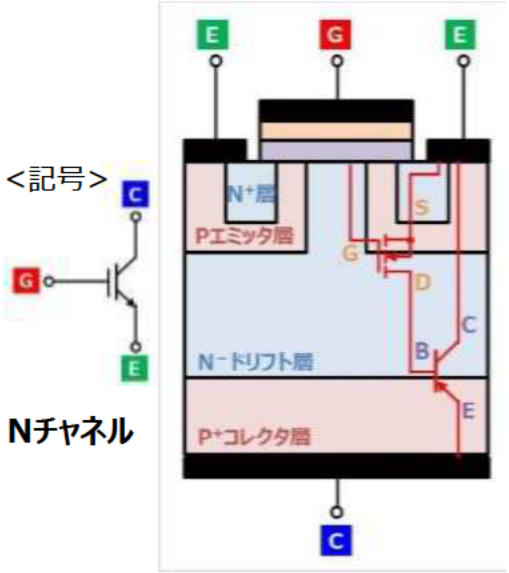
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（11）

トランジスタの仲間には、MOSFETとバイポーラトランジスタの構造を複合化した絶縁ゲート型バイポーラトランジスタという種類もある。この素子の最大の特徴は、高耐圧で大電力の高速スイッチングが可能なことであり、高耐圧のスイッチング素子として用いられる。（図7-18-25）

【半導体基板の具体的応用：パワーデバイス】

<絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ（**IGBT**）

増 幅 機 能　　スイッチング機能



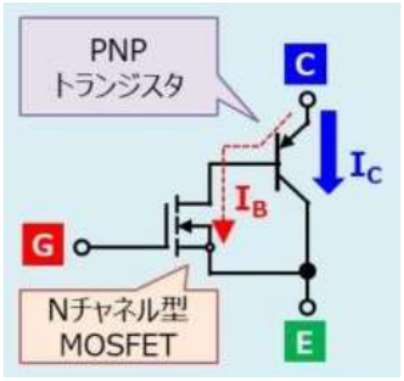


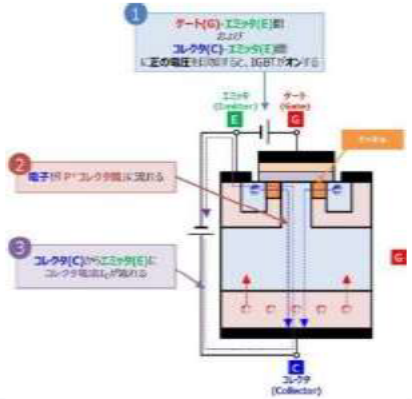
図7-18-25　絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ（IGBT）の基本構造

高耐圧化と低オン抵抗化に適した構造

<構造の特徴>

MOSFETのドレイン側に**P⁺コレクタ層**を形成

コレクタ(C)からエミッタ(E)に向かってP型半導体とN型半導体が**P→N→P→N**と並ぶ。



エミッタに対して**正の電圧**をゲートに印加すると、
NチャネルMOSFETがオンして、**PNPトランジスタ**に**ベース電流I_B**が流れます。
その結果、コレクタからエミッタに**コレクタ電流I_C**が流れます。

3.品目の主たる用途の調査分析（12）

動作の説明

○輸出令第7項（18）半導体基板

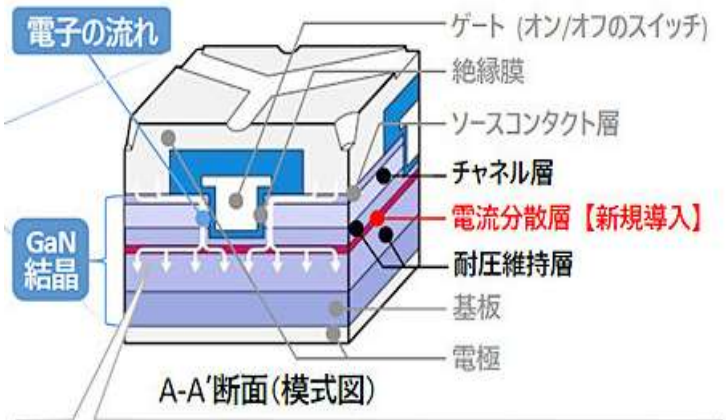
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（12）

豊田合成は、縦型MOSFETの特徴を生かして電気を基板に対して垂直に流す「縦型構造」を採用することで、GaNパワー半導体で世界最高水準となる1チップで100アンペア(A)の大電流動作を実現。薄型・小型化などを図り、さらにGaN結晶内に電流分散層」導入することで、電流を耐圧維持層に広げて抵抗値を下げ、電流容量を100アンペアに高めた。　（図7-18-26）

【半導体基板の具体的応用：パワーデバイス】図7-18-26　電界効果トランジスタ（MOSFET）の基本構造

<縦型MOSFETの応用>

大電流動作 100 A：豊田合成「縦型GaNパワー半導体」



チャネル層の細い通路を通過した電子を電流分散層で水平方向に広げることで耐圧維持層の電気抵抗を低減

チップ全体に電流を流すことができるため、電流密度が高くなる。



チップ



小型化したインバータ回路

高耐圧化と低オン抵抗化

3.品目の主たる用途の調査分析（13）

動作の説明

○輸出令第7項（18）半導体基板

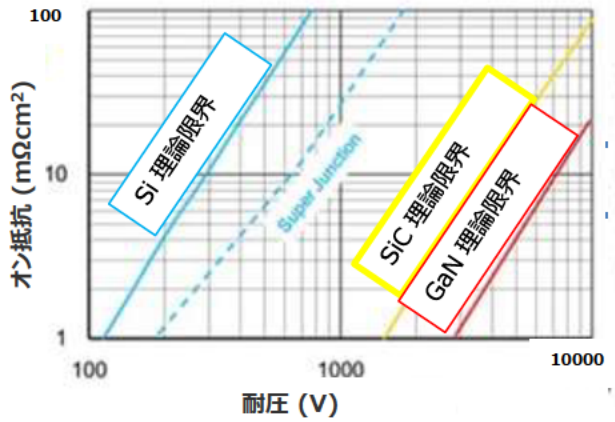
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（13）

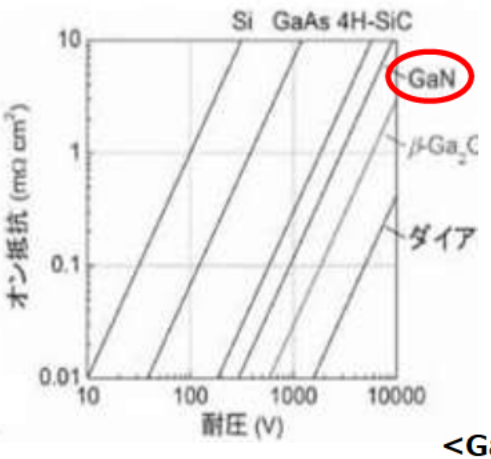
オン抵抗を小さくして高電流を流せる特性と、高耐圧(高い絶縁電圧)特性とは、下の図に示すように、相反する傾向となっている。また、スイッチング速度の大小も、オン抵抗・耐圧とも相反関係にある。こうした傾向の中で、GaNはいずれの特性の点からも優れていることが分かる。（図7-18-274）

【半導体基板の具体的応用：パワーデバイス】

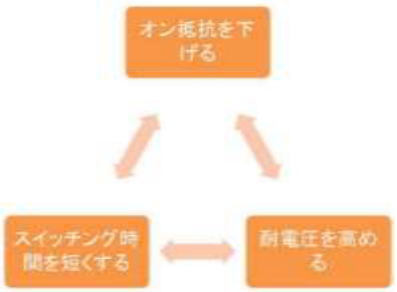
図7-18-27　パワーデバイスの特性

<オン抵抗と耐圧の関係>





高耐圧化・低オン抵抗化・高速動作



GaNは、オン抵抗・耐圧・スイッチング速度の点で優れた特性を示す。Siの10倍以上の耐圧があるため、薄型化・低抵抗化による導通損失の低減が可能。

<GaNパワーデバイスの優れた特性>

高耐圧(1.2kV級)・
低抵抗(1.8mΩcm2)・、
高周波動作(10MHz以上)

3.品目の主たる用途の調査分析（14）

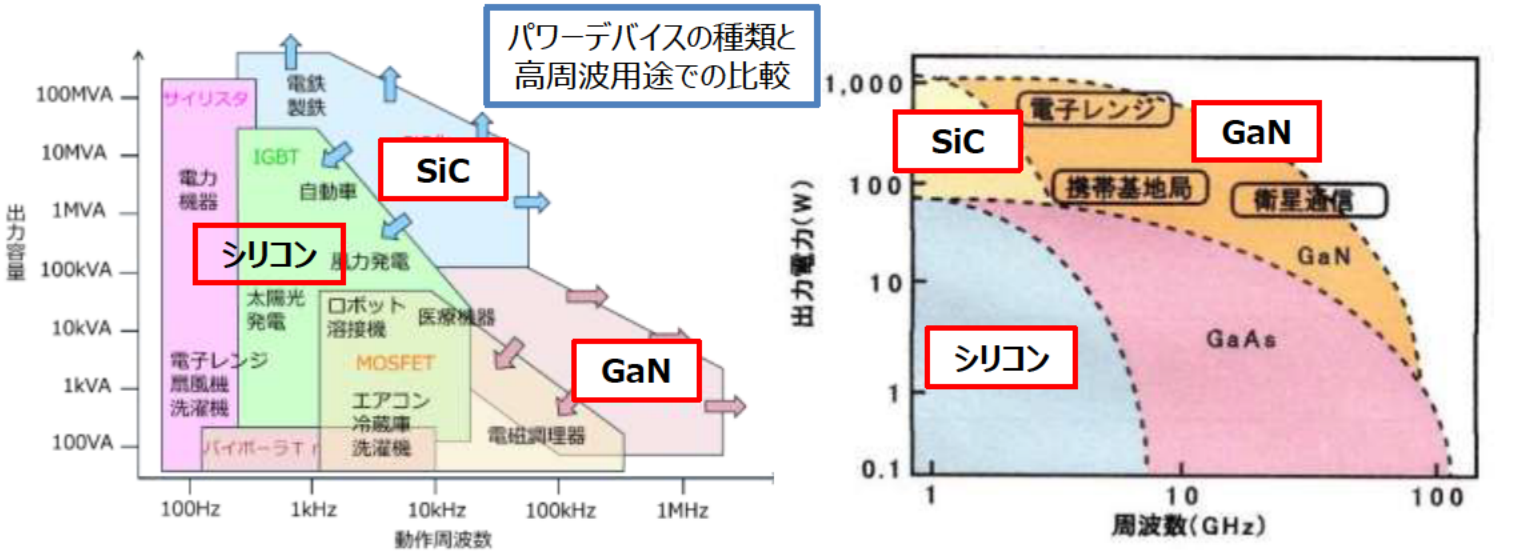
○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（14）

パワーデバイスの動作周波数別用途を図7-18-28に示す。どの周波数領域で、どれ位の電力量の制御ができるかという面から、適性なデバイス性能を比較する。二つの図で周波数と電力の領域が異なっているのに注意して、比較すると、比較的低電力・低周波の領域では、シリコン系半導体基板が適用できる。低周波数かつ高電力の場合には、SiC半導体基板に移り、高周波数・高電力の領域では、GaN半導体基板が最も適性と言える。このように、GaNを用いたパワーデバイスの用途拡大に従い、基板の含めた製造技術の最適化が必要となる。

【半導体基板の具体的応用：パワーデバイス】

図7-18-28　半導体基板の動作周波数別用途



用途①：低周波数・低電力 ⟹ シリコン

用途②：低周波数・高電力 ⟹ SiC

用途③：高周波数・高電力 ⟹ GaN

パワーデバイス分野でのGaNの需要が拡大している。

3.品目の主たる用途の調査分析（15）

○輸出令第7項（18）半導体基板

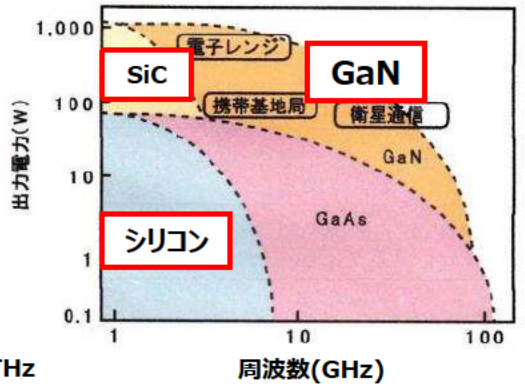
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（15）

パワーデバイスの動作周波数別用途を図7-18-29に示す。どの周波数領域で、どれ位の電力量の制御ができるかという面から、適性なデバイスの種類を決定する。例えば、1GHz近傍のL-Bandで用いられる通信用パワーデバイスは、用途に応じて必要とされる出力により、対応する種類が異なっている。一方、情報の大容量化・超高速通信のために更に高周波化する場合も、対応できるデバイスの種類が異なる。高周波・高出力が必要とされる一部の用途には、現在真空管が用いられているが、将来ダイアモンド・デバイスがその領域で使われるようになると考えられている。

【半導体基板の具体的応用：パワーデバイス】

通信用パワーデバイス

図7-18-29　半導体基板の動作周波数別用途



<各種通信用途と対応するデバイス>

L-Band帯：低出力用途(携帯端末)　Si　　中出力(携帯基地局)　SiC　　高出力(放送地上局)　GaN





10-100GHz帯及びそれ以降のTHz帯：主に衛星通信用・航空宇宙用、防衛機器向けレーダーに応用されている。更に大出力が必要な場合には真空管を用いているが、ダイアモンドデバイスが用いられるようになる。

<デバイス>

Si ⇒ SiC ⇒ GaN ⇒ ダイアモンド

3.品目の主たる用途の調査分析（16）

○輸出令第7項（18）半導体基板

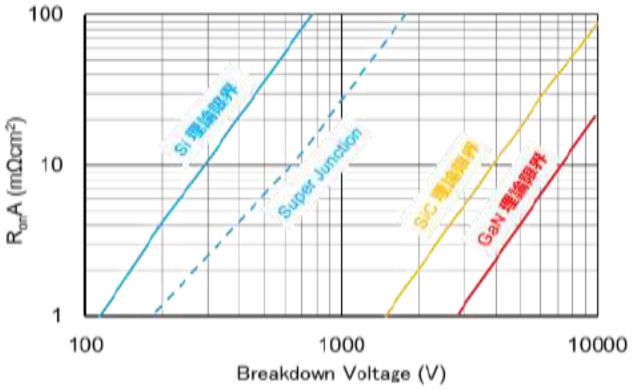
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（16）

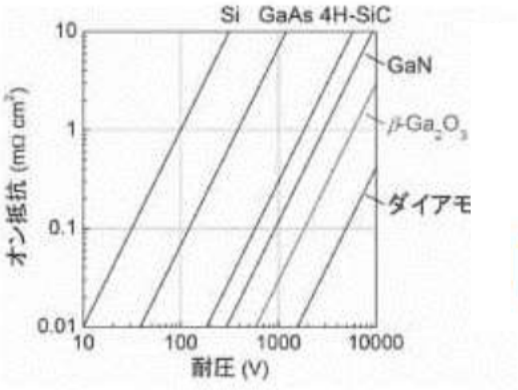
パワーデバイスでは、高電流を扱うために生じる発熱によって消費される電力を極力抑えたい。また、扱う高電圧範囲はできるだけ拡げたい。こうした要求を満たすための指標として、オン抵抗と耐圧が挙げられる。主な半導体材料のオン抵抗と耐圧の関係を図7-18-30に示す。半導体基板は、それぞれの基板の物理的・電気的・光学的物性を最大限に生かして、その上にデバイスを形成後、モジュールなどとして製品化される、

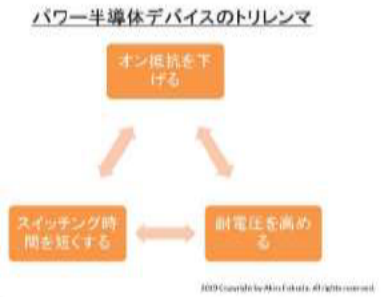
【半導体基板の具体的応用：パワーデバイス】 図7-18-30 主な半導体材料のオン抵抗と耐圧の関係

パワーデバイスの特性

パワーデバイスでは、発熱に関わるオン抵抗と絶縁破壊に関わる耐圧の両特性が特に重視される。







SiCとの比較では、熱伝導率がSiCの方が約3倍高く、それ以外の物性データ（バンドギャップ、電子移動度、絶縁破壊電圧、飽和ドリフト速度）は全てGaNの方が10%程度勝っている。
よって、高温動作環境では、SiCに分があるが、電力変換容量、動作周波数の高い領域での使用は、GaNの方が有利と言える。

3.品目の主たる用途の調査分析（17）

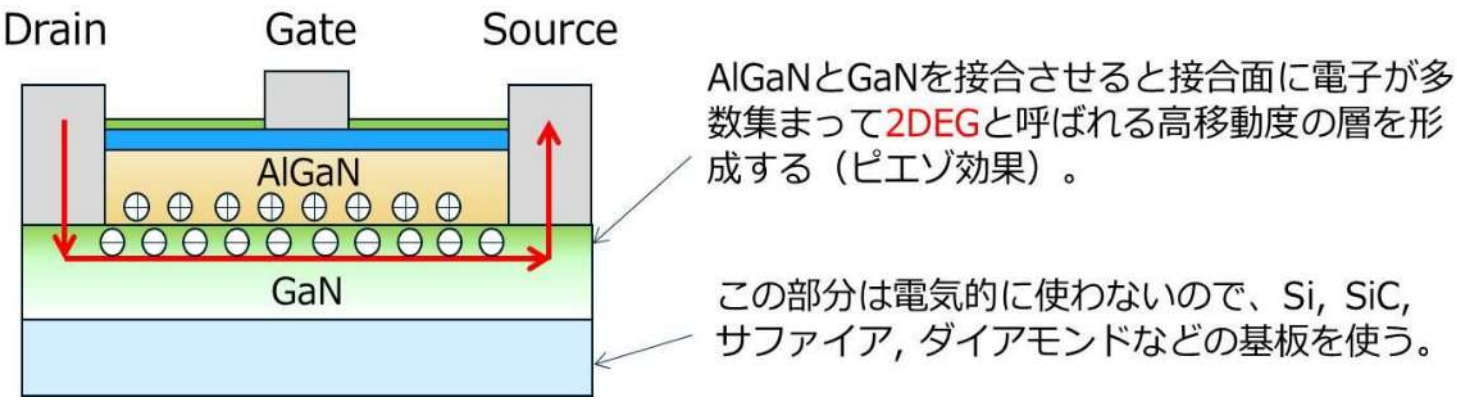
○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（17）

半導体基板の用途（スイッチングデバイス）を図7-18-31に示す。半導体基板は、それぞれの基板の物理的・電気的・光学的物性を最大限に生かして、その上にデバイスを形成後、モジュールなどとして製品化される、

【半導体基板の具体的応用：スイッチングデバイス】図7-18-31 半導体基板の用途（スイッチングデバイス）

<スイッチングデバイスの構造>



耐電圧を同じとすると絶縁破壊電圧の 3 乗に比例してオン抵抗が小さくなる。
GaN を使用することにより Si よりも 1000 倍オン抵抗を下げることができる。

3.品目の主たる用途の調査分析（18）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（18）

半導体基板は、それぞれの基板の物理的・電気的・光学的物性を最大限に生かして、その上にデバイスを形成後、モジュールなどとして製品化される。しかし、基板材料自身の特性は優れていても、その時点での基板供給の面や、デバイス製造プロセスの到達レベルの関係で、その基板を最終製品まで持ち込めない事がある。既存の基板を補完利用して、基板材料本来の特性を生かす技術が幾つか検討されている。（図7-18-32）

【半導体基板の活用】

図7-18-32　半導体基板の活用：両立化の検討

問題点

<ゲルマニウム>

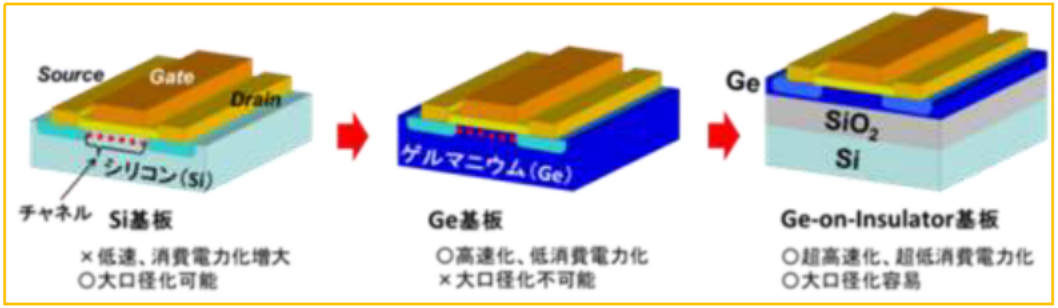
◎ 移動度 大
→ 低消費電力化が可能

× **大型基板が供給できない**

<シリコン>

△ 移動度 小

◎ 大型基板が供給可能



量産対応	4インチ	5インチ	6インチ	8インチ	12インチ

両立化技術の検討

3.品目の主たる用途の調査分析（19）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（19）

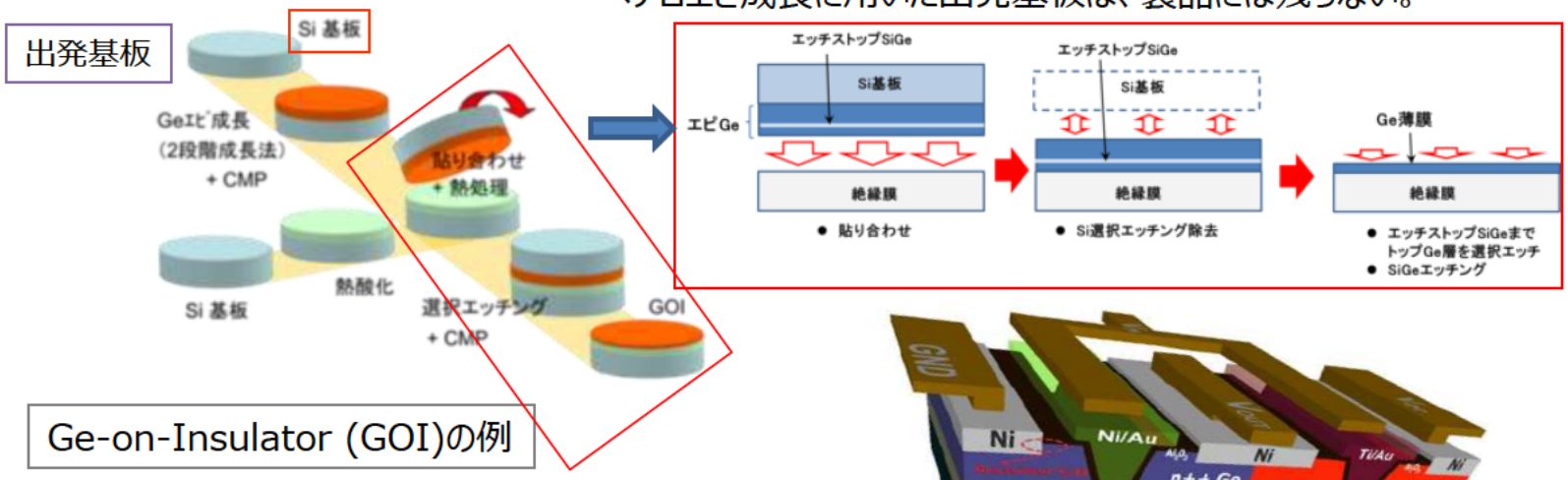
半導体基板の用途を図7-18-1に示す。半導体基板は、その基板の特徴を生かして、その上にデバイスを形成後、モジュールなどとして製品化される場合と、別の基板を用いて作成したデバイスを転用するためにだけ一時的に用いられる場合がある。ヘテロエピ成長に用いた出発基板は完全にエッチングされて最終的には製品の中には残らない。大型基板の提供ができていないGeやダイアモンドなどの半導体デバイスの製造に有効な方法である。（図7-18-33 ）

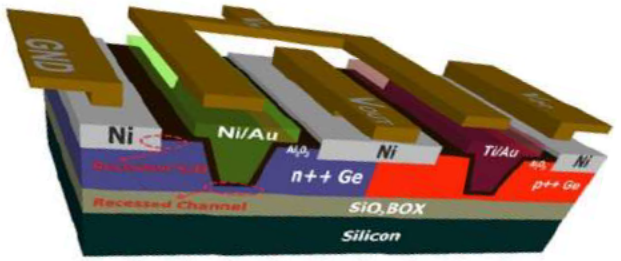
【半導体基板の活用】

図7-18-33 半導体基板の用途（デバイスに間接的に使用）

デバイスに間接的に使用 → シリコン基板を核にした工程を利用すれば、12インチの基板上にデバイスを一度に大量に製造できる。

ヘテロエピ成長に用いた出発基板は、製品には残らない。





Ge-CMOSトランジスター（Purdue大;2014）

3.品目の主たる用途の調査分析（20）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（20）

半導体基板は、その基板の特徴を生かして、その上にデバイスを形成後、モジュールなどとして製品化される場合と、別の基板を用いて作成したデバイスを転用するためにだけ一時的に用いられる場合がある。ヘテロエピ成長に用いた出発基板はデバイス形成のためのパターニングプロセスなどを経た後、最終基板に貼り合わせされて、デバイス部分を最終基板に転送する。転送し終えた基板はエッチング除去せずに、剥離層の位置で剥がして再び出発基板として再生利用する。（図7-18-34）

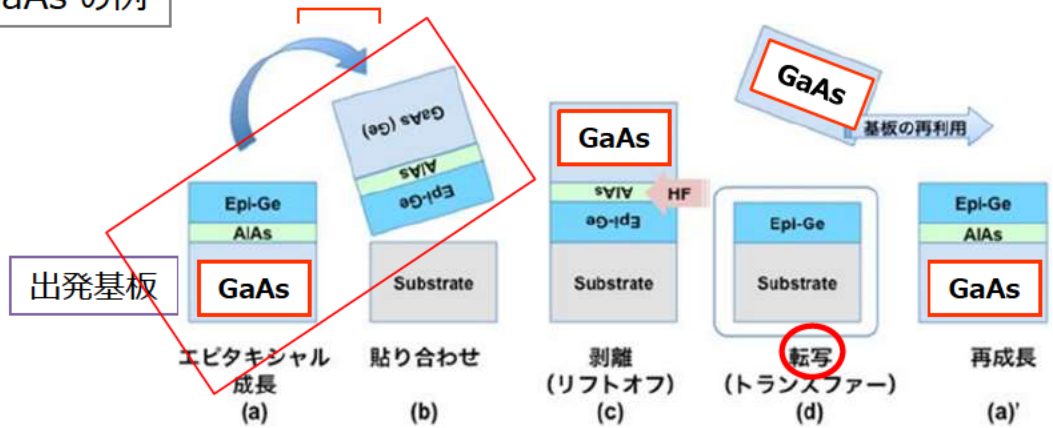
【半導体基板の活用】

図7-18-34　半導体基板の用途（ヘテロエピ成長基板再利用）

デバイスに間接的に使用

Ge-on-GaAs の例

ヘテロエピ成長に用いた出発基板は、再利用する。



3.品目の主たる用途の調査分析（21）

○輸出令第7項（18）半導体基板

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

用途の規制はない。

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（１）

シリコン半導体基板の特徴を図7-18-36に示す。シリコンは、地球上で酸素の次に多く存在する元素であって、高純度化し易く、また硬くて丈夫であるという多くの特長がある。超高純度に精製されたシリコン半導体基板は、各種メモリ、ロジックデバイスだけでなく、各種センサーデバイスに適用されて、データセンター、スーパーコンピューターから、PC、スマートフォンを始めとする各種民生機器、自動運転車の各種制御機器、医療機器、GPSなどの軍事用途等幅広く使用されている。急速にシリコン半導体の需要拡大が進んだ結果、シリコン基板の大きさ(直径をウェハサイズという)も、黎明期の2インチ弱から、3インチ→4インチ→5→6→8→12インチと進み、現在は12インチの大きさのシリコンウェハがデバイスの量産の主流となっている。製品的には450mmのサイズが供給できるようになっているが、まだ450mmのウェハは普及していない。

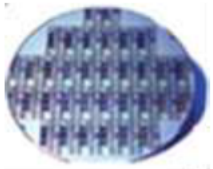
【半導体基板：シリコン基板】

図7-18-36　シリコン半導体基板の特徴

規制パラメータ　輸出令第7項(18)
イ シリコン



シリコン基板



最大450mmの直径の超高純度基板を入手可能

主流の
ウェハサイズ

ウエハーサイズ		2"	3"	4"	5"	6"	8"	12"
直　径　(mm)	JEITA	50±0.5	76±0.5	100±0.2	125±0.2	150±0.2	200±0.5	300±0.2
	SEMI	50.8±0.38	76.2±0.63	100±0.5	125±0.5	150±0.2	200±0.2	300±0.2
厚　み　(μm)	JEITA	280±10	380±15	525±15	625±15	625±15	725±25	775±25
	SEMI	279±25	381±25	520±20	625±20	675±20	725±20	775±20

4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（２）

シリコン以外の各半導体基板においても、本格的需要の立ち上がりに先行して基板サイズを大きくする必要がある。SiC（炭化シリコン）単結晶基板では、6～8インチの基板の供給が立ち上がりつつある。SiCのように硬い材料に関して、機械加工で生じる歪や転位が成長膜に影響を及ぼすので、欠陥フリーの基板製造技術が要求される。炭化シリコンの半導体基板の例を図7-18-37に示す。

【半導体基板：炭化シリコン基板】

規制パラメータ　輸出令第7項(18)
ハ　炭化シリコン

図7-18-37　炭化シリコンの半導体基板の例

SiC半導体 6インチ基板

住友電工(2020年、“CrystEra®”)



外観画像



X線トポグラフィ画像

基板をX線で撮影・観察したもので、転位の密集領域が無ければ一様 (灰色) に見える。

SiC半導体 8インチ基板

STMicroelectronics：2021年



機械加工歪み層や内在の転位が、成長膜に悪影響を及ぼす。

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令第7項（18）半導体基板

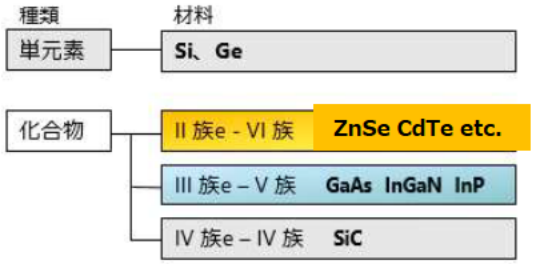
①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（３）

IoTや５G、或いはAIなどでの情報通信が広範囲に普及してくると、それに使われる電力量が膨大になり、省エネルギー化・省電力化が最近特に注目されている。このため、効率的な電力の送受信方法や利用方法を実現するために、パワー半導体が用いられる。トランジスタの基本的な各動作である整流作用・増幅・スイッチングを応用し、電圧、周波数を変えたり、直流を交流、交流を直流に変えるなどの電力変換は、民生用だけでなく、車両用、送配電部門などでの利用が拡大している。おおむね定格電流が1A以上のものをパワー半導体と分類している。これらに規制の対象となっているシリコン・ゲルマニウム・炭化ケイ素・Ⅲ－Ⅴ族化合物が使用されている。（図7-18-38）

【半導体基板】

図7-18-38　各種半導体基板の特徴

規制パラメータ　輸出令第7項(18)
イ～ニ　シリコン・ゲルマニウム・炭化ケイ素・Ⅲ－Ⅴ族化合物



II 族	III 族	IV 族	V 族	VI 族
Be ﾍﾞﾘﾘｳﾑ	B ﾎｳ素	C 炭素	N 窒素	O 酸素
Mg ﾏｸﾞﾈｼｳﾑ	Al ｱﾙﾐﾆｳﾑ	Si ｼﾘｺﾝ	P ﾘﾝ	S 硫黄
Zn 亜鉛	Ga ｶﾞﾘｳﾑ	Ge ｹﾞﾙﾏﾆｳﾑ	As 砒素	Se ｾﾚﾝ
Cd ｶﾄﾞﾐｳﾑ	In ｲﾝｼﾞｳﾑ	Sn ｽｽﾞ	Sb ｱﾝﾁﾓﾝ	Te ﾃﾙﾙ
Hg 水銀	Tl ﾀﾘｳﾑ	Pb 鉛	Bi ﾋﾞｽﾏｽ	Po ﾎﾟﾛﾆｳﾑ

<単元素から成る半導体基板>

シリコン・ゲルマニウム

<化合物から成る半導体基板>

炭化ケイ素・Ⅲ－Ⅴ族化合物

パワー半導体：高電圧・大電流で動作

4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（４）

ゲルマニウムは、シリコンと比べてキャリアの移動度が大きいことを活かして、デバイスの高速動作が可能であり、また光学的特性を活かして、テラヘルツ波伝送や、発光素子・太陽電池への応用が期待できる。一方、ゲルマニウム基板上にⅢ－Ⅴ族化合物のヘテロエピタキシャル膜を成長させてデバイスを作製したという報告事例は、現時点ではない。（図7-18-39）

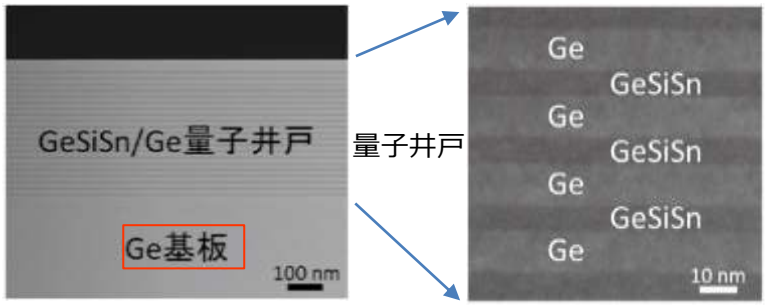
【半導体基板：ゲルマニウム基板】

規制パラメータ　輸出令第7項(18)
ロ　ゲルマニウム

図7-18-39　ゲルマニウム基板の使用例

GeSn系材料：高いキャリヤ移動度・エネルギーギャップ制御性

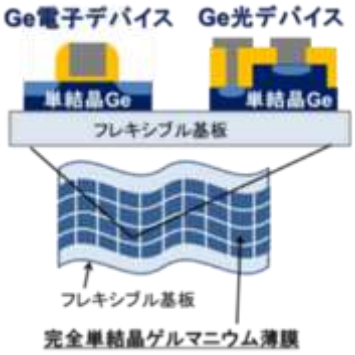
①ゲルマニウム基板を用いた共鳴トンネルダイオード・デバイス



THz波帯のデバイスに応用

②フレキシブル基板を用いたゲルマニウム電子・光学混載デバイス





https://www.uec.ac.jp/research/information/opal-ring/0007361.html

4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（５）

1990年代になって長年の夢であった青色LEDが実用化された。このLEDは、単結晶基板上に、発光層であるInGaN井戸層をヘテロエピタキシャル成長して作られる。当初は基板の入手し易さから、サファイア基板が多く用いられたが、格子定数の異なるサファイア基板上にⅢ－Ⅴ族化合物を成長させるために、成長する膜内に高密度の結晶欠陥(貫通転位)が発生してしまっていた。低転位密度のGaN基板が入手できるようになり、最近は青色LEDの製造ではGaN基板が主流になっている。（図7-18-40）

【半導体基板：Ⅲ－Ⅴ族化合物基板】

規制パラメータ　輸出令第7項(18)
二　Ⅲ－Ⅴ族化合物

図7-18-40　Ⅲ－Ⅴ族化合物基板の使用例１

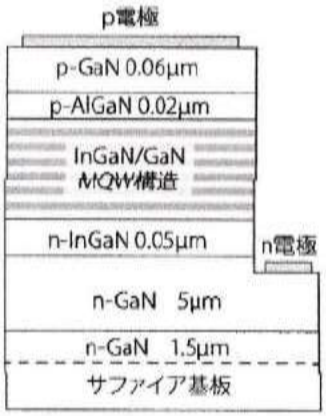
青色LED

青色LED：発光波長(最大) 400～420nm

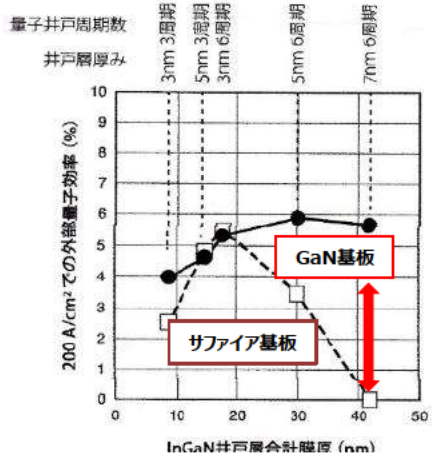
青色LEDの発明：1990年代。中村・天野・赤崎氏

GaN青色LED　白色LED

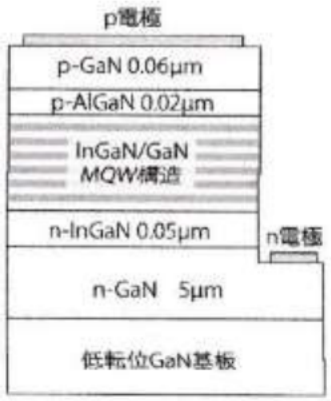




サファイア基板上LED



外部光取出し効率が基板の種類で大いに異なる。



低転位GaN基板上LED

4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（６）

深紫外波長帯で発光する半導体発光ダイオード（LED）は、ウィルスの殺菌や飲料水・空気の浄化、光加工、樹脂硬化、環境汚染物質の分解、食品流通分野、種々の医療機器などで従来使われてきた水銀ランプなどのガス光源は、寿命が短く、消費電力も極めて大きく、さらに水銀などの人体・環境に有害な物質を代替技術実現への要望が高まっている。従来の発光層であるInGaNにバンドギャップの小さいAlNを加えて、遠紫外発光のLEDが製造されている。この場合にも、発光層の結晶性は下地基板に大いに影響される。低欠陥密度の発光層が得られるAlN基板では光の外部取出し効率が劣るという問題があり、欠陥と取出し効率を両立させるために様々な工夫が成されている。（図7-18-41）

【半導体基板：Ⅲ－Ⅴ族化合物基板】

規制パラメータ　輸出令第7項(18)
二　Ⅲ－Ⅴ族化合物

図7-18-41　Ⅲ－Ⅴ族化合物基板の使用例２

遠紫外LED

用途：殺菌・消毒・環境用その他での利用拡大

発光領域：　210～350nm

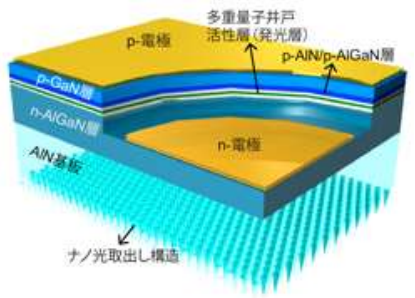
発光層→ AlNを加えたた四元混晶AlInGaN系



＜エピ膜中の欠陥密度低減＞　＜光取出し効率の改善＞

AlN基板の適用

基板の種類・構造により、欠陥密度・外部光取出し効率が異なる。



ハイブリッド光取出し構造
(AlN基板表面に2次元フォトニック結晶とサブ波長ナノ構造とを組み合わせ)

90W/cm^2（発光波長265nm、室温・連続動作）を実現

4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令第7項（18）半導体基板

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（７）

Ⅲ－Ⅴ族化合物基板及びその上にエピ成長された化合物半導体薄膜は、その光学的特性を生かして、半導体レーザーの主要構成要素となり、各種波長の光を放出する。特定波長範囲の光は、CD・DVDなどの各種媒体の書込み・読取り、或いは材料の切断加工、プリンターでの感光、治療、各種照明、センシングデバイスなどに用いられる。（図7-18-42）

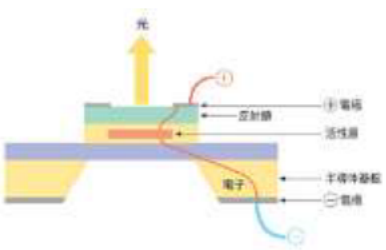
【半導体基板：Ⅲ－Ⅴ族化合物基板】

規制パラメータ　輸出令第7項(18)
二　Ⅲ－Ⅴ族化合物

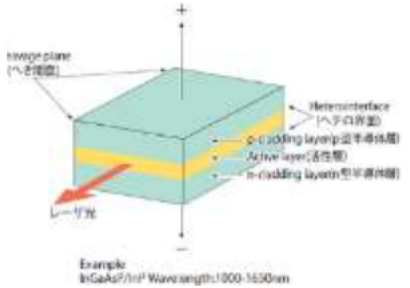
半導体レーザー

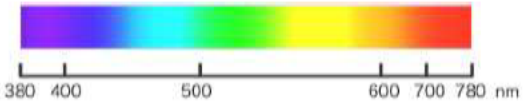
図7-18-42　Ⅲ－Ⅴ族化合物基板の使用例３

半導体基板	半導体材料	区分	波長帯（nm）
GaN	InGaN	紫外～緑色	380～540
GaAs	AlGaInP	赤色	620～700
	InGaAsP	赤～近赤外	650～750
	AlGaAs	近赤外	760～860
InP	InGaAsP	赤外	1,300～1,550



面発光型半導体レーザの基本的な構造





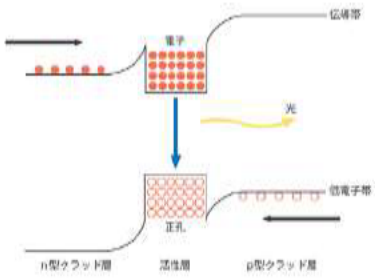
記録・読込み・感光・測定など

照明など

感知・通信・医療・加工・測定など
800
980

長距離光通信
1,300
1,600





ダブルヘテロ構造の模式

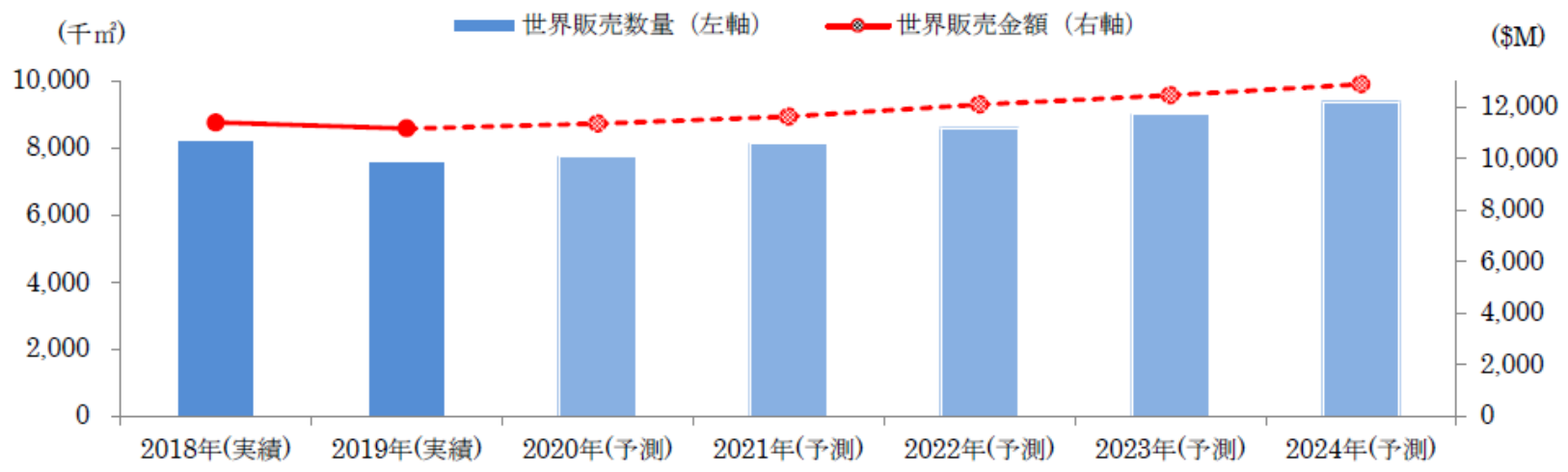
4.品目の技術動向調査（8）

○輸出令第7項（18）半導体基板

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（１）

シリコンウエハの世界販売数量と世界販売金額を図7-18-43に示す。半導体需要の継続的な増加によりシリコンウエハ市場も拡大すると予想されている。長期的にも5G の普及やIoT 投資に伴う需要により市場拡大が続くとみられる。

図7-18-43　シリコンウエハの世界販売数量と世界販売金額（富士経済）



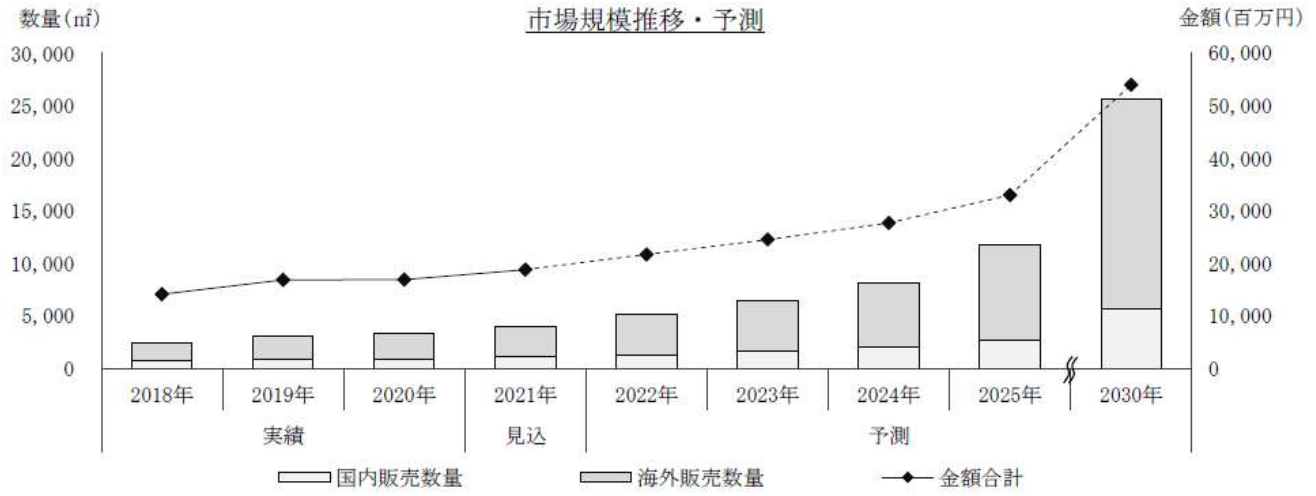
4.品目の技術動向調査（9）

○輸出令第7項（18）半導体基板

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（２）

SiCウエハの世界販売数量と世界販売金額を図7-18-44に示す。SiCウエハ市場はSiC パワーデバイス市場に比例する形で推移しており、2019年までは堅調な推移が続いていた。2020 年は新型コロナウイルスの影響によって、パワーデバイスメーカーが予定していた開発案件を延期するなどの動きによって、市場は当初見込んでいたほどの伸びには至らなかった。金額ベースでは、円高の影響もあり、ほぼ横ばいでの推移にとどまった。2021年は、2020年から延期となった案件や中国を中心とした需要増加によって、数量ベースで120%程度の伸びが予測される。また、EV の駆動用インバータモジュールへの採用が2022 年頃に予定されていることから、今後も拡大基調での推移が続くと期待される。

図7-18-44　SiCウエハの世界販売数量と世界販売金額（富士経済）



4.品目の技術動向調査（10）

○輸出令第7項（18）半導体基板

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（３）

GaNウエハの世界販売数量と世界販売金額を図7-18-45に示す。パワーデバイス向けのGaN 単結晶ウェーハを対象としている。なお、GaN on Si で展開されているGaN パワーデバイスは対象外としている。GaNウエハは限られた研究機関向けに2 インチウェーハが外販されているため、僅少値となっている。現在は、4 インチサイズで超低欠陥密度のウェーハ生成に成功している。縦型GaN パワーデバイスの実用化には6インチ以上のウェーハが必要とされているため、この開発成果を6 インチサイズにも応用し、欠陥密度が極めて低いウェーハ生成の開発を進めている。6 インチウェーハの量産は2023 年頃を目標として進められており、2025 年頃から自動車・電装分野向けに採用が進むとみられる。

図7-18-45　GaNウエハの世界販売数量と世界販売金額（富士経済）



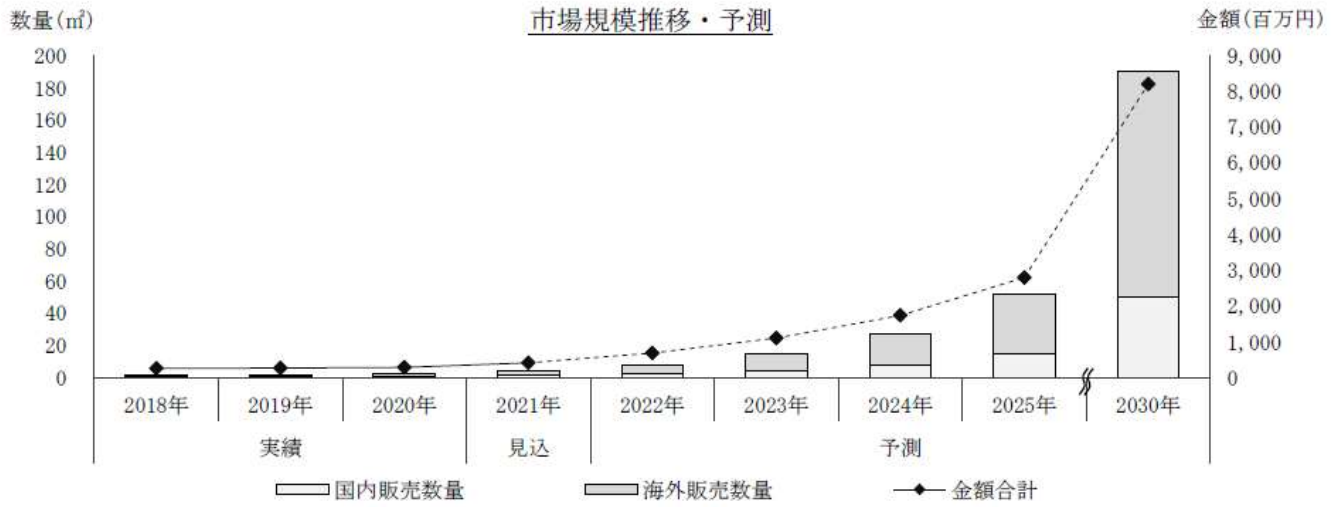
4.品目の技術動向調査（11）

○輸出令第7項（18）半導体基板

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（４）

酸化ガリウムウエハの世界販売数量と世界販売金額を図7-18-46に示す。酸化ガリウムウェーハは、気相成長によりエピタキシャル結晶を作成するα型（コランダム構造）、および溶液成長によりバルク結晶を作成するβ型（ベータガリア構造）に分類される。図7-18-27ではバルクウェーハであるβ型を対象としており、サファイアを下地基板として、その上に酸化ガリウム半導体層を形成するα型は対象外としている。市場は、2016年から市場が立ち上がっており、ノベルクリスタルテクノロジー（日本）が2インチおよび4インチウエハ、KymaTechnologies（米国）が1インチウェーハを販売している。研究開発用途も含めて、海外を中心に市場は拡大しており、2023年には10億円を超える規模に拡大する見通しである。北米、欧州、中国で積極的な開発が進められていることから、今後も海外を中心に市場は拡大するとみられる。β型ウェーハを使用したパワーデバイスについては、2022 年にダイオード、2023年にトランジスタの展開が予定されているが、トランジスタの普及・量産化に向けてウェーハの大口径化が必要となることから、2023年頃から6インチウェーハの実績が出てくると予測される。

図7-18-46　酸化ガリウムウエハの世界販売数量と世界販売金額（富士経済）



4.品目の技術動向調査（12）

○輸出令第7項（18）半導体基板

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（５）

シリコンウエハの企業シェア（金額）を図7-18-47に示す。

信越半導体（日本）はユーザーとの長期契約価格による供給を行っている比率が他の競合他社よりも高く、長期的に安定した売上を確保する体制としている。親会社の信越化学工業ではフォトレジスト、半導体容器を取り扱っており、半導体分野の各サプライチェーンにおいて強い影響力を保持している。

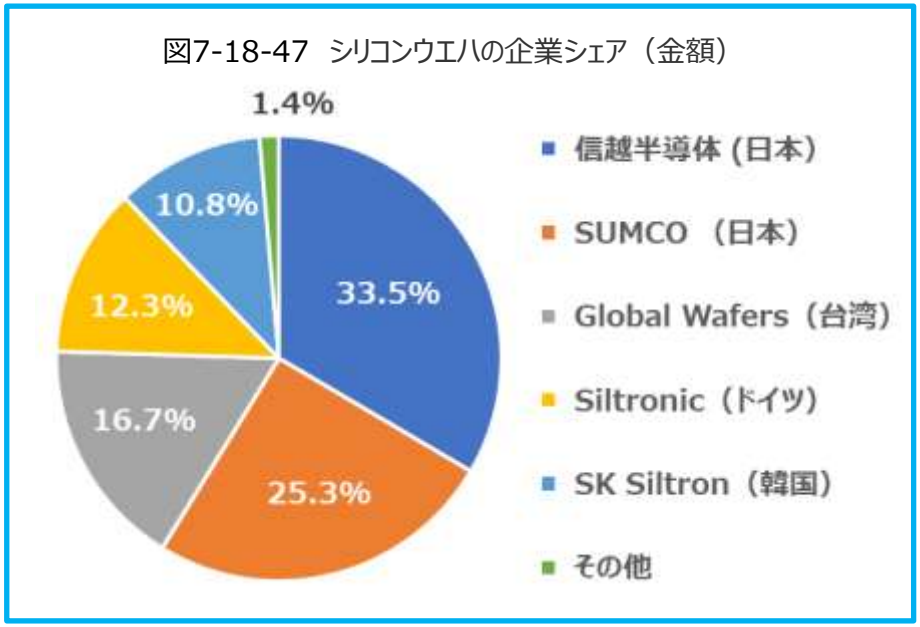
SUMCO（日本）は信越半導体と同様に主要半導体メーカーを顧客としており、先端ロジック向けの注力度が高い。スポット価格による供給比率が信越半導体よりもやや高い水準にあることから、2019 年は金額ベースでのシェアが低下した。台湾での合弁FSTでは主にスポット価格での供給を行っている。

Global Wafers （台湾）はTopsil Semiconductor Materials（デンマーク） およびSunEdison Semiconducto（米国）の買収により、シリコンウエハ市場で3番手にまでシェアを高めている。200mmウエハの生産能力では日本企業2社に迫っているほか、300mmウエハでも生産能力拡大に向けて大規模投資を続けている。GlobalFoundries（米国）とは300mmSOI ウエハの長期供給契約を締結する目的でMOUを取り決めている。

Siltronic（ドイツ）はWacker Chemie （ドイツ）が大株主であり、欧州ではInfineon Technologies（ドイツ）との結びつきが強い。アジア地域ではシンガポールにおいてSamsung Electronics（韓国） とJV で生産コストを抑制した300mm ウエハを生産している。
2019 年はメモリ分野で一部顧客内での在庫調整が続いたことにより、販売数量、販売金額ともに減少した。

SK Siltron(韓国)はSK グループであり、ウエハの生産を300mmに集約した。これにより、300mmウエハの生産能力は信越半導体、SUMCOに次ぐ3番手となっている。Samsung Electronics とSK hynix が主要顧客であるが、Intel、2020 年Q1 にはDuPont（米国）のSiC ウエハ事業の買収を完了し、パワー半導体でも存在感を強めている。

図7-18-47 シリコンウエハの企業シェア（金額）



4.品目の技術動向調査（13）

○輸出令第7項（18）半導体基板

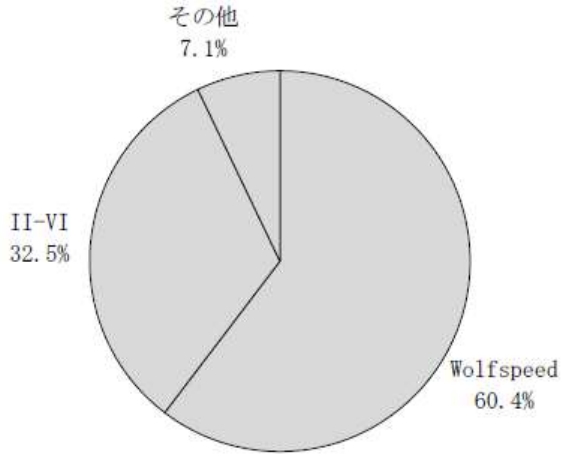
②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（６）

SiCウエハの企業シェア（金額）を図7-18-48に示す。

Wolfspeed（米国）は、2021年10月にCreeから社名変更した。Wolfspeed は、6 インチウェーハを中心に展開しておりInfineonTechnologies、STMicroelectronics、ON Semiconductorなどの欧米系パワーデバイスメーカーとSiC ウェーハの長期供給契約を締結していることから、同社の実績拡大に寄与している。今後、自動車・電装分野向けでSiC パワーデバイスの需要増加が見込まれることから、実績はさらに拡大すると予測される。また、以前から行っていた増産投資が完了する予定であり、生産能力の拡大によって、これらの需要増加に対応していく。ニューヨーク州の投資は8 インチウェーハが対象であり、2022 年から同社のデバイス向けに生産開始を予定している。

II-VI（米国）は、パワーデバイス向けで6インチウェーハを展開しているが、2020 年は新型コロナウイルスの影響で前半に動きがみられなかったことや、計画していた案件の遅延によって、実績は横ばいでの推移となった。しかし、欧州、北米、中国で需要が増加傾向にあることから、2021年は実績が拡大した。今後のさらなる需要増加に向けて、設備投資を進めており、結晶成長、研磨、検査工程で能力増強を図っていく予定である。また、8インチ化に対する要望も出てきており、技術的には対応可能であるため、実用化に向けた展開を進めている。

図7-18-48　SiCウエハの企業シェア（金額）



SiC エピウェーハ市場では、**昭和電工（日本）**の実績が最も大きく、基底面転移を0.1 個/c ㎡以下に抑えた「ハイグレードエピ」を展開しており、主要パワーデバイスメーカーを中心に採用実績がみられる。また、さらに表面欠陥密度を低減した第2 世代製品を開発している。2020 年12 月にデンソー製の燃料電池自動車向け次期型昇圧用パワーモジュールへの採用を発表しており、今後の実績拡大に影響を及ぼすとみられる。

住友電気工業（日本）は、2018 年から「Epiera」を展開しており、パワーデバイスメーカーへの評価を継続して行っている。

4.品目の技術動向調査（14）

○輸出令第7項（18）半導体基板

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（7）

GaN 単結晶ウェーハメーカー・研究機関の動向を以下に説明する。

住友電気工業（日本）は、LED やLD の光デバイス向けの実績が多く、研究開発用途では採用実績がある。薄膜GaN ウェーハの量産に向けて、スマートカット技術を適用し、生産ラインの増設を図っている。

三菱ケミカル（日本）は、電子デバイス用のウェーハのほか、高輝度白色LED などの発光デバイス用ウェーハも開発を進めている。同社は、独自の液相成長法によって、超低欠陥密度の4インチウェーハの生成に成功している。また、2020年度内にこの成長方法を用いた大型の量産設備を国内に新設し、事業化を狙った実証実験を進めていくとみられる。今後は、4インチウェーハでの開発成果をもとに６インチウェーハの開発を進めていき、2025年頃に自動車・電装分野への展開を目標に、2023年度で6インチウェーハの量産販売ができるよう目指している。

サイオクス（日本）は、パワーデバイス向けに2インチの単結晶ウェーハの開発を進めている。厚いドリフト層内の浅いドーピングレベルを制御して、低オン抵抗化を図ることができるという。

物質・材料研究機構(NIMS)と東京工業大学は、転位欠陥が極めて少ない高品質結晶を得るための新たな育成方法を開発した。同研究グループは、特定の添加物を含んだガリウムとナトリウムの合金液体を、下地の基板上に塗布しながらGaN 結晶を育成させたことにより、従来に比べ転位密度を100 分の1 に削減した高品質なGaN 結晶を成長させることに成功した。この開発成果をもとに、転位欠陥の少ない大型結晶の作製を目指していく。

GaN on Si のエピ膜成長技術を得意とするエピベンダは、日本国内では、**エア・ウォーター（日本）**などが参入している。また、アジア圏では、**Suzhou Nanowin Science and Technology（中国）**、**EPISTAR（台湾）**、**Episil-Precision（台湾）**などが、欧米では、**Wolfspeed（米国）**、**IQE（英国）**、**EpiGaN（仏国）**、**TopGaN（ポーランド）** などのメーカーが参入している。**Gan Power Technology（台湾）**は、**NTT アドバンステクノロジ（日本）**のエピ膜成長技術を採用している。

4.品目の技術動向調査（15）

○輸出令第7項（18）半導体基板

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（8）

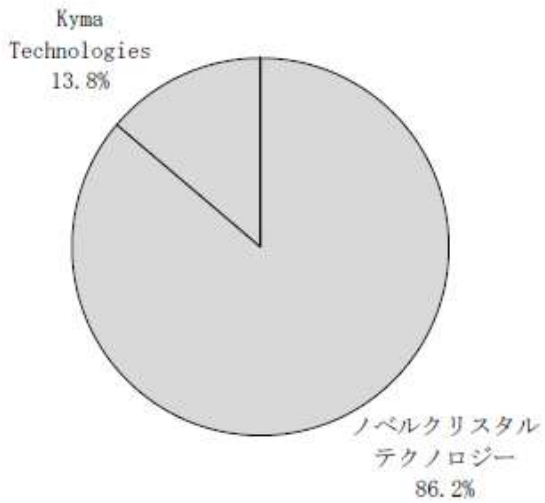
酸化ガリウムウエハの企業シェア（金額）を図7-18-49に示す。

ノベルクリスタルテクノロジー（日本）は当該市場をけん引しており、市場全体の85%以上の実績を有している。現在は2インチウエハが中心であるが、4インチウェーハも展開しており、今後の実績拡大につなげていく。海外を中心にデバイス開発に取り組む企業が増加しているほか、中国向けの実績が拡大しており、海外市場を中心に実績が拡大していくとみられる。同社は、ビジネス構築のため、安川電機、新電元工業、トレックス・セミコンダクターなどから資金調達を実施しており、デバイス開発および実用化に向けた取り組みを加速させていく予定である。

KymaTechnologies（米国）は、SYNOPTICS（米国）が生産した1インチウェーハの販売を行っており、軍需向けを中心に採用がみられる。今後、2インチウェーハの実用化を図ることで、実績拡大を目指している。

その他では、**中国の山東大学、同済大学、天津大学**などが研究開発を進めている。また、欧州では**ドイツの研究機関であるIKZ**で開発が進められている。

図7-18-49　酸化ガリウムウエハの企業シェア（金額）



目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（19）
レジスト

令和 4年3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令第7項（19）レジスト

【レジストの役割】

レジストは、提供時の形態から、

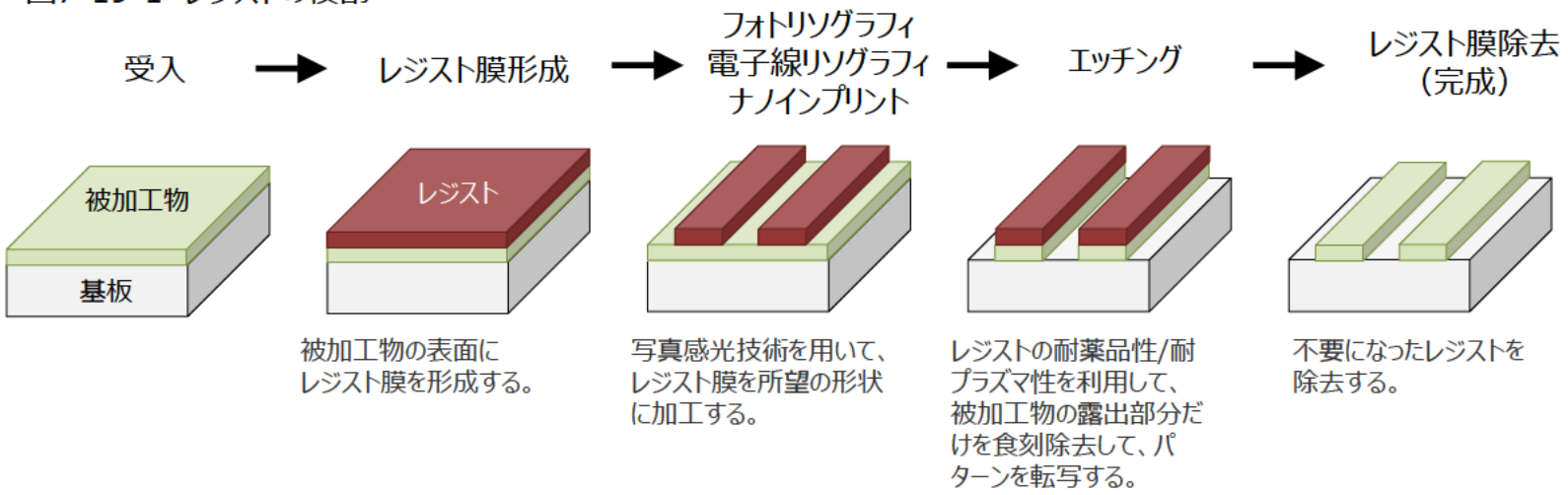
①ラミネートされたフイルム形状で提供される**ドライフィルムレジスト**と、

②粘性液体として提供される**粘性液状型レジスト**

に大別される。

しかし、どちらも被加工物の表面を所望の形状で部分的に被覆する膜となり、薬品及び／又はプラズマに対して耐性を有することからパターン転写に利用されるという点で共通する。レジスト膜を所望の形状に加工するために、**フォトリソグラフィ技術**、**電子線リソグラフィ技術**、**インプリント技術**が用いられる。パターン転写に利用された後は不要になったレジストを対象物から除去することが多いが、例外的にフラットパネルディスプレイのカラーレジストのように基板上に残し機能材料として用いる場合もある。

図7-19-1 レジストの役割



1.対象品目の概要調査（2）

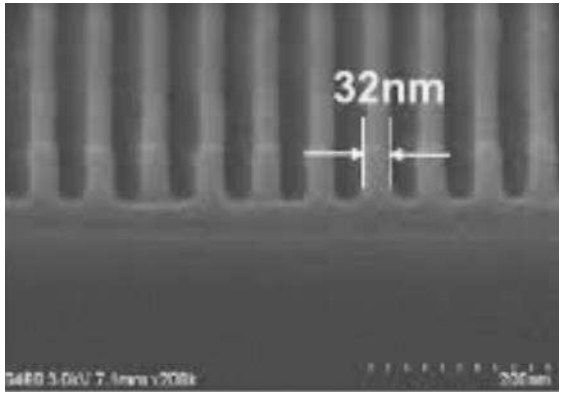
○輸出令第7項（19）レジスト

【レジストの種類と用途】

レジストには、①材料加工用レジストと、②フラットディスプレイやイメージングセンサーの表面に塗布され、RGBフイルター及びブラックマトリックスとして利用される表面イメージング用レジストと、③電子部品を実装するプリント基板において配線を絶縁被覆するために表面塗布されるソルダーレジストがある。③は輸出令第７項(19)に該当しないため、以降では説明しない。

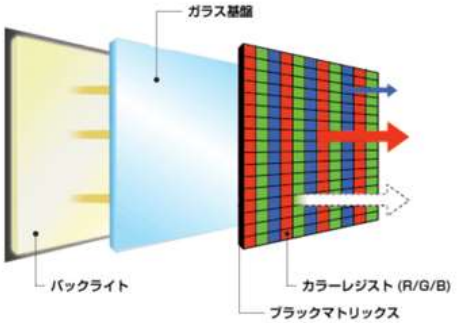
図7-19-2　レジストの種類と用途

①材料加工用レジスト
半導体デバイスの製造等において、微細加工に利用される樹脂膜



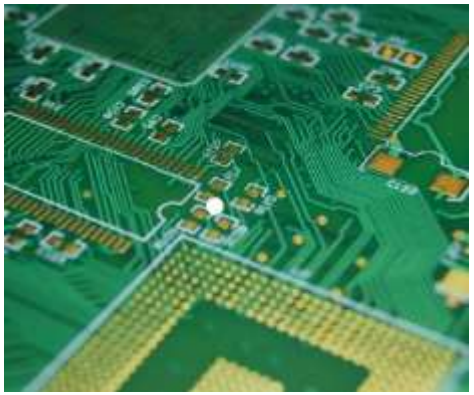
輸出令第７項(19)十九の(イ)、(ロ)、(ホ)

②表面イメージング用レジスト
フラットディスプレイなどで、フイルター及びブラックマトリックスとして用いられる樹脂膜



輸出令第７項(19)十九の(ニ)

③ソルダーレジスト
配線を絶縁被覆するために塗布される緑色の樹脂膜



輸出令第７項(19)に該当しない

https://semicon.jeita.or.jp/STRJ/STRJ/2004/4A_STRJ_WS050304_WG5Litho_HANYU2.pdf

1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令第7項（19）レジスト、 貨物等省令第6条十九号イ

【フォトリソグラフィとは】

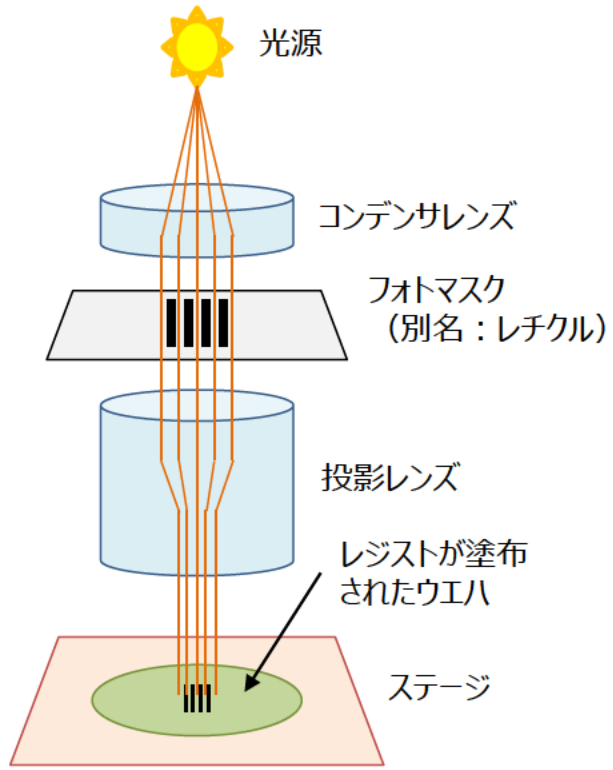
フォトレジストには、**ポジ型レジスト**と、**ネガ型レジスト**がある。レジストに光を照射する（露光する）と、光が当たった箇所でレジストが現像液に溶解するように化学変化するタイプのものをポジ型レジストと呼び、逆に現像液に溶解しないように化学変化するタイプのものをネガ型レジストと呼ぶ。

ウエハに塗布されたレジスト上に、所望の微細パターンを結像させる装置を**縮小投影露光装置**と言う。縮小投影露光装置の光学系は、光源、コンデンサレンズ、フォトマスク、投影レンズ、ステージからなる。フォトマスクは、ガラス基板の上に遮光パターンを形成したリソグラフィにおける原版であり、マスク上のパターンがウエハ上に縮小投影され、レジストが感光して、パターンが転写される。

この段階では、まだパターンは顕在化していない（潜像）が、露光に続く現像工程においてレジスト膜から不要な部分が溶解除去され、立体的なパターンが形成される。

この立体的なパターンは、続くエッチング工程で、被加工物の表面の一部を保護する膜（加工マスク）として機能する。

図7-19-3 縮小投影露光装置



1.対象品目の概要調査（4）

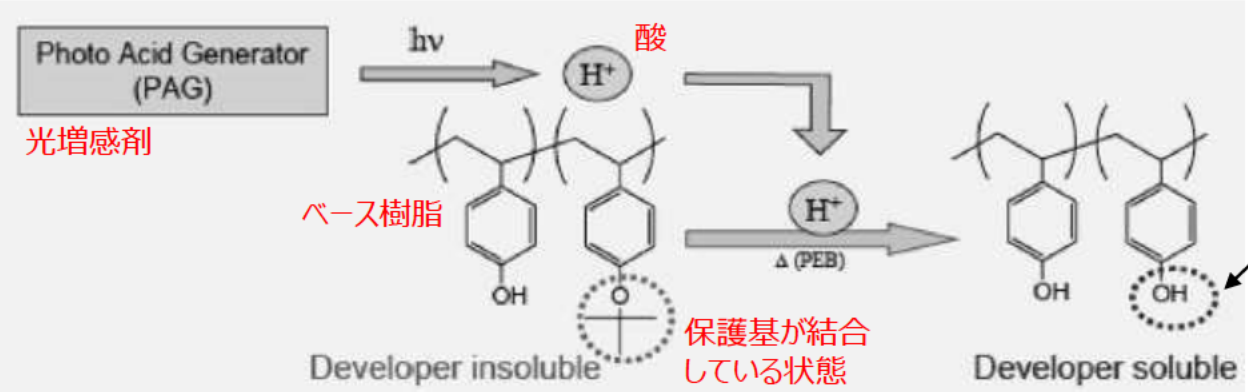
○輸出令第7項（19）レジスト、 貨物等省令第6条十九号イ

【化学増幅型レジストの感光メカニズム】

フォトレジストには様々なタイプがあり、一括りには説明できないが、KrF、ArF、EUVリソグラフィで採用されているポジ型レジストは、波長に合わせて最適化されているものの、感光メカニズムの点では共通しており、**化学増幅型レジスト**という範疇に属する。ここでは、ArF用のレジストについて説明するが、EUV用でも基本的には同じと考えてよい。

化学増幅型レジストは、ベース樹脂（base polymer）、光増感剤（photo-senstizer）、溶媒からなる。ベース樹脂の炭素鎖には、アルカリ現像液への溶解を防ぐ保護基が備わっているので、この保護基がある限りベース樹脂は現像液には溶けない。一方、光増感剤は、光が照射されると分解して酸を放出する。このメカニズムを有する光増感剤を特に、光酸発生剤（PAC：photo acid generator）と呼ぶ。液状のレジストをウエハに塗布してベークすると溶媒が揮発し、ベース樹脂と光増感剤が残りレジスト膜となる。ここに光を照射すると、光増感剤が分解し、放出された酸はレジスト膜中を拡散してベース樹脂まで到達すると、酸の触媒作用によってベース樹脂の保護基を切断する。保護基を失ったベース樹脂は、アルカリ現像液に溶解する。一方、光が当たっていないところでは、酸が放出されないので、保護基のついたベース樹脂は温存される。したっがて、現像液には溶けない。なお、保護基の選び方によって、ネガ型レジストも作れる。化学増幅型レジストでは、酸の触媒作用を利用するので、光増感剤の添加が微量でも、保護基の切断に大きな効果があり、光量にたいする感度が高い、という特長がある。

図7-19-4　化学増幅型レジストの感光メカニズム



出典：https://www.jstage.jst.go.jp/article/gomu/85/2/85_33/_pdf

1.対象品目の概要調査（5）

○輸出令第7項（19）レジスト、 貨物等省令第6条十九号イ

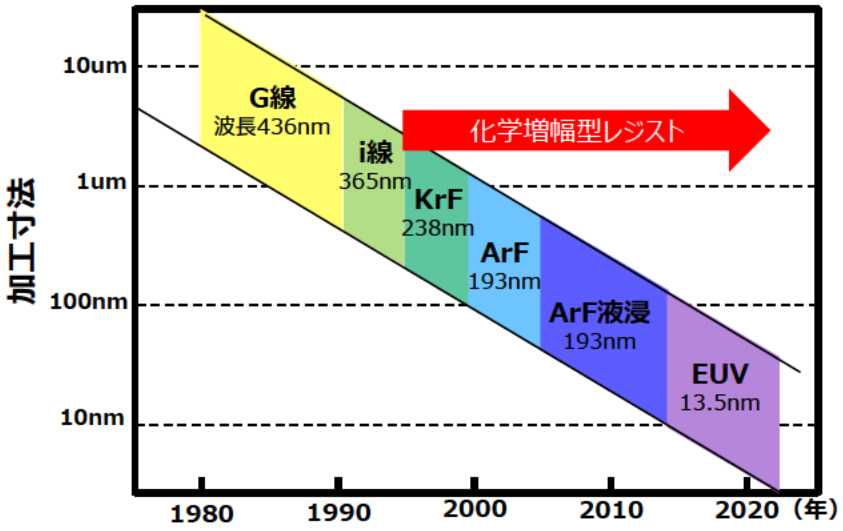
【フォトリソグラフィにおける光の短波長化】

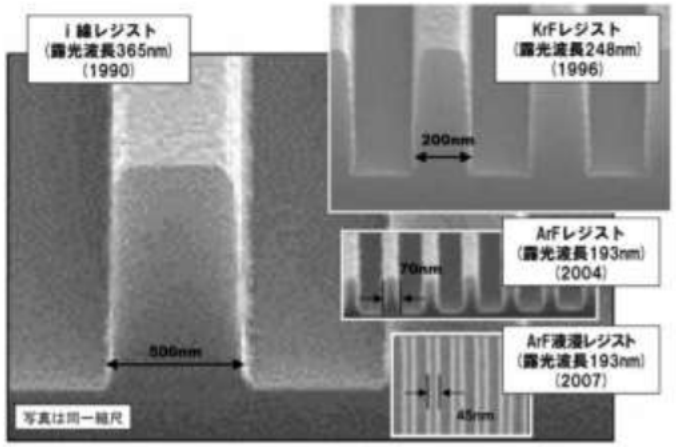
フォトリソグラフィの解像度は、レンズの大きさに反比例し光の波長に比例することからRayleighの式で表すことができる。

$$解像度 = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

ここで、λは光の波長、*NA*はレンズの大きさを表す開口数、k_1はレジスト材料のコントラストなどリソグラフィのプロセス性能を意味する定数である。縮小投影露光装置の光源の波長は、水銀ランプから発光するｇ線（λ=436nm）→ｉ線（λ=365nm）、→ エキシマレーザーで発光するKrF（λ=248nm）→ ArF（λ=193nm）、→ EUV（ λ=13.5nm ）へと短波長化が進められてきた。波長に合わせてレジストを感光させる原理も変遷してきたが、KrF以降は化学増幅型レジストが主流になっており、EUVリソグラフィでも使用されている。

図7-19-5　半導体デバイスの微細化トレンドと露光波長の関係





https://www.jsr.co.jp/rd/assets/pdf/tec115-6.pdf

1.対象品目の概要調査（6）

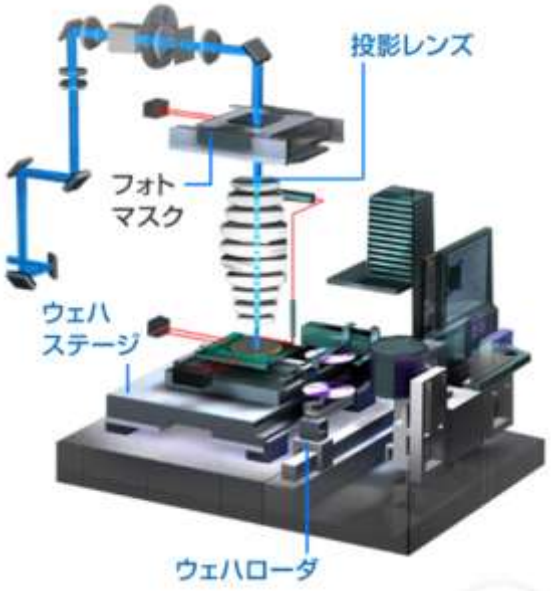
○輸出令第7項（19）レジスト、 貨物等省令第6条十九号イ

【縮小投影露光装置】

ArFエキシマレーザー光（193nm）までは、投影レンズを用いて集光する透過型光学系が用いられてきたが、波長が短くなると光は投影レンズを透過できなくなる。EUV光（13.5nm）では、透過型光学系を放棄し、反射鏡を用いて集光する反射型光学系が用いられている。光学系は変わったが、ポジ型の化学増幅型レジストを用いる点では連続している。ただし、EUVリソグラフィでは、ベース樹脂からの二次電子による影響が大きい。このことについては後述する。

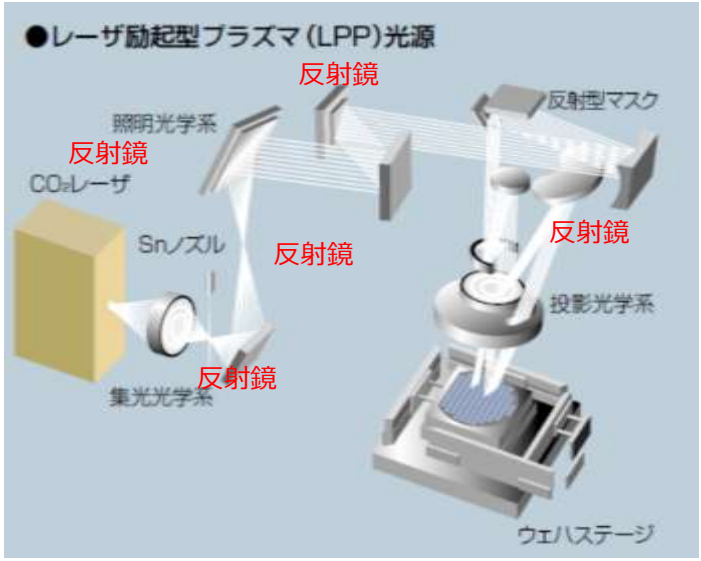
図7-19-6 縮小投影露光装置の光学系

（a）透過型光学系（g線、i線、KrF、ArF）



https://www.nikon.co.jp/technology/product/semiconductor/index.htm

（b）反射型光学系（EUV）



https://www.semi.org/sites/semi.org/files/2020-09/45_Kaihatsuhiwa_2012%231_NuFlare.pdf

1.対象品目の概要調査（7）

○輸出令第7項（19）レジスト、 貨物等省令第6条十九号ロ

【電子線リソグラフィ】

レジストを感光させる手段として電子ビームを利用する。図7-19- 7 に電子線描画装置の構成を示した。光学式の縮小露光装置と対比させると、光源は電子銃に、ガラス製の投影レンズは電磁石に、フォトマスクは成形アパーチャーに相当する。

電子銃から放出された電子は、磁場によって方向を曲げられ、細い電子ビームに集束させられる。電子ビームは、アパーチャーの窓を通過する際に窓の形状に応じて所望の形に成形される。成形された電子ビームはさらに細く絞られ、ステージ上の部材に照射されて、部材表面に塗布されたレジストを感光させる。

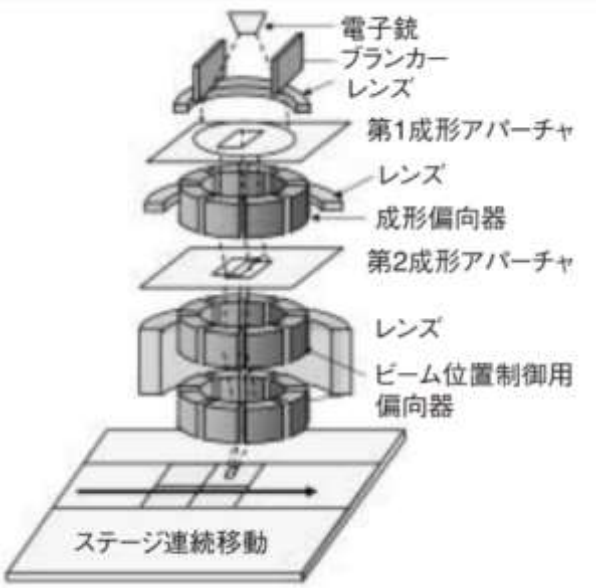
電子ビームの直径は、数ミクロン～数ナノメートルまで可変であるが、基本的には細いビームであるため、パターンを描画するためには、偏向器で電子ビームの進路方向を曲げて、「一筆書き」することになる。このため、描画には大変時間がかかる。一方で、極細の電子ビームによって数ナノメートルまで微細化できること、偏向器で電子ビームの方向を変えて任意パターンを直接描画できる利点があり、フォトリソグラフィとは応用面で住み分けができている。

電子線描画用のレジストは、ポジ型もネガ型もある。例えば、線パターンには電子線照射部がパターンとして残るネガ型が適し、孔パターンにはポジ型が適するので、使い分けられる。感光メカニズムとしては、化学増幅型もあれば、非化学増幅型もあり、一概にこちらがよいとは言えない。

ネガ型レジストの場合は、架橋反応を利用する。架橋反応とは、電子線のエネルギーを得て活性化した官能基を介して、レジストを構成する分子同志を網目状に連結させることを言う。網目状に連結して巨大化した高分子は、現像液に対して難溶であるため、パターとして残る。

なお、電子ビームの代わりに、正電荷イオンを用いる**イオンビーム式**の場合も、原理的には電子ビームの描画と同じであるため、説明は省略する。

図7-19-7　電子線描画装置



出典:
https://www.semi.org/sites/semi.org/files/2020-09/45_Kaihatsuhiwa_2012%231_NuFlare.pdf

1.対象品目の概要調査（8）

○輸出令第7項（19）レジスト、 貨物等省令第6条十九号ニ

【表面イメージング用レジスト】

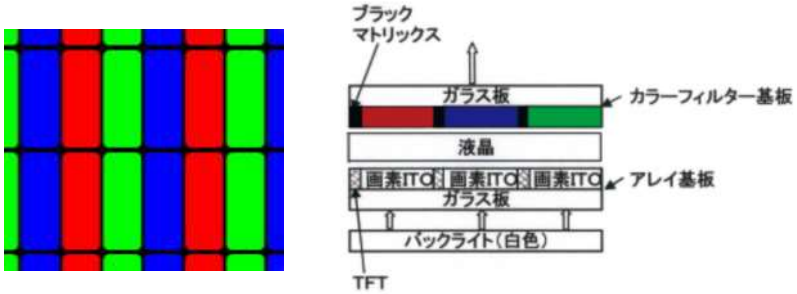
光の三原色は、Red(赤)、Green(緑)、Blue(青)からなり、これら三色を組み合わせることによって全ての色を表現できることから、液晶パネルやイメージセンサでRGBカラーフィルタが使用されている。カラーフィルタは、ネガ型フォトレジストに顔料を分散させて着色したものである。同様に、鮮明画像を実現するためにRGBの各画素を仕切るブラックマトリックスもその一種と言える。カラーレジストのフォトリソグラフィは、色毎に分けて、色数回繰り返し行なわれる。

ところで、元来，顔料は基材を被覆する着色剤であるため，光（紫外線）を通し難い。このため、当初はフォトリソグラフィによるパターン形成は到底不可能と考えられていた。しかし、顔料を微分散化してその粒径を小さくし，高感度のフォトレジストをうまく選べば着色パターンの形成が可能になることが示された（特開昭60-129707）。

鮮明で明るいカラーフィルタを形成するためには、顔料を微粒子化する技術と、均一に分散させる技術が必要である。また、色調に広がりがでるように、あるいは経年退色しないように、顔料の成分自体にも改良が加えられる。

図7-19-8 液晶パネルに用いられるカラーフィルタ

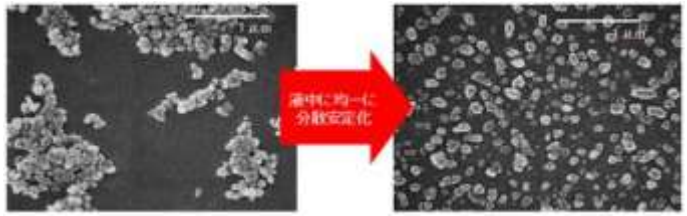
（a）液晶パネル画素とその断面



（b）顔料の微粒子化



（c）顔料の均一分散化



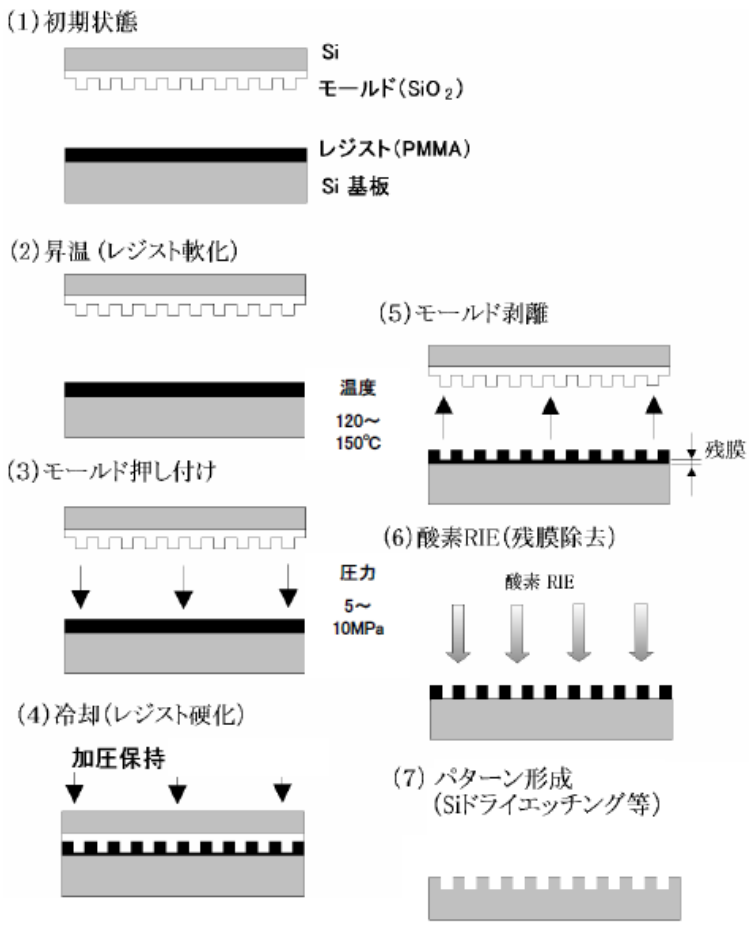
https://www.toyo-visual.com/ja/products/fpdcf/cfresist.html

1.対象品目の概要調査（9）

○輸出令第7項（19）レジスト、 貨物等省令第6条十九号ホ

【熱ナノインプリント】
　プリンストン大学のChau教授が1996年に発表した。例えば、（1）熱可塑性のPMMAレジスト（ポリメタクリル酸メチル：ガラス転位温度Tg=105℃）をSi基板に塗布し、（2）PMMAのガラス転位温度以上に昇温して、 PMMAレジストを液状にする。次に、(3)表面に凹凸のパターンを形成したモールドを押し付けると、PMMAがモールドの凹部に入り込む。その後、(4)ガラス転位温度以下まで冷却すると、PMMAが再び固化する。（5）モールドを引き剥がすと、Si基板上にパターン転写されたPMMAレジストパターンが残る。（6）PMMA残膜がある場合は、酸素の反応性イオンエッチング(RIE)などにより適宜除去する。
さらに、（7）PMMAレジストパターンをマスクにして下地のSi基板をエッチングするとSi基板に溝パターンを転写することができる。
　Chauらの実験により、10nm以下の転写が可能であることが示された。解像度はモールドの製作精度によって決まる。モールドさえ入手できれば、EUVリソグラフィ並みの極微細パターンであっても安価な装置で形成できる。ただし、半導体デバイス応用などでは、レイヤーの重ね合わせ（アライメント）を要するので、適用するためには位置合わせ精度の向上など課題は残されている。

図7-19-9　熱ナノインプリント技術



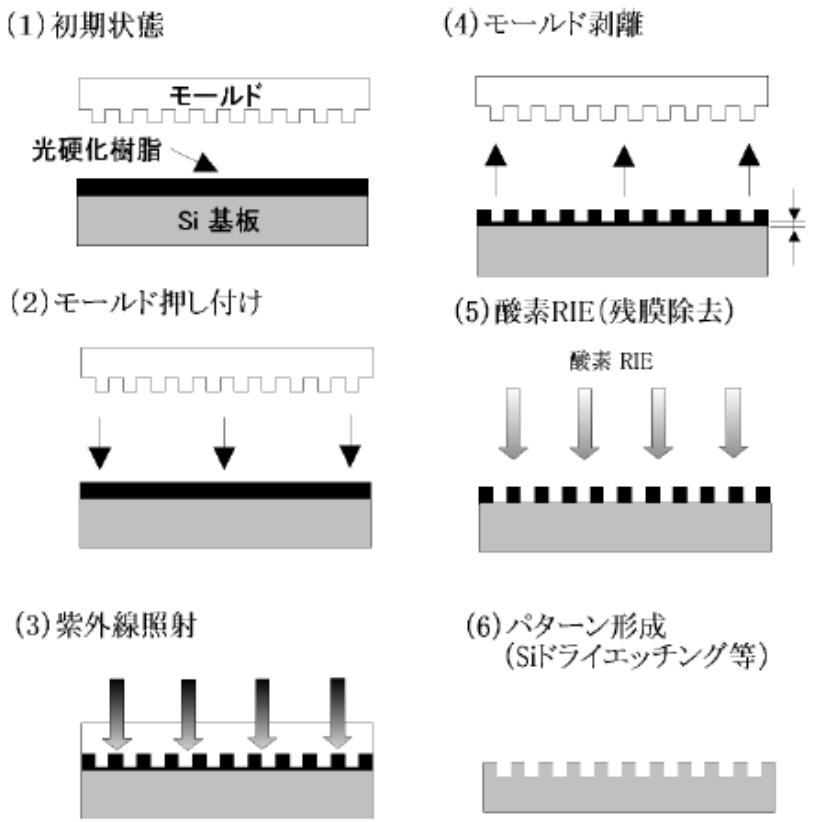
電子情報通信学会『知識の森』（http://www.ieice-hbkb.org/）

1.対象品目の概要調査（10）

○輸出令第7項（19）レジスト、 貨物等省令第6条十九号ホ

【光ナノインプリント】
オランダのフィリップス研究所（1996年）、米国テキサス大学のWilson教授が紫外光硬化樹脂を用いた、光ナノインプリント技術を発表した。
光ナノインプリントは、石英基板表面に凹凸パターンをつけた透明モールドを用いる。例えば、（1）Si基板表面に、低粘性の光硬化レジストを塗布する。次に、（2）表面に凹凸のパターンを形成したモールドを押し付けると、硬化していないレジストはモールドの凹部に入り込む。その後、（3）紫外線を照射して、レジストを紫外光硬化させる。（4）モールドを引き剥がすと、Si基板上にパターン転写されたレジストが残る。（5）残膜がある場合は、酸素の反応性イオンエッチング(RIE)などにより適宜除去する。さらに、（6）レジストをマスクにして下地のSi基板をエッチングするとSi基板に溝パターンを転写することができる。
加工寸法を決めているのはモールドの製作精度であり、紫外光の波長には依存しないので、レジストを硬化させることができる波長であればいずれも使用できる。
また、光ナノインプリントにおけるプレス圧力は、熱ナノインプリントが5～10MPaであるのに対して、0.1MPa以下と小さいという長所がある。熱サイクルを使用しない、常温プロセスなので、スループットが高く、熱膨張による誤差もない。

図7-19-10　光ナノインプリント技術



電子情報通信学会『知識の森』（http://www.ieice-hbkb.org/）

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令第7項（19）レジスト

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(19)	6		十九	レジストであって、次のいずれかに該当するもの又はそれを塗布した基板 レジスト：半導体製造用のレジスト（ソルダーレジストを除く。）であって、レジスト材である樹脂（ベースポリマー）を含む。 イ　半導体用のリソグラフィに使用するレジストであって、次のいずれかに該当するもの （一）　15ナノメートル以上193ナノメートル未満の波長の光で使用することができるように設計したポジ型レジスト ポジ型レジスト：照射された部分のみが現像液に溶解するレジストをいう。 （二）　１ナノメートル超15ナノメートル未満の波長の光で使用するように最適化したレジスト ロ　電子ビーム又はイオンビームで使用するために設計したレジストであって、0.01マイクロクーロン毎平方ミリメートル以下の感度を有するもの ハ　削除 ニ　表面イメージング技術用に最適化したレジスト ホ　第十七号ヘ（二）に該当するインプリントリソグラフィ装置に使用するように設計又は最適化したレジストであって、熱可塑性又は光硬化性のもの	イ　半導体用のリソグラフィに使用するレジストであって、次のいずれかに該当するもの （一）15ナノメートル以上193ナノメートル未満の波長の光で使用することができるように設計したポジ型レジスト （二）１ナノメートル超15ナノメートル未満の波長の光で使用するように最適化したレジスト ロ　電子ビーム又はイオンビームで使用するために設計したレジストであって、0.01マイクロクーロン毎平方ミリメートル以下の感度を有するもの

MCTR規制番号	Wassenaar規制文言（全文）
3桁	
3C002．	Resist materials as follows and "substrates" coated with the following resists: a. Resists designed for semiconductor lithography as follows: 1. Positive resists adjusted (optimised) for use at wavelengths less than 193 nm but equal to or greater than 15 nm; 2. Resists adjusted (optimised) for use at wavelengths less than 15 nm but greater than 1 nm; b. All resists designed for use with electron beams or ion beams, with a sensitivity of 0,01μ coulomb/mm2 or better; c. Not used since 2012 d. All resists optimised for surface imaging technologies; e. All resists designed or optimised for use with imprint lithography equipment specified in 3B001.f.2. that use either a thermal or photo-curable process.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（19）レジスト

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【民生用途】

貨物等省令第6条19号イで規制される半導体用のリソグラフィに使用するレジストからは、加工寸法10nm以下の高性能プロセッサ、超高集積メモリが製造される。さらに、高性能プロセッサからは、サーバー、スーパーコンピュータが製造される。

貨物等省令第6条19号ロで規制される電子ビーム用レジストからは、フォトリソグラフィで使用されるフォトマスクが製造される。電子線リソグラフィには、任意形状のパターンが描画できるという特長があり、微細加工に用いる原版の製造に欠かせない技術になっている。

貨物等省令第6条19号ニで規制される表面イメージングに使用される代表的なレジストは、カラーレジストである。応用製品に液晶パネルやイメージセンサがある。画素の寸法は超微細というわけではないが、RGBフイルターにおける光の透過性、ブラックマトリクスにおける遮光性など、機能面での改良が続いている。

貨物等省令第6条19号ホで規制されるナノインプリンタで実用化されている製品に、マイクロレンズや偏光シートがある。微細なものを安価で作れるという長所がある。現在は、非常に単純な繰り返しパターンで単層構造の製品が多いが、応用範囲は広がっており、これからの成長株と言える。

図7-19-11　レジストを使用する製品

貨物等省令第6条19号イ



高性能プロセッサ
AMD EPYC ROME



スーパーコンピュータ　富岳

貨物等省令第6条19号ロ

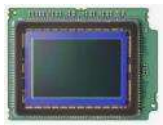


フォトマスク

貨物等省令第6条19号ニ



液晶パネル



イメージセンサ

貨物等省令第6条19号ホ



マイクロレンズ



偏光シート

3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（19）レジスト

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

【軍事利用】

貨物等省令第6条19号イ

10nm以下まで微細化したプロセッサは、高性能計算(HPC:high-performance computing)に必要なスーパーコンピュータを提供する。レジスト自体が直接的に兵器として用いられることは考えにくいが、HPC技術を使って新兵器を開発する可能性がある。

例えば、平和目的で行われる「創薬」，「遺伝子解析による個人に適合する予防薬」の開発などは、軍事用には化学兵器の開発や生物兵器の開発に転用される惧れがある。また、「高性能な機能デバイス」，「製造工業における創造的な設計」といった利用は、軍事用にはステルス性を備え戦闘力の高い戦闘機の設計や、軍事衛星の設計に応用されるかもしれない。

また、情報処理能力の向上は、サイバー戦でも有利になることが考えられる。

貨物等省令第6条19号ロ

微細加工に用いる原版の製造に欠かせない材料であるため、貨物等省令第6条19号イ、ホで使われる技術を経て、軍事目的に使用される可能性がある。

貨物等省令第6条19号ニ

小型化された液晶パネルやイメージセンサは、軍事用の携帯装備、例えばヘッドギアのゴーグルに実装される。

貨物等省令第6条19号ホ

ナノインプリントの用途は広がっており、想像もつかなかった用途が生まれるかもしれない。例えば、バイオ・医療分野への応用例として、微小量の液体を制御するマイクロTAS(Micro Total Analysis Sysitem)が注目されている。流路内に製作された微小構造体によりサイズ選別を行うDNA/Protainバイオチップ、高アスペクトナノ構造を有する細胞培養シート及び抗原抗体反応検出シートなどが報告されている。高度なバイオ技術は生物兵器の開発に利用される恐れがある。

4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（19）レジスト
貨物等省令第6条十九号イ（一）

① 規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（1）

規制パラメータ　輸出令第7項(19)

十九　レジストであって、
　イ　半導体用のリソグラフィに使用するレジストであって、
（一）　15ナノメートル以上193ナノメートル未満の波長の光で使用することができるように設計したポジ型レジスト

【ArFの解像限界と延命策】

解像度は、レンズの大きさに反比例し光の波長に比例することからRayleighの式（1）で表すことができる。

$$\text{解像度} = k_1 \frac{\lambda}{NA} \qquad (1)$$

ここで、λは光の波長、*NA*はレンズの大きさを表す開口数、k_1はレジスト材料のコントラストなどリソグラフィのプロセス性能を意味する定数である。また、開口数*NA*は、式（2）で表される。

$$NA = n \cdot \sin\theta \qquad (2)$$

θはウエハ面に結像する光線の開き、*n*はレンズとウエハ間の媒質の屈折率である。

ArFリソグラフィの場合、波長$\lambda = 193$nmであるから、空気の屈折率 $n=1$のままでは、k_1と$\sin\theta$を改善しても解像度65nmを達成できない。そこで、投影レンズとウエハの間に水を浸して屈折率を $n=1.44$にするArF液浸リソグラフィが導入された。この場合は、$\lambda = 193$nmに対して$k_1=0.3$、$NA = 1.35$まで改善すれば、解像度は43nmとなる。

しかし、半導体デバイスの微細化は、ムーアの法則によって進むため、これもすぐに限界を迎えた。

エキシマレーザーの光源としては、波長157nmのF_2があるが、開発の進捗は遅かったため、微細化技術はダブルパターニングによるArF液浸リソグラフィを延命化する方向に進んだ。

ダブルパターニングには２倍ピッチでパターンを露光した後にその1/2のピッチだけシフトさせて露光する方法や、スペーサプロセスなどのプロセストリックを用いた後に不要なパターンを除去する方法など、複数の手法がある。それでも、解像度は10nm台が限界であり、工程数が増えるという問題があった。

ここで登場したのが、波長13.5nmのEUVリソグラフィである。光学系を大幅に見直さなければならないなど、困難な技術課題は多くあったが、2010年代後半には量産に投入されている。

貨物等省令第6条十九号イ（一）について総括すると、「15ナノメートル以上193ナノメートル未満の波長の光で使用することができるように設計したポジ型レジスト」に、F_2（波長157nm）用のレジストが該当するが、F_2リソグラフィは量産レベルに到達する前に露光機の開発がストップしているため、レジストを入手しても、現実には利用困難である。

2020年現在においては、ArF(193nm)用と、EUV(13.5nm)用のレジストが、十九号イ（一）で求められるリソグラフィ技術をカバーする。

4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（19）レジスト
貨物等省令第6条十九号イ（二）

① 規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（2）

規制パラメータ　輸出令第7項(19)

十九　レジストであって、
　イ　半導体用のリソグラフィに使用するレジストであって、
（二）　１ナノメートル超15ナノメートル未満の波長の光で使用するように最適化したレジスト

【FinFETの登場】

半導体デバイスの知識が必要だが、簡単に説明すると、プレーナ型のMOSFET（図7-19-12（a））は、微細化していくとサブスレッショルド・リーク電流が増えるという問題がある。とはいえ、ゲートを短くするとゲート容量が減り、結果として駆動電流が減ってしまう。これゆえ、トランジスタの構造は10nmが限界と考えられていた時期もあった。

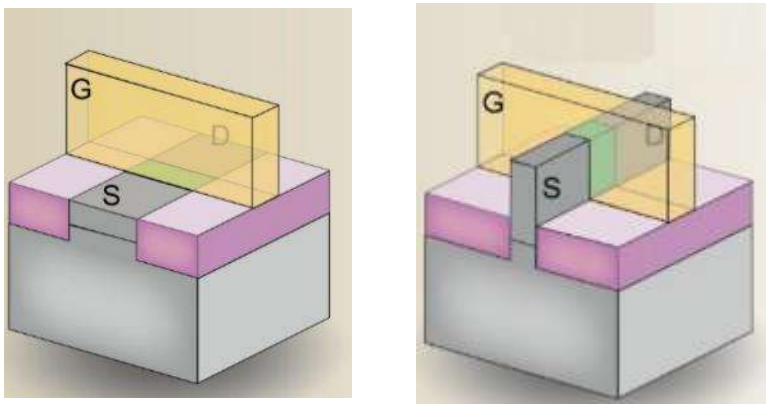
ここで考案されたのが、FinFETである（図7-19-12（b））。トランジスタのチャネル部分を３次元化して、ゲートがチャネルの2面、3面、または4面を利用できるように配置したMOSFETである。 FinFETの登場により、ゲート容量の問題が解決し、高速スイッチングと高電流密度を可能にした。

結果的に、ムーアの法則にしたがって微細化を推進する意義が得られ、モチベーションが上がったことで、EUVリソグラフィという困難な課題にも取り組むことができたのである。

波長13.5nmのEUVリソグラフィ技術が完成し、研究レベルでは3nmノードのFinFETが試作され、量産レベルでは7nmノードのFinFETが製造されている。身近な例でいえば、スーパーコンピュタ「富岳」では、TSMCの7nmプロセスが使われている。

図7-19-12　MOSトランジスタの構造

（a）プレーナ型のMOSFET　　（b）FinFET



図中の薄緑色の部分をチャネルと呼び、面積が大きいほどよい。FinFETは上面だけでなく側面を加えた３面を利用している。

出典: https://phys.org/news/2020-03-scientists-fin-width-finfet-physical-limit.htm

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（19）レジスト
貨物等省令第6条十九号イ（二）

① 規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（3）

規制パラメータ　輸出令第7項(19)

十九　レジストであって、
　イ　半導体用のリソグラフィに使用するレジストであって、
（二）　１ナノメートル超15ナノメートル未満の波長の光で使用するように最適化したレジスト

【EUV用レジストの課題】

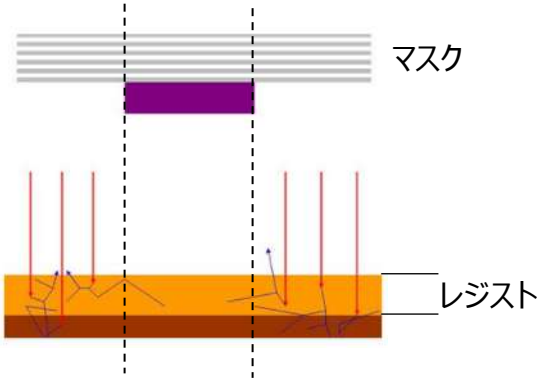
EUVにおいても化学増幅型レジストが用いられるが、ArFリスグラフィとは本質的に異なる点があり、感度、解像度、エッジラフネスの問題と複雑に絡みあってくるため、単純な話ではない。3nmの安定量産を目指しては、レジストの改良が鍵となる。

ArF露光では、酸発生剤がArF光のエネルギーを直接吸収して光分解し、酸を発生していた。すなわち、酸発生機構には、波長選択性があった。ベース樹脂は、ArF光に対して透明性があり、酸発生機構には関与しなかった。

ところが、EUV露光では、ベース樹脂がEUV光を吸収して二次電子を放出し、この２次電子が酸発生剤を励起して、酸を発生させるというメカニズムが主になる。すなわち、材料による波長選択性は失われている。1個の光子から、平均で4個の二次電子が放出されることが分かっており、数の上でも増幅されている。二次電子は、レジスト中を拡散し、そのうちの幾つかはEUV光が照射されていない場所まで入り込んで、その場所の酸発生剤までも分解し、感光領域を広げてしまう（図7-19-13）。

しかも、二次電子の発生、拡散、酸発生剤への付着は全て確率的であり、量子力学の揺らぎに左右されしまうため、エッジラフネス（線パターンのエッジが直線的でなく凸凹いていること）の原因にもなる。このように、酸発生機構だけに問題を絞り込めない点が、従来のレジスト開発とは異なっている。

図7-19-13　EUV露光における二次電子の拡散



赤線はEUV光、青線は二次電子の軌跡をあらわす。二次電子の幾つかは、拡散によって、非照射領域まで入り込んでおり、解像度を低下させる。

貨物等省令第6条十九号イ（二）について総括すると、「1ナノメートル超15ナノメートル未満の波長の光で使用することができるように最適化したレジスト」は、二次電子による酸発生機構を考慮したレジストであり、開発の途上である。ただし、改善が進めば、超微細化された半導体デバイスによって、スーパーコンピュータの性能が飛躍的に向上するため、輸出規制対象とすべき正当な理由がある。

4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（19）レジスト
貨物等省令第6条十九号ロ

① 規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（4）

規制パラメータ　輸出令第7項(19)

十九　レジストであって、
ロ　電子ビーム又はイオンビームで使用するために設計したレジストであって、0.01マイクロクーロン毎平方ミリメートル以下の感度を有するもの

【ビーム電流量と解像度】

フォトリソグラフィでは、比較的大面積に紫外線を照射して一括露光するためスループットは高いが、電子線リソグラフィは電子ビームを絞り込み、極端なこと言えば一筆書きになるため、スループットは極めて低い。もし、レジストの感度が低ければ、描画にはより多くの電子を必要とするので、ビーム電流を増やすか、照射時間を長くする必要がある。照射時間を短くしたい場合は、ビーム電流を増やすことになるが、電子は負電荷を有しているから近接する電子同士はクーロン力で反発するため、ビーム電流が大きくなるとクーロン効果が大きくなり電子ビームが拡がり解像度が下がる。表7-19-1に各種レジストとその感度、分かる場合は加工線幅を示した。市販レジストは、感度1～2μC/mm^{2}で数十nmの線幅を加工している。化学増幅型レジストでも0.1～１μC/mm^{2}なので、貨物等省令第6条十九号ロで規制している「0.01マイクロクーロン毎平方ミリメートル以下」は非常にアグレッシブな値と言える。感度では該当するものもあるが、微細加工に本当に適しているのかまでは分からなかった。

表7-19-1　各種レジストとその感度

タイプ	レジスト	感度 (μC/mm^2)	加工線幅
ポジ型	ポリヘキサフルオロブチルメタクレート	0.004	-
	ポリブテン1-スルフォン	0.016	-
	メチルメタクリレートー共重合体	0.2～0.6	-
	日本ゼオン　ZEP530A	1.9	18nm
ネガ型	グリシジルメタクリレートーエチルアクリレート共重合体	0.004	-
	グリシジルメタクリレートー３－クロロスチレン共重合体	0.03	-
	グリシジルメタクリレートースチレン共重合体	0.10	-
	東京応化　OEBR-CAN038AE	1.6	35nm
	ポリスチレン	4	-

4.品目の技術動向調査（5）

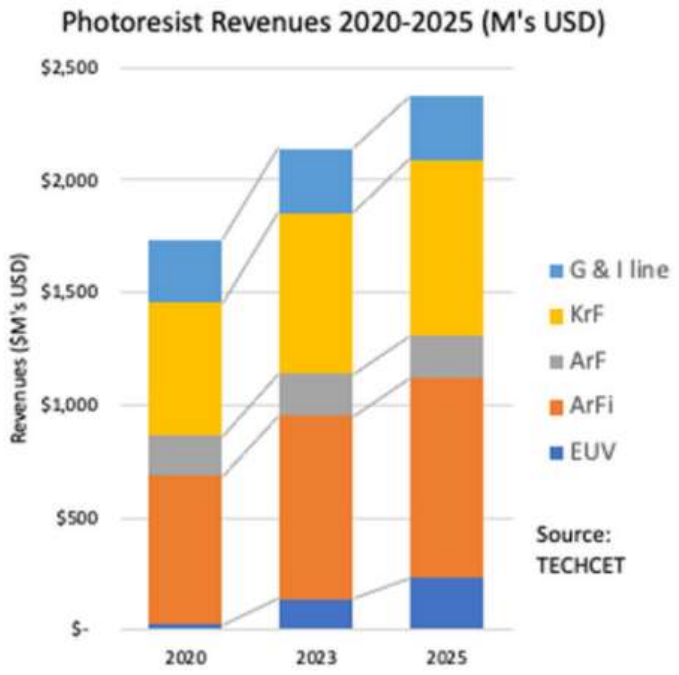
○輸出令7項（19）レジスト

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（1）

半導体レジストのタイプ別世界市場を図7-19-14に示す。2021年の半導体製造用フォトレジスト市場は前年比6%超の19億8000万ドルとなり、2025年には23億7000万ドルにまで増加すると予測されている。半導体の需要増加に伴って、フォトレジストも供給が間に合わない状態にあり、その販売額も継続して増加傾向にある。2021年のEUVレジスト市場は、2020年の1万8000リットルから2021年には3万5000リットルと販売量がほぼ倍増する見通しで、その結果、売り上げ規模も前年比約90%増の5100万ドルと大幅に成長することが予想されている。また、2020年から2025年にかけての年平均売上高成長率は53%と予測されており、その背景には先端ロジックでのEUVの採用に加え、先端DRAMでのEUV採用もある。

KrFレジストは現在、3D NANDに多用されており、2021年の市場規模は同12%増と予測されている。また、i/g線レジスト市場も2021年は同2～3%増とわずかながら成長が期待されている。また、今後3～5年にわたって3D NANDとロジックの生産が拡大することが予想されるため、レジストの主な溶剤であるプロピレングリコールメチルエーテルアセテート(PGMEA)と関連性が高いフォトレジストシンナーならびにEBR(エッジビードリムーバー)の使用量も増加すると予想されている。

図7-19-14　半導体レジストタイプ別世界市場



4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（19）レジスト

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（2）

半導体レジストの世界市場シェア（2019年）を図7-19-15に示す。フォトレジスト市場は、日本の５社、JSR（日本）、東京応化工業（日本）、信越化学工業（日本）、住友化学（日本）、富士フイルム（日本）が、92%を占めており、海外メーカは合わせても8%以下である。その内訳は次頁に示した。

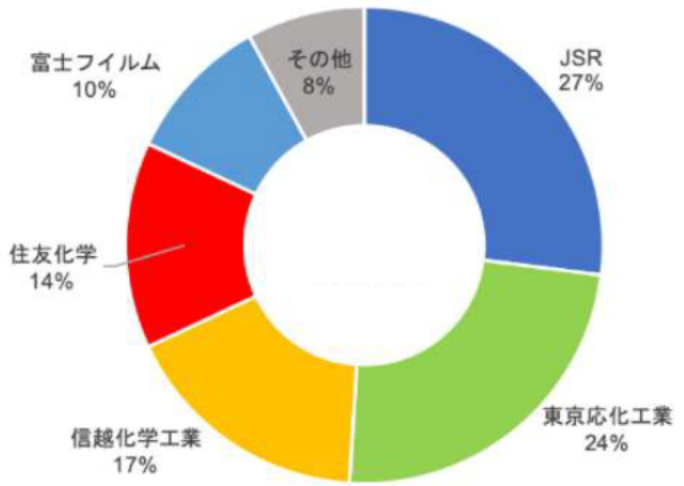
JSRがシェア27%を占めトップである。台湾ファンドリーの主要サプライヤーとしての地位を確保しているほか、近年DRAM向けでもシェアを拡大している。もともと、ArFドライレジストで高いシェアを有していることや、多層材料を持っていることも強みとなっている。

東京応化工業はEUVや厚膜KrFでは高いシェアを有するものの、ArFでは韓国DRAM顧客で他社に先行され、シェアが減少している。

信越化学、住友化学は台湾ファンドリー、ならびに先端DRAMでシェアを広げている。

富士フイルムは北米ロジック顧客向けで高いシェアを有している。

図7-19-15　半導体レジストの世界市場シェア（2019年）



4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令7項（19）レジスト

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（3）

前頁の円グラフのうち、その他8%の内訳を表7-19-２に示した。

表7-19-２　その他の半導体レジスト製造企業（前頁の円グラフのうち、その他8%の内訳）

	半導体レジスト製造企業	会社概要
1	Dow Silicones（旧Dow Corning）（米国）	旧Dow Corningは、アメリカ合衆国ミシガン州ミッドランドに本社を置く化学工業メーカーであった。ダウ・ケミカルとコーニングの共同出資による合弁企業で、シリコーンなどケイ素技術に特化していた。2017年にダウ・ケミカルがコーニングの持ち分を買い取り100%ダウ・ケミカルの子会社となり、名前もDow Silicones となった。
2	DuPont Electronic Technologies（米国）	親会社のDuPontは、アメリカ合衆国・デラウェア州・ウィルミントンに本社を置く化学メーカーである。会社の規模は世界第4位・アメリカで第2位である。石油会社を除けば時価総額ベースでは世界で四番目に大きい化学会社である。この子会社のDuPont Electronic Technologiesは半導体用フォトレジストを生産しており、2020年、韓国で先端半導体製造に必要なフォトレジストを生産すると発表した
3	AZ Electronic Materials Manufacturing（ルクセンブルグ）	AZ Electronic Materials Manufacturingは、2014年にドイツ・ダルムシュタットを本拠とする化学品・医薬品メーカーであるMercに買収された。サブミクロンリソグラフィプロセス用のg-line / i-lineフォトレジスト、およびナノメートルリソグラフィプロセス用のKrFフォトレジストを製造している。
4	KAYAKU Advanced Materials（日本）	MicroChem（日本）は、2019年にKAYAKU Advanced Materialsへ社名変更をした。親会社は日本化薬（日本）であり、エポキシ樹脂をベースとした感光性レジスト材料を開発し、ドライフィルム・液状レジストの製品ラインナップを取り揃え、 MEMS/半導体パッケージを中心とする幅広い用途に展開・供給している。
5	MicroChemicals（ドイツ）	MicroChemicalsは2001年に創業し、半導体品質のフォトレジスト、付属品、溶剤、エッチャントを使用した微細構造の分野で、多くの研究機関、新興企業、生産施設を提供している。
6	Microresist Technology（ドイツ）	Microresist Technologyは1993年に設立され、マイクロおよびナノ構造化プロセス用の革新的なフォトレジスト、ポリマー、フォトポリマー、および付属品の開発、製造、販売を行っている。
7	Dongwoo Fine-Chem（韓国）	住友化学（日本）の子会社。韓国で半導体用プロセスケミカル、フォトレジスト、光学機能性フィルム、カラーフィルター、タッチセンサー等の製造、販売を行っている。
8	Dongjin Semichem (韓国)	Dongjin Semichem は、電子材料と発泡剤を提供する韓国を拠点とする会社である。電子材料は半導体とフラット・パネル・ディスプレイに使用されるフォト・レジスト、底部反射防止コーティング（BARC）、上塗り材料、化学機械研磨・平坦化（CMP）スラリー、エッチング剤、シンナー及びストリッパー等を製造、販売している。
9	BelPlata (ベラルーシ)	BelPlata は1998年に創業し、ベラルーシおよび近隣諸国の顧客向けにプリント回路基板の製造用の電子部品や材料、フェライト製品、はんだペースト、その他の関連製品を開発および販売している。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（20）
アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、
燐・砒素・アンチモン有機化合物

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物

輸出令7項（20）では、アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物及び燐・砒素・アンチモン有機化合物が規制対象品目になっている。具体的には、表7-20-1に示す有機金属化合物及び有機化合物が挙げられる。比較的沸点が低く容易に気化するため、有機金属気相成長 (MOCVD)法による化合物半導体の製造等に用いられる。

表7-20-1　規制対象となる有機金属化合物及び有機化合物の例

区分	名称			化学式	CAS番号	沸点（℃）
	日本語	英語	略称			
アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物	トリメチルアルミニウム	trimethylaluminium	TMA	$((CH_3)_3Al)_2$	75-24-1	127
	トリエチルアルミニウム	triethylaluminum	TEA	$(C_2H_5)_3Al$	97-93-8	187
	ジメチルアルミニウムハイドライド	dimethylaluminumhydride	DMAH	$(CH_3)_2AlH$	865-37-2	154
	トリイソブチルアルミニウム	triisobuthylaluminum	TIBA	$(iso\text{-}C_4H_9)_3Al$	100-99-2	130
	トリメチルガリウム	trimethylgallium	TMG	$(CH_3)_3Ga$	1445-79-0	55.7
	トリエチルガリウム	triethylgallium	TME	$(C_2H_5)_3Ga$	1115-99-7	142.6
	トリメチルインジウム	trimethylindium	TMI	$(CH_3)_3In$	3385-78-2	136
	トリメチルインジウム	triethylindium	TEI	$(C_2H_5)_3In$	923-34-2	184
燐・砒素・アンチモン有機化合物	トリメチルホスフィン	trimethylphosphine	TMP	$(CH_3)_3P$	594-09-2	38-39
	ジエチルホスフィン	diethylphosphine	TEP	$(C_2H_5)_2PH$	627-49-6	85
	ターシャリブチルフホスフィン	tertiarybutylphosphine	TBP	$tert\text{-}C_4H_9PH_2$	2501-94-2	56.1
	トリメチルアルシン	trimethylarsine	TMAs	$(CH_3)_3As$	593-88-4	56
	トリエチルアルシン	triethylarsine	TEAs	$(C_2H_5)_3As$	617-75-4	140
	トリメチルアンチモン	trimethylstibine	TMSb	$(CH_3)_3Sb$	594-10-5	81

出典: 高千穂商事/高千穂化学工業ホームページ（https://www.takachiho.biz/Organometallics.html）, Wikipedia, PubChem (https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/) 等

1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物

対象とされる有機金属化合物は、安全上取扱いに注意を要する材料であるため、法令によって規制されている。

【代表的な有機金属化合物】
トリメチルアルミニウム（TMA）、 トリメチルガリウム（TMG）、 トリメチルインジウム （TMI）

【危険有害性】
- 空気に触れると自然発火する。
- 水と爆発的に反応し、メタンガスを発生する。
- 皮膚腐食性及び皮膚刺激性を有する。

【適用法令】
- **消防法** 第3類自然発火性物質及び禁水性物質、有機金属化合物
- **道路法** 車両の通行制限（施行令第１９条の１３、（独）日本高速道路保有・債務返済機構公示第１２号・別表第２）
- **船舶安全法** 可燃性物質類・自然発火性物質（危規則第２，３条危険物告示別表第１）
- **港則法** 危険物・自然発火性物質（法第２１条2、則第１２条、昭和５４告示５４７別表示表二）
- **航空法** 輸送禁止（施行規則第１９４条）

※１ トリメチルアルミニウムは、労働安全衛生法、水質汚濁防止法、水道法の適用を受ける。
※２ トリメチルインジウムは、 労働安全衛生法、大気汚染防止法、労働基準法、化学物質排出把握管理促進法、労働基準法の適用を受ける。

図7-20-1 有機金属化合物に適用されるGHS対応ラベル



図7-20-2 安全な包装形態の一例（ステンレス製容器）



1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物

有機化合物のトリメチルホスフィンやトリメチルアルシンは、例えばStrem Chemicals社（米国）で製造され、試験・研究の目的に限り日本でも購入できる。なかでも、トリメチルアルシンは、砒素を含む有毒な材料あり、漏洩すると深刻な健康被害や環境汚染をもたらす危険物であるが、水素化物であるアルシン（AsH_3）よりは安全であるとされている。当初は、純度が低く得られる半導体結晶の品質が不十分であったが、現在は純度も良くなっている。

図7-20-3 試薬メーカーの電子カタログに公開されている製品情報の一例



1.対象品目の概要調査（4）

○輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物

【トリメチルアルミニウムの製造方法】

工業的には、アルミニウムと塩化メチルから直接法によって合成される。

1st step: $2\mathbf{Al} + 3\mathbf{CH_3Cl} \rightarrow (CH_3)_3Al_2Cl_3$

2nd step: $2(CH_3)_3Al_2Cl_3 + 6Na \rightarrow \mathbf{((CH_3)_3Al)_2} + 2Al + 6NaCl$

【トリメチルガリウムの製造方法】

工業的には、塩化ガリウムとトリメチルアルミニウムから合成される。

$3\mathbf{((CH_3)_3\ Al)_2} + \mathbf{(GaCl_3)_2}$

$\rightarrow (CH_3)_4Cl_2AlGa + 2((CH_3)_2AlCl)_2 + 1/2\ ((CH_3)_3Al)_2 + \mathbf{(CH_3)_3Ga}$

副生成物を分解しトリメチルガリウムの収率を高める方法、未反応のトリメチルアルミニウムを回収し再利用する方法、トリメチルガリウムを高純度化するために行う蒸留精製法について、論文発表や特許出願がある。

【トリメチルインジウムの製造方法】

幾つか方法があるが、 トリメチルガリウムと類似の方法が適用できる。

1.対象品目の概要調査（5）

○輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物

【トリメチルホスフィンの製造方法】

グリニャール試薬と亜リン酸エステルから合成できる。

$$3\,CH_3MgCl + (C_6H_5O)_3P \rightarrow (CH_3)_3P + 3C_6H_5OMgCl$$

【トリメチルアルシンの製造方法】

三酸化二砒素とトリメチルアルミニウムから合成できる。

$$As_2O_3 + 3/2\,((CH_3)_3Al)_2 \rightarrow 2\,(CH_3)_3As + 3/n\,(CH_3Al\text{-}O)_n$$

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる材料の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令				貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号	イロハ		
7(20)	6	1	二十		有機金属化合物又は有機化合物であって、次のいずれかに該当するもの	
7(20)	6	1	二十	イ	イ　アルミニウム、ガリウム又はインジウムの有機金属化合物であって、純度が99.999パーセントを超えるもの	純度が99.999パーセントを超える
7(20)	6	1	二十	ロ	ロ　燐、砒素又はアンチモンの有機化合物であって、純度が99.999パーセントを超えるもの	純度が99.999パーセントを超える

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3C003		3C003 Organo-inorganic compounds as follows:
3C003	a	a. Organo-metallic compounds of aluminium, gallium or indium, having a purity (metal basis) better than 99,999%;
3C003	b	b. Organo-arsenic, organo-antimony and organo-phosphorus compounds, having a purity (inorganic element basis) better than 99,999%.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

〇輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【MOCVD法による半導体デバイスの製造】
対象品目になっているアルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物及び燐・砒素・アンチモン有機化合物は、有機金属気相成長法（MOCVD：metal organic chemical vapor deposition）と呼ばれる半導体デバイス製造工程の原料として用いられる（図7-20-4）。原料の純度が低い場合は、製造した半導体膜中に不純物起因の様々な結晶欠陥が発生する（図7-20-6）。

図7-20-4　MOCVD法によるAlGaAs層の形成

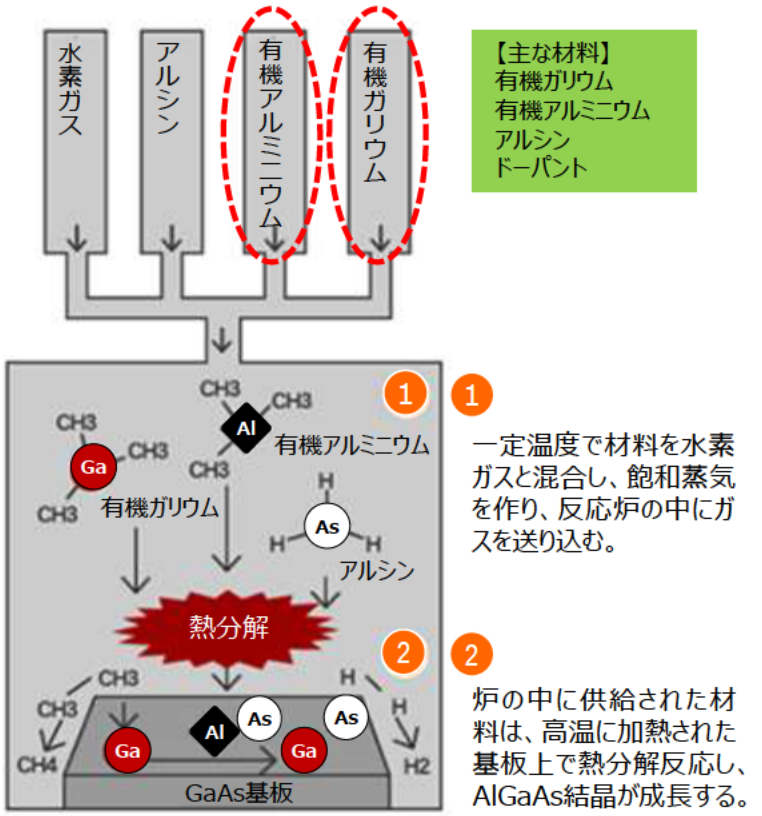
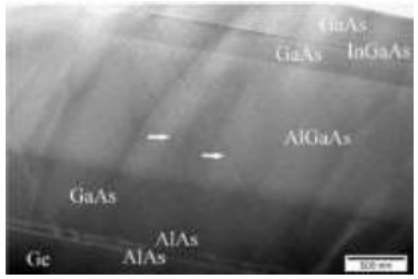


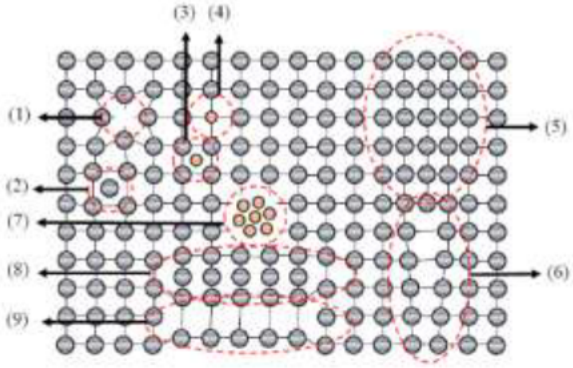
図7-20-5　AlGaAs半導体層の透過電子顕微鏡写真



MOCVD AIX 200RF反応器を用いて作成したレーザー発光ダイオードの断面構造。MOCVD原料としてトリメチルアルミニウム、トリメチルガリウム、トリメチルインジウム、アルシンを使用している。

出典：Crystals 2018, 8, 311

図7-20-6　不純物に起因する結晶欠陥



(1) 原子空孔
(2) 格子間原子
(3) 格子間不純物
(4) 置換不純物
(5) 積層欠陥
(6) 刃状転位、
(7) 析出物
(8)(9) らせん転位

上記のうち(3)(4)(7)の欠陥は不純物起因

3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【民生用途】

対象品目であるアルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物及び燐・砒素・アンチモン有機化合物は、化合物半導体デバイスの製造に使用され、熱画像システム、レーダー、通信機器、コンピュータ機器などの電子およびオプトエレクトロニクス製品となる。

化合物半導体とは、2種類以上の元素が結合してできる半導体であり、元素の組み合わせ、組成比によって、性質を変えることができる。代表的な化合物半導体には、III族とV族元素、II族とVI族元素があり、それぞれIII-V族半導体、II-VI族半導体と呼ばれている。

代表的なIII族元素としてはアルミニウム(Al)・ガリウム(Ga)・インジウム(In)、V族元素としては窒素(N)・リン(P)・砒素(As)・アンチモン(Sb)があり、これらの元素に有機基を結合させて、分子構造を持たせたものが、輸出令7項(20)に該当する材料である。

図7-20-7に、化合物半導体デバイスを組み込んだ工業製品を示す。III-V族化合物半導体はその多くが直接遷移型の半導体であるため、発光ダイオード・レーザーダイオードをはじめとする発光素子や、特定波長域の赤外線を吸収することから赤外線センサに用いられる。また高い電子移動度を利用して、極超短波以上の増幅には、ガリウム砒素(GaAs)を用いた電界効果トランジスタが広く使われている。また、窒化ガリウム(GaN)はUSB急速充電器から始まって、高耐圧・高周波スイッチング素子へと、その用途を広げている。

図7-20-7　化合物半導体デバイスを組み込んだ工業製品



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

〇輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物
②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

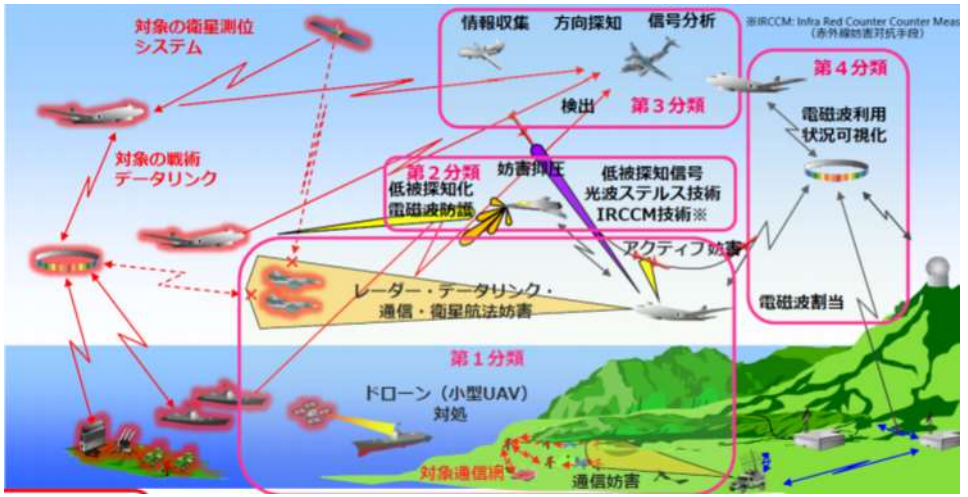
【軍事用途（1）：暗視装置】
赤外線の大気透過率はMW帯（3～5μm）とLW帯（8～10μm）で高くなるので、これらの波長帯は、遠方からの撮像によく使用される。量子井戸型赤外線センサは、障壁層や井戸層を形成する半導体の組成と井戸層の幅を調整することで、MW/LW帯に合わせることができる。このような理由から暗闇でも攻撃目標を捕捉できる暗視装置に使用されている（図7-20-8）。

【軍事用途（2）：電子戦兵器】
組成の異なる複数の化合物半導体材料を積層して、高電子移動度トランジスタ（HEMT：High electron Mobility Transistor）を製造することができる。このような高周波デバイスは、マイクロ波の領域で超高速動作するため、軍用通信機器、レーダー、ミサイル誘導装置、通信妨害装置等に利用されている（図7-20-9）。

図7-20-8　赤外線カメラによる暗視画像



図7-20-9　マイクロ波を利用した電子戦兵器



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

〇輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物
②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

【合成試薬等の用途】

トリメチルホスフィンと同じアルキルホスフィン類に属するトリエチルホスフィン、トリブチルホスフィンなども、強い還元性を有しており、新しいタイプの還元剤として利用することができる。 また、金属と錯体を形成し、特異な触媒特性を持つことからオキソ反応、ヒドロカルボキシル化反応、水素添加反応、重合反応及び還元触媒等として利用可能であり、高級アルコール、医薬品、農薬等の各種有機化合物の合成に利用される。

また、アルキルホスフィンオキサイドは、耐熱性、耐薬品性に優れており、高温反応溶媒、樹脂用難燃剤、潤滑油添加剤等としての利用が可能である。また各種金属イオンと配位化合物を形成する能力があり、金属の抽出溶媒として利用される。特に、トリｎ－オクチルホスフィンオキサイドはリン鉱石からウランの抽出溶媒として大量に利用されている。

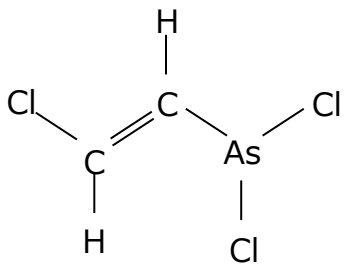
一方、ホスホニウム塩は、相関移動触媒、アルキル化反応触媒、ニトリル化反応触媒、エーテル類の合成触媒、スルフィド合成触媒等として、医薬品、農薬及び一般工業薬品の合成に利用されている。

【化学兵器としての用途】

有機リン化合物、有機砒素化合物には毒性があり、化学兵器として使用される可能性がある。

例えば、化学兵器として悪名の高いルイサイト（Lewisite）は、塩化第一銅を触媒とし三塩化砒素、アセチレン及び塩酸を原料として合成できる有機砒素化合物であり、即効性があるびらん剤（皮膚がただれる）として用いられる（図7-20-10）。繊維やゴムを透過する性質があるため普通の防護服では防ぐことができない。

図7-20-10　ルイサイトの構造



4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

【高純度トリメチルガリウム（TMG）の製造】

特開2006-342101に開示されているトリメチルガリウムの製造設備の一例を図7-20-11に示す。高純度化には蒸留精製法を用いるが、蒸留精製は蒸気圧の差を利用して濃縮する操作であるから、使用する溶媒種の選び方にノウハウが生まれる。従来は沸点差の大きいメシチレンを使っていたが、多量のメシチレンを必要とし、不経済という問題点があった。特開2014-37424は、溶媒としてアミン化合物 $R^2{}_2N\text{-}(CH_2)_n\text{-}NR^2{}_2$（式中、$R^2$は、炭素原子数1～6 のアルキル基を示し、nは、4～8の整数を示す）、より具体的には、N,N,N′,N′-テトラブチル-1,6-ヘキサンジアミンが適することを主張するものである。さらに蒸留時の還流比、温度条件などを細かく定めている（図7-20-12）。

図7-20-11　特開2006-342101に開示されているトリメチルガリウムの製造設備（溶媒としてメシチレンを使用している）

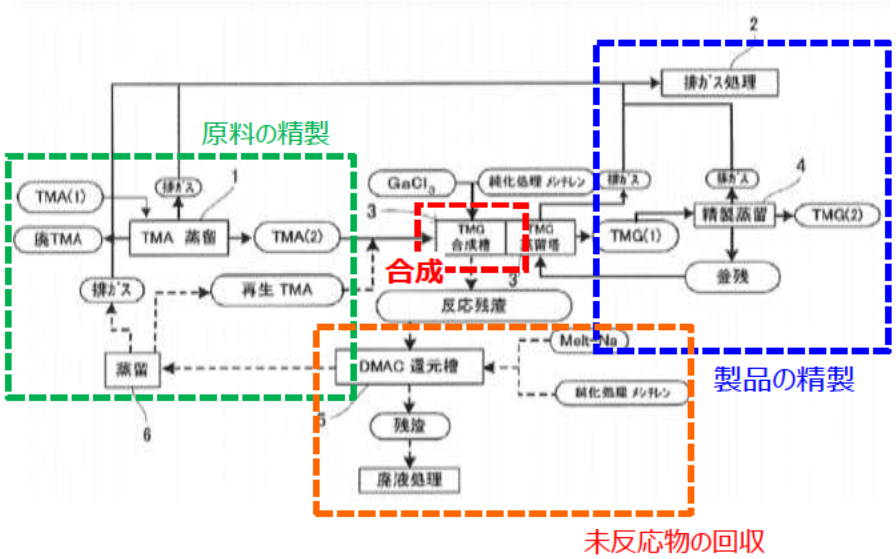


図7-20-12　特開2014-37424に開示されているトリアルキルガリウムの精製方法

【００１７】
前記の炭化水素及びケイ素化合物のうち、特に目的物であるトリアルキルガリウムと沸点が近いものは蒸留精製が困難であり、工業的規模で高純度品を得るためには操作が非常に煩雑となる。具体的には、例えば、トリメチルガリウムの沸点は55.7℃、トリエチルガリウムの沸点は142.6℃であるため、これらの沸点と近い沸点を有する炭化水素及びケイ素化合物を除去することが望まれている。特に沸点差６～40 ℃ のものの除去は困難を極める。この問題の解決は、以下に示すような還流比や温度の繊細なコントロールや適当なアミン化合物を適宜使用することによって達成される。

(以下、数ページにわたって細かく記載されているので、詳細は省く)

4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

規制パラメータ　輸出令第7項(20)
イ　アルミニウム、ガリウム又はインジウムの有機金属化合物であって、純度が99.999パーセントを超えるもの
ロ　燐、砒素又はアンチモンの有機化合物であって、純度が99.999パーセントを超えるもの

【規制パラメータ調査】

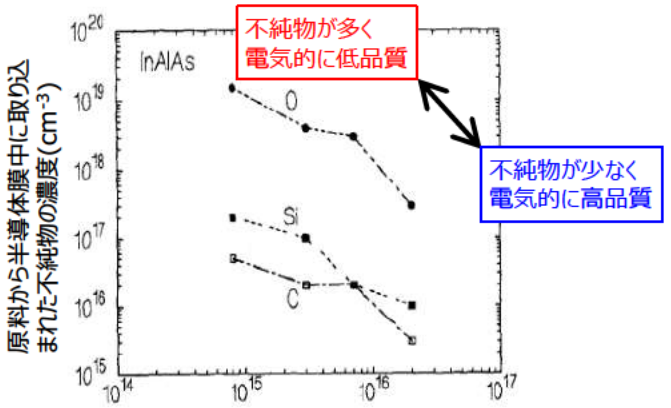
半導体を製造するMOCVD工程では、原料となる有機金属化合物に極微量であっても不純物が含まれていると、結晶欠陥が導入されて半導体デバイスの特性が悪くなる（発光特性の劣化、雑音の増大など）。20年以上前は、原料純度による違いが、製造した半導体の電気特性の差として見えていた（図7-20-13）。しかし、今日では、原料の純度が上がり（≧99.9999%）、大きく取り上げられることはない。むしろ、不純物汚染問題は、腐食性ガスを流した時の配管材料からの汚染、外部から侵入する水分、分解生成物からの炭素汚染などに移行している。

図7-20-13　原料の純度が半導体膜の品質に及ぼす影響を調べた文献（技術が未熟だった90年代の古い研究）

Table I. Summary of SIMS Measurements

In Source	Impurity Concentration (cm⁻³) InAlP		InAlAs	
TMIn #1	G767	O: 6E20 C: 3E19 Si: 1E18	G768	O: 3E18 C: 2E16 Si: 1E17
TMIn #2	G769	O: 1E22 C: 3E20 Si: 7E19	G770	O: 1.5E19 C: 5E16 Si: 2E17
TMIn #3	G772	O: 5E19 C: 3.5E18 Si: 3E17	G773	O: 4E18 C: 2E16 Si: 2E16
TMIn #4 (liquid)	G774	O: 6E21 C: 7E19 Si 5E18	G775	O: 3E17 C: 3E15 Si: 1E16

サンプル#　　二次イオン質量分析で測定した不純物濃度



製造メーカーの異なるトリメチルインジウムTMIn＃１～＃4を用いて、4つのサンプルを作成し、半導体膜(InAlAs)に取り込まれた不純物量と電気特性の関係について調べた。原料自体の純度は明らかにされていないが、堆積した膜に取り込まれた不純物量は二次イオン質量分析でわかっており、不純物が多くなるほど電気伝導に寄与する自由キャリア濃度が低下している。

出典：Journal of Electronic Materials, Vol.26,No.4,pp.361-365 (1997)

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

【特許出願状況】

宇部興産は、高純度（99.999%以上）のトリメチルアルミニウム、トリメチルガリウム及びトリメチルインジウムを実際に出荷しており、特許出願状況から2016年頃には国内でも製造技術が確立したと推測される。

表7-20-2　国内の出願状況

公開番号	発明の名称	出願人
特開2005-008553	高純度アルキルガリウムの製造方法	信越化学工業
特開2006-001895	有機化合物の精製方法及びこれにより得られた有機金属化合物	信越化学工業
特開2006-111546	トリメチルガリウム、その製造方法およびそのトリメチルガリウムから得られた窒化ガリウム薄膜	住友化学
特開2006-265166	トリアルキルガリウムの製造方法	日亜化学工業
特開2006-265167	トリアルキルガリウムの製造方法	日亜化学工業
特開2006-265168	トリアルキルガリウムの製造方法	日亜化学工業
特開2006-342101	有機金属化合物の製造方法	信越化学工業
特開2010-195690	高純度トリアルキルガリウム及びその製造方法	宇部興産
特開2011-084504	トリアルキルガリウムの製造方法、及び製造装置	気相成長株式会社
特開2011-084507	トリアルキルアルミニウムの製造方法	気相成長株式会社
特開2011-184363	トリメチルインジウムの製造方法	信越化学工業
特開2014-037424	高純度トリアルキルガリウム及びその製造方法	宇部興産
特開2016-029026	トリアルキルガリウムの製造方法	宇部興産
特開2016-056160	トリアルキルガリウムの製造方法	宇部興産
特開2016-145170	固体有機金属化合物の製造方法及び製造装置	宇部興産
特開2016-532699	アルキルインジウム化合物の製造方法及びその使用	ユミコア・アクチンゲゼルシャフト・ウント・コムパニー・コマンディットゲゼルシャフト
特開2016-536325	アルキルインジウム化合物の製造方法及びその使用	ユミコア・アクチンゲゼルシャフト・ウント・コムパニー・コマンディットゲゼルシャフト
特開2018-065767	アルミニウム合金を含む組成物及びその製造方法、並びにトリアルキルアルミニウムの製造方法	東ソー・ファインケム
特開2018-135300	トリアルキルアルミニウムの製造方法	東ソー・ファインケム
特開2019-178166	アルキルインジウム化合物の製造方法及びその使用	ユミコア・アクチンゲゼルシャフト・ウント・コムパニー・コマンディットゲゼルシャフト
特開2021-014459	アルキルインジウム化合物の製造方法及びその使用	ユミコア・アクチンゲゼルシャフト・ウント・コムパニー・コマンディットゲゼルシャフト

4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物
②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【世界の主な市場プレーヤー】

MOCVD向け高純度有機金属化合物を扱う企業は、米国、欧州、中国にまたがって世界各地に存在する。

表7-20-3　高純度アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物を製造する主な企業

トリメチルアルミニウム 純度:99.9999%以上	
企業名	国籍
Albemarle	米国
Lanxess (Chemtura)	ドイツ
Nouryon	オランダ
SAFC Hitech	英国
Jiangsu Nata Opto-electronic Material	中国
Jiang Xi Jia Yin Opt-Electronic Material	中国
ARGOSUN MO	中国
UP Chemical	韓国
Lake Materials	韓国
宇部興産※	日本
信越化学※	日本

トリメチルガリウム 純度:99.9999%以上	
企業名	国籍
Akzo Nobel	オランダ
Dow chemical	米国
Albemarle	米国
SAFC Hitech	英国
Nata	中国
宇部興産※	日本
信越化学※	日本

トリメチルインジウム 純度:99.9999%以上	
企業名	国籍
Dow chemical	米国
Nouryon	米国
LANXESS	ドイツ
Merck KGaA	ドイツ
SAFC Hitech	英国
NaJiangsu Nata Opto-electronic Material	中国
ARGOSUN MO	中国
宇部興産※	日本
信越化学※	日本

出典：市場調査レポート（https://www.marketreportsworld.com）のプレビューで紹介されている企業を列挙した。レポートには生産者のシェアなどの詳細情報も掲載されている。

※ 宇部興産と信越化学は、上記の市場調査レポートにプレーヤとして名前は挙がっていないが、生産していることは、それぞれのホームページで確認している。

4.品目の技術動向調査（5）

〇輸出令7項（20）アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物
②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【関連企業】
アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物用いて化合物半導体製品を製造する主な企業を表7-20-４に示す。

表7-20-4　アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物を用いて化合物半導体製品を製造する主な企業

関連企業	国籍・地域
日亜化学工業	日本
東芝	日本
EMCORE	米国
Bridgelux, Inc.	米国
ByteLight	米国
Lattice Semiconductor Corporation	米国
Aixtron AG	ドイツ
AZZURRO Semiconductors AG	ドイツ

関連企業	国籍・地域
ANNEALSYS	フランス
Plessey Semiconductors	英国
EpiGaN	ベルギー
Ammono	ポーランド
Sanan Optoelectronics	中国
Epistar	台湾
OAO Saturn	ロシア
Ioffe FTI	ロシア

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（21）
燐・砒素・アンチモン水素化物

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

輸出令7項（21）では、燐・砒素・アンチモン水素化物が規制対象品目になっている。具体的には、表7-21-1に示す水素化物が挙げられる。半導体製造工程のイオン注入、化学気相成長に用いられるが、優れた電気特性を得るために高純度品(99.999%以上）を必要とする。いずれも、可燃性ガスで毒性があり、法的規制を受ける。

表7-21-1　規制対象となる水素化物の例

材料名	化学式	CAS番号	沸点	可燃性 (爆発範囲)	急性毒性 LC50（4時間）
ホスフィン (phospine)	PH_3	7803-51-2	-87.8℃ (常温気体)	可燃性 (1.3～98 %)	11 ppm
アルシン (alsine)	AsH_3	7784-42-1	-62.5℃ (常温気体)	可燃性 (4.5%～78 %)	16.2 ppm
スチビン (stibine)	SbH_3	7803-52-3	-17℃ (常温気体)	可燃性 (不明)	100 ppm

1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

ホスフィン（PH_3）

- リンと水素による無機化合物。
- 常温では無色腐魚臭の可燃性気体で、常温の空気中で酸素と反応して自然発火する。極めて毒性が強い。
- 半導体製造のドーピングガスの原料であり、ケイ素をn形にする場合や、InGaP（インジウムガリウムリン）などといった化合物半導体を製造するときにも用いられる。

【適用法令】

• **高圧ガス保安法**	第2条（液化ガス） 一般高圧ガス保安規則第2条
• **道路法**	施行令第19条の12（車両の通行の禁止）
• **船舶安全法**	危規則第3条危険物告示別表第1(高圧ガス(毒性))
• **港則法**	施行規則第12条（危険物の種類：高圧ガス）
• **航空法**	施行規則第194条危険物(高圧ガス(毒性ガス))
• **労働安全衛生法**	施行令別表第1危険物（可燃性のガス） 施行令第18 条の2 別表第9 名称等を表示し、又は通知すべき危険及び有害物 （りん化水素） 半導体製造工程における安全対策指針（特殊材料ガス）
• **毒物及び劇物取締法**	第２条別表第１（28）、毒物及び劇物指定令第１条第３０号 毒物（燐化水素及びこれを含有する製剤）
• **消防法**	第9条の3（貯蔵等の届出を要する物質）
• **化審法**	第2条第7項（一般化学物質）
• **大気汚染防止法**	施行令第10条 特定物質

1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

アルシン（AsH_3）

- 砒素と水素による無機化合物。
- 常温では無色ニンニク臭の可燃性気体。極めて毒性が強い。
- 砒化ガリウム (GaAs) や砒化インジウム (InAs) 等の化合物半導体の原料として用いられる。

【適用法令】

- **高圧ガス保安法**　第2条（液化ガス）
  一般高圧ガス保安規則第2条（可燃性ガス，毒性ガス，特殊高圧ガス）
- **道路法**　施行令第19条の12（車両の通行の禁止）
- **船舶安全法**　危規則第3条危険物告示別表第1(高圧ガス(毒性))
- **港則法**　施行規則第12条（危険物の種類：高圧ガス）
- **航空法**　施行規則第194条危険物(高圧ガス(毒性ガス))
- **労働安全衛生法**　施行令別表第1危険物（可燃性のガス）
  名称等を表示し、又は通知すべき危険物及び有害物。
  政令番号 ： 別表第9 の458　政令名称： 砒素及びその化合物。
  半導体製造工程における安全対策指針（特殊材料ガス）
- **毒物及び劇物取締法**　第２条別表第１（28）、毒物及び劇物指定令第１条第２３号
  毒物（砒素化合物及びこれを含有する製剤）
- **消防法**　第9条の3（貯蔵等の届出を要する物質）
- **化審法**　施行令第1条別表第１（特定第一種指定化学物質）
  （別表第1の該当番号：322（砒素及びその無機化合物））
- **大気汚染防止法**　有害大気汚染物質/優先取組（ヒ素及びその化合物）
- **水質汚染防止法**　政令第2条第6号（砒素及びその化合物）
- **水質汚濁防止法**　施行令第2条有害物質（ヒ素及びその化合物）
- **土壌汚染対策法**　第2種特定有害物質（砒素及びその化合物）

1.対象品目の概要調査（4）

〇輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

スチビン（SbH_3）

- アンチモンと水素による無機化合物。
- 常温では無色ニンニク臭の可燃性気体。毒性が強い。

【適用法令】

• **高圧ガス保安法**	第2条（液化ガス） 一般高圧ガス保安規則第2条（可燃性ガス，毒性ガス，特殊高圧ガス）
• **労働安全衛生法**	名称等を表示し、又は通知すべき危険物及び有害物。 政令番号 ： 別表第9 の38 政令名称： アンチモン及びその化合物。 半導体製造工程における安全対策指針（特殊材料ガス）
• **毒物及び劇物取締法**	毒物及び劇物指定令第２条第７項（アンチモン化合物及びこれを含有する製剤）
• **化管法**	特定第一種指定化学物質 ３１（アンチモン及びその化合物）
• **大気汚染防止法**	中環審第9次答申の14
• **水質汚濁防止法**	政令第3条の3第47号（アンチモン及びその化合物）

※ 道路法、船舶安全法、港則法、航空法、消防法は、適用法令のリストに入っていないが、
輸送上の注意はホスフィン、アルシンと同じ扱いであることが厚生労働省の「職場のあんぜんサイト」に記載されている。

1.対象品目の概要調査（5）

○輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

【ホスフィンの製造方法】

純度の高くない粗製ホスフィンは様々な方法によって製造することができる。
例えば、リン鉱石から作られる黄リンからは、

① 黄リンにアルカリを作用させる方法： $\mathbf{P_4} + 3\,\mathbf{KOH} + 3\,H_2O \rightarrow \mathbf{PH_3} + 3KH_2PO_2$
② 黄リンを高温で加水分解する方法
③ 黄リンを電解還元する方法
④ 黄リンを加熱して赤リンとし、その赤リンをリン酸中で水と接触させる方法

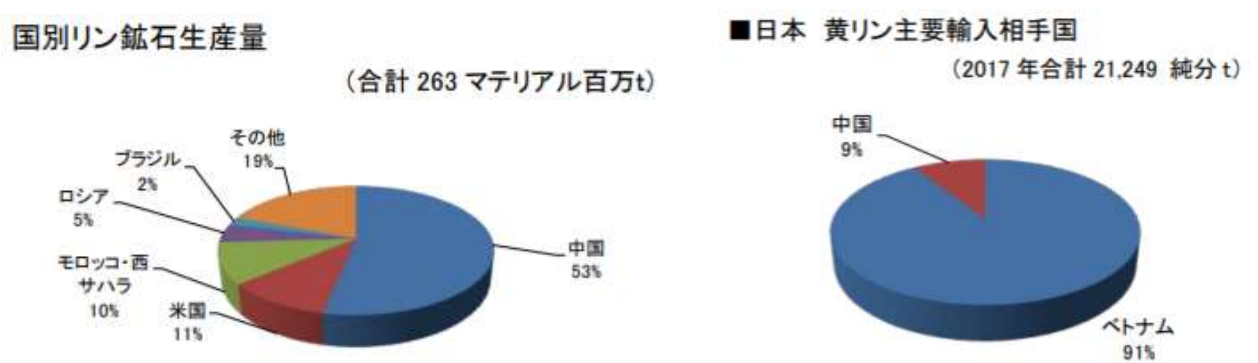
によって製造できる。他には

⑤ リン化物を加水分解する方法：$\mathbf{Ca_3P_2} + 6H_2O \rightarrow 3Ca(OH)_2 + 2\mathbf{PH_3}$

であってもよい。

図７-21-1に、リン鉱石の生産量と、日本の黄リン主要輸入相手国を示す。黄リン製造には、電力を多く必要とするので、日本は電気料金の安いベトナム、中国から輸入している。

図７-21-1 リン鉱石の生産量と、日本の黄リン主要輸入相手国



1.対象品目の概要調査（6）

○輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

【アルシンの製造方法】

非鉄製錬の副産物として得られる中間生成物(Ca_3As_2、As_2O_3、$AsCl_3$）を経て、下式の反応によりアルシン（AsH_3）を得る。
例えば、

$$Ca_3As_2 + 3H_2SO_4 \rightarrow 2AsH_3 + 3CaSO_4$$

$$4AsCl_3 + 3NaBH_4 \rightarrow 4AsH_3 + 3NaCl + 3BCl_3$$

$$Zn_3As_2 + 6H^+ \rightarrow 2AsH_3 + 3Zn^{2+}$$

が知られている。

【スチビンの製造方法】

非鉄製錬の副産物として得られる中間生成物(Sb_2O_3、$SbCl_3$）を経て、下式の反応によりスチビン（SbH_3）を得る。
例えば、

$$2Sb_2O_3 + 3LiAlH_4 \rightarrow 4SbH_3 + 1.5Li_2O + 1.5\ Al_2O_3$$

$$4SbCl_3 + 3NaBH_4 \rightarrow 4SbH_3 + 3NaCl + 3BCl_3$$

が知られている。

2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる材料の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は、水素化物の純度が99.999パーセントを超えるものという点で一致している。ただし、輸出貿易管理令では、「20モルパーセント以上の不活性ガス又は水素を含んだものを除く」とあり、数値が緩和されている。

輸出令	貨物等省令 条	項	号	イロハ	貨物等省令文言（全文）	パラメータ
7(21)	6	1	二十一		燐、砒素又はアンチモンの水素化物であって、純度が99.999パーセントを超えるもの（20モルパーセント以上の不活性ガス又は水素を含んだものを除く。） （運用解釈） 不活性ガス：ヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドン又は窒素をいう。	純度が99.999パーセント

Wassenaar規制番号 3桁	細番	Wassenaar規制文言（全文）
3C004		3C004 Hydrides of phosphorus, arsenic or antimony, having a purity better than 99,999%, even diluted in inert gases or hydrogen. Note 3.C.4. does not apply to hydrides containing 20% molar or more of inert gases or hydrogen.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

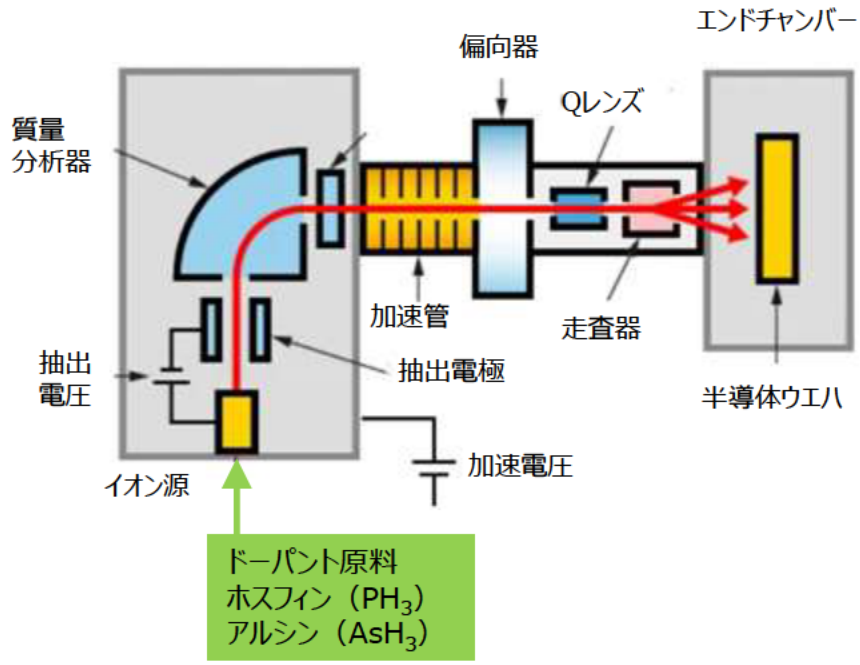
〇輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

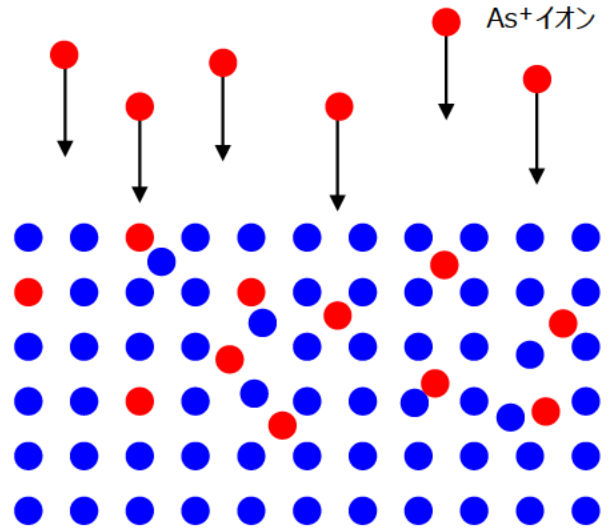
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【イオン注入による半導体デバイスの製造】

イオン注入装置は、半導体基板に特定の元素を注入する装置で、目的とする元素のイオンを発生させるイオン源、必要なイオンだけを取り出す質量分析器、イオンを電気的に加速する加速器、対象物であるターゲットを高真空状態とするチャンバーから成る（図7-21-2）。注入する元素はドーパントと呼ばれる。n型シリコンを作成するためSi基板にP、As等のV族元素を注入するが、その原料としては、対象品目になっている高純度ホスフィン（PH_3）や高純度アルシン（AsH_3）が用いられる。イオン注入装置の質量分析器にはイオン種を選別する機能があるが、異種元素であっても荷電量と質量が同じフラグメントは分別できないので、原料ガスには高純度のものが求められる。

図7-21-2　イオン注入装置





Si基板(青丸)にAs⁺(赤丸)が注入されている様子を示す。

3.品目の主たる用途の調査分析（2）

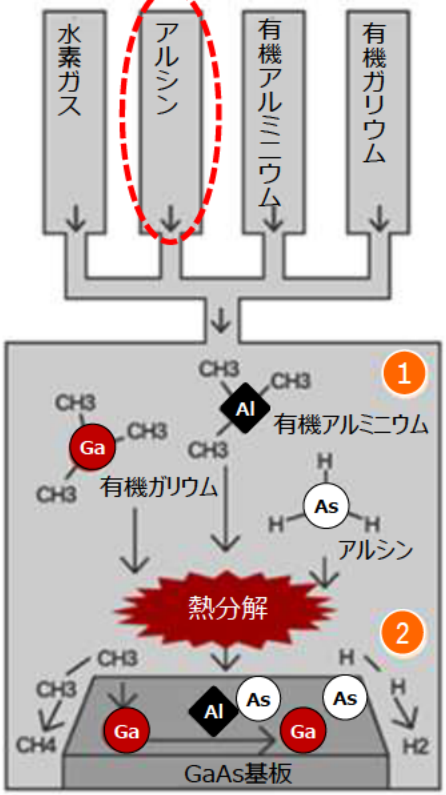
〇輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【MOCVD法による半導体デバイスの製造】

対象品目になっている燐・砒素・アンチモン水素化物は、有機金属気相成長法（MOCVD：metal organic chemical vapor deposition）と呼ばれる半導体デバイス製造工程の原料として用いられる（図7-21-3）。原料の純度が低い場合は、製造した半導体膜中に不純物起因の様々な結晶欠陥が発生する（図7-21-5）。

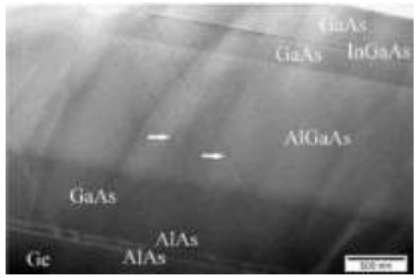
図7-21-3 MOCVD法によるAlGaAs層の形成



1 一定温度で材料を水素ガスと混合し、飽和蒸気を作り、反応炉の中にガスを送り込む。

2 炉の中に供給された材料は、高温に加熱された基板上で熱分解反応し、AlGaAs結晶が成長する。

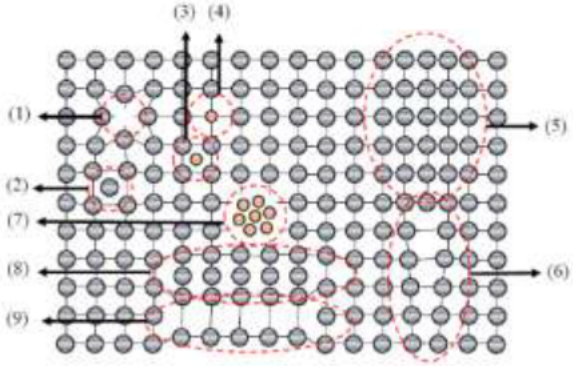
図7-21-4 AlGaAs半導体層の透過電子顕微鏡写真



MOCVD AIX 200RF反応器を用いて作成したレーザー発光ダイオードの断面構造。MOCVD原料としてチルアルミニウム、トリメチルガリウム、トリメチルインジウム、アルシンを使用している。

出典：Crystals 2018, 8, 311

図7-21-5 不純物に起因する結晶欠陥



(1) 原子空孔
(2) 格子間原子
(3) 格子間不純物
(4) 置換不純物
(5) 積層欠陥
(6) 刃状転位、
(7) 析出物
(8)(9) らせん転位

上記のうち(3)(4)(7)の欠陥は不純物起因

3.品目の主たる用途の調査分析（3）

〇輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

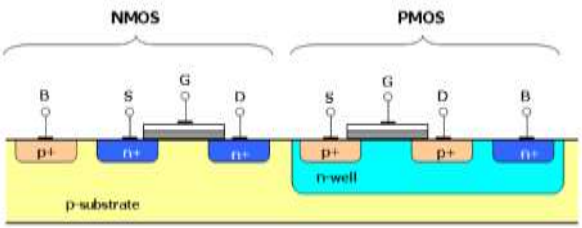
①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【代表的な半導体デバイスの構造】

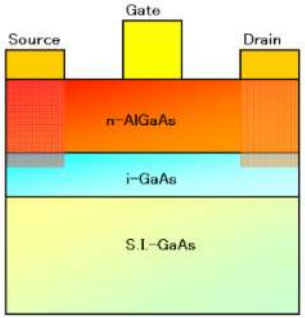
対象品目の燐・砒素・アンチモン水素化物を原料として、様々な半導体デバイスが製造される（図7-21-６）。

図7-21-６　代表的な半導体デバイスの構造

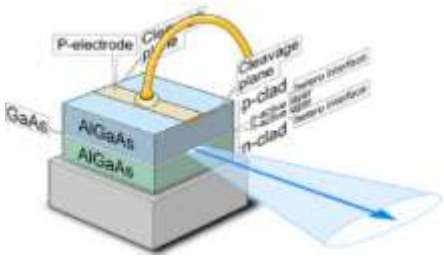
(a) CMOS（用途：論理回路）



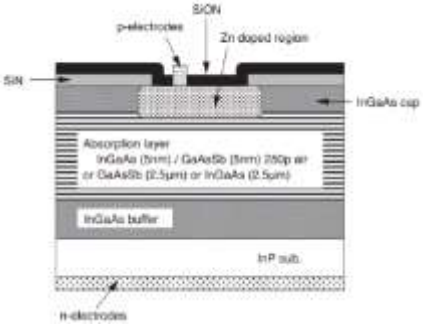
(b) HEMT（用途：高周波トランジスタ）



(c) レーザーダイオード（用途：レーザー光放射）



(d) 量子井戸型赤外フォトダイオード（用途：赤外線検出）



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

【民生用途】

対象品目である燐・砒素・アンチモン水素化物は、シリコン半導体デバイス及び化合物半導体デバイスの製造に原料として用いられ、高速通信システム・スーパーコンピュータ用部品、ナビゲーション機器用部品、各種センサーを含む赤外線・レーザー機器用半導体部品、無線機器用SHF部品などの電子機器に組み込まれる。

図7-21-7に、半導体デバイスを組み込んだ工業製品を示す。

シリコン半導体は、微細加工に優れる点を活かして、大規模集積回路を構成することができる。高速・高性能化した半導体デバイスは、サーバーなどの情報処理機器で使用される。また、小型化・低消費電力化したMCUはモバイル製品で用いられている。

III-V族化合物半導体は、その多くが直接遷移型の半導体であるため、発光ダイオード・レーザーダイオードをはじめとする発光素子や、特定波長域の赤外線を吸収することから赤外線センサに用いられる。また高い電子移動度を利用して、極超短波以上の増幅には、ガリウム砒素(GaAs)を用いた電界効果トランジスタが広く使われている。

図7-21-7　半導体デバイスを組み込んだ工業製品



3.品目の主たる用途の調査分析（5）

〇輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

【軍事用途（1）：携帯電子端末】

高性能かつ低消費電力となったシリコン半導体は、スマートフォンなどの携帯端末を発展させた。近年では、歩兵の装備も電子化されつつある。

例えば、図7-21-8に示すMRヘッドセットと呼ばれる電子機器である。MR（Mixed Reality）、すなわち複合現実とは、実際の環境と、コンピュータによって人工的に作り出された現実感を組み合わせ、複合的な空間知覚を生み出す技術のことを言う。個人用戦闘装備として暗視ゴーグルが実用化されているが、ここに、眼前に見える視覚映像に、地図情報、敵味方の位置情報や敵味方識別に関するデジタル情報を重畳することで、状況認識力を強化するツールとして用いられようとしている。

また、レーザー誘導爆弾、ミサイル、精密誘導砲弾などに攻撃目標の位置を指示するレーザー目標指示装置も小型化し、携帯式のものも登場している。光学系の高性能化と共に、プロセッサによる電子制御技術も大いに貢献している。

図7-21-8　軍事用MR（複合現実）ヘッドセット



3.品目の主たる用途の調査分析（6）

〇輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

【軍事用途（2）：暗視装置】

赤外線の大気透過率はMW帯（3～5μm）とLW帯（8～10μm）で高くなるので、これらの波長帯は、遠方からの撮像によく使用される。量子井戸型赤外線センサーは、障壁層や井戸層を形成する半導体の組成と井戸層の幅を調整することで、MW/LW帯に合わせることができる。このような理由から暗闇でも攻撃目標を捕捉できる暗視装置に使用されている（図7-21-9）。

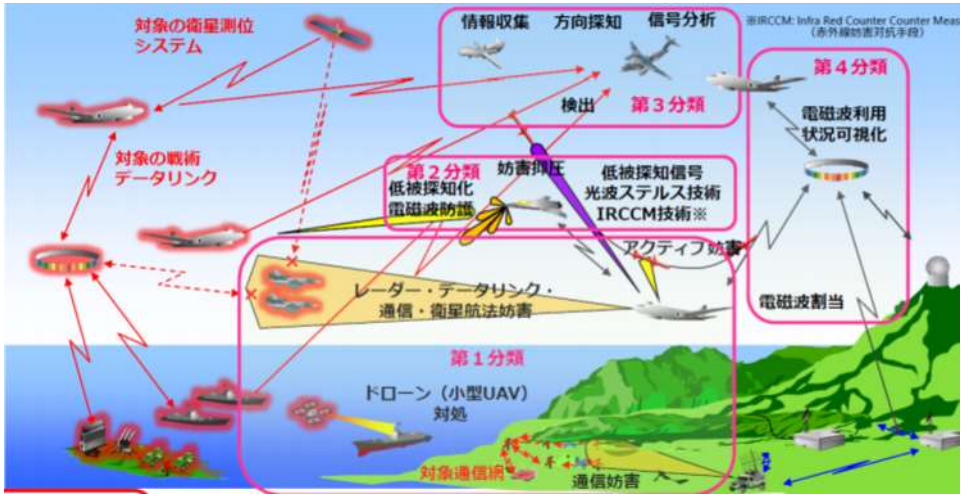
【軍事用途（3）：電子戦兵器】

組成の異なる複数の化合物半導体材料を積層して、高電子移動度トランジスタ（HEMT：High electron Mobility Transistor）を製造することができる。このような高周波デバイスは、マイクロ波の領域で超高速動作するため、軍用通信機器、レーダー、ミサイル誘導装置、通信妨害装置等に利用されている（図7-21-10）。

図7-21-9　赤外線カメラによる暗視画像



図7-21-10　マイクロ波を利用した電子戦兵器



4.品目の技術動向調査（1）

〇輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物
①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査
／技術動向と規制状況の分析、可視化

規制パラメータ　輸出令第7項(21)
燐、砒素又はアンチモンの水素化物であって、純度が99.999パーセントを超えるもの（20モルパーセント以上の不活性ガス又は水素を含んだものを除く。）
不活性ガス：ヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドン又は窒素をいう。

【規制パラメータ調査 1：純度の単位】

この頁では、純度の単位について説明する。

不純物の含有量の単位としては、
1ppb（parts per billion）すなわち10億分の1、
1ppm（parts per million）すなわち100万分の1、
1%（percent）すなわち100分の1、
がある。これらの関係は、
1ppb = 0.001ppm = 0.0000001%
10,000,000ppb = 10,000ppm = 1%
である。

純度とは、100%から不純物量を差し引いた値であるから、

純度99.999%以上とは、不純物が0.001%以下、すなわち 10ppm以下であることを保証する。

99.999%は、数字の「9」が５個並ぶので、 5N (ファイブ・ナイン)ともいう。

今日の半導体産業で使用されるガスの純度は、通常6N～6.5N、すなわち、99.9999～99.99995%であり、規制パラメータ（99.999%）よりもさらに高純度である。次ページで説明するように、発光輝度の高いLED、暗電流が少なく高感度の赤外線センサ、高速動作するトランジスタなど、優れた特性を備える化合物半導体の製造には、高純度ガスの使用が欠かせない。

4.品目の技術動向調査（2）

〇輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

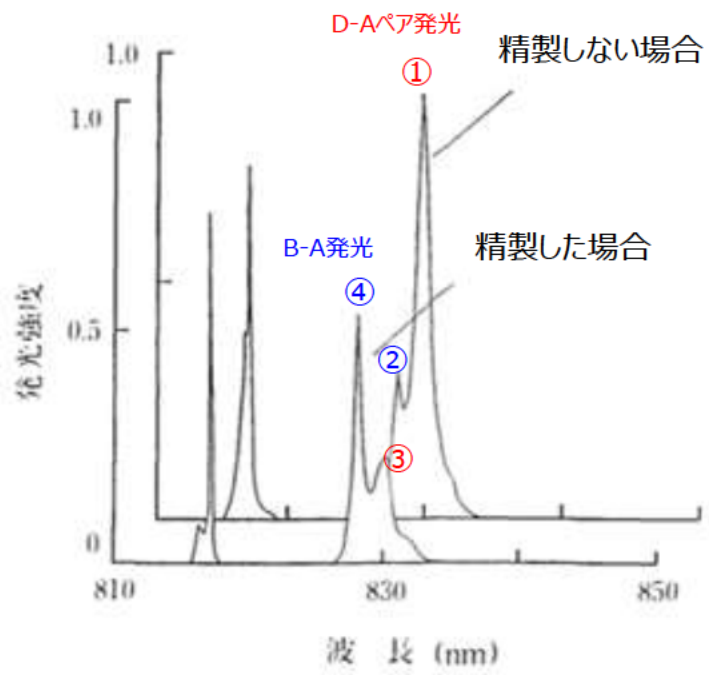
①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査
／技術動向と規制状況の分析、可視化

規制パラメータ　輸出令第7項(21)
燐、砒素又はアンチモンの水素化物であって、純度が99.999パーセントを超えるもの（20モルパーセント以上の不活性ガス又は水素を含んだものを除く。）
不活性ガス：ヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドン又は窒素をいう。

【規制パラメータ調査 2：高純度ガスの必要性】

GaAs、InP、AlGaAs、InGaAlPなどの化合物半導体を製造する際に、ホスフィン、アルシンなどの半導体材料ガス中に、硫黄、ケイ素、ゲ ルマニウムなどのn型不純物が数ppb存在するだけでLEDの発光輝度を低下させることが分かっている。
文献「表面技術　Vol.45, No,1,pp.38-42 (1994)」に掲載されている検証実験の結果を図7-21-11に示す。

図7-21-11 不純物としてモノシランを故意に15ppb（=0.0000015%）混入した場合のフォトルミネッセンス特性の変化



トリメチルガリウム($(CH_3)_3Ga$)、アルシン(AsH_3)、水素(H_2)を原料としてGaAs半導体層を形成する実験において、故意にモノシラン（SiH_4）を15ppb混入してガスの純度を低下させた場合は、フォトルミネッセンス評価で不純物起因の異常発光が認められた。

図中で、「精製しない場合（奥側の波形）」とはモノシランを15ppb混入させた低純度のガスがそのまま反応室に送られた場合であるが、フォトルミネッセンス評価では、本来のバンドアクセプタ間のB-A発光②が弱く、不純物起因のD-Aペア発光①が強い強度で観測されている。

これに対して、「精製した場合（手前の波形）」とは、モノシランを15ppb混入して純度を低下させたガスを、MN精製剤によってモノシランを１ppb以下まで除去し、再び高純度化してから反応室に送った比較実験になるが、同評価では、不純物起因のD-Aペア発光③が弱まり、本来のバンドアクセプタ間のB-A発光④が支配的になっている。

<フォトルミネッセンス>
物質に光を照射し、励起された電子が基底状態に戻る際に発生する光のことを言う。 この発光は物質の不純物や欠陥の影響を受け易いため、物質中の欠陥や不純物の解析に利用される。

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

規制パラメータ　輸出令第7項(21)
燐、砒素又はアンチモンの水素化物であって、純度が99.999パーセントを超えるもの（20モルパーセント以上の不活性ガス又は水素を含んだものを除く。）
不活性ガス：ヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドン又は窒素をいう。

【規制パラメータ調査 3：ガス精製前処理】

高純度化の第一段階として、鉱石から燐、砒素、アンチモンを抽出して中間生成物を合成する際に、化学的性質が似ているために分離し難い同族元素間、例えば燐を精製する場合では砒素及びアンチモンの除去が重要である。

例えば、特開2012-17230には、粗製黄リンから砒素及びアンチモンを除去し、高純度元素リンを製造する方法が開示されている。液状の粗製黄リンと、ヨウ素酸及びヨウ素酸塩から選択されるヨウ素酸含有化合物との接触処理をキレート剤の存在下に水溶媒中で行うことにより、高純度黄リンを回収することができる（図7-21-12）。

図7-21-12　特開2012-17230に開示されている高純度元素リンの製造方法および高純度リン酸の製造方法

＜実施例－１＞

２００ｍｌトールビーカーにイオン交換水１８０ｍｌを入れ、ＥＤＴＡ－４Ｎａを０．２ｇ加えて溶解した。更に粗製黄リン２４．２ｇと５ｗｔ％ヨウ素酸１６ｍｌを加えた。ヒーターにより加熱を開始し、粗製黄リンが液状化したら攪拌を開始した（回転数約３００ｒｐｍ）。液温が６０℃に到達後、６０℃に保持しながら３時間撹拌を継続した（回転数約３００ｒｐｍ）。なお、接触処理中のｐＨは１．８であった。途中、６０℃到達後、１５分、３０分、６０分、１２０分、１８０分に約1ｇの黄リンを採取して分析用サンプルを得た。サンプル中のＳｂとＡｓの分析値を表－1に示す。なお、黄リン中のＳｂの分析方法としては、冷却・固化した黄リン０．５～1．５ｇを濃硝酸５０ｍｌ中に入れ、酸化分解する。分解終了後２５０ｍｌメスフラスコに入れ、メスアップして分析用測定液とした。測定液は適宜希釈して、ＩＣＰ－ＭＳによりＳｂを測定した。また同じ分析用測定液を使用してＩＣＰ－ＡＥＳによりＡｓを測定した。

【表１】

表－１

撹拌時間	0分(ﾌﾞﾗﾝｸ)	15分後	30分後	60分後	120分後	180分後
Ｓｂ(ppb)	10000	16	3	10	15	18
Ａｓ(ppm)	192	86	59	58	59	55

4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

規制パラメータ　輸出令第7項(21)
燐、砒素又はアンチモンの水素化物であって、純度が99.999パーセントを超えるもの（20モルパーセント以上の不活性ガス又は水素を含んだものを除く。）
不活性ガス：ヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドン又は窒素をいう。

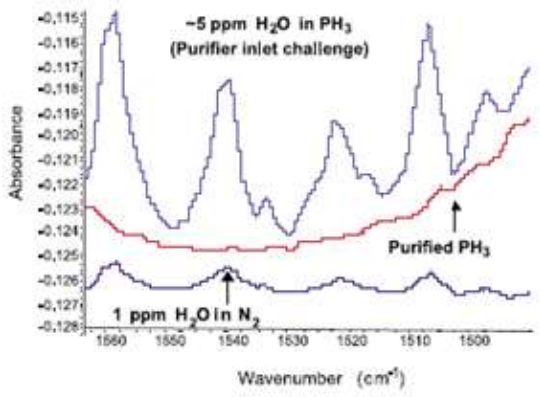
【規制パラメータ調査 4：ホスフィンの精製】

半導体製造プロセスに使用されるガス中の水分は、酸化等により直接半導体素子の性能を劣化させるのみならず、配管等の腐食を招き粒子汚染を発生させる。ガス製造メーカは、ppmオーダーの極微量水分でも検出できるオンラインモニタリング技術の開発にも取り組んでいる。

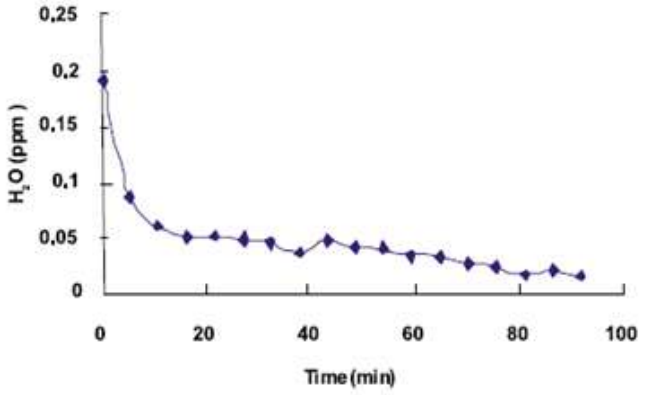
例えば、ホスフィンに含まれる水分量は、フーリエ変換赤外線分光法（FTIR）で測定できる。図7-21-13(a)は、ホスフィンに水分が5ppm含まれている場合の赤外線分光波形を示しているが、1ppmの標準ガスに対して、はっきりと違いが見えている。さらに、同図(b)は、純化器でホスフィン中の水分を除去していく過程をモニタした例を示しているが、0.2ppmから0.01ppmまで変化していく様がモニターされている。

図7-21-13　フーリエ変換赤外線分光法によるホスフィン中水分量のオンラインモニタリング

(a) ホスフィンに水分が5ppm含まれている場合の赤外線分光波形



(b) 純化器でホスフィン中の水分を除去していく過程をモニタした例



出典：大陽酸素技報　N0.23（2004）

4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

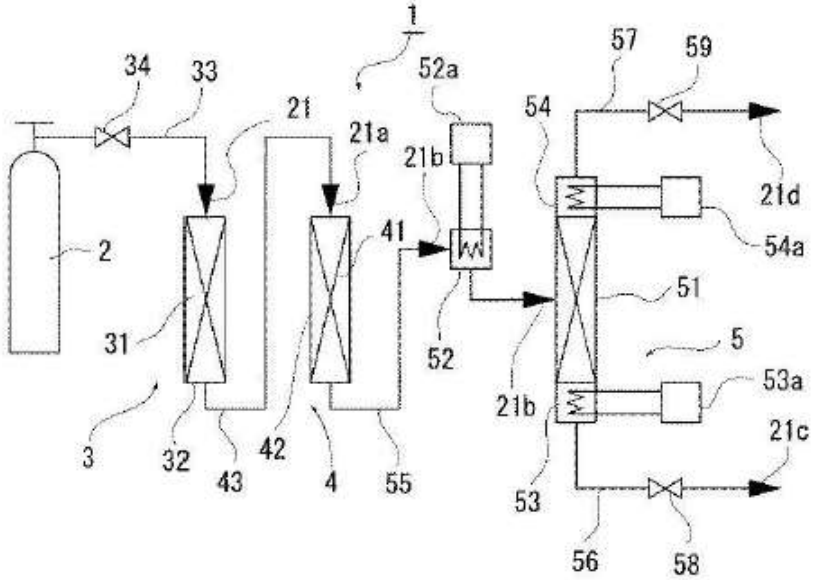
①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査
／技術動向と規制状況の分析、可視化

規制パラメータ　輸出令第7項(21)
燐、砒素又はアンチモンの水素化物であって、純度が99.999パーセントを超えるもの（20モルパーセント以上の不活性ガス又は水素を含んだものを除く。）
不活性ガス：ヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドン又は窒素をいう。

【規制パラメータ調査　５：アルシンの精製】

特開2005-8481には、アルシンを高純度化する方法が開示されている。合成したばかりの粗製アルシンには複数成分の不純物として（硫化水素、硫化カルボニルなどの酸性成分、水などの易吸着成分、一酸化炭素、酸素、二酸化炭素、炭化水素、シラン、ゲルマン等の低沸点成分）が含まれている。これらは、粗製アルシンンに対して、酸性成分除去処理、易吸着成分除去処理、低沸点除去処理を段階的に行うことで、高純度アルシンを得ることができる（図7-21-14）。

図7-21-14　特開2005-8481 に開示されたアルシンの精製方法及びその装置



成分	精製前濃度（ppm）	精製後濃度（ppm）
N_2	0．05	＜0．01
O_2	＜0．01	＜0．01
CO	3．5	＜0．01
CO_2	0．02	＜0．01
CH_4	＜0．01	＜0．01
C_2H_4	0．02	＜0．01
C_2H_6	0．03	＜0．01
SiH_4	0．002	＜0．001
GeH_4	0．006	＜0．001
H_2O	0．1	＜0．01
H_2S+COS	30	＜0．01

粗製アルシン ► 1次処理 吸着（ソーダライム）酸性成分除去 ► 2次処理 吸着（モレキュラーシーブ）易吸着成分除去 ► 3次処理 蒸留 低沸点成分除去 ► 高純度アルシン

4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化

【特許出願状況】

鉱石から燐、砒素、アンチモンを抽出して中間生成物を合成する工程と、中間生成物から水素化物を合成する工程からなる。必ずしも、一社で鉱石から対象品目を一貫生産しているとは限らない。これらの中間生成物は、多くの場合、非鉄精錬における副生成物として生産される。中間生成物を合成する工程では、化学的性質が似ているために分離し難い同族元素間、例えば燐を精製する場合では、砒素及びアンチモンを如何にして除去するか、ということが重要であり、水素化物を合成した後は、硫化物、水分、酸素、炭化水素の除去が重要である。表7-21-２に、関係する特許を時系列で列挙した。

表7-21-2　国内の出願状況

公開番号	発明の名称	出願人
特開1984-045913	ホスフィンの精製方法	日本化学工業株式会社
特開1985-260412	高純度ホスフィンの製造法	日本化学工業株式会社
特開1986-146716	三塩化砒素の製造方法	三菱金属株式会社
特開1987-100413	酸化砒素よりの三塩化砒素の製造方法	住友金属鉱山株式会社
特開1989-139781	ホスフィンの製造方法	製鉄化学工業株式会社
特開1989-164711	純粋ホスフィンの製造法	製鉄化学工業株式会社
特開1989-027966	高純度ホスフィンの製造法	日本化学工業株式会社
特開1995-267615	ホスフィンの精製方法およびその装置	日本酸素株式会社
特開1997-165209	ホスフィン含有ガス製造用の組成物、方法および装置	デゲッシュ　デ　チリ　リミターダ
特開2002-338216	高純度リンの製造方法	古河機械金属株式会社
特開2002-519295	高純度ホスフィンまたは他のガスを製造するための方法及び装置	エレクトロン・トランスファ・テクノロジーズ・インコーポレーテッド
特開2005-008481	アルシンの精製方法及びその装置	大陽東洋酸素株式会社
特開2012-17230	高純度元素リンの製造方法および高純度リン酸の製造方法	日本化学工業株式会社
W2020/137905	燻蒸用ホスフィン及びその製造方法、並びに燻蒸方法	日本化学工業株式会社

4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物
②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【世界の主な市場プレーヤー】

燐水素化物（ホスフィン）及び砒素水素化物（アルシン）を製造する企業は、世界各地に存在する（表7-21-3）。

アンチモン水素化物（スチビン）については、「Pubchem」で検索して、3社見つかったが、市場シェアの大きさについては不明である（表7-21-4）。

表7-21-3　燐・砒素水素化物化物を製造する主な企業

ホスフィン	
企業名	国籍・地域
大陽日酸	日本
日本化学工業	日本
Versum Materials	米国
Solvay	ベルギー
Jiangsu Nata Opto-Electronic Material	中国
Linde plc	多国籍

アルシン	
企業名	国籍・地域
大陽日酸	日本
Air Products	米国
VersumMaterials	米国
Air Liquide	フランス
Jiangsu Nata Opto-Electronic Material	中国
Linde plc	多国籍

表7-21-4　アンチモン水素化物化物を取り扱う企業

スチビン	
企業名	国籍・地域
THE Biotek	米国
Parchem	米国
Smolecule	米国

4.品目の技術動向調査（8）

○輸出令7項（21）燐・砒素・アンチモン水素化物
②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【関連企業】

燐・砒素・アンチモン水素化物を用いて半導体製品を製造する主な企業を表7-21-5に示す。

表7-21-5　燐・砒素・アンチモン水素化物を用いて化合物半導体製品を製造する主な企業

関連企業	国籍・地域
古川電子	日本
日亜化学工業	日本
東芝	日本
EMCORE, Bridgelux, Inc.,	米国
ByteLight,	米国
Lattice Semiconductor Corporation	米国
Plessey Semiconductors	英国
Gruppo SIAD	イタリア
Aixtron AG	ドイツ
AZZURRO Semiconductors AG	ドイツ
EpiGaN	ベルギー
Ammono	ポーランド

関連企業	国籍・地域
ANNEALSYS	フランス
Sanan Optoelectronics	中国
Semiconductor Manufacturing International Corporation	中国
Powerchip Technology Corporation	中国
Epistar	台湾
Vanguard International Semiconductor (VIS) Corporation	台湾
Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Ltd.	台湾
OOO GIRMET	ロシア
OOO HORST	ロシア
OAO Saturn	ロシア
Tower Semiconductor Ltd.	イスラエル

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（22）
炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（１）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

【炭化けい素（SiC）】

炭化けい素は、炭素とけい素の1:1の化合物で、天然には、隕石中に僅かに存在する。鉱物学上はモアッサン石(Moissanite)と呼ばれている。特徴は次の通り。

（硬度）ダイヤモンド、炭化ホウ素に次いで、地球上で３番目に硬い物質である。

（熱衝撃）熱伝導率が高く、また、熱膨張率が低い為、熱衝撃にはとても高い。

（耐熱性）熱安定性が強く、大気圧下では溶融することは出来ず、分解温度は約2545℃で極めて優れた耐熱性を有している。

（耐食性）極めて安定した化合部で、酸やアルカリにも侵されにくく、とても優れた耐薬品性を有してる。

（電気的性質）半導体の性質を有し、電気抵抗が発熱体として使用できる低抵抗領域から絶縁体に近い高抵抗領域までの広い範囲でコントロールできる。

従来型のシリコン半導体に比べると、オン抵抗が低く、200℃以上の高温でも動作可能であり、更には数倍の高速スイッチング動作が可能である。高速、高温および/または高電圧デバイス（パワーデバイス）に使用されている。

SiCとGaNの物性値を表7-22-1に示す。

絶縁破壊電界強度E_C：

絶縁破壊（絶縁性の喪失）を起こすことなく印加できる最大の電場（電圧を電極間距離で割ったもの）を表す。数値が大きいほど、絶縁耐力が高い。

Baliga（バリガ）の性能指数：

BFOM（Baliga Figure of Merit）＝$\varepsilon\mu_e Ec^3$で定義される。ここで誘電率：ε、電子移動度：μe （cm2/Vs）、絶縁破壊電界強度：Ec （V/cm）である。BFOMは物性定数で定まり、パワーデバイス性能の材料固有の限界性能の指標であり、数値が大きい方がパワーデバイスとしての性能が高い。

表7-22-1 SiCとGaNの物性値

項目	単位	Si	4H-SiC*	GaN
バンドギャップ	eV	1.12	3.26	3.39
電子移動度 μ_e	cm^2/Vs	1400	1000	1200
正孔移動度 μ_h	cm^2/Vs	600	120	10
絶縁破壊電界強度 E_c	MV/cm	0.3	3	3.3
熱伝導度 λ	W/cmK	1.5	4.9	2.1
飽和速度 V_{sat}	cm/s	1.0×10^7	2.0×10^7	2.5×10^7
誘電率 ε		11.8	10	9.5
Baligaの性能指数（対Si） $\varepsilon\mu_e Ec^3$		1	565	957

（＊）SiCはいくつかの結晶構造がある。4Hは六方晶である。

1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

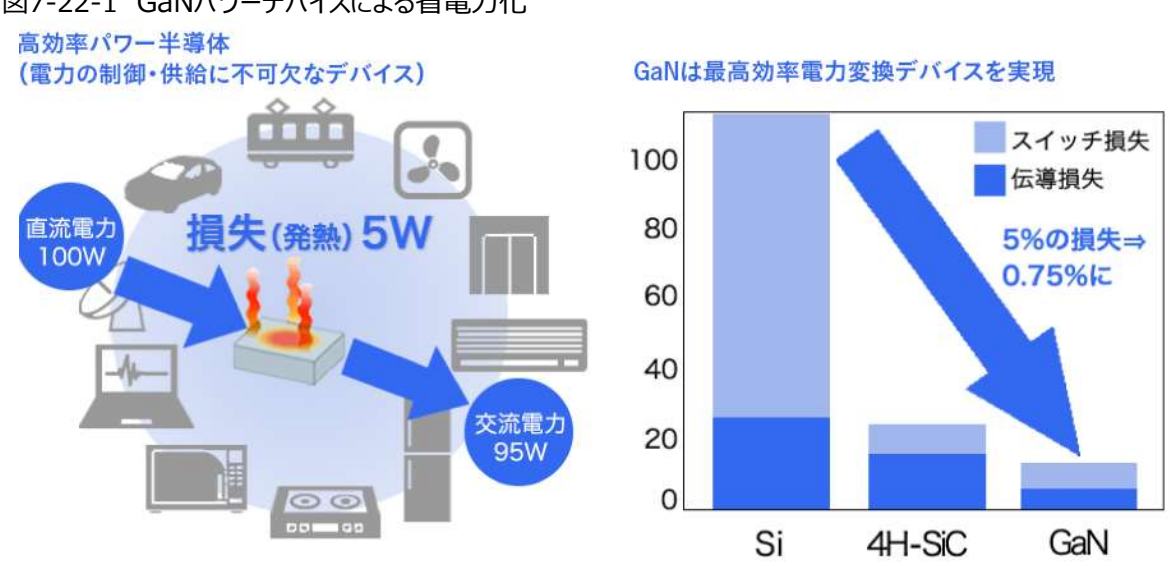
【窒化ガリウム（GaN）】

窒化ガリウム（GaN）は、ガリウム（Ga）の窒化物（N）であり、従来は青色LEDやレーザーダイオードの材料として広く用いられてきた。

前ページの　表7-22-1　SiCとGaNの物性値　の通り、GaNは、熱伝導度はSiCに劣るもののSiより高く、絶縁破壊電界強度などがSiCよりも高く、高耐圧化や低損失化、スイッチングスピードの高速化、ひいてはデバイスの小型化などが可能となるため、次世代パワーデバイスなどでの用途が注目されている。

名古屋大学の天野教授の試算では、家電製品から電気自動車や発電所での電力変換などに用いられている直流・交流変換器で使われているSiパワーデバイスをGaNパワーデバイスに置き換えると、2021年以前の原子力発電量の半分に相当する電力が省電力化できるとのこと。図7-22-1　参照。

図7-22-1　GaNパワーデバイスによる省電力化



https://www.cirfekikin.imass.nagoya-u.ac.jp/history.html

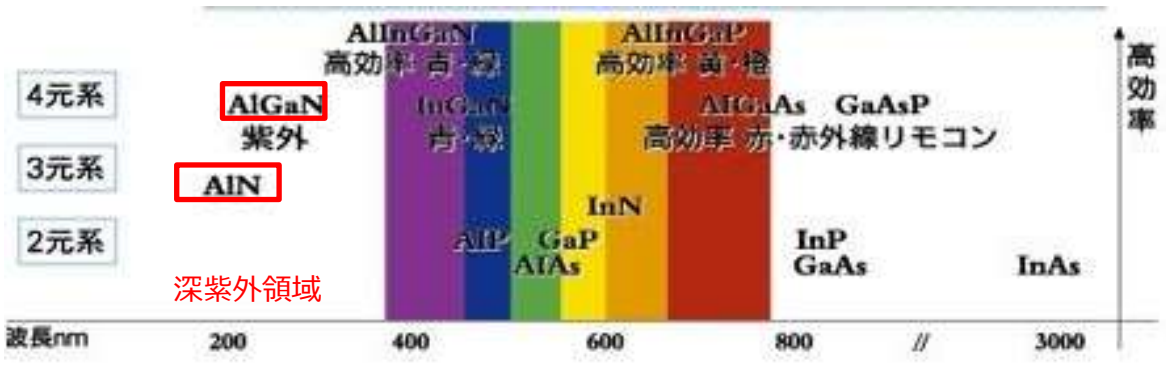
1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

【窒化アルミニウム(AlN)】
窒化アルミニウム(AlN)は、アルミニウムの固体窒化物で、最大321 W/(m·K)の高い熱伝導率を有し、電気絶縁体である。絶縁破壊電界強度はSiCやGaNの半分以下の1.4MV/cm、熱伝導度はSiと同程度の1.7W/cmKであるため、パワーデバイスには向かない。
室温で6.2eVのバンドギャップを有しており、青色～深紫外で動作する発光素子などにに利用されている。

【窒化アルミニウムガリウム（AlGaN）】
窒化アルミニウムガリウム(AlGaN)は、窒化アルミニウムと窒化ガリウムの任意の合金（$Al_xGa_{1-x}N$）であり、アルミニウム濃度により、バンドギャップを、3.4eV (xAl=0) から 6.2eV (xAl=1) までコントロールできる。
窒化アルミニウムガリウムは、インゴットや基板は存在せず、GaNやAlN基板上に成長させた薄膜として存在している。
AlGaNは、青色半導体レーザー、紫外線の検出器やAlGaN/GaN高電子移動度トランジスタなどに使用されている。

図7-22-２　化合物半導体の発光波長



https://www.cirfekikin.imass.nagoya-u.ac.jp/history.html

1.対象品目の概要調査（4）

〇輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

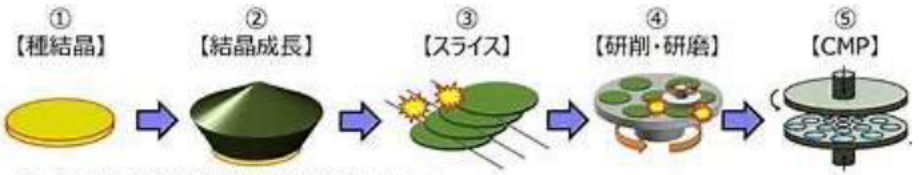
【基板（Wafer／ウェーハ】
基板の製造工程として炭化けい素（SiC)の例を 図7-22-3 示す。出来上がった炭化けい素基板の例を 図7-22-4 に示す。この基板上に集積回路を形成する。JISでは、半導体の基板を「ウェーハ」と記述する。

【インゴット】
インゴットは、基板製造工程の ②結晶成長させた円筒形の塊である。トヨタ自動車／デンソーが製造した炭化ケイ素インゴットを 図7-22-5 に示す。

【ブール（Boule）】
インゴットと同意である。厳密には、
インゴット：溶融状態から凝固した個体
ブール：化学合成などにより作製されたインゴット
窒化ガリウムは、ガリウムと窒素ガスの化学合成で作製されるのでブールであるが、国内では使い分けしない場合がある。語源は、化学合成して作製したサファイアの円筒形の原石をブールと呼んでいることによる。

【プリフォーム】
インゴットと基板の中間工程のもの。例えば、スライスした板状や研削までした板状のものである。

図7-22-3 炭化けい素基板の製造工程



①-②SiCの種結晶を成長させインゴットを生成
③ インゴットをスライスしSiCウエハーの素地を作成
④ スライスされたSiCウエハー素地を機械で研削・研磨
⑤ CMP＝Chemical Mechanical Polish
化学機械研磨で鏡面加工してSiCウエハーが完成

図7-22-4
炭化けい素基板



図7-22-5
炭化けい素インゴット／ブール



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認（１）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、 窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(22)	6		二十二	炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの半導体基板又はインゴット、ブール若しくはその他のプリフォームであって、20度の温度における電気抵抗率が10,000オームセンチメートルを超えるもの	20度の温度における電気抵抗率が10,000オームセンチメートルを超えるもの
			二十四	前二号のいずれかに該当する基板であって、当該基板の上に炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムのエピタキシャル層を少なくとも一層以上有するもの(第十八号に該当するものを除く。)	

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3C5		High resistivity materials as follows: a. Silicon carbide (SiC), gallium nitride (GaN), aluminium nitride (AlN) or aluminium gallium nitride (AlGaN) semiconductor "substrates", or ingots, boules, or other preforms of those materials, having resistivities greater than 10,000 ohm-cm at 20°C;
3C6		Materials, not specified in by 3C001, consisting of a "substrate" specified in by 3C005 with at least one epitaxial layer of silicon carbide, gallium nitride, aluminium nitride or aluminium gallium nitride.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

民生用途：
　SiCやGaNなどの化合物半導体基板を使用して製造された化合物半導体デバイスは、これまで実現が難しかった電気機器の小型化や省エネ性能の向上に利用される。
図7-22-6に、化合物半導体基板を使ったデバイスの民生用途の例を示す。

航空宇宙防衛用途：
　極低温から極高温域や放射線環境などの特殊な環境で動作する探知装置、誘導装置や、レーザー砲の発光源などに利用される。

図7-22-6　化合物半導体基板を使ったデバイスの民生用途例



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

〇輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化（１）

用途の規制はない。

4.品目の技術動向調査（3）

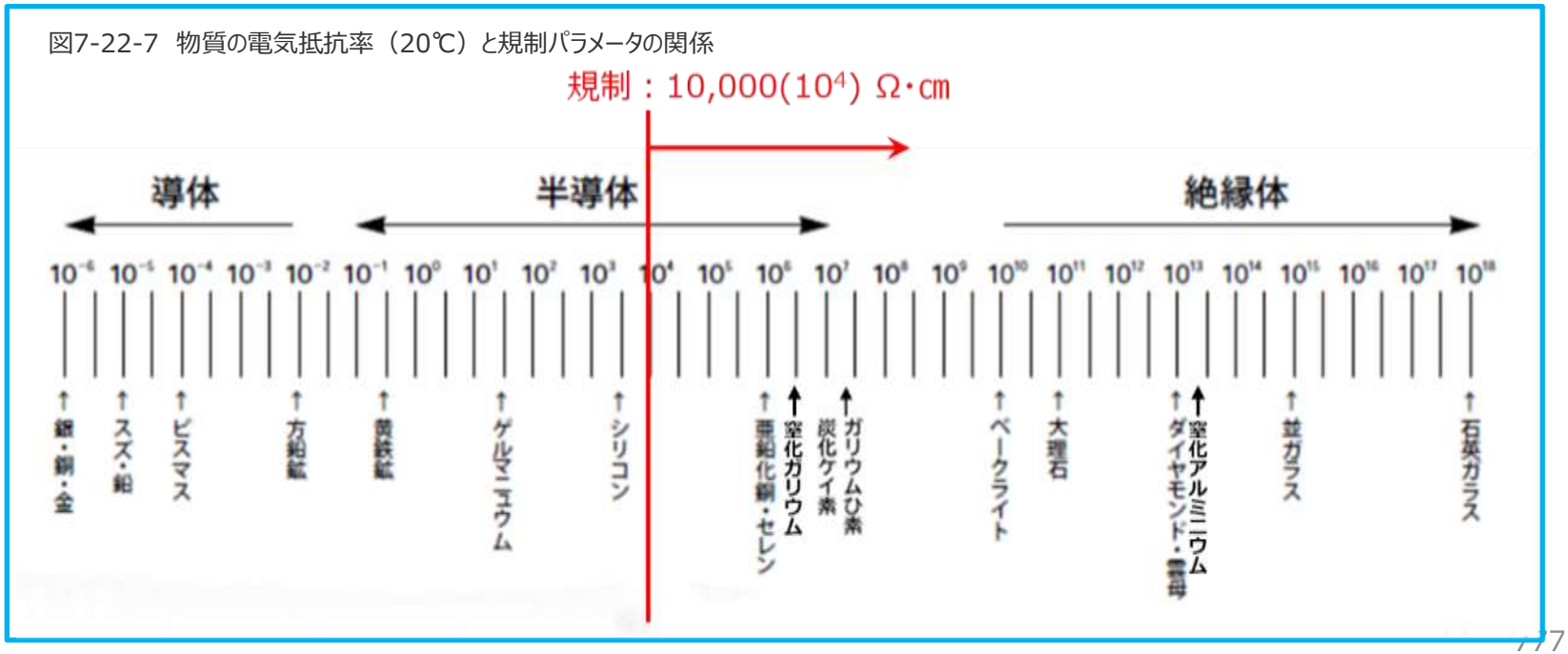
○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

規制パラメータ　輸出令第7項(1)
（二十二）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの半導体基板又はインゴット、ブール若しくはその他のプリフォームであって、２０度の温度における電気抵抗率が１０，０００オームセンチメートルを超えるもの
（二十四）前二号のいずれかに該当する基板であって、当該基板の上に炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムのエピタキシャル層を少なくとも一層以上有するもの（第十八号に該当するものを除く。）

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（１）

物質の電気抵抗率と規制パラメータの関係を図7-22-7 に示す。炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウムは単独で規制パラメータの電気抵抗率10,000Ω･cmw超えている。窒化アルミニウムガリウムの電気抵抗率は、調査したが不明である。
また炭化けい素、窒化ガリウムなどの化合物半導体単結晶基板は、結晶中にＧｅ（ゲルマニウム）やSi（シリコン）などをドープ量によって電気抵抗値コントロールでき、0.5Ω･cm以下にした基板が市販されている。

図7-22-7　物質の電気抵抗率（20℃）と規制パラメータの関係



4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

規制パラメータ　輸出令第7項(1)
（二十二）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの半導体基板又はインゴット、ブール若しくはその他のプリフォームであって、２０度の温度における電気抵抗率が１０，０００オームセンチメートルを超えるもの
（二十四）前二号のいずれかに該当する基板であって、当該基板の上に炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムのエピタキシャル層を少なくとも一層以上有するもの（第十八号に該当するものを除く。）

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（１）

【結晶欠陥による電気抵抗値の変化】
結晶欠陥の例を 図7-22-8 に示す。
結晶欠陥によって抵抗率が高くなるイメージを 図7-22-9　に示す。
結晶中に欠陥があると、結晶中を流れる電子が欠陥部で散乱し、電流量が減る。即ち、抵抗値が高くなる。
結晶欠陥量を定量化することは難しいので、結晶欠陥と電気抵抗の関係のグラフは見当たらない。

図7-22-8　結晶欠陥の例

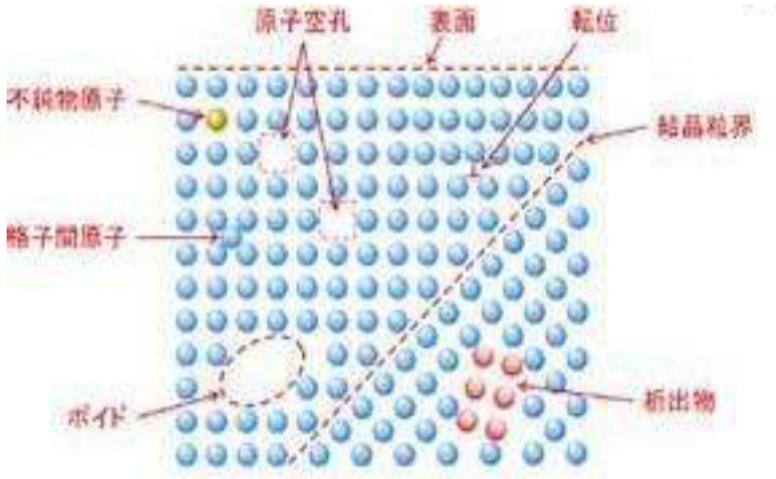
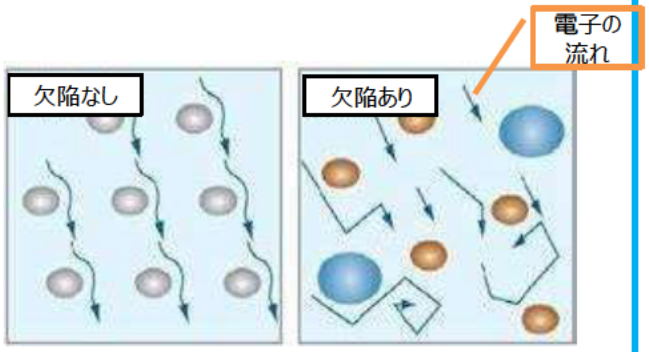


図7-22-9　結晶欠陥によって抵抗値が高くなるイメージ



結晶欠陥がないと電子の流れがスムース。

結晶欠陥があると電子の散乱が発生し、電流量が少なく、（抵抗値が高く）なる。

4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（１）

規制パラメータ　輸出令第7項(1)
（二十二）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの半導体基板又はインゴット、ブール若しくはその他のプリフォームであって、２０度の温度における電気抵抗率が１０，０００オームセンチメートルを超えるもの
（二十四）前二号のいずれかに該当する基板であって、当該基板の上に炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムのエピタキシャル層を少なくとも一層以上有するもの（第十八号に該当するものを除く。）

【ドープによる電気抵抗値の変化の事例】
　半導体は、不純物を添加してN型半導体、P型半導体を作製する。シリコンの場合、リン（P）加えると、リンはシリコンより電子の数が多いので、シリコンのみ状態（真性半導体）よりも電子過多となる。N型半導体と呼ぶ。ホウ素（B）の場合は、電子の不足（正孔過多）となる。P型半導体と呼ぶ。図7-22-10 にシリコンのN型半導体・P型半導体の模式図を示す。
加える不純物の量（ドープ量）が多くなる電気抵抗率/比抵抗が低くなる。
　図7-22-11に、シリコンの不純物ドープ量と比抵抗（電気抵抗率）を、
　図7-22-12に、炭化シリコンの窒素（N）ドープ量と電気抵抗率を示す。

図7-22-10　シリコンのN型半導体・P型半導体の模式図

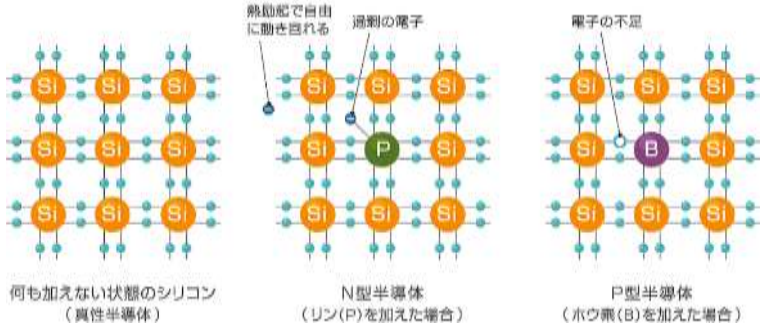


図7-22-11　シリコンの不純物ドープ量と比抵抗（電気抵抗率）

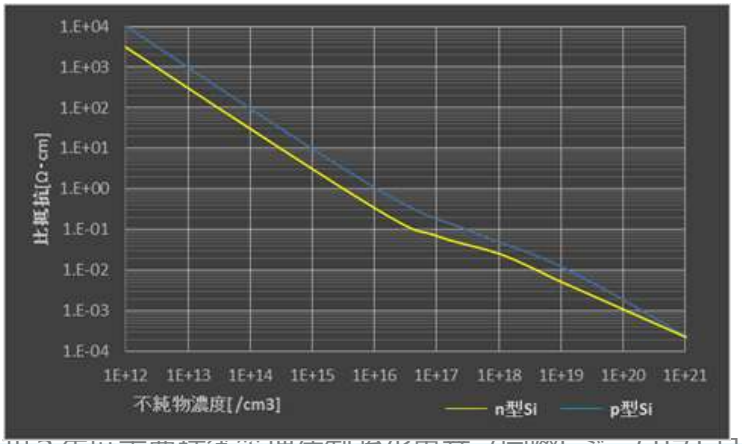
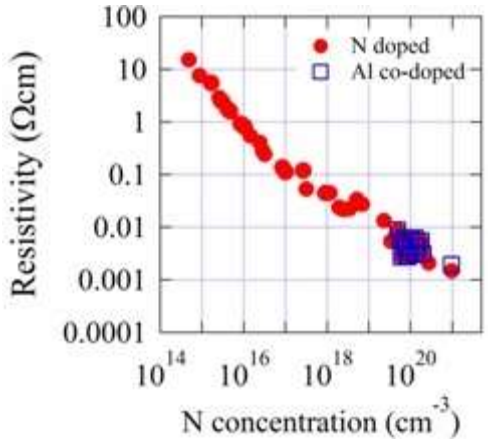


図7-22-12　炭化シリコン（SiC）の窒素（N）ドープ量と電気抵抗率



4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【炭化けい素基板の市場動向】

規制対象の高抵抗（２０度の温度における電気抵抗率が１０，０００オームセンチメートルを超えるもの）基板は、高周波デバイス（窒化ガリウムHEMT）用のベース基板として広く利用されている。携帯電話基地局の送信用増幅器、軍事用レーダーなどに多く用いられ、着実に使用量が増えており、自動車用レーダーや大容量データ送信などへの適用が期待されている。

炭化けい素基板は高い応用の見通しと産業的価値を持ち、中国の半導体産業の発展において重要な戦略的地位を占めている。長い間、炭化ケイ素基板のコア技術と市場は基本的に欧米の先進国に独占されており、製品サイズが大きいほど、技術パラメーターのレベルが高いほど、その技術的優位性が明らかになっている。中国の炭化ケイ素結晶研究は1990年代後半に始まったばかりで、開発の初期段階では技術的なボトルネックや能力の限界により工業化を達成できず、国際的な先進レベルから大きく遅れています。21世紀に入ってからは、国家産業政策の支援と指導のもと、中国の炭化ケイ素基板業の発展は大きく加速している。天河河田、山東天宇などの独立した知的財産権を持つ優れた炭化ケイ素基板製造企業が次々と現れた。日本国内企業は、技術主導型の開発を行い、炭化けい素基板と単結晶インゴットの製造を深く掘り下げ、単結晶と基板の製造技術を徐々に習得し、国内の炭化けい素基板製造技術の世界とのギャップを解消し、先進国との技術ギャップを徐々に縮めている。

世界の炭化けい素基板市場は、2020年には310.4米ドルとなり、2022-2027年の間に21.4%のCAGR（年平均成長率）で成長し、2027年末には9億9,380万米ドルに達する見込みである。

炭化けい素基板の主要プレーヤーを表7-22-2に示す。

表7-22-２ 炭化けい素基板の製造企業

会社	会社概要
Cree Inc.(米国) 現社名　Wolfspeed Inc.	クリーは、ノースカロライナ州立大学でシリコン結晶の成長方法を研究していた、助教授と学生らによって、1987年に設立された。輸送、電源、電源インバータ、ワイヤレスシステムなどの電力および無線周波数アプリケーション用の炭化けい素および窒化ガリウム基板（材料）とデバイスの開発製造会社である。1991年、世界で最初の商用炭化けい素基板を発売した。2021年10月、同社は社名をウルフスピードに変更した。SiC基板の世界シェアは約40％で第一位である。
II-VI Incorporated（米国） （II-VI Advanced Materials SiC Division）	II-VI社は、エンジニアリング材料および光電子部品のグローバルリーダーであり、通信、産業、航空宇宙、防衛、半導体資本設備、ライフサイエンス、家電製品、自動車市場における多様なアプリケーションのための革新的な製品を開発する垂直統合製造会社です。ペンシルベニア州ザクセンブルクに本社を置き、世界中に研究開発、製造、販売、サービス、流通施設を展開している。200㎜径のSiC基板を製造している。SiC基板の世界シェアは約35％で第二位である。

4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

表7-22-2 炭化けい素基板の製造企業（続き）

会社	会社概要
SK Siltron（韓国）	韓国唯一のSiC基板製造会社。1983年に設立された300㎜シリコンウェーハの製造会社である。 100㎜と150㎜口径のSiC基板を製造している。2020年、米デュポン社のSiCウェハー部門を4億5000万ドル（約5400億ウォン）で買収した。世界シェアは第３位。
日本製鉄株式会社（日本）	2018年にSiC基板事業から撤退し、関連資産は、昭和電工へ譲渡した。
昭和電工株式会社（日本）	昭和電工は、港区に本社を置く、石油化学、化学品、エレクトロニクス材料、無機材料、アルミニウムなどの総合素材製造企業である。SiC基板は、デバイスソリューション事業部が担当し、パワー半導体向けSiCエピタキシャルウェーハを製造している。
Dow Corning（米国） 現社名：Dow Silicones Corporation	ダウ・シリコーン・コーポレーション(旧ダウコーニング・コーポレーション)は、米国ミシガン州ミッドランドに本社を置くアメリカの多国籍企業です。シリコーンとシリコンベースの技術を専門とし、世界最大のシリコーンおよびシリコン関連製品生産企業である。日本国内では東レとの合弁会社（デュポン・東レ・スペシャルティ・マテリアル株式会社）で事業展開している。
ローム株式会社（日本） SiCrystal GmbH（ドイツ）	ロームは、京都市に本社を置き、従業員約22000人、売上訳1700億円のパワーデバイス、オプトデバイス、個別半導体などの製造会社である。 SiC基板は、ドイツにある子会社のSiCrystalで開発製造している。SiCrystal は、欧州最大のSiC単結晶ウェーハメーカー。ドイツが1994年にスタートさせたSiC単結晶成長技術開発プロジェクトを礎として、1997年に設立され、2001年よりSiCウェーハの量産、供給を開始した。2000年にはSiemensグループのFreitoronicsとの合併を経て、2009年よりローム(株)グループの1社となった。
Norstel　AB（スエーデン） 現在：STMicroelectronics（本社スイスのイタリアの多国籍半導体会社）	欧州最大のエピサービス供給会社。1993年より開始された、スウェーデンLinkoping大学とABB社のSiC共同研究を礎として、フィンランドのSiウエハメーカー、Okmetic社傘下を経て、2005年に独立。量産用SiCエピ炉と研究開発用枚葉式エピ炉の他、数多くの評価装置を有し、大量生産に耐えうる体制を築き上げている。2019年、STMicroelectronicsは、Norstelを買収した。

4.品目の技術動向調査（8）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

表7-22-2 炭化けい素基板の製造企業（続き）

会社	会社概要
SICC Materials（中国）	SICCは山東省で2010年に設立された、シリコンカーバイド基板材料の研究開発・生産の会社です。主な製品は、100㎜と150㎜口径の半絶縁およびN型SiC基板である。研究段階であるが200㎜口径のウェーハが製造できる。2019年、SiC基板の世界シェアは15％を超えた。 2018年、日本法人（SICC Global株式会社）を大阪に設立し、SiC基板の販売を行っている。
TankeBlue Semiconductor（中国）	タンケブルーセミコンダクターは、2006年9月に北京で設立され、2億1,582万元の資本を保有する半導体SiCウェーハの研究開発、製造する国営企業です。http://www.tankeblue.com/
Tongguang Crystal（中国）	Tongguang Crystalは、中国科学院半導体研究所によって2012年に設立され、半導体炭化ケイ素単結晶ウェーハの研究開発と製造を行う中国国家の戦略的企業である。
CENGOL（中国） 北京世纪金光半导体有限公司	2010年、北京で設立された国家戦略会社である。100㎜と150㎜口径のSiC基板を製造している。また、SiC基板を使った、パワーデバイス、パワーモジュール製品も製造している。 前身は、1970年の設立された中原半導体研究所である。http://cengol.com/
Synlight Crystal（中国） 同光晶体	Synlight Crystalは2012年5月に設立された。中国科学院の半導体研究所を基盤とし、中国でいち早く単結晶SiC基板の大量生産を実現した会社で、現在、100㎜と150㎜口径の高純度な半絶縁性および導電性の単結晶SiC基板などを製造している。
上記以外に、Tianke Heda(中国）、Shandong Tianyue（中国）及びZhongke Energy Saving（中国）があるが、詳細は不明。	

4.品目の技術動向調査（9）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【窒化ガリウム基板の市場動向】

規制対象の高抵抗窒化ガリウム（GaN）基板は、レーザーダイオードやLEDのようなオプトエレクトロニクス・デバイスとパワートランジスタやRF高周波デバイスなどの電子デバイスアプリケーションの両方で利用されている。

2016年における窒化ガリウム基板の市場流通量は約60万枚(2インチウェハ換算)と推定されている。市場としては、2017年から2022年の間、年平均成長率10%で伸び、2022年には1億ドル以上の規模に達すると予測している。

現在のGaN基板市場は寡占化が進んでおり、日本企業の住友電気工業(SEI)、三菱化学(MCC)、住友化学の100%子会社であるサイオクス(SCIOCS)の3社で85%以上のシェアを有している。これらの日本企業の窒化ガリウム基板市場での優位性は明らかである。

窒化ガリウム基板の主要プレーヤーを表7-22-3に示す。

表7-22-3 窒化ガリウム基板の製造企業

会社	会社概要
住友電気工業株式会社（日本）	1897年に大阪で創業した住友電工は、自動車、情報通信、エレクトロニクス、環境エネルギー、産業素材の5つの事業分野を世界約40カ国で展開している。GaNを含む各種化合物半導体基板及びエピタキシャルウェーハを製造している。
三菱ケミカル株式会社（日本）	1933年に創業し、千代田区に本社を置く、日本最大の化学会社である。窒化ガリウム（GaN）基板は、自社のエピタキシャル技術と化合物半導体の加工技術を用いた、高品質な単結晶基板である。高輝度LED用基板や、プロジェクター光源や高輝度ヘッドライトに使用される青色レーザーダイオード（LD）用基板として、幅広い用途で使用されている。 また、より高品質・高生産性を実現すべく、独自技術の液相成長法（ SuperCritical Acidic Ammonia Technology）により製造される窒化ガリウム基板 の開発を進めている。
株式会社サイオクス（SCIOCS）（日本）住友化学の100％子会社	サイオクスは、旧日立電線が1995年から開始したGaN基板研究を祖とし、2013年に日立金属、そして2015年から住友化学の関連会社としてがGaN事業を行っている。製品は、50㎜口径n型基板であり、100㎜口径基板及び高抵抗GaN基板を開発中である。本社は茨城県日立市。
Soitec（フランス）	ソイテックは、1992年にフランスのグルノーブル近郊で、フランス原子力代替エネルギー代替エネルギー委員会(CEA)が作成したマイクロ・ナノテクノロジー研究研究所CEA Letiの2人の研究者によって設立された。SOI（ Silicon-on-Insulator (SOI)）基板を中心として半導体基板製造会社である。GaNは、SiC基板上にエピタシシャル成長させた基板を製造している。

4.品目の技術動向調査（10）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

【窒化アルミニウム基板の市場動向】

高抵抗の窒化アルミニウム（AlN）基板は、熱伝導率が高いので、大電力パワーデバイスの熱放散基板として、また、やLEDやチップ抵抗器などに使われている。

窒化アルミニウム基板の主要プレーヤーを表7-22-4に示す。

表7-22-4 窒化アルミニウム基板の製造企業

会社	会社概要
株式会社MARUWA（日本）	株式会社MARUWAは、1973年、愛知県で創業したエレクトロニクス用・産業用セラミックス及び電子部品の開発製造会社である。ルーツは、江戸時代から続き陶磁器（瀬戸物）の陶芸家の家系で大正時代に和食器製造し、1960年に電子部品（通信機器向け特殊磁器、固定抵抗器用セラミック）分野へ進出した。窒化アルミニウム、窒化けい素、炭化シリコンなどの化合物半導体基板の開発製造を行っている。
Stellar Industries Corp（米国）	ステラ・インダストリーズ社は1985年に窒化アルミニウムのセラミックの専門会社として設立された。本社はマサチューセッツ州である。
Rogers（米国）	ロジャースは、1832年、製紙会社として設立され、2016年本社をアリゾナ州へ移転した。ロジャーズは、大量の熱を放散し、高出力レーザーダイオードやその他の熱発生光学デバイスの熱管理を提供するように設計された液体冷却材料を提供している。冷却材料として、窒化アルミニウム(AlN)が、追加され、現在AlN基板も製造している。
東芝マテリアル株式会社（日本）	2003年、東芝デバイス＆ストレージ社の子会社として設立され、ファインセラミックス、蛍光材料応用製品、高純度金属、磁性材料部品、タングステン・モリブデン、特殊金属材料などの部品・材料の開発、製造会社である。本社は、東芝横浜事業所内にある。

4.品目の技術動向調査（11）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

表7-22-4 窒化アルミニウム基板の製造企業（続き）

会社	会社概要
CeramTec（ドイツ）	セラムテックは、高度なセラミック部品を製造・開発しており、製品は、医療技術、自動車製造、エレクトロニクス、機器や機械建設、防衛技術、および化学工業で、多くの異なるアプリケーションで使用されている。窒化アルミニウム基板を製造している。本社はドイツのバーデン・ヴュルテンベルク州プロチンゲンにあります。
CoorsTek（米国）	クアーズテックは、1910年、Adolph Coorsによって設立されたプライベートカンパニーで、航空宇宙、自動車、化学、エレクトロニクス、医療、冶金、石油・ガス、半導体、その他多くの産業用の工業用セラミックスの企業である。本社と主要工場は、コロラド州ゴールデンにある。コバレントマテリアル（旧東芝セラミックス）を2014年に買収し、旧東セラの小国、秦野、刈谷3工場が同社の工場になり、炭化けいそ基板などを日本国内で製造している。
デンカ株式会社（日本）	1915年設立されたセラミックス材料の大手企業である。セラミックス以外では、ウィルス抗原診断キット、機能性エラストマー、セメント、肥料、合成繊維、食品包装材などの開発製造を行っている。本社は中央区。
株式会社フェローテックマテリアルテクノロジーズ（日本）	株式会社フェローテックホールディングス（日本）の事業会社。1989年設立。半導体等装置関連事業製品、電子デバイス事業製品（磁性流体・サーモモジュール・パワー半導体用基板）、車載関連事業製品の製造を行っている。本社は中央区。AIN基板を製造している。
KCC Corporation（韓国）	KCCは1958年にケウムカンスレート工業株式会社としてスタートし、以来、ガラス、窓/ドア、外装/内装材、床材などの建築材料の製造をしていた。半導体電源モジュールに使用されるAIN基板や参加アルミニウム基板を製造している。本社はソウル。

4.品目の技術動向調査（12）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

表7-22-4 窒化アルミニウム基板の製造企業（続き）

会社	会社概要
Shengda Tech（中国）	1988年、安徽省で設立。金属パッケージ、AINセラミック材料、電子ペーストの製造会社である。同社のAIN基板は、主にパワー電子モジュール、光ファイバー部品、半導体パワーデバイス、マイクロ波電源装置などに使用されている。AIN基板の年間生産量は、4000m^2相当である。
Zibo Linzi Yinhe High-Tech Development（中国） 淄博市临淄银河高技术开发有限公司	1993年、山東省で設立。パワーエレクトロニクス材料(DBCセラミック銅板)、デバイス(パワーエレクトロニクスモジュール)、パワーエレクトロニクス研究、設計、生産、販売の会社であある。 同社は敷地2万平方メートル、登録資本金は2180万元で、従業員125名の研究開発型企業である。
Nanjing Zhongjiang New Material Science＆Technology（中国） 南京中江新素材技術有限公司	南京中江新素材技術有限公司は、2012年、南京で設立された。アルミナ、窒化アルミニウム、銅セラミック基板の研究開発・製造を行う企業である。
LEATEC FINE CERAMICS CO. LTD.（台湾）	1991年に設立されたLEATECファインセラミックスは、台湾で唯一の化合物半導体基板の製造会社である。製品には、窒化アルミニウム、アルミナ（参加アルミニウム）の基板がある。本社は、桃園市にあり、工場は桃園に２か所と、中国本土の崑山市に１か所ある。
株式会社U-MAP/三菱マテリアル（日本）	名古屋大学発のベンチャー企業である株式会社U-MAPと三菱マテリアルは、高い熱伝導率に加えて、高い機械特性を両立させた窒化アルミニウム基板を共同開発中である。

4.品目の技術動向調査（13）

○輸出令7項（22）炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの基板（（１８）に掲げるものを除く。）又はインゴット、ブールその他のプリフォーム

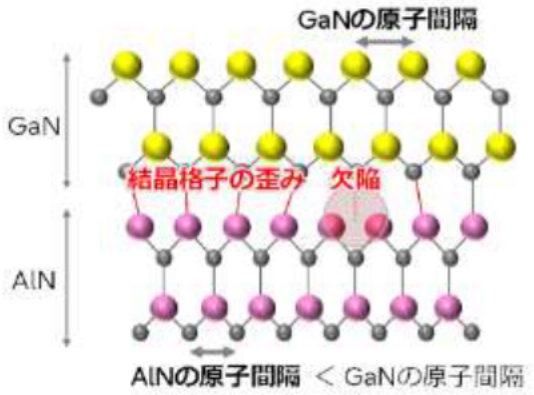
・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

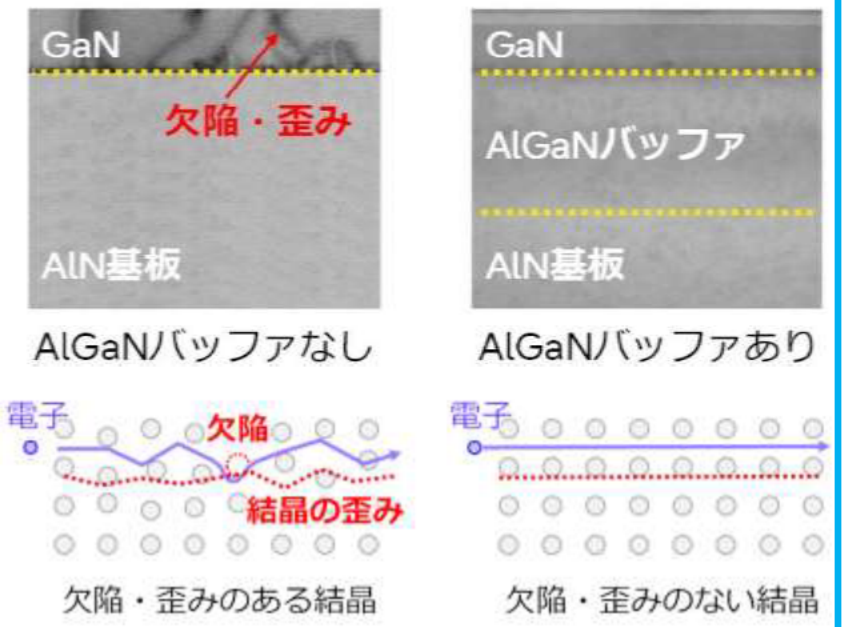
【窒化アルミニウムガリウム基板の市場動向】
規制対象の窒化アルミニウムガリウム（AlGaN）基板は，市場に存在しない。
シリコン、炭化けい素や窒化ガリウム基板上に窒化アルミニウムガリウムをエピタキシャル成長させた基板はあるが、これらは、輸出令第７項（１８）半導体基板の規制対象であり、本項の対象ではない。
将来的に本項の規制対象となりうる基板は、窒化アルミニウム基板上に窒化アルミニウムガリウムをエピタキシャル成長せた基板が考えられる。

研究的な情報として、富士通が2022年1月に公表した、AlN基板上にAlGaNをバッファー層として成長させ、その上に結晶欠陥や結晶格子の歪が殆どない高品質GaN膜を作製した。このGaNで作製される高周波高出力素子は、次世代パワーアンプとして、無線通信距離やレーダー探知距離を飛躍的に伸ばしていくことが期待できる。図7-22-13参照。

図7-22-13　AlGaNをバッファー層にした高品質GaN

2022年1月25日富士通ホームページで公表
（防衛装備庁安全保障技術研究推進制度の支援研究）





https://www.fujitsu.com/jp/about/research/article/202201-high-output-aln.html

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第7項（23）
多結晶基板

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（１）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

輸出令第7項（23）では図7-23-1に示す様に、多結晶基板上での非エピキシャル単結晶層、エピキシャル単結晶層を対象としている。以下に多結晶基板の理解で重要な（１）基板の構成、（２）セラミックス、（３）貼り合わせについて説明する。

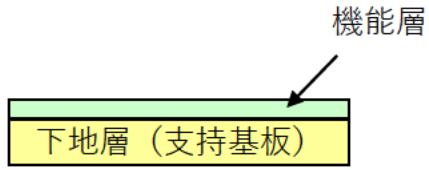
図7-23-1　対象となる多結晶基板



（１）基板の構成

機能層としては半導体単結晶だが、下地層（支持基板）としては多結晶（セラミックス）・ガラス（非晶質）が組み合わされ、コストダウン、絶縁性向上、熱伝導性向上、剛性向上・柔軟性向上などが確保される。図7-23-2に基板の構成を示す。

図7-23-2　多結晶基板の構成



多結晶半導体としてよく使われているのが太陽電池に使われている多結晶シリコンである。単結晶シリコン製造時に発生した端材や不良品を集めて製造される。単結晶シリコンに比べて、太陽光発電の発電効率は単結晶シリコンに比べて若干下がるが、製造コストが安い。

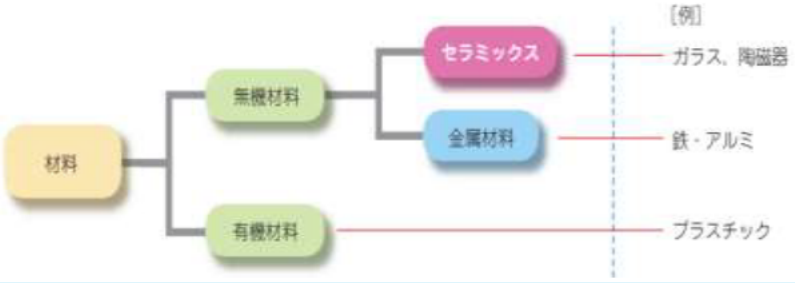
1.対象品目の概要調査（２）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

（２）セラミックス

材料には，無機材料と有機材料（プラスチックスなど）があり、無機材料の中で金属（鉄や銅など）以外の材料（ガラス，陶磁器など）がセラミックスである。セラッミックスの位置づけを図7-23-3に示す。

図7-23-3 セラッミックスの位置づけ

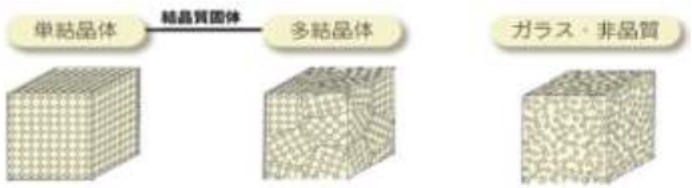


セラミックスの状態は構造（構成原子の並び方）によって表7-23-1および図7-23-4のようになる。
粉体を焼き固めることによってできる多結晶体は、特に 、「焼結体」と呼ばれる。

表7-23-1セラミックスの分類

結晶体	単結晶体	構成原子が規則正しい
	多結晶体	細かい単結晶の粒が集まって
非結晶（ｱﾓﾙﾌｧｽ）		原子の並びが周期性や規則性をもたない

図7-23-4 セラミックスの結晶構造



1.対象品目の概要調査（３）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

（３）貼り合わせ

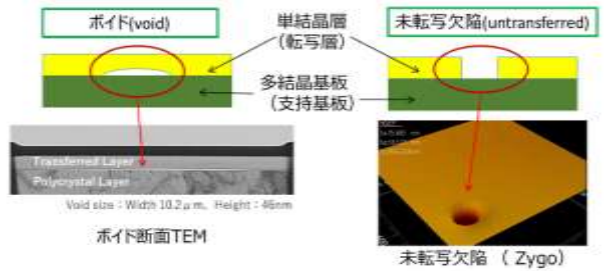
非エピキシャル多結晶基板として、単結晶基板と多結晶基板を使った貼り合わせがある。高価なSiC基板を安価に製造する方法として単結晶SiC基板と多結晶SiC基板を張合わせる。張り合わせた後、単結晶基板を薄く残したまま多結晶基板を引きはがすと、多結晶基板の上に非エピキシャル単結晶層が形成される。一部薄く引きはがされたSiC単結晶基板を再利用でき、コスト削減を可能としている。その概略を図7-23-5に示す。

図7-23-5 単結晶SiC膜製造プロセス



貼り合わせプロセスにおいて、図7-23-6に示すような基板内に微小のボイドと未転写欠陥が発生することがある。

図7-23-6 貼り合わせ単結晶SiC膜の欠陥



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令第7項（23）多結晶基板

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
7(23)	6		二十三 二十四	多結晶基板又は多結晶セラミック基板であって、20 度の温度における電気の抵抗率が10,000オームセンチメートルを超えるもののうち、当該基板の表面にシリコン、炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アル ミニウムガリウムの非エピタキシャル単結晶層を少なくとも 一層以上有するもの 前二号のいずれかに該当する基板であって、当該基板の上に炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムのエピタキシャル層を少なくとも一層以上有するもの(第十八号に該当するものを除く。)	20度の温度における電気の抵抗率が10,000オームセンチ メートルを超える

Wassenaar規制番号		Wassenaar規制文言（全文）
3桁	細番	
3C5	b	b. Polycrystalline "substrates" or polycrystalline ceramic "substrates", having resistivities greater than 10 000 ohm-cm at 20°C and having at least one non-epitaxial single-crystal layer of silicon (Si), silicon carbide (SiC), gallium nitride (GaN), aluminium nitride (AlN), or aluminium gallium nitride (AlGaN) on the surface of the "substrate".
3C6		Materials, not specified in by 3C001, consisting of a "substrate" specified in by 3C005 with at least one epitaxial layer of silicon carbide, gallium nitride, aluminium nitride or aluminium gallium nitride.

比較原文

・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html

・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（1）

多結晶基板の用途として、代表的な（１）太陽電池、（２）パワー半導体（貼り合わせ技術）、（３）LED（エピタキシャル成長技術）を説明する。

（１）太陽電池

多結晶基板の用途として太陽電池がある。太陽電池の多結晶基板の位置づけを、図7-23-7に示す。太陽電池には非常に多くの種類があり、現在、実用化もしくは研究がすすめられているものだけでも数十種類ある。太陽電池を分類する方法は「材料の種類による分類」、「材料の厚みによる分類」、「動作原理による分類」などいくつかの方法がある、「材料の種類」によっておおまかに分類すると、下の表のように太陽電池はシリコン系、化合物半導体系、有機系の3つに分けることができる。

図7-23-7　単結晶シリコンと多結晶シリコンの太陽電池の製造方法



3.品目の主たる用途の調査分析（２）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（2）

多結晶基板の用途として太陽電池の単結晶シリコンと多結晶シリコンの太陽電池の製造方法を図7-23-8に示す。多結晶シリコン太陽電池は単結晶シリコン太陽電池と比較して、コストの低減が見込まれているが、結晶欠陥、粒界、不純物、応力などの種々の問題がある。

多結晶シリコン基板は、単結晶シリコンに比べてウェハー単位での純度が低いため、変換効率は20～23%程度（単結晶シリコン25～27%）になるが、単体の製造単価が安価に抑えられるため、現在の住宅用太陽光発電システムの9割を多結晶シリコンが占めている。単結晶シリコン基板は、純度の高い（99.99999%）シリコンを作るために溶融炉から引き上げるという作業を行っているため、製造コストが高くなる。また、円柱状のインゴット(塊)から切り出される単結晶シリコンは製品化に際して八角形に加工されるが、セル同士の間に隙間ができやすくパネル上に無駄なスペースが生まれてしまう場合がある。シリコンの粒から成る多結晶シリコンは方形に加工することが容易であるため、パネル上の隙間を少なくすることが可能である。ただし単結晶シリコンに比べると面積当たりの発電効率は劣るため、初期費用の回収期間や売電に至るまでに時間がかかる。多結晶シリコンに関しては、シャープや京セラが大きなシェアを獲得していたが、ともに販売の中心はすでに中国メーカーからのOEM製品になっている。

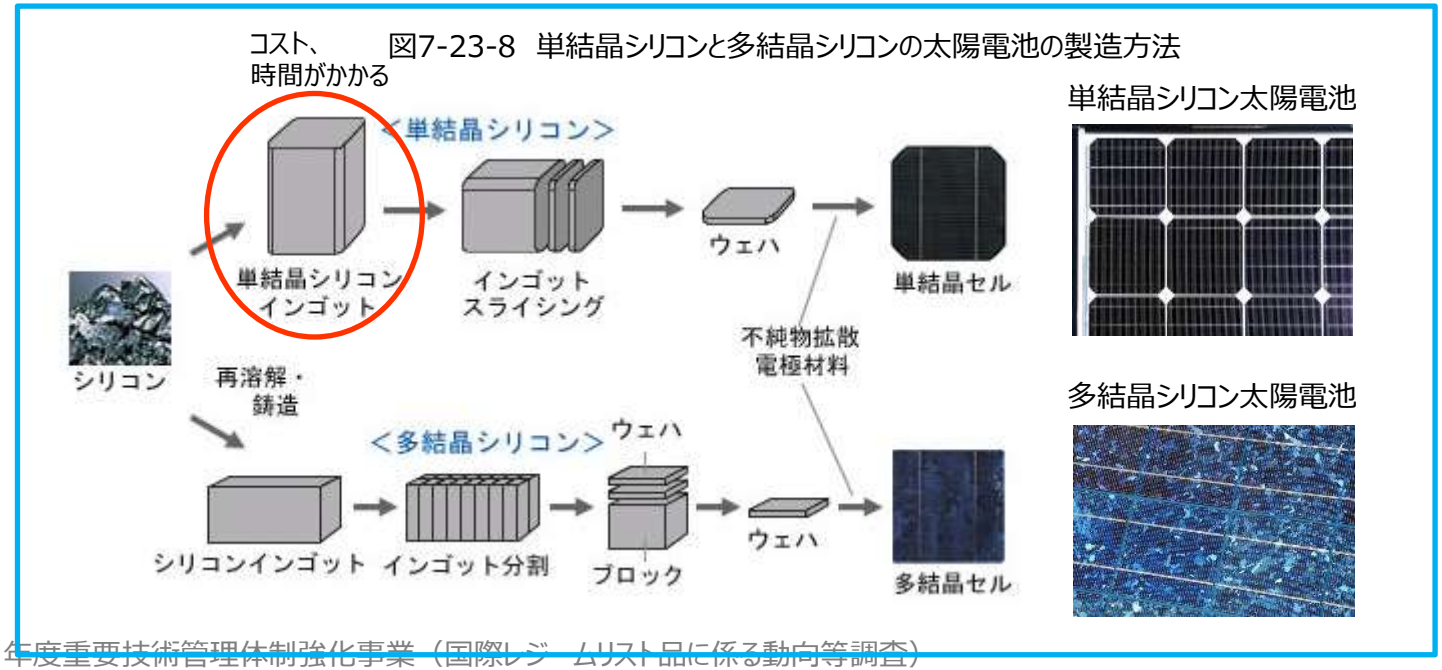


図7-23-8　単結晶シリコンと多結晶シリコンの太陽電池の製造方法

3.品目の主たる用途の調査分析（３）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（3）

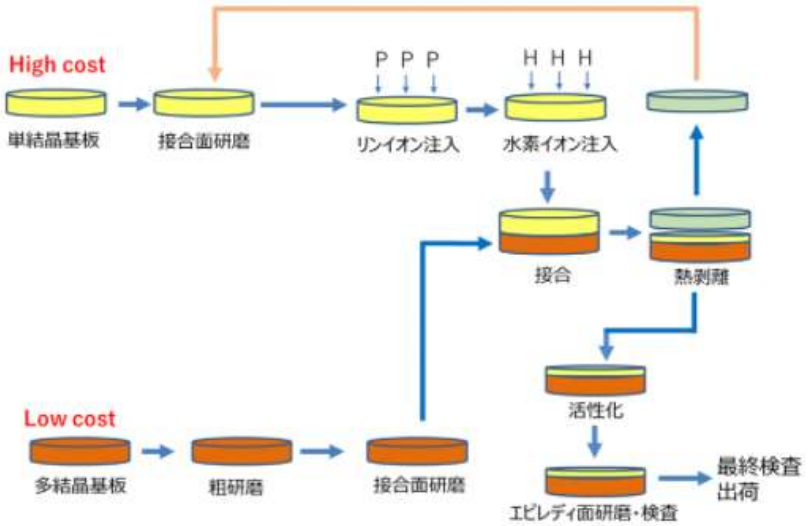
（２）パワー半導体（貼り合わせ技術）

多結晶基板の用途として、製造が容易な多結晶基板を用いコストを削減することが研究されている。例として、SiCパワー半導体で使用される単結晶SiC基板を表層の単結晶部分と支持基板となる多結晶SiC基板を貼りあわせることでデバイスの低コスト化を実現しようとしている。SiC単結晶基板と多結晶基板の貼り合わせの例を図7-23-9に示す。

多結晶SiCは材料としては低価格ながら、研磨面状態が粗く、Si、単結晶SiCの代替デバイ ス材料としての貼り合せ素材の条件を満たさない。表面粗さRa0.3nm以下、高品質用途としてはRa0.1nm以下が求められている。基板表面をナノレベルで研磨する技術が必要である。

しかしながら多結晶SiCは、硬く、研磨に多大な時間を要する。研磨プロセスの革新で時間を短縮することはコスト削減につながる。また、現在３～４インチ基板が出回っているが、シリコンなど従来の半導体プロセスとしては６インチ以上が主流であることから、近い将来のニーズとして効率的な生産性を検討する際、SiC基板サイズは６～８インチ対応とするのが適当である。現在、４インチでのテストにおいても非常に長時間を要しているが、６インチ、８インチ対応技術とするには、加工時間の短縮に加えて面粗さ・キズ対策、また基板の破損を防止するための反り・歪み対策などの課題があげられている。

図7-23-9　SiC単結晶基板と単結晶基板の貼り合わせの例



3.品目の主たる用途の調査分析（４）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査（4）

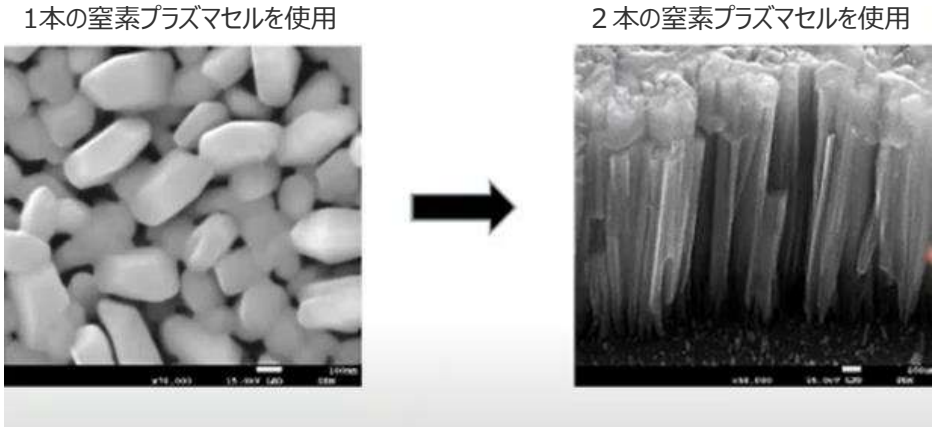
（３）LED（エピタキシャル成長技術）

多結晶基板の用途として、LEDなどの製造が容易な多結晶基板を用いコストを削減することが研究されている。単結晶シリコン基板は、純度の高い（99.99999%）シリコンを作るために溶融炉から引き上げるという作業を行っているが、 多結晶基板ではその必要がなくコストの低減につながる。しかし、多結晶基板上のエピタキシャル成長は結晶の方向性が定まらず、所望の電子の移動ができない大きな問題がある。

これらを解決する研究例として、特願2017-012847の「窒化物半導体の製造装置およびその製造方法に関し、GaN系薄膜を多結晶基板上に成長させること」を目的した特許がある。この特許では、２本の窒素プラズマセルを有する分子線エピタキシー装置によって石英ガラス及び非晶質炭素被覆グラファイト基板上に直接成長させ、GaN系薄膜を柱状結晶として成長させている。これにより上下の電子の移動が可能になり、各種の省電力及び大面積化が可能で安価な窒化物系光電変換のデバイス形成が可能になるとしている。（図7-23-10）簡素化された製造装置、プロセスが今後の研究課題である。

この他にも、コストや大面積化で有利な多結晶基板上へのエピタキシャル成長による薄膜生成の研究が行われている。

図7-23-10　石英ガラス基板上に直接成長したGaN系薄膜の断面画像



3.品目の主たる用途の調査分析（５）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

用途の規制はない。

4.品目の技術動向調査（１）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

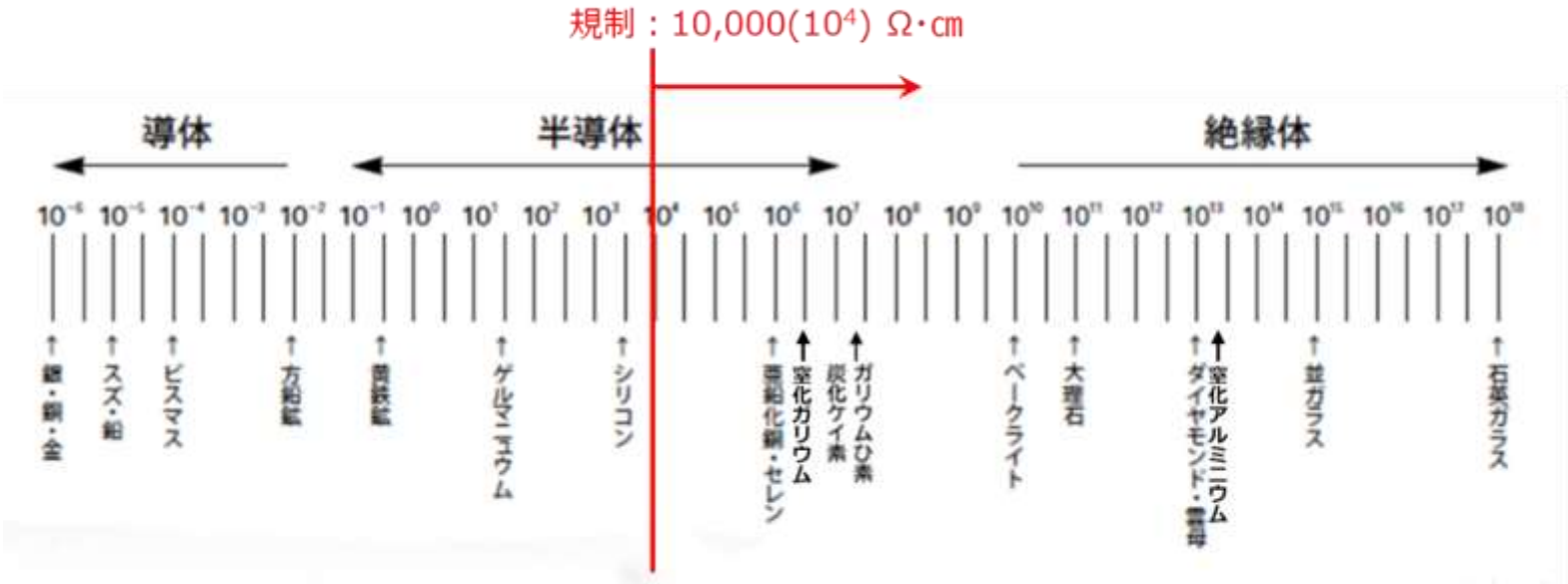
①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／技術動向と規制状況の分析、可視化（１）

「電気抵抗率が10,000オームセンチメートルを超えるもの」の物質の電気抵抗率と規制パラメータの関係を図7-23-11に示す。
炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウムなどは、規制パラメータの10,000Ωセンチメートルを超えており、規制対象となっている。

規制パラメータ　輸出令第7項(23)

多結晶基板又は多結晶セラミック基板であって、20 度の温度における電気の抵抗率が10,000オームセンチ メートルを超えるもののうち、当該基板の表面にシリコン、炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムの非エピタキシャル単結晶層を少なくとも 一層以上有するもの
前二号のいずれかに該当する基板であって、当該基板の上に炭化けい素、窒化ガリウム、窒化アルミニウム又は窒化アルミニウムガリウムのエピタキシャル層を少なくとも一層以上有するもの

図7-23-11　物質の電気抵抗率と規制パラメータの関係



4.品目の技術動向調査（２）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（１）

市場調査では、実際に製造されている（１）太陽電池と（２）パワー半導体の生産及び技術動向を説明する。

（１）太陽電池

太陽電池は近年まで日本企業のシャープ、京セラなどが高いシェアを持っていたが、現在では撤退もしくは中国企業のOEM製品の購入がほとんどとなっている。

有識者の情報によると、現在では単結晶の最高効率が27.3%程度、多結晶が約23.3%となっており（次頁図7-23-14）数年前より数%改善されている。また、単結晶と多結晶の比率も2018年は多結晶の方が多かったが、2020年では、単結晶が88%を占めている状態となっている。（図7-23-12）これらは変換効率の良いPERC 構造（Passivated Emitter and Rear Cell）の出現によるもので、中国企業を中心にこの構造を取り入れ、シェアを拡大している。従来のセル構造とPERCセル構造の比較を図7-23-13に示す。PERCセル構造ではパッシベーション膜を挿入することで、発電ロスを抑制している。

パナソニック（日本）は、このパッシベーション膜の箇所にアモルファスシリコンを採用した「HIT」という商品を開発し生産している。このアモルファスシリコンで全面を覆うことにより、PERCセルより変換効率が良くなると公表している。

図7-23-12　太陽電池セル　単結晶と多結晶の比率

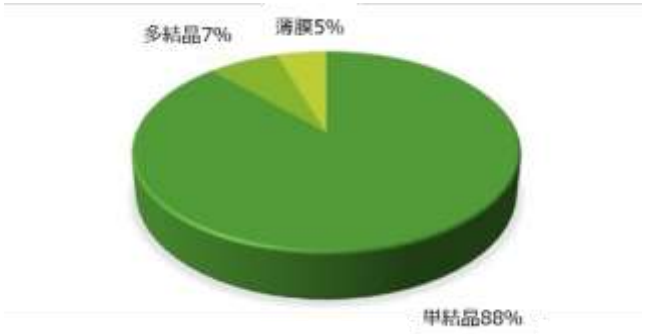
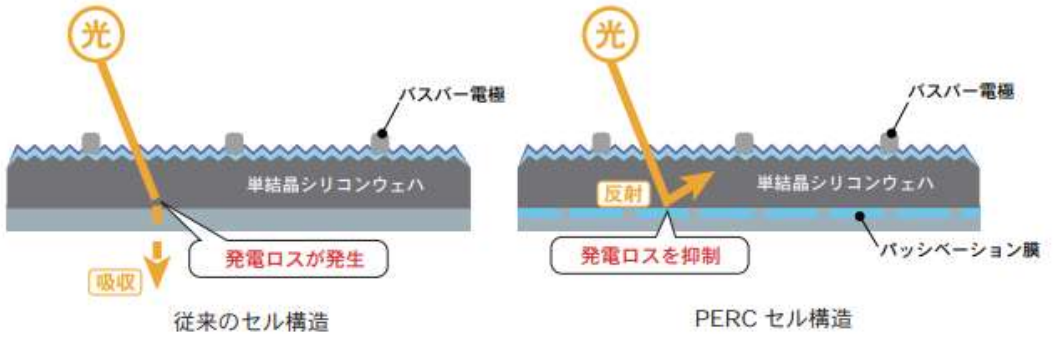


図7-23-13　従来のセル構造とPERCセル構造の比較



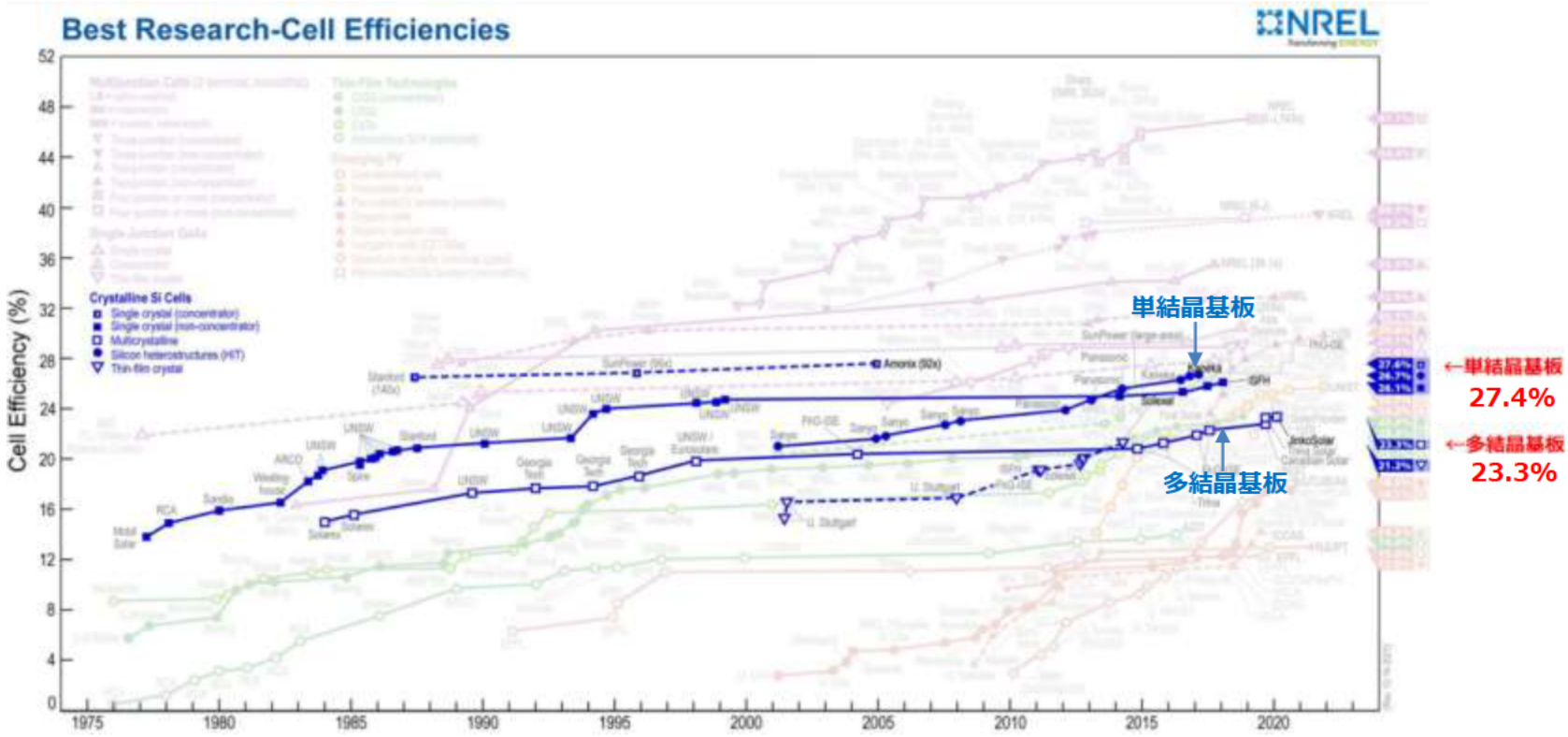
4.品目の技術動向調査（３）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（２）

アメリカの国立再生可能エネルギー研究所（NREL）の太陽電池セル最高効率推移を図7-23-14に示す。現在では、単結晶セルの最高効率が27.3%程度、多結晶セルが約23.3%となっている。

図7-23-14　従来のセル構造とPERCセル構造の比較



4.品目の技術動向調査（４）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

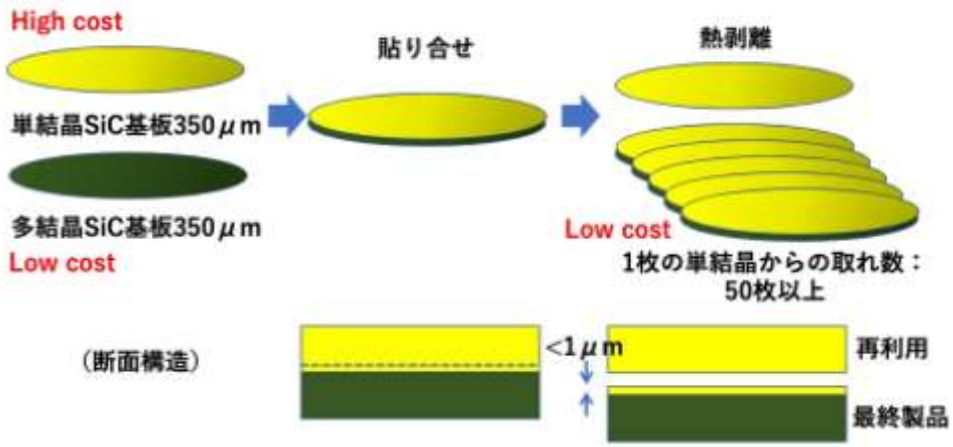
・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査（３）

（２）パワー半導体

今やSiCやGaNなどの化合物半導体を使用したパワー半導体が効率の良さから徐々に普及しつつある。しかしながら、単結晶基板では、コストがかかり低コスト化が普及の大きな課題となっている。このことから、各社多結晶基板と単結晶基板を貼り合わせた製品開発が盛んに行われている。

2020年12月21日に行われた、住友金属鉱山株式会社の事業説明会において、注力分野としてSiC基板（多結晶基板）を発表している。単結晶SiC基板を多結晶SiC基板に薄く貼り合せ、多結晶基板を支持基板とすることにより、高額な単結晶の使用量を抑え、大幅なコストダウンを実現するものとしている。2025年頃には車載向けでの採用を目指している。住友金属鉱山の中期計画のSiC貼り合わせ技術を図7-23-15に示す。 この様に各社多結晶基板を用いた研究開発、製品化を推進している。

図7-23-15　住友金属鉱山の中期計画のSiC貼り合わせ技術



4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

市場プレーヤーを 表7-23-2 に示す。

表7-23-2 多結晶基板の製造企業

会社	会社概要
サイコックス（日本）	サイコックスは、2012年に設立され2017年から多結晶基板を製造、販売しているベンチャー企業である。低抵抗多結晶SiCの支持基板の上に高品質な単結晶を薄く貼り合せることによって、SiC単結晶の特性を維持しつつ、基板全体の低抵抗化と高強度化を実現しているとしている。
京セラ（日本）	電子部品、ファインセラミック部品、半導体部品、情報機器、通信機器、太陽電池、セラミック、宝飾、医療用製品などを製造する大手電子部品・電気機器メーカーである。1982年に世界に先駆け多結晶シリコン太陽電池の量産を本格開始した。太陽電池のシェアは20%を占め第2位である。（2019年）しかしながら、現在では販売の中心はすでに中国メーカーからのOEM製品になっている。
Wolfspeed（米国）	Wolfspeed（米国）は、2021年10月にCreeから社名変更した。Wolfspeed は、6 インチウェーハを中心に展開しておりInfineonTechnologies、STMicroelectronics、ON Semiconductor などの欧米系パワーデバイスメーカーとSiC ウェーハの長期供給契約を締結していることから、同社の実績拡大に寄与している。今後、自動車・電装分野向けでSiC パワーデバイスの需要増加が見込まれることから、実績はさらに拡大すると予測される。また、以前から行っていた増産投資が完了する予定であり、生産能力の拡大によって、これらの需要増加に対応していく。ニューヨーク州の投資は8 インチウェーハが対象であり、2022 年から同社のデバイス向けに生産開始を予定している。
Westinghouse Electric Company（米国）	ウェスティングハウス・エレクトリック・カンパニーは、1886年設立された旧ウェスティングハウスが幾多の変遷後、原子力部門を独立し、1999年に設立された。核燃料、サービス、メンテナンス、計装、制御、原子力発電の設計など、国際的に原子力製品やサービスを提供している会社である。本社はペンシルバニア州。同社は、英国原子力燃料有限公司(BNFL)に売却、東芝による買収の変遷の後、2017年に破産し、2018年にBrookfield Business Partners（本社：カナダトロント）が所有している。

4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

表7-23-2 多結晶基板の製造企業（続き）

会社	会社概要
CoorsTek (米国)	CoorsTekは、1910年、Adolph Coorsによって設立されたプライベートカンパニーで、航空宇宙、自動車、化学、エレクトロニクス、医療、冶金、石油・ガス、半導体、その他多くの産業用の工業用セラミックスの企業である。本社と主要工場は、コロラド州ゴールデンにある。コバレントマテリアル（旧東芝セラミックス）を2014年に買収し、旧東セラの小国、秦野、刈谷3工場が同社の工場になり、炭化けいそ基板などを日本国内で製造している。
ZAO Svetlana-Rost（ロシア）	ロシア国サンクトペテルベルグにある「Svetlana-Rost」は、化合物半導体基板および半導体多層エピタキシャル構造、ナノヘテロ構造のエピタキシャル基板の製造会社である。詳細情報は開示されていない。http://svetlana-rost.ru/
OOO Nitride Crystals（ロシア）（Nitride Crystals Group (NCG)）	ロシア国サンクトペテルベルグで、2007年に、ワイドギャップ半導体関連企業のいくつかを統合して、設立された。窒化アルミニウム(AlN)や炭化けい素(SiC)を含む、化合物半導体材料およびデバイスの開発製造の会社である。https://nitride-crystals.ru/
ZAO SKTB NORD（ロシア）	ロシア国モスクワにある無線・通信用の電子部品の会社である。詳細開示されていない。
ZAO NEVZ-CERAMICS（ロシア）	ネフツセラミックスは、NEVZ-Union Holding Companyの事業会社の一つである。1991年に操業を始め、2011年に、ナノ構造セラミックス生産の合弁会社の設立に関する協定締結により、NEVZ-Union Holdingの事業会社に編入されました。本社は、ノボシビルスク（アフガニスタンに近い）にある。 電力産業(原子力を含む)、無線エレクトロニクス、機械工学、化学、石油化学産業向けのナノ構造セラミックスを開発製造を行っている。
OAO POLIKOR（ロシア）	POLIKORは、ロシア国キュシュマ，イヴァノヴォ地方（モスクワの郊外）にある、セラミックの製造会社である。起業は、1894年、工業用ボイラや炉の耐熱煉瓦の生産開始に始まり、1961年以降、エレクトロニクス産業向けの材料生産を始めました。製品の一つに、窒化アルミニウムや酸化アルミニウムの基板がある。https://www.polikor.net/

4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

表7-23-2 多結晶基板の製造企業（続き）

会社	会社概要
CoorsTek (米国)	CoorsTekは、1910年、Adolph Coorsによって設立されたプライベートカンパニーで、航空宇宙、自動車、化学、エレクトロニクス、医療、冶金、石油・ガス、半導体、その他多くの産業用の工業用セラミックスの企業である。本社と主要工場は、コロラド州ゴールデンにある。コバレントマテリアル（旧東芝セラミックス）を2014年に買収し、旧東セラの小国、秦野、刈谷3工場が同社の工場になり、炭化けいそ基板などを日本国内で製造している。
ZAO Svetlana-Rost（ロシア）	ロシア国サンクトペテルベルグにある「Svetlana-Rost」は、化合物半導体基板および半導体多層エピタキシャル構造、ナノヘテロ構造のエピタキシャル基板の製造会社である。詳細情報は開示されていない。http://svetlana-rost.ru/
OOO Nitride Crystals（ロシア）（Nitride Crystals Group (NCG)）	ロシア国サンクトペテルベルグで、2007年に、ワイドギャップ半導体関連企業のいくつかを統合して、設立された。窒化アルミニウム(AlN)や炭化けい素(SiC)を含む、化合物半導体材料およびデバイスの開発製造の会社である。https://nitride-crystals.ru/
ZAO SKTB NORD（ロシア）	ロシア国モスクワにある無線・通信用の電子部品の会社である。詳細開示されていない。
ZAO NEVZ-CERAMICS（ロシア）	ネフツセラミックスは、NEVZ-Union Holding Companyの事業会社の一つである。1991年に操業を始め、2011年に、ナノ構造セラミックス生産の合弁会社の設立に関する協定締結により、NEVZ-Union Holdingの事業会社に編入されました。本社は、ノボシビルスク（アフガニスタンに近い）にある。 電力産業(原子力を含む)、無線エレクトロニクス、機械工学、化学、石油化学産業向けのナノ構造セラミックスを開発製造を行っている。
OAO POLIKOR（ロシア）	POLIKORは、ロシア国キュシュマ，イヴァノヴォ地方（モスクワの郊外）にある、セラミックの製造会社である。起業は、1894年、工業用ボイラや炉の耐熱煉瓦の生産開始に始まり、1961年以降、エレクトロニクス産業向けの材料生産を始めました。製品の一つに、窒化アルミニウムや酸化アルミニウムの基板がある。https://www.polikor.net/

4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

表7-23-2 化合物基板の製造企業（続き）

会社	会社概要
住友電気工業株式会社	1897年に大阪で創業した住友電工は、自動車、情報通信、エレクトロニクス、環境エネルギー、産業素材の5つの事業分野を世界約40カ国で展開している。GaNを含む各種化合物半導体基板及びエピタキシャルウェーハを製造している。
豊田合成株式会社	1949年、トヨタ自動車のゴム部門を主体として、愛知県で創業した自動車部品およびオプトエレクトロニクス製品の製造会社である。
日亜化学工業株式会社	1956年に徳島県で創業した、光半導体と化学品の製造会社である。ノーベル賞を受賞した青色発光ダイオードの開発に代表されるように研究開発型の会社である。GaN系の半導体レーザーも製品群にある。
株式会社東芝	化合物半導体基板は、上記CoorsTekを参照。 株式会社東芝は、データセンターなどでの活用が見込まれるSiC（シリコンカーバイド）パワー半導体や、GaN（窒化ガリウム）パワー半導体の開発製造を行っている。
株式会社MARUWA	株式会社MARUWAは、1973年、愛知県で創業したエレクトロニクス用・産業用セラミックス及び電子部品の開発製造会社である。ルーツは、江戸時代から続き陶磁器（瀬戸物）の陶芸家の家系で大正時代に和食器製造し、1960年に電子部品（通信機器向け特殊磁器、固定抵抗器用セラミック）分野へ進出した。窒化アルミニウム、窒化けい素、炭化シリコンなどの化合物半導体基板の開発製造を行っている。

4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令第7項（23）多結晶基板

・市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

表7-23-2 化合物基板の製造企業（続き）

会社	会社概要
Infineon Technologies （ドイツ）	Infineon Technologiesは、1999年に親会社シーメンスAGの半導体事業が分社化si設立された.ドツの半導体メーカーでである。インフィニオンは約46,665人の従業員を抱え、世界10大半導体メーカーの1つである。、自動車、産業、マルチマーケット分野向けの半導体およびシステム、チップカード、セキュリティ製品を製造している。
AIXTRON SE（ドイツ）	AIXTRONは、1983年にアーヘン大学からスピンアウト産業として設立された。半導体業界の顧客向けに金属有機化学蒸気堆積(MOCVD)装置の製造を専門とする会社である。同社のMOCVD装置は、化合物、有機、ナノチューブ、ナノファイバーを含む電子および光電子製品の製造に使用されている。本社は、ヘルツォーゲンラートにある。
CeramTec (ドイツ)	CeramTecは、高度なセラミック部品を製造・開発しており、製品は、医療技術、自動車製造、エレクトロニクス、機器や機械建設、防衛技術、および化学工業で、多くの異なるアプリケーションで使用されている。窒化アルミニウム基板を製造している。本社はドイツのバーデン・ヴュルテンベルク州プロチンゲンにあります。
Samsung (韓国) （Samsung Electronics Co., Ltd.）	Samsung Electronicsは、韓国のテクノロジー企業で、世界最大の総合家電・電子部品・電子製品の製造会社であり、サムスングループの中核会社である。1938年に三星商会として設立された。
ChuangLian Electronic Component (Group) Co. Ltd.（中国）	ChuangLian Electronic Componentは、50年の研究、開発、製造の経験を持つ大手メーカーで、中国本土のトップ100の電子部品メーカーの一つである。サーメットトリマーポテンショメータ、RFコネクタ&ケーブルアセンブリ、マイクロ波部品、厚膜ハイブリッド回路、厚膜電子ペースト、マイカコンデンサ、巻線ポテンショメータ、PCB、高度セラミック材料などの特殊部品と材料を製造している。1970年に西安で創業した。
LEATEC FINE CERAMICS CO. LTD. (台湾)	1991年に設立されたLEATEC FINE CERAMICSは、台湾で唯一の化合物半導体基板の製造会社である。製品には、窒化アルミニウム、アルミナ（参加アルミニウム）の基板がある。本社は、桃園市にあり、工場は桃園に２か所と、中国本土の崑山市に１か所ある。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

【輸出令第10項（11の2）】
光センサーの製造用のマスク又はレチクル

令和 4年 3月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

【フォトマスク】

フォトマスクはLSIなど集積回路の製造工程で使用される部材である。表面の遮光膜に微細な回路パターンをエッチングした透明なガラス板で、回路をシリコンウェハに焼き付けるときの原版になる。フォトマスク上のパターンをシリコンウェハ上に縮小露光することにより微細なパターンを形成する。

露光工程を図10-112-1に示す。

【フォトマスクの製造工程】

フォトマスクのパターンは、ガラス板の片面にクロム膜とレジストが全面に形成されたものから、指定した部分のクロムを除去することにより製作される。設計データ通りにクロム・レジスト面にレーザー露光し、その後、現像・エッチング工程を経てお客様のご指定通りのパターンを再現致する。

フォトマスクの製造工程を図10-112-2に示す。

図10-112-1　露光工程

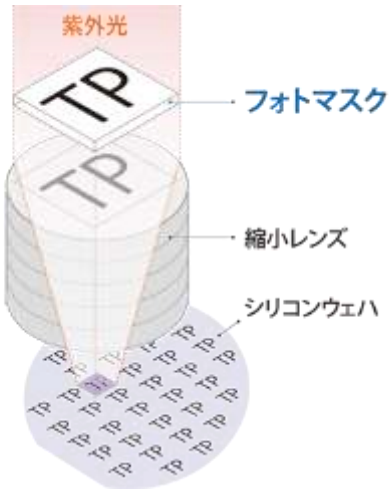
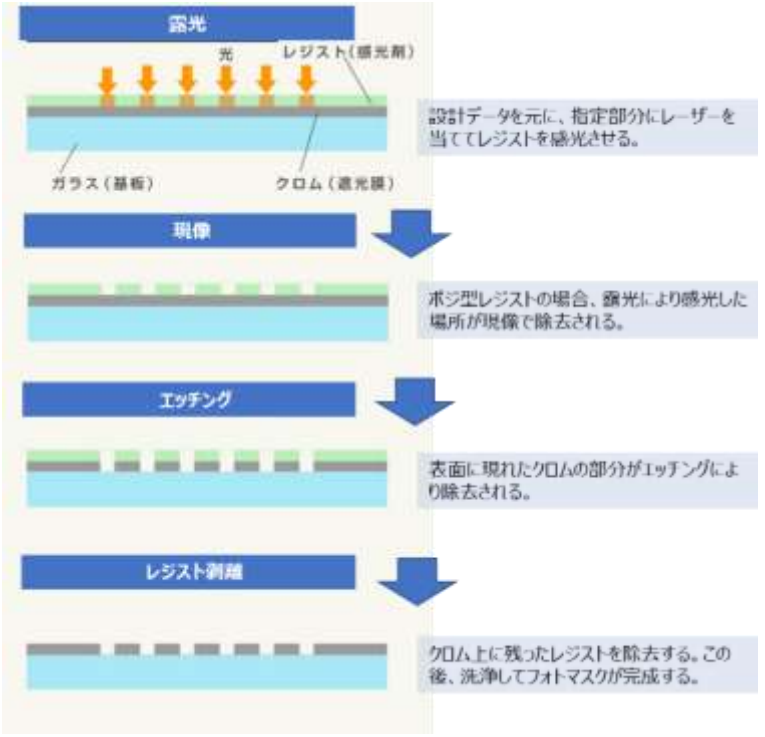


図10-112-2　フォトマスクの製造工程



1.対象品目の概要調査

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

【フォトマスクの種類】

フォトマスクの種類を図10-112-3に示す。

☆バイナリーマスク

バイナリーマスクとは単純な遮光膜のパターンのみで形成されるマスクで、光を透過する／遮断するという機能のみのマスクで、主として露光波長以上の太さのパターン形成に用いられる。

☆位相シフトマスク

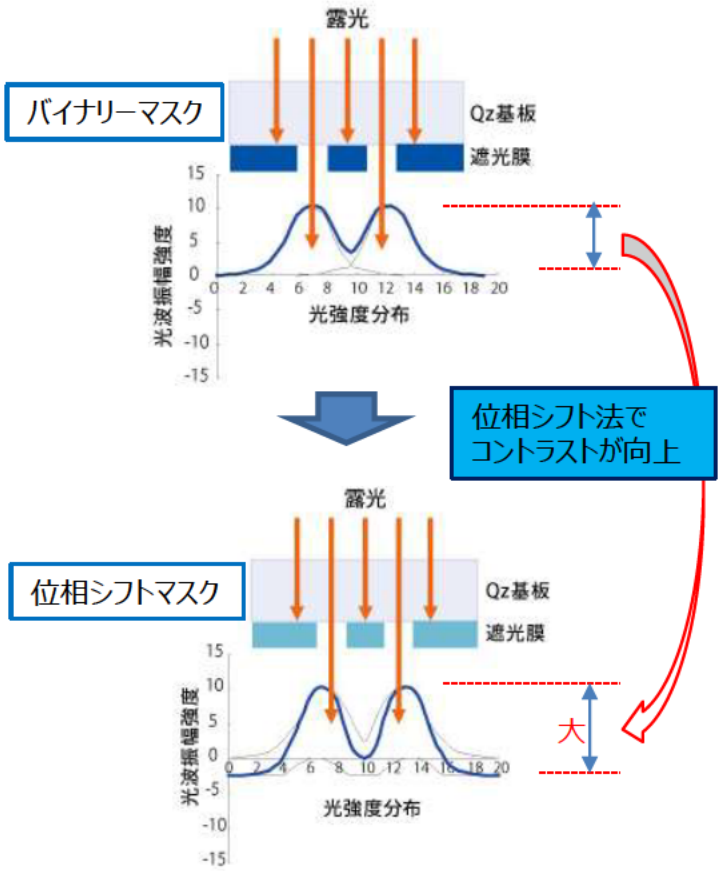
位相シフトマスクとは、光の位相や透過率を制御する事で、ウエハーへの露光時の解像度や焦点深度を改善し、転写特性を向上させたフォトマスクである。代表的なものにハーフトーン型位相シフトマスクがある。

ハーフトーンマスクとは、180度の位相差を付けた半透明遮光膜を用いたフォトマスクである。半透明な遮光膜をフォトマスク上に付けると、パターンの部分の位相を局所的に変える事ができる。この半透明薄膜を「位相シフタ」と呼ぶ。位相シフト法とは、転写すべきパターンが形成されているフォトマスク上に光の位相を変化させる部分を設け、シフタを通過して位相が変わった光と、シフタを通過せずに位相の変わっていない光との干渉現象を利用して、解像力を向上させる手法である。

☆レクチル

一般にフォトマスクは、LSIチップに描かれるパターンの4倍又は5倍の大きさに描かれた拡大マスクになっている。この拡大マスクのことをレチクルと呼び、高密度半導体の製造に使われる高精細のフォトマスクのことである。

図10-112-3　フォトマスクの種類



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令				貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号	イロハ		
10(11の2)	9	1	十三の二		十三の二　第三号イ(二)又は(三)のいずれかに該当する光センサーの製造用に特別に設計されたマスク又はレチクル	
10(2)	9	1	三	イ	（二）　900ナノメートル超1,200ナノメートル以下の波長範囲で最大感度を有し、かつ、応答時定数が95ナノ秒以下のもの	900ナノメートル超1,200ナノメートル以下の波長範囲で最大感度を有し、かつ、応答時定数が95ナノ秒以下
10(2)	9	1	三	イ	（三）　フォーカルプレーンアレーであって、素子の数が2,048を超え、かつ、300ナノメートル超900ナノメートル以下の波長範囲で最大感度を有するもの	素子の数が2,048を超え、かつ、300ナノメートル超900ナノメートル以下の波長範囲で最大感度

Wassenaar規制番号						WA規制文言（英文）
3桁	細番					
6.B.2						Masks and reticles, specially designed for optical sensors specified by6.A.2.a.1.b. or 6.A.2.a.1.d.
6.A.2	a	1	b			b. "Space-qualified" solid-state detectors having all of the following: 1. A peak response in the wavelength range exceeding 900 nm but not exceeding 1 200 nm; and 2. A response "time constant" of 95 ns or less;
6.A.2	a	1	d			d. "Space-qualified" "focal plane arrays" having more than 2 048 elements per array and having a peak response in the wavelength range exceeding 300 nm but not exceeding 900 nm;

比較原文
・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html
・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

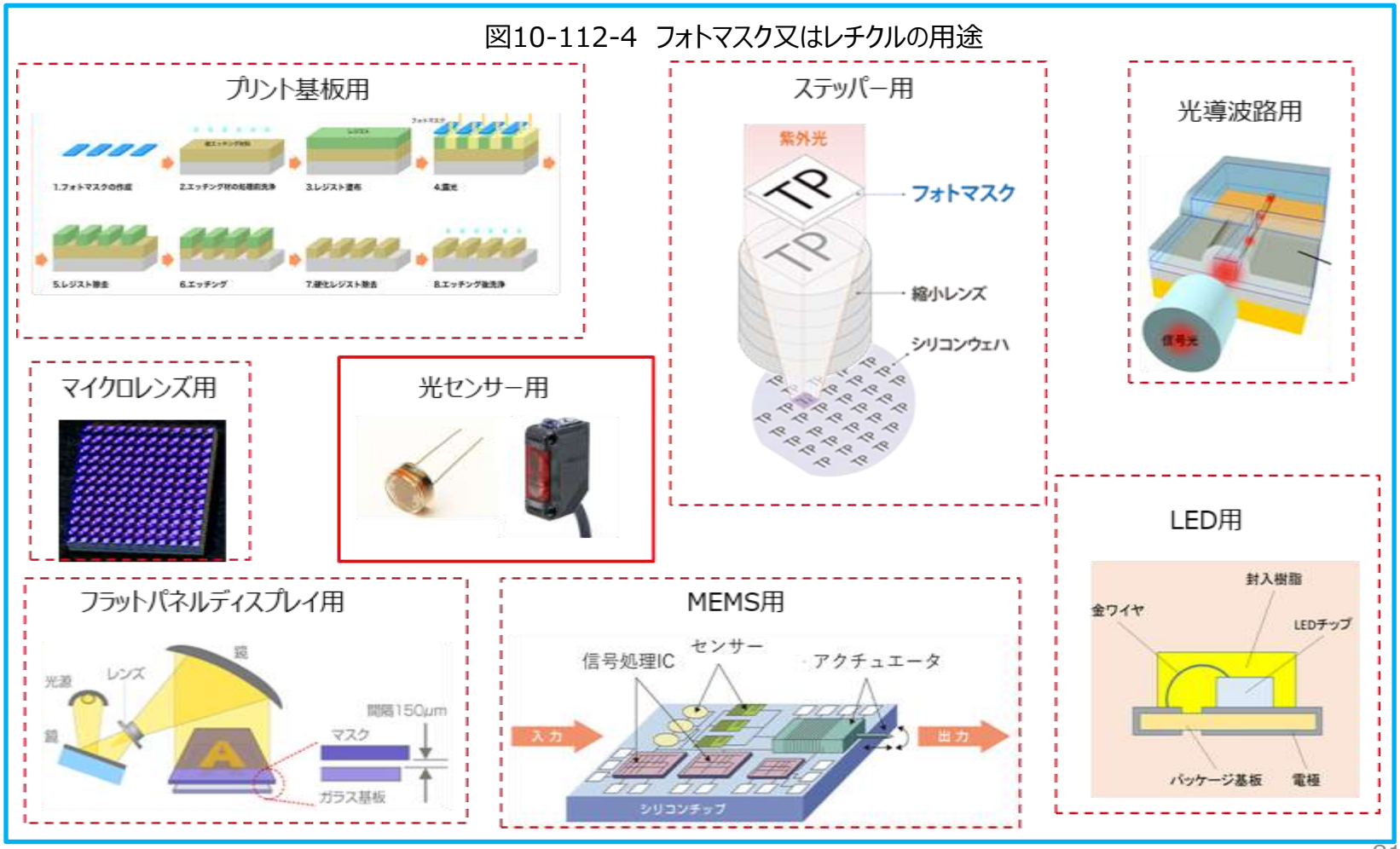
3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

フォトマスク又はレクチルは、半導体/集積回路、受光・発光素子、プリント基板、画像表示デバイス、マイクロマシン、磁気ヘッドなどを製造するときに使用されるツールで、パターニングの原版になるものである。フォトマスク又はレチクルの用途を図10-112-4に示す。

図10-112-4　フォトマスク又はレチクルの用途



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

☆プリント基板（図10-112-5）

基本的なフォトマスクの使用法で、配線層や部品層といった異なる画像を写すために、数枚から数十枚のフォトマスクが使用される。露光工程でフォトレジストにフォトマスクの画像が転写され、現像液で光の当たった部分が除去され、あるいは残存する。これが、次のエッチング工程で被加工対象に対するマスクとなる。エッチング工程で不要部分の除去が終了後、フォトレジストを薬液によって剥離することで工程が終了する。次の層の加工のためにまたフォトレジストが塗布され、同様の処理が繰り返される。

☆LED（図10-112-6）

発光ダイオード（LED）とは、ダイオードの1種で、順方向に電圧を加えた際に発光する半導体素子である。有機エレクトロルミネッセンス（有機EL）も分類上はLEDに含まれる。フォトリソグラフィ工程で、マスクを用いて成膜層を加工する。

☆MEMS（図10-112-7）

機械要素部品、センサ、アクチュエータ、電子回路を一つの基板上に微細加工技術によって集積化したデバイスを指す。

図10-112-5　プリント基板

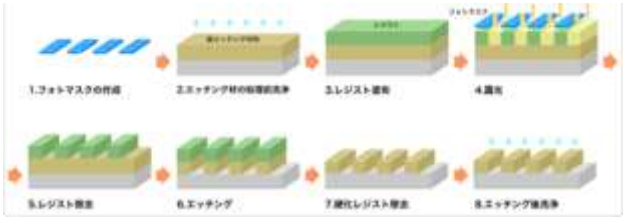


図10-112-6　LED

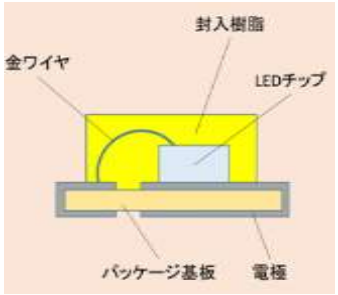
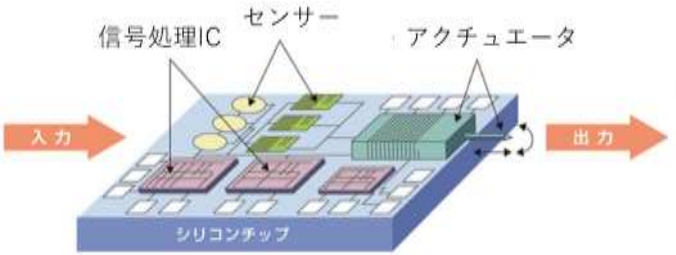


図10-112-7　MEMS



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

☆光導波路

光導波路とは光を局所的に閉じ込め，任意の方向に導くものである。光を特定の領域（コア）に閉じ込めるため、全反射が利用される。

光導波路の構造を図10-112-8に示す。

図のように屈折率の大きな媒質をそれより屈折率の小さな媒質で挟み込み、光が全反射によって伝搬するような光の通り道を作る。屈折率の大きな中央の層をコア層、それ以外の部分をクラッド層という。 基板上にフォトマスクを用いて導波路を作成し、光通信モジュールや光センシング等の各種機能を持たせることが出来る。

☆マイクロレンズ

光量透過を制御することで、マイクロレンズなどの３次元構造を形成することが可能となる。フォトマスクを用いたマイクロレンズの製作を図10-112-9に示す。

☆イメージセンサーは、オンチップレンズとカラーフィルタ、フォトダイオードの3層で形成されている。オンチップレンズは、たくさんのマイクロレンズが1枚のシート状に並べられたもので、これにより集光力が高まり、イメージセンサーの感度が大幅に向上する。

イメージセンサーの仕組みを図10-112-10に示す。

図10-112-8　導波路の構造

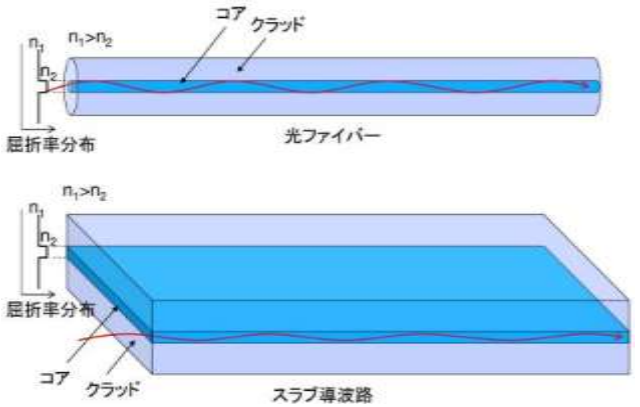


図10-112-9　フォトマスクを用いたマイクロレンズの製作

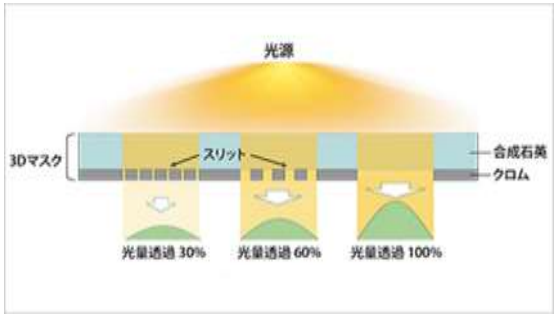
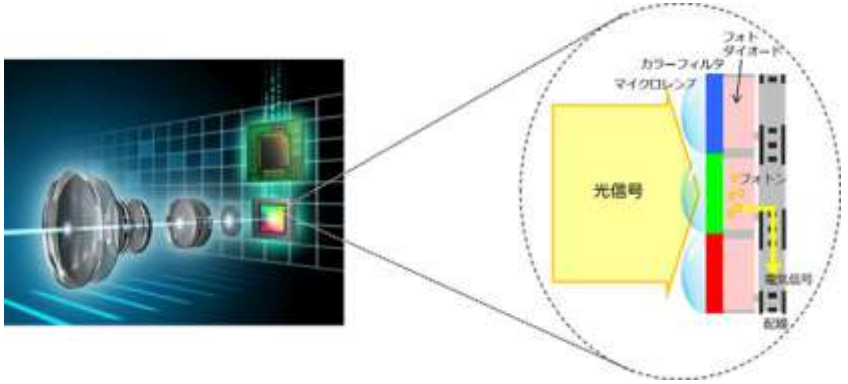


図10-112-10　イメージセンサーの仕組み



3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

☆フラットパネルディスプレイ（FPD）

例として、液晶ディスプレイの製造工程について説明する。

製造工程概要を図10-112-11に示す。

基板上の微細なパターンを形成する原理は、カメラ（デジタルカメラではなく、いわゆるスチールカメラ）の写真の作り方と同じで、ガラス基板を洗浄し、感光材（フォトレジスト）を基板に塗布する。次にパターンが描画されたネガフィルムに相当するフォトマスクを通して光をあてガラス基板にパターンを焼き付ける。露光されたガラス基板を現像することにより、焼き付けられたパターンが基板上に残る。FPD露光装置を図10-112-12に示す。

スマートフォンやタブレットではパネルの高精細化への流れが加速している。パネルの高精細化のためには、パネルの画素パターンの微細化が不可欠であり、**フォトマスクの微細化と露光技術の進化**が求められている。

☆ロータリーエンコーダ

発光素子と受光素子の間に回転スリットと固定スリットがある。回転スリットの回転により、発光素子の光が透過・遮断される。この光の変化を受光素子がとらえることで回転を検出する。

ロータリーエンコーダの構成を図10-112-13に示す。

軸の回転数をパルスに変換するために、受光素子には**高速応答性**が求められる。

図10-112-11　液晶ディスプレイパネルの製造工程概要

・洗浄→・成膜→・レジスト塗布

↓

露光

光を照射し、カラーフィルターパターンを焼き付ける。ブラックレジストは光が当たった部分だけ、カラーレジストは光が当たらなかった部分だけのレジスト膜が変質する

↓

・現像→・エッチング→・剥離→・液晶充填

エンコーダの規制パラメータ「角度の変換誤差の絶対値が1 秒以下のもの及び当該エンコーダ用に設計されたリング、ディスク又はスケール」に関連して、受光素子の時定数が関係してくるので注意が必要である。

図10-112-12　FPD露光装置（マルチレンズシステム）

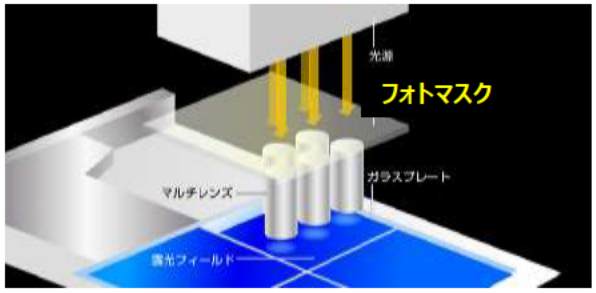
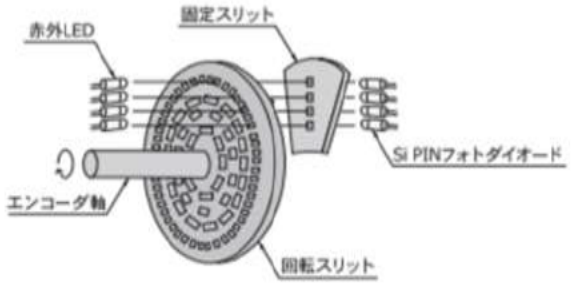


図10-112-13　ロータリーエンコーダの構成



3.品目の主たる用途の調査分析（1）

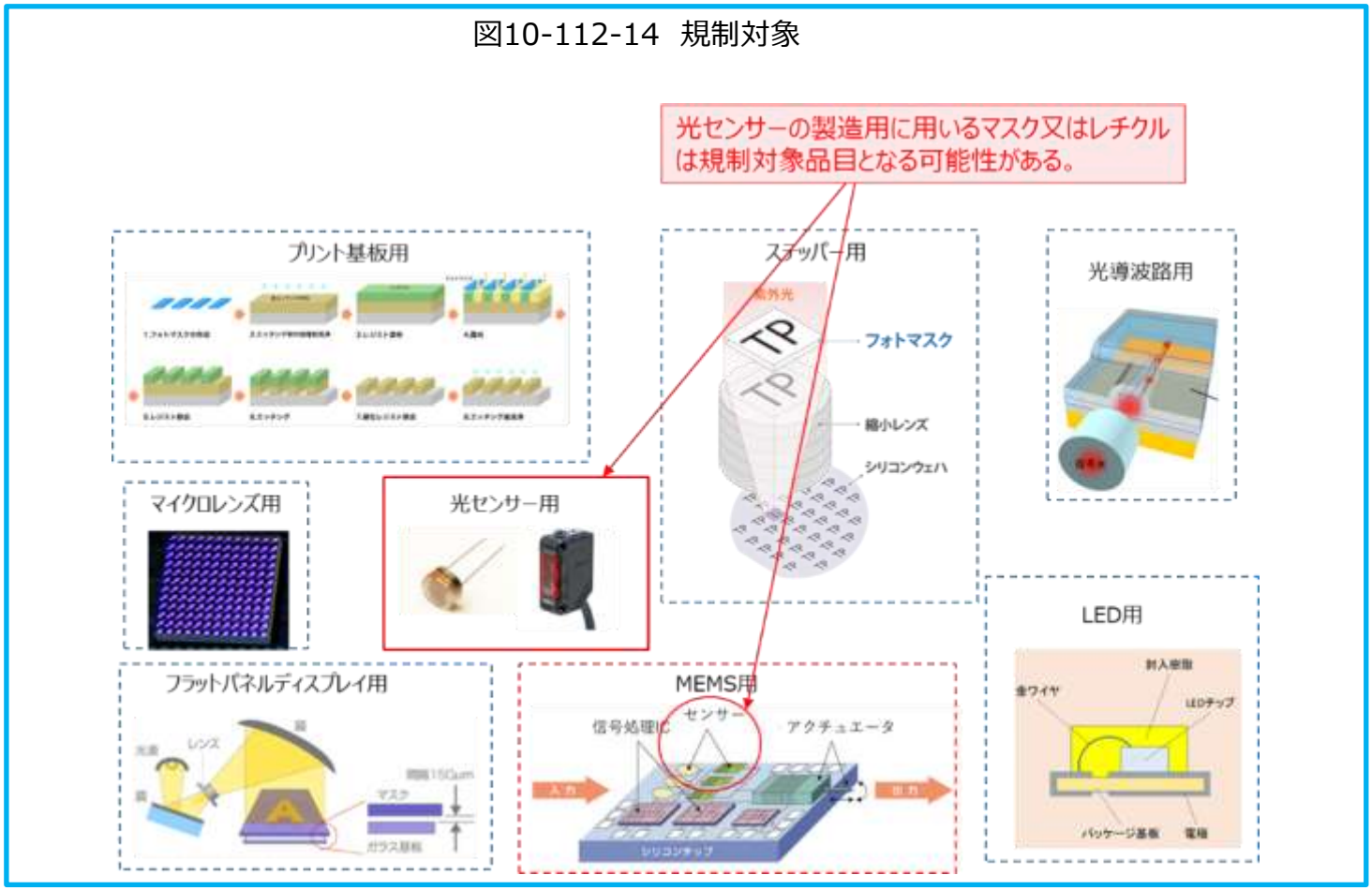
○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

規制対象となりうる内容を図10-112-14に示す。

フォトマスク又はレクチルは、パターニングの原版として使用されているが、このうち光センサーの製造に用いるものは規制対象となる可能性があるので注意が必要である。

図10-112-14　規制対象



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化

【光センサーの分類】

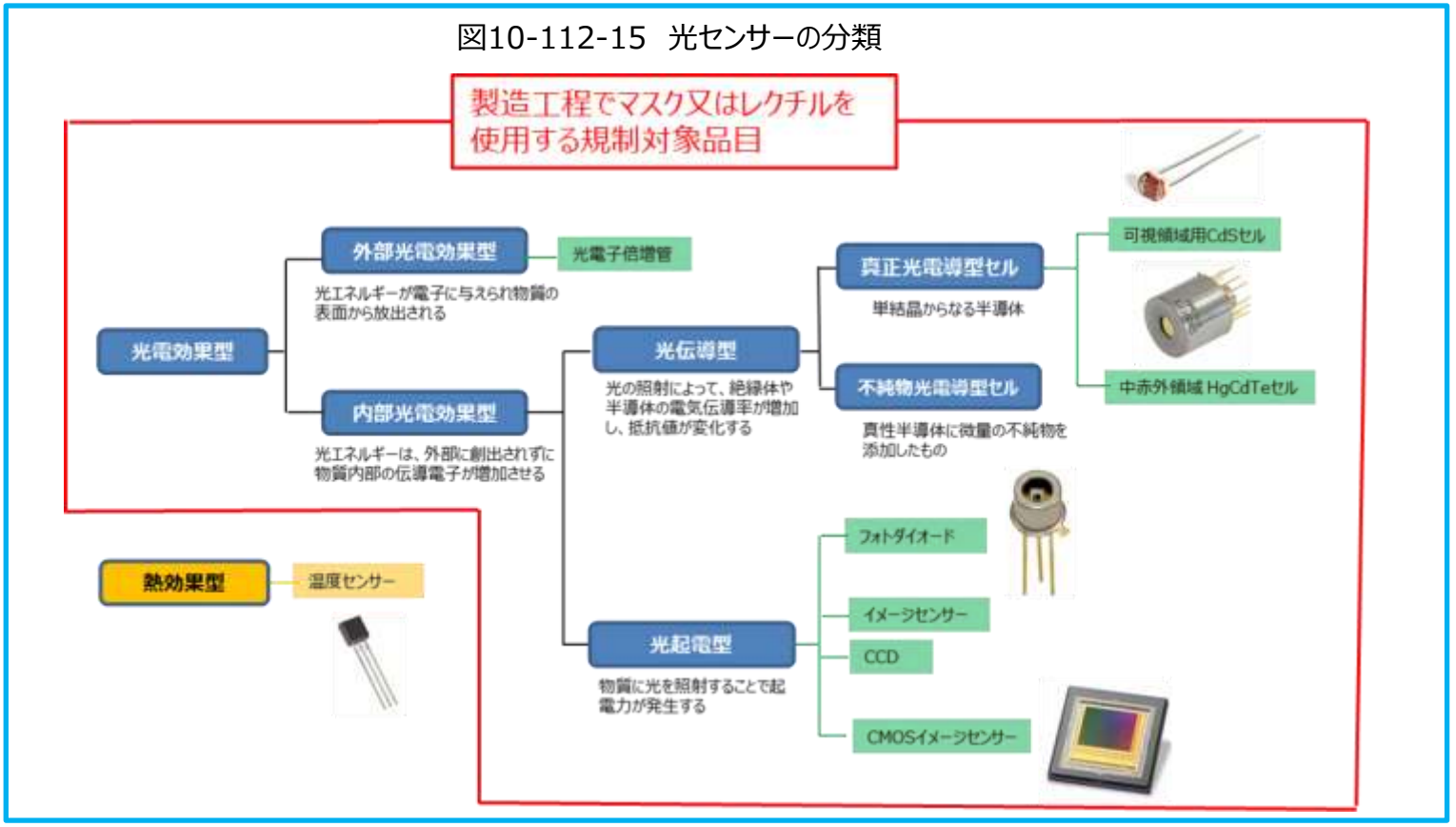
光センサーは図10-112-15に示すように、「光電効果型」と「熱効果型」に大きく分類される。

・光電効果型：光を検出して電気信号に変換するセンサーである。

・熱効果型：光の入射で発生する熱に反応するセンサーで、「温度センサー」になる。

この図の中で、熱を感知する温度センサー以外を製造するときに使用するマスク又はレチクルは、規制対象となりうるので注意が必要である。

図10-112-15　光センサーの分類



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化

【光センサーの構成】

光センサーは単体でも使用されるが、光を出す「投光部」と光を受ける「受光部」から構成される「光センサー」が多い。投光素子から光を投光し、反射光または透過光の強度を受光素子で検出する。この特性を活かして製品の有無や寸法測定などをおこない、産業機械の自動化等に役立っている。

光センサーの基本構造を図10-112-16に示す。

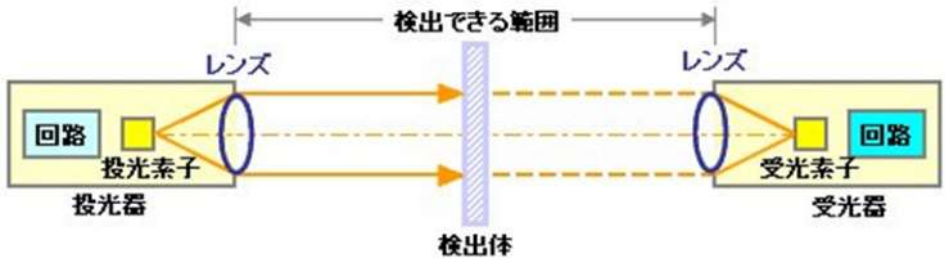
☆投光素子（図10-112-17）

LED（発光ダイオード）は、電気を流すと発光する半導体素子で、pn接合と呼ばれる基本構造を持っており、P型と、N型の2種類の異なる性質を持つ半導体を接合して作られる。

☆受光素子（図10-112-18）

光を電気信号に変換する素子で、ﾌｫﾄﾀﾞｲｵｰﾄﾞとも呼ばれる。

図10-112-16　光センサーの基本構造



上記、発光ダイオードとﾌｫﾄﾀﾞｲｵｰﾄﾞは、「フォトリソグラフィ」技術で製造され、この工程でマスク又はレチクルが用いられる。

図10-112-17　発光ダイオード

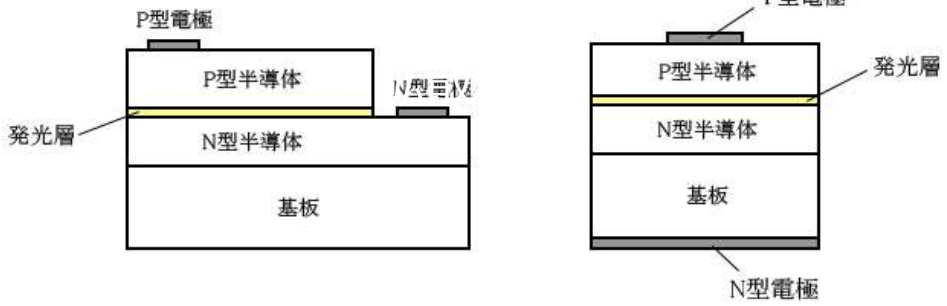
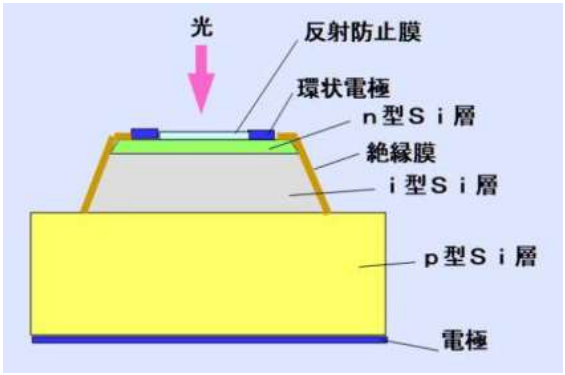


図10-112-18　ﾌｫﾄﾀﾞｲｵｰﾄﾞ



4.品目の技術動向調査（1）

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

＜規制パラメータ語句の説明＞

900ナノメートル超1,200ナノメートル以下の波長範囲で最大感度を有し、かつ、応答時定数が95ナノ秒以下のもの
フォーカルプレーンアレーであって、素子の数が2,048を超え、かつ、300ナノメートル超900ナノメートル以下の波長範囲で最大感度を有するもの

【光センサーの最大感度】

光センサーの最大感度イメージを図10-112-19に示す。

最大感度とは、光センサーが最も良く応答する光の波長である。図において、900～1200nmの近赤外線領域で最大感度が存在することを表している。

【光センサーの応答時定数】

計測･制御系において，系の状態が一次遅れで表される場合に，ステップ入力を与えると，時間をt，最終変化をθ_0として，

出力は$\theta_0(1-e^{-t/T})$の形をとる。

Tを時定数といい，最終値の63.2%に達する時間である。

一般に、時定数は小さいほど応答が早く、光センサの応答時定数が95ns以下とは、95ns以内に応答が得られる光センサである。

【フォーカルプレーンアレー】

フォーカルプレーンアレーのイメージを図10-112-20に示す。

受光素子（光センサー）を平面上（或いは3次元上）に並べて、すべての素子が同時に受光できるように同一焦点上に並べた状態を、フォーカルプレーンアレーという。カメラのCCDもフォーカルプレーンアレーの一種である。

光センサ上の各素子は同一焦点上にあるので、スキャンすることなく同時に応答し、像が得られる。

図において、光センサーはフォーカルプレーンアレー状態である。

図10-112-19　最大感度

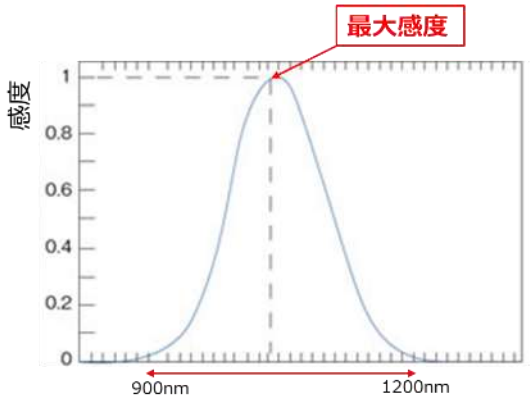
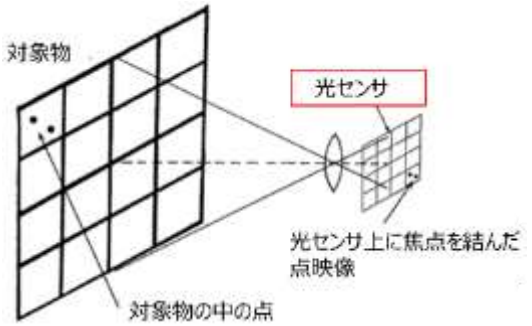


図10-112-20　フォーカルプレーンアレー



4.品目の技術動向調査（1）

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

光のスペクトルを図10-112-21に示す。

規制パラメーターの波長範囲

(a) 900ナノメートル超1,200ナノメートル以下の波長範囲で最大感度を有し、かつ、応答時定数が95ナノ秒以下のもの

(b) フォーカルプレーンアレーであって、素子の数が2,048を超え、かつ、300ナノメートル超900ナノメートル以下の波長範囲で最大感度を有するもの

※フォーカルプレーンアレー：光センサーを同一焦点面に並べたもの

が指す領域を図中に示す。

(a)**は近赤外線領域**に含まれ、(b)**は可視光を含む領域**であることが分かる。

(a)は近赤外線カメラ（InGaAsカメラ）
(b)は可視光を増幅する暗視スコープ（ナイトビジョン）
の波長領域で、(a)(b)両方を用いてより鮮明な画像を得られる軍用暗視装置が想定される。

軍用暗視装置を図10-112-22に示す。

※InGaAsカメラ：950nm～170 nmの近赤外波長領域に高い感度を持つInGaAs（インジウム・ガリウム・ヒ素）センサを搭載したカメラ

図10-112-22　軍用暗視装置

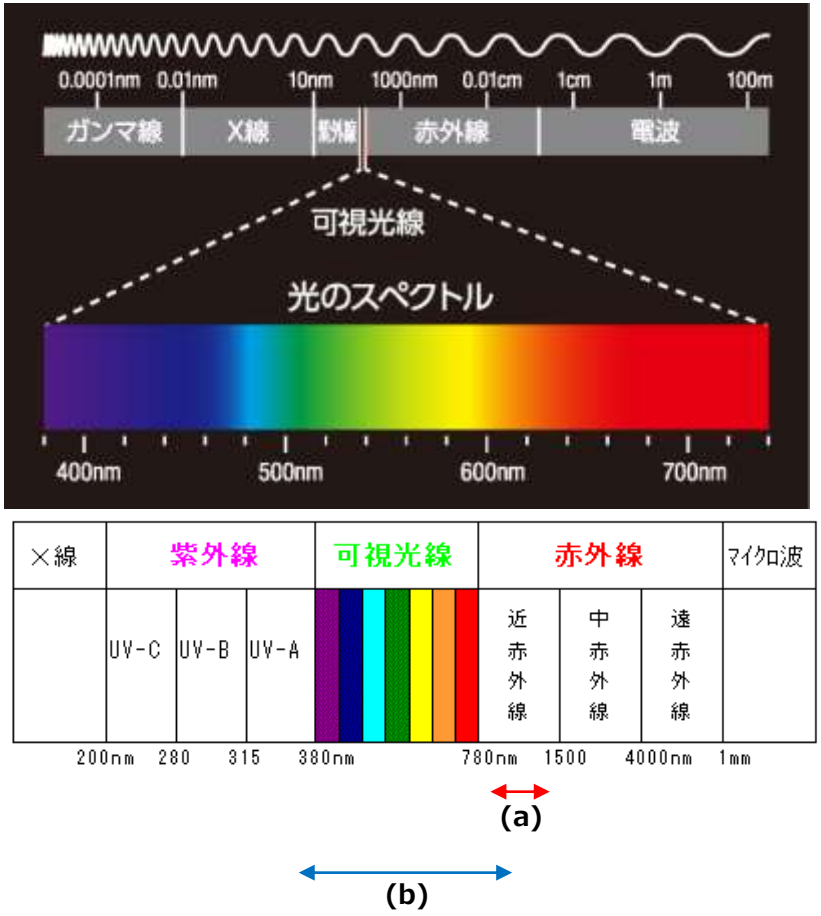
<暗視装置>



<暗視装置映像>



図10-112-21　光のスペクトル



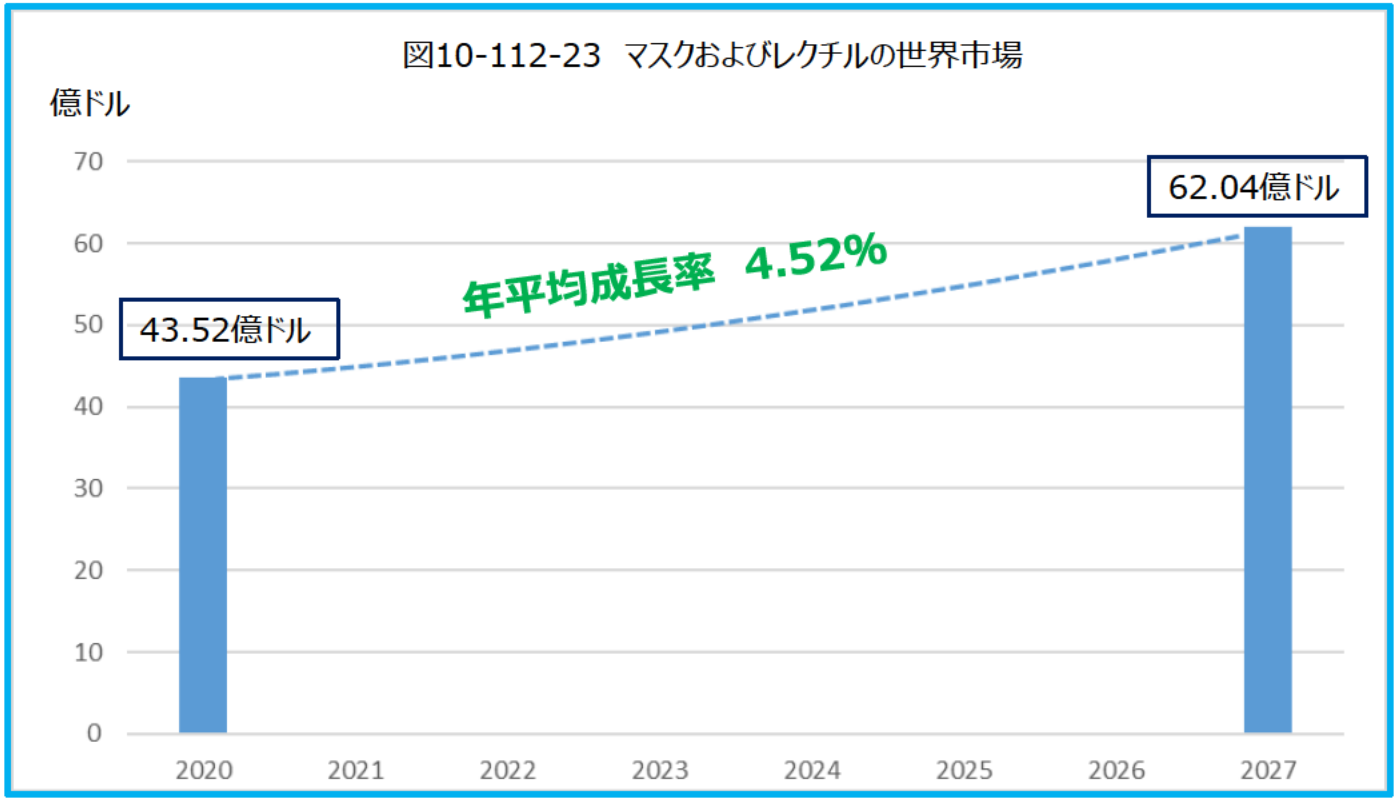
4.品目の技術動向調査（2）

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

世界の半導体フォトマスク市場は、2020年の43億5,215万米ドルから、2027年末までに62億436万米ドルに達し、2021年～2027年は年平均成長率4.52%が予測されている。
マスクおよびレクチルの世界市場を図10-112-23に示す。

図10-112-23　マスクおよびレクチルの世界市場



Global Semiconductor Photomask Market Research Report 2021

4.品目の技術動向調査（3）

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

フォトマスクの主要企業を図10-112-24に示す。
世界の半導体フォトマスクの主要プレーヤーは、フォトロニクス、凸版、DNP、HOYA、SK-エレクトロニクスなどで、世界のトップ5メーカーが約45%のシェアを占めている。
市場は、日本が30%以上の最大シェアで、北アメリカと韓国が約30%のシェアで続いている。
製品面では、クォーツマスクが最大で、シェアは約85%である。
用途は、最大の用途がICで、フラットパネルディスプレイ、タッチパネルが続く。

（2021年10月22日、Market Insights Reports）

図10-112-24　フォトマスクの主要企業

企業	会社概要
Hoya（日本）	世界シェアNo.1のHOYAのマスクは、半導体の更なる高集積化により、電子機器の高速、高性能に貢献している。
大日本印刷（DNP）（日本）	日本の総合印刷会社で、国内印刷業界2強（凸版印刷と大日本印刷）の一角。5nmプロセス相当のフォトマスク製造プロセスを開発した。
凸版印刷（日本）	世界最大規模の総合印刷会社である。2021年11月、フォトマスク事業の分社化を発表した。
SK-Electronics（日本）	液晶ディスプレイ製造に用いられるフォトマスクでは世界シェア3位であり、世界唯一の第10世代及び第11世代のフォトマスクを製造可能なラインを持つことを強みとする企業である。
Photronics（アメリカ）	集積回路およびフラットパネルディスプレイ向けのフォトマスク製品を手掛ける。

4.品目の技術動向調査（4）

○【輸出令第10項（11の2）】光センサーの製造用のマスク又はレチクル

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

フォトマスク市場をけん引しているのは45ナノメートル未満の微細プロセスである。より微細な回路をウエハー上に形成すれば、1枚のウエハーから取れる半導体チップ数が増え生産コストを抑えられるほか、消費電力や処理性能を向上できる。大手半導体メーカーは毎年数百億円規模を投じて、微細加工ができる最先端の製造技術の開発を進めている。

フォトマスクは微細な回路を描くためには欠かせず、微細化が進むにつれて一度に使うフォトマスクの枚数は増えている。最先端の20ナノメートル台の回路技術では一度に必要なフォトマスクに数千万から数億円もかかるケースもある。

（日経テレコン　2022/01/05）

その他のフォトマスク企業を図10-112-25に示す。

図10-112-25　その他のフォトマスク企業

企業	会社概要
AA Spectre Corporation（アメリカ）	産業用および航空宇宙用圧力トランスデューサーを制作する会社。流体動力、油圧システム、燃料電池、医療ガス、石油およびガス探査、航空宇宙、科学研究、航空機地上支援、および軍事用途で製品を提供している。
Applied Image Inc.(アメリカ)	光学部品の測定や画像解析を行う会社で、宇宙ステーションで使用できるカスタム製品を提供している。
Abeam Technologies(アメリカ)	半導体製造と超微細加工分野の解析業務を手掛ける。計測、フォトマスク作成、欠陥検査シミュレーション、および半導体装置の設計のためのソフトウェアを提供している。
Advance Reproductions Corporation(アメリカ)	大面積フォトマスクとフォトツールを提供する会社で、半導体、マイクロ波、ナノテクノロジー、医療および電子デバイスの製造メーカーをサポートしている。
Advent Cleaning Technology(アメリカ)	最先端のクラス10クリーンルームを持ち、洗浄、表面処理、プラズマコーティング、および石英製造を提供する。
Biotronics(アメリカ)	医療機関向けに、臨床エンジニアを派遣し、質の高いの医療機器管理サービスを手掛ける。
Intelligent Micro Patterning（アメリカ）	特許取得済みのマスクレスリソグラフィー技術を用いて、最先端のマイクロパターニングを実現する。
Martin Photomask（アメリカ）	レーザーフォトマスク、ステッパーレチクル、大面積フォトマスク等を提供する。
Metrigraphics LLC（アメリカ）	電鋳、フォトリソグラフィー、イオンビームミリングなどの最先端の超小型製品を手掛けている。
Noel Technologies（アメリカ）	シリコンバレーを拠点とするファウンドリサービス会社で、プロセス開発と最適化を請け負う。
Nippon Filcon（日本）	製紙用の網で国内シェア6割を誇る。半導体製造用フォトマスクが成長のけん引役になっている。
Reynard Corporation（アメリカ）	カスタム光学部品と薄膜コーティング(ARコーティング等）を提供する
Teledyne DALSA （カナダ）	集積回路、電子技術、ソフトウェア、半導体ウェーハ処理を手掛ける。
Kelvin Nanotechnology（イギリス）	3Dイオントラップ、グレーティングMOT、MEMS重力計、および専門のDFBレーザーを手掛ける。
SUSS MicroTec (ドイツ)	SUSS MicroTecグループのフォトマスク装置は次世代リソグラフィーを含む、クリーニング、露光後ベーク、現像プロセス等、全てのテクノロジーノードに対応している。

目次

令和３年度重要技術管理体制強化事業
（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

輸出貿易管理令第12項（6）
燃料電池

令和 4年 1月

株式会社三菱ケミカルリサーチ

1.対象品目の概要調査（1）

○輸出令12項(6)燃料電池

電池は、エネルギーを電気に変換する装置で、化学反応を利用する「化学電池」と、熱や光といった物理エネルギーを利用する「物理電池」、生物の作用を利用する「生物電池」に分類される。電池の分類を図12-6-1に示す。

燃料電池とは、電気化学反応によって燃料の化学エネルギーから電力を取り出す電池を指す。燃料には方式によって、**水素**、炭化水素、アルコールなどを用いる。

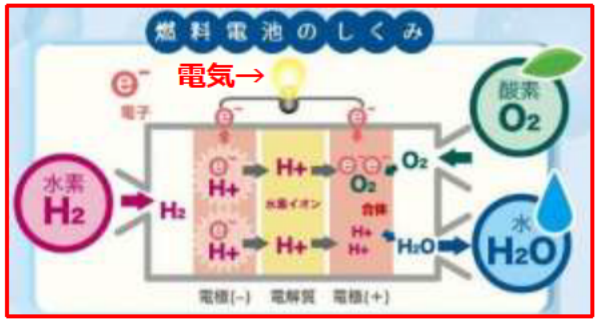
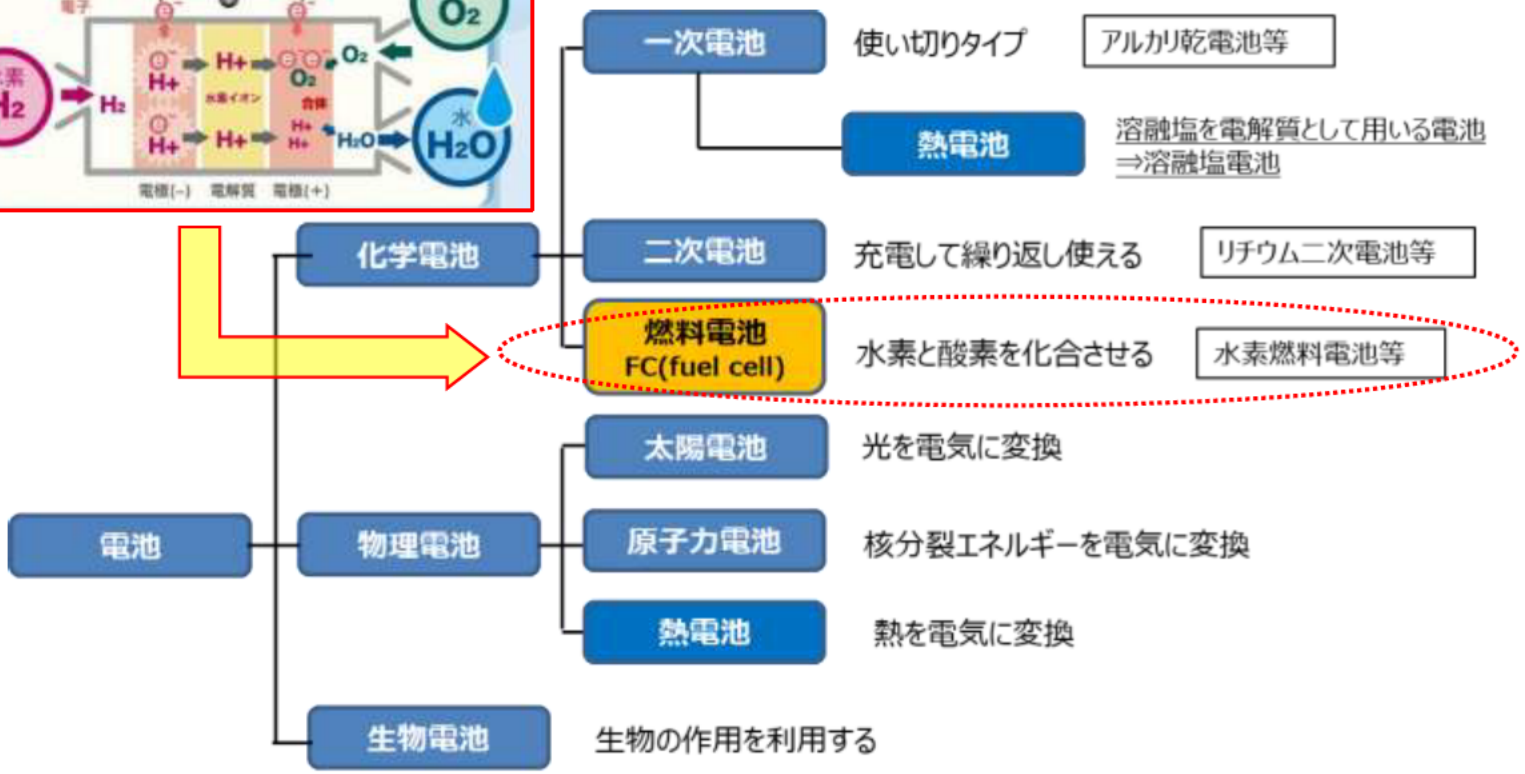


図12-6-1　電池の分類



1.対象品目の概要調査（2）

○輸出令12項(6)燃料電池

燃料電池(FC［fuel cell］)は、電気化学反応によって燃料の化学エネルギーから電力を取り出す電池である。

エネルギー密度と出力密度の関係を図12-6-2に示す。

二次電池であるリチウムイオン電池と比べて、出力は劣るがエネルギーは大きい。持続的にエネルギーが必要な用途に向いていることが分かる。

燃料電池の種類と特徴を表12-6-1に示す。

図12-6-2　エネルギー密度と出力密度

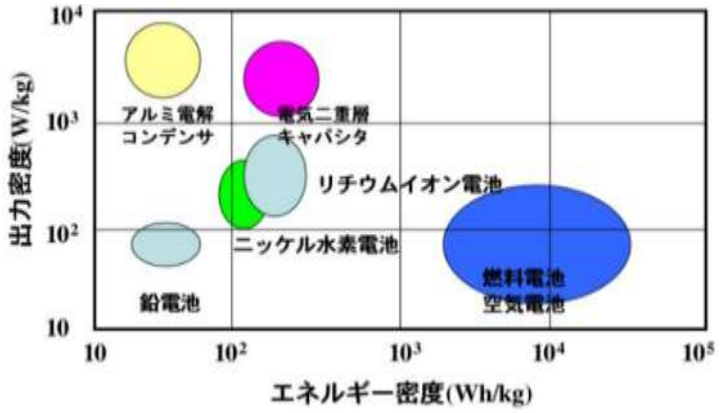


表12-6-1　燃料電池の種類と特徴

燃料電池の種類	低温形		高温形		
	固体高分子形	リン酸形	アルカリ形	溶融炭酸塩形	固体酸化物形
燃料	水素、メタノール、天然ガス	水素、メタノール、天然ガス	純水素	天然ガス、メタノール、ナフサ、石炭ガス化ガス	天然ガス、メタノール、ナフサ、石炭ガス化ガス
運転温度	室温～100℃	160～210℃	室温～260℃	600～700℃	900～1000℃
電解質	水素イオン交換機	高濃度リン酸	高濃度水酸化カリウム	リチウム、カリウム炭酸塩	ｼﾞﾙｺﾆｱ系ｾﾗﾐｯｸ(固体酸化物)
電荷担体	水素イオン	水素イオン	水酸化物イオン	炭酸イオン	酸化物イオン
排熱利用	温水	温水・蒸気	温水・蒸気	蒸気タービン、ガスタービン	蒸気タービン、ガスタービン
特徴	低温作動、高出力密度、移動用動力源	排熱を給湯、冷暖房に使用	低温作動、比較的高い出力	高発電効率、排熱を複合発電システムに利用、燃料の内部改質可能	高発電効率、排熱を複合発電システムに利用、燃料の内部改質可能
利用分野	自動車、モバイル機器 燃料電池自動車	銀行、病院、コンピュータ施設 大規模発電	宇宙船、スペースシャトル 潜水艦	実用化実証中	エネファーム等で実用化が進んでいる。

1.対象品目の概要調査（3）

○輸出令12項(6)燃料電池

☆太陽光で水を水素燃料に変換

スウェーデン・ウメオ大学の研究チームが、「太陽光エネルギーを使って、水を水素へ効率的に変換する手法」を開発した。電力網が整備されていない地域でも、太陽エネルギーで水を電気分解して水素燃料に変換すれば、直接燃料として使うことも燃料電池として最終的に電気に変換することもできるため、「化石燃料への依存を減らすには再生可能エネルギーを水素燃料に変換することが有効である」としている。

☆ＮＥＤＯが燃料電池の活用を目指す実証事業に着手（燃料電池の活用を目指す実証事業を図12-6-3に示す）

NEDOは農機や建機、港湾荷役機器、ドローンなど多様な用途での燃料電池の活用を目指す実証事業に着手する。これにより、日本の燃料電池技術のさらなる競争力強化と水素社会の実現に貢献する。

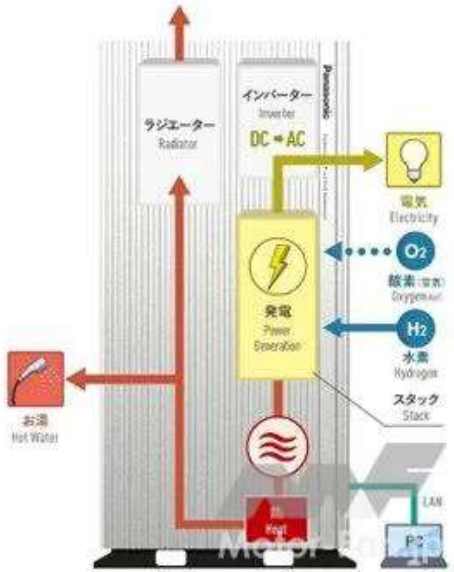
☆純水素型燃料電池を開発（純水素型燃料電池を図12-6-4に示す）

パナソニックは、高純度の水素と空気中の酸素との化学反応で発電する純水素型燃料電池を開発した。業務用途がターゲットで、単体で、小規模な商業施設などの需要に適した5kWの発電出力を得ることができる。さらに、ユニットとして束ねることで、MWクラスの発電出力にも対応する。

図12-6-3　燃料電池の活用を目指す実証事業



図12-6-4　純水素型燃料電池



2.国際協定との対比／協定原文定義等の確認

○輸出令12項(6) 燃料電池

輸出貿易管理令（以下輸出令）／貨物等省令とWassenaarアレンジメントの比較、対象となる機器の定義及び輸出令／貨物等省令の解釈とWassenaarアレンジメントの内容は一致している。

輸出令	貨物等省令			貨物等省令文言（全文）	パラメータ
	条	項	号		
12(6)	11	1	八	大気から遮断された状態で使用することができる動力装置であって、次のいずれかに該当するもの	
12(6)	11		八	八　出力が２キロワットを超える燃料電池であって、次のいずれかに該当する装置を有するもの	出力が２キロワットを超える
12(6)	11		八	（一）　10キロヘルツ未満の周波数の水中ノイズを減少させることができるように設計した防音装置若しくはエンクロージャ又は衝撃を緩和することができるように設計した装置	10キロヘルツ未満の周波数の水中ノイズを減少させることができるように設計
12(6)	11		八	（二）　反応生成物を圧縮又は燃料として再生することができ、反応生成物を貯蔵することができ、かつ、100キロパスカル以上の圧力下で反応生成物を排出することができるように設計した装置	100キロパスカル以上の圧力下で反応生成物を排出することができるように設計

WA番号						WA文言（英文）
5桁	細番					
8A2	j					j. Air independent power systems specially designed for underwater use, as follows:
8A2	j	3				3. "Fuel cell" air independent power systems with an output exceeding 2 kW and having any of the following:
8A2	j	3	a			a. Devices or enclosures, specially designed for underwater noise reduction in frequencies below 10 kHz, or special mounting devices for shock mitigation; or
8A2	j	3	b			b. Systems having all of the following:
8A2	j	3	b	1		1. Specially designed to pressurise the products of reaction or for fuel reformation;
8A2	j	3	b	2		2. Specially designed to store the products of the reaction; and
8A2	j	3	b	3		3. Specially designed to discharge the products of the reaction against a pressure of 100 kPa or more;

比較原文
・経済産業省　安全保障貿易管理
　貨物・技術のマトリクス表
　（令和3年1月27日施行対応版）
https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html
・Wassenaar Arrangement
　PUBLIC DOCUMENTS　Volume II
　List of Dual-Use Goods and Technologies
　and　Munitions List（December 2020）
https://www.wassenaar.org/app/uploads/2020/12/Public-Docs-Vol-II-2020-List-of-DU-Goods-and-Technologies-and-Munitions-List-Dec-20-3.pdf

3.品目の主たる用途の調査分析（1）

○輸出令12項(6)燃料電池

①現在我が国又は諸外国で、使用中の用途及び将来活用の可能性がある用途の調査

燃料電池の種類・用途・使用機器を図12-6-5に示す。

燃料電池は、クリーンなエネルギーで発電効率が良いという特徴を持ち、電気自動車をはじめ家庭や施設の電源、宇宙船や潜水艦等で使用されている。

図12-6-5　燃料電池の種類と用途

【燃料電池の種類】
- 固体高分子形燃料電池
- りん酸形燃料電池
- アルカリ形燃料電池
- 溶融炭酸塩形燃料電地
- 固体酸化物形燃料電池

【燃料電池の用途】

（民生用途）
- 電子機器の電源
- **燃料電池自動車**
- 非常用電源
- 宇宙船
- 水中探査機
- 地質探査装置
- 水中修理装置

（軍用用途）
- **潜水艦**
- 水中救助艇



3.品目の主たる用途の調査分析（2）

○輸出令12項(6)燃料電池

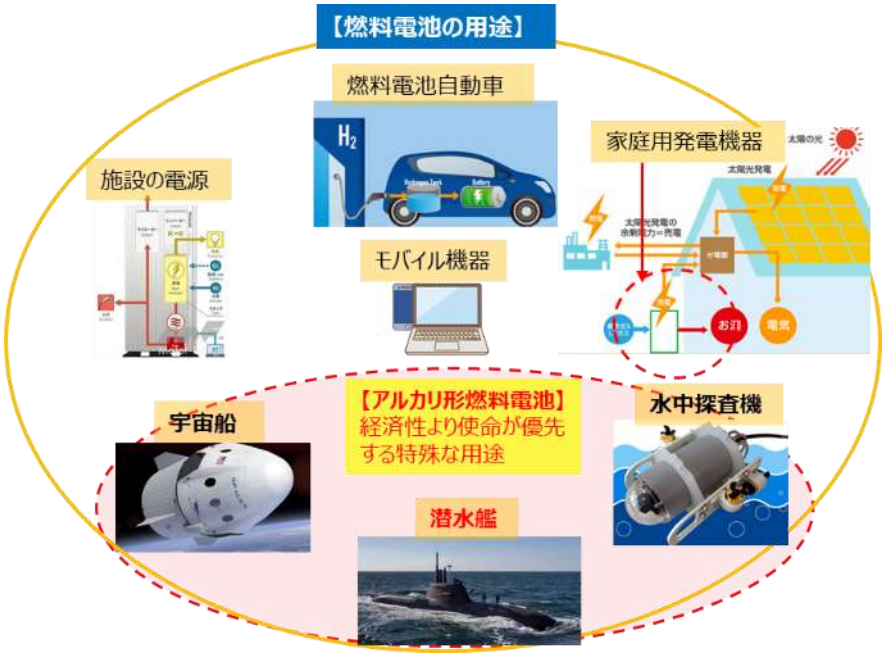
②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

燃料電池の規制がかかる可能性がある用途を図12-6-6に示す。
省令中「大気から遮断された」「水中」とあるので、図中の赤丸で囲んだ「宇宙船」「潜水艦」「水中探査機」等が規制対象となりうる用途である。

図12-6-6　規制がかかる可能性のある用途

＜貨物等省令＞

大気から遮断された状態で使用することができる動力装置であって、次のいずれかに該当するもの
ハ　出力が２キロワットを超える燃料電池であって、次のいずれかに該当する装置を有するもの
（一）　10キロヘルツ未満の周波数の水中ノイズを減少させることができるように設計した防音装置若しくはエンクロージャ又は衝撃を緩和することができるように設計した装置
（二）　反応生成物を圧縮又は燃料として再生することができ、反応生成物を貯蔵することができ、かつ、100キロパスカル以上の圧力下で反応生成物を排出することができるように設計した装置



3.品目の主たる用途の調査分析（3）

○輸出令12項(6)燃料電池

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

【（参考）ガス循環系燃料電池の場合】

海域試験模式図を図12-6-7に示す。

海洋研究開発機構と三菱重工業は、海中で長時間働く、新しいガス循環系構造を採用し小型化した燃料電池システムを開発し、実際の海域での試験を実施した。海底設置型の観測機器や海中探査機などの電源に用いることで、蓄電池よりも長期的な海洋観測や調査が可能になる。

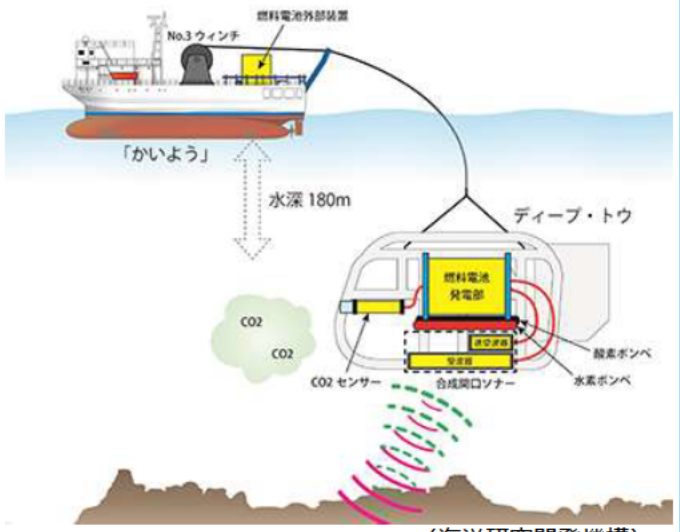
発電で生成される水を海中に放出しない完全閉鎖式システムは、深海巡航探査機「うらしま」の電源として開発されたものである。

実海域試験では、燃料電池システムを海洋調査用曳航体「ディープ・トウ」に搭載して最大で水深180mまで潜航させ、電力を同時に2つの観測機器に供給した。最大出力200ワット、2時間の安定した電力供給が確認できた。また、海中探査機の海底充電ステーション用の電源として、探査機の電池を海底で充電することで観測を継続させることが可能となる。

閉鎖式HEML燃料電池システムの概要を表12-6-2に示す。

表より、出力350Wとなっており、**輸出規制パラメータの「出力2キロワットを超える燃料電池」には該当しない**ことが分かる。

図12-6-7　海域試験模式図



（海洋研究開発機構）

表12-6-2　閉鎖式HEML燃料電池システムの概要

種別	スタンドアローン動作型水中燃料電池システム
動作温度	0℃～45℃
保管温度	0℃～60℃
振動・衝撃	船上使用可
HEML燃料電池	直径600mm、長さ800mm、重量500kg以下、出力350W
燃料	純水素
酸化剤	純酸素

規制パラメータ　輸出令12項(6)
大気から遮断された状態で使用することができる動力装置であって、次のいずれかに該当するもの
ハ　出力が２キロワットを超える燃料電池であって、次のいずれかに該当する装置を有するもの
（一）　10キロヘルツ未満の周波数の水中ノイズを減少させることができるように設計した防音装置若しくはエンクロージャ又は衝撃を緩和することができるように設計した装置
（二）　反応生成物を圧縮又は燃料として再生することができ、反応生成物を貯蔵することができ、かつ、100キロパスカル以上の圧力下で反応生成物を排出することができるように設計した装置

3.品目の主たる用途の調査分析（4）

○輸出令12項(6)燃料電池

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

【（参考）深海巡航探査機の場合】

深海巡航探査機を図12-6-8に示す。

深海巡航探査機は、自律型海中ロボットで、あらかじめ設定した探査ルートに沿って自動で潜航することができる。海底地形や地質の精密探査が可能である。

深海巡航探査機の主要諸元を表12-6-3に示す。

表より、出力4kWとなっており、**輸出規制パラメータの「出力2キロワットを超える燃料電池」に該当**する。

さらに、規制パラメータ（一）、（二）に該当するかどうか判定する必要がある。

図12-6-8　深海巡航探査機



表12-6-3　深海巡航探査機の主要諸元

【主要目】	
最大潜航深度	3,500m
最大航続距離	300km
水中速度(最大)	4ノット
長さ	10m
幅	1.3m
【動力装置】	
主動力源	閉鎖式燃料電池（固体高分子式電解質膜方式）
定格出力	4kW
定格電圧	120V
補助動力源	リチウムイオン電池120V、30Ah

規制パラメータ 輸出令12項(6)
大気から遮断された状態で使用することができる動力装置であって、次のいずれかに該当するもの
ハ　出力が２キロワットを超える燃料電池であって、次のいずれかに該当する装置を有するもの
（一）　10キロヘルツ未満の周波数の水中ノイズを減少させることができるように設計した防音装置若しくはエンクロージャ又は衝撃を緩和することができるように設計した装置
（二）　反応生成物を圧縮又は燃料として再生することができ、反応生成物を貯蔵することができ、かつ、100キロパスカル以上の圧力下で反応生成物を排出することができるように設計した装置

3.品目の主たる用途の調査分析（5）

○輸出令12項(6)燃料電池

②利用可能性のある用途全体に対して、規制がかかっている用途の分析、可視化

【（参考）軍事用途の場合】

燃料電池は燃料効率が良く、大きなエネルギーが得られることから、軍事用途へも使用されている。燃料電池の軍事用途への使用例を図12-6-9に示す。潜水艦に求められる静寂性を満たすために、従来のスターリングエンジンからほぼ無音の燃料電池へと置き換えられた。燃料電池を海中で使用する際には、燃料電池の発電により生成される水を海中に放出することが困難であるため、閉鎖式のシステムを構築する。**潜水艦用として使用する場合、純酸素と純水素を用いた閉鎖循循環形システム技術が必要**となる。

燃料電池の潜水艦用途に関しては、輸出規制の対象となる。

燃料電池の自動車用と潜水艦用の違いを図12-6-10に示す。

図12-6-9　燃料電池の軍事用途への使用例

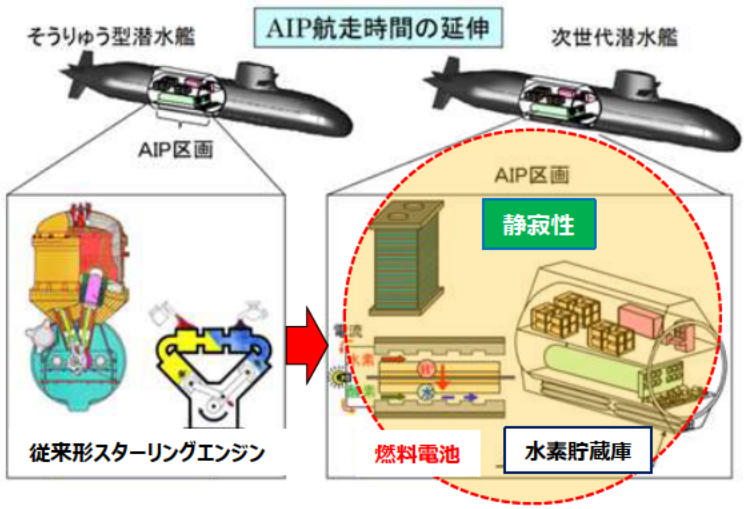
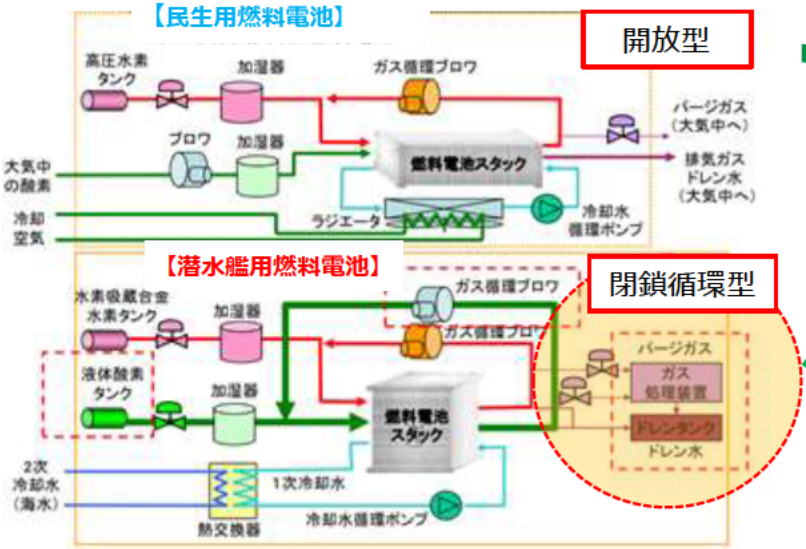


図12-6-10　燃料電池の自動車用と潜水艦用の違い



3.品目の主たる用途の調査分析（6）

○輸出令12項(6)燃料電池

③規制がかかっている用途の品目の分析及び可視化

用途に対する規制はない。

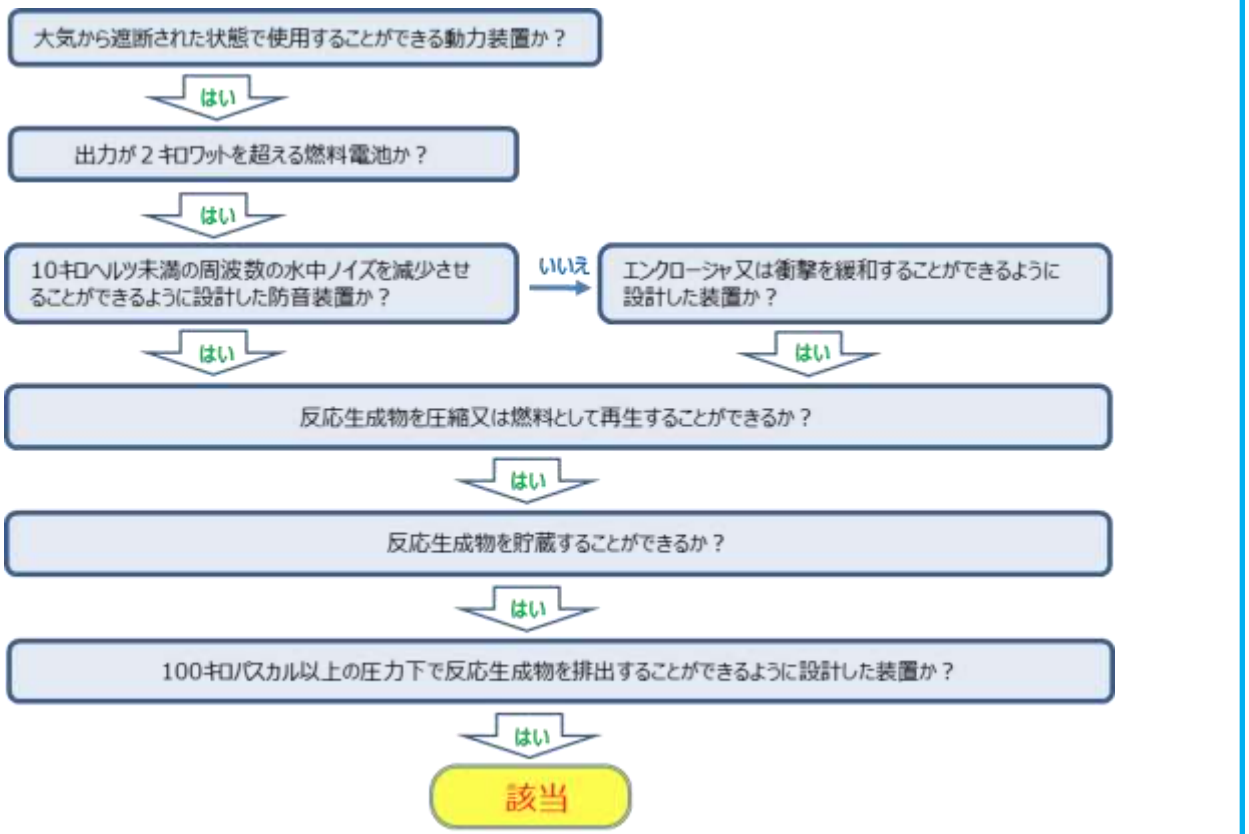
4.品目の技術動向調査（1）

○輸出令12項(6)燃料電池

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

規制省令に基づき、規制に抵触するかどうかを「図12-6-11　規制判定フロー」に示す。

図12-6-11　規制判定フロー



4.品目の技術動向調査（2）

○輸出令12項(6)燃料電池

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

☆規制パラメーター「10キロヘルツ未満の周波数の水中ノイズ」

視界が限られる潜水艦は、水中音波探知機（ソナー）を使って水中の音波を解析することで、周囲の障害物や敵艦船を探知している。音波は空気中を340m/sの速さで伝わるが、水中では約4,500m/sで伝わる。また、低周波であるほど減衰が少なく、14KHzの音波を用いるソナーでは有効距離4,500mであるが、4KHzでは有効距離は18,000mである。

音波の水中での減衰には、拡散損失と吸収損失がある。

・拡散損失

音波は水中で拡散していくことで距離が離れると弱くなっていく。

・吸収損失

音波エネルギーが他のエネルギーに変換するために発生する。単位距離当たりの減衰量を吸収係数α【dB/m】と呼び、距離rだけ伝搬する間の損失はarとなる。この吸収は、1)粘性による損失、2)熱伝導による損失、3)分子間のエネルギー交換による損失等により発生する。

Fisherによると、海水中のαは次式で与えられる。

$$\alpha\,[\mathrm{dB/m}] = \frac{A f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{B f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + c f^2$$

f_1、f_2はホウ酸と硫酸マグネシウムの緩和時間に関連した周波数、A、B、cは温度と圧力の関数である。

長距離音波伝搬に利用される数100Hz以下の周波数ではαの値は小さいが、kHz以上の領域では大きな値となる。

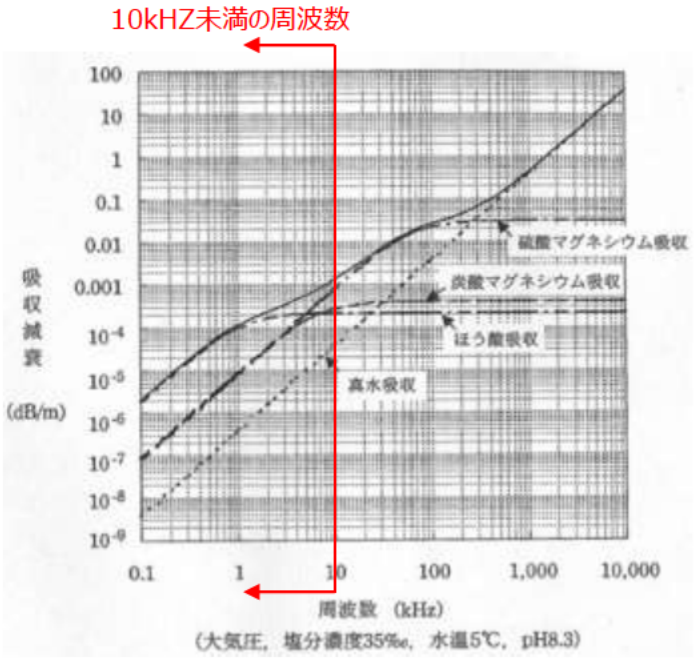
海水中における周波数と吸収減衰の関係を図12-6-12に示す。

潜水艦で用いるソナーは**10kHz未満の音波を利用**することが多く、これは図からも吸収損失が比較的低い領域であることが理由と推測できる。

以上より、**規制パラメーター「10キロヘルツ未満の周波数の水中ノイズ」**は、「ソナーに用いる音波周波数帯域でノイズを減少させる設計」を想定したものと推測できる。

なお、ソナーの分解能は周波数が高いほど良くなるので、出来るだけ高い周波数で損失が少ない妥協点で周波数を選択しているのが、現状である。

図12-6-12　海水中での周波数と吸収減衰の関係



4.品目の技術動向調査（3）

○輸出令12項(6)燃料電池

①規制パラメータを基準とした、性能パラメータの調査／ 技術動向と規制状況の分析、可視化

☆規制パラメーター「<u>反応生成物を圧縮又は燃料として再生</u>」「<u>反応生成物を貯蔵</u>」

燃料電池の反応生成物は水である。

潜水艦に燃料電池が搭載されている場合も、他のエネルギー源（一次電池、二次電池やガソリン等）を併用しており、生成物である水を他のエネルギーを使用して、再び水素と酸素を生成し、燃料電池の燃料として利用することもできる。いわゆるエネルギーの変換であるが、例えば太陽光発電の場合、発電で得られた電気を使って水から水素を生成して貯蔵し、燃料電池の燃料として使用することもある。潜水艦内においては、ボンベで貯蔵できる水素と酸素の量には限界があり、潜航中にエネルギーの変換で必要なエネルギーに置き換える方が、限られた貯蔵スペースの有効活用になる。

また、貯蔵して艦内で使用する水としても利用できる。

☆規制パラメーター「<u>100キロパスカル以上の圧力下で反応生成物を排出</u>」

100キロパスカル＝水深10メートルの水圧なので、
「潜水艦が水深10mより深く潜った状態で、反応生成物である水を排出できる仕組み」を備えている装置に使われる**燃料電池**を指す。

規制パラメータ　輸出令12項(6)
大気から遮断された状態で使用することができる動力装置であって、次のいずれかに該当するもの
八　出力が２キロワットを超える燃料電池であって、次のいずれかに該当する装置を有するもの
（一）　10キロヘルツ未満の周波数の水中ノイズを減少させることができるように設計した防音装置若しくはエンクロージャ又は衝撃を緩和することができるように設計した装置
（二）　反応生成物を圧縮又は燃料として再生することができ、反応生成物を貯蔵することができ、かつ、100キロパスカル以上の圧力下で反応生成物を排出することができるように設計した装置

4.品目の技術動向調査（4）

○輸出令12項(6)燃料電池

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

世界の燃料電池市場シェアを図12-6-13に示す。

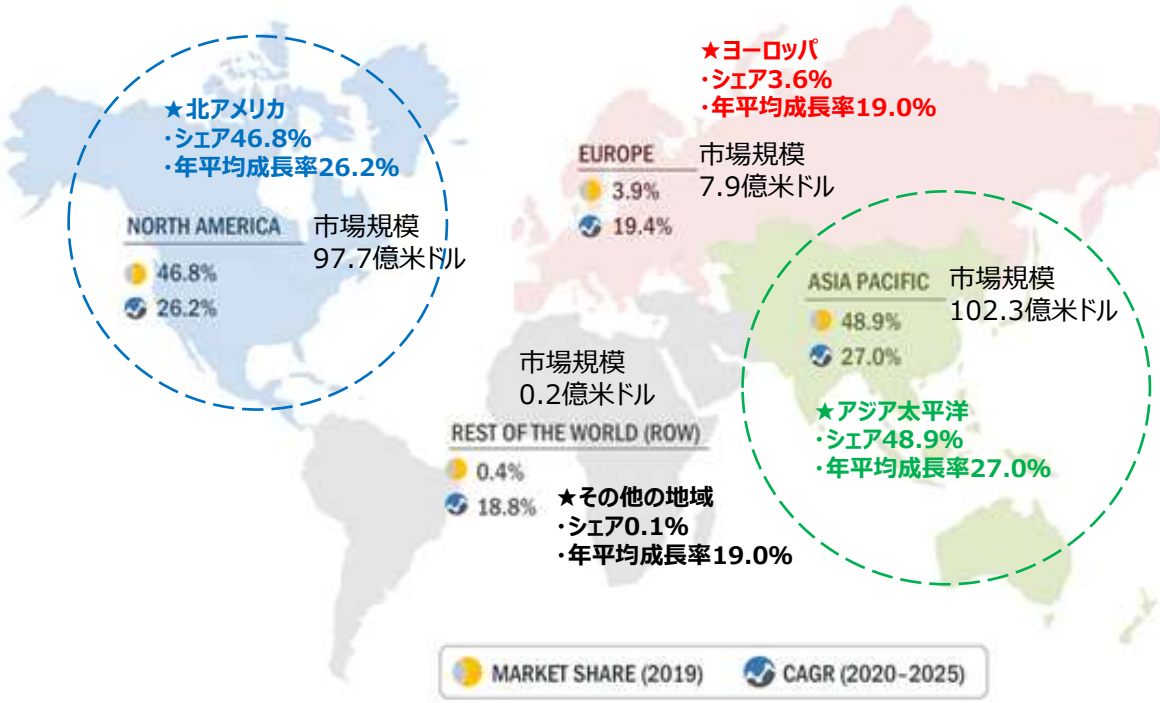
2019年の各地域の市場シェアと、2020年から2025年の期間での年平均成長率が表中に示されている。

◆北アメリカ(市場規模97.7億米ドル)
シェア46.8%　年平均成長率26.2%
◆ヨーロッパ(市場規模7.9億米ドル)
シェア3.9%　年平均成長率19.4%
◆アジア太平洋(市場規模102.3億米ドル)
シェア48.9%　年平均成長率27.0%
◆その他の地域(市場規模0.2億米ドル)
シェア0.4%　年平均成長率18.8%

アジア太平洋地域が最大の市場で、燃料電池自動車の増加が期待され、今後も高い成長率が予測されている。
二番目の市場である北米では、今後クリーンエネルギーの必要意識が高まり、燃料電池自動車や発電需要の増加が期待される。

※各地域の市場規模は、以下の方法で算出した。
・次頁の2020年世界市場規模263億米ドルから、地域別シェアを乗じて得た値に、年平均成長率を元に2019年の地域別市場規模を逆算した。

図12-6-13　世界の燃料電池市場シェア　2019年



出典：MarketsandMarkets
Fuel Cells Market– GLOBAL FORECAST TO 2025

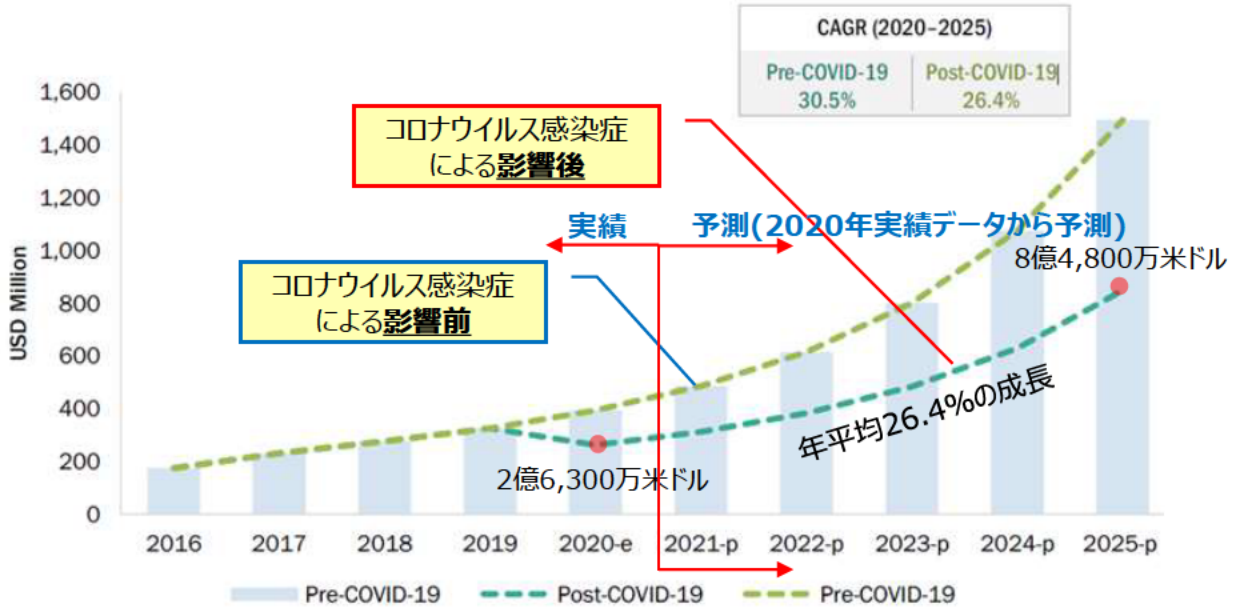
4.品目の技術動向調査（5）

○輸出令12項(6)燃料電池

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

世界の燃料電池市場は、2020年の2億6,300万米ドルから年平均26.4%の成長を遂げ、2025年には8億4,800万米ドルに達すると予測されている。燃料電池に関連する政府の補助金と研究開発活動の増加が、主な成長の要因である。
世界の燃料電池市場規模2016-2025を図12-6-14に示す。
コロナウイルス感染症による予測変更前後のデータを示した。

図12-6-14　世界の燃料電池市場規模　2016-2025



出典：MarketsandMarkets
Fuel Cells Market– GLOBAL FORECAST TO 2025

4.品目の技術動向調査（6）

○輸出令12項(6)燃料電池

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

世界の燃料電池の供給電力予測は、2020年710.7MWから2025年までに2,884.8MWに達すると予測されている。この間の年平均成長率は32.3%である。

燃料電池を種類別に見ると、**PEMFC（固体高分子形燃料電池）**は2025年には2,682.6MWに達すると予測されており、この間の年平均成長率は32.7%で、タイプ別では最高の成長率となる。燃料電池自動車は大型車での採用が今後伸びると予測されており、このことがPEMFCの高成長に繋がっている。

世界の燃料電池の種類別電力量を表12-6-5に、この表をグラフ化したものを図12-6-15に示す。

燃料電池市場で**PEMFC**は、アジア太平洋地域などで高成長を遂げ、2020年の652.4MWから2025年までに2,682.6MWとなり、この間の年平均成長率は32.7%である。

PAFC（リン酸形燃料電池）は、同じ期間で28.9%の年平均成長率が予測されている。これは、クリーンエネルギー志向による局所発電への利用によるものである。

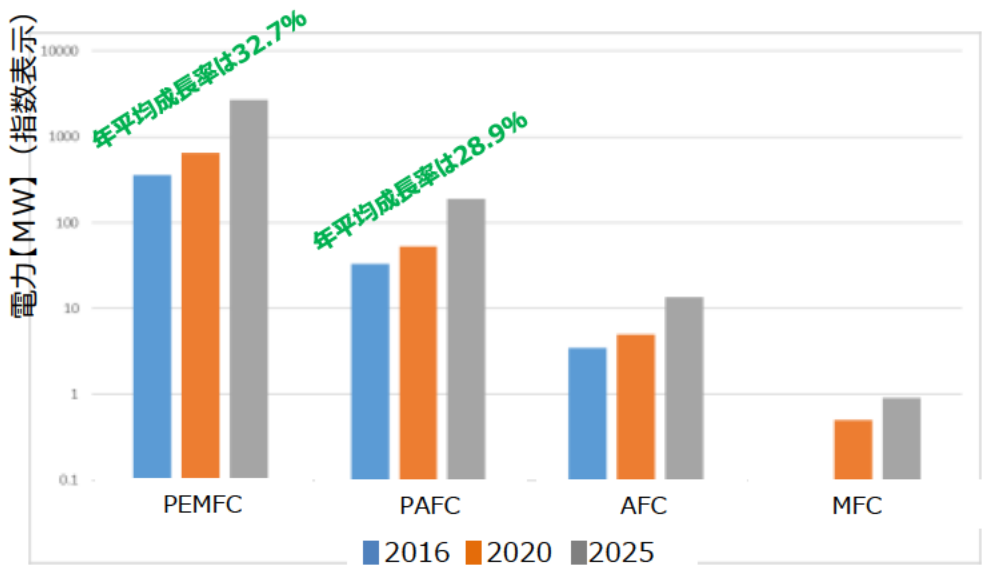
AFC（アルカリ形燃料電池）は、航空宇宙産業での利用で大幅な成長が見込まれている。

表12-6-5　世界の燃料電池の種類別電力量【MW】

	2016年	2020年	2025年
PEMFC(固体高分子形燃料電池)	361.5	652.4	2682.6
PAFC(リン酸形燃料電池)	32.8	52.8	187.9
AFC（アルカリ形燃料電池）	3.5	5	13.5
MFC(溶融炭酸塩形燃料電池)	0	0.5	0.9

出典：MarketsandMarkets
Fuel Cells Market– GLOBAL FORECAST TO 2025

図12-6-15　世界の燃料電池の種類別電力量推移



4.品目の技術動向調査（7）

○輸出令12項(6)燃料電池

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

世界の主な燃料電池メーカーを表12-6-6に示す。
このトップ5企業の合計シェアは、燃料電池市場の60%を占めている。
＜協業関係＞
◆2017年10月
Ballard Power Systemsと日清紡ホールディングスが共同で、燃料電池に非貴金属触媒を使用する研究開発を行っている。
◆2019年4月
Plug Powerは、電気自動車メーカーであるCharlatteAmericaと提携した。
ヨーロッパとアメリカの空港で、ProGen水素燃料電池技術で電力を供給している。
◆2019年10月
PlugPowerがドイツの特殊車両メーカーMULAGと提携。
ドイツのハンブルク空港で、貨物牽引トラクターに燃料電池で電力を供給する。

表12-6-6　世界の主な燃料電池メーカー

企業	会社概要
Ballard Power Systems（カナダ）	自動車用燃料電池の製造会社。列車、海洋用途、および無線塔などの重要なインフラ用バックアップ電源システムにも燃料電池を提供している。さらに、ドローン用燃料電池も開発中である。
Cummins（アメリカ）	新電力事業として、バッテリー、燃料電池、水素製造を手掛けている。2019年9月、燃料電池および水素製造を手掛けるHydrogenicsCorporationを買収した。北米の都市バス、スクールバス、ヨーロッパでの通勤電車へ燃料電池による電力を供給している。
PowerCell（スウェーデン）	燃料電池と電力システムの開発、製造、販売を行っている。化石燃料と再生可能燃料の両方を処理し、それらを水素に変換して、パワーセルを駆動し、1～6キロワットで動作する。
SFC Energy（ドイツ）	クリーンエネルギー、防衛、輸送が主な事業で、再生可能エネルギーとして、風力発電のバックアップ電源として燃料電池を提供している。
Plug Power（アメリカ）	代替エネルギー技術として、水素および燃料電池を手掛けている。テレコムセンターのバックアップ電源へ燃料電池を提供している。
Intelligent Energy（イギリス）	自動車、自家発電、無人航空機等に向けた燃料電池を提供している。建築業界へ燃料電池を供給するため、英国、ドイツ、米国、日本と提携している。

4.品目の技術動向調査（8）

○輸出令12項(6)燃料電池

②市場／政策動向調査、市場プレーヤ調査

その他の燃料電池メーカーを表12-6-7に示す。

表12-6-7　その他の燃料電池メーカー

企業	会社概要
Howaldtswerke-Deutsche Werft（ドイツ）	キールに本社を置くドイツの造船会社。2005年以降はティッセンクルップ・マリン・システムズの子会社。現在、主に212クラスAの燃料電池駆動の潜水艦で知られている。
Nordseewerke（ドイツ）	ドイツの機械製作会社。元は、海軍向け水上艦艇や潜水艦、コンテナ船、浚渫船や研究船などの特殊船舶の建造および修理を主たる業務としていた。現在は風力原動機の製造を行う。
Siemens AG（ドイツ）	もともと電信、電車、電子機器の製造会社から発展し、現在では情報通信、交通、防衛、生産設備、家電製品等を製造する。
UTC Power（アメリカ）	ロケットエンジン、ヘリコプター、燃料電池等を製造していたが、これらの事業は売却された。現在は、航空機のエンジン、宇宙産業、防火・消火製品およびセキュリティサービス、その他工業製品など、非常に多くの分野で研究開発、製造を行っている。
Lockheed Martin Corporation（アメリカ）	ロッキード・マーティンは、アメリカ合衆国の航空機・宇宙船の開発製造会社で、世界のトップクラスの軍需企業である。最新鋭ステルス戦闘機であるF-22やF-35の開発・製造を行っている。
Ballard Power Sources（カナダ）	自動車用燃料電池の製造会社。列車、海洋用途、および無線塔などの重要なインフラ用バックアップ電源システムにも燃料電池を提供している。さらに、ドローン用燃料電池も開発中である。
Kockums AB（スウェーデン）	スウェーデンの防衛産業SAABグループ所有の造船会社で、潜水艦などを製造してきた。現在、船舶の水中でのステルス技術を開発している。
DCNS Group（フランス）	フランスの海軍艦艇を建造する造船企業で、原子力潜水艦、原子力空母を製造してきた。
Design Bureau “Rubin”, “Malakhit”（ロシア）	ロシア最大の潜水艦製造会社。北極圏で一年中運航できる潜水艦貨物船や天然ガスパイプライン用の原子力水中ガス中継基地などに取り組んでいる。また、原子力攻撃型潜水艦や、魚雷発射管と潜水艦ミサイルの複合体の開発も行っている。
State Enterprise （アメリカ）	米国海軍調査研究所。海軍と海兵隊の調査研究所で、基礎科学研究、応用研究、技術開発、プロトタイピングなどを行っている。専門分野としてプラズマ物理学、宇宙物理学、材料工学、戦術的電子戦の研究などが含まれる。
ブルームエナジージャパン	ブルームエナジーとソフトバンクグループが合併して出来た会社。横浜市役所新庁舎などに納入。
三菱パワー	旧三菱日立パワーシステム。大型商業施設や工場向け大型機を2017年に発売。1,000キロワット級のSOFC（固体酸化物形燃料電池）を計画中。
富士電機	病院やスーパーなど50キロワット級の機種を発売。国内外で納入実績あり。
京セラ	大阪ガスなどと家庭向けで培った技術をベースに小型機を発売。2022年に燃料電池などの新研究拠点を操業。
ダイニチ工業	京セラなどと小型機を製造。

令和３年度重要技術管理体制強化事業（国際レジームリスト品に係る動向等調査）

発行　令和 4年3月18日

株式会社三菱ケミカルリサーチ

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第4項（18の2）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
4-182-2	図4-182-1	電池の分類
4-182-2	図4-182-2	熱電池
4-182-3	表4-182-1	熱電池の特性
4-182-5	図4-182-3	電池の種類と用途
4-182-6	図4-182-4	規制対象品目となりえる品目
4-182-7	図4-182-5	緊急脱出装置
4-182-7	図4-182-6	誘導砲
4-182-8	図4-182-7	ＧＳユアサの熱電池
4-182-8	図4-182-8	出力密度比較
4-182-9	図4-182-9	定格時間内最小電圧の経年変化
4-182-9	図4-182-10	寿命予測
4-182-10	図4-182-11	各種電池のエネルギー密度と出力密度の関係
4-182-12	図4-182-12	軍用バッテリー市場の電池種類別占有率
4-182-13	表4-182-2	主な熱電池メーカー

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第4項（23）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
4-23-2	図4-23-1	アナログ-デジタル変換回路
4-23-3	図4-23-2	主なアナログデジタル変換回路の方式と性能
4-23-4	図4-23-3	シングルエンド4chのA/D変換PCカード
4-23-4	図4-23-4	24ビット8チャンネル高精度データ収集カード
4-23-4	図4-23-5	ＶＨＳビデオ変換キャプチャー
4-23-6	図4-23-6	PCにおけるアナログデジタル変換器の使用イメージ
4-23-6	図4-23-7	アナログデジタル変換器の主な用途のサンプリングレートと分解能
4-23-7	図4-23-8	アナログデジタル変換器の用途の例
4-23-8	図4-23-9	ロケットと無人航空機の例
4-23-9	図4-23-10	軍事用ロケットの構造模式図
4-23-9	図4-23-11	パトリオット　P3C のシーカーと誘導制御部
4-23-10	図4-23-12	電子戦に使用される機器の内部構造の例
4-23-12	図4-23-15	宇宙の放射線環境
4-23-12	図4-23-16	高度と放射線強度
4-23-13	表4-23-1	半導体デバイスの耐放射線性
4-23-13	図4-23-17	シングルイベント効果とソフトエラー（左下）、ラッチアップ（右下）
4-23-14	図4-23-18	ADS-944データーシート
4-23-15	図4-23-19	ISL73141SEHの外観写真
4-23-16	図4-23-20	ISSのラジエータ
4-23-17	図4-23-21	glass-to-metalシール
4-23-18	図4-23-22	MCTRに掲載されている典型的なアナログデジタル変換ボード
4-23-19	図4-23-23	アナログデジタル変換器市場の年次推移
4-23-19	表4-23-2	アナログデジタル変換器用途別市場推移

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第4項（26）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
4-26-2	図4-26-1	集積回路　トランジスタ、コンデンサ、抵抗の構成例
4-26-2	図4-26-2	集積回路の種類
4-26-3	図4-26-3	探知装置（Seeker）の例
4-26-4	図4-26-4	富士山レーダードーム
4-26-4	図4-26-5	航空機のレードーム
4-26-4	図4-26-6	ミサイルのレードームの例
4-26-6	図4-26-7	集積回路を使用する機器の例
4-26-7	図4-26-8	小惑星探査機　はやぶさ２
4-26-7	図4-26-9	気象衛星ひまわり８号
4-26-9	図4-26-10	地球上空
4-26-10	図4-26-13	耐放射線アームプロセッサー　VORAGO社
4-26-12	図4-26-14	放射線検出方式
4-26-12	図4-26-15	明星電気株式会社製SPM
4-26-13	図4-26-16	放射熱
4-26-13	図4-26-17	航空機用レードームの例

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（１）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-1-3	図7-1-1	集積回路　トランジスタ、コンデンサ、抵抗の構成例
7-1-3	図7-1-3	モノリシック集積回路の例
7-1-4	図7-1-4	ハイブリッド集積回路の例
7-1-5	図7-1-5	マルチチップ集積回路の例
7-1-5	図7-1-6	SOS（Silicon On Sapphire）の構造例
7-1-5	図7-1-7	光集積回路の例
7-1-6	図7-1-9	化合物半導体　モノリシックマイクロ波集積回路構造例
7-1-9	図7-1-11	A14 BionicプロセッサとIntel Core i9-10980XEの外観
7-1-9	図7-1-12	エアコンのマイクロコントローラ使用例
7-1-10	図7-1-13	DRAMとSRAMのセルの構成例
7-1-11	図7-1-14	マスクROMのセルの構成例
7-1-11	図7-1-15	UV-EPROM
7-1-12	図7-1-16	NOR型フラッシュメモリとNAND型フラッシュメモリの構造比較例
7-1-16	図7-1-17	逐次比較型アナログデジタル変換器の回路構成例
7-1-16	図7-1-18	アナログ信号(入力)とデジタル信号(出力)の関係
7-1-17	図7-1-19	デジタルアナログ変換器のイメージ
7-1-17	図7-1-20	抵抗ラダー型デジタルアナログ変換回路の例
7-1-18	図7-1-21	光集積回路の例
7-1-18	図7-1-22	信号処理用のシリコン光回路上に貼り合わせた ハイブリッド光位相シフタ
7-1-20	図7-1-24	脳の神経回路の一部を模したニューラルネットワーク
7-1-20	図7-1-25	ニューラルネットワークの構造例
7-1-20	図7-1-26	ニューラルネットワークのアーキテクチャ例
7-1-21	図7-1-27	FFT変換のイメージ
7-1-21	図7-1-28	ダイレクトデジタルシンセサイザの構成例
7-1-21	図7-1-29	Qualcomm社（米国）のスマートフォン用 5G対応プラットフォームチップ
7-1-33	図7-1-30	汎用ロジックICとメモリの外観
7-1-34	図7-1-31	集積回路を使用する機器の例
7-1-35	図7-1-32	福島第一原子力発電所原子炉の放射線量と調査装置
7-1-36	図7-1-33	人工/自然放射線量
7-1-36	図7-1-34	CTの外観と内部構造
7-1-37	図7-1-35	空間線量率の比較
7-1-37	図7-1-36	H-IIA試験機2号機の実証衛星(MDS-1)の衛星システム
7-1-38	図7-1-37	自衛隊の化学防護車
7-1-38	図7-1-38	スカイレンジャーR70
7-1-39	図7-1-39	宇宙ステーションのラジエータ
7-1-39	図7-1-40	宇宙ステーション船外実験プラットフォームの例
7-1-41	図7-1-42	迎撃ミサイルの構造
7-1-41	図7-1-43	赤外線シーカの回路例
7-1-41	図7-1-44	小型・高性能シーカ技術

（様式２）

7-1-43	図7-1-45	放射線による半導体デバイスの現象
7-1-44	図7-1-46	MOSFETバルク構造とSOI構造の比較イメージ
7-1-45	図7-1-47	原子はじき出しエネルギーと逆光子パラメータ
7-1-45	図7-1-48	CIGSとシリコンの放射線耐性比較（太陽電池の場合）
7-1-46	図7-1-49	XILINX（米国）のミサイル用集積回路構成の例
7-1-48	図7-1-50	電子戦システムの例
7-1-49	図7-1-51	電子戦に使用される機器の内部構造の例
7-1-50	図7-1-52	極限環境におけるトータルドーズ量と温度の関係
7-1-51	表7-1-10	自由空気中の中世束が1平方センチメートルあたり１兆個である場合の実行線量
7-1-51	図7-1-53	CIGSとシリコンの放射線耐性比較（太陽電池の場合）
7-1-56	図7-1-58	時間とデジタルアナログ変換器の出力の関係
7-1-56	表7-1-13	デジタルアナログ変換器の分解能と量子化の単位（LSB）
7-1-57	図7-1-59	スプリアス・フリー・ダイナミック・レンジ（SFDR）
7-1-58	図7-1-60	規制対象となる信号処理用の電気光学的集積回路又は光集積回路の例
7-1-60	図7-1-61	入力信号におけるシングルエンド方式と差動方式の例
7-1-61	図7-1-62	FPGA 上のシリアルトランシーバの例
7-1-61	図7-1-63	XC7VX690Tの外観
7-1-62	図7-1-64	米国国防総省の「Air Combat Evolution（ACE）」での実際の訓練の様子
7-1-63	図7-1-65	Xilinx（米国）のVirtex-7 FPGAシリーズのRF1761フリ ップチップBGAパッケージ（裏面）
7-1-64	図7-1-66	伝搬遅延時間の例
7-1-64	図7-1-67	ソシオネクストのカスタム集積回路向けCPUデザイン概要
7-1-65	図7-1-68	ANDの論理回路の例
7-1-67	図7-1-71	Analog Devices（米国）のDDS製品
7-1-67	図7-1-72	アナログデバイス（米国）AD9914の外観
7-1-69	図7-1-74	世界の集積回路（Integrated Circuit）製品別市場（WSTS）
7-1-70	図7-1-75	世界の半導体市場の概要
7-1-71	図7-1-76	世界の半導体市場の概要
7-1-71	図7-1-77	用途別耐放射線集積回路市場2020年の実績と2026年の予測
7-1-72	図7-1-78	耐放射線集積回路市場企業シェア

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（２）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-2-2	図7-2-1	マイクロ波、ミリ波の位置付けと用途
7-2-2	表7-2-1	マイクロ波帯のIEEE名
7-2-3	表7-2-2	貨物等省令第6条第ニ号の規制対象となる品目
7-2-4	表7-2-3	マイクロ波発振・増幅用真空管の代表的な種類
7-2-4	表7-2-4	真空電子デバイスの性能の指標
7-2-5	図7-2-2	マイクロ波用真空電子デバイスの例（進行波管）
7-2-5	図7-2-3	熱電子陰極
7-2-6	図7-2-4	マイクロ波用真空電子デバイスの例
7-2-7	図7-2-5	代表的な電子銃の仕組み
7-2-8	図7-2-6	電子銃の特徴
7-2-8	図7-2-7	電子銃のパルス発生方法
7-2-8	図7-2-8	グリッド式電子銃の原理
7-2-9	図7-2-9	熱電子陰極材料の開発の歩み
7-2-9	図7-2-10	含浸型カソードの構造と製品の例
7-2-10	図7-2-11	非軸対称電子ビームの例（シート状電子ビームのクライストロンの電子銃部分）
7-2-10	図7-2-12	複数電子ビームの例（6ビーム型クライストロン断面）
7-2-10	図7-2-13	環状電子ビームの例（後進波管の電子銃部分）
7-2-11	図7-2-14	マイクロ波の導波管、空洞共振器
7-2-11	図7-2-15	進行波管の遅波回路の例
7-2-11	図7-2-16	空洞結合形遅波回路
7-2-12	表7-2-5	マイクロ波増幅用の半導体素子
7-2-13	図7-2-17	FETの動作原理図
7-2-13	図7-2-18	半導体と真空電子管の性能
7-2-14	図7-2-19	半導体マイクロ波用増幅回路の模式図
7-2-14	図7-2-20	モノリシックICの種類
7-2-15	図7-2-21	周波数フィルターの種類
7-2-15	図7-2-22	帯域幅
7-2-16	表7-2-6	マイクロ波用フィルターの種類（インダクタやコンデンサからなるもの）
7-2-17	図7-2-23	マイクロ波用フィルターの例（インダクタやコンデンサからなるもの）
7-2-18	表7-2-7	マイクロ波用フィルターの種類（機械的振動を利用するもの）
7-2-19	図7-2-24	SAWフィルターの模式図
7-2-19	図7-2-25	BAWフィルターの模式図
7-2-20	表7-2-8	マイクロ波用フィルターの例（電磁波の共鳴現象を利用するもの）
7-2-21	図7-2-26	マイクロ波用フィルターの例（電磁波の共鳴現象を利用するもの）
7-2-22	表7-2-9	マイクロ波用フィルターの例（光領域でのフィルタリングを利用するもの）
7-2-22	図7-2-27	マイクロ波用フィルターの例（光領域でのフィルタリングを利用するもの）①
7-2-23	図7-2-28	マイクロ波用フィルターの例（光領域でのフィルタリングを利用するもの）②
7-2-24	表7-2-10	マイクロ波用フィルターの同調方法の例
7-2-25	図7-2-29	マイクロ波用フィルターの同調方法の例（手動またはモーターによる方法）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（２）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-2-26	図7-2-30	マイクロ波用フィルターの同調方法の例（MEMSの動作で制御する方法）
7-2-27	図7-2-31	マイクロ波用フィルターの同調方法の例（温度で制御する方法）
7-2-27	図7-2-32	マイクロ波用フィルターの同調方法の例（磁気で制御する方法）
7-2-28	図7-2-33	バラクタの動作原理
7-2-28	図7-2-34	マイクロ波用フィルターの同調方法の例（電子的に制御する方法）
7-2-29	図7-2-35	マイクロ波用フィルターの同調方法の例（電磁光学的・光学的に制御する方法）
7-2-30	図7-2-36	ハーモニックミクサの原理と製品例
7-2-30	図7-2-37	コンバータの原理と製品
7-2-31	図7-2-38	マイクロ波用の電力増幅器および電力モジュールの系統図（進行波管と固体増幅器を組み合わせて使う例）
7-2-31	図7-2-39	マイクロ波用の電力増幅器および電力モジュールの製品例
7-2-32	図7-2-40	マイクロ波用電力増幅モジュール（MPM）の性能の位置づけ
7-2-33	表7-2-11	マイクロ波発振機能を有するデバイス
7-2-34	図7-2-41	正帰還による発振の原理
7-2-34	図7-2-42	負性抵抗性
7-2-35	図7-2-43	基準発振器の信号の高周波数化
7-2-35	図7-2-44	SAW発振器と電極の構造
7-2-36	図7-2-45	DDS
7-2-37	図7-2-46	周波数切換えの所要時間
7-2-38	図7-2-47	マイクロ波通信の送信機・送受信機のブロック図の例
7-2-39	図7-2-48	パルスレーダーのブロック図の例
7-2-40	図7-2-49	フェーズドアレイレーダー
7-2-40	図7-2-50	マイクロ波の位相制御方法
7-2-41	図7-2-51	マイクロ波試験用送信機および受信機
7-2-42	図7-2-52	スペクトラムアナライザーとシグナルアナライザー
7-2-42	図7-2-53	ベクトルシグナルアナライザーの解析機能
7-2-75	表7-2-12	マイクロ波の用途例
7-2-75	表7-2-13	真空管と半導体増幅・発振器の特徴
7-2-76	表7-2-14	真空電子デバイスの種類に応じた現在の用途の例
7-2-77	図7-2-54	マイクロ波用半導体デバイスの材料による用途の例
7-2-78	図7-2-55	マイクロ波用フィルタの使用例
7-2-79	図7-2-56	パルスレーダーとフェーズドアレイレーダー
7-2-80	図7-2-57	衛星によるマイクロ波通信のイメージ
7-2-80	図7-2-58	スペクトラム拡散の種類
7-2-81	図7-2-59	マイクロ波の軍事分野の利用例
7-2-82	表7-2-15	宇宙用の真空電子デバイスに求められる性能の例
7-2-83	表7-2-16	真空電子デバイス用熱電子陰極に求められる性能の例
7-2-84	図7-2-60	ITUの高密度固定無線業務へ割り当てた周波数帯
7-2-85	表7-2-17	周波数帯とレーダー性能の関係

（様式２）

7-2-86	表7-2-18	レーダーの用途と周波数帯の関係

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（２）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-2-87	表7-2-19	真空電子デバイスの規制対象となる構造
7-2-88	図7-2-61	瞬時帯域幅と中心周波数
7-2-89	図7-2-62	真空電子デバイスの動作周波数に関する規制パラメータ（進行波真空電子デバイスであって、ヘリックス形のもの、折返し導波管形のもの又は蛇行導波管回路形）
7-2-90	表7-2-20	ITUが無線通信用に割り当てた周波数帯域のうち、 無線測位用に割り当てた周波数帯域を除く周波数帯域 （2020年版による）
7-2-91	図7-2-63	貨物等省令第6条第二号イの真空電子デバイスの規制パラメータ
7-2-92	図7-2-64	熱電子陰極の規制パラメータ
7-2-92	図7-2-65	熱電子陰極の規制パラメータ
7-2-93	図7-2-66	モノリシックマイクロ波集積回路増幅器の規制パラメータ
7-2-94	図7-2-67	マイクロ波用ディスクリートトランジスタの規制パラメータ
7-2-95	図7-2-68	マイクロ波用固体増幅器（モノリシックマイクロ波集積回路増幅器及びハーモニックミクサ又はコンバータを除く）の規制パラメータ
7-2-96	表7-2-21	マイクロ波用フィルターの同調方法の例
7-2-97	図7-2-69	電子的又は磁気的に同調可能な帯域通過フィルター・帯域阻止フィルターの規制パラメータ
7-2-98	図7-2-70	ハーモニックミクサ又はコンバータの規制パラメータ
7-2-99	図7-2-71	貨物等省令第6条第十三号ニの規制範囲（例）
7-2-99	図7-2-72	動作周波数とオフセット周波数の隔たり、搬送波に対する1Hz当たりの単側波帯位相雑音の比
7-2-100	図7-2-73	周波数シンセサイザーを用いた組立品の規制パラメータ
7-2-101	図7-2-74	周波数切換えの所要時間
7-2-102	図7-2-75	送受信モジュール、送受信用モノリシックマイクロ波集積回路、送信モジュール及び送信用モノリシックマイクロ波集積回路の規制パラメータ
7-2-103	表7-2-22	マイクロ波用試験受信機の規制パラメータ
7-2-104	図7-2-76	マイクロ波デバイスの市場規模
7-2-105	図7-2-77	マイクロ波デバイスの市場規模（周波数帯別）
7-2-106	図7-2-78	マイクロ波デバイスの市場規模（最終用途別）
7-2-107	図7-2-79	マイクロ波真空電子デバイスの市場規模
7-2-108	図7-2-80	マイクロ波半導体デバイスの市場規模（材料別）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（３）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-3-2	図7-3-1	信号処理装置
7-3-2	図7-3-2	弾性波若しくは音響光学効果を利用する信号処理装置又はその部分品
7-3-3	図7-3-3	弾性波の縦波と横波
7-3-3	図7-3-4	表面弾性波、疑似表面弾性波、バルク弾性波
7-3-3	図7-3-5	音響光学効果
7-3-4	図7-3-6	SAWフィルターとBAWフィルターの基本構造
7-3-4	図7-3-7	SAWフィルターの周波数特性の例
7-3-5	図7-3-8	回折格子（透過型）の原理
7-3-5	図7-3-9	回折格子による波長の異なる光の分離
7-3-6	図7-3-10	音響光学効果の原理
7-3-6	図7-3-11	音響光学効果を利用した光のオン・オフ
7-3-7	図7-3-12	メインローブとサイドローブ
7-3-8	図7-3-13	弾性波フィルターによる入出力信号の時間差
7-3-8	図7-3-14	信号遅延の利用例（位相合わせ）
7-3-8	図7-3-15	3dB帯域幅
7-3-12	図7-3-16	SAWデバイスとBAWデバイスの扱う周波数帯
7-3-13	表7-3-1	SAW・BAWデバイスの用途の例
7-3-14	図7-3-17	SAWデバイスの例
7-3-15	表7-3-2	BAWデバイスの用途の例
7-3-16	図7-3-18	BAWデバイスの例
7-3-17	表7-3-3	音響光学効果を利用した装置の例
7-3-18	図7-3-19	音響光学効果を利用した装置の例
7-3-19	表7-3-4	弾性波若しくは音響光学効果の軍事関係の用途例
7-3-20	図7-3-20	BAWデバイス（FBAR）による原子時計部品の小型化
7-3-20	図7-3-21	パルス圧縮レーダー
7-3-21	図7-3-22	直接スペクトラム拡散方式
7-3-21	図7-3-23	広周波数帯域でのリモートセンシングのイメージ
7-3-23	表7-3-5	弾性波若しくは音響光学効果の規制がかかっている用途例
7-3-24	図7-3-24	分散型遅延フィルタによるパルス圧縮の原理
7-3-25	図7-3-25	表面弾性波又は疑似表面弾性波を利用する信号処理装置の規制パラメータ
7-3-26	図7-3-26	メインローブとサイドローブの電力の比
7-3-27	図7-3-27	バルク弾性波を利用する信号処理装置の規制パラメータ
7-3-28	図7-3-28	弾性波ディレイラインの市場規模
7-3-29	図7-3-29	音響光学効果デバイスの市場規模（種類別）
7-3-30	図7-3-30	音響光学効果デバイスの市場規模（分野別）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（４）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-4-2	図7-4-1	超電導体の主な特徴
7-4-2	図7-4-2	高温超電導材料の探索
7-4-3	図7-4-3	G-Mサイクルとこれを利用したGM冷凍機
7-4-3	表7-4-1	超電導技術の用途
7-4-6	図7-4-4	ジョセフソン接合・素子の用途の例
7-4-6	図7-4-5	SFQ素子、HFQ素子の用途の例
7-4-7	図7-4-6	ジョセフソン接合の構造と電流ー電圧特性
7-4-7	図7-4-7	SFQ回路の動作原理
7-4-7	図7-4-8	SFQ回路とHFQ回路の比較
7-4-8	図7-4-9	SQUIDの実用化例
7-4-8	図7-4-10	SQUIDの構造
7-4-9	図7-4-11	超電導による周波数の有効活用
7-4-9	図7-4-12	超電導フィルタの使用例
7-4-10	図7-4-13	ジョセフソン接合の使用例
7-4-10	図7-4-14	SFQ素子の使用例
7-4-11	図7-4-15	SQUIDの使用例（規制対象外）
7-4-11	図7-4-16	超電導バンドパスフィルタの使用例
7-4-13	表7-4-2	規制に該当し得る用途と超電導素子
7-4-14	図7-4-17	電流スイッチング機能を有する素子の規制パラメータ
7-4-15	図7-4-18	Q値の定義
7-4-15	図7-4-19	Q値の計算式例
7-4-16	図7-4-20	量子コンピュータの市場規模（方式別）
7-4-17	図7-4-21	量子コンピュータの市場規模（用途別）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（５）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-5-2	図7-5-1	超電導の主な特徴
7-5-2	図7-5-2	高温超電導材料の探索の歴史
7-5-3	図7-5-3	電流と磁束の関係
7-5-3	図7-5-4	コイルの形状の例
7-5-4	図7-5-5	フープ応力
7-5-4	図7-5-6	G-Mサイクルとこれを利用したGM冷凍機
7-5-5	図7-5-7	G-Mサイクルとこれを利用したGM冷凍機
7-5-6	図7-5-8	第1種超電導体と第2種超電導体の違いと第2種超電導体の着磁によるバルク磁石の生成
7-5-12	表7-5-1	超電導技術の用途
7-5-13	図7-5-9	研究・開発・計測機器分野での超電導磁石利用例
7-5-13	図7-5-10	診断・医療分野での超電導磁石利用例
7-5-14	図7-5-11	エネルギー・電力分野での超電導磁石利用例
7-5-15	図7-5-12	産業・輸送分野での超電導磁石利用例
7-5-16	図7-5-13	高エネルギーを蓄積し瞬時に放出するための超電導磁石利用例
7-5-17	図7-5-14	強い電磁場で物体に運動エネルギーを与えるための超電導磁石利用例
7-5-18	図7-5-15	プラズマを制御するための超電導磁石利用例
7-5-19	図7-5-16	物体同士の接触による接触抵抗・摩擦を防ぐための超電導磁石利用例
7-5-21	表7-5-2	規制対象となる超電導電磁石の用途例
7-5-22	図7-5-17	リチウムイオン電池でのエネルギー放出性能の例
7-5-22	図7-5-18	1秒間で10kJのエネルギーを放出するSMES
7-5-22	図7-5-19	10kJのエネルギーに相当する 質量と速度の関係
7-5-23	図7-5-20	（参考）超電導材料の磁場と臨界電流密度の関係
7-5-23	図7-5-21	用途に応じた超電導電磁石の磁場・臨界電流密度に求められる性能の例
7-5-24	図7-5-22	コイル形状の規制パラメータ（ソレノイドコイルの例）
7-5-24	図7-5-23	コイル直径と蓄積エネルギーの関係の例（SMES用コイル）
7-5-25	図7-5-24	超電導電磁石の市場規模

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（６）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-6-2	図7-6-1	電池の分類とセル
7-6-3	図7-6-2	セルと電池
7-6-3	図7-6-3	一次電池の原理
7-6-3	図7-6-4	二次電池の原理（鉛蓄電池の例）
7-6-4	図7-6-5	太陽電池の仕組み
7-6-4	表7-6-1	太陽電池の特徴と変換効率
7-6-5	図7-6-6(a)	太陽光線の波長区分
7-6-5	図7-6-6(b)	トリプルジャクションセルの相対変換効率
7-6-6	図7-6-6-1	太陽電池の変換効率推移
7-6-8	図7-6-7	電池の種類と使用する機器
7-6-9	図7-6-8	民生用途での電池の使用（自動車）
7-6-10	図7-6-9	民生用途での電池の使用（その他）
7-6-11	図7-6-10	規制対象となる可能性のある用途
7-6-12	図7-6-11	ミサイル
7-6-12	図7-6-12	リチウムイオン電池搭載の潜水艦
7-6-13	図7-6-13	無人航空機
7-6-13	図7-6-14	個人携行通信機
7-6-15	図7-6-15	宇宙空間での太陽光パネル
7-6-16	図7-6-16	規制パラメータの領域
7-6-17	図7-6-17	空気亜鉛電池
7-6-17	図7-6-18	塩化チオニルリチウム電池
7-6-17	図7-6-19	二酸化硫黄リチウム電池
7-6-18	図7-6-20	二酸化マンガンリチウム電池
7-6-17	図7-6-21	リチウム二硫化鉄電池
7-6-18	図7-6-22	リチウム炭素電池
7-6-19	図7-6-23	次世代電池
7-6-20	図7-6-24	太陽光パネルの変換効率イメージ
7-6-21	図7-6-25	太陽電池パネルの構成
7-6-21	図7-6-26	太陽電池パネルの構成部材
7-6-22	図7-6-27	宇宙ステーションの太陽光パネルイメージ
7-6-22	図7-6-28	NEDOによる太陽光パネル変換効率ロードマップ
7-6-23	図7-6-29	リチウムイオン電池の世界市場
7-6-24	図7-6-30	太陽電池モジュールの世界市場
7-6-25	表7-6-2	世界の主な一次電池メーカー
7-6-26	図7-6-31	二次電池の種類別シェア
7-6-26	図7-6-32	二次電池の用途
7-6-26	表7-6-3	二次電池メーカー
7-6-27	図7-6-33	世界市場の地域別二次電池シェアと成長率
7-6-27	表7-6-4	その他の二次電池メーカー
7-6-28	表7-6-5	太陽光発電メーカーシェアランキング2019
7-6-28	表7-6-6	その他の太陽電池メーカー

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（７）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-7-2	図7-7-1	コンデンサの種類
7-7-3	図7-7-2	コンデンサの構造(1)
7-7-3	図7-7-3	電解コンデンサのMLCCへの置き換え
7-7-4	図7-7-4	コンデンサの構造(2)
7-7-7	図7-7-5	コンデンサの種類・用途・使用機器
7-7-8	図7-7-6	超電導エネルギー貯蔵システムを用いたレールガン
7-7-8	図7-7-7	航空機発射用電磁カタパルト
7-7-9	図7-7-8	ポット溶接機
7-7-9	図7-7-9	医療用Ｘ線装置
7-7-10	図7-7-10	規制パラメータ輸出令第7項(7)
7-7-10	表7-7-1	コンデンサの種類と特徴
7-7-11	図7-7-11	高電圧用コンデンサの規制パラメータ
7-7-12	図7-7-12	高電圧用コンデンサの規制パラメータ
7-7-12	図7-7-13	加速器の種類とエネルギー
7-7-13	図7-7-14	高電圧コンデンサの世界市場推移
7-7-14	表7-7-2	世界の高電圧コンデンサメーカー

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（８）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-8-2	図7-8-1	エンコーダの種類
7-8-3	図7-8-2	インクリメンタルエンコーダの回転角度の相対値出力の例
7-8-3	図7-8-3	アブソリュートエンコーダの回転角度の絶対値出力の例
7-8-4	図7-8-4	コントローラの一時的故障における「インクリメンタルエンコーダ」と「アブソリュートエンコーダ」の違い
7-8-4	図7-8-5	電源ON/OFFにおけるインクリメンタルエンコーダ」と「アブソリュートエンコーダ」の違い
7-8-6	図7-8-6	エンコーダの用途と使用する機器の例
7-8-7	図7-8-7	エレベータでのエンコーダの使用例
7-8-7	図7-8-8	ベルトコンベアでの使用例
7-8-8	図7-8-9	鹿島34m局のアンテナ
7-8-8	図7-8-10	鹿島34m局の構造図
7-8-8	図7-8-11	鹿島34m局のエンコーダ
7-8-9	図7-8-12	モータシステムの構成例
7-8-10	図7-8-13	無人搬送ロボット用モータモジュールの例
7-8-10	図7-8-14	無人搬送ロボット用モータモジュールの使用例
7-8-11	図7-8-15	遠隔検知した標的地帯の画像を表示する双方向兵器照準システムの例
7-8-11	図7-8-16	米海兵隊のNMESIS地対艦ミサイル（無人発射車両）
7-8-11	図7-8-17	HEIDENHAIN社（ドイツ）の角度エンコーダ
7-8-12	図7-8-18	国境監視の例
7-8-12	図7-8-19	国境監視用長距離熱画像セキュリティシステム
7-8-12	図7-8-20	エンコーダ内蔵サーボモータ
7-8-13	図7-8-21	宇宙用高精度角度検出器
7-8-13	図7-8-22	宇宙用高精度角度検出器海外製品との比較
7-8-15	図7-8-23	規制のかかっているエンコーダ
7-8-16	表7-8-1	分解能の単位換算表
7-8-17	図7-8-25	RENISHAW社アブソリュート光学式エンコーダ
7-8-17	図7-8-26	RENISHAW社アブソリュート光学式エンコーダ直径と精度の関係
7-8-18	図7-8-27	エンコーダ市場推移（実績/予測）
7-8-19	図7-8-28	ロータリーエンコーダ タイプ別市場推移（実績/予測）
7-8-20	表7-8-2	エンコーダの市場シェア（2020年）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（8の2）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-82-2	図7-82-1	パワー半導体の分類と機能
7-82-2	図7-82-2	サイリスター
7-82-3	図7-82-3	逆導通3端子サイリスター
7-82-3	図7-82-4	トライアック
7-82-4	図7-82-5	サイリスタの動作原理
7-82-5	図7-82-6	交流の直流への変換イメージ
7-82-6	図7-82-7	休止・立上がりイメージ
7-82-7	図7-82-8	サイリスターのパワー半導体内での位置づけ
7-82-9	図7-82-9	サイリスターの用途例
7-82-10	図7-82-10	民生用途(1)
7-82-11	図7-82-11	民生用途(2)
7-82-12	図7-82-12	電子熱化学砲
7-82-12	図7-82-13	レールガン
7-82-13	図7-82-14	規制判定フロー
7-82-14	図7-82-15	規制パラメータ（イ）
7-82-14	図7-82-16	規制パラメータ（ロ）
7-82-15	図7-82-17	世界のサイリスター市場　2019(実績)～2026(予測)
7-82-16	表7-82-1	サイリスターメーカー(1)
7-82-17	表7-82-2	サイリスターメーカー(2)

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（8の3）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-83-2	図7-83-1	パワー半導体回路の働き
7-83-3	図7-83-2	半導体整流器
7-83-4	図7-83-3	パワー半導体の比較
7-83-5	図7-83-4	ジャンクション温度
7-83-5	図7-83-5	ジャンクション温度と消費電力の関係
7-83-6	図7-83-6	サイリスタの特性
7-83-8	図7-83-7	パワー半導体の用途
7-83-8	図7-83-8	コストメリットが生じる分岐点
7-83-9	図7-83-9	方式の比較
7-83-9	図7-83-10	高電圧直流送電システム
7-83-10	図7-83-11	民生用途
7-83-11	図7-83-12	電気自動車で使われる整流素子
7-83-11	図7-83-13	スイッチング回路
7-83-12	図7-83-14	風力発電
7-83-12	図7-83-15	無停電電源装置
7-83-12	図7-83-16	電気炉の制御
7-83-13	図7-83-17	規制判定フロー
7-83-14	図7-83-18	電子熱化学砲
7-83-14	図7-83-19	レールガン
7-83-14	図7-83-20	スイッチングデバイス
7-83-15	図7-83-21	Band Gap材料の特性
7-83-15	図7-83-22	WBG半導体の可能性
7-83-16	図7-83-23	世界のパワー半導体市場　2020(実績)～2027(予測)
7-83-17	図7-83-24	パワー半導体の世界シェア
7-83-18	表7-83-１	その他のパワー半導体メーカー

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（8の4）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-8-4-2	図7-8-4-1	直接変調方式と外部変調方式のシステム構成例
7-8-4-3	表7-8-4-1	干渉計を用いた光変調器の作動原理
7-8-4-3	図7-8-4-2	光変調器マッハツェンダ干渉計の構造と光変調器製品例
7-8-4-5	図7-8-4-3	光変調器の用途（光通信）
7-8-4-6	図7-8-4-4	光変調器の用途
7-8-4-7	図7-8-4-5	光トランシーバの内部構造の例
7-8-4-8	図7-8-4-6	光変調器を用いた機器の軍事用途への利用例
7-8-4-9	図7-8-4-7	フェーズドアレイアンテナの構成比較
7-8-4-10	図7-8-4-8	高消光比のマッハツェンダ干渉計の試作例
7-8-4-11	図7-8-4-9	変調方式の規制対象
7-8-4-11	表7-8-4-2	外部変調方式
7-8-4-12	図7-8-4-10	外部変調方式における光変調信号変換のイメージと規制項目（マッハツェンダ光変調器の例）
7-8-4-13	図7-8-4-11	電気光学効果を有する光変調器の規制パラメータ
7-8-4-14	図7-8-4-12	光トランシーバ市場の年次推移の実績／予測
7-8-4-15	図7-8-4-13	光トランシーバのデータレート別市場規模推移実績／予測
7-8-4-16	図7-8-4-14	光トランシーバー市場上位5社の売上実績推移（金額）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（９）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-9-2	図7-9-1	オシロスコープの種類
7-9-2	図7-9-2	等価時間サンプリング（上）とリアルタイムサンプリング（下）
7-9-3	図7-9-3	オシロスコープの構成
7-9-3	図7-9-4	オシロスコープの表示画面
7-9-4	図7-9-5	入力3デシベル帯域
7-9-4	図7-9-6	ノイズのRMS
7-9-6	図7-9-7	オシロスコープの使用例
7-9-7	図7-9-8	超高周波数帯域オシロスコープ
7-9-7	表7-9-1	電波の周波数帯と主な用途
7-9-9	図7-9-9	オシロスコープの種類と規制対象
7-9-10	図7-9-10	サンプリングオシロスコープの規制パラメータ
7-9-11	図7-9-11	オシロスコープの市場規模（分野別）
7-9-12	図7-9-12	オシロスコープの市場規模（周波数帯別）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（10）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-10-2	表7-10-1	アナログデジタル変換器の方式の種類
7-10-2	図7-10-1	アナログ信号(入力)とデジタル信号(出力)の関係
7-10-3	図7-10-2	シングルエンド4chのA/D変換PCカード
7-10-3	図7-10-3	波形デジタイザーを使用したアナログデジタル変換の信号の流れ
7-10-4	図7-10-4	24ビット8チャンネル高精度データ収集カード
7-10-4	図7-10-5	信号収集ボードの例
7-10-5	図7-10-6	AMOのトランジェントレコーダー
7-10-8	図7-10-7	PCにおけるアナログデジタル変換器の使用イメージ
7-10-8	図7-10-8	アナログデジタル変換器の主な用途の サンプリングレートと分解能
7-10-9	図7-10-9	アナログデジタル変換器の用途の例
7-10-10	図7-10-10	アナログデジタル変換器の規制がかかっている用途の例
7-10-11	図7-10-11	電子戦に使用される機器の内部構造の例
7-10-12	表7-10-2	規制されているアナログデジタル変換器の装置 の分解能（ビット数）とサンプリングレート
7-10-12	図7-10-12	アナログデジタル変換器の規制パラメータのビット数と サンプルレートの関係
7-10-13	図7-10-13	信号収集ボードPentek（米国）Model 6003
7-10-13	図7-10-14	Model 6003のブロック図
7-10-14	図7-10-15	波形デジタイザーkeysight technologies（米国）M9703A
7-10-14	図7-10-16	M9703Aのブロック図
7-10-15	図7-10-17	トランジェントレコーダー
7-10-15	表7-10-3	SATURNの入力モード
7-10-16	図7-10-18	アナログデジタル変換器市場の年次推移
7-10-16	表7-10-4	アナログデジタル変換器用途別市場推移

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（11）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-11-2	図7-11-1	デジタル方式の記録装置の普及の変遷
7-11-4	図7-11-2	デジタル方式の記録装置の用途
7-11-5	図7-11-3	デジタル方式の記録装置の規制がかかっている用途
7-11-6	図7-11-4	軍事用途におけるESM／ELINT搭載例
7-11-6	図7-11-5	ESM／ELINTシステム構成例
7-11-7	図7-11-6	C-2に搭載したELINTの実用性評価の様子
7-11-7	図7-11-7	Telemus社（米国）「ALR-510 ELINT/ESMシステム」（UAV用）
7-11-7	図7-11-8	Pentek社 （米国）「Talon RTX Rugged IFレコーダ RTX2589」
7-11-10	図7-11-11	RAIDの種類とその特徴
7-11-11	図7-11-12	デジタル方式の記録装置市場推移（実績/予測）
7-11-11	図7-11-13	デジタル方式の記録装置地域別シェア推移（実績/予測）
7-11-12	図7-11-14	デジタル方式の記録装置市場シェア（2015年）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（12）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-12-2	表7-12-1	信号発生器の種類と特徴
7-12-2	図7-12-1	信号発生器の製品例
7-12-3	表7-12-2	ファンクションジェネレータと任意信号発生器の比較
7-12-4	図7-12-2	信号発生器の原理（DDS方式）
7-12-5	図7-12-3	信号発生器のブロック図の例
7-12-5	図7-12-4	任意波形発生器の製品の例（OWON社）
7-12-5	図7-12-5	任意波形発生器の出力波形デモの例
7-12-6	図7-12-6	パルス変調信号の種類
7-12-6	図7-12-7	パルス形状の評価
7-12-7	図7-12-8	単側波帯位相雑音
7-12-8	図7-12-9	周波数切換えの所要時間
7-12-9	図7-12-10	信号発生器の変調方式
7-12-15	図7-12-11	信号発生器の用途
7-12-16	図7-12-12	電波の種類と代表的な用途
7-12-17	表7-12-3	高周波電磁波の利用例
7-12-18	図7-12-13	高機能の信号発生器を必要とする軍事技術の例
7-12-20	表7-12-4	規制対象となり得る信号発生器
7-12-21	図7-12-14	信号発生器の規制パラメータ
7-12-22	図7-12-15	貨物等省令第6条第十三号イの規制パラメータ
7-12-22	図7-12-16	パルス信号のパルス幅とオン・オフ比
7-12-23	図7-12-17	周波数切換えの所要時間の値
7-12-23	図7-12-18	周波数切換えの所要時間の値
7-12-24	図7-12-19	貨物等省令第6条第十三号ニの規制範囲
7-12-24	図7-12-20	動作周波数とオフセット周波数の隔たり、搬送波に対する1Hz当たりの単側波帯位相雑音の比
7-12-25	図7-12-21	信号発生器の市場規模（用途別）
7-12-26	図7-12-22	信号発生器の市場規模（周波数帯別）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（13）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-13-2	表7-13-1	周波数分析器の種類
7-13-2	図7-13-1	周波数分析器の製品例
7-13-3	図7-13-2	スペクトラムアナライザーの使用例
7-13-4	図7-13-3	スペクトラム・アナライザーの構成（ヘテロダイン方式とFFT方式）
7-13-5	図7-13-4	スペクトラム・アナライザーの構成（フィルタバンク方式）
7-13-6	図7-13-5	3dB分解能帯域幅(RBW)
7-13-6	図7-13-6	RBWによる表示波形の変化
7-13-7	図7-13-7	フーリエ変換
7-13-7	図7-13-8	離散フーリエ変換の時間窓長
7-13-8	図7-13-9	DFT処理の際の信号の取りこぼし
7-13-8	図7-13-10	信号の一部取りこぼしによる観測信号強度の低下の例
7-13-9	図7-13-11	離散時間信号の不連続の影響
7-13-10	図7-13-12	離散時間信号の処理方法
7-13-11	図7-13-13	離散時間信号幅と100%の確率で検出するパルス信号幅の関係
7-13-12	図7-13-14	マスクトリガーによるスペクトルの捕捉例
7-13-16	表7-13-2	スペクトラムアナライザーの用途の例
7-13-16	図7-13-15	高周波信号を扱う機器の例
7-13-17	表7-13-3	レーダーの用途と周波数帯の関係
7-13-18	図7-13-16	パルスレーダー
7-13-19	図7-13-17	衛星によるマイクロ波通信のイメージ
7-13-19	図7-13-18	スペクトラム拡散の種類
7-13-20	図7-13-19	マイクロ波の軍事分野の利用例
7-13-22	表7-13-4	規制対象となる周波数分析器
7-13-23	図7-13-20	周波数分析器の規制パラメータ
7-13-24	図7-13-21	周波数分析器の市場規模（用途別）
7-13-25	図7-13-22	周波数分析器の市場規模（周波数帯別）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（14）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-14-2	図7-14-1	ネットワークアナライザーの製品例
7-14-3	図7-14-2	交流回路のインピーダンス
7-14-3	図7-14-3	正弦波信号の振幅と位相のベクトル表現
7-14-4	図7-14-4	ネットワークアナライザーのSパラメータ
7-14-4	図7-14-5	24ポートネットワークアナライザーの例
7-14-4	表7-14-1	ネットワークアナライザーのSパラメータ
7-14-5	図7-14-6	ネットワークアナライザーの基本構成
7-14-6	図7-14-7	線形の系の入出力信号
7-14-6	図7-14-8	非線形の系の入出力信号例
7-14-7	表7-14-2	ネットワークアナライザーの種類
7-14-9	図7-14-9	ネットワークアナライザーの使用例（アンテナの特性評価）
7-14-9	図7-14-10	ネットワークアナライザーの測定対象の例
7-14-11	表7-14-3	ネットワークアナライザの測定対象周波数帯の無線使用例
7-14-12	表7-14-4	規制対象となるネットワークアナライザー
7-14-13	図7-14-11	ネットワークアナライザーの規制パラメータと製品性能
7-14-14	図7-14-12	ネットワークアナライザーの市場規模（用途別）
7-14-15	図7-14-13	ネットワークアナライザーの市場規模（動作周波数別）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（15）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-15-2	図7-15-1	秒を定義するセシウム原子の超微細構造間の遷移エネルギー
7-15-2	図7-15-2	セシウム原子周波数標準器と原子時計の構造
7-15-3	図7-15-3	原子周波数標準の正確さ向上の歩み
7-15-4	図7-15-4	ルビジウム原子周波数標準器を用いた発振器の模式図と製品例
7-15-4	図7-15-5	チップスケールセシウム原子時計の製品例
7-15-7	表7-15-1	原子周波数標準器の用途（民生用途）
7-15-7	図7-15-6	周波数ホッピングのイメージ
7-15-8	表7-15-2	原子周波数標準器の規制対象となり得る用途
7-15-9	表7-15-3	宇宙用原子周波数標準器の仕様項目の例
7-15-10	表7-15-4	原子周波数標準器の方式と使われる原子・イオンの例
7-15-11	図7-15-7	輸出令第7項(15)の規制対象
7-15-11	図7-15-8	発振器・原子周波数標準器の典型値と宇宙用以外の規制パラメータとの関係
7-15-12	図7-15-9	原子時計の市場規模（方式別）
7-15-13	図7-15-10	原子時計の市場規模（分野別）
7-15-16	図7-15-11	原子時計製品の性能比較
7-15-18	図7-15-12	原子のエネルギー準位の変化
7-15-18	図7-15-13	原子のエネルギー準位の構造（セシウム原子の例）
7-15-19	図7-15-14	秒を定義するセシウム原子の超微細構造間の遷移エネルギー
7-15-19	図7-15-15	セシウム原子一次周波数標準器の構造
7-15-20	図7-15-16	正確さと安定度
7-15-20	図7-15-17	原子周波数標準のアラン分散の典型例

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（15の2）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-152-2	図7-152-1	熱制御装置
7-152-2	表7-152-1	温度制御の種類と特徴
7-152-3	図7-152-2	CPUの冷却
7-152-3	図7-152-3	ヒートパイプの原理
7-152-3	図7-152-4	エンジンの冷却
7-152-4	図7-152-5	スプレー方式の熱制御装置
7-152-5	図7-152-6	水の状態変化と必要熱量
7-152-7	図7-152-7	噴射ノズル
7-152-7	図7-152-8	エアコン室外機の冷却
7-152-7	図7-152-9	ミスト冷却の熱移動
7-152-8	図7-152-10	ガスタービン発電設備
7-152-8	図7-152-11	熱延鋼帯の冷却
7-152-8	図7-152-12	ダイカスト製品の冷却
7-152-9	図7-152-13	アメリカ海軍C4Iシステム
7-152-9	図7-152-14	航空機の電子機器
7-152-10	図7-152-15	SprayCoolエンクロージャー
7-152-10	図7-152-16	利用分野
7-152-11	図7-152-17	規制対象
7-152-12	図7-152-18	熱制御・放熱部材の世界市場

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（16）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-16-3	図7-16-1	洗浄装置　ウェットステーション
7-16-3	図7-16-2	洗浄装置　ワンバス型ウェットステーション
7-16-4	図7-16-3	成膜の方法
7-16-4	図7-16-4	成膜
7-16-5	図7-16-5	ランプアニール装置
7-16-5 7-16-28	図7-16-6	ALD装置
7-16-6	図7-16-7	MOCVD装置の例
7-16-7	図7-16-8	CMP処理と装置
7-16-8	図7-16-9	ウエハ表面検査装置
7-16-8	図7-16-10	リソグラフィ工程/エッチング工程
7-16-9	図7-16-11	光露光とナノインプリントの違い
7-16-10	図7-16-12	スピンデベロッパ
7-16-11	図7-16-13	ドライエッチング装置
7-16-12	図7-16-14	イオン注入装置
7-16-12	図7-16-15	ドーピングの方法
7-16-13 7-16-32	図7-16-16	直接描画装置の構成例
7-16-13	図7-16-17	アニール処理のイメージ
7-16-14	図7-16-18	放射型半導体製造装置
7-16-15	図7-16-19	バックグラインド装置の工程のイメージ
7-16-15	図7-16-20	プローバ装置/テスタ装置の構成例
7-16-22	図7-16-21	半導体製造装置若しくは試験装置の応用用途例
7-16-27	表7-16-2	ウエハーサイズと直径及び厚みの関係
7-16-27	表7-16-3	周期律表から見た化合物半導体の組み合わせ
7-16-31	図7-16-27	ナノインプリントの工程フロー
7-16-32	図7-16-28	フォトマスクの製造工程
7-16-33	図7-16-29	Sパラメータ測定
7-16-33	図7-16-30	モノリシックマイクロ波集積回路
7-16-34	図7-16-31	半導体製造装置市場の年次推移
7-16-35	図7-16-32	半導体製造装置市場のアプリケーション別年次推移
7-16-36	表7-16-4	半導体製造装置の売上企業ランキング
7-16-37	図7-16-33	各工程の半導体製造装置（前工程）の参入企業
7-16-37	図7-16-34	主な製造装置の企業シェア（2018年）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（17）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-17-2	図7-17-1	マスク・レチクルの概要
7-17-3	図7-17-2	リソグラフィ技術の進展
7-17-3	図7-17-3	リソグラフィ技術対応のマスク種類
7-17-4	図7-17-4	位相シフトマスクの原理とその光学的比較効果
7-17-5	図7-17-5	ハーフトーンマスク
7-17-5	図7-17-6	グレイトーンマスク
7-17-6	図7-17-7	OPC技術適用マスクの事例
7-17-6	図7-17-8	計算機リソグラフィのSMO事例
7-17-8	図7-17-9	フォトマスク又はレチクルの用途
7-17-9	図7-17-10	プリント基板
7-17-9	図7-17-11	LED
7-17-9	図7-17-12	MEMS
7-17-10	図7-17-13	導波路の構造
7-17-10	図7-17-14	フォトマスクを用いたマイクロレンズの製作
7-17-10	図7-17-15	イメージセンサーの仕組み
7-17-11	図7-17-16	液晶ディスプレイパネルの製造工程概要
7-17-11	図7-17-17	FPD露光装置（マルチレンズシステム）
7-17-12	図7-17-18	ナノインプリント・リソグラフィ工程
7-17-13	図7-17-19	集積回路　トランジスタ、コンデンサ、抵抗の構成例
7-17-14	図7-17-20	規制のかかっている用途１
7-17-15	図7-17-21	規制のかかっている用途２
7-17-16	図7-17-22	規制対象となる集積回路（第一号から第八号の四までのいずれかに該当する集積回路）
7-17-16	図7-17-23	インプリントリソグラフィ技術
7-17-17	図7-17-24	マスクおよびレクチルの世界市場
7-17-18	表7-17-1	フォトマスクの主要企業
7-17-19	表7-17-2	その他のマスク・レチクル製造企業１
7-17-20	表7-17-3	その他のマスク・レチクル製造企業２
7-17-21	表7-17-4	多層マスク、インプリントリソグラフィ用マスクの製造企業

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（17の2）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-17-2-2	図7-17-2-1	光露光のフォトマスク製造工程
7-17-2-2	図7-17-2-2	EUV露光用マスクブランクス
7-17-2-3	図7-17-2-3	全反射鏡と多層膜反射鏡の違い
7-17-2-4	表7-17-2-1	EUVマスクブランクスへの特性指標
7-17-2-4	表7-17-2-2	SEMI P37一覧
7-17-2-5	図7-17-2-4	EUVマスクの欠陥
7-17-2-5	図7-17-2-5	EUVマスクブランクスの欠陥検査方法
7-17-2-7	図7-17-2-6	1nmまでの半導体のスケーリング
7-17-2-8	図7-17-2-7	スーパーコンピュータ「富岳」のCPU（A64FX）にも使用されている7nm半導体プロセステクノロジ
7-17-2-10	図7-17-2-8	NA定義
7-17-2-11	図7-17-2-9	ダブルパターニングの一例
7-17-2-12	図7-17-2-10	EUV光源の一例
7-17-2-13	図7-17-2-11	EUVマスクブランクスのシェア
7-17-2-13	表7-17-2-3	EUV露光用フォトマスクにおけるサプライチェーン
7-17-2-14	図7-17-2-12	ASMLにおけるEUV露光装置の出荷台数と受注残
7-17-2-15	図7-17-2-13	EUV露光装置によるウエハ処理数の伸び

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（18）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-18-2	図7-18-1	半導体基板の定義と特徴
7-18-3	図7-18-2	半導体基板の使い方
7-18-4	図7-18-3	各種半導体基板の結晶構造(1)
7-18-5	図7-18-4	各種半導体基板の結晶構造(2)：炭化シリコンの結晶構造
7-18-6	図7-18-5	半導体基板の結晶構造とエピタキシャル成長の関係
7-18-7	図7-18-6	半導体基板上へのエピタキシャル成長
7-18-8	図7-18-7	半導体基板の製造方法（１）
7-18-9	図7-18-8	半導体基板の製造方法（２）
7-18-10	図7-18-9	半導体基板の製造方法（３）
7-18-11	図7-18-10	半導体基板の製造方法（４）
7-18-12	図7-18-11	半導体基板の製造方法（５）
7-18-13	図7-18-12	半導体基板上へのヘテロエピタキシャル成長の課題
7-18-14	図7-18-13	半導体基板上へのエピタキシャル成長　GaNの欠陥観察の例
7-18-15	図7-18-14	HEMT用エピタキシャル基板
7-18-18	図7-18-15	半導体基板の用途の例
7-18-19	図7-18-16	半導体基板材料の特性と用途
7-18-20	図7-18-17	半導体基板の用途の例（太陽電池）
7-18-21	図7-18-18	半導体基板の用途（パワーデバイス）
7-18-22	図7-18-19	半導体基板の用途（電力変換）
7-18-23	図7-18-20	トランジスタの種類
7-18-24	図7-18-21	ヘテロバイポーラトランジスタの例
7-18-25	図7-18-22	電界効果トランジスタ（MOSFET）の基本構造（１）
7-18-26	図7-18-23	電界効果トランジスタ（MOSFET）の基本構造（２）
7-18-27	図7-18-24	電界効果トランジスタ（MOSFET）の基本構造（３）
7-18-28	図7-18-25	絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ（IGBT）の基本構造
7-18-29	図7-18-26	電界効果トランジスタ（MOSFET）の基本構造
7-18-30	図7-18-27	パワーデバイスの特性
7-18-31	図7-18-28	半導体基板の動作周波数別用途（１）
7-18-32	図7-18-29	半導体基板の動作周波数別用途（２）
7-18-33	図7-18-30	主な半導体材料のオン抵抗と耐圧の関係
7-18-34	図7-18-31	半導体基板の用途（スイッチングデバイス）
7-18-35	図7-18-32	半導体基板の活用：両立化の検討
7-18-36	図7-18-33	半導体基板の用途（デバイスに間接的に使用）
7-18-37	図7-18-34	半導体基板の用途（ヘテロエピ成長基板再利用）
7-18-39	図7-18-36	シリコン半導体基板の特徴
7-18-40	図7-18-37	炭化シリコンの半導体基板の例
7-18-41	図7-18-38	各種半導体基板の特徴
7-18-42	図7-18-39	ゲルマニウム基板の使用例
7-18-43	図7-18-40	Ⅲ－Ⅴ族化合物基板の使用例１
7-18-44	図7-18-41	Ⅲ－Ⅴ族化合物基板の使用例２

（様式２）

7-18-45	図7-18-42	Ⅲ－Ⅴ族化合物基板の使用例３
7-18-46	図7-18-43	シリコンウエハの世界販売数量と世界販売金額（富士経済）
7-18-47	図7-18-44	SiCウエハの世界販売数量と世界販売金額（富士経済）
7-18-48	図7-18-45	GaNウエハの世界販売数量と世界販売金額（富士経済）
7-18-49	図7-18-46	酸化ガリウムウエハの世界販売数量と世界販売金額（富士経済）
7-18-50	図7-18-47	シリコンウエハの企業シェア（金額）
7-18-51	図7-18-48	SiCウエハの企業シェア（金額）
7-18-53	図7-18-49	酸化ガリウムウエハの企業シェア（金額）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（19）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-19-2	図7-19-1	レジストの役割
7-19-3	図7-19-2	レジストの種類と用途
7-19-4	図7-19-3	縮小投影露光装置
7-19-5	図7-19-4	化学増幅型レジストの感光メカニズム
7-19-6	図7-19-5	半導体デバイスの微細化トレンドと露光波長の関係
7-19-7	図7-19-6	縮小投影露光装置の光学系
7-19-8	図7-19-7	電子線描画装置
7-19-9	図7-19-8	液晶パネルに用いられるカラーフィルタ
7-19-10	図7-19-9	熱ナノインプリント技術
7-19-11	図7-19-10	光ナノインプリント技術
7-19-13	図7-19-11	レジストを使用する製品
7-19-16	図7-19-12	MOSトランジスタの構造
7-19-17	図7-19-13	EUV露光における二次電子の拡散
7-19-18	表7-19-1	各種レジストとその感度
7-19-19	図7-19-14	半導体レジストタイプ別世界市場
7-19-20	図7-19-15	半導体レジストの世界市場シェア（2019年）

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（20）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-20-2	表7-20-1	規制対象となる有機金属化合物及び有機化合物の例
7-20-3	図7-20-1	有機金属化合物に適用されるGHS対応ラベル
7-20-3	図7-20-2	安全な包装形態の一例（ステンレス製容器）
7-20-4	図7-20-3	試薬メーカーの電子カタログに公開されている製品情報の一例
7-20-8	図7-20-4	MOCVD法によるAlGaAs層の形成
7-20-8	図7-20-5	AlGaAs半導体層の透過電子顕微鏡写真
7-20-8	図7-20-6	不純物に起因する結晶欠陥
7-20-9	図7-20-7	化合物半導体デバイスを組み込んだ工業製品
7-20-10	図7-20-8	赤外線カメラによる暗視画像
7-20-10	図7-20-9	マイクロ波を利用した電子戦兵器
7-20-11	図7-20-10	ルイサイトの構造
7-20-12	図7-20-11	特開2006-342101に開示されているトリメチルガリウムの製造設備（溶媒としてメシチレンを使用している）
7-20-12	図7-20-12	特開2014-37424に開示されているトリアルキルガリウムの精製方法
7-20-13	図7-20-13	原料の純度が半導体膜の品質に及ぼす影響を調べた文献（技術が未熟だった90年代の古い研究）
7-20-14	表7-20-2	国内の出願状況
7-20-15	表7-20-3	高純度アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物を製造する主な企業）
7-20-16	表7-20-4	アルミニウム・ガリウム・インジウム有機金属化合物、燐・砒素・アンチモン有機化合物を用いて化合物半導体□　　製品を製造する主な企業

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（21）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-21-2	表7-21-1	規制対象となる水素化物の例
7-21-6	図7-21-1	リン鉱石の生産量と、日本の黄リン主要輸入相手国
7-21-9	図7-21-2	イオン注入装置
7-21-10	図7-21-3	MOCVD法によるAlGaAs層の形成
7-21-10	図7-21-4	AlGaAs半導体層の透過電子顕微鏡写真
7-21-10	図7-21-5	不純物に起因する結晶欠陥
7-21-11	図7-21-6	代表的な半導体デバイスの構造
7-21-12	図7-21-7	半導体デバイスを組み込んだ工業製品
7-21-13	図7-21-8	軍事用MR（複合現実）ヘッドセット
7-21-14	図7-21-9	赤外線カメラによる暗視画像
7-21-14	図7-21-10	マイクロ波を利用した電子戦兵器
7-21-16	図7-21-11	不純物としてモノシランを故意に15ppb（=0.0000015%）混入した場合のフォトルミネッセンス特性の変化
7-21-17	図7-21-12	特開2012-17230に開示されている高純度元素リンの製造方法および高純度リン酸の製造方法
7-21-18	図7-21-13	フーリエ変換赤外線分光法によるホスフィン中水分量のオンラインモニタリング
7-21-19	図7-21-14	特開2005-8481 に開示されたアルシンの精製方法及びその装置
7-21-20	表7-21-2	国内の出願状況
7-21-21	表7-21-3	燐・砒素水素化物化物を製造する主な企業
7-21-21	表7-21-4	アンチモン水素化物化物を取り扱う企業
7-21-22	表7-21-5	燐・砒素・アンチモン水素化物を用いて化合物半導体製品を製造する主な企業

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（22）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-22-2	表7-22-1	SiCとGaNの物性値
7-22-3	図7-22-1	GaNパワーデバイスによる省電力化
7-22-4	図7-22-2	化合物半導体の発光波長
7-22-5	図7-22-3	炭化けい素基板の製造工程
7-22-5	図7-22-4	炭化けい素基板
7-22-5	図7-22-5	炭化けい素インゴット／ブール
7-22-7	図7-22-6	化合物半導体基板を使ったデバイスの民生用途例
7-22-9	図7-22-7	物質の電気抵抗率（20℃）と規制パラメータの関係
7-22-10	図7-22-8	結晶欠陥の例
7-22-10	図7-22-9	結晶欠陥によって抵抗値が高くなるイメージ
7-22-11	図7-22-10	シリコンのN型半導体・P型半導体の模式図
7-22-11	図7-22-11	シリコンの不純物ドープ量と比抵抗（電気抵抗率）
7-22-11	図7-22-12	炭化シリコン（SiC）の窒素（N）ドープ量と電気抵抗率
7-22-19	図7-22-13	AlGaNをバッファー層にした高品質GaN

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第7項（23）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
7-23-2	図7-23-1	対象となる多結晶基板
7-23-2	図7-23-2	多結晶基板の構成
7-23-3	図7-23-3	セラッミックスの位置づけ
7-23-3	表7-23-1	セラミックスの分類
7-23-3	図7-23-4	セラミックスの結晶構造
7-23-4	図7-23-5	単結晶SiC膜製造プロセス
7-23-4	図7-23-6	貼り合わせ単結晶SiC膜の欠陥
7-23-6	図7-23-7	単結晶シリコンと多結晶シリコンの太陽電池の製造方法
7-23-7	図7-23-8	単結晶シリコンと多結晶シリコンの太陽電池の製造方法
7-23-8	図7-23-9	SiC単結晶基板と単結晶基板の貼り合わせの例
7-23-9	図7-23-10	石英ガラス基板上に直接成長したGaN系薄膜の断面画像
7-23-11	図7-23-11	物質の電気抵抗率と規制パラメータの関係
7-23-12	図7-23-12	太陽電池セル　単結晶と多結晶の比率
7-23-12	図7-23-13	従来のセル構造とPERCセル構造の比較
7-23-13	図7-23-14	従来のセル構造とPERCセル構造の比較
7-23-14	図7-23-15	住友金属鉱山の中期計画のSiC貼り合わせ技術

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第10項（11の2）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
10-112-2	図10-112-1	露光工程
10-112-2	図10-112-2	フォトマスクの製造工程
10-112-3	図10-112-3	フォトマスクの種類
10-112-5	図10-112-4	フォトマスク又はレチクルの用途
10-112-6	図10-112-5	プリント基板
10-112-6	図10-112-6	LED
10-112-6	図10-112-7	MEMS
10-112-7	図10-112-8	導波路の構造
10-112-7	図10-112-9	フォトマスクを用いたマイクロレンズの製作
10-112-7	図10-112-10	イメージセンサーの仕組み
10-112-8	図10-112-11	液晶ディスプレイパネルの製造工程概要
10-112-8	図10-112-12	FPD露光装置（マルチレンズシステム）
10-112-8	図10-112-13	ロータリーエンコーダの構成
10-112-9	図10-112-14	規制対象
10-112-10	図10-112-15	光センサーの分類
10-112-11	図10-112-16	光センサーの基本構造
10-112-11	図10-112-17	発光ダイオード
10-112-11	図10-112-18	ﾌｫﾄﾀﾞｲｵｰﾄﾞ
10-112-12	図10-112-19	最大感度
10-112-12	図10-112-20	フォーカルブレーンアレー
10-112-13	図10-112-21	光のスペクトル
10-112-13	図10-112-22	軍用暗視装置
10-112-14	図10-112-23	マスクおよびレクチルの世界市場
10-112-15	図10-112-24	フォトマスクの主要企業
10-112-16	図10-112-25	その他のフォトマスク企業

（様式２）

二次利用未承諾リスト

輸出令第12項（6）

委託事業名　令和３年度重要技術管理体制強化事業

受注事業者名　株式会社三菱ケミカルリサーチ

頁	図表番号	タイトル
12-6-2	図12-6-1	電池の分類
12-6-3	図12-6-2	エネルギー密度と出力密度
12-6-3	表12-6-1	燃料電池の種類と特徴
12-6-4	図12-6-3	燃料電池の活用を目指す実証事業
12-6-4	図12-6-4	純水素型燃料電池
12-6-6	図12-6-5	燃料電池の種類と用途
12-6-7	図12-6-6	規制がかかる可能性のある用途
12-6-8	図12-6-7	海域試験模式図
12-6-8	表12-6-2	閉鎖式HEML燃料電池システムの概要
12-6-9	図12-6-8	深海巡航探査機
12-6-9	表12-6-3	深海巡航探査機の主要諸元
12-6-10	図12-6-9	燃料電池の軍事用途への使用例
12-6-10	図12-6-10	燃料電池の自動車用と潜水艦用の違い
12-6-12	図12-6-11	規制判定フロー
12-6-13	図12-6-12	海水中での周波数と吸収減衰の関係
12-6-15	図12-6-13	世界の燃料電池市場シェア　2019年
12-6-16	図12-6-14	世界の燃料電池市場規模　2016-2025
12-6-17	表12-6-5	世界の燃料電池の種類別電力量【MW】
12-6-17	図12-6-15	世界の燃料電池の種類別電力量推移
12-6-18	表12-6-6	世界の主な燃料電池メーカー
12-6-19	表12-6-7	その他の燃料電池メーカー