

令和 2 年度 重要技術管理体制強化事業 (我が国における重要鉱物の流通管理高度化調査)

調査報告書

2021年3月23日
株式会社矢野経済研究所

目次

調査概要	3
調査結果サマリー	4
01. ケイ素 (Si)	19
02. ガリウム (Ga)	34
03. インジウム (In)	49
04. フッ素 (F)	60
05. ヘリウム (He)	75
06. カーボン (C)	
06-01. 人造黒鉛	87
06-02. カーボンナノチューブ (CNT)	99
06-03. グラフェン	110
06-04. 活性炭	117
07. タングステン (W)	126
08. タンタル (Ta)	141
09. イットリウム (Y)	155
10. ルテニウム (Ru)	164
11. ゲルマニウム (Ge)	174

調査概要

本事業では、我が国における重要鉱物の流通管理の高度化等に資する情報の提供を目的に、我が国産業に必要不可欠な重要鉱物に係る技術動向やサプライチェーン等に関する調査を実施。国外における生産から我が国への輸入、またその製品の輸出動向までを包括的に整理するとともに、我が国への安定供給を脅かすリスクや、サプライチェーン上の課題等について分析を行った。

業務実施内容

- 本調査では、半導体や電子部品等のエレクトロニクス分野において、デバイス・部材の高性能・高機能に必要でありながら、供給リスクを内在する重要鉱物として、以下の11の鉱物資源を調査対象として設定。
- これら重要鉱物において、国内外における流通実態、国内企業における重要鉱物の供給源の多角化及び技術開発動向、主要国における重要鉱物の生産・輸出管理等について文献調査ならびにヒアリング調査を実施した。

- 01. ケイ素 (Si)
- 02. ガリウム (Ga)
- 03. インジウム (In)
- 04. フッ素 (F)
- 05. ヘリウム (He)
- 06. カーボン (C)
- 07. タングステン (W)
- 08. タンタル (Ta)
- 09. イットリウム (Y)
- 10. ルテニウム (Ru)
- 11. ゲルマニウム (Ge)

- 文献調査ならびにヒアリング調査の結果を以下の項目に沿って各鉱物資源ごとに整理した。
 - (1) 概要
 - (2) 世界需要・供給
 - (3) 日本の輸出入等の動向
 - (4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向
 - (5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
 - (6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
 - (7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

調査結果サマリー

01. ケイ素（Si）サマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

- 他国と比較した時の電力コストの高さ
- 多結晶シリコン、シリコンウエハ製造時のエッチング・洗浄で大量に使用するフッ酸、硝酸の安定調達
- 使用済みフッ酸、硝酸の廃酸処理の負担増加

多結晶シリコンからシリコンウエハに至る製造基盤を国内中心に構築することで、多結晶シリコン、シリコンウエハのいずれでも日系メーカーが世界的に高い競争力を発揮している。しかし、半導体業界の競争環境が変化する中、国内の製造基盤を将来も維持していくためには、さらなるコスト競争力の強化が不可欠との声は強い。そうした観点から、上記の点がサプライチェーン上の課題・リスクとして指摘される。

用途	シリコン、半導体用・太陽電池用シリコンウエハ、合成石英の主原料。アルミ合金の添加材
製造	珪石(ケイ素と酸素が主成分)を電気炉で木炭(還元剤)などと融解、還元。膨大な電力を消費。
主要生産国	電力コストの安い、米国、ノルウェー、オーストラリア、ブラジル、南アフリカ、中国など。日本は1982年で国内生産を止め、全量輸入。
多結晶シリコン	
用途	半導体や太陽電池用シリコンウエハ。日系メーカーは半導体用にフォーカスしている。
製造	金属シリコンを塩素化して三塩化ケイ素(SiHCl_3)を製造し、これを蒸留精製、水素還元。 *上記以外に、モノシランを熱分解するUCC法及びエチル法があるが、酸化しやすい微粉末が形成されやすいため、半導体用途には不向き。
純度	半導体用シリコンウエハ（SEGグレードは11N～）、太陽電池用シリコンウエハ（SOGグレードは6N～9N）
副産物	多結晶シリコンを製造する際、反応上三塩化ケイ素（ SiHCl_3 ）の2/3程度が四塩化ケイ素（ SiCl_4 ）として発生する。多結晶シリコンメーカーはこの四塩化ケイ素を三塩化ケイ素にコンバージョンし製造工程に戻したり、合成石英ガラスや乾式シリカの原料として利用（もしくは外販）している。多結晶シリコンメーカーそれぞれのケミカルチェーンによっても事情は異なってくるが、メーカーによっては多結晶シリコンの生産が四塩化ケイ素の主な消費先の一つである乾式シリカの需要動向に影響を受ける場合がある。

02. ガリウム（Ga）サマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

- 相場価格高騰を契機とする動きに注意は必要も（背景に中国の生産抑制による需給バランスのタイト化）
- 長々期視点ではサプライチェーンの再構築も可能との見方あり

2021年に入り、ガリウムの市況が上昇しており、3月の国際スポット価格は300ドル/kgと、2013年以来8年ぶりに300ドルを超えた。これは中国の大手アルミ事業者が副産物のガリウム生産を抑制したことなどにより需給バランスがタイト化したことが要因とみられている。

国内では、亜鉛精錬副産物からガリウム生産を唯一行っていた秋田製錬が生産休止中のため、二次メーカー（輸入・再生地金からの高純度化）のみ生産している状況。輸入地金の供給元は大半が中国であるが、日本のガリウムメーカーは現状調達面について強い懸念を持っていない。その背景には、（中国だけではなく）世界のボーキサイト工場において、ガリウム回収が行われているのは一部のため、長々期視点では現行の10倍近い供給源がまだ残されているとの見方もある。

化合物半導体ウエハー（GaAs、GaP、他）

用途	可視LED、赤外LED、LD、VCSEL、高周波デバイスなど
製造（使用Ga純度）	単結晶成長法は各種あるが、いずれも結晶と融液の間に温度勾配を設けて融液を固化させている。薄膜結晶成長法は液相と気相の2通りとなる。使用Ga純度は6N以上。
主要プレイヤー	住友電気工業、昭和電工、DOWAエレクトロニクス、信越化学工業

化合物半導体ウエハー（GaN）

用途	青色LED、青紫色LD、パワーデバイス、高周波デバイス
製造（使用Ga純度）	単結晶成長法としての現状主流はサファイア下地基板への気相法による厚膜化となるが、高品質化と低価格化を目指す中で溶液成長法などによるアプローチが進められている。薄膜成長法の場合もサファイアを下地基板とした方法が主体であるが、大面積、かつ低価格化が図れるシリコンを下地とする方法も進み始めている。使用Ga純度は6N以上。
主要プレイヤー	住友電気工業、サイオクス、三菱ケミカル、日本ガイシ、日亜化学工業、豊田合成、ローム

03. インジウム（In）サマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

- 主力用途のITOターゲット市場において、日本企業の競争力低下の懸念がある。

インジウムの新地金の国内生産量は70tと横ばいで推移しており、それ以外は新地金の輸入、及び使用済みITOターゲット等から再生される再生地金として供給されている。新地金を生産する海外企業は韓国（Korea Zinc等）、欧米（Teck Resources、Indium Corporation等）に多数存在する。再生地金の供給量は、国内供給量の約60%（2019年）を占めるなど回収再利用のスキームが確立されている。そのため、現段階でインジウムの調達に問題は生じていない。一方、主力用途のITOターゲット市場で不安定要因が増えている。ここ数年でフラットパネルディスプレイ（FPD）の主要生産国が韓国・台湾から中国にシフトしており、中国FPDメーカーは政府の支援を受けて中国産ITOターゲットの採用を拡大しているという。中国産ITOターゲットの品質も高まる傾向にあり、5年以内には日本産の品質レベルに到達するとの見方もある。従来、ITOターゲット市場では日本企業が高いシェアを獲得していたが、FPD市場及びITOターゲット市場における中国企業の台頭により、日本企業の競争力低下の懸念が生じている。

ITOターゲット

用途	FPDや太陽電池などの透明電極
主要プレイヤー（国内）	JX金属、三井金属鉱業、東ソー、アルバック
主要プレイヤー（海外）	Vital Thin Film Materials（中国）、Guangxi Crystal Union Photoelectric Materials（中国）、Wuhu yingri Technology（中国）等

InPウエハ

用途	光ファイバ通信に用いられる半導体レーザ（LD）や発光ダイオード（LED）などの発光素子、及びフォトダイオード（PD）などの受光素子
主要プレイヤー（国内）	住友電気工業、JX金属
主要プレイヤー（海外）	AXT（米国）等

04. フッ素（F）サマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

● チャイナ・リスク（原料面及び事業環境面）

価格、品質、供給の安定度という点で中国産の無水フッ化水素酸が極めて優位な状況。また、今後、中国市場の拡大が見込まれる中、日本企業において半導体製造に係るフッ素関連製品の現地生産化が徐々に進展しているが、そうした取り組みは一方で技術流出のリスクに晒される懸念が生じている。

蛍石	
輸入状況	無水フッ化水素酸の製造原料の大部分は不純物の少ない中国産がメイン
無水フッ化水素酸	
用途	フルオロカーボン類、フッ素樹脂の中間原料、その他、各種表面処理・洗浄用のフッ化物（高純度フッ化水素酸）
製造	蛍石をロータリーキルンの中で濃硫酸と反応させ、出てきたガスを洗浄・凝集・蒸留する方法が一般的
主要生産国	原料面での優位性から中国が主体（日本は輸入のほぼ全量が中国）。メキシコ、インド、ベトナム等、中国以外もあるが、インドは原料を中国に依存、ベトナムは生産量が限られる等の点が指摘されている（メキシコは技術改善に伴い今後有力なソースとなりうる可能性あり）
高純度フッ化水素酸	
用途	最先端半導体製造工程（エッチング、洗浄）、液晶ディスプレイ製造工程、液晶ガラス（スリミング）
製造	無水フッ化水素酸を蒸留法にて高純度化（不純物管理等にノウハウ）
純度	12Nクラスの超高純度（金属不純物レベルと液中微粒子の管理サイズによりいくつかのグレードあり）
主要プレイヤー	ステラケミファ、森田化学工業、ダイキン、サンリット・フルオロケミカル（台湾）、Formosa Daikin（台湾）の他、ソウルブレイン（韓国）、ラムテクノロジー（韓国）も半導体向け高純度フッ化水素酸の国産化に取り組む
半導体液晶製造用特殊ガス	
用途	半導体液晶製造（エッチング、チャンバークリーニング）、半導体配線材料
製造	ガス種や製法によって中間原料が異なる場合もみられるが、基本的にはフッ化水素酸をフッ素源として用いているものとみられる
主要プレイヤー	関東電化工業、昭和電工、三井化学、セントラル硝子、SK Materials（韓国）、Hyosung（韓国）、PERIC（中国）、Versum Materials（米国）など

05. ヘリウム（He）サマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

● 国家備蓄に対する要請の高まり

米国に加え、カタール、ロシアがヘリウムの供給国として存在感を高めていくことが予想される中、地政学的なリスクが増すことで、市況は一層乱高下しやすくなる可能性があるかと懸念されている。

中国では、ロシア（ガスパロム）からパイプラインで天然ガスの供給が始まっており、これをソースに寧夏のヘリウム精製工場で精製ヘリウムガスが生産されているものの、現状は年間20t程度と規模が小さく、中国企業単独での事業運営も難しいレベル（欧米系のガスメーカーが中国国内のヘリウムガス流通等を手掛けている）であるなど、自前のサプライチェーンを構築するには至っていない。

しかし、半導体分野での需要増を受け、中国、台湾がヘリウムの調達量を増やす等、アジア圏を中心に品薄感が高まっており、日本のヘリウム輸入価格は依然として上昇傾向にある。こうした点から、ヘリウムでは、これまで以上に安定供給体制の強化を通じた、国内価格の安定化が重要となってくるものとみられる。

原料ガス	
製造	ヘリウムは天然ガスに含有されているものを分離・精製して生産している。しかしながら、採算性の観点からヘリウム単独での採掘が行われることはなく、天然ガス採掘時の随伴品として生産されており、その供給量は天然ガスの生産状況に大きく左右される。
供給国	現状は米国、カタールが主要供給国（2019年の世界シェアは両国で86%）
需給動向	足元はコロナの影響で緩んでいるものの、2021年は需給がタイトになる可能性。日本国内の単価は2016年以降、上昇基調。2022年以降は新規プラントの稼働に伴い需給バランスが軟化していく見通しであるが、備蓄ヘリウムの枯渇等を背景に今後は米国のヘリウム供給力が低下していくことが予想されている（米国に代り、カタール、ロシアの存在感上昇）。
ヘリウムガス・液体ヘリウム	
用途	超低温、不活性といった特徴から、光ファイバー、半導体、液晶、太陽電池などの製造工程（キャリアガス、冷却）で使用されているほか、医療用MRI等の超電導磁石の冷却材として用いられている。
製造	沸点の差を利用し、純度を高める方法が採られている（汎用的なガス分離技術）
純度	99.99%（4N）～99.99995%（6N5） *メーカーによってスペックが多少異なる
主要サプライヤー	岩谷産業、JHC（JAPAN HELIUM CENTER, 太陽日酸系列）、日本ヘリウム（エア・ウォーター系列）、日本エア・リキード（エア・リキード系列）、Union Helium（昭和電工系列）の5社。世界的にはLinde（英）、エア・リキード（仏）、エア・プロダクツ（米国）といった工業ガス大手が市場を占有している。

06-1. 人造黒鉛サマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

● 中国の等方性黒鉛メーカーが太陽電池から半導体へと事業領域を拡大することによる競争の激化

単結晶シリコン引上げ炉の部品選択の決定権は、シリコンウエハメーカーが握っている。半導体用シリコンウエハ市場では日本企業2社の存在感が高く、技術のすり合わせによって日本の等方性黒鉛メーカーは品質の高い製品を供給している。一方、中国の等方性黒鉛メーカーの主戦場は太陽電池分野であるが、技術力の高まりとともに半導体分野でも低価格を武器とした攻勢が強まってくるものと予想される。さらに、中国が注力しているシリコンウエハの内製化が進めば、等方性黒鉛市場での日本企業の競争力低下につながる懸念がある。このことは、半導体分野のほか冶金（連続鋳造用ダイス、ホットプレスダイス等の製品）分野などにも影響が及ぶと考えられる。

等方性黒鉛	
用途	半導体単結晶シリコン引上げ炉用部品、MOCVD装置用サセプター、LPE装置用ポート、太陽電池単結晶・多結晶製造装置部品、連続鋳造用ダイス、金型製造用放電加工電極、高温ガス炉用心材、ロケット部品、イオン注入装置用電極、等
主要プレイヤー（国内）	東洋炭素、東海カーボン、新日本テクノカーボン、イビデン
主要プレイヤー（海外）	SGL Carbon（独）、Mersen（仏）、Sinosteel（中国）、Chengdu Carbon（中国）、Baofeng Five-star Graphite（中国）、Jiangxi Shen Tian Carbon（中国）、Pingdingshan Oriental Carbon（中国）、Datong Xincheng New Materials（中国）、等
単結晶シリコン引上げ炉部品	
用途	ルツボ、ヒーター、電極、熱遮蔽板(シールド)、種結晶保持具(シードチャック)、ルツボ回転用ペディスタル、等
主要プレイヤー（国内）	東洋炭素、東海カーボン、新日本テクノカーボン、イビデン
主要プレイヤー（海外）	SGL Carbon（独）、Mersen（仏）

06-2. カーボンナノチューブ（CNT）サマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

- 多層CNTの量産技術の蓄積を武器に、単層CNT市場でも中国企業の追い上げが予想される

単層CNT市場ではロシア企業がおおよそ95%のシェアを有する一方、日本での実用化は進んでいない。ただし、日本で開発されたSG法やe-DIPS法、ELF法などは世界に誇れる合成・分離技術であり、これらの技術を生産効率やコストを考慮しながらさらに高度化させていくことが重要と考えられる。

多層CNTの主要サプライヤーである中国企業は、数百～数千トン規模の生産体制を整えている。ポリウムゾーンとなったLiB導電助剤の需要も中国に集中し、現地企業だけが潤う状況にある。今後は量産技術の蓄積を武器とした、単層CNT市場での中国企業の追い上げが予想される。

電界効果トランジスタ（Field Effect Transistor:FET）

用途	LSI（シリコンMOSFET代替）、バイオセンサー、ガスセンサー、等
開発状況	開発状況：CNT-FETの実用化に向けては高純度の半導体型単層CNTの合成（あるいは半導体／金属型の分離）、バンドギャップを揃えるための位置・配向制御、ソース・ドレイン電極とCNTチャネルのコンタクト抵抗低減などに関する技術の確立が必要⇒米国の大学が技術開発で先行
主要プレイヤー（国内）	産業技術総合研究所、NEC、名城ナノカーボン、等
主要プレイヤー（海外）	ローレンスバークレー国立研究所（米国）、マサチューセッツ工科大学（米国）、スタンフォード大学（米国）、IBM（米国）、デルフト工科大学（オランダ）、北京大学（中国）、等

不揮発メモリ：NRAM（Nanotube RAM）

用途	現在主流のフラッシュメモリに比べ、消費電力が4分の1以下と少ない利点を生かし、様々な情報端末機器への搭載を想定。大容量化により、DRAMの代替が究極の目標
主要プレイヤー（国内）	富士通グループ（NRAMの技術ライセンス供与先）
主要プレイヤー（海外）	単層CNT：Nano-C（米国） NRAM技術の開発：Nantero（米国）

06-3. グラフェンサマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

- 量産技術の確立がグラフェンFETの実用化に向けた最大の課題となっている。

現在、様々な研究機関・企業でグラフェンの量産化に向けた研究開発が進められている。しかしながら、酸化・還元法であれば酸化グラフェンの還元工程に関する技術等が確立されていないため、FETに応用できる高品質グラフェンを量産するまでには至っていない。また、グラフェンFETを対象とした半導体メーカーの研究開発の動きが鈍化する傾向にあるため、その実用化に遅れが生じている。日本のグラフェンメーカーにおいては、政府の研究開発に対する支援強化への期待感が大きい。

原料面では、機械的剥離法や酸化・還元法に用いる黒鉛の需給状況を注視していく必要がある。現段階では様々な黒鉛を用いながらグラフェンFETの開発が進められているが、LiB負極材と同じ黒鉛を原料に用いるのであれば、LiB負極材向けの需要拡大に伴う黒鉛の需給バランスの悪化や価格上昇の懸念が高まる。グラフェンFETに最適な黒鉛を早期に見出し、調達ルートを確立することが重要と考えられる。

電界効果トランジスタ（Field Effect Transistor:FET）

用途	LSI（シリコンMOSFET代替）、バイオセンサー、ガスセンサー、等
製造方法	グラフェンFETの研究初期においては、機械的剥離により得られるグラフェンを基板上に転写する手法が採られていたが、グラフェンの寸法や位置を制御することや大面積のグラフェンを得ることが困難で、量産には不向きであった。このため、近年はSiC 基板を用いた熱分解法やCVD法、酸化還元法をベースとしたチャネル形成が試みられている。
主要プレイヤー（国内）	物質・材料研究機構、東京大学、東北大学、富士通研究所、等
主要プレイヤー（海外）	IBM（米国）、BGT Materials（英国）、HRL Laboratorie（米国）、IHP Microelectronics（独）、Samsung Electronics（韓国）、等

06-4. 活性炭サマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

- 電気二重層キャパシタ(EDLC)メーカーによる用途開拓が進展しない場合、活性炭電極の需要低迷につながる

日本のEDLC市場は伸び悩む傾向にある。民生・産業機器向けのバックアップ用途は堅調であるものの、牽引役になることが期待された自動車回生用途において、蓄電性能に加え急速充電・長寿命を兼ね備えるLiBに需要がシフトしている。今後はバイワイヤ化・電装化に伴うバックアップ電源など、EDLCメーカーにおける用途開拓の重要性が増してくるが、その動きが進展しない場合は活性炭電極の需要が低迷する懸念が生じる。

EDLCの蓄電性能アップには限界があると考えられ、出力重視へと開発の軸足が移行する可能性が高い。そのため、活性炭には細孔内の抵抗低減など一層の低抵抗化が求められてくるであろう。

電気二重層キャパシタ（EDLC）電極

用途	スマートフォン（RTCやメモリー等のバックアップ電源、アプリケーション駆動時の電力アシスト、等）、AV機器・家電（CMOS IC、マイコン、RAM、RTC等のバックアップ電源）、産業機器（各種制御機器、セキュリティ機器、エンコーダー、シーケンスコントローラー等）のバックアップ電源、自動車や建設機械等の回生システム、他
製造方法	EDLC電極用活性炭の賦活には、水蒸気賦活あるいはアルカリ賦活が用いられる。椰子殻系は水蒸気賦活が一般的であり、フェノール樹脂は両方法が可能。石油コークスやピッチ系は賦活能力の高いアルカリ賦活が採用されている。アルカリ賦活は得られる活性炭の体積容量が大きく、細孔も一定の均一なものができるが、賦活後に洗浄、濾過、乾燥を繰り返して行うため生産コストの上昇につながる。
主要プレイヤー（国内）	クラレ、大阪ガスケミカル、MCEバテック、ATエレクトロード、等
主要プレイヤー（海外）	Cabot（米国）、等

07. タングステン（W） サマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

- 原料供給に関するリスクへの対策（タングステン原料の国家備蓄の強化、官民一体となった鉱山開発等）
- リサイクル技術の高度化（コバルト残渣の活用やガス回収等）を通じた、再生原料の取り組み拡大

タングステン原料に関しては、中国以外（ロシア、モンゴル、ベトナム、ブラジル他）からの調達拡大、リサイクル率（再生原料の使用増加）の向上等を通じ、中国依存度は一定レベルまで低下しているが、タングステン原料の供給では中国が依然として支配的な立場にある。また、供給源の多角化では、再生原料の取り組み拡大が挙げられるが、業界ではコスト負担の面から国内での回収・リサイクル拡大は困難とされる。

タングステン粉・タングステンカーバイド粉

用途	タングstenは超硬合金の原料（タングstenカーバイド）として使用されることが多いが、タングsten粉が集積回路配線材料（六フッ化タングstenを熱CVDにより形成）のタングsten源として利用されているほか、三酸化タングsten粉が電池材料の添加剤やシンチレタ原料として用いられている。
製造	タングsten原料（パラタングsten酸アンモニウム/APT）を化学精製し、高純度の三酸化タングstenを製造。これを原料に純タングstenが生産される。また、タングstenカーバイドは純タングstenとカーボンを混合し、炭化炉で焼成する製造方法が一般的であるが、三酸化タングstenとカーボンを炉の中で直接反応させる直接炭化法を超微粒グレードの製造に採用しているメーカーがある。
純度	タングsten粉の純度は99.9%以上とされるが、電池材料や配線材料等の用途では、放射性元素、アルカリ金属を限りなく低減した高純度品（中には、5N以上を保証した高純度タングsten粉が製品化されている）が求められることも少なくない。
主要プレイヤー	アライドマテリアル、日本新金属、日本タングsten等の日本メーカーのほか、米Kennametal、ベルギーUmicore、スウェーデンSandvik等がある。また、近年は中国メーカーの台頭が顕著である。

超硬合金

用途	耐磨耗性が要求される金属加工用の切削工具をメインに、シールドマシンの刃やアルミ缶等の深絞り用金型、打ち抜き用金型等で使用される。
製造	タングstenカーバイド（WC）と結合剤（バインダ）であるコバルト（Co）とを混合し焼結したもの。タングstenカーバイド粉にコバルト粉、複炭化物粉等を添加し、均一に混合した後、成型、焼結し、超硬合金となる。
主要プレイヤー	アライドマテリアル、日本新金属、日本タングsten、東邦金属、東芝マテリアル、東海合金工業等。欧米メーカーとしては米Kennametal（独Widiaを2002年に買収）、ベルギーUmicore、オーストリアCERATIZIT、スイスExtramet products等が挙げられる。

08. タンタル（Ta）サマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

- サプライチェーンのさらなる強化に向けて、くずの種類を問わず、酸化物・メタルに幅広く使用できるようにするためのリサイクル技術の開発等が課題

近年、中国がタンタルくずの輸出を制限しているとの話も挙がっているが、あくまでも調達先のひとつに過ぎず、直接的な影響は出ていないとされるなど、日本国内では、サプライチェーン全体を通じ、安定供給リスクへの対策が進展している。しかし、米国政府が中国を含む非同盟国からのタンタル輸入を禁止する等、タンタル業界では新たな分断リスクが生じている。今後、中国から米国に輸入されていたタンタル関連の製品については、日本をはじめ、他国からの輸出に置き換わっていくとみられるが、この一連の流れの中で、原料資材面での制約（中国品の使用見直し）への対応として、タンタルくずの一層の使いこなし等が求められていくものと見られる。

タンタル粉	
用途	タンタルコンデンサー用粉（電子機器、スマートフォン、携帯基地局）、ターゲット材（半導体：配線バリア用）
製造	粉末種類（アングュラー/粉碎粉、ノジュラー/還元粉、フレーク/片状粉）によって製法が異なる。アングュラータイプは電子ビーム溶解、ノジュラー状およびフレーク状の粉末の多くはフッ化物（ K_2TaF_7 ）をナトリウム還元することで得ている。
主要プレイヤー	グローバルアドバンスメタル（GAM）、タニオビス（旧H.C.Starck）。GAMは日本（会津）に拠点を保有し、主にコンデンサ用粉末を製造。タニオビス（旧H.C.Starck）は、日本（水戸）の工場にてターゲット材向けの粉末をメインに生産している。
化合物（酸化タンタル）	
用途	LT単結晶：SAWフィルター、光学レンズ用添加剤：デジタルカメラ用レンズ）
製造	輸入くず、または輸入タンタル粉を酸素気流中で強熱すると得られる。
主要サプライヤー	三井金属鉱業（三池レアメタル工場）、多木化学（兵庫県） *住友金属鉱山（住鉱国富電子/北海道、大田電子/鹿児島、青梅事業所）、山寿セラミックス（愛知県）などがLT単結晶（タンタル酸リチウム）を製造している。
化合物（炭化タンタル）	
用途	超硬工具添加剤（粒成長抑制剤として使用される）
製造	溶媒抽出を用いた分離・精製技術により抽出された酸化物を炭化处理
主要サプライヤー	三井金属鉱業工業（三池レアメタル工場）、タニオビス（水戸工場）、アライドマテリアル、日本新金属等のタングステンカーバイド粉を製造する企業でも生産されている。

09. イットリウム（Y）サマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

- 酸化イットリウムの調達経路の多角化が課題

サーバーの市場拡大・大容量化、低消費電力化等を受け、ロジックメーカーやファブリーが投資を積極化していることから、2020年以降半導体製造装置市場は好調に推移していくものと予想されている。保護膜の需要も拡大傾向となり、さらなる微細・高集積化の実現に向けコンタミの低減につながる酸化イットリウムの安定調達の重要性が増す。

一方、イットリウムの分離・精製工程は中国企業が独占。半導体製造装置用保護膜としてイットリウムの代替材料の開発は進んでいない。

中国がレアアースの輸出管理を強化し、酸化イットリウムの調達が不安定化すれば、保護膜材料をアルミナに戻す、すなわちコンタミの増加により歩留まり低下、さらには製造装置メーカーの競争力低下につながる懸念がある。よって、酸化イットリウムの調達経路の多角化が課題であり、備蓄強化も検討する必要がある。

半導体製造装置向け保護膜

用途	エッチング装置のチャンバー内壁、チャック等の保護膜
主要プレイヤー（国内）	信越レア・アース、フジインコーポレーテッド、日本イットリウム
主要プレイヤー（海外）	Oerlikon Metco（スイス）等

10. ルテニウム（Ru）サマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

● 鉱石産出量の制約、鉱山の偏在などによりルテニウム地金の供給不安が常につきまとう

白金族金属は鉱石の品位が数ppmと低く、年間の産出量が限られてしまう。深深度の鉱石を低コストで採掘する技術開発が進めば、産出量を増やせる可能性があるものの、現在の技術ではルテニウムで年間数十トン規模の供給が上限になると考えられる。鉱山は南アフリカとロシアに偏在しており、停電等のインフラ不全、労働争議の勃発、社会の混乱などによる採掘作業の中断が鉱石の産出量の減少につながる恐れがある。

また、ルテニウム市場ではHDD向けの用途開発が進んだ2007年に価格が高騰。ルテニウムは白金等の副産物として得られるため、需要に応じて産出量をコントロールできず、こうした用途開発によっても一時的な供給不足が生じる懸念がある。一方、日本ではJOGMECを中心に鉱山の探索・開発支援が行われているほか、ルテニウムメーカーによって回収再利用の取り組みが進んでいる。こうした取り組みを継続・強化していくことが、サプライチェーンの安定化を図る上で重要と考えられる。

ルテニウムターゲット

用途	HDD（垂直磁気記録方式）の軟磁性下地層及び非磁性中間層の材料
製造方法	スパッタリングターゲットの製造方法は溶融法と焼結法に大別でき、現在は焼結法が多用されている。焼結法は、原料粉末を高温下で溶着・焼結させて成形するものであり、HDD向けでは主に放電プラズマ焼結（Spark Plasma Sintering：SPS）法が採用されている。SPS法は、パルス通電による被加工物の自己発熱、粒子間に発生する放電プラズマエネルギーを利用することで、迅速かつ緻密な焼結を短時間で実現する。 また、STT-RAMやEUV向けでは溶融法で得られるルテニウムターゲットが用いられるものとみられる。
主要プレイヤー（国内）	フルヤ金属、田中貴金属
主要プレイヤー（海外）	Materion（米国）、Soleras Advanced Coatings（ベルギー）、American Elements（米国）等

11. ゲルマニウム（Ge）サマリー

エレクトロニクス分野に係る、サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク等

● “自前のサプライチェーン”の維持強化（再生原料の買い上げ制度、防衛省等との連携）

シリコンテクノロジーが2018年4月に金属ゲルマニウムの国内生産に参入したことで、中国に依存しないサプライチェーンの構築が進んでいる。二酸化ゲルマニウムについても、これまで主にカナダから輸入されてきたが、2018年末から2019年に掛けてプラント事故等により同国からの供給に制限が生じる等、供給リスクが表面化した。国内亜鉛精錬所において一部回収されている二酸化ゲルマニウムを活用するなどにより、ゲルマニウムに係る供給の多元化が図られるようになっている。

しかし、国産の原料・材料は価格が輸入品と比べ割高ともされ、中国メーカーの価格攻勢等が事業上のリスクとなっている現状がある。昨今、中国のゲルマニウム業界では、政府による川下展開の促進等を通じ、サプライチェーンの強化が図られているが、2020年9月施行の「資源税法」により、この動きが一層加速する可能性もある。

中国は主に石炭灰のバイプロとして金属ゲルマニウムを製造しているため、影響がゲルマニウム業界全体に広がるとは考えにくい。が、金属ゲルマニウムを主原材料とする光学部品関連のサプライチェーンでは、中国メーカーの攻勢にさらされる懸念があることから、今後はゲルマニウムのユーザーでもある防衛省等とも連携を図りながら、国内のサプライチェーンを維持強化していくことが求められるものとみられる。

金属ゲルマニウム・酸化ゲルマニウム

用途	赤外線透過材料、光学用結晶材料、光ファイバー母材用四塩化ゲルマニウム
主要プレイヤー（国内）	シリコンテクノロジー（赤外線透過材料、単結晶Ge、多結晶Ge）、三菱マテリアル電子化成（酸化Ge、四塩化Ge、金属Ge）、ティーディーワイ（光学用結晶材料、ウェーハ、ターゲット等）、トリケミカル研究所（光ファイバー母材用の四塩化Ge等）
主要プレイヤー（海外）	Umicore（ベルギー）、PPM Pure Metals（ドイツ）、Tech Resources（カナダ）、5N Plus（カナダ）、南京中ゲルマニウム科技（中国）、雲南ゲルマニウム業（中国）

01. ケイ素 (Si)

- (1) 概要
- (2) 世界需要・供給
- (3) 日本の輸出入等の動向
- (4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向
- (5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- (6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- (7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

(1) 概要

- ケイ素（Si, シリコン）は、二酸化ケイ素として古くより研磨剤や耐火材、ガラス原料として用いられているほか、珪石・還元材・鉄源から作られるフェロシリコンが鋼材の添加剤や製鋼用脱酸剤として使用されるが、ここではエレクトロニクス分野に係るサプライチェーンを見ていく上で、金属シリコンに着目した。
- 金属シリコンは、シリコン、半導体用・太陽電池用シリコンウエハ、合成石英の主原料になるほか、アルミ合金の添加材としても使われる。
- ケイ素と酸素を主成分とする珪石を木炭などと一緒に電気炉で融解、還元して製造される。金属ケイ素の製造には膨大な電力を消費するため、日本国内での生産は1982年をもってなくなり、現在は全量輸入されている。主要生産国は比較的電気代の安い米国、ノルウェー、オーストラリア、ブラジル、南アフリカ、中国などである。
- 金属シリコンの用途のうち、半導体や太陽電池用シリコンウエハは、金属シリコンを塩素化して三塩化ケイ素（ SiHCl_3 ）を生成し、これを蒸留精製、水素還元した高純度の多結晶シリコンが使用される。
- 半導体用シリコンウエハで用いられる多結晶シリコン（SEGグレード）は11N～、太陽電池用シリコンウエハで用いられる多結晶シリコン（SOGグレード）は6N～9Nの純度となる。
- 多結晶シリコンの製造工程から副生される四塩化ケイ素は合成石英ガラスや乾式シリカの原料として使用されている。合成石英ガラスは、金属不純物が少なく、光透過性が高いことから、光ファイバーや半導体製造時のフォトマスクなどに使われる。一方、乾式シリカは、工業用材料として、ゴムの補強剤、塗料等の粘度調整剤、半導体ウエハの研磨剤（CMP、ケミカルメカニカルポリッシング）、医薬品添加剤、農薬・肥料等のフィラーなどの用途がある。

(2) 世界需要・供給

【世界需要】

中国での需要拡大を背景にここ数年金属シリコン市場は拡大も、
2019年は世界的な景気後退懸念や米中対立の影響からマイナスに転じる。

- 2019年の世界の金属シリコン市場は、推定需要が前年比14.5万t減で、282万t（前年比4.9%減）となった。地域別にみると、アジア地域が171.9万t（同1.4%減）、欧州地域が58.1万t（同11.4%減）、南北アメリカ地域は35.7万t（同8.9%減）であった。中国を除くと全ての地域で需要が大幅に減少することになった。全体としては世界的な景気の減速懸念や米中間の貿易戦争などが影響した。
- アジアの内訳をみると、中国が119.8万t（同5.5%増）、日本が19.0万t（同16.8%減）、韓国が11.8万t（同28%減）。その他アジア地域が21.4万t（同1.1%減）であった。中国を除くと全ての地域で需要が大幅に減少することになった。
- 中国は2017年までの5年間10%超のペースで内需が拡大してきたが、2018年以降は需要の伸びが鈍化している。しかし、中長期的には中国国内に大型シリコン工場や太陽電池向け多結晶シリコン工場の建設が進むため、内需の拡大が予想される。
- 韓国では、多結晶シリコン大手2社（OCI、ハンファ）が中国メーカーの生産拡大により価格下落が顕著であった太陽電池向け多結晶シリコン生産から撤退を発表。韓国国内での多結晶シリコンの生産量が減少したため、金属シリコンの需要も縮小している。
- 欧州地域は化学用途向けの需要縮小に加え、自動車生産の減少によるアルミニウム合金の添加材としての需要の減少などにより大幅な下落となった。
- また、南北アメリカ地域では、シリコンを多く含有するアルミスクラップの使用量が国内アルミ合金メーカーにおいて増加したことが影響し、金属シリコンの需要が減少している。

(2) 世界需要・供給

【世界供給】

2019年は需要減を背景に生産過剰、市況悪化が表面化。各国で生産調整が進む。

- 2019年の世界の金属シリコン生産量は282.1万t（前年比7.3%減）。内訳は中国189.5万t（同4.3%減）、ノルウェーが18.4万t（同1.1%減）、アメリカが13.0万t（同29.7%減）、ブラジルが20.2万t（同7.3%減）、その他41.0万t（同13.6%減）であった。
- 中国の生産量は2010年に100万tを超えて以降も、2015年150万t、2018年198万tと飛躍的に増加していたが、2019年は減少となった。これまでは中国の内需の増加に対応するため、新疆地域の新興巨大サプライヤーを中心に生産量が拡大していたが、金属シリコン価格の大幅な下落で生産量は減少している。
- 新疆地域のサプライヤーの多くは自社所有の炭鉱からの石炭での安価な自家発電を備えており、低い製造コストを強みに生産量を拡大してきた。一方で、2018年以降の価格下落と国内需要の大幅な減速に新型コロナの影響が加わったことで、新疆地域以外の多数の生産者が生産調整を実施。その結果、中国全体の生産量は減少となった。
- 中国以外の金属シリコン生産量でトップのフェログローブは、供給過剰の拡大とそれに伴う市況悪化に対応し、米国とスペインで一部設備を休止し、米国とフランスでは金属シリコンの設備の一部を他の合金の生産に切り替えた。これにより米国・欧州地域での供給量が減少している。

(3) 日本の輸出入等の動向

- 金属シリコンの輸入通関実績でみると、2020年の中国からの輸入量は147,706t（シェア79.1%）。その他、ノルウェー、ブラジル、オーストラリアと続く。なお、輸入される金属シリコンのうち、低純度金属シリコン（4N以下）は主にアルミ合金の添加材として使用される。
- 金属シリコンの輸入では、中国のシェアが90%前後と高い水準にあったが、ここ数年は低下傾向にある。市況やサプライヤーの生産調整等の影響を受けるため、その年によっても状況は変わってくるが、需要家サイドからは調達リスクの分散化（ソースの多様化）に取り組んでいるとの声が聞かれた。

表.1-1 金属シリコンの輸入状況

輸入					単位 : t
国名	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
中国	164,934	190,081	204,908	159,166	147,706
ノルウェー	5,263	6,140	5,534	9,474	16,785
ブラジル	4,560	4,560	8,880	9,440	10,740
オーストラリア	4,931	4,338	5,976	7,457	7,487
その他	1,611	1,369	4,237	5,406	4,007
合計	181,299	206,487	229,535	190,943	186,725
(中国依存度)	91.0%	92.1%	89.3%	83.4%	79.1%

出所：工業レアメタル（No136 2020）及び貿易統計を基に矢野経済研究所作成

(3) 日本の輸出入等の動向

- 金属シリコンの主な用途である多結晶シリコンと、多結晶シリコンを原料に製造される単結晶シリコン、半導体・太陽電池用シリコンウエハの国内生産・販売・輸出入の状況は、2019年は半導体メモリー設備投資が世界的に不調であった。しかし、2020年は“すごもり需要”等が半導体の需要を喚起し、多結晶シリコン、単結晶シリコン、シリコンウエハの生産量がいずれも拡大している。

表.1-2 国内における高純度シリコンの生産・販売・輸出入 推移

(単位：t)

区分		2015年	2016年		2017年		2018年		2019年		出典
				前年比		前年比		前年比		前年比	
多結晶シリコン	生産量	8,855	9,774	110.4%	10,748	110.0%	10,856	101.0%	n/a	—	新金属協会推計
	輸入	17,837	26,320	147.6%	22,062	83.8%	22,672	102.8%	14,428	63.6%	財務省通関統計
単結晶シリコン	生産量	8,114	8,408	103.6%	9,199	109.4%	10,034	109.1%	9,385	93.5%	新金属協会推計
	国内販売	4,317	4,271	98.9%	4,254	99.6%	4,467	105.0%	4,116	92.1%	
	輸出	4,443	4,856	109.3%	5,731	118.0%	6,495	113.3%	6,180	95.2%	
	輸入	3,970	5,567	140.2%	6,573	118.1%	4,421	67.3%	3,933	89.0%	財務省通関統計
シリコンウエハ	輸出	5,302	5,799	109.4%	5,966	102.9%	6,307	105.7%	6,110	96.9%	財務省通関統計
	輸入	2,602	2,338	89.9%	2,263	96.8%	2,308	102.0%	2,287	99.1%	

出所：新金属協会資料等を基に矢野経済研究所作成

(4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向

- 業界の稼働率改善が進められるも、中国における金属シリコン工場の稼働率は現在も50%前後。
- 金属シリコンの原材料（シリコン砂・石英砂、金属シリコンを含む鉄合金など）を対象に輸出許可証制度が引き続き取られているが、輸出管理を強化するといった動きは今のところ見られない。
- 「資源税法」で中国のけい砂等が税率分高価になり、中国金属シリコンメーカーがけい砂等の原材料を海外から調達する可能性もあるが、けい砂等の資源は世界的に豊富であるため、このような中国の動きが日系メーカーの（シリコンウエハ等に係る）サプライチェーンに影響を及ぼすとは考えにくい。

（生産管理関連政策）

- ✓ 2016年以降、中国では市場参入規制を厳しくしたため、ローレベルな製造メーカーの整理淘汰が進んだ。その結果、2017年以降は一時期のような拡大トレンドは沈静化してきているが、それでも業界内の金属シリコン稼働率は50%前後の水準にとどまっているとされる。
- ✓ 金属シリコンメーカーが市況見合いで稼働率を変動させていることが要因として挙げられるが、環境保護規制の厳格化により稼働が制限されている企業もあるとのこと。金属シリコンの生産量が多い新疆、雲南などの省・自治区では2017年頃より生産量制限の規制を敷いているが、業界の稼働率を大きく引き上げるまでの効果は見られていない。

（輸出管理関連政策）

- ✓ 海外への金属シリコン資源の流出を防ぐため、金属シリコンの原材料であるシリコン砂・石英砂及び金属シリコンを含む鉄合金などの輸出を対象に、輸出許可証制度が引き続き取られているが、規制を強化するといった動きは今のところ見られなかった。ただし、報道ベースでは、金属シリコンの輸出で関税脱税疑惑が持ち上がったことで、2020年7月頃より福建省アモイ港を主体とした金属シリコンの通関手続きが税関当局により厳格化されているとの話もある。

（産業育成関連政策、他）

- ✓ 最近の動きとしては、中西部地域において、シリコンの原材料であるけい砂や石英砂、シリコン系鉄合金製品などの分野を対象に外資系企業による投資を促進するような政策が見られる程度である。
- ✓ 2020年9月より施行された「資源税法」において、金属シリコンの原材料である天然石英砂（原鉱又は選鉱）に資源税率1～12%が設定された。このため、今後は海外からけい砂等の原材料を調達する動きが広がる可能性もあるが、今のところ実質的な影響は確認されていない。

① 金属シリコンに係る中国政策動向

【金属シリコンの生産管理関連政策】

2016年以降、中国では市場参入規制を厳しくしたため、ローレベルな製造メーカーの整理淘汰が進んでいる。その結果、2017年以降、一時期のような拡大基調からは落ち着いてきているが、それでも金属シリコンの生産能力利用率（稼働率）は50%前後の水準にある。

表.1-3 2015年～2021年中国金属シリコン地域別生産能力・生産量推移

単位：万t

地域	2015年		2016年		2017年		2018年		2019年(見込)		2020年(予測)		2021年(予測)	
	生産能力	生産量	生産能力	生産量	生産能力	生産量	生産能力	生産量	生産能力	生産量	生産能力	生産量	生産能力	生産量
新疆	90	48	120	70	130	75	168	102	174	98	184	128	184	138
雲南	112	47	115	48	115	48	115	48	115	44	130	46	130	46
四川	65	38	70	39	70	39	70	34	70	30	70	30	70	30
福建	25	13	26	14	26	14	25	11	25	9	25	9	25	9
甘肅	20	8	20	6	20	6	18	9	18	9	18	9	18	9
湖南	25	8	15	4	15	4	14	6	14	5	14	5	14	5
貴州	16	8	16	4	16	4	14	4	14	3.5	14	4	14	4
その他	67	25	78	25	88	30	76	26	76	22	76	24	76	24
合計	420	195	460	210	480	220	500	240	506	220.5	531	255	531	265

出所：中国有色金属工業協会珪業分会データ（2019年末時点）

※2019年生産量の多い順

② 中国における半導体用多結晶シリコンの生産概況

- 2019年における中国の半導体原料級超高純度多結晶シリコン（11N）の使用量は3,900t～4,000t（在庫を含んだ需要量は約5,300t）と推計される。
- 2020年に新しく稼働した半導体生産ラインが複数あるため、2020年の超高純度多結晶シリコン（11N）の使用量は少なくとも6,000t程度まで増加すると推計される。ただし、12インチ用の高品質シリコン（11N）は、国産品もあるが、多くは海外からの輸入品（年間で800t～1,000t）である。
- 半導体原料級多結晶シリコンを製造するためのコア設備が中国製または海外からの中古品（60年代が主）であるため、8インチ以下半導体ウエハ用のシリコンは概ね自国で製造できるようになっているが、12インチ用の高品質のシリコン製造技術は完全には確立されておらず、かつ品質の安定性も十分でないとされる。
- 現段階で高品質シリコン（11N）が量産可能な国内企業は5社あるが、品質は安定していない。そのうち、比較的安定した製品が生産できるのは「江蘇鑫華半導体材料科技有限公司」の1社のみである。

表.1-4 中国国内における半導体原料級多結晶シリコンの製造企業

メーカー	生産能力（2019年末）	生産量（2019年）
江蘇鑫華半導体材料科技有限公司	5,000t/年	約2,700t
国家電投集団黄河上游水電開発有限責任公司新能源分公司	2,500t/年	約1,000t
新特能源股分有限公司	1,500t/年	約900t
雲南冶金雲芯硅材股分有限公司	1,000 t/年	約600t
内蒙古通威高純晶硅有限公司*	500 t/年	0t
中国（5社）計	10,500t/年	約5,200t

* 同社の半導体原料級多結晶シリコン生産設備は中国製、「有研半導体材料有限公司」から譲渡されたもので、2019年は生産設備がまだ調整中。

出所：公開情報を基に矢野経済研究所作成

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 半導体用多結晶シリコン

概要

半導体用（SEGグレード, 11N～）と太陽電池用（SOGグレード, 6N～9N）がある。
半導体用の供給は主に4社（トクヤマ、三菱マテリアル、ヘムロック、ワッカー）。
太陽電池用の供給は中国が主だが、過剰感強い。発電効率が高いSi単結晶系の拡大もあり、多結晶は減少傾向

製造方法

金属シリコンを出発原料に、三塩化ケイ素もしくはモノシランを精製し、これを蒸留精製もしくは熱分解する製造方法がある。半導体用グレードにも対応できるメーカーは、主にシーメンス法をベースとする三塩化珪素法を採用している。分解反応炉はベルジャー型反応炉の他、流動床反応炉が用いられている。製法上、高純度の水素、塩素が必要なため、これらを安定的に手当てできるかも半導体グレードの製造では重要なポイントとされる。また、太陽電池用グレードは管状反応炉を使用するVLD法、Degussa法など他のプロセスが導入されているケースがある。

用途

[半導体用]

最先端ウエハは半導体の線幅微細化に伴い、表面の平坦度が一段と求められている。
電極が上下についた縦型半導体のパワーデバイスや、128層などと多層化が進む3D NANDフラッシュメモリなどはウエハ内部の品質要求（カーボン濃度、不純物濃度）が高まっている。日系の多結晶シリコンメーカーは近年、特に重視されるカーボン濃度（表面及びバルク）の低減等に取り組み、実績を積み上げている。
日本のウエハ2社は引き合いの強い先端ウエハの増産を進めており、多結晶シリコンメーカーもこれらウエハメーカーでのシェアを追求している。

プレイヤー

トクヤマ、三菱マテリアル、ヘムロックセミコンダクター（米国）、ワッカー（独）、OCI（韓国）、GCLポリ（中国）等。
最近、多結晶シリコン業界では価格競争の厳しい太陽電池用から半導体用にシフトを図るメーカーが増えている（ワッカー、OCI、GCLポリ）。

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 半導体用シリコンウエハ

概要

微細な凹凸や微粒子を限界まで排除した、超平坦・超清浄なシリコン製のウエハ。

基板サイズは100mm～300mm。

製品としては、標準のポリッシュト・ウエハ(PW : Polished Wafer)の他、各種特殊加工を施したアニール・ウエハ(AW : Annealed Wafer)、エピタキシャル・ウエハ(EW : Epitaxial Wafer)、埋込層付エピタキシャル・ウエハ(JIW : Junction Isolated Wafer)、SOIウエハ(Silicon-On-Insulator Wafer)がある。

製造方法

高純度の多結晶シリコン(11N～)からさらにFZ(フローティングゾーン)法などのゾーンメルティングやCz(チョクラルスキー)法などの単結晶成長法による析出工程を経て、単結晶シリコンインゴットとなる。その後、ウエハ加工工程により仕上げる。

ゾーンメルト法では結晶中の不純物が融解帯に掃き出されて濃縮する過程を繰り返すことで高純度のシリコンを得る。一方、Cz法は偏析を利用して高純度化するため、原料である多結晶シリコン(多結晶珪素)には非常に純度の高いものが要求される。半導体に利用するには基本的に結晶欠陥(転位)のない単結晶が必要とされ、FZ法においてもCz法においても単結晶を回転させながらいったん細くし、転位を外に追い出した段階で結晶の径を大きくすることにより、所定の大きさの単結晶シリコンインゴットを得る。

ウエハ加工工程では、シリコン単結晶のブロックを厚さ1mm以下にスライシング後、研削・鏡面研磨等の高度な加工工程を経て、超平坦なシリコンウエハに仕上げていく。

用途

各種半導体デバイス（ロジック、メモリ、パワー半導体等）

プレイヤー

信越半導体、SUMCO、Siltronic（独）、GlobalWafers（台湾）、SK Siltron（韓国）。

GlobalWafersがSiltronicの買収に乗り出す等の動きがあるほか、大手ウエハサプライヤーが300mmを重視し、200mmの増産に慎重な姿勢を見せる中、新興の中国勢であるWafer WorksやFerro Teckなどが設備投資を活発化している。

(6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- 日系のシリコンウエハメーカーは、得意とする300mm（12インチ）ウエハに係るサプライチェーンを国内メインに構築。今後もこの体制に大きな変化はないと見られる。
- 多結晶シリコンの主原料である金属シリコンの国内における中国依存度は、現在も5割以上と高い水準にあるが、これは市況見合いの側面が強く、原料ソースの多様化（ノルウェー、ブラジル等から調達）は一定レベルで進展。多結晶シリコンメーカーサイドでの在庫等を含め、中国依存に対する対策は相応に採られていることが確認された。
- 多結晶シリコンからシリコンウエハに至る製造基盤を国内中心に構築することで、多結晶シリコン、シリコンウエハのいずれでも日系メーカーが世界的に高い競争力を発揮しているが、半導体業界の競争環境が変化する中、国内の製造基盤を将来も維持していくためには、さらなるコスト競争力の強化が不可欠との声が多く聞かれた。

(多結晶シリコン)

- ✓ 主原料である金属シリコンについて、国内における中国依存度（中国産の金属シリコンの比率）は5割以上。最近是中国品の価格が他と比べ安価であるため、中国品の調達量を増やしているような状況であるが、ノルウェーやブラジル等の金属シリコンを使用するなど、原料ソースの多様化も一定レベルで進展している様子が確認された。
- ✓ 日系の多結晶シリコンメーカーは、基本的にどこからでも原料を調達できるような体制を整えており、仮に中国から金属シリコンが手当てできなくなった場合でも、多結晶シリコンの製造ラインがストップするようなことがないよう対策が採られている。
- ✓ 中国の代替先からの調達に関して、輸送日数の問題から急な対応が難しい場合も想定されるが、日系多結晶シリコンメーカーではそういった点を加味し、在庫管理を行っているとのこと。

(単結晶シリコン及びシリコンウエハ)

- ✓ 日系のシリコンウエハメーカーは、技術・コスト面から単結晶シリコンを国内中心に集中生産している。
- ✓ 主原料とする多結晶シリコンは、高純度品（11N以上）を使用するため、サプライヤーはトクヤマ、三菱マテリアル、ヘムロック、ワッカーの4社となる。多結晶シリコン業界では価格競争の厳しい太陽電池用から半導体用にシフトを図るメーカーが増えているが、韓国、中国の多結晶シリコンメーカーはまだ高純度品を十分に供給できる能力を確立できていないとされる。こうした韓国、中国メーカーが半導体用多結晶シリコン市場に本格参入してくれば、多結晶シリコンメーカー間の価格競争が激化する可能性が高いが、ウエハメーカーは、品質・コストはもとより、長期に亘って安定的に調達できるか（安定生産出荷）という側面も重視しているとのこと。

(7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- 多結晶シリコンからシリコンウエハに至る製造基盤を国内中心に構築することで、多結晶シリコン、シリコンウエハのいずれにおいても日系メーカーが世界的に高い競争力を発揮しているが、半導体業界の競争環境が変化する中、国内の製造基盤を将来も維持していくためには、さらなるコスト競争力の強化が不可欠との声は強い。
- そうした観点から、他国と比較した電力コストの高さやフッ酸等の廃酸処理が課題として指摘される。

	(原料)	(素材)		(製品・用途)
	金属シリコン	多結晶シリコン	単結晶シリコン	半導体用シリコンウエハ
課題・リスク	● 多結晶シリコンメーカーにおける中国依存度は5割以上	● 今後は競争激化の見通し 品質要求の高度化（カーボン濃度低減等）に伴い、日系メーカーが高シェアを確保も、将来的には韓国、中国メーカーのキャッチアップも想定される。 ● 資材面に安定調達リスク等 多結晶シリコン、シリコンウエハ製造時のエッチング・洗浄で大量に使用するフッ酸、硝酸の安定調達にリスク。また、使用済みフッ酸、硝酸の廃酸処理が多結晶シリコンメーカー等の大きな負担になってきているとの声もあがっている	技術・コスト面から単結晶シリコンを国内中心に集中生産。 今後もこの体制に大きな変化はないとみられる。 ⇒国内の製造基盤が競争力の源泉	● 半導体産業の潮流変化への対応 遠隔、非接触、リモート、5G、ネットワークの高度化、環境対応（グリーン化）のトレンドがコロナ禍で加速化。半導体の重要性が増す。 ● 米中貿易摩擦（規制強化）、中国・韓国の内製強化（サプライチェーンの変化）、技術情報の流出・人材引き抜き等がリスク要因
対応策	● 原料ソースの多様化は一定レベルで進展 ルウエー、ブラジル等から調達。多結晶シリコンメーカーでは、突発的なリスクへの備えとして在庫を確保。	● コスト競争力の強化 他国と比較した時の電力コストの高さが重し。今後のカーボンニュートラル推進の流れがネガティブに働く可能性も指摘される（石炭火力に大きく依存しているメーカーもある）。	● コスト競争力の強化 ● 内部体制の強化	

① 多結晶シリコンにおける課題・リスク

需要見通し 業界動向

- ✓ データセンタ向けメモリの需要拡大等により、シリコンウエハ市場は堅調。一部にはデータセンタ投資の落ち着きを指摘する声も出だしているが、日系多結晶シリコンメーカーが主戦場とする300mmウエハの市場は2020年後半（7月～12月）も大きな落ち込みはないとみられ、将来的な需要も引き続きポジティブな方向にある。
- ✓ 特に微細化対応ウエハの需要は拡大基調で推移すると見られることから、品質優位性からこの領域で強さを見せる日系のウエハメーカーが必要とする高品質ポリシリコンの需要を取り込む動きが国内で加速すると予想される。
- ✓ 業界動向としては、独ワッカーが米国工場の2万t/年の析出能力(太陽電池用)を半導体用に転換すべくユーザ提案を進めているほか、韓国OCIや中国GCLと言った太陽電池用からのコンバート組の動きも徐々に活発化しているとのこと。
- ✓ 韓国、中国はシリコンウエハやポリシリコンの自国での内製化を進めており、将来的には日系メーカーの阻害要因となる可能性はあるものの、日本メーカーが得意とする高レベルの品質が重視される領域（300mm、先端プロセス向け）で競合先となるまでにはまだ時間が掛かるものとみられる。ただ、韓国のOCI～SK-Siltron～Samsung/SK-Hynixがタイトに結びつくことで、急速にキャッチアップしてくる可能性もあるとみられる。

課題・リスク

● コスト競争力が問われる中での「電力コストの負担増」

韓国、中国の多結晶シリコンメーカーが半導体分野での動きを活発化する中、マーケットプライスへの影響が懸念されるなど、今後競争環境が厳しくなっていくことが予想される。高い品質を自負する日系多結晶シリコンメーカーにあってもコスト競争力の強化が不可欠となっているが、そうした中、「電力コストの負担増」が国内製造での大きな懸念点として改めて指摘されている。「電力コスト」については、自家発電か、買電かによっても製造コストへのインパクトは多少異なるものとみられるが、石炭火力への依存やカーボンニュートラルの達成に向けた再生可能エネルギー導入促進等、将来的に電力コストの負担がさらに増す方向にある点に懸念が強まっている。

● 後工程（洗浄・エッチング）で大量使用するフッ酸、硝酸の調達面及び廃酸処理の問題

多結晶シリコンの製造時、洗浄・エッチングの目的で高純度フッ酸や硝酸が使用されるが、中国に供給を依存するフッ酸はもとより、硝酸でも海外メーカーとの競争等により、一部サプライヤーが製造を停止する等、国内での供給基盤に懸念が生じている。

また、フッ酸、硝酸に関しては、使用後の廃酸処理の問題も挙げられる。従来、多結晶シリコンの洗浄時に出てくる使用済みフッ酸はステンレス業界等で二次利用されていたが、近年国内のステンレス生産量が落ち込んでおり、使用済みフッ酸を引き取ってもらえる量が減っている（廃酸処理に出す量が増えている）という問題がある。多結晶シリコンメーカーの中には、処理コストの負担増だけでなく、廃酸処理を行う業者サイドの処理能力が国内の多結晶シリコン製造における懸念材料になりかねないとの見方も出てきている。

② シリコンウエハにおける課題・リスク

需要見通し 業界動向

- ✓ 300mmの引き合いが徐々に増えていることに加え、200mmが復調からウェルバランスに向かっており、この先の引き合いも強いとの見方。
- ✓ 分野別では自動車向けで需要が急増しているほか、すごもり需要（白物家電、在宅ワーク）も需要を下支え。また、産業向けなども需要が増加している。通常、200mmは秋口から不需要期に入るが、今期はこうした動きがみられず、全般的に引き合いが強いとのこと。遠隔、非接触、リモート、5G、ネットワークの高度化、環境対応（グリーン化）のトレンドがコロナ禍で加速化しており、半導体の重要性が高まっていることが背景にあるとしている。

課題・リスク

- ✓ 米商務省が2020年12月に発表した、中国半導体大手の中芯国際集成电路製造（SMIC）の「エンティティー・リスト」追加に関連し、その宣言文に「線幅10nm（ナノメートル）以下の最先端の半導体を製造するために必要な設備や技術は原則として許可しない」と明記された一方、14nm以上の設備、技術については禁輸措置の対象にならなかった。業界内では、いずれにしてもシリコンウエハの流通に制限が掛かる懸念はあると受け止められている一方で、需要自体のトレンドは変わらないため、サプライチェーンが変わる可能性があるとの見方も出ている。
- ✓ 中国が内製化の加速を目的に補助金をばらまいており、シリコンメーカーが乱立している。品質面はまだまだであるが、いずれは追いついてくることを想定し、コスト競争力を強化していかなければならないとの声が聞かれた。また、韓国が内製化を進めようとしている。こうしたBuy Koreaの動きにどのように対応していくかは国内の製造基盤を維持していく上で課題になっていく可能性があると思われる。
- ✓ フッ酸についてはシリコンウエハメーカーでもリスク要因として挙げられた。中国で輸出管理法が施行され、輸出制限されるかもしれないとの懸念が聞かれた。また、フッ酸以外では、ドーパ材として使用するアンチモンも安定供給が懸念される材料として挙げられる。使用量が少ないため、そこまで大きなリスクがあるとは言えないが、中国に原材料を依存しているため、材料メーカーサイドで在庫を確保する等の対策が採られているようだ。

02. ガリウム (Ga)

- (1) 概要
- (2) 世界需要・供給
- (3) 日本の輸出入等の動向
- (4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向
- (5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- (6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- (7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

(1) 概要

- ガリウムは、低融点（29.76℃）、高沸点（2403℃）であり、液体として存在する温度域が元素中最大である。水と同様に、液体の方が固体よりも体積が小さく、酸、アルカリに溶ける（両性）といった特長もある。
- 自然界では単体としては存在せず、元素又はその化合物を抽出する一次原料としての高品位のガリウム鉱物もまた存在しない。ガリウムの含有量が比較的多い鉱石としてはナミビアのツメブで産するゲルマナイトが知られているが、それでも含有率はわずかに0.6%–0.7%程度である。
- ガリウムは主にアルミニウムや亜鉛を製錬する際の副産物から得られる。このうち、アルミニウム製錬での副産物として得るのが主流である。
- アルミニウム製錬の場合、ボーキサイトからバイヤー法でアルミナを生産する際に、ガリウムを含んだバイヤー液（アルミン酸ソーダ溶液）から酸化ガリウム(III) (Ga_2O_3) を沈殿させた後、水銀陰極を用いて電解還元し、ガリウムを得る方法が一般的である。ガリウム含有溶液には他の金属も含まれるため、それらと分離して精製する必要がある。
- 日本でも従来は亜鉛副産物から金属ガリウムが生産されていたが、現在は休止中のため、国産の金属ガリウムは製造されていない。
- ガリウムは、主にガリウム砒素(GaAs)、ガリウムリン(GaP)等の化合物半導体材料として、可視LED、赤外LED、LD（レーザダイオード）、VCSEL（垂直共振器面発光レーザ）、高周波デバイスなどで使用されるほか、ガリウムナイトライド (GaN) が、シリコン (Si) と比べ電氣的、物理的特性に優れ、大幅に電力損失を低減することができるとして、青色LED、青紫色LD、パワーデバイス、高周波デバイスなどで使用されている。さらに、酸化ガリウム (Ga_2O_3) は、 GaN や SiC と比較し同等以上の特性を示す指標が多く、パワーデバイスへの応用が期待されている。

(2) 世界需要・供給

【世界需要】

化合物半導体の需要落ち込みが影響し、2019年のガリウム需要は前年から微減も電気自動車向けの好調な引き合いを背景に2020年は回復が見込まれる。

2019年の化合物半導体（6N～）の需要は158t（前年比88%）。米中の貿易摩擦の影響などで、Huaweiなどの中国の主要セットメーカーの需要が落ち込んだことなどもあり、前年割れとなった。貿易摩擦の影響による経済の不透明感などもあり、大型のデータセンター建設案件なども先延ばしの傾向がみられた。一方で、電気自動車向け（～5N）などの需要は右肩上がりが続き、2019年は198t（前年比107%）と増加した。

表.2-1 ガリウム用途別需要推移（世界, t/年）

Ga品種	用途	2018		2019		2020予測	
		総需要 (リサイクル込)	前年増減	総需要 (リサイクル込)	前年増減	総需要 (リサイクル込)	前年増減
6N～	化合物半導体	179	107%	158	88%	170	108%
～5N	太陽電池・ガス・磁石他	185	108%	198	107%	217	109%
合計		365	108%	356	98%	387	109%

出所：工業レアメタル（No.136 2020）

USGSアニュアルレポート（2021/1）より抜粋

- 2020年のGaAsウエハの世界消費量は前年比114%の伸びが見込まれる。GaAsウエハの48%がLED、同32%がRFアプリケーションで使用され、残り20%がフォトニクス用途等になるとみられる。GaAsウエハの需要のほとんどをアジア地域で独占している。
- GaN RFデバイスは、ケーブルテレビ伝送、商用無線インフラ、パワーエレクトロニクス、衛星と用途が広がっており、2020年には9.4億ドル（前年比122%）の市場規模まで拡大したとみられる。
- また、2020年の高出力LED市場は140億ドル（前年比105%）と引き続き安定した伸びを示しているとのこと。

(2) 世界需要・供給

【世界供給】

ガリウム新地金、中国が世界供給量の93.9%を占める。

工業レアメタル（No.136 2020）によると、2019年の世界のガリウム地金生産量は245t（前年比96%）であった。国別で見ると、中国（230t）、ロシア・カザフスタン（7t）、日本（3t）、その他（5t）。中国が圧倒的なシェアを有しており、2019年も93.9%と90%超の水準を維持している。ガリウムはリサイクル率の高い金属となっており、GaAs基板においては使用量の半数近くがリサイクルでまかなわれているとされる。同レポートではリサイクル分を2019年120t（前年比89%）と推計しており、バージンとリサイクルのトータルの供給量（2019年）は365t（同94%）となっている。

表.2-2 ガリウム供給量推移（世界, t/年）

	2018	前年増減	2019	前年増減	2020予測	前年増減
①国別バージンガリウム						
日本	3	100%	3	100%	3	100%
韓国	0	-	0	-	0	-
中国	240	133%	230	96%	250	109%
ロシア・カザフスタン	6	86%	7	117%	5	71%
その他	5	100%	5	100%	5	100%
小計	254	130%	245	96%	263	107%
②リサイクル分						
小計	135	108%	120	89%	130	108%
③ガリウム供給量（①+②）						
合計	389	122%	365	94%	393	108%

出所：工業レアメタル（No.136 2020）

USGSアニュアルレポート（2021/1）より抜粋

2020年の世界の生産能力 低純度地金：724t/年、高純度精製能力：325t/年、リサイクル：273t/年と推計

- 中国の低純度地金の生産能力は2010年の年間140トンから2016年以降、年間約600トンに拡大している。中国は世界の一次低純度地金の生産能力の80%以上を占めている。中国以外では日本、韓国、ロシアが一次低純度地金を生産している。
- 高純度地金の2020年の生産量は約220tと推計される。2019年から5%ほど増加した。中国、日本、スロバキア、米国が主な生産国。英国は2018年に高純度精製を停止した。リサイクルは、カナダ、中国、ドイツ、日本、スロバキア、米国などが行っている。

(3) 日本の輸出入等の動向

米中貿易摩擦の影響から、2019年は国内の需要、供給ともに前年割れも、2020年は回復の見込み
3Dセンシング分野（LiDAR、VCSEL、セキュリティカメラ等）、電気自動車での企業活動の活発化がガリウム需要を牽引すると期待される

【国内需要】

- GaAs系化合物半導体の国内勢のシェアはかつて70%以上を占めたが、中国勢の参入やSi系デバイスの復権の影響によるメーカー再編の動きなどで、大きく下落している。しかし、それでも40%レベルのシェアを維持し、ガリウム主要消費国のひとつとなっている。
- 2019年の化合物半導体の需要は、米国・中国の貿易摩擦の影響などを大きく受け、71t（前年比86%）と前年から減少した。その他の用途でも太陽電池向けなどで需要が減少したことにより、61t（前年比83%）と落ち込んだ。
- 需要減により、バージンの輸入も減少し、2019年のガリウム輸入数量は前年比77%の76.5tであった。
- 今後の見通しについて、化合物半導体用途では移動通信網の5G化を契機に特性で優位とされるGaAs系デバイス需要の増加を期待する声は強い。また、自動車の自動運転への応用（半導体レーザーを光源として使用するLiDARセンサー）を含め、VCSELもガリウムの需要拡大を牽引する用途と位置付けられている。
- 白色や赤色のLED市場は過当競争の様相が増しており、VCSELなどへの転換を図ろうとする企業が増加すると見られる。その一方で、こうした動きについて、業界内では一種のブームと捉える向きもある。ただ、電気自動車は中国の国策としての支援継続をはじめ、世界的にも普及促進が図られる流れにあることから、パワー半導体での取り組みは多くの企業にとって無視できないテーマとなっている。

表.2-3 ガリウム用途別需要推移（国内、t/年）

Ga品種	用途	2018		2019		2020予測	
		総需要 (リサイクル込)	前年増減	総需要 (リサイクル込)	前年増減	総需要 (リサイクル込)	前年増減
6N～	化合物半導体	82	104%	71	86%	77	108%
～5N	太陽電池・ガス・磁石他	74	104%	61	83%	63	103%
合計		156	104%	132	85%	140	106%

(3) 日本の輸出入等の動向

【国内供給】

- 工業レアメタル（No.136 2020）による業界推定の2019年の国内ガリウム供給量は149.5t（前年比103%）となった。なお、この数値には、亜鉛副産物から生産した国産の新地金（3t）が含まれるが、現在は休止中である。そのため、主には輸入メタルやスクラップリサイクルにより供給されている。
- 輸入メタルは主に中国から輸入されている。2015年以降は中国への依存度が高まる傾向にある（中国の輸入合計に占めるシェアは2015年：60.5%、2017年：69.1%、2019年：71.9%、2020年予測：75%）。

表.2-4 ガリウム輸入数量推移

（単位：t/年）

		2015	2016	2017	2018	2019	2020予測	20/19比	構成比 (2020)
国別 輸 入 量	中国（4N）	49.5	56.0	65.0	75.0	55.0	60.0	109.1%	75.0%
	ロシア（4N）	0.0	4.0	6.0	3.5	3.0	3.0	100.0%	3.8%
	米国（4～6N）	15.0	10.0	5.0	10.0	7.5	8.0	106.7%	10.0%
	台湾（2～6N）	7.0	4.0	5.0	4.0	4.0	4.0	100.0%	5.0%
	ドイツ（4～7N）	2.8	0.0	5.0	3.0	2.0	1.0	50.0%	1.3%
	ウクライナ（4N）	0.9	1.5	2.0	0.0	0.0	0.0	-	-
	フランス（4～7N）	1.5	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-
	韓国（3～6N）	1.5	0.7	0.0	0.7	1.0	1.0	100.0%	1.3%
	英国（4N～6N）	1.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-
	カザフスタン（4N）	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	-	-
	その他（4N）	3.0	3.0	5.0	3.0	4.0	3.0	75.0%	3.8%
	合計	81.7	87.1	94.0	99.4	76.5	80.0	104.6%	100.0%

出所：工業レアメタル（No.136 2020）

(4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向

- ガリウムに関しては、資源探査・採掘の許可証制度及び輸出許可証制度が採られているのみであるが、このところ金属ガリウムの供給過剰感が高まっていることに加え、化合物半導体等の産業育成が重点化される傾向にある。
- これらの点から、将来的にはガリウムの生産・輸出管理に関する方針が見直される可能性もあるとみられているが、そのような可能性を示唆する情報はこれまでのところ浮上していない。

（生産管理関連政策）

- ✓ 中国ではガリウムの探査・採掘に関して、許可証（鉱山資源探査権許可書・鉱山採掘権許可書）制度で市場参入が管理されている。しかし、ガリウム資源は、他品種鉱山（ボーキサイト鉱山、石炭鉱山・スズ鉱山、閃亜鉛鉱山）と付随・共生する上、含有率がかなり低く、全国各地に分散している状況である。そのため、ガリウムの生産量を制限するような政策は今のところ採られておらず、検討段階にあるとされる。

（輸出管理関連政策）

- ✓ 中国では海外へのガリウムの無闇な流出を防ぐため、輸出許可証制度（輸出許可証管理貨物リスト）が導入されている。

（産業育成関連政策、他）

- ✓ 最近になって、ガリウムに係る政策が徐々に本格的に打ち出されるようになってきている。CIGS薄膜太陽電池関連材料や化合物半導体材料を奨励型産業と位置づけ、各種の施策が導入されているほか、珠海市ハイテク産業区でのGaN-on-Si製造ラインの増設・拡張等の動きもあった。

② 中国におけるガリウムの開発・生産概況

【金属ガリウム】

ガリウムの生産原料（バイヤー液等）が豊富、かつ安価

- ガリウムは主にアルミニウム精錬、亜鉛精錬の副産物として得られる。
中国におけるアルミニウム精錬、亜鉛精錬産業の規模は大きく、2019年の中国国内の酸化アルミニウム生産量は7,247万t（前年比1%減）、亜鉛生産量は624万t（前年比9.2%増）であった。
- 酸化アルミニウムからのガリウム生産事例（平陸優英鋅業有限公司）をみると、1tあたりのガリウムを生産するには約1,600tのバイヤー液が必要とされる。また、平陸優英鋅業有限公司にバイヤー液を供給する「山西復晟鋁業有限公司」の酸化アルミニウムプロジェクト（年間80万t）をみると、酸化アルミニウム1tあたり、約17tのバイヤー液が発生していることが分かった。
- これらの事例を基に試算すると、2019年の中国国内の酸化アルミニウム生産量が7,247万tであるため、仮にこれらから発生したバイヤー液からガリウムを回収した場合（7,247万t×17÷1600）、最大77万tのガリウムが生産可能となる。

ガリウムの価格は低迷

表.2-5 中国メーカーの金属ガリウムの国内希望価格

単位：元/kg

日付	4N（純度99.99%）	6N（純度99.9999%）	7N（純度99.99999%）
2016年5月27日	740～760	870～970	不詳
2017年5月26日	710～750	830～860	不詳
2018年5月28日	1,340～1,380	1,440～1,490	不詳
2019年5月27日	980～1,030	1,080～1,130	不詳
2020年5月27日	1,000～1,040	1,110～1,160	1,320～1,350

注：上記価格は増値税込み、現物価格である。

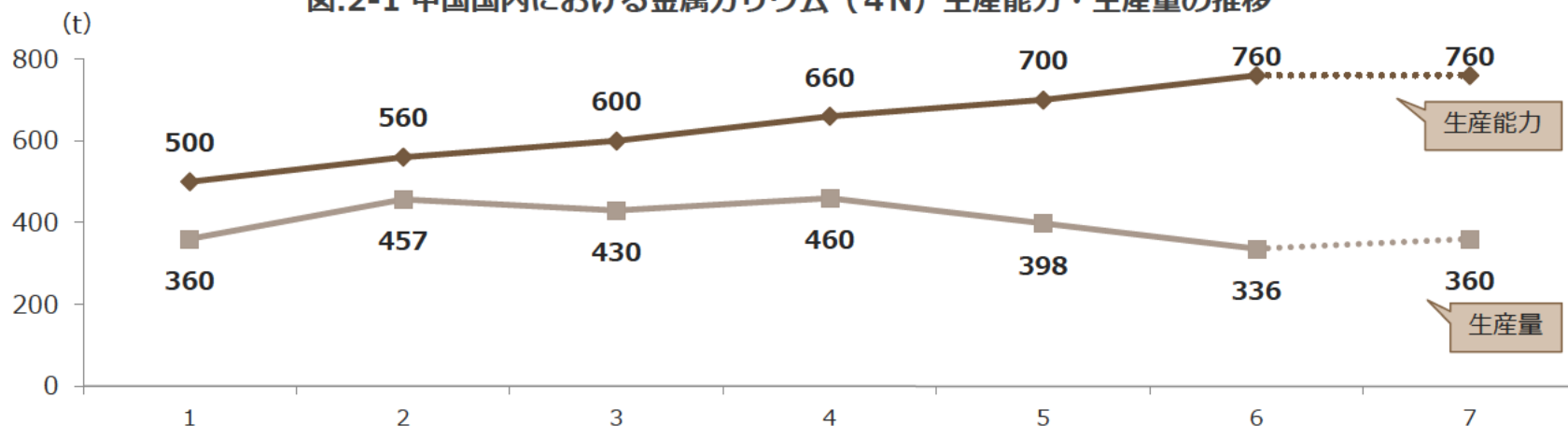
出所：中国有色金属工業協会（<http://www.chinagallium.org/>）

② 中国におけるガリウムの開発・生産概況

【金属ガリウム】

過剰生産能力問題が表面化

図.2-1 中国国内における金属ガリウム（4N）生産能力・生産量の推移



- ・ 2019年の中国国内の金属ガリウム生産能力は760tである。一方、同年の生産量は336tで、これは生産能力の44%に当たる。
- ・ 世界のガリウム需要は、2020年は400t前後とみられることから、中国メーカーがこれ以上金属ガリウムを生産しようにも余剰の需要がないのが実際である。
- ・ 中国で金属ガリウム事業の純利益率は約30%になっており、決して低いわけではないが、そもそも需要規模が小さく、利益額という点では見劣りする。今後5GやGaN急速充電器などでの需要拡大が期待されているが、これらの用途が成長しても、需要量が急激に拡大するわけではないため、業界の供給過剰状態の解消は当面先と見られている。
- ・ 中国における高純度ガリウムの生産能力は約200tとみられている。ただし、純度の低い4N品と純度の高い7N品の価格差は1kgあたり約300円しかないため、国内の多くのメーカーは4N品の生産に集中している。
- ・ 国内における金属ガリウムの年間使用量はここ数年240t～260tの水準にある。そのうち、GaAsが全体の約7割を占めている。なお、国内における5G基地局通信用のGaNデバイスに使用される高純度金属ガリウム（8N）の生産規模は2019年時点で約10tと推定される。

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 化合物半導体ウエハー（GaAs、GaP、他）

概要

ガリウムの最大用途となる通信用途系の電子デバイスや赤・赤外LEDやLDの光デバイスの材料。

製造方法

単結晶の製造方法としては、液体封止チョクラスキー（LEC）法、グラジエントフリージング（GF）法、垂直ブリッジマン（VB）法、水平ブリッジマン（HB）法などがあるが、いずれの方法においても、結晶と融液の間に温度勾配を設けて融液を固化させることにより結晶の育成を行っている。

用途

可視LED：表示板、自動車ランプ、液晶バックライトなど

赤外LED：バーコードリーダー、リモコン、センサーなど

LD：ピックアップレーザー（DVD、CD）、プリンター、センサー、通信光源、マーカー、墨出し器

VCSEL：センサー、マウス、プリンター、通信用光源

高周波デバイス：ダイオード・トランジスタ（主にパワーアンプ系）

プレイヤー

住友電気工業（住電半導体材料（神戸））、昭和電工（秩父事業所、昭光エレクトロニクス）、DOWAエレクトロニクス（DOWAセミコンダクター秋田）、信越化学工業（磯部工場、いわき半導体）

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 化合物半導体ウエハー（GaN）

概要

白色LEDに使われる青色LEDや紫外LED、さらに、青紫色LDやパワーデバイス用材料としてもその高い特性（バンドギャップなど）が期待されている。

製造方法

単結晶基板の製造方法としての現状の主流はサファイアなどの下地基板上へのエピタキシャル成長（ GaCl_3 や $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$ （TMG）がガリウム源、その後下地基板を剥がす）となるが、高品質化と低価格化を目指す中で溶液成長法によるアプローチが進められている。エピタキシャル基板の場合も現状の単結晶基板と同様に、サファイアなどの下地基板をベースとしている。

用途

青色LED：照明（白色LED）、表示

紫外LED：照明、硬化、殺菌、印刷、センサー

青紫色LD：ピックアップレーザー（Blu-ray）、プリンター、プロジェクター

パワーデバイス：ダイオード・トランジスター（ソーラーインバーター、xEV用インバーター、急速充電など）

高周波デバイス：ダイオード・トランジスター（5G通信基地局、無線通信など）

プレイヤー

住友電気工業、サイオクス、三菱ケミカル、日本ガイシ、エア・ウォーター
日亜化学工業、豊田合成、ローム

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

- 化合物半導体ウエハー (Ga_2O_3)

概要

GaNよりも高い特性（バンドギャップなど）を有しており、SiCの領域への応用が期待されている。また、世界的にも日本における取り組みが進んでいるとされている。

製造方法

単結晶基板の製造方法として、薄膜成長が主体のGaNに比べ一般的な融液成長法で育成が可能となっている。また、結晶構造が違うタイプではエピタキシャル成長によるものもある。

用途

パワーデバイス：ダイオード・トランジスター（各種インバーターなど）

プレイヤー

ノバルクリスタルテクノロジー、不二越機械工業、FLOSFIA

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● ターゲット材料

概要

太陽電池（CIGS）やTFT材料（IGZO）として使用されている。

製造方法

混合・粉砕により得られた粉末をプレス成形後に焼結という手順を踏むケースが多いが、ターゲットメーカー固有の技術も多く、スラリー状態から真空吸引脱水しながら成形する方法など多種の製法がある（組成比などもさまざま）。
一例：Ga塩溶液にアルカリを添加して中和することによって水酸化Gaを沈澱生成させ、これを濾過乾燥した後焼成することによって製造される酸化Gaを出発原料とし、主に酸化Inや酸化Zn等の粉末と混合する。

用途

太陽電池／CIGS

酸化物半導体（TFT）／IGZO

プレイヤー

アルバック（アルバック九州）、三井金属（三池ターゲット工場）、JX金属（磯原工場（茨城県））

(6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- 輸入メタルの供給元の中国比率が年々高まっていることに加え、直接高純度品の供給を受けるケースが増えているとされる等、国内ガリウムメーカーにおける中国依存度は上昇傾向にある。
- ガリウム市況は2021年に入り上昇しており、3月の国際スポット価格は300ドル/kgと、2013年以来8年ぶりに300ドルを超えた。中国の大手アルミ生産者が副産物のガリウム生産を抑制したことなどにより需給バランスがタイト化したことが要因とされる。
- 新地金の価格上昇がスクラップ経由の高純度地金に及ぼす影響は限定的とされる。また、これまでのところ、国内ガリウムメーカーは現状強い調達懸念を持っておらず、業界内でも供給源の多角化に関する具体的なアクションはあがっていない。

(原料調達面)

- ✓ 鉱石からの生産を唯一行っていたDOWAグループ（秋田製錬）は現在生産を休止している。
- ✓ 国内ガリウムメーカーは輸入メタルを高純度化し新地金を得ている。
- ✓ 輸入メタルの供給元の中国比率は年々高まっているだけでなく、直接高純度品の供給を受けるケースも増えている。

(代替素材の開発状況)

- ✓ もともと、各アプリケーション分野におけるシリコンなど従来使われてきた素材に対する特性差により、ガリウム使用が進んできた。今後主流となる5G関連の高周波デバイスにおいてはGaAsが主流になる方向であるが、6G以降についてはまだ定まっていない。次世代パワーデバイスにおいて他素材（SiやSiC）が先行しているが、GaNやGa₂O₃への期待は高く、デバイスメーカーサイドでの研究開発も活発化してきている。
- ✓ GaN系デバイスとして足元成長が見込めるGaN on Siであるが、国内での取り組みは少ない状況になる。ただ、ベースとなるシリコン領域において国内には世界的にもメジャープレイヤーが存在することを利した取り組みを進めることで、GaN on GaN市場が本格化するまでのブランクを埋めることが出来る。最近是中国勢が多数参入してきたことで、チップデザインやドライバーの実装等、様々な分野でのコスト低減の提案が活発化しているとされる。

(リサイクルの状況)

- ✓ 化合物半導体工程内で出るスクラップ由来の再生地金が生産されているが、廃製品からのリサイクルは行われていない。
- ✓ 近年は「廃LED照明」からのガリウム化合物リサイクルに関する技術実証事業が行われている。

(7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- 価格高騰を契機とする動きには注意が必要（背景に中国の生産抑制による需給バランスのタイト化）
- 長々期視点ではサプライチェーンの再構築も可能との見方あり

	(原料)	(素材)	(製品・用途)	
	金属ガリウム	化合物半導体ウエハ (GaAs, GaP, GaN, Ga ₂ O ₃ , 他)	各種LED、LD	高周波デバイス パワー・デバイス
課題・リスク	● 中国への依存度が高まる傾向 (国内での亜鉛製錬副産物からの生産は休止中) ● ガリウム相場価格の高騰 3月の国際スポット価格は300ドル/kgと、2013年以来8年ぶりに300ドルを超えた。中国の大手アルミ生産者が副産物のガリウム生産を抑制したことなどにより需給バランスがタイト化したことが要因。	● 中国高純度地金の使用検討が進む 6～7N品が直接入ってきている模様で、価格的な魅力から使用を検討する動きがみられる。	● メーカー間の競争は激化の見込み GaAs系では一時期の高シェアではないものの、今後も現状維持は見込める状況。 GaN系LEDは今後さらなるシェア低下となる方向、LD（青紫色）は横ばい見込み。	● 製品領域でのシェア拡大が焦点 GaAs高周波デバイス（特に対5G）はSiと戦える数少ない領域。 GaNとGa₂O₃パワーデバイスは先行するSi、SiCと同等（または以上）の市場成長が見込まれる。
	● 亜鉛製錬副産物からの生産は条件が整えば再開可能 市場取引価格が再稼働の判断材料となるが、再稼働には一定の期間（設備メンテ等）が必要となる。	● 供給源多角化の検討着手 業界内で具体的なアクションは今のところあがっていないが、世界のポーキサイト工場（中国だけではなく）において、ガリウム回収が行われているのは一部のため、長々期視点では現行の10倍近くの供給源がまだ残されているとの見方もある。	● GaAs系⇒GaP系⇒GaN⇒Ga₂O₃の順で、中国を含む海外勢の台頭が進むと予想される	● 今後期待されるアプリケーションでの取り込み GaN系では、可視光以外の紫外、深紫外で高付加価値化の可能性。
対応策			● シェア拡大に向けた一手シリコン領域でメジャープレイヤーが存在することを利して、GaN on Si への注力も有効。 GaN系パワーデバイス市場の本格化につなげてシームレスな成長が期待される。	

03. インジウム（In）

- （１）概要
- （２）世界需要・供給
- （３）日本の輸出入等の動向
- （４）主要国（中国）における生産・輸出管理動向
- （５）エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- （６）国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- （７）サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

(1) 概要

- インジウム (In) の融点は156.6℃と低く、光沢のある銀白色の金属で軟らかい性質を持つ。単体金属は室温では安定だが、酸に対し水素を発生し溶解する。インジウム化合物には塩化インジウム (InCl_3)、酸化インジウム (III) (In_2O_3)、リン化インジウム (InP) などがある。塩化インジウムは易溶性であるが、酸化インジウムやリン化インジウムは不溶性である。
- インジウムの地殻中の平均含有量は0.1ppmである。インジウムが含まれる鉱石としては、閃亜鉛鉱をはじめとする硫化鉱石や錫石等の酸化鉱物があり、主に亜鉛製錬の煙灰、残渣からカドミウム、錫、ガリウム等とともに分離される。次に、インジウムイオン溶液に亜鉛 (アルミニウム) 粉末を加え、置換・析出させることでインジウム地金を得る。
- インジウムの最大の用途は、ITO (Indium Tin Oxide : インジウム-スズ酸化物) ターゲットである。ITOターゲットは酸化インジウム粉末に酸化スズ粉末を10wt%程度ドーピングすることで導電性を高めており、液晶、有機EL、タッチパネル等のフラットパネルディスプレイ (FPD) の透明電極として使われる。
- 近年はスズの代わりに亜鉛を使用したIZO (Indium Zinc Oxide : インジウム-亜鉛酸化物) ターゲット、酸化物半導体としてIGZO (Indium Gallium Zinc Oxide : インジウム-ガリウム-亜鉛酸化物) ターゲットも開発されている。
- 酸化インジウム粉末は、インジウム溶液にアルカリ水溶液を添加することで水酸化インジウム粉末を析出し、これを粉碎・分級した後に仮焼することで得られる。
- リン化インジウムはインジウムとリンからなるⅢ-V族化合物半導体であり、常温で安定な閃亜鉛鉱型の結晶構造をもつ。分子量 145.79、融点1062℃、比重4.81である。半導体材料としては1.35eVのバンドギャップを有し、高電界における電子移動度および耐放射線が高いなどの特長を有する。
- インターネット通信の伝送情報量を飛躍的に拡大した高密度波長多重 (DWDM) 方式の普及に伴い、光ファイバー通信のキーデバイス材料として注目されている。また、航空機・自動車用ベアリングの表面被覆用、ターゲットリング向け撮像管用にもリン化インジウムが使用されている。

(2) 世界需要・供給

【世界需要】

- インジウムの世界需要はITOターゲット向けが80%以上を占めており、主にTVやタブレット、スマートフォンなどに搭載されるFPD市場と一定の連動性を持って推移している。
 - 2019年は中国の生産能力拡大などを背景にFPDの供給過剰が顕在化し、FPD価格の下落につながった。これを受け中国の既存のFPD工場などが生産・在庫調整などを実施したため、インジウムの需要も前年比91.6%、1,379tに落ち込んだ。
 - ここ数年、インジウムを含むレアメタル業界では中国の民間貴金属取引所（Fanya, 雲南省昆明）の破綻、それに伴い差し押さえられた投機在庫の市場流入による市況への影響が懸念されていた。インジウムに関しては、2020年1月にFanyaの在庫分である約3,600tの入札で、Kunming Rongke New Materials が総額約28億50百万元（約427億50百円）で落札した。
- ※ Kunming Rongke New Materials：中国の大手レアメタル生産者であるVital Materials及び投資会社、銀行の出資により2019年9月に設立された。
- ※ Vital Materials：高純度金属、金属合金、貴金属、セラミック等の様々なスパッタリングターゲットを手掛けるVital Thin Film Materials（VTFM）を傘下に有する。VTFMは、ベルギーのUmicoreと合併で設立したITOターゲットの事業会社を前身としている。

表.3-1 インジウムの世界需要推移

(単位：t)

区分	2016年	2017年		2018年		2019年	
			前年比		前年比		前年比
ITOターゲット	1,202	1,238	103.0%	1,281	103.5%	1,153	90.0%
その他	209	222	106.2%	224	100.9%	226	100.9%
合計	1,411	1,460	103.5%	1,505	103.1%	1,379	91.6%

出所：工業レアメタル2020（No.136 2020）

(2) 世界需要・供給

【世界供給】

- 2019年におけるインジウムの新地金の世界生産量は、前年比130.6%の968tであった。新地金の世界生産量に占める国別シェアを見ると、中国が535tと全体の55.3%を占め、韓国、日本、カナダ、フランス、ベルギー、ペルー、ロシアと続く。
- 日本における新地金の生産量は70tの横ばい推移が続いており、2019年のシェアは7.2%となった。
- この他、主にITOターゲットから再生される再生地金も市場に供給されている。一般的に、ITOターゲットはユーザーである成膜メーカーでガラスやフィルムにスパッタリングされるが、装置の制約などで実際に成膜されるのはターゲットの30%程度である。ITOターゲットメーカーは残り70%のターゲットを使用済み品として回収、精製した再生地金を再びターゲットとして供給する。そのため、ITOターゲット用途での新地金使用量はそれほど多くない。ITOターゲットメーカーにおける回収以外に、専業メーカーによってもITOターゲットの回収・再生がなされている。

表.3-2 インジウムの新地金世界生産量推移

(単位：t)

区分	2016年	2017年		2018年		2019年	
			前年比		前年比		前年比
中国	300	287	95.7%	300	104.5%	535	178.3%
韓国	210	225	107.1%	235	104.4%	225	95.7%
日本	70	70	100.0%	70	100.0%	70	100.0%
カナダ	71	67	94.4%	58	86.6%	61	105.2%
フランス	-	30	-	40	133.3%	40	100.0%
ベルギー	20	20	100.0%	22	110.0%	20	90.9%
ペルー	10	10	100.0%	11	110.0%	12	109.1%
ロシア	5	5	100.0%	5	100.0%	5	100.0%
合計	686	714	104.1%	741	103.8%	968	130.6%

出所：United States Geological Survey「Mineral Commodity Summaries」

(3) 日本の輸出入等の動向

- ・ 現在、日本は、インジウム全量を地金、亜鉛鉱石の形態で輸入している。また、輸入されるインジウムには海外に出荷されたITOターゲットの使用済返却分、ならびに海外工場で発生する工程内スクラップの回収分も含まれている。
- ・ 輸入相手国のうち、韓国、台湾、中国は ITOターゲットメーカーの海外拠点の後処理工場から回収されたスクラップや、ユーザーから回収された使用済ターゲットが中心であり、カナダ、米国、英国からは新地金が入ってくる。カナダには資源大手で世界最大級の亜鉛メーカーであるTeck Resources Limited があり、副産物としてインジウムを生産している。
- ・ 最大の輸入相手国である韓国からの輸入量は、ターゲットメーカーの海外拠点の後処理工場やユーザーからのITOターゲット回収量が縮小したことなどにより2016年まで低水準で増減していたが、2017年に回復基調へと転じた。中国からの輸入量も投機ブームの終了とともに2015年から増加傾向にあった。しかしながら、2019年はITOターゲットの在庫過多を背景に、両国からの輸入は激減した。

表.3-3 インジウムの輸入量推移

8112.92100 塊、くず及び粉 インジウムのもの

輸入				単位 : t
国名	2016年	2017年	2018年	2019年
韓国	84	204	327	186
中国	50	78	113	35
台湾	26	31	30	27
フランス	1	7	22	8
カナダ	30	36	20	27
英国	0	0	2	0
その他	1	1	1	1
合計	193	356	515	286
(韓国依存度)	43.5%	57.3%	63.5%	65.0%

出所：財務省貿易統計

(3) 日本の輸出入等の動向

- 2006年に国内で唯一亜鉛鉱石からインジウムを生産していた日鉱金属（現JX金属）が、豊羽鉱山を閉山した。以降、純粋な国内産のインジウムは無くなり、輸入亜鉛鉱石等からの副産物生産のみとなった。国内において亜鉛鉱石からインジウムを生産している企業はDOWAメタルマイン1社であり、生産量は70tの横ばいで推移している。それ以外は、輸入やリサイクルによる再生地金として供給されており、2019年の供給量は888t（前年比75.9%）となった。在庫過多に陥ったことなどから新地金及びスクラップの輸入量が286t（同55.5%）と大きく減少したほか、再生地金生産量も532t（同90.8%）と落ち込んだ。
- インジウムの2019年の国内需要は729t（前年比90.3%）と、FPD市場の世界的な調整局面の影響を受けたITOターゲットの需要の落ち込みによって前年割れとなった。世界需要に対する国内需要の比率は2019年で52.9%。インジウムの主力用途であるITOターゲット市場において国内企業が高いシェアを有しており、韓国企業の参入により競争が激化する傾向にあるものの、日本はインジウムの主要消費国の座を維持している。なお、輸出（塊・粉・くず）は、貿易統計上41t（2019年）であるが、インジウムのほかバナジウム、ガリウム、ハフニウム等を含んでいるためインジウムとしては不明である。

表.3-4 インジウムの国内需給推移

（単位：t）

（単位：％）

区分			2016年	2017年		2018年		2019年	
					前年比		前年比		前年比
供給	国内生産（新地金）※1		70	70	100.0%	70	100.0%	70	100.0%
	輸入※2		193	356	184.5%	515	144.7%	286	55.5%
	国内再生 地金※3	ITOターゲット	508	523	103.0%	541	103.5%	487	90.0%
		その他	41	44	106.2%	44	100.9%	45	100.9%
		小計	549	567	103.2%	586	103.3%	532	90.8%
	合計		812	993	122.3%	1,171	117.9%	888	75.9%
需要	ITOターゲット※4		569	626	110.0%	670	107.0%	589	87.9%
	その他※4		132	136	103.0%	137	100.7%	140	102.2%
	輸出		－	－	－	－	－	－	－
	合計		701	762	108.7%	807	105.9%	729	90.3%

出所

※1：United States Geological Survey「Mineral Commodity Summaries」の日本生産分

※2：財務省貿易統計、※3：工業レアメタル（No.136 2020）「世界のインジウム需要推定」をもとに推計

※4：工業レアメタル2020（No.136 2020）

(4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向

- インジウムに関して生産・輸出管理関連の政策で触れられる機会が減っている。全国鉱物資源計画（2008～2015）では「インジウム等レアメタル鉱産に対する保護を強化し、インジウムの戦略的備蓄を行う」と記載していたが、全国鉱物資源計画（2016～2020）では、「レアメタル鉱産の戦略的備蓄を行う」とインジウムという文言が削除された。また、2017年にはインジウムの輸出割当制度が廃止されている。
- 市況低迷や環境規制強化などを背景に中小企業が淘汰され、インジウムの生産が大手企業へ集約されたことも背景にあるものとみられる。

（生産管理関連政策）

- ✓ 「中華人民共和国鉱産資源法」の対象鉱種となっており、鉱産資源探査許可証と採掘許可証の取得が義務付けられている。また、全国鉱物資源計画（2008～2015）では「インジウム等レアメタル鉱産に対する保護を強化し、インジウムの戦略的備蓄を行う」と記載していたが、全国鉱物資源計画（2016～2020）では、「レアメタル鉱産の戦略的備蓄を行う」とインジウムという文言が削除されている。業界の中では、レアアース輸出制限政策で諸外国から批判されたことを受け、インジウムの生産制限を敢えて明言しない狙いがあるとされる（ただし、実際に輸出を制限するような動きがほぼなくなったともされる）。

（輸出管理関連政策）

- ✓ 2007年3月、中国商務部では「インジウム・モリブデン輸出許可証申込標準と申込手順」を発表し、初めてインジウム輸出時にライセンスが必要であることが規定された。しかし、その後、2017年にインジウムの輸出割当制度は廃止されている。また、インジウムの輸出関税についても、近年は引き下げの方向が採られている。

（産業育成関連政策、他）

- ✓ 市況低迷（民間非鉄金属取引所の破綻とそれに伴う在庫問題）、環境規制強化などを背景に中小企業が淘汰され、インジウムの生産は資金力、技術力、大規模を有する大手企業への集中が進んでいる。
- ✓ 2020年9月に施行された「資源税法」では、インジウムの税率は2～10%に設定されているが、他鉱種と同様に免除・控除条件が付記されていることから、「資源税」の適用は、産業の集約化をさらに加速化させる可能性があると見られている。

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

ITOターゲット

概要

ITOターゲットはスパッタリング法によって薄膜形成を行うための材料であり、酸化インジウム (In_2O_3) と酸化スズ (SnO_2) によって構成されている。標準的なITOターゲットの純度は99.99%で、Fe、Ni、Cr、Cu、Siの合計は100ppm未満となる。形状として、円盤状や角板状に仕上げたプレーナー型、円筒形のロータリー型がある。

製造方法

酸化In粉末と酸化Sn粉末とを混合し（通常9：1程度）、得られた混合粉末（プレミックス粉体）を加圧成形後、焼結を行ったのち、バックングプレートにボンディングしてITOターゲットとなる。ITOターゲットは組成（純度、Sn量、O量、添加物など）、相対密度、組織構造（Sn原子の分散状態等）の調整が特性向上に有効である。スパッタリングターゲットメーカー各社はこうした膜質向上が可能なITOターゲットの作り込みを行うほか、ITO焼結体原料としての酸化In粉末の物性（ITO焼結体及びスパッタ後のITO膜の性能に大きく影響する）や、酸化Inの充填性の調整（充填性が低いとプレミックス粉体の圧縮度が低くなるため加圧成形した際に固まりにくくなることで、ITO焼結体にピンホールが生じてしまう）などに配慮して製造している。

用途

ITO薄膜は3.7eVのワイドバンドギャップを有するn型半導体であり、①導電性が高い、②高い可視光透過率を持つ、③酸を用いた微細加工性に優れるといった特徴を有する。ITO薄膜の形成方法は、スプレー熱分解法、CVD法等の化学的成膜法と、電子ビーム蒸着法、スパッタリング法等の物理的成膜法に大別される。中でもスパッタリング法は大面積均一成膜が可能で、かつ高性能の膜が得られる成膜法であることから、FPDや太陽電池などの透明電極の形成ラインで多用されている。FPDには液晶ディスプレイ、有機ELディスプレイ、電子ペーパーなどがあり、TVやタブレット、スマートフォンなどに搭載されている。FPD用の透明電極は、TFTアレイ側とカラーフィルター（CF）側の2箇所ある。CF用はラフでも問題ないが、TFTアレイ側は厚み等に対する要求が厳しい。太陽電池向けでは主に有機系（色素増感、有機薄膜）や有機無機ハイブリッド型（ペロブスカイト）の透明電極として使用されている。

プレイヤー

JX金属、三井金属鉱業、東ソー、アルバック、Vital Thin Film Materials（中国）
Guangxi Crystal Union Photoelectric Materials（中国）、Wuhu yingri Technology（中国）、他

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● InPウエハ

概要

リン化インジウム (InP) はインジウム (In) とリン (P) からなるⅢ-V族化合物半導体であり、常温で安定な閃亜鉛鉱型の結晶構造をもつ。分子量 145.79、融点1062°C、比重4.81であり、金属様の外観を持ち、酸に僅かに溶ける。半導体材料としては1.35eVのバンドギャップを有し、高電界(10^4 v/cm附近)における電子移動度ならびに耐放射線が高いことが特徴である。インターネット通信の伝送情報量を飛躍的に拡大した高密度波長多重 (DWDM) 方式の普及に伴い、光ファイバー通信のキーデバイス材料として注目されている。

製造方法

化合物半導体基板技術は、結晶原料、結晶成長、熱処理、加工、基板と大きく5つに分けられ、なかでも結晶成長 (液相成長、気相成長) の技術開発が進んだ。インジウムリンは、液相成長のLEC法 (Liquid Encapsulated Czochralski : 液体封止引上法) やボート法によって単結晶成長が行われる。LEC法とは、るつぼに結晶原料と封止剤をチャージし、成長炉を加熱して原料を溶液とする。種結晶を取り付けた引上軸を原料溶液につけて引き上げることによって結晶成長させインゴットを得るものである。ボート法は溶融化した原料をルツボの中で固化させ単結晶化する成長法である。ボート法にはHB (Horizontal Bridgeman) 法、VB (Vertical Bridgeman) 法、VGF (Vertical Gradient Freezing) 法等がある。こうした製法で得られた単結晶インゴットを2~4インチのウエハーサイズにスライスして使用する。

用途

主力用途は、光ファイバ通信に用いられる半導体レーザ (LD) や発光ダイオード (LED) などの発光素子、及びフォトダイオード (PD) などの受光素子であり、需要の大部分がLD向けとなっている。石英ファイバーの伝送損失の小さい波長域 (1.3 μ m、1.55 μ m) の発光、受光にインジウムリン系の材料が最適とされている。近年はインターネット・トラフィックの増大が続き、光ファイバーへの投資が増えていることから、インジウムリンの需要も拡大傾向にある。この他、赤外線検出器、放射線検出器などに使用されているほか、高電子移動度トランジスタの開発が進んでいる。

プレイヤー

住友電気工業、JX金属、AXT (米国)、等

(6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- 新地金原料・新地金の輸入依存や副産物ゆえの調達リスクを回収再利用の取り組みでカバー
- 透明電極向けに様々な代替素材の開発が進むも、ITOターゲットの牙城を崩せず

(ITOターゲット、InPの原料調達面)

- ✓ 新地金の国内生産は例年70tで需要をカバーできないため、輸入に依存する傾向にある。一方、新地金を生産する企業は、日本（DOWAメタルマイン）以外にも韓国（Korea Zinc等）、欧米（Teck Resources、Indium Corporation等）に多数存在する（この他、中国企業では約15社が輸出ライセンス保有）。現段階で、新地金の調達に問題は生じていない。

(回収再利用の取り組み)

- ✓ ITOターゲットは、回収再利用が確立されている。ITOターゲットメーカーが使用済みターゲットをFPDメーカーから回収、ITOターゲット製造時に発生するスクラップとともに再度ターゲット原料として利用する。こうした取り組みが、原料の安定調達に大きく貢献している。TVやパソコンなど最終製品からのインジウムの回収再使用は行われていないが、近年はスパッタ装置に付着するITOを回収し、再利用しようという動きがある。
- ✓ InPにおいても工程内で発生するスクラップが回収再利用されている。一方、廃製品を対象した回収再利用は行われていない。

(代替素材の開発状況)

- ✓ 数十年にわたり、ITOターゲットの代替を目指した透明電極用素材の開発が行われている。SnO₂系のATO(SnO₂:Sb)、FTO(SnO₂:F)、ZnO系のAZO(ZnO:Al)、GZO(ZnO:Ga)、銀ナノワイヤー、銀や銅、銀塩などを使用したメタルメッシュ、導電性高分子（PEDOT-PSS）、CNT、グラフェンなどが既に実用化されている。
- ✓ ただし、抵抗率と可視光透過率のバランス、耐薬品性、耐熱性、エッチング加工性などの点で、ITOターゲットを完全に置き換えるまでには至っていない。

(7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- FPDの主要生産国が中国にシフトしている。ITOターゲット市場においては、中国企業の技術向上と中国政府の後押しにより、日本企業の競争力低下の懸念がある。
- 中国・Vital社が落札した中国投機在庫の市場流入が、インジウム地金の価格変動につながる可能性がある。

(原料)

(素材)

(製品・用途)

亜鉛鉱石

インジウム地金

ITOターゲット
InPウエハ

FPD
受発光素子

課題・リスク

—

● 価格の変動

中国の投機ブームは一段落したものの、中国・Vital社が落札した中国投機在庫の市場流入による価格変動が懸念材料となっている。

● 需要に応じた供給量のコントロール

主に亜鉛製錬の副産物として回収されるため、亜鉛等の需給・価格に生産が左右されてしまう。

● ITOターゲット：日本企業の競争力低下の懸念

中国産ITOターゲットの品質が高まる傾向にあるほか、中国のFPDメーカーが政府の支援を受けて中国産ITOターゲットの採用を拡大している。そのため、今後は日本企業の競争力低下が懸念される。

● InPウエハ

参入企業はJX金属、住友電工、AXT（米国）の3社で、日本企業が高い市場シェアを有する。中国企業とは技術力に差があり、現段階で課題、リスクは見当たらない。

● FPD：主要生産国の変化

世界各地の巣ごもり需要の恩恵を受け、テレビやモニター向けFPDの需要が堅調。ただし、FPDの主要生産国が韓国・台湾から中国にシフトしている。

● 受発光素子

インターネット・トラフィックの増大が続き、光ファイバーへの投資が増えていることから、リン化インジウムの需要も拡大傾向にある。日本企業においては現在の高い市場シェアの維持が重要である。

対応策

—

● 回収再利用の継続的な取り組み

使用済みターゲットや工程内で発生するスクラップを中心とした回収再利用の取り組みを継続させる。

● ITOターゲット：価格競争力の強化

中国ITOメーカーの価格競争力の源泉は電気代、人件費、環境対策コストなどである。

—

04. フッ素（F）

- （１）概要
- （２）世界需要・供給
- （３）日本の輸出入等の動向
- （４）主要国（中国）における生産・輸出管理動向
- （５）エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- （６）国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- （７）サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

(1) 概要

- フッ素は、天然に存在する元素のひとつで、ハロゲン族に分類される。フッ素は反応性がきわめて強いことから、この特性を活かし、様々な化合物が製造されている。
- 工業的に使用されるフッ素（フッ化物）は、フッ化カルシウム(CaF_2)を主成分とする蛍石から製造される。蛍石は CaF_2 含有量が97%以下の冶金・セラミックグレードの塊鉱と、97%を超えるアシッドグレードに分けられる。
- このうち、冶金・セラミックグレードは、製鉄分野で転炉や電炉の融剤として使用されることが多い。一方、アシッドグレードは、粉碎・浮遊選鉱等により CaF_2 含有量を 97%超にした粉末である。主にフッ化水素酸の原料として使用されておりこのフッ化水素酸を基に各種のフルオロカーボン類やフッ素樹脂の中間原料、その他フッ化物が製造されている。
- フッ化水素酸の最大の用途はフルオロカーボン類となる。フルオロカーบอนはフッ素で置換されている炭化水素の総称で、冷媒（カーエアコン、家庭用・業務用エアコン、冷蔵庫、冷凍機等）や発泡剤（断熱材、緩衝材等）、洗浄剤（精密部品、電子部品等）、噴射剤（エアゾール等）として様々な分野で使われているほか、半導体エッチング剤として各種のフルオロカーボン系ガスが使用されている。
- 半導体や液晶の製造工程で使用されるドライエッチングやチャンバークリーニング用のフッ素系ガスとしては、半導体、液晶の幅広い工程で使用される三フッ化窒素 (NF_3) をはじめ、トリフルオロメタン (CH_3F) やフルオロメタン (CHF_3)、ヘキサフルオロメタン1,3ブタジエン (C_4F_6)、オクタフルオロシクロブタン (C_4F_8)、ヘキサフルオロメタン (C_2F_6) 等のフルオロカーボン系ガスが挙げられる。また、用途は異なるものの、六フッ化タングステン (WF_6) が半導体配線材料（タングステン）の成膜ガスとして使用されている。
- さらに、半導体や太陽電池の製造工程では、シリコンウエハのウェットエッチングやウェット洗浄に、フッ化水素酸を極めて高いレベルまで高純度化した、高純度フッ化水素酸が使用される。半導体や液晶の製造プロセスでは、微細化や高機能化の進展に伴い、洗浄工程が増える傾向にあるが、中でも、高純度フッ化水素酸を用いた希フッ酸洗浄（酸化膜除去等も兼ねる）は、現在の多段洗浄工程の最終洗浄に用いられ、半導体ウェットエッチングの中でも特に高いクリーン度が要求される。

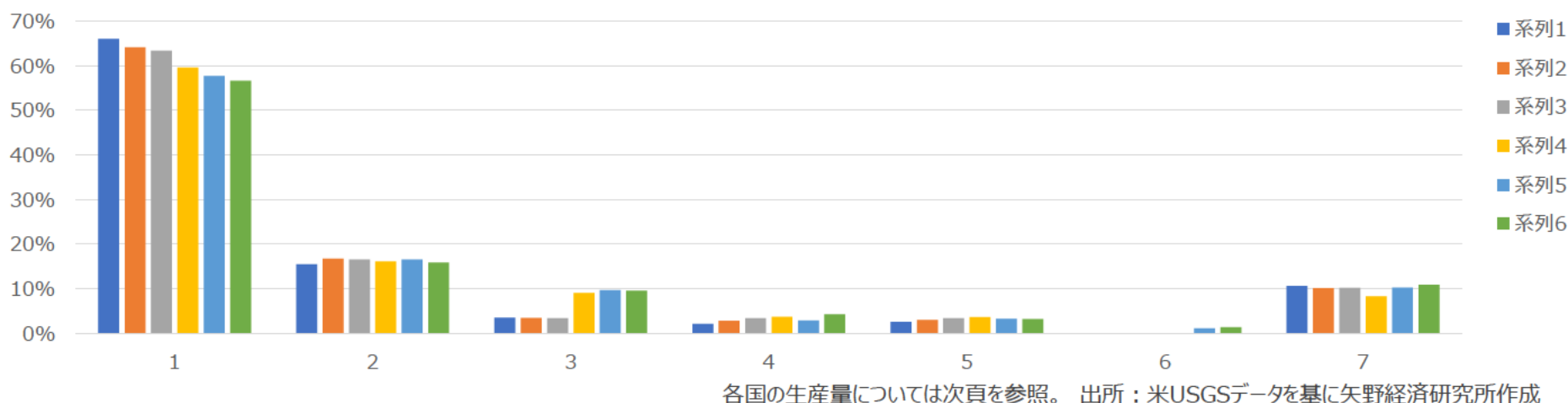
(2) 世界需要・供給

【世界供給】

2020年は南アフリカ、カナダでの新規鉱山立ち上げに伴い、蛍石の生産量は増加。

中国や米国ではフルオロケイ酸（FSA）を原料とするフッ化水素酸プロジェクトが動き出すも、当面はコスト面等から蛍石に置き換わるような動きにはつながらないとみられる。

図.4-1 蛍石生産量における主要国のシェア推移（2015～2020e）



- ✓ 2020年の世界の蛍石の生産量（ CaF_2 純分）は7,460千tであった。新型コロナウイルス感染症の影響もあり、需要自体は減少したものの、南アフリカ、カナダでの新規鉱山の立ち上げに伴い増加したと見られている。
- ✓ 蛍石の世界生産量の過半（2019年時点で57.6%のシェア）を占める中国の生産量はここ数年減少傾向にある。近年、環境基準の厳格化を背景に小規模な鉱山を中心に閉鎖が相次いだことが背景にあるとみられる。
- ✓ また、最近の動きとして、リン酸肥料生産の際に副産するフルオロケイ酸（FSA）を用い無水フッ化水素酸を製造するプロジェクトが中国や米国等で進められている。しかし、資本コスト及び処理コスト面でまだ制約があることに加え、エレクトロニクス等の高純度が要求される分野では品質の異なる原料を使用することへの警戒感があるため、当面は蛍石に置き換わるような動きにはつながらないとみられている。

※フルオロケイ酸（FSA）を用いたフッ化水素酸（HF）プロジェクト

仏アルケマが、カナダ農薬会社Nutrienとパートナーシップを締結し、リン酸肥料の生産から回収したフルオロケイ酸（FSA）を用い、無水フッ化水素酸を製造するプラント（4万t/年）を米ノースカロライナ州に建設することを発表（2020年6月）。2022年の操業開始を計画。生産した無水フッ化水素酸はポリマー（ポリフッ化ビニリデン）及びフルオロ誘導体、フルオログラス（R-32）の生産に使用することも明らかにしている。

(2) 世界需要・供給

表.4-1 世界の蛍石（CaF₂純分）生産量

単位：千t

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020e	20/19比	構成比
中国	4,200	4,000	3,800	4,400	3,800	3,800	4,000	4,300	4,300	100.0%	57.6%
メキシコ	1,240	1,210	1,110	1,030	988	990	1,080	1,230	1,200	97.6%	16.5%
モンゴル	480	240	370	231	202	200	605	718	720	100.3%	9.6%
南ア	170	158	285	135	165	200	242	210	320	152.4%	2.8%
ベトナム	-	-	38	168	175	200	239	238	240	100.8%	3.2%
カザフスタン	65	108	110	110	110	110	-	88	77	87.5%	1.2%
スペイン	107	103	103	98	130	130	145	139	140	100.7%	1.9%
モロッコ	79	81	75	79	70	70	65	88	88	100.0%	1.2%
ドイツ	54	49	60	40	50	50	45	50	50	100.0%	0.7%
イラン	80	85	90	80	40	40	70	55	55	100.0%	0.7%
カナダ	-	-	-	-	-	-	-	80	100	125.0%	1.1%
パキスタン	-	-	-	-	-	-	-	100	100	100.0%	1.3%
その他	405	346	349	299	200	210	229	164	210	128.0%	2.2%
合計	6,880	6,380	6,390	6,670	5,930	6,000	6,720	7,460	7,600	101.9%	100.0%
F純分換算（48.7%）	3,348	3,105	3,110	3,246	2,886	2,920	3,270	3,631	3,699	101.9%	

出所：United States Geological Survey「Mineral Commodity Summaries Fluorspar」World Mine Production

- ✓ マテリアルベースでの生産量を掲出。構成比は2019年数値より算出。
- ✓ USGSによると、中国の生産量は政府発表値。また、同レポートの但し書きにて、中国非金属鉱物産業協会（CHINA NON-METALLIC MINERALS INDUSTRY ASSOCIATION）が実際の生産量をおよそ600万tと推計していると記載している。

(3) 日本の輸出入等の動向

- エレクトロニクス関連用途の原料ともなるフッ化水素酸は、蛍石（アシッドグレード）を輸入し国内で製造するケースと輸入フッ化水素酸を利用するケースがあるが、現在は輸入フッ化水素酸を利用するケースが圧倒的に多く、純分換算（蛍石：47.5%、輸入フッ化水素酸：95%）した輸入量の比較では、蛍石2：フッ化水素酸8の割合となる。
- 近年、コスト、品質の面から輸入フッ化水素酸における中国依存度（数量ベース）はほぼ100%の状態が続いている。

表.4-2 蛍石およびフッ化水素酸の輸入状況

2529.22000 ほたる石（アシッドグレード）

輸入					単位：t
国名	2017年	2018年	2019年	2020年	20/19
中国	28,989	58,234	53,629	37,044	69.1%
ベトナム	16,461	26,483	26,055	-	
モロッコ	-	-	-	189	
モンゴル	591	416	410	102	
ドイツ	10	14	6	3	
合計	46,051	85,147	80,100	37,338	46.6%
中国依存度(数量ベース)	62.9%	68.4%	67.0%	99.2%	

2811.11000 ふっ化水素（フッ化水素酸）

輸入					単位：kg
国名	2017年	2018年	2019年	2020年	20/19
中国	101,530,680	111,725,336	92,933,722	73,481,500	79.1%
台湾	722,000	228,000	399,000	266,000	66.7%
ドイツ	-	35,620	236,920	325,475	137.4%
スペイン	-	19,600	98,000	76,800	78.4%
インド	-	-	23,000	72,770	316.4%
韓国	-	-	4,020	9,480	235.8%
メキシコ	19,994	19,967	-	-	
合計	102,272,674	112,028,523	93,694,662	74,249,625	79.2%
中国依存度(数量ベース)	99.3%	99.7%	99.2%	99.0%	

出所：財務省貿易統計

(3) 日本の輸出入等の動向

- フッ化水素酸の輸出状況は、対韓輸出管理が厳格化された2019年7月を境に様相が一変している。高純度フッ化水素酸に関しては2019年11月以降、韓国への輸出に許可が出されるようになったが、韓国企業による国産化の動きもあり、2020年の対韓国輸出は2019年比で25.0%と大きく縮小している。

表.4-3 フッ化水素酸の輸出状況

2811.11000 ふつ化水素（フッ化水素酸）

輸出					単位：kg
国名	2017年	2018年	2019年	2020年	20/19
韓国	29,057,640	36,823,964	19,793,573	4,950,085	25.0%
米国	842,621	938,276	1,647,393	2,028,235	123.1%
台湾	56,750	1,395,562	2,172,993	1,621,399	74.6%
中国	103,640	338,861	693,200	849,363	122.5%
インドネシア	69,750	84,210	100,000	111,620	111.6%
ドイツ	35,524	12,617	26,573	52,822	198.8%
シンガポール	72,094	126,123	126,200	556	0.4%
マレーシア	242	99	102	96	94.1%
英国	18	30	15	24	160.0%
合計	30,238,279	39,719,742	24,560,064	9,614,200	39.1%

2811.11000 ふつ化水素（フッ化水素酸）

輸出					単位：千円
国名	2017年	2018年	2019年	2020年	20/19
韓国	4,708,318	7,490,763	4,503,807	1,280,834	28.4%
米国	208,585	235,758	419,216	482,518	115.1%
台湾	129,513	434,671	646,178	560,414	86.7%
中国	141,310	155,895	261,929	343,848	131.3%
インドネシア	12,520	19,777	22,622	35,575	157.3%
ドイツ	10,731	12,905	8,771	16,542	188.6%
シンガポール	18,411	32,062	32,214	14,037	43.6%
マレーシア	7,363	4,167	3,942	3,515	89.2%
英国	708	1,180	601	985	163.9%
合計	5,237,459	8,387,178	5,899,591	2,738,268	46.4%

韓国シェア（数量ベース） 96.1% 92.7% 80.6% 51.5%

(4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向

- WTO裁定を受け、蛍石の輸出税を廃止した2012年以降、蛍石の生産・輸出管理に係る明確な政策は打ち出されていないが、環境規制の強化等を通じ、資源保護、産業集約化を推進。その結果、中国における蛍石鉱山の数は大幅に減少したとされる。

（生産管理関連政策）

- ✓ 蛍石の全国生産量は減少傾向にあるとされるが、WTOの裁定を受け、蛍石の輸出税を廃止した2012年以降は採掘総量制御指標を公表していない。

（輸出管理関連政策）

- ✓ 蛍石の輸出税を廃止した2012年12月の発表以降、輸出管理に係る政策は特に発表されていない。

（産業育成関連政策、他）

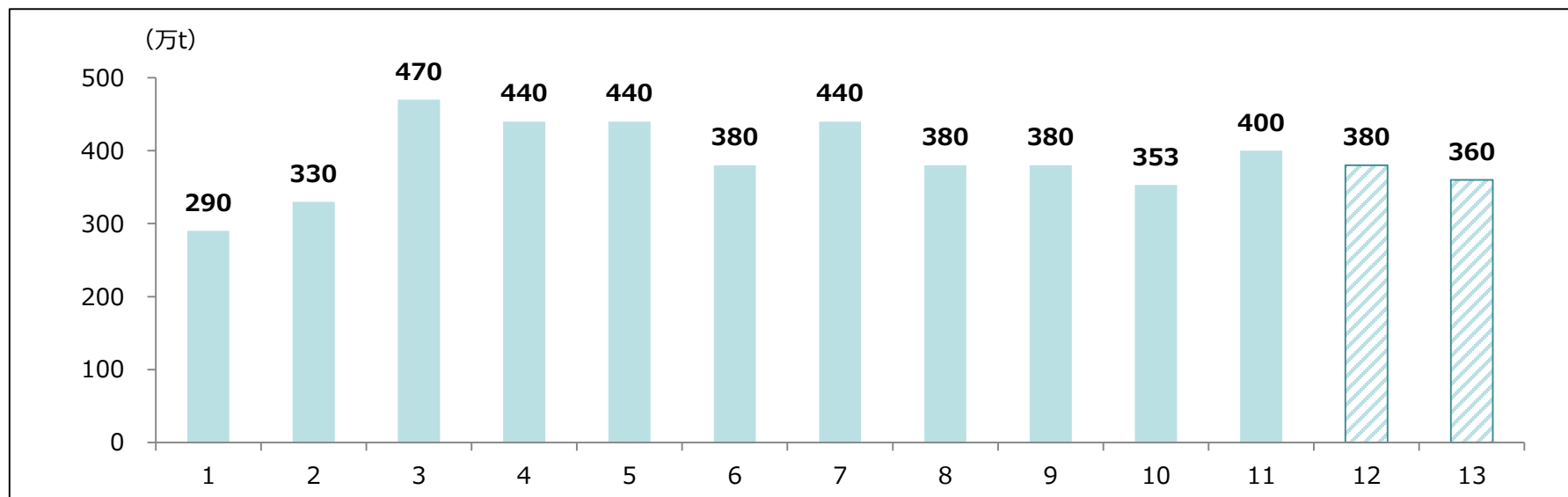
- ✓ 中国フッ素化学工業「第十三次五年」発展計画（2016年4月）にて、中・低品位蛍石の採掘・選鉱・利用の奨励、蛍石資源の持続的発展可能な管理制度の徹底、蛍石に対する総量制御制度の厳格化、蛍石の輸入提唱などが掲げられた。
- ✓ また、同年に発表した全国鉱物資源計画（2016～2020）において蛍石を戦略的鉱産リストに追加された。
- ✓ さらに、2020年9月には重慶市での蛍石を含む非金属鉱種の高度加工化の推進を盛り込んだ「西部地域奨励類製品リスト」を公表している。なお、2020年9月より施行された「資源税法」では、蛍石に対し、資源税率を1%～8%を設定。徴収対象を精鉱又は選鉱としている。

② 中国におけるフッ素の生産・開発概況

【蛍石】

近年、中国における蛍石の生産量は400万t前後で推移している。業界参入基準の策定による生産能力の安定化（小規模な採掘企業や生産技術が遅れている企業などの淘汰による蛍石業界の再編）、環境基準の厳格化による一部鉱山の休業や閉鎖、新規採掘許可証の交付停止などを考慮すると、今後生産量が増加する見込みは低いとみられる。

表.4-4 中国における蛍石の生産量推移



出所：各種公開情報を基に矢野経済研究所作成

② 中国におけるフッ素の生産・開発概況

【無水フッ化水素酸】

- ✓ 中国における無水フッ化水素酸の年間生産能力は215万t、生産量は159万t（2019年）。
- ✓ 主な生産企業は53社。そのうち、年間生産能力が5万tを超える企業は15社程度とみられる。
中国の無水フッ化水素酸の用途別構成比を2018年消費量ベースからみると、フッ素系冷媒は56%、フッ素樹脂は24%、フッ素系ファインケミカルは8%、無機フッ素は6%となる。
- ✓ 2018年における中国の無水フッ化水素酸の輸出量は25.9万t、輸入量は0.06万tであった。

表.4-5 主な無水フッ化水素酸生産企業

社名	無水フッ化水素酸 生産能力（万t/年）	その他
浙江三美化工股份有限公司	13.1	自消用がメイン（フッ素系冷媒などを生産）。
青海西鋤同鑫化工有限公司	10	3号・4号生産ラインは2020年4月稼働。
貴州瓮福藍天氟化工股份有限公司	12	一部を自消。
内蒙古東岳金峰氟化工有限公司	12	山東東岳化工有限公司と赤峰金峰銅業有限公司の共同出資会社。無水フッ化水素酸の生産能力12万t/年（生産ライン4本）を計画。2020年12月頃より一部設備（9万t/年）の試運転を開始。
浙江永和製冷股份有限公司	8.5	関連会社である内蒙古永和氟化工有限公司が5万t/年、内蒙古華生氫氟酸有限公司が3.5万t/年。また、同社は梅蘭化工集团有限公司、山東東岳化工有限公司などにも無水フッ化水素酸を供給している。
多氟多化工股份有限公司	8	自消用がメイン。
福建省邵武市永飛化工有限公司	6.7	一部を自消。
山山東東岳化工有限公司	6	ほぼ自消用。
邵武華新化工有限公司	3	一部を自消。無水フッ化水素酸は2万t/年の能力を保有している。また、関連会社の金塘氟化学分公司は電子部品製造向けフッ化水素酸1万t/年、産業向けフッ化水素酸100t/年の設備を有している。

出所：各種公開情報を基に矢野経済研究所作成

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 高純度フッ化水素酸

概要

高純度フッ化水素酸とは、ELグレード（12Nグレード）と言われる電子部品向けの製品である。半導体製造工程では、50%フッ化水素酸及びバッファードフッ化水素酸（フッ化水素酸とフッ化アンモニウム溶液の混合水溶液）の2種が主に利用されている。

また、55%フッ化水素酸が、LCD 用ガラスのスリミング（薄化）及びステンレスの洗浄用に利用されている。ガラススリミング用途では高濃度の工業用フッ化水素酸を購入し、使用者側で希釈して使う例が増えている。数年前まで好調の兆しを見せていたスリミング需要は LCD の海外生産へのシフトとディスプレイの有機 EL へのシフトのため減少傾向へと変化している。一方、ステンレスの洗浄用では、半導体メーカーが製造工程で使用した高純度フッ化水素酸の使用済薬液をステンレスメーカーが引き取り、使用しているケースも少なくないが、引取量はステンレスメーカーの稼働に依存する。

用途

主な用途は半導体及び太陽電池製造におけるシリコンウェーハのウェットエッチングやウェット洗浄であり、特に最先端プロセスでの需要が大きいため、主要アプリケーションは3D NANDフラッシュ、DRAMとなる。また、ロジック半導体プロセスでも使用されるが、最先端プロセス（14nm以下）を保有している半導体メーカー自体に限られる。長期契約というわけではないが、一度供給をし出すと安定供給という面からもあまりサプライヤー変更されない。また、製造プロセス・ラインとの相性もあるとされる。

プレイヤー

12N以上の高純度フッ化水素酸のサプライヤーとしては、ステラケミファ、森田化学、ダイキンといった国内メーカーが大きなシェアを有しているが、台湾ではローカル系の僑力化工（サンリット・フルオロケミカル）、Formosa Daikin（ダイキンとの合併）が実績を有しているほか、最近になって、韓国メーカーのソウルブレインが国産化を実現している。その他、Solvayといった欧米系のメーカーもあるが、それほど積極的な動きを見せているわけではないようだ。

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 半導体液晶製造用特殊ガス

概要

半導体や液晶の製造工程では、エッチングやチャンバーのクリーニングに各種のフッ素系ガスが使用されている。主なフッ素系ガスとしては、半導体、液晶の幅広い分野で使用される三フッ化窒素 (NF_3)、トリフルオロメタン (CHF_3) をはじめ、フルオロメタン (CHF_3)、ヘキサフルオロメタン1,3ブタジエン (C_4F_6)、オクタフルオロシクロブタン (C_4F_8)、ヘキサフルオロメタン (C_2F_6) 等のフルオロカーボン系ガスが挙げられる。また、六フッ化タングステン (WF_6) が半導体配線材料 (タングステン) の成膜ガスとして使用されている。

これら半導体液晶製造用に使用されるフッ素系ガスは、環境規制 (モントリオール議定書) はもとより、半導体構造やプロセス技術 (成膜装置やエッチング装置) の進化によってもガス種が変化する。

最近では積層化 (3D NANDフラッシュ等) で使用量が増加しているヘキサフルオロメタン1,3ブタジエン (C_4F_6)、フルオロメタン (CHF_3)、オクタフルオロシクロブタン (C_4F_8) や、半導体配線材料向けに需要が急増している六フッ化タングステン (WF_6) が注目されている。

※なお、半導体液晶製造用特殊ガスとしては、フッ素系ガスだけでなく、塩素系や窒素系等のガスもある。

用途

半導体液晶製造 (エッチング、チャンバークリーニング)、半導体配線材料

- ✓ 多層化による使用量増加や設備投資の拡大等により、半導体製造用の市場が拡大基調にある。一方、液晶ディスプレイは需要の飽和や中国への一極集中 (韓国勢が撤退) が顕著となってきており、大幅な需要増は見込みにくくなっている。
- ✓ 半導体の製造という点では韓国・中国・台湾がメイン市場。特に3D NANDフラッシュでの需要増を背景にメモリ用途の割合が高まっている。

プレイヤー

半導体液晶製造用のフッ素系ガスでは、関東電化工業、昭和電工、三井化学、セントラル硝子、SK Materials (韓国)、Hyosung (韓国)、PERIC (中国)、Versum Materials (米国) などがしのぎを削っている。企業によって、得意とするガス種、製造技術がまちまちのため、OEMやJV等のケースもある。また、同様にガス種や製法によって中間原料が異なる場合もみられるが、基本的にはフッ化水素酸をフッ素源として用いているものとみられる。

(6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- 高純度フッ化水素酸や半導体液晶製造用特殊ガスの国内メーカーは、主に中国から輸入された無水フッ化水素酸を原料として調達している。最近では、BCPの観点から中国外のソースを一定程度使用するメーカーも出てきているが、価格、品質に加え、安定供給という点で、中国産に勝るものはないとの声も多く聞かれた。
- フッ化水素酸は、長期間貯蔵することが設備面等で難しいため、定期的に購入する必要がある。サプライヤーサイドでは多少の在庫を保有しているとされるが、それでも仮にサプライヤーから供給が止まった場合、数ヶ月も工場の稼働を維持することは難しいとされる。そのため、原料調達面でのリスク対策として、中国での現地生産という選択肢も無視できないものになっている。

(無水フッ化水素酸)

- ✓ 値段や供給量の安定度の点から中国産が優れているとの見方は強く、基本的には中国に依存する構造にある。
- ✓ しかし、近年はBCPの観点から中国外のソースを模索する動きが広がっており、メキシコや欧州が有力なソースになってきている様子が伺えた。また、国産の無水フッ化水素酸を最近になって購入し出したケースもあるようだ。
- ✓ それ以外にも、ベトナムやインドも候補として挙げられるが、ベトナム産の無水フッ化水素酸の生産枠は既に長期契約で埋まっており、新規の調達が難しい状況にあるとされる。また、インドは原料を中国に頼っているため、中国以外のソースとは位置付けにくい面がある。
- ✓ また、現在進められている無水フッ化水素酸の国産化プロジェクトについて、将来の安定調達先になりうると期待が示される一方、国内の供給者は値段、品質の両面で大きな課題があるとの厳しい見方も見られた。
- ✓ なお、韓国に関しても、一部で国産化を進められているものの、中国からの輸入無水フッ酸に依存しているとされる。

(フッ化水素酸の回収・リサイクル)

- ✓ リサイクル技術自体はあるが、コスト面で割に合わないため、ほぼ進んでいないとされる。

(7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- 半導体製造に係るフッ素関連製品（高純度フッ化水素酸、半導体製造用特殊ガス）においては、原料面だけでなく、事業環境面においてもチャイナ・リスクに晒されており、選択肢が徐々に狭まってきているような状況。
- 中国や韓国での現地生産化が徐々に進展する中、国内の供給基盤をどのように維持強化していくかが大きな課題。

	(原料)	(素材)		(製品・用途)
	蛍石	無水フッ化水素酸	高純度フッ化水素酸 半導体製造用特殊ガス	半導体
課題・リスク	● 中国のシェアは低下も、資源確保の動き 中国、環境規制を厳格化（資源保護）するとともに、蛍石の輸入ポジションを強化。	● 中国に供給面を依存 価格、品質、供給の安定度という点で中国産が極めて優位な状況。	● 中国・韓国メーカーによる国産化 韓国、台湾、中国と東アジアに大手ユーザーが集中する市場構造。メーカー間の競争が一層激化する見込み。	中国半導体市場は今後、超高純度フッ化水素酸が求められるような最先端プロセスへの投資が拡大する見込み。 ● 米中貿易摩擦（規制強化） ● 中国内製化（サプライチェーンの変化）
対応策	● ソースの多様化① カナダや南アフリカでの新規鉱山の立ち上げ	● 中国外のソース活用 メキシコ・欧州が有力なソースとして育ってきているとも ● 国産化プロジェクトの推進 価格・品質の両面で課題ありとの声が聞かれる ● ソースの多様化② フルオロケイ酸を用いたフッ化水素酸の製造（中国だけでなく、米国でもプロジェクトが進行）	● 中国等での現地生産化（地産地消） 技術流出のリスク	

① 高純度フッ化水素酸における課題・リスク

需要見通し 業界動向

- ✓ 2021年以降の需要見通しについて、2021年1～2Qあたりはデータセンタ関連の投資が比較的落ち着く可能性はあるが、5G関連の投資を含め、トレンドとしては拡大基調にあるため、今後も半導体市場はプラスで推移すると予想される。
- ✓ 中国半導体市場は今後、超高純度フッ化水素酸が求められるような最先端プロセスへの投資が拡大する見込み。米中対立の影響はあるものの、サプライヤーサイドとしてはポジティブな方向に向きつつあるとの見方も出てきている。

課題・リスク

● 中国での現地生産化という選択肢

仮に中国での超高純度フッ化水素酸の需要が相応の規模になった場合、超高純度フッ化水素酸の現地生産化も選択肢に挙がってくる可能性がある。中国での一貫生産というビジネスモデル自体は、中国から韓国に供給できる点を含め有効であるが、技術流出のリスクが一方で指摘される。

● 国内ステンレス市場の低迷が、使用済HFの処理コストアップにつながる懸念

液晶ガラス・スリミング用55%フッ酸は、有機ELの登場もあり、需要が縮小している。また、ステンレス洗浄用は半導体工場の使用済薬液をステンレスメーカーが再利用しているケースが相応に浸透している。しかし、ステンレスの国内市場は、コロナの影響もあり、低調に推移している。また、鉄鋼メーカーの合理化の波がステンレスにも押し寄せてくるとの見方は強く、ステンレスの国内生産量は今後減少していく方向にある。そのため、今後国内半導体工場での使用済フッ化水素酸の処理コストアップが懸念される（ステンレスメーカーが引き取ってくれなければ、産廃として処理しなければならなくなる）。

②半導体液晶製造用特殊ガスにおける課題・リスク

需要見通し 業界動向

- ✓ 半導体分野は3D NANDメモリの動向に依存するものの、多層化や設備投資拡大が牽引する見込み。一方、液晶ディスプレイは需要の飽和や中国への一極集中（韓国勢が撤退）が顕著となっており、大幅な需要増は見込みにくくなっている。ただし、液晶ディスプレイからOLEDへのシフトが進むことで、一時的に需要が高まる可能性があるとの指摘もある。
- ✓ また、微細化技術の進展の関連では、使用するガス種に大きな変化は見られないとされるが、EUVのシェア拡大によって、C₄F₈等の需要がさらに増加する方向との見解も見られた。
- ✓ いずれにしても、市場は半導体製造用を中心に拡大の方向にある。しかし、韓国（サムスン）、台湾（TSMC）、中国（YMTC）と東アジアに集中する市場構造であることから、メーカー間の競争が一層激化していくことが予想される。そうした中では、現地生産化が一層進んでいくことも想定される。

課題・リスク

● 中国における国産化の動き（楽観視できないとの見方）

これから中国市場の存在感が増していく見込み。マーケットが肥大化していく中で、中国も本格的に参入していく可能性がある。中国の半導体業界は米中の関係もあり、メモリに係る半導体材料の需要が、2021年から2022年にはそれなりに量がまとまってくる見込みではあるが、中国における国産化の動向については楽観視できないとの見方が示されている。

● 輸出管理体制の見直し

半導体液晶製造用特殊ガスの競争環境は今後厳しくなっていくことが予想される中、輸出管理体制の見直し等は、日本メーカーにとっても重要な経営課題となっているとの声が聞かれた。

05. ヘリウム (He)

- (1) 概要
- (2) 世界需要・供給
- (3) 日本の輸出入等の動向
- (4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向
- (5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- (6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- (7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク
- (参考資料) ヒアリング情報等

(1) 概要

- ヘリウムは、不活性で熱伝導率が高く、あらゆるガスの中で最も沸点が低いという特長を持つ。
- 一般的に、天然ガスに含有しているヘリウム分を分離・精製（吸着工程や冷却処理により不純物やメタンガスなどを除去）し、粗ヘリウムが製造され、それをさらに液化・高純度化したものが市場で流通している。
- 天然ガスからヘリウムガスを取り出すためには、経済性の観点から0.5%～1%の濃度が必要とされるが、そのような高い濃度でヘリウムを含んでいる天然ガスの井戸は地球上の一部地域に偏在していると言われている。また、ヘリウム単独での採掘が行われることはなく、天然ガス採掘時の随伴品として生産されており、その供給量は天然ガスの生産状況に大きく左右される。なお、近年、天然ガスの分野では、採掘技術の発展等を背景に非在来型天然ガス資源であるシェールガスの開発が活発化しているが、シェールガスは一般にヘリウム濃度が低く、工業的にヘリウムを取り出すことは困難とされている。
- 以前は世界のヘリウムの約8割を米国が供給していたが、米国でのヘリウム生産量がシェールガスの生産増加等に伴い頭打ちとなる一方、2013年に世界最大のヘリウム精製工場（カタルII）が稼働を開始したことにより、現在は米国、カタルを中心に、その他、アルジェリア、ポーランド、豪州、ロシアがヘリウムを供給する構図に変わっている。
- ヘリウムの用途には、ガス体で使用するヘリウムガスと、液体で使用する液体ヘリウムがあり、ヘリウムガスは不活性であることや軽い物質であること、熱伝導性が高いといった特性を生かした雰囲気制御等の用途、液体ヘリウムではヘリウムの沸点の低さを利用した冷却材（寒剤）等の用途で利用されることが多い。具体的には、半導体・エレクトロニクス（光ファイバー、半導体/液晶のウエハ冷却用、キャリアガス）、各種検査（真空装置、配管等のリークテスト用）、鉄鋼・機械・冶金（溶接熱処理用、溶接用シールドガス、レーザー光源）、防災（原子炉冷却用）*1、輸送産業（飛行船（バルーン充填用）、リニアモーターカー（超電導コイル冷却用）、医療（MRIの超電導マグネット冷却用）、海洋・エンジニアリング（潜水作業用）などがある。

*1 ヘリウムガスは、高温で熱分解せず、セラミックス（炭化ケイ素等）被覆の燃料と化学的に不活性、かつ、核的な効果（中性子の減速や吸収等）をほとんど持たないため、炉心の核反応にも影響を与えないとの観点から、現在の原子力発電の主流である軽水炉より安全性が高いとされる次世代原子炉「高温ガス炉」（実証段階）の冷却材として使用されている。

(1) 概要

- また、新たなヘリウムの用途として量子コンピュータが注目されている
- 量子コンピュータでは、量子の重ね合わせを維持するために極低温の環境が必要となるが、この極低温装置に液体ヘリウムを用いた極低温装置（ヘリウム3-ヘリウム4希釈冷凍機）が用いられている。
- 希釈冷凍機は、ヘリウム同位体であるヘリウム3とヘリウム4（いわゆる一般的なヘリウム）を混合した溶液の性質を利用し、連続的に10mK程度の極低温を生成することができるもので、世界初の量子コンピュータ（IBM Q）にも採用されたBlufors（フィンランド）や、Oxford Instruments（英国）等が知られている。
- ヘリウム3は、主に水素爆弾の原材料である三重水素を作る際の副産物等として生産・貯蔵されており、その販売、流通は米DOEの同位体プログラムにより管理されている。一時は米口の核軍縮進展等から生産量が減少。世界的に深刻な供給不足が生じた時期もあったが、近年はテネシー川流域公社のワッツバー原子力発電所（Watts Bar Nuclear Generating Station）でトリチウムの製造を開始（ヘリウム3を副生）する等の対策が進められた結果、現在では需要と供給はある程度バランス化しているとされる。
- しかし、容易に手当てできるものでなく、価格自体も極めて高価（最近でも2,000ドル/リットルを超える水準とされる）なため、最近ではヘリウム3を消費しない無冷媒希釈冷凍機等の開発が活発化している。

*2 IBM Q：量子ビット（Qubits）を格納するための強化されたチャンバー、絶対零度に近い温度に保つための液体ヘリウムなどの極低温装置のタンク、量子ビットの動作を制御して出力を「読み取る」ための電子機器のラック等で構成。

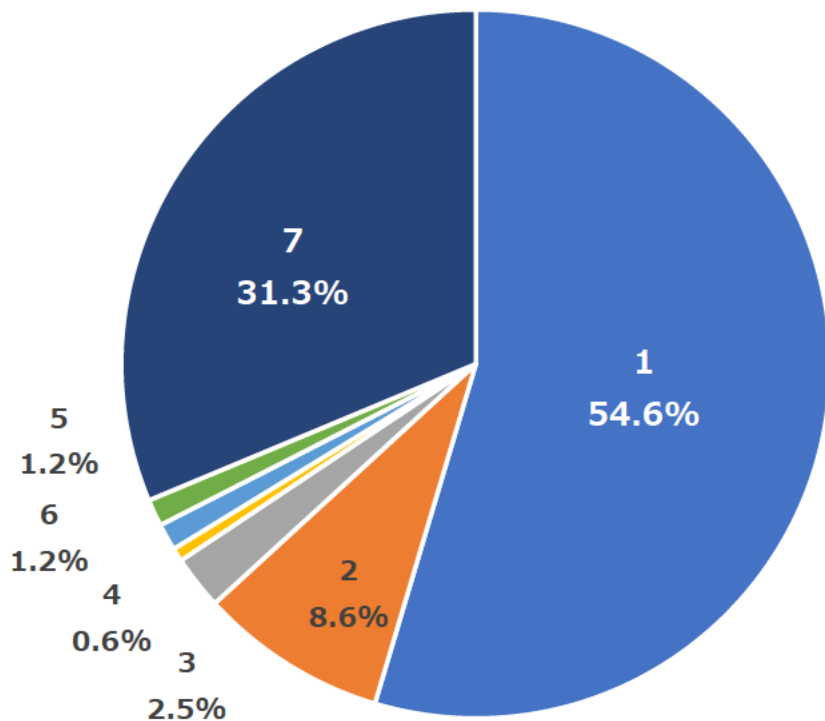
(2) 世界需要・供給

【世界需給】

現状は米国、カタールが主要供給国（2019年の世界シェアは両国で86%）

足元はコロナの影響で緩んでいるものの、2021年は需給がタイトになる可能性も

図.5-1 世界における生産量（国別シェア2019年）



出所：USGS/Mineral Commodity Summaries（2020）

- USGSによると、世界における供給量（2020年、米国の備蓄払い出しを含む）は1.6 億m³。このうち、米国が8,900万m³（天然ガスからの産出分：6,800万m³、備蓄払い出し分：2,100万m³）、カタールが5,100万m³。この2カ国で世界シェアの86%（2019年）を占める。
- 需要サイドでは、新興国における MRI の設置台数の増加や光ファイバーによる通信インフラの整備の拡大によって、世界全体のヘリウム需要量は増加傾向とされ、中長期的にヘリウムの需給逼迫の可能性が指摘されている。
- 足元では、新型コロナウイルス感染症の拡大を背景に、世界的に経済活動が停滞しているため、2020年の需要自体は前年を下回ると見られているが、最大供給者である米国はヘリウムガスの産出量減少、施設老朽化による供給トラブルの多発、備蓄量の減少といった問題から中長期的にヘリウム供給量が減少すると予想されている。
- 米国の供給量の減少が見込まれる一方で、カタール、ロシア等の新規プロジェクトの稼働が予定されている。具体的には、カタールⅢが2021年1月の稼働開始、ロシア（ガスプロム/Amour project）は2021年2Q、ロシア（ガスプロム/イルクーツク）は2021年末～2022年頭の稼働が見込まれている。しかし、これらプロジェクトでの生産が本格化するまでにはまだ時間を要することから、2021年は一時的に需給バランスがタイト化する可能性もあるとみられている。

(3) 日本の輸出入等の動向

【国内需給】

国内のヘリウム需要はここ数年ほぼ横ばいで推移

液体ヘリウムは、4K冷凍機の普及に伴い、補充用を中心にMRI向けで需要が減少傾向

表.5-1 ヘリウム生産・販売量

生・販	液・ガス区分	単位	2015年		2016年		2017年		2018年		2019年	
			数量	前年比	数量	前年比	数量	前年比	数量	前年比	数量	前年比
生産量	ヘリウムガス	千m ³	7001	99%	7041	101%	6988	99%	7074	101%	6625	94%
	液体ヘリウム	千ℓ	3809	91%	3336	88%	2990	90%	2814	94%	2458	87%
	合計（ガス換算）	千m ³	10007	96%	9674	97%	9348	97%	9294	99%	8565	92%
販売量	ヘリウムガス	千m ³	7078	100%	6997	99%	7677	110%	7853	102%	7059	90%
	液体ヘリウム（ガス換算）	千m ³	3190	99%	3021	95%	2509	83%	2526	101%	2101	83%
	合計	千m ³	10268	100%	10018	98%	10186	102%	10380	102%	9161	88%

出所：一般社団法人日本産業・医療ガス協会資料

図.5-2 ヘリウムガス 用途別構成比（2019年）

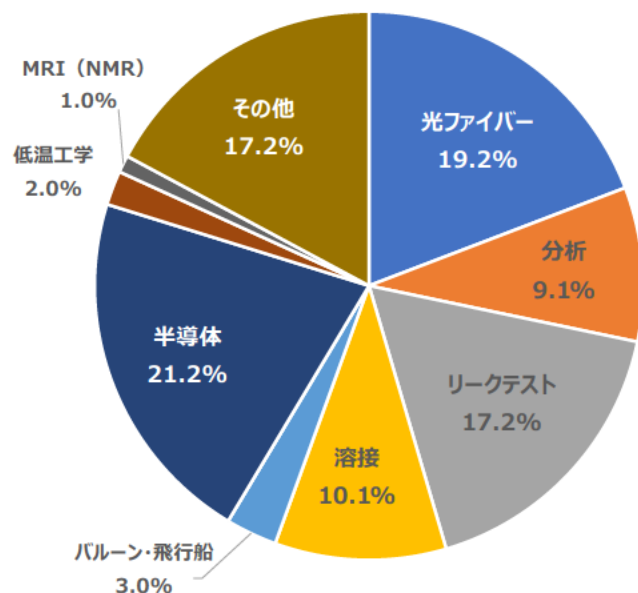
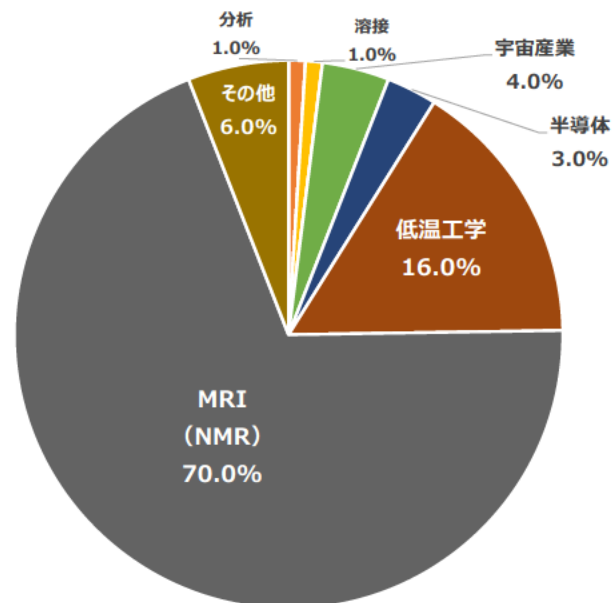


図.5-3 液体ヘリウム 用途別構成比（2019年）



出所：一般社団法人日本産業・医療ガス協会資料

(3) 日本の輸出入等の動向

- 日本国内の輸入単価は2016年以降、上昇基調。2020年も前年比116.9%と2割近く上昇。国内の需要が半導体製造工程向け等で堅調であったことに加え、中国、台湾の需要拡大により、アジア圏での品薄感が高まったとされる。

表.5-2 ヘリウムの輸入状況

ヘリウム 2804.29-100

輸入					単位 : kg
国名	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
米国	1,313,383	1,295,064	1,033,449	1,023,709	962,178
カタール	401,658	423,047	614,706	595,332	406,103
その他	137	479	5,337	26,474	12,464
計	1,715,178	1,718,590	1,653,492	1,645,515	1,380,745

輸入					単位 : 1000円
国名	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
米国	7,515,949	7,264,554	6,173,860	6,790,580	7,757,737
カタール	2,584,302	2,728,377	4,076,537	4,185,185	3,104,345
その他	53,963	25,152	57,432	217,337	118,700
計	10,154,214	10,018,083	10,307,829	11,193,102	10,980,782

CIF単価					単位 : 円/kg
国名	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
米国	5,723	5,609	5,974	6,633	8,063
カタール	6,434	6,449	6,632	7,030	7,644
その他	393,891	52,509	10,761	8,209	9,523
計	5,920	5,829	6,234	6,802	7,953

(4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向

- 政府レベルでヘリウムに関する政策・支援は公開されておらず、詳細は不明も、省政府レベルではヘリウムガス田の探査の動きが確認された。
- 国内需要の95%以上を輸入に依存。輸入量の2/3をカタールが占める。今後はカタールに加え、タンザニア、ロシアからの輸入開始が見込まれている様子が伺える。
- 中国においても、欧米系の大手ガス会社がヘリウムの供給を寡占。ヘリウム低温精製装置の開発（全国産化）に成功するなどの動きもあるが、現状は規模が小さく、中国企業単独での事業運営も難しいレベルであるなど、自前のサプライチェーン構築にはまだまだ時間が掛かると見られている。

（中国政策動向）

- ✓ 政府レベルにおいて、ヘリウムに関する具体的な政策・支援は公開されておらず、詳細は不明であるが、2020年の両会（全国人民代表大会と全国人民政治協商会議）において、全国人民政治協商会議委員を務める中国科学院物理化学技術研究所の教授が「我が国におけるヘリウム資源の開発利用に関する助言」を提案する等、ヘリウムのサプライチェーン上のリスクについては一定レベルで認識されていることが伺える。
- ✓ 一方、省政府レベルではヘリウムガス田の探査（陝西省）の動きが見られた。

（ヘリウム開発・生産概況）

- ✓ 現在稼働中のヘリウムガス田は四川省「威遠ガス田」の1箇所のみで、中国におけるヘリウム自給率は5%以下にとどまる。
- ✓ 2019年時点の輸入相手国、カタール（約65%）、アメリカ（約24%）、豪州（約10%）、他。カタールからの輸入が全体の約2/3を占めている。
- ✓ 2021年頃にはカタール、タンザニア、ロシアで新たなヘリウムガスプラントが稼働する見通し。中国はこの3国と国交関係が良好であるため、これらのプロジェクトの稼働に伴い、同3国からの供給拡大が期待されている。

（業界動向）

- ✓ 世界におけるヘリウムの供給と同様に、中国においても、欧米系の大手ガス会社（Linde, Air Liquide, Air Products）がヘリウムの供給を寡占している状況にあるが、2019年3月、ヘリウムガスの大手でもあるPraxairとLindeが合併した際、元Praxairの中国事業を広州広鋼気体能源股份有限公司が取得するなどの動きがあった。
- ✓ また、中国科学院理化技術研究所が支援するベンチャー企業の北京中科富海低温科技有限公司がヘリウム低温精製装置の開発（全国産化）に成功し、液化ヘリウムの商業化供給を開始している。

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● ヘリウムガス

概要

不活性で熱伝導率が高く、あらゆるガスの中で最も沸点が低いガス。光ファイバー、半導体、液晶、太陽電池などの先端技術や、医療用MRIをはじめとする超電導分野で使用されている。

ヘリウムは天然ガスに含有されているものを分離・精製して生産している。しかしながら、採算性の観点からヘリウム単独での採掘が行われることはなく、天然ガス採掘時の随伴品として生産されており、その供給量は天然ガスの生産状況に大きく左右される。

製造方法

沸点の差を利用し、純度を高める方法が採られている（一般的なガス分離技術とみられる）。なお、含まれる不純物としては酸素、窒素、炭化水素等になる。

ヘリウムガスのスペックは4N～6N5（メーカーによってスペックが異なる）。

＊液体ヘリウムは極低温のため不純物をチェックすることができない（純度を保証するというものではない）。

6N以上のグレードは分析装置（ガスクロマトグラフィー等）で要求されることが多い。

半導体（リソグラフィー工程）や光ファイバー（母材製造工程）でも不純物は敬遠されるが、これらのユーザーは工場内に精製装置を導入していることが多く、主に4Nが納入されているようだ（一部のユーザーは6N品もある）。

6N品は4N品の2倍ほど価格が高いとされる。

プレイヤー

海外からヘリウムを液体コンテナで輸入し日本国内で販売している事業者は、岩谷産業、JHC（JAPAN HELIUM CENTER, 太陽日酸系列）、日本ヘリウム（エア・ウォーター系列）、日本エア・リキード（エア・リキード系列）、Union Helium（昭和電工系列）の5社。

ガスレビューによると、日本のヘリウム事業シェアは岩谷産業：52%、JHC：26%、日本ヘリウム：15%、日本AL：4%、ユニオンヘリウム：3%。これら事業者は、半導体・光ファイバーの大口需要家には、輸入液体コンテナのまま、ユースポイントまで配送。その他用途は、充填所でシリンダー、ガストレーラーに移充填して配送している。

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● ヘリウムガス

用途

(MRI) 2019年の国内ヘリウム需要量 (ヘリウムガス) 7万m³、(液体ヘリウム) 147万m³

超伝導コイル・マグネットの製造工程：初期充填や製造後のコイル・マグネットのトレーニング試験時、磁石納品時

MRI装置製造工場：顧客への納入時に、液体ヘリウムが揮発している場合、充填

MRI装置の利用時：定期メンテナンス時（数年に一度の割合で補充）

冷凍機の技術革新（4K冷凍機の普及）により、追い足しの必要性が低下（国内需要の減少につながっている）
ヘリウムフリー（少量しか使わない）のMRI装置が製品化されており、今後こうしたMRI装置が増えてくると、ヘリウム需要の下押し要因になるとみられる。

(半導体製造工程) 2019年の国内ヘリウム需要量 (ヘリウムガス) 150万m³、(液体ヘリウム) 6万m³

CVD工程：TEOS（テトラエトキシシラン、層間絶縁膜用）のバブリング用、キャリアーガス用、ウエハ温度調整用

ドライエッチング工程：エッチング混合ガス

リソグラフィー工程：レーザ用パージガス

多層化によりヘリウムの使用量が増加する方向。

(光ファイバー) 2019年の国内ヘリウム需要量 (ヘリウムガス) 135.5万m³

母材製造プロセスにおいて、原料である塩化物のキャリアガスとして使用されるほか、ガラス透明化の雰囲気ガスとしても使用される

製造プロセスによってもヘリウムガスの使用量は異なる。日本国内で最も多く使用されているVAD（Vapor-phase Axial Deposition）法や、次いで主要な製造方法であるOVD（Outside Vapor-phase Deposition）法は他の方法（MCVD法）よりヘリウムガスを多く使用するプロセスと言われている。

また、線引き工程でも冷却用にヘリウムガスが使用される。

国内メーカーが中国に線引き工程を移管した結果、現在は母材製造工程が圧倒的に多くなっている。

(リークテスト) 2019年の国内ヘリウム需要量 (ヘリウムガス) 121万m³

ヘリウムリークテストが使用される分野は多岐にわたり、自動車部品（熱交換器、コンプレッサ、配管部品等）をはじめ、薬品包装のピンホール検査やドラム缶容器の検査等がある。また、半導体やFPDの製造に使用される真空装置等でもヘリウムリークテストが用いられている。

(6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- 原料ガスの供給源に関しては、米国のヘリウム供給力低下を見据え、早くよりカタールやロシアでの権益確保が進められた結果、カタールに加え、ロシアからの原料ガス輸入も2021年秋以降スタートする見込みである。しかし、ロシアからの輸入ガスは国際価格より割高になる可能性が指摘されており、国内のヘリウムガス価格の安定化までには至らないとみられる。
- 過去のヘリウム不足による価格高騰を契機とし、ヘリウムガスの回収再利用が光ファイバーやリークテスト等の用途で進んだものの、キャリアガス用途では精製が困難なこともあり、一層の回収再利用は難しい状況。

(原料ガスの供給源)

- ✓ 米国の主要ヘリウム源の1つであるカンザス州のHugotonガス田におけるヘリウム濃度の低下、連邦準備制度における備蓄ヘリウムの枯渇を背景に、米国のヘリウム供給力は低下していくとみられている。既に生産が立ち上がっているカナダやアルジェリアも一定の供給を担っていくものとみられるが、いずれも量は限られるため、規模の面ではカタール、ロシアの存在感が増していく方向にある。
- ✓ 日系のガスメーカーはカタール、ロシアで一定の権益を確保するが、ロシアの場合、ヘリウムの精製施設から輸出港までの輸送コストがかさむため、国際価格より割高になる可能性もあるとの指摘がみられた。

(回収再利用の取り組み)

- ✓ ユーザーサイドでの回収、再利用について、回収時の条件によっては再生（精製）が困難である。半導体用途のうち、CVD工程やドライエッチング工程でキャリアガスとして使用されるものは塩素系ガスが含まれてしまうため、そのような排ガスを精製することはできず、再利用されていないとのこと。
- ✓ また、光ファイバーに関しては、線引き工程（冷却）で使用されるヘリウムガスは再生可能であるが、母材製造工程（キャリアガス）では半導体用途と同様に再利用されていない。
- ✓ 一方、リークテストは概ね再利用されているとのこと。ヘリウムガスの消費量が少ないところでも、精製装置がかなり導入されているほか、水素への代替やヘリウム混合比率を低下させるなどの取り組みもみられるようだ。

(7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- これまでに生産設備トラブルだけでなく、米国西海岸港湾閉鎖（2002年）、港湾施設へのサイバー攻撃（2017年）、カタール断交（2017年）等、ロジスティック面での様々なリスクがヘリウムのタイト化に直結してきた。
- ソース的にはロシア、カタールのウエイトが高まることで、供給源の多角化は進むものの、地政学的なリスクが増すことで、市況は一層乱高下しやすくなる可能性がある」と懸念されている。そのため、これまで以上に安定供給体制の強化を通じた、国内価格の安定化が重要となってくるものとみられる。

	(原料)	(素材)	(製品・用途)
	ヘリウムガス	高純度ヘリウムガス 液体ヘリウム	半導体・光ファイバー等
課題・リスク	● 国内の輸入価格は依然として上昇基調。 ● カタール、ロシアがヘリウムの供給国として存在感を高めていくことが予想される中、地政学的なリスクが増すことで、市況が一層乱高下しやすくなると懸念される。	● 安定供給体制のさらなる強化（国内価格の安定化） ● 中国による自前サプライチェーンの構築 現状、中国メーカーの生産規模は小さく、流通面でも外資企業に依存しているが、将来的には中国政府支援の基、現地企業が本格的に参入していく可能性も。 ⇒将来、原料ソースの争奪戦へと発展するリスク	● 価格面を含め、安定したヘリウム流通が、製造基盤上重要 半導体分野では、多層化によりヘリウムの使用量が増加する方向にある。
対応策	● 新規ソースの模索 カナダ、アルジェリア、タンザニア等のプロジェクトも挙げられるが、米国、カタール、ロシアに続くほどの有力なソースになりうるとは今段階では見られていない。 ● 安定供給という観点では、国家備蓄が必要との声は強い		● 回収再利用の拡大 過去のヘリウム不足による価格高騰を契機とし、ヘリウムガスの回収再利用が光ファイバーやリークテスト等の用途に進んだものの、半導体や光ファイバーのキャリアガス用途では精製が困難とされる。

06. カーボン (C)

- 06-1. 人造黒鉛
- 06-2. カーボンナノチューブ (CNT)
- 06-3. グラフェン
- 06-4. 活性炭

06-1. 人造黒鉛

- (1) 概要
- (2) 世界需要・供給
- (3) 日本の輸出入等の動向
- (4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向
- (5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- (6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- (7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

(1) 概要

- 黒鉛（グラファイト）は、耐熱性（非酸化雰囲気中で3500℃）をはじめ導電性や潤滑性、耐酸耐アルカリ性等に優れるという特長を持ち、天然黒鉛と人造黒鉛に分類される。
- 天然黒鉛は炭素鉱物の一種であり、主に六方晶系、黒色又は灰黒色の金属光沢を持つ。天然黒鉛には、結晶性の高い鱗状黒鉛及び結晶性がやや低い土状黒鉛があり、鱗状黒鉛はさらに鱗片状黒鉛と塊状黒鉛に分類されている。
- 人造黒鉛は粒度や不純物などの品質を精密に調整できる、人工的に製造された黒鉛である。
- 主原料は石炭から得られるピッチコークス、あるいは石油から得られるカルサインコークスである。ピッチコークス及びカルサインコークスには、結晶組織が縦方向に揃ったニードル状（ニードルコークス）と、結晶方向がランダムなアモルファス状（アモルファスコークス）の2種類がある。
- これらの主原料にピッチ、タールを加え加熱、混練、成形し焼成したうえで、3000℃程度の高温にて黒鉛化し、人造黒鉛が製造される。成形方法の違いにより、押出成形品（電気炉用電極、ヒーター等）、CIP成形品（半導体製造用ルツボ・ヒーター、放電加工用電極材等）、型押成形品（モーター用電刷子、摺動材等）といった用途がある。また、近年はリチウムイオン電池（LiB）の負極材としての需要が拡大傾向にある。
- また、CIP法で成形が行われ、その物性が等方性である黒鉛は等方性黒鉛と呼ばれている。等方性黒鉛においては、CIP法で成形を行った際に異方性が生じないようにするため、主原料にアモルファスコークスが使用されている。

(2) 世界需要・供給

【世界需要】

- 人造黒鉛の世界需要は、2019年でおおよそ185万t、2015～2019年のCAGRは約4%になると推計される。用途別の世界需要を網羅する統計データがないため、主要用途である黒鉛電極（中国市場のみ）、LiB負極材、等方性黒鉛の需要動向を個別にみる。
- 人造黒鉛の最大の需要地は中国である。2017年に中国政府が地条鋼の操業規制を実施したことで電気炉への生産シフトが進み、黒鉛電極の需要が急増した。その結果、原料のニードルコークスが供給不足になったが、2019年下期には欧州の景気減速などを背景に鉄鋼生産、ひいては黒鉛電極の需要が低迷。2020年もCovid-19の影響で電炉メーカーの黒鉛電極の在庫取り崩しが長期化している。2019年における中国の黒鉛電極の需要は、上期の勢いが下期の減速分を補いおおよそ80万t（前年比114%）になったものとみられる。
- LiB負極向けの人造黒鉛の世界需要は、2019年におおよそ22万t（前年比140%）になったものとみられる。
- 負極材料としては黒鉛系（天然・人造）のほか、カーボン系やシリコン系なども使用されているが、黒鉛系が世界のスタンダードとなっている。特に、ここ数年はLiBの長寿命化につながるサイクル特性が天然黒鉛よりも優れていることから、中国メーカーが製造する車載用LiB向けで人造黒鉛の需要が拡大している。また、日本や韓国のLiBメーカーも人造黒鉛と天然黒鉛を混合して使用するケースが増えている。
- 民生小型LiB向けではスマートフォン向けをはじめとするラミネートセルで、膨張の少ない人造黒鉛が好まれている。
- 等方性黒鉛の世界需要は、2019年におおよそ8万tと推計される。単結晶シリコンや化合物半導体、太陽電池の製造装置用部品などのエレクトロニクス分野が牽引役となっているほか、連続鋳造用ダイスや金型製造用放電加工電極などの一般産業、高温ガス炉用心材やロケット部品などの原子力・宇宙航空分野などの用途がある。

(2) 世界需要・供給

【世界供給】

- 人造黒鉛の世界供給を網羅する統計データがないため、主要用途である黒鉛電極、LiB負極材、等方性黒鉛の供給動向を個別にみる。
- 黒鉛電極の世界生産能力はおよそ290万t/年に達し、そのうち中国企業が生産能力が200万t/年と70%以上を占めているものと推計される。中国では20社近い企業が黒鉛電極市場に参入しているが、主要サプライヤーはFangda Carbon New Material、Jilin Carbon、Dantan Technology、Shanxi Hongtemei Chemical Industry、Jiexiu Zhiyao Carbonなどである。
- 黒鉛電極の世界最大のサプライヤーは、昭和電工。2016年にドイツのSGL GEを完全子会社化した。2020年2月に黒鉛電極の需要減速を受けてドイツ工場を閉鎖するなどの生産再編を行い、生産能力を現在の25万t/年から21万t/年に減らすと発表した。この他、GrafTech International（米国）、Graphite India、HEG（ともにインド）、東海カーボン、SECカーボン、日本カーボンなどが参入している。
- LiB負極材向け黒鉛（人造及び天然）の世界生産能力は約55万t/年。そのうち、中国企業が生産能力が50万t/年と90%程度を占めているものと推計される。主なサプライヤーはBTR New Energy Materials、Shanshan Technology、Kaijin New Energy Technology、Zichen Technology、等。
- 等方性黒鉛の世界生産能力は約12～13万t/年と推定される。この分野では東洋炭素、東海カーボン、新日本テクノカーボン、イビデンといった日本企業の存在感が大きいほか、Mersen（フランス）、SGL Carbon（ドイツ）などの欧米企業も参入している。近年は中国において太陽電池および半導体の生産が急増していることから、中国企業の等方性黒鉛の生産能力が急増している。

(3) 日本の輸出入等の動向

- 人造黒鉛の輸入の状況をみると、2019年の中国からの輸入量は69,338tと前年から1,958t減少したものの、シェアは76.2%と前年より0.6ポイント高まった。その他の輸入相手国はポーランド、フランス、米国、スイス、韓国など。炭素電極（丸形のもの）も中国からの輸入量が最大となっており、2019年は10,557t、シェアは77.2%となった。以降、フランス、スペイン、インド、マレーシア、米国が続く。

表.6-1-1 人造黒鉛の輸出入量推移

3801.10.000 人造黒鉛					3801.10.000 人造黒鉛				
輸入					輸出				
国名	2016年	2017年	2018年	2019年	国名	2016年	2017年	2018年	2019年
中国	45,435	55,489	53,902	52,868	中国	6,061	7,963	11,438	8,177
ポーランド	4,985	7,386	7,939	7,093	韓国	10,984	11,843	10,667	7,983
フランス	1,132	4,121	3,416	3,476	米国	3,065	5,853	10,280	6,150
米国	1,188	2,377	2,633	2,949	ドイツ	1,055	1,599	1,954	2,291
スイス	1,285	1,381	1,624	1,551	ベルギー	1,312	1,338	1,751	1,664
韓国	551	1,204	1,109	728	ハンガリー	17	21	437	1,536
その他	578	459	674	673	台湾	1,610	1,671	1,383	1,372
計	55,153	72,418	71,296	69,338	インドネシア	1,162	1,784	2,394	694
(中国依存度)	82.4%	76.6%	75.6%	76.2%	タイ	393	941	556	560
					オランダ	229	160	259	426
					その他	2,144	2,413	1,605	1,548
					計	28,031	35,585	42,724	32,401

表.6-1-2 炭素電極丸形の輸出入量推移

8545.11.010 炭素電極丸形のもの					8545.11.100 炭素電極丸形のもの				
輸入					輸出				
国名	2016年	2017年	2018年	2019年	国名	2016年	2017年	2018年	2019年
中国	10,005	10,444	11,420	10,557	韓国	22,058	25,382	24,478	22,088
フランス	4,662	3,897	1,491	2,384	米国	12,544	13,677	11,758	9,941
スペイン	492	530	315	287	台湾	7,936	8,347	9,022	6,651
インド	633	379	302	239	ロシア	3,400	1,491	3,787	1,636
マレーシア	71	0	1	100	オーストラリア	2,158	2,391	2,368	1,458
米国	2	1	8	70	トルコ	4,941	2,437	2,294	1,308
韓国	0	0	31	31	ベトナム	1,124	607	1,799	970
その他	0	16	16	1	タイ	2,151	2,223	2,452	935
計	15,865	15,267	13,584	13,668	フィリピン	824	818	736	549
(中国依存度)	63.1%	68.4%	84.1%	77.2%	中国	1,414	1,314	915	536
					その他	9,673	12,253	10,403	1,348
					計	68,224	70,940	70,012	47,421

(3) 日本の輸出入等の動向

- 国内における人造黒鉛の需要動向に関する統計データがないため、炭素協会がまとめた炭素製品の出荷動向をみていく（表.6-1-3）。
- 炭素協会では用途を押出成形品の電極、CIP成形や押出成形で得られる特殊炭素製品、型押成形で得られるブラシ完成品、黒鉛精錬に区分している。黒鉛精錬とは、鋳物用塗型材などとして黒鉛精錬事業者が粉碎・精錬・加工を行った粉末等である。
- 人造黒鉛や天然黒鉛などを用いた炭素製品の2019年出荷実績は、210,538t（前年比82.6%）となった。内訳は電極128,587t（同76.5%）、特殊炭素製品67,480t（同94.6%）、ブラシ完成品2,801t（同86.3%）、黒鉛精錬11,679t（同95.4%）である。
- 電極用途では、主に人造黒鉛の丸形が電気炉で使用されている。2019年の人造丸形の出荷は90,130t（前年比72.7%）となった。電炉鋼の生産が減少し、前年の供給不安の中で積み上がった在庫の調整局面に入ったことなどから、国内向けが42,552t（同69.2%）と大きく減少。輸出も電炉鋼生産の減少と海外メーカーとの競争激化などにより47,421t（同67.7%）と低迷した。
- 特殊炭素製品は電気・接点用や機械用、化学構造用の出荷が前年を上回ったものの、主力用途の半導体用4,086t（同92.6%）、放電・冶金用6,139t（同94.5%）、加炭用5,287t（同75.3%）といずれも需要は低調。輸出も24,819tと前年から落ち込みを見せた。
- ブラシ完成品では人造黒鉛質、天然黒鉛質ともに2019年の出荷が前年割れとなった。

(3) 日本の輸出入等の動向

表.6-1-3 炭素製品の国内出荷実績

(単位：t)

区分		2016年	2017年		2018年		2019年	
			前年比		前年比		前年比	
電極	人造丸形	109,035	116,547	106.9%	124,023	106.4%	90,130	72.7%
	その他	30,425	38,153	125.4%	44,149	115.7%	38,448	87.1%
	小計	139,460	154,700	110.9%	168,172	108.7%	128,578	76.5%
特殊炭素製品	半導体用	3,155	3,764	119.3%	4,413	117.2%	4,086	92.6%
	放電・冶金用	5,741	6,353	110.7%	6,498	102.3%	6,139	94.5%
	電気・接点用	41	33	80.5%	36	109.1%	41	113.9%
	機械用	833	794	95.3%	804	101.3%	848	105.5%
	化学構造用	131	76	58.0%	99	130.3%	112	113.1%
	加炭用	4,538	5,748	126.7%	7,019	122.1%	5,287	75.3%
	その他	33,954	40,728	120.0%	52,431	128.7%	50,967	97.2%
	小計	48,393	57,496	118.8%	71,300	124.0%	67,480	94.6%
ブラシ完成品	人造黒鉛質	100	96	96.0%	105	109.4%	88	83.8%
	天然黒鉛質	376	291	77.4%	437	150.2%	374	85.6%
	金属質	2,305	1,715	74.4%	2,703	157.6%	2,340	86.6%
	小計	2,781	2,103	75.6%	3,245	154.3%	2,801	86.3%
黒鉛精錬	炭素製品	65	83	127.7%	86	103.6%	100	116.3%
	鋳物	7,703	5,782	75.1%	2,362	40.9%	2,233	94.5%
	鉛筆	273	280	102.6%	311	111.1%	300	96.5%
	乾電池	0	0	-	0	-	3	-
	その他	8,857	8,962	101.2%	9,482	105.8%	9,043	95.4%
	小計	16,898	15,107	89.4%	12,241	81.0%	11,679	95.4%
合計		207,532	229,406	110.5%	254,958	111.1%	210,538	82.6%

出所：炭素協会

(4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向

- 天然黒鉛と異なり、人造黒鉛では、生産・輸出管理に関する施策は確認されなかった。

（生産管理関連政策）

- 中国において、人造黒鉛の生産に関して特に制限されるような政策は確認されなかった。
- 一方、天然黒鉛業界においては、「石墨行業準入条件」が施行しており、これまで同条件に合致した製造メーカ（2回分の計約33社のみ）での採掘が承認されている状況にある。また、1社あたりの最低生産規模と1ラインあたりの最低生産規模なども規定されている。

（輸出管理関連政策）

- 人造黒鉛の輸出に関しても特に制限は見られない。また、2010年6月発表された「一部製品の輸出税還付取消に関する財政部、税務総局の公告」により、HSコード3801100090である「その他人造黒鉛」の輸出税還付は廃止された。

（資源税法関連）

- 黒鉛（原鉛又は選鉛）の資源税率として3～12%が設定されているが、ニードルコークスなどの石油資源又は石炭資源を原料とする人造黒鉛は、「資源税法」の適用対象には含まれていない。

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 等方性黒鉛

概要

アモルファスコークス等を冷間静水圧プレス法(CIP: Cold Isostatic Pressing)で成形し、その物性が等方性(成形体の方向による特性の違いが非常に少ない)となる黒鉛を等方性黒鉛と呼ぶ。緻密で高強度を有し、半導体製造用ろつばやヒーターのほか、放電加工用電極材など高い機能が要求される用途で使用されている。

製造方法

- ①粉砕：原料コークスを粉砕機によって数 μm ～数十 μm に粉砕・混合して所定の粒度に調整する。
- ②混ねつ：加熱式ニーダーで混ねつを行い、原料コークス粉の表面に原料ピッチ層を均一に形成後、冷却させる。
- ③粉砕・ふるい分け：混ねつ品を粉砕、ふるい分けし、数十 μm ～数百 μm の粒度に調整、成形原料とする。
- ④CIP成形：成形原料をゴム製型に充填しゴム型をシール。その後、水や油などの圧力媒体が満たされた圧力容器に入れ、約100～200MPaの静水圧を掛けて円柱や角柱の製品を成形する。
- ⑤焼成・ピッチ含浸：成形品に含まれるバインダーを炭素化し、フィラー粒子と一体化させるために約1000℃まで加熱。材質によっては、かさ密度や強度、電気伝導度等の向上のためコールタールピッチを開気孔に加圧含浸することもある。
- ⑥黒鉛化：焼成された成形体を約3000℃まで加熱。黒鉛結晶を制御しながら発達させることで所望の物理特性を得る。黒鉛化の期間は1～1.5ヶ月。
- ⑦材料試験：等方性黒鉛素材が材料特性を満足していることを確認するために、密度、硬さ、強度、電気抵抗率などの物理特性や灰分などの検査を行う。

用途

エレクトロニクス分野：半導体単結晶シリコン引上げ炉部品、MOCVD装置用サセプター、LPE装置用ボート、太陽電池単結晶・多結晶製造装置部品、等
一般産業分野：連続鋳造用ダイス、金型製造用放電加工電極、等
その他：高温ガス炉用心材、ロケット部品、イオン注入装置用電極、等

プレイヤー

東洋炭素、東海カーボン、新日本テクノカーボン、イビデン
SGL Carbon (独)、Mersen、Sinosteel (仏)、Chengdu Carbon (中国)、Baofeng Five-star Graphite (中国)、Jiangxi Shen Tian Carbon (中国)、Pingdingshan Oriental Carbon (中国)、Datong Xincheng New Materials (中国)、等

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 単結晶シリコン引上げ炉部品

概要

単結晶シリコン引上げ炉には、様々な等方性黒鉛製の部品が使われている。採用理由は、1600℃程度の高温で使用されても強度が低下しない、半導体に不要な金属不純物を数ppm以下まで低減した高純度品ができる、などである。

製造方法

黒鉛化工程での高温処理により炭素材中に含まれる多くの不純物は揮発・除去されるものの、数百ppm程度の灰分が残留する。単結晶シリコン引上げ炉用部品向けの等方性黒鉛は、これらの灰分を化学的（ハロゲン化やフッ素化）に除去する高純度化工程を経る。

用途

単結晶シリコン引上げ炉にはルツボ、ヒーター、電極、熱遮蔽板(シールド)、種結晶保持具(シードチャック)、ルツボ回転用ペDESTALなど約30種の等方性黒鉛製の部品が使われている。

【単結晶シリコンの製造方法】

多結晶シリコンと微量のドーパントを石英ルツボの中に充填し、Arを流しながら等方性黒鉛ヒーターで1600℃程度に加熱して多結晶シリコンを溶融。その後、金属ワイヤーに吊るした単結晶シリコン種棒(シード)をルツボ内の溶融シリコンに接触させ、単結晶シリコンを凝固成長させながら引き上げることで円柱状の単結晶シリコンインゴットを製造する。石英ルツボはシリコンの溶融温度で軟化するため、形状保持のために等方性黒鉛ルツボの内側に入れて使用する。

プレイヤー

東洋炭素、東海カーボン、新日本テクノカーボン、イビデン、SGL Carbon（独）、Mersen（仏）

(6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- シリコンウエハーの大口径化を背景に、軽量で機械的強度にも優れるC/Cコンポジットを用いた単結晶シリコン引上げ炉部品が製品化されている。

(等方性黒鉛の原料調達面)

- ✓ 等方性黒鉛の原料となるアモルファスコークスは、主に石炭の副産物であるコールタールから製造される。電炉用黒鉛電極やLiB負極材の原料であるニードルコークス同様に、コールタール（及び重質油）から得られる。
- ✓ ニードルコークスは2017年から2019年にかけて供給不足となっていたが、等方性黒鉛において原料調達への影響は生じていない。現段階で、原料調達面での不安定要素はないものと考えられる。

(代替素材の開発状況)

- ✓ シリコンウエハーの大口径化に伴い、CZ法に用いられる引上げ炉も大型化している。これにより、従来の等方性黒鉛製ルツボでは重量が増加することによるハンドリング上の問題や、装置内の有効処理寸法が小さくなるという問題が生じてきた。そのため、ルツボをはじめとする炉構成部品の素材として、炭素繊維強化炭素複合材（C/Cコンポジット）が使用される場合もある。
- ✓ C/Cコンポジットは炭素繊維にフェノール樹脂等を含浸し、高温で焼成・熱処理することにより樹脂を炭素化した複合材である。等方性黒鉛よりも軽量、かつ機械的強度に優れ、非酸化性雰囲気では2000℃以上の高温で 사용할 ことができる。
- ✓ C/Cコンポジットのサプライヤーは東洋炭素、東海カーボン、新日本テクノカーボン、SGL Carbon、Mersenといった等方性黒鉛を手掛ける企業のほか、Carbon Composites、ACROSSなどである。

(7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- 中国企業が主戦場としている太陽電池分野で競争激化。技術力の高まりとともに半導体分野でも低価格を武器に中国企業の攻勢が強まる可能性がある。
- シリコンウエハーの大口径化への対応、部品の決定権を握るシリコンウエハメーカーとの関係維持・強化が重要となる。

	(原料)	(素材)	(製品・用途)	
	石炭、コールタール アモルファスコークス	等方性黒鉛	単結晶シリコン 引上げ炉部品	半導体用シリコンウエハ
課題・リスク	● 脱炭素化 現段階で、原料調達面での不安定要素はないものと考えられる。 - 長期的には、世界的な脱炭素の動きを受けた石炭および副産物であるコールタールの生産量減少が予想される。 コールタールの生産量減少に伴う需給バランスの悪化、価格上昇の懸念がある。	● 中国企業との競争激化 中国企業が主戦場としている太陽電池分野で競争が激化。 ● 他産業への影響 特殊黒鉛を手掛ける日本企業の競争力低下は冶金（連続鋳造用ダイス、ホットプレスダイス等の製品）分野などに影響が及ぶ可能性がある。	● 中国企業の台頭 中国企業の技術力の高まりとともに、半導体分野でも低価格を武器とした攻勢が強まるものと予想される。	● 半導体産業の潮流変化 遠隔、非接触、リモート、5G、ネットワークの高度化、環境対応（グリーン化）のトレンドがコロナ禍で加速化。半導体の重要性が増す。 ● 米中貿易摩擦（規制強化）、中国内製化（サプライチェーンの変化）、技術情報の流出・人材引き抜き等がリスク要因
対応策	—	● 新規用途の開発 放電加工機（EDM）電極など半導体、太陽電池に続く、柱となる用途の開発・育成。	● 製品面での差別化 シリコンウエハーの大口径化への対応。 ● シリコンウエハメーカーとの関係強化 部品の決定権はシリコンウエハメーカーが握っている。すり合わせ技術を基盤とした関係維持・強化が重要。	● コスト競争力の強化 ● 内部体制の強化

06-2. カーボンナノチューブ (CNT)

- (1) 概要
- (2) 世界需要・供給
- (3) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- (4) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- (5) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

(1) 概要

- カーボンナノチューブ（Carbon Nanotube：以下CNT）は、1991年に日本電気基礎研究所の飯島澄男博士（当時）によって発見された。一般的には直径1～数10nm、長さ1～数10 μ m程度のものを指すが、類似の構造体として直径100nm以上の昭和電工「VGCF」がある。また、CNTは単層CNTと多層CNTに大別される。
- 単層CNTは機械的特性（引張り強度50～70GPa）や電気的特性（電流密度1GA/cm²）、熱伝導性（熱伝導率2000～3000W/mK）等に優れるほか、柔軟、かつ弾力性、可撓性、摺動性に富むといった特長を有する。
- 多層CNTは単層チューブが入れ子状態で同心筒状の多層となっている。層の数は様々であり、層数に起因する材料性能の違いが生じる。
- CNTの合成方法は、触媒気相合成法（触媒CVD法、単にCVD法ともいう）と炭素固体原料法に大別され、現在は触媒気相合成法が主流となっている。
- 触媒気相合成法は、浮遊流動反応法と触媒担持反応法に区分される。浮遊流動反応法はトルエン、ベンゼン、メタンなどの気体原料とガス状にした浮遊触媒を炉内で反応させる合成方法である。
- さらに、触媒担持法は、流動床法と固定床法（基板法）に分類される。流動床法は細孔を有するアルミナ、マグネシア、ゼオライト、シリカなどにナノ微粒子として調製した触媒金属（Fe、Co、Ni、Mo など）を担持させたものである。担持体によって触媒の安定性を図れるなどの特徴がある。固定床法は金属触媒を載せた基板（Siなど）上にCNTを成長させるものであり、高純度で配向性の良いCNTを得られる。
- 単層CNTは、直径と巻き方の幾何学形状がカイラル指数（ n,m ）によって決まり、そのカイラル指数によって金属型や半導体型になるといった特性を有する。金属型は透明電極に用いられるITO代替などとして用途開発が進んでいる。半導体型は室温で10～100cm²/Vs の移動度をもつことに加え、機械的安定性（高強度、弾性体）、化学的安定性（高耐熱性、耐薬品性）を有することからトランジスタや不揮発性メモリー、熱電変換素子、超短時間パルスレーザーなどでの利用が検討されている。
- 多層CNTは樹脂複合材向けを中心に市場が立ち上がり、近年はリチウムイオン電池（LiB）用の導電助剤として需要が拡大傾向にある。

(2) 世界需要・供給

【世界需要】

- 2017年の単層CNTの市場規模は4.4t（前年比139.2%）と推計される。
- 単層CNT市場では大手海外メーカーが低価格化を進め、導電性／帯電防止塗料・コート剤や熱硬化性樹脂複合材、ガラス、アスファルト、タイヤなど幅広い用途で採用が広がった。さらに、2019年より中国LiBメーカーが導電助剤に単層CNTを採用する計画を明らかにしている。導電性の高さから多層CNTより添加率は低くなるものの（添加率：単層CNT0.03～0.05%、多層CNT1～2%）、多層CNT市場におけるLiB導電助剤向けの需要の伸びを考慮すると、単層CNTでも年間に数トン規模の需要が生じる可能性が高い。また、今後は熱可塑性樹脂向けの需要も立ち上がってくるとみられる。
- 2017年の多層CNTの市場規模は1,900t（同147.3%）と推計される。
- 多層CNT市場では、中国を中心にLiB導電助剤向けの需要が旺盛である。複合材料向けでは新しい用途を見出しにくい状況が続いているものの、中国で樹脂向けの採用が本格化しそうである。この他、導電・帯電防止フィルム・シート向けを中心に分散液やコート液なども緩やかな成長が続くと予想される。

表.6-2-1 CNT 世界需要の推移

	(単位:t)				
	2017年	2018年(見)	2019年(予)	2020年(予)	2021年(予)
単層CNT	4.4	5.8	9.8	12.7	20.1
(前年比)	139.2%	131.8%	169.8%	128.4%	158.5%
多層CNT	1,900	2,250	2,550	2,831	3,074
(前年比)	147.3%	118.4%	113.3%	111.0%	108.6%
合計	1,904.4	2,255.8	2,559.8	2,843.7	3,094.3
(前年比)	149.6%	118.5%	113.5%	111.1%	108.8%

(2) 世界需要・供給

- CNTのエリア別の需要構成をみると、中国が80%を超える最大の需要地となっており、欧州7.8%、日本4.6%、北米2.1%、その他3.2%と続く。中国では新エネルギー自動車に対する補助金制度など手厚い政府支援策を背景に、EV・PHEV（xEV）の生産・販売台数の伸びが顕著で、LiBの需要も拡大。中国のLiBメーカーは正極材にLFP（リン酸鉄リチウム）を使用した中大型セルの製造を得意としていたが、LFPは導電性とリチウムイオン拡散性が低いため出力特性に劣るため、優れた導電性を付与できるCNTが好まれた。
- 用途別ではLiB導電助剤向けが80%近い構成比となっている。次いで、複合材料向けの需要がおよそ20%、その他分散液・コート液向けなどが1%程度を占める。
- 複合材料用途では樹脂（コンパウンド／マスターバッチ）向けの需要が中心。最終製品はICチップやHDD部品の搬送用トレイ、キャリア、治具、自動車のフューエル部品やボディ外板（フェンダー）などである。ゴム・エラストマー／CNT複合材料は耐疲労性、耐摩耗性の向上などの切り口でO-ring、コンベアベルトなどの工業部品で検討が進んでいる。
- 分散液は透明電極向けにITO代替への取り組みが活発化していた時期もあったが、最近ではITO並みの透明性や導電性を発現できないことから研究開発がトーンダウン気味である。一方、導電・帯電防止フィルムや漆黑インキとしての応用が進んでいる。

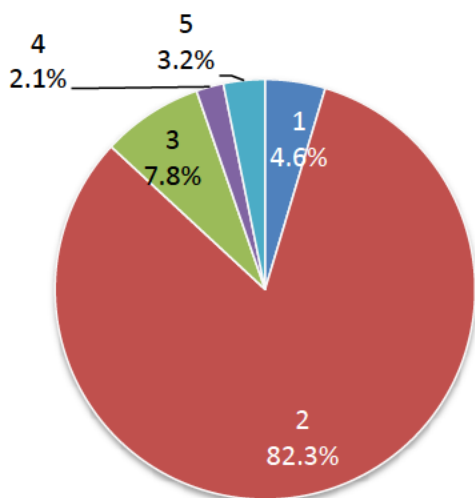


図.6-2-1 CNT エリア別需要構成（2018年推計）

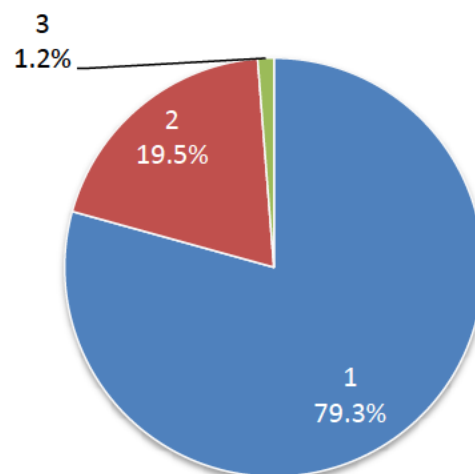


図.6-2-2 CNT 用途別需要構成（2018年推計）

(2) 世界需要・供給

【世界供給】

- 単層CNT市場のメーカーシェアをみると、OCSiAlが95.2%でシェアトップとなっており、日本ゼオン4.3%、Thomas Swan 0.2%、Chasm Advanced Materials 0.1%と続く。
- 多層CNT市場ではLiB向けの需要を取り込んでいる中国勢が年々存在感を高めており、2018年はCNano Technology、Dazhan Nano Materials、SUSN Nanotech New Materialsの上位3社で6割近いシェアを占めるものとみられる。また、上位企業のほとんどがLiB向けに展開しており、Nanocylのみが主に複合材料向けに100t超の需要を取り込んでいる。

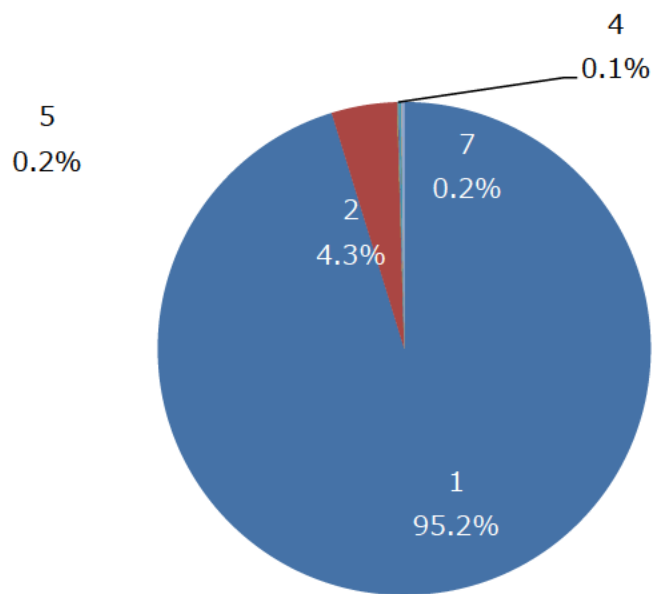


図.6-2-3 単層CNT メーカーシェア (2018年推計)

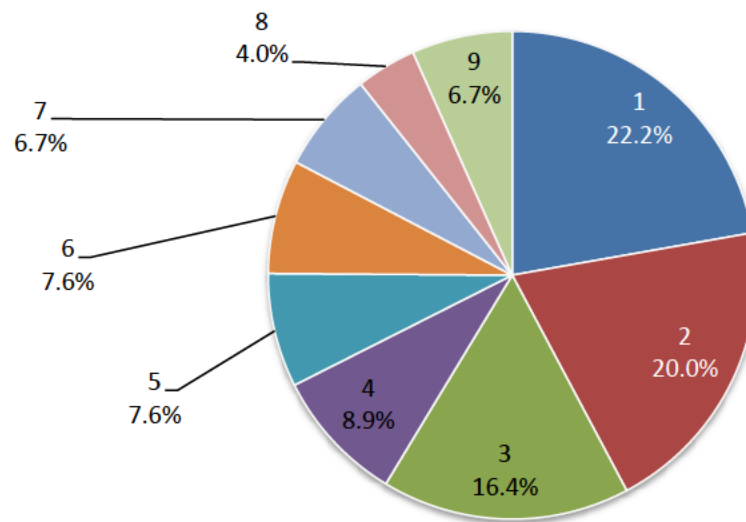


図.6-2-4 多層CNT メーカーシェア (2018年推計)

(2) 世界需要・供給

表.6-2-2 主要単層CNTメーカーの供給能力

企業	国(拠点)	生産能力	用途
名城ナノカーボン	日本 (愛知県)	—	透明電極や配線材料
日本ゼオン	日本 (山口県)	10t/年	半導体向け熱界面材料、柔軟エラストマー、簡易電源
OCSiAl	ロシア (ノボシヴィルク州)	60t/年	タイヤ、樹脂複合材、建材、LiB向け導電助剤、シリコン・ゴム向け添加剤、GFRP
Carbon Solutions	アメリカ (カリフォルニア州)	4~5kg/月	センサー、柔軟電極、透明電極、赤外線および可視光検出器
Nano-C	アメリカ (マサチューセッツ州)	—	NRAMチップ、透明電極、センサー
Nanoshel	アメリカ (デラウェア州)	—	分散液、導電性フィルム・インク
Raymor Industries	カナダ (ケベック州)	500kg~1t/年	プリントドエレクトロニクス、薄膜トランジスタ
Thomas Swan	イギリス	1.2t/年	NRAM、二次電池
NanoSolution	韓国 (全州市)	4~5kg/月	導電性コート剤、透明電極向け分散剤
KH Chemicals	韓国 (江陵市)	1t/年	帯電防止、LiBの負極向け導電助剤
Chasm Advanced Materials	アメリカ (オクラホマ州)	1t/年	タッチスクリーン、ディスプレイ、太陽光パネル、携帯向けバッテリー、EV向けLiB
Ad-Nano Technologies	インド (カルナータカ州)	—	エレクトロニクス、樹脂・ゴム複合材、塗料、LiB
Chengdu Organic Chemicals	中国 (成都市)	500kg/年	LiB向け導電助剤、帯電防止・発熱機能を付与した繊維・フィルム

※2018年末時点

出所：矢野経済研究所

(2) 世界需要・供給

表.6-2-3 主要多層CNTメーカーの供給能力

企 業	拠 点	生産能力 (t/年)	備 考
CNano Technology	中国	3,000	2012年に鎮江工場、2017年に常州工場稼働
Shandong Dazhan Nano Materials	中国	2,000	
Shenzhen SUSN Nanotech New Materials	中国	500	深セン工場と東莞工場の2拠点、珠海に新工場を建設中、2018年内に1,000t/年に増強
huizhou jiyue nano material technology	中国	750	2018年末までに1,000t/年に増強
Chengdu Organic Chemicals/ Timesnano	中国	700	2014年200t/年、2016年300t/年増強
Qingdao Haoxin New Energy Technology	中国	600	グラフェン600t/年、CNTペースト1万t/年
Shenzhen Dynanonic	中国	300	
Wuxi Dongheng New Energy	中国	200	CNTペースト1,000t/年
Shenzhen Nanotech Port	中国	200	CNTペースト2,000t/年
Nanocyl	ベルギー	400	開発・試作用CNTプラント(CVD法、同60t/年)、コンパウンド設備3,500t/年
Arkema	フランス	400	2011年量産プラント稼働
Hyperion Catalysis International	米国	200	
LG	韓国	400	
JEIO	韓国	100	
Kumho	韓国	50	2013年11月量産開始
昭和電工	日本	300	2018年に100t/年増強
トーヨーカラー	日本	2	
TPR	日本	1~2	
大陽日酸	日本	N.A.	コンパウンドベースの生産能力10t/年
ニッタ	日本	N.A.	
浜松カーボニクス	日本	N.A.	シーディアイ(愛知県一宮市)へサンプル製品の受注製作を委託

※2018年末時点

出所：矢野経済研究所

(3) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 電界効果トランジスタ (Field Effect Transistor:FET)

概要

シリコン集積回路の高性能化が限界に近づきつつある中、単層CNTをFETに応用する研究開発が行われている。単層CNTの理論上のキャリア移動度、キャリア速度はいずれもシリコンの10倍以上。電子が散乱を受けずに伝導するバリスティック伝導も起こりうる。トランジスタ性能として高速スイッチングや高周波応答を期待できるほか、チャンネルの厚みがCNTの直径になることから、ショートチャンネル効果の抑制にもつながる。1998年にオランダ・デルフト工科大学やIBMの研究チームが、世界初となる単層CNTを用いたトランジスターを製作。その後は、主にFETのチャンネル材料としての開発が進んでいる。

製造方法

研究当初は、レーザーアブレーションやアーク放電法で合成した単層CNTを有機溶媒中や界面活性剤を入れた水溶液中に分散し、基板上に塗布する手法でFETチャンネルが形成された。最近では単層CNTの成長に触媒金属が必要であることを利用して、触媒を基板上に配置してCVD法によって単層CNTを成長させる手法が多く発表されている。また、CNT-FETはバックゲート型、トップゲート型、ラップアラウンドゲート型などのタイプが開発されている。初めて作製されたCNT-FETは1998年に報告されたバックゲート型のものである。これはゲート誘電体となるシリコン基板上に金属電極をフォトリソグラフィと金属の蒸着・リフトオフによって形成し、その上にチャンネルとして単層CNTを配置している。トランジスタの作製は比較的容易であるものの、集積回路の作製が難しいとされている。バックゲート型では、シリコン基板の裏面にゲート電極をレイアウトし、シリコン基板の表面に絶縁膜と単層CNTチャンネル、ソース電極、ドレイン電極を配置する。このタイプはゲート接合部がトランジスタごとに独立しているため、同一の基板上に複数のFETを配置して論理動作を行わせることができる。ラップアラウンドゲート型のFETはチャンネルとなる単層CNTをゲート誘電体が覆う構造を持ち、チャンネルとゲートの接触面積を増やすことでリーク電流を減らす効果が期待できる。

用途

LSI（シリコンMOSFET代替）、バイオセンサー、ガスセンサー、等

プレイヤー

産業技術総合研究所、NEC、名城ナノカーボン、ローレンスバークレー国立研究所（米国）、マサチューセッツ工科大学（米国）、スタンフォード大学（米国）、IBM（米国）、デルフト工科大学（オランダ）、北京大学（中国）、等

(3) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 不揮発メモリ : NRAM(Nanotube RAM)

概要

不揮発性メモリとは電源が切れても情報を保持する半導体メモリの総称であり、マスクROMやEEPROM、フラッシュメモリ、FeRAM、ReRAM、MRAMなどの製品がある。これらの不揮発性メモリに比べ、NRAMは大容量、低消費電力、高温対応、高速動作、書き換え上限が大きいなどの特長を有する。

NRAMは単層CNTから成る薄膜と、それを挟む二つの金属電極でメモリ素子を構成する。メモリ素子に電圧印加や微小な電流を流すことで、単層CNTが接触（低抵抗化）、分離（高抵抗化）することで情報を記憶する。情報を書き換えるときは書き込み電圧よりも高い電圧を加えることで、単層CNTの接着部にフォノン（格子振動）が発生し、その熱で接触が解ける。情報の読み出し動作では、低い電圧パルスで記憶素子に加えて電流値を検出し、抵抗状態を判別する。

NRAMの基本技術は、Nantero（米国）が所有している。同社は170件を超える米国特許を取得、200件超の特許を申請中としている。自社でNRAMを製造するのではなく、半導体メーカー等に対する知財のライセンス供与を事業の基盤としている。

2018年4月には米Dell Technologies Capitalと米Cisco Investments、米Kingston Technology、米Schlumbergerなど8社、うち5社で2970万米ドルの出資を受け、製品開発を加速させている。

用途

現在主流のフラッシュメモリーに比べ、消費電力が4分の1以下と少ない利点を生かし、様々な情報端末機器への搭載を想定。大容量化により、DRAMの代替を究極の目標としている。

プレイヤー

単層CNT : Nano-C（米国）
NRAM技術の開発 : Nantero（米国）

(4) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- 単層CNTは川下領域での実用化が最大の課題、高純度化等に向けた合成・分離方法の開発が進む。
- グラフェンや有機半導体などの競合素材も、FETチャネル材としての応用は道半ばとなっている。

(単層CNTの原料調達面)

- ✓ 単層CNTの合成はアーク放電法とCVD法に大別でき、大量生産には原料ガスと触媒を用いるCVD法が適している。一般的に、原料ガスは炭化水素系ガス（トルエン、エチレン、メタン、等）、触媒は鉄を中心としてニッケル、コバルトなども用いられる。
- ✓ 単層CNTにおいては川上の原料調達よりも、川下領域での実用化に向けた課題が多い。

※国内企業においては高純度化等に向けた合成方法や分離方法の開発が進んでいる。

- 合成方法：産業技術総合研究所（産総研）が2004年にスーパーグロース法（SG法）、2006年に直接熱分解合成法（e-DIPS法）を開発した。
- 分離方法：単層CNTは金属型と半導体型の混合物として合成されるため、電気的な応用を図るうえでは合成時に金属型と半導体型を作り分ける、あるいは合成後に分離精製する必要がある。現状では選択的に合成することは難しく、分離精製による方法が実用化に最も近いとされている。2018年にNEC、産総研、名城ナノカーボンの3社が、世界初の非イオン性分散剤を用いた半導体型CNT製造技術として電界誘起層形成法（ELF法）を確立した。

(代替素材の開発状況)

- ✓ FETのチャネル材として、グラフェンや有機半導体の研究開発が進められている。
- ✓ グラフェンは量産に向けた合成方法の確立、バンドギャップの付与などが大きな課題となっている。グラフェン-FETの実用化は2030年以降が予想される。
- ✓ 有機FETに使われる材料は、低分子タイプではルブレン・ペンタセンなどのアセン類をはじめ、ジナフトチエノチオフェン、オリゴチオフェン、ポルフィリンなどのp型半導体、ペリレンジイミド、テトラシアノキノジメタン、フラレーンなどのn型半導体がある。高分子タイプではポリチオフェンやポリフルオレン、ドナーアクセプター型ポリマーなどが代表的である。移動度向上、しきい値の低電圧化、長寿命化、ドーピングや微細加工技術の確立など実用化に向けた課題は様々である。

(5) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- 単層CNTの研究開発においては日本が先行しているものの、多層CNT市場で量産技術を蓄積している中国企業の追い上げが予想される。
- エレクトロニクス分野での実用化に向け、日本発の合成・分離技術を生産効率やコストを考慮しながらさらに高度化させていくことが重要と考えられる。

	(原料)	(素材)	(製品・用途)	
	原料ガス:炭化水素系ガス 触媒:鉄、コバルト、ニッケル,等	単層CNT	電界効果トランジスタ (Field Effect Transistor:FET)	不揮発メモリ
課題・リスク	—	● 中国企業の台頭 多層CNTの主要サプライヤーは中国企業であり、数百～数千トン規模の生産体制を整備。 - 多層CNTの量産技術の蓄積を武器として、単層CNT市場でも中国企業の追い上げが予想される。	● 要素技術の確立 FETにおいては、バンドギャップを揃えるための位置・配向制御、ソース・ドレイン電極とCNTチャネルのコンタクト抵抗低減などに関する技術の確立が急がれる。 - 不揮発メモリでは、大容量化や微細化に関するロードマップが発表されているものの、その実現性は不透明である。	
対応策	—	● 合成技術、分離技術のさらなる高度化 日本で開発されたSG法やe-DIPS法、ELF法などの技術を、生産効率やコストを考慮しながらさらに高度化させていく。		

06-3. グラフエン

- (1) 概要
- (2) 世界需要・供給
- (3) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- (4) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- (5) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

(1) 概要

- グラフェンは、六角形2Dハニカム格子を形成した炭素原子1個分（単層）の厚みをもつ2次元のシート材料である。機械的特性（引張り強度 1TPa）や熱伝導性（熱伝導率 $\sim 5000\text{W/mK}$ ）等に優れるほか、非常に高い電子移動度（理論値 $20\text{万cm}^2/\text{Vs}$ ）、可視域の広い範囲での高い光吸収率（2.3%）などの特長を有する。
 - 通常、炭素 2～10原子層の厚さを有するものは「少数層グラフェン」と分類され、「グラフェンナノプレートレット」（GNP）とも呼ばれている。原子層が10層を超える（多くは100層を超える）ものが黒鉛（グラファイト）である。現在、工業的に製造されているグラフェン材料には、グラフェンパウダー、GNP、グラフェンナノリボン（GNR）、酸化グラフェン（GO）、還元型酸化グラフェン（rGO）、グラフェン膜などがある。
 - グラフェンの製造方法は、未だ確立されているとは言えず、様々な研究機関・企業で高品質グラフェンの量産化に向けた研究開発が進められている。主な製造方法は以下のとおりである。
- ✓ スコッチテープ法（機械的剥離法）：スコッチテープの粘着性を利用してグラファイト結晶面を剥離し、それを任意基板上にこすり付けることにより一層あるいは多層のグラフェンシートを得る。
 - ✓ 酸化・還元法：グラファイト粉末を濃硫酸中で過マンガン酸カリウムを用いて酸化した後、遠心分離と純水への分散を繰り返すことで単層に剥離する。遠心分離の前に超音波を印加する方法もある。
 - ✓ 熱（触媒）CVD法：Pt、Ni、Ru、Cuなどの遷移金属基板を用いて、炭化水素ガスを $1,000^\circ\text{C}$ 程度の温度下で、金属触媒との反応により熱分解させグラフェンへと成長させる。任意基板上へのグラフェン転写が必要。
 - ✓ プラズマCVD法：Pt、Ni、Ru、Cuなどの遷移金属基板を用いて、プラズマ中の電子およびイオンの衝撃により炭化水素ガスを解離させることでグラフェンを得る。任意基板上へのグラフェン転写が必要。
 - ✓ 熱分解法：SiCを真空中で $1,200^\circ\text{C}$ 以上の高温加熱を行い、Si原子を表面から昇華させることでグラフェンを得る。
- グラフェンは電気、光学、機械などの多様な特性を兼ね備えることから、エレクトロニクスをはじめ複合材料、エネルギー、コーティングなど幅広い分野への応用が期待されている。

(2) 世界需要・供給

【世界需要】

- グラフェン（グラフェンパウダー、GNP、GNR、GO、rGO）の世界需要は、およそ200tと推計される。
- 当初は透明電極としての実用化に向けた研究開発が活発化していたが、近年はエネルギー分野や複合材料向けで需要が立ち上がっている。
- 具体的な用途は電気二重層キャパシタ（EDLC）電極や二次電池の電極・導電助剤、自動車部品、自転車のフレーム、テニスラケット、スポーツシューズ、イヤホンの振動板、タイヤ添加剤など。なかでも、EDLCと二次電池（主にリチウムイオン電池）をターゲットに事業を展開する企業が多い。また、樹脂やゴムの複合材向けなどとしてカーボンブラック代替が可能となれば、需要の大幅な増加を期待できるため、海外では年産数百～数千t規模の生産能力を整えている企業も少なくない。

表.6-3-1 グラフェンの需要分野・用途

区分	具体的用途例	備考
エレクトロニクス	トランジスタ、IC	電界効果トランジスタ（FET）、スピントロニクスへの応用
	センサー	バイオセンサー、イオンセンサー、ガスセンサー、赤外線センサーなど
	コンデンサー	電気二重層キャパシタ（EDLC）の電極材
	透明電極	ITO代替としてタッチパネル、太陽電池、有機EL等への応用
複合材料	樹脂複合材	スポーツ用品、自動車部品など
	ゴム複合材	シューズソール、タイヤなど
エネルギー	リチウムイオン電池	負極材・導電助剤
	燃料電池	電極触媒としてPt触媒代替
コーティング	導電インク	タッチパネルやプリントエレクトロニクスへの応用
	塗料	静電塗装用プライマーなどへの応用
その他	放熱材料	ヒートシンク、ヒートスプレッドなど
	3Dプリンタ材料	樹脂フィラメントなどに配合
	生体材料	ドラッグデリバリー
	ガスバリア膜	封止膜、真空・密閉容器、生体・食品容器など

(2) 世界需要・供給

【世界供給】

- グラフェンの世界供給能力は、およそ8,000t/年（2019年末時点）と推計される。NanoXplore（カナダ）が4,000t/年と世界最大の生産体制を構築。その他、The Sixth Element（中国）1,000t/年、Standard Graphene（韓国）700t/年、Perpetuus Advanced Materials（英国）500t/年、Ningbo Morsh Technology（中国）300t/年など。日本企業はパイロットプラントでのサンプル出荷にとどまっている。
- 多くの企業が剥離法や酸化還元法を用いたパウダー状あるいは分散液として供給しており、膜状のグラフェンを製造する企業は少ない。
- エリア別でみると、NanoXploreが立地する北米が50%を超えるシェアを有するものとみられる。これに、グラフェンの原料となるグラファイトが豊富な中国、「Graphene Flagship」など大型の研究開発プロジェクトを有する欧州が続く。

表.6-3-2 主要グラフェンメーカーの供給能力

企業	国	生産能力 (t/年)	主要生産品目
NanoXplore	カナダ	4,000	グラフェンパウダー
The Sixth Element	中国	1,000	グラフェンパウダー, GO, rGo
Standard Graphene	韓国	700	GO, rGo
Perpetuus Advanced Materials	英国	500	GNP
Ningbo Morsh Technology	中国	300	GNP
Taiwan Carbon Nano Technology	台湾	250	GO
KnanoGraphene Technology	中国	200	グラフェンパウダー, GNP
XG Sciences	米国	200	GNP
Global Graphene Group	米国	200	GO, rGO
仁科マテリアル	日本	－	重金属フリーGO, GO, rGo
グラフェンプラットフォーム	日本	－	グラフェンパウダー, グラフェンインク
インキュベーション・アライアンス	日本	－	グラフェンフラワー, グラフェンチューブ
ADEKA	日本	－	グラフェンパウダー
日本触媒	日本	－	GO, rGo, MGO
大阪ガスケミカル	日本	－	多層グラフェン
石原ケミカル	日本	－	グラフェンパウダー

(3) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 電界効果トランジスタ (Field Effect Transistor:FET)

概要

グラフェンの理論的な電子移動度は $20\text{万cm}^2/\text{Vs}$ と、代表的な半導体材料であるシリコンの100倍以上に達するものと予測されている。このことは、グラフェンをチャネル材料に用いることで高速低消費電力のトランジスタを実現できることを示唆している。同じナノカーボン材料であるCNTと比べると、2次元の材料であるグラフェンは薄膜加工が中心となる半導体プロセスとの親和性が高い。

ただ、グラフェンは逆格子空間におけるK、K'点付近で電子・正孔が対称な線形分散特性を有し、伝導帯と価電子帯が1点で交わることからバンドギャップはゼロとなる。そのため、高いオン/オフ比が要求されるデジタル信号用トランジスタとしては利用できないという問題がある。そこで、近年はグラフェンにバンドギャップをもたせる方法が盛んに検討されている。従来、IBMやSamsungなど半導体関連メーカーが、グラフェンFETの実用化に向けた研究開発を推進してきた。しかしながら、グラフェンの量産技術が未だ確立していないことなどから、その動きが鈍化する傾向にある。

製造方法

グラフェンFETの研究初期においては、機械的剥離により得られるグラフェンを基板上に転写する手法が採られていたが、グラフェンの寸法や位置を制御することや大面積のグラフェンを得ることが困難で、量産には不向きであった。このため、近年はSiC 基板を用いた熱分解法やCVD法、酸化・還元法をベースとしたチャネル形成が試みられている。

グラフェンにバンドギャップをもたせる方法としては、2層グラフェンやグラフェンナリボンの適用が挙げられる。2層グラフェンもバンドギャップはゼロであるが、垂直電界を印加することでバンドギャップを開くことができる。グラフェンナリボン (GNR) はグラフェンをナノメートルサイズの幅に切り出した帯状の物質であり、グラフェンから引き継がれる優れた電子移動度に加えて、バンドギャップと高いオン/オフ比をもつことが理論的に予想されている。その合成方法は、レーザーを用いたリソグラフィー法によってグラフェンからGNRを切り出す方法 (トップダウン合成法)、有機小分子を用い、さまざまな有機合成化学的手法注や金属表面重合法によって段階的に組み上げてGNRを得る方法 (ボトムアップ合成法) に大別される。

用途

LSI (シリコンMOSFET代替)、バイオセンサー、ガスセンサー、等

プレイヤー

IBM (米国)、BGT Materials (英国)、HRL Laboratorie (米国)、IHP Microelectronics (独)、Samsung Electronics (韓国)、物質・材料研究機構、東京大学、東北大学、富士通研究所、等

(4) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- エレクトロニクス分野向け黒鉛の最適なスペックの把握、調達ルートの確立が重要
- FETチャネル材としてグラフェンや有機半導体の開発が進むも、実用化に向けた課題は山積み

(グラフェンの原料調達面)

- ✓ グラフェンの原料は合成方法によって異なる。CVD法では炭化水素ガスと金属触媒、機械的剥離法や酸化・還元法では天然黒鉛および人造黒鉛が用いられており、炭化水素ガスや金属触媒においては調達面での不安要因は見当たらない。一方、天然黒鉛や人造黒鉛はグラフェンのさらなる需要の拡大とともに、サプライチェーン上のチョークポイントとなりそうである。
- ✓ 現状、用途・ユーザーごとに結晶性や粒度、純度などを最適化するべく様々な天然黒鉛・人造黒鉛がグラフェンの原料として使用されている。一般に、天然黒鉛は結晶性が高く、人造黒鉛は不純物や粒度、構造等の品質管理が容易といった特長を有する。
- ✓ 近年は天然、人造を問わず車載用を中心としたLiB負極材向けの需要が好調。世界が脱炭素の動きを強めるなか、自動車の電動化の進展に伴ってLiB向けの需要は今後も拡大していくものと予想され、黒鉛の需給バランスの悪化や価格上昇につながる可能性がある。
- ✓ そのため、FET向けなどのエレクトロニクス分野にはどのようなスペックの黒鉛が必要となるかを早期に把握し、調達ルートを確立していくことが重要といえる。

(代替素材の開発状況)

- ✓ FETのチャネル材として、単層CNTや有機半導体の研究開発が進められている。
- ✓ 単層CNTは合成・分離方法の開発が進む傾向にあるが、様々な技術課題が残されている。単層CNT-FETの実用化は2030年以降が予想される。
- ✓ 有機FETにおいても移動度向上、しきい値の低電圧化、長寿命化、ドーピングや微細加工技術の確立など実用化に向けた課題は山積みとなっている。

(5) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- グラフェンの量産技術が確立されていないこと、半導体メーカーにおいて研究開発の動きが鈍化する傾向にあることなどから、グラフェンFETの実用化に遅れが生じている。
- LiB負極材向けの需要拡大を背景に、黒鉛の需給バランスの悪化や価格上昇の懸念がある（LiB負極材と同じ黒鉛を原料に用いる場合）。

	(原料)	(素材)	(製品・用途)	
	天然黒鉛鉱石 石炭、重質油	黒鉛（天然／人造）	グラフェン （酸化・還元法、機械的 剥離法）	電界効果トランジスタ （Field Effect Transistor:FET）
課題・リスク	—	● 黒鉛の供給不安の懸念 グラフェンFETに最適な黒鉛を探求している段階にある。 LiB負極材と同じ黒鉛を用いる場合には、同用途向けの需要拡大に伴う需給バランスの悪化や価格上昇の懸念が高まる。	● 量産技術の確立 酸化・還元法であれば酸化グラフェンの還元工程に係る技術の確立など、グラフェンの量産化が最大の課題となっている。 グラフェンFETの実用化に向けては、バンドギャップの付与などが課題である。	● 実用化の遅れ IBMやSumsungなど半導体関連メーカーが実用化に向けた研究開発を推進してきた。しかしながら、最近はその動きが鈍化する傾向にある。
対応策	—	● 調達ルートの確立 グラフェンFETに最適な黒鉛を早期に見出し、最適な調達ルートを確立する。	● 政府の支援強化 Graphene Flagship（欧州）など、海外ではグラフェンの研究開発に対する公的支援が手厚い。日本ではCNTに支援が偏重しているとの声もあり、グラフェンを対象とした政府の支援強化への期待感大きい。	

06-4. 活性炭

- (1) 概要
- (2) 世界需要・供給
- (3) 日本の輸出入等の動向
- (4) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- (5) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- (6) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

(1) 概要

- 活性炭とは、有機質原料を炭化・賦活することで得られる炭素を主成分（多くは90%以上）とする多孔質固体である。内部表面積が極めて大きく、有機物を中心に様々な物質を吸着させる性質がある。
- 活性炭はその形状から粉末炭、粒状炭、繊維状に大別され、さらに粒状炭は不整粒子の破碎炭、円柱状・球状の成形（造粒）炭、成形炭の破碎品である顆粒炭に分類される。
- また、賦活方法によりガス賦活法炭と薬品賦活法炭とに分けられ、粒状炭は主にガス賦活法（海外では薬品賦活法もある）、粉末炭は薬品賦活法およびガス賦活法の何れによっても製造される。
- ガス賦活法では原料を不活性ガス中で炭化した後、各種の酸化性ガス（水蒸気、二酸化炭素など）により賦活処理を行う。炭化は一般に800℃以下、賦活は700～1000℃の温度下で行なわれる。薬品賦活法は原料に化学薬品を混和、浸透させた後、酸素を含まない不活性ガス中で徐々に温度を上げ炭化、賦活する方法である。賦活に用いられる薬品は塩化亜鉛やリン酸など。賦活薬剤に水酸化カリウム、水酸化ナトリウムを用いる場合はアルカリ賦活法と呼ばれている。
- 原理的に炭化できる物質はすべて活性炭原料の対象となるが、現在は安価で大量・安定的に調達できるおが屑、ヤシ殻、石炭などが主流となっている。また、近年は廃棄物のリサイクルを目的にさまざまな有機系廃棄物の活性炭化が試みられている。
- 活性炭はその優れた吸着性を活かし、幅広い分野で使用されている。具体的には食品工業分野での砂糖や清酒類の精製・浄化をはじめ、医薬品分野での液相脱色・分離精製、化学工業分野での工程ガス精製・分離、溶剤回収、各種排ガスの脱臭、排オゾンの処理、触媒および触媒担体等である。

(2) 世界需要・供給

【世界需要】

- 活性炭の世界需要は2019年でおおよそ200万 t になるとみられる。エリア別では中国と北米の需要が大きい。
- 今後も大気・水質汚染に悩む新興国を中心に、水処理や排ガスの不純物除去などに使う活性炭の需要は堅調に推移していくものと予想される。

【世界供給】

- 供給面では日米欧の企業が主導するM&A、中国企業などの新規参入が進んでいる。日本勢では、大阪ガスケミカルが2014年に世界シェア3位の座にあったスウェーデンJacobi Carbonsをグループ傘下に収め、海外展開を加速。クラレは2018年に世界シェアトップの米国Calgon Carbonを12億9,700万ドルで完全子会社化した。なお、Calgon Carbonは、2016年に仏アルケマから活性炭事業を展開するCECAを買収している。
- 中国では環境規制の強化に伴い活性炭の需要が急増。木質系でFujian Yuanli Active Carbon、石炭系ではNingxia Huahui Activated Carbonなど多数の企業が市場参入を図っている。こうした新興国を中心としたサプライヤーの増加によって、活性炭市場には過剰生産の懸念があるとされている。

表.6-4-1 活性炭の主なサプライヤー

企業	本社	生産拠点	備考
クラレ	日本	日本、フィリピン、中国、米国、英国、ベルギー、フランス、イタリア	2018年に米国Calgon Carbon買収
大阪ガスケミカル	日本	日本、フィリピン、マレーシア、スウェーデン	2014年にスウェーデンJacobi Carbons買収
Cabot	米国	日本、米国、カナダ、イタリア、オランダ、英国	2012年にオランダNORIT買収
Donau Carbon	ドイツ	ドイツ、オーストリア、フランス、米国、フィリピン	2016年に米国子会社が米国Standard Purificationと合併
Ingevity	米国	米国、中国	2015年に米国WestRockより分社化
中国・木質系	Fujian Yuanli Active Carbon、Fujian Xinsen Carbon、Fujian Zhixing Activated Carbon、Quzhou Yunhe Carbon、Shanghai Xingchang Activated Carbon、他		
中国・石炭系	Ningxia Huahui Activated Carbon、Datong Coal Jinding Activated Carbon、Shanxi Xinhua Chemical、Inner Mongolia Taixi Coal、Shanxi Huaqing Activated Carbon、他		

(3) 日本の輸出入等の状況

- 活性炭の輸入状況をみると、最大の輸入相手国である中国からの輸入量は、2019年で44,350t。前年から9,542t減少し、シェアは51.0%と前年より9.1ポイント低下した。その他の輸入相手国はフィリピン、マレーシア、インド、米国、インドネシア、ベトナム、スリランカなど。近年は、インドからの輸入量が増えている。
- 輸出は韓国、中国、米国、台湾が主な相手国であり、ここ数年はオランダ向けが増加傾向にある。

表.6-4-2 活性炭の輸出入量推移

活性炭 3802.10 000

輸入					輸出				
				単位：t					単位：t
国名	2016年	2017年	2018年	2019年	国名	2016年	2017年	2018年	2019年
中国	51,395	50,822	53,892	44,350	韓国	1,990	1,953	2,125	2,475
フィリピン	7,732	10,836	9,163	12,717	中国	1,972	2,893	2,798	2,470
マレーシア	5,614	6,330	7,529	8,702	米国	2,935	2,278	1,249	2,448
インド	1,074	2,018	4,938	6,541	オランダ	290	95	448	1,132
米国	5,934	6,415	4,613	5,098	台湾	1,027	1,138	1,074	999
インドネシア	3,039	3,261	3,366	3,598	インド	831	683	796	476
ベトナム	1,506	1,654	1,928	2,401	ベトナム	146	132	105	270
スリランカ	1,855	2,113	2,315	2,189	ドイツ	449	606	931	215
その他	1,709	2,732	1,932	1,446	タイ	185	218	239	214
合計	79,858	86,181	89,676	87,041	その他	1,078	999	1,099	1,165
（中国依存度）	64.4%	59.0%	60.1%	51.0%	合計	10,902	10,992	10,865	11,866

出所：財務省貿易統計

(3) 日本の輸出入等の状況

- 経済産業省生産動態統計年報によると、活性炭の2019年生産量は44,619t（前年比98.2%）となった。内訳は粒状活性炭29,626t（同96.7%）、粉状活性炭14,993t（同101.2%）。
- ここ数年は安価な輸入品が増加傾向にあったが、2019年の輸入量は87,041t（同97.1%）と前年実績を割り込んだ。輸出は単価が高い機能品が中心となっており、2019年は11,866t（同109.2%）と大きく伸長。この結果、2019年の内需（販売＋輸入－輸出）は114,919t（同96.6%）となった。

表.6-4-3 活性炭の国内生産・国内販売・輸出入量推移

（単位：t）

区分		2016年	2017年	前年比	2018年	前年比	2019年	前年比	出典
活性炭	生産	50,386	47,669	94.6%	45,454	95.4%	44,619	98.2%	経済産業省生産動態統計年報 化学工業統計編
	販売	43,907	40,964	93.3%	40,118	97.9%	39,743	99.1%	
	輸入	79,858	86,181	107.9%	89,676	104.1%	87,041	97.1%	財務省貿易統計
	輸出	10,902	10,992	100.8%	10,865	98.8%	11,866	109.2%	
	内需	112,863	116,153	102.9%	118,929	102.4%	114,919	96.6%	-

表.6-4-4 種類別活性炭の国内生産・国内販売推移

（単位：t）

区分		2016年	2017年	前年比	2018年	前年比	2019年	前年比	出典
活性炭 （粒状）	生産	32,224	31,272	97.0%	30,633	98.0%	29,626	96.7%	経済産業省生産動態統計年報 化学工業統計編
	販売	28,420	27,772	97.7%	26,252	94.5%	25,849	98.5%	
活性炭 （粉状）	生産	18,162	16,397	90.3%	14,821	90.4%	14,993	101.2%	
	販売	15,487	13,192	85.2%	13,866	105.1%	13,894	100.2%	

(3) 日本の輸出入等の状況

- 活性炭はその優れた吸着能力から、水処理や空気浄化を中心とした用途展開が活発に図られてきた。
- 種類別に用途をみると、粒状活性炭では水処理用途が全体の国内需要の40%程度を占めている。近年は高度浄水処理システム向けの需要が堅調であったが、都市部を中心に同システムを導入する施設整備が一巡。需要は頭打ちとなっている。
- 粉状活性炭は工業薬品、水処理、醸造・アミノ酸が3本柱となっており、これらを合わせるとおよそ70%超の構成比となろう。繊維状活性炭は水処理や空気浄化が中心である。
- ハイエンド領域として電気二重層キャパシタ（電極）、自動車部品（キャニスター等）などがある。

表.6-4-5 活性炭の主な用途

種類	需要分野	主な用途
粒状	水処理	上下水道処理、産業排水処理、家庭用浄水器、超純水
	その他の液相処理	脱色・精製、醸造、貴金属の回収
	空気浄化	空調機、オゾン分解、ガスマスク、自動車部品
	脱臭	下水・し尿処理、工場排ガス、冷蔵庫脱臭剤
	ガス分離・溶剤回収	窒素酸化物の分離、アルコールなどの回収
粉状	工業薬品	染料、写真薬品、メッキ
	水処理	上下水道、排水処理
	醸造・アミノ酸	清酒、焼酎、洋酒、脱色
	澱粉・精糖	ブドウ糖、精糖、油脂
	医薬品	抗生物質、その他医薬品
	エネルギー	電気二重層キャパシタ電極
繊維状	水処理	浄水器
	空気浄化	空調機
	エネルギー	電気二重層キャパシタ電極

出所：各種資料をもとに矢野経済研究所作成

(4) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 電気二重層キャパシタ（EDLC）電極

概要

電気二重層キャパシタ（EDLC：Electric Double Layer Capacitor）は、電極と電解液界面に生じる電気二重層を利用した蓄電デバイスである。二次電池と比較すると、電気容量が小さいものの、急速な充放電が可能であり、繰り返し使用による性能低下が非常に少ないという特徴がある。主要構成部材は、①電気二重層を形成するための分極性電極、②電荷を出し入れするための集電体、③分極性電極との界面に電気二重層を形成するための電解液、電解質、④電極同士の絶縁を保持するためのセパレータ、⑤外装ケース等である。電極の材料には、比表面積が高い活性炭が主に利用されている。

製造方法

EDLC電極用活性炭の賦活には、水蒸気賦活あるいはアルカリ賦活が用いられる。椰子殻系は水蒸気賦活が一般的であり、フェノール樹脂は両方法が可能。石油コークスやピッチ系は賦活能力の高いアルカリ賦活が採用されている。アルカリ賦活は得られる活性炭の体積容量が大きく、細孔も一定の均一なものができるが、賦活後に洗浄、濾過、乾燥を繰り返して行うため生産コストの上昇につながる。

また、電極材の製造方法には活性炭をスラリー化してアルミ箔等の集電体に塗布するコーティング工法と、活性炭と導電助剤その他の添付剤をバインダー（PTFE など）と混練した後にシート状に成形（シート電極）するシート工法がある。一般にEDLCの小容量品はシート工法が多いとされるが、コーティング工法を採用するメーカーも少なくなく一定していない。これは中～大容量品も同様で、同分野で多い捲回型はコーティング工法が一般的と言われているが、シート工法もまれではない。

用途

スマートフォン（RTCやメモリー等のバックアップ電源、アプリケーション駆動時の電力アシスト、等）、AV機器・家電（CMOS IC、マイコン、RAM、RTC等のバックアップ電源）、産業機器（各種制御機器、セキュリティ機器、エンコーダー、シーケンスコントローラー等）のバックアップ電源、自動車や建設機械等の回生システム、他

プレイヤー

クラレ、大阪ガスケミカル、MCIバテック、ATエレクトロード、Cabot（米国）、等

(5) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- 原料となるヤシ殻やフェノール樹脂、石油コークスの調達は安定的である。
- 使用済み活性炭の再生システムを確立、代替素材ではグラフェンの実用化時期が近づきつつある。

(活性炭の原料調達面)

- ✓ EDLC電極用活性炭の原料には、主にヤシ殻やフェノール樹脂、石油コークスが用いられる。ヤシ殻系活性炭は細孔分布が広く灰分が多いが、価格は最も安い。石油コークス系活性炭から得られる電極は高純度で高い体積当たり容量を示す。フェノール樹脂系活性炭は金属分を含まず、高純度であるものの高価である。
- ✓ ヤシの実からヤシ殻系活性炭を製造する場合、炭素部分が多いヤシの実の内果皮（シェル）のみが利用される。ヤシの実には年に3回程度収穫できるため資源枯渇の心配がないとされており、日本企業はヤシの実が豊富な東南アジアに生産拠点を設けることで原料調達の安定化を図っている。フェノール樹脂など、その他の原料の調達にも短期的な不安定要素は見当たらない。

(回収再利用の取り組み)

- ✓ 使用済み活性炭を再賦活することで、吸着能力を回復（再生）させることができる。一般的には流動炉やロータリーキルンで800～1000℃の高温により炭化・賦活しており、日本の主要企業の多くは再生専用設備を保有している。

(代替素材の開発状況)

- ✓ EDLCの電極材料として、単層CNTやグラフェンの開発が進められている。
- ✓ 単層CNTを用いたEDLC電極は、NEDO「カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト」（2006～2010 年度）において、EDLC メーカーである日本ケミコンが開発に成功した。日本ケミコンではプロジェクト終了後も継続して研究開発に取り組み、充放電中に生じる電極の体積変化を大幅に抑制できる技術、シートの連続生産が可能なRoll to Roll装置を開発。材料コストを抑制するため小型EDLC用電極としての製品化を目指している。
- ✓ グラフェンは活性炭やCNTよりも比表面積が大きく、導電性にも優れている。比表面積の大きさは、高エネルギー密度による蓄電性能の向上につながる。優れた導電性は高出力密度を実現することができるため、高速放電により瞬時に大出力を発揮し、急速充電も可能となる。こうした特長が評価され、日本でもグラフェン電極の実用化時期が近づきつつある。

(6) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- 日本のEDLC市場では、期待された自動車回生用途が伸び悩む傾向にある。
- EDLCメーカーによる用途開拓が進展しない場合、活性炭電極の需要低迷につながる。

	(原料)	(素材)	(製品・用途)
	ヤシ殻、フェノール樹脂 石油コークス	活性炭 EDLC電極	EDLC
課題・リスク	潜在的には以下のような課題・リスクが考えられる。 ● 地球温暖化 ヤシ生産地の変化による、ヤシ殻の調達不安定化 ● 脱炭素化 石油の生産量減少を背景とした石油コークスの需給バランス悪化、価格の上昇	● EDLCの用途が広がらないことによる、EDLC電極用活性炭の需要低迷 ● 自動車分野を中心とする出力重視のEDLC開発への対応	● 需要の伸び悩み 自動車向けに期待が集まるが、回生用途では蓄電性能に加え、急速充電・長寿命を兼ね備えるLiBに需要がシフト
対応策	● 長期的な視点での供給源（ヤシ殻）の多角化	● 細孔内の抵抗低減などによる、電極の一層の低抵抗化	● 新規用途開発 自動車のバイワイヤ化・電装化等に伴うバックアップ電源の増加、電源に対するニーズの多様化への対応

07. タングステン（W）

- （１）概要
- （２）世界需要・供給
- （３）日本の輸出入等の動向
- （４）主要国（中国）における生産・輸出管理動向
- （５）エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- （６）国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- （７）サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

(1) 概要

- タングステンは熱に強く、硬く、重いという特徴がある。タングステンの融点は金属の中で最も高い3380℃で、沸点は5000℃を超える（鉄の融点は約1500℃）。
- タングステンは炭素（C）と結合すると非常に硬くなり、モース硬度ではダイヤモンドの「10」に次ぐ「9」にランクされる。比重は19.3と金とほぼ同じで、鉄の2.5倍、鉛の1.7倍である。
- 主なタングステン鉱石は、鉄マンガン重石（ $(\text{Fe}, \text{Mn}) \text{WO}_4$ ）や灰重石（ CaWO_4 ）である。これらの鉱石をアルカリによる分解浸出後、有機相と接触させてタングステンを有機相に抽出し、アンモニア水と接触させてタングステンを逆抽出し、APT（パラタングステン酸アンモニウム）ができる。
- また、イオン交換樹脂法によっても分解浸出液からAPTを生成することができる。APTを加熱すれば三酸化タングステンが得られ、それを水素中で還元したものが金属タングステン（粉）である。日本はAPT、三酸化タングステン、フェロタングステン等を主に中国から輸入し、タングステン製品を製造している。
- タングステンは、高温度での硬度や耐熱性保持などの特性から、主として炭化物（タングステンカーバイト、WC）の形で超硬工具に用いられている。また、特殊鋼分野では、高速度鋼、耐熱鋼、強靱工具鋼等においてフェロタングステンが使用されている。
- 金属タングステン（金属タングステンやタングステン合金）は融点が高く、金属としては比較的大きな電気抵抗を持つという特性を利用し、線、棒、接点、電極棒に加工され、照明基部、電子機器、自動車、工作機械等に利用されている。その他にも、タングステン化合物が脱硝・高分子等の触媒、顔料、ダイヤモンドの副砥粒等で用いられている。
- 上記のように、タングステン製品は幅広い分野にわたるが、ここでは、エレクトロニクス分野における材料・アプリケーションとして、電子部品の加工（精密刃物等）にも用いられる超硬合金用のタングステンカーバイド粉に加え、集積回路配線材料（六フッ化タングステンを熱CVDにより形成）のタングステン源として利用されるタングステン粉、電池材料の添加剤として用いられる三酸化タングステン粉に注目した。

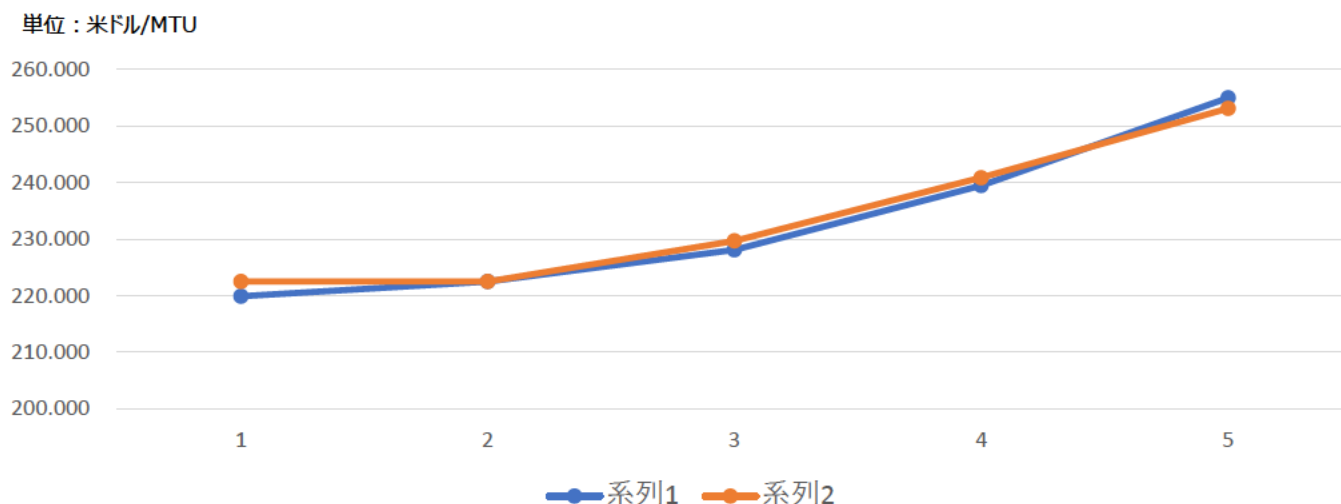
(2) 世界需要・供給

【世界需要】

2019年、2020年と低迷も、2020年秋以降回復トレンドが強まっており、APTの市況も上昇基調に転じる。

- 2013年以降の世界のタングステン需要量の公開データはないが、2018年頃までは拡大基調にあったものとみられる。しかし、米中貿易摩擦が本格化した2018年後半以降、タングステンの最大の需要先である超硬工具を中心に市場環境が悪化。世界経済の減速感が強まった2019年はタングステンの需要もマイナスに転じたものと見られる。
- 2020年も、新型コロナが世界経済や工業生産、特に自動車、商用航空宇宙、石油・ガス掘削産業などのタングステンを消費する最終用途部門に影響を与えた結果、2019年の需要量を下回るとみられている。
- しかし、2020年秋以降、中国を中心に需要が急回復しており、2021年は需要が持ち直す方向にあるようだ。日本国内のタングステン業界関係者によると、中国は2020年5月、6月の時点で自動車生産が回復しており、秋以降はタングステンの需要に直結する超硬合金の市場も回復が鮮明になってきているとのこと。実際、2020年11月、12月の時点で超硬工具市場の顕著な回復感に言及する報道が多く見られるようになっており、タングステン需要の指標となるパラタングステン酸アンモニウム（APT）の市況も2021年に入り、上昇トレンドが強まっている。

図.7-1 パラタングステン酸アンモニウム（APT）の市況推移



*各月の平均価格を算出し掲出。APT原料取引の価格単位であるMTUはMetric Ton Unitの略で、WO₃純分10kg当たりの価格。

出所：Metal Bulletin発表資料を基に矢野経済研究所作成

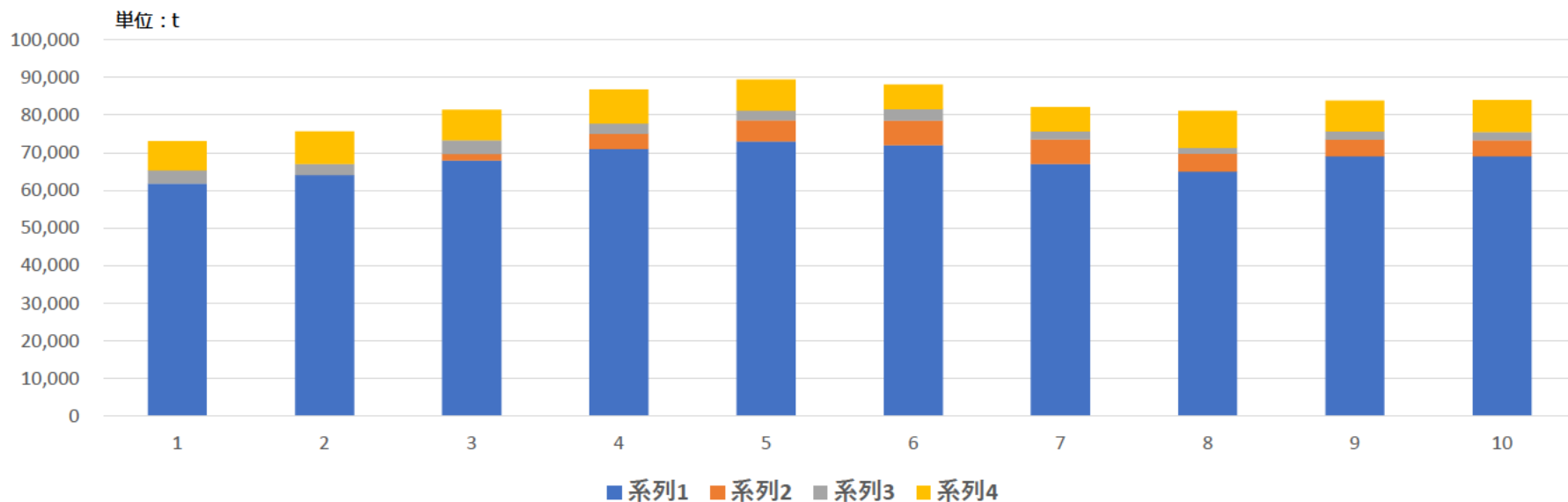
(2) 世界需要・供給

【世界供給】

世界のタングステン供給の80%超を中国が占める。

- 世界のタングステン供給に関しては、中国が世界供給の80%超を担うなど支配的な立場にある。タングステン資源自体は、カナダ、カザフスタン、ロシア、米国等にも相当規模あるとされるが、中国は、世界最大級のタングステン鉱床を有し、上流から下流に至るタングステン産業の集積度という観点からも高い競争力を誇る。
- 米USGSのレポートによると、2019年のタングステン供給量は世界で75,700t。このうち、中国は69,000t（シェア82.3%）を占めている。近年、中国政府は環境監査を厳格化するなどの規制を強化。その結果、小規模な鉱山やAPT製錬を中心に操業停止に追い込まれたこと等により、中国のタングステン供給量は減少する動きが見られた（USGSレポートのデータでは2015年の73,000tをピークに2018年まで減少）。2019年の中国によるタングステン供給は2018年の65,000tから増加しているものの、中国政府は引き続き採掘や加工に一定の制約を設けていることから、今後も世界のタングステン供給は中国の動向に依存する構図が続くとみられている。

図.7-2 タングステン鉱石生産量推移



*単位：t、2020年は推計値

出所：U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2021

(3) 日本の輸出入等の動向

- タングステンの主要用途である超硬工具は2019年、2020年と国内生産高が減少。これに伴い、超硬工具の主要資材である金属タングステン、炭化タングステンの消費も低迷。

表.7-1 超硬工具 生産及び輸出入の動向

(単位：百万円)

	超硬工具 生産高	(生産高 + 輸入) - 輸出	超硬工具 輸出額	超硬工具 輸入額
2016年	268,269	224,541	113,314	69,586
2017年	282,136	231,070	126,555	75,489
2018年	311,873	249,011	141,973	79,111
2019年	297,382	246,984	126,920	76,522
2020年	208,785	166,964	105,451	63,630
〈元データ〉	機械工具機械統計 (経済産業省)		機械工具貿易統計 (財務省)	

出所：日本機械工具工業会

表.7-2 超硬工具主要資材消費実績推移

上段：消費量 (kg)、下段：前年比 (%)

資材名	金属タングステン	炭化タングステン	金属コバルト粉	カーボン
2017年	1,292,310	4,977,520	544,313	205,403
2018年	1,504,361 (116.4%)	5,518,393 (110.9%)	592,983 (108.9%)	246,823 (120.2%)
2019年	1,254,162 (83.4%)	4,664,851 (84.5%)	513,342 (86.6%)	175,838 (71.2%)
2020年	1,101,402 (87.8%)	3,446,294 (73.9%)	387,749 (75.5%)	133,267 (75.8%)

出所：日本機械工具工業会統計資料130

(3) 日本の輸出入等の動向

- 製品出荷量の8割超が超硬合金用タングステン粉末となっており、国内需要の7割程度が自動車関連という構造。
- 合金及び工具として輸出されることが多く、タングステン（素材）製品自体は国内向けが中心。
- 2020年夏以降、国内の超硬用タングステン粉末の出荷は回復トレンドに。

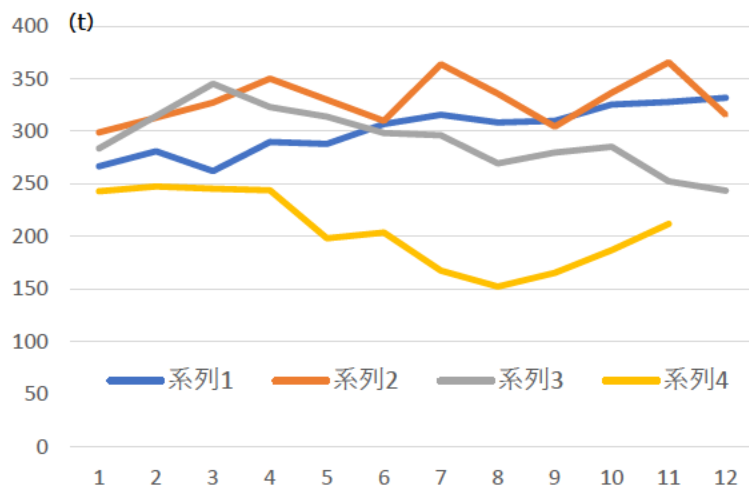
表.7-3 タングステン製品 需要別出荷推移

(単位：t)

	タングステン粉末			タングステン金属製品			
	超硬用	その他用	粉末 計	線及び棒	加工品他	合金他	製品 計
2015年	2,845	382	3,226	110	80	115	305
2016年	2,764	376	3,140	100	85	109	294
2017年	3,194	420	3,613	111	93	123	326
2018年	3,456	494	3,950	111	95	131	338
2019年	3,106	399	3,505	102	94	105	301

出所：タングステン・モリブデン工業会

図.7-3 超硬用タングステン粉末の月次出荷量推移



出所：タングステン・モリブデン工業会

- ✓ 世界で見れば、建築・土木、鉱山工具もそれなりに大きな需要を占めるが、国内では自動車関係の需要がメインとなる。
- ✓ 超硬合金や超硬工具として輸出されるケースもあるため、主要国（中国、米国、日本）の自動車生産台数の動きにある程度左右されるほか、特に工具の市中在庫の状況によっても超硬用タングステン粉の出荷動向が変わってくるとされる。
- ✓ 2019年春以降、前年を下回る水準に転じ、特に2020年は春から秋に掛けて低調な出荷であったことが伺えるが、2020年秋以降は回復基調にあり、足元ではかなり活況となってきたとの声も聞かれるようになっている。

(3) 日本の輸出入等の動向

- 日本国内では、主に海外から輸入したパラタングステン酸アンモニウム（APT）、三酸化タングステン（WO₃）、フェロタングステン（FeW）がタングステン原料として用いられている。
- APT（タングステン酸塩）の輸入量は2019年1575t、2020年823tと推移した。中国からの輸入量が圧倒的に多く次いでベトナムとなる。ここ数年ベトナムからの輸入量は増えておらず、中国のシェアが常に80%を超える水準にある。
- また、フェロタングstenは中国及びロシアから輸入されている。フェロタングstenは、特殊鋼分野での利用が中心となるが、一部タングsten原料としてリサイクル工程で用いられているものとみられる。なお、三酸化タングstenは、貿易統計にそれに相当するコードが設けられていない。金属酸化物が含まれる分類（2825.90）の「その他酸化物」（コード2825.90900）のうち、中国からの輸入を三酸化タングstenの推定値として扱う場合があるが、各国からの輸入状況を把握することができないため、ここでは割愛した。

表.7-4 タングstenの輸入状況（タングsten酸塩、フェロタングsten）

2841.80000 タングsten酸塩（ウォルフラム酸塩）

輸入	2017年	2018年	2019年	2020年	20/19
数量（kg）	1,755,647	1,509,646	1,574,895	823,480	52.3%
純分換算（70%）	1,228,953	1,056,752	1,102,427	576,436	52.3%
中国	1,415,000	1,342,000	1,461,100	702,000	48.0%
ベトナム	328,400	160,000	103,000	120,978	117.5%
ドイツ	237	1,636	2,637	492	18.7%
インド	2,000	6,000	8,000	-	-
その他	1,425,010	1,342,010	1,461,258	702,010	48.0%

7202.80010 フェロタングsten

輸入	2017年	2018年	2019年	2020年	20/19
数量（kg）	1,342,502	1,103,308	767,580	704,125	91.7%
純分換算（77%）	1,033,727	849,547	591,037	542,176	91.7%
中国	927,901	775,308	584,580	518,125	88.6%
ロシア	308,601	300,000	180,000	185,000	102.8%
その他	106,000	28,000	3,000	1,000	33.3%
タングsten酸塩及びフェロタングsten 合計（）	2,262,679	1,906,299	1,693,463	1,118,612	66.1%
中国（純分換算）	1,704,984	1,536,387	1,472,897	890,356	60.4%
中国依存度(数量ベース)	75.4%	80.6%	87.0%	79.6%	

(4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向

- 生産・輸出・産業育成の様々な面から、自国タングステン産業の強化が進められており、最近ではアモイタングステンといった大手企業グループの海外展開も加速している。
- 2020年12月に施行された「輸出管理法」では、今のところタングステンは規制対象とはなっていないが、日本国内の業界関係者の間でも、「いつ規制対象になるかという危機感はある」との声が多く聞かれた。

（生産管理関連政策）

- ✓ 2005年に「市場参入」条件が制定されて以降、国家が認可・内定したローカル企業だけが許可証（鉱山資源探査権許可書・鉱山採掘権許可書）の発行対象に限定された。
- ✓ また、「総量制御（割り当て）」制度を実施しており、全国トータル年間最大採掘量を事前発表している。現在タングステンの年間最大採掘量を定める「全国鉱物資源計画（2021～2025）」を策定中である。少し前までは違法採掘の問題が根強く残っていたが、政府の取り締まり強化により、2019年頃には実質採掘量がほぼ割当量のレベルまで低減できていると伝えられている。

（輸出管理関連政策）

- ✓ タングステン資源の無秩序な採掘、海外への原材料流出、タングステン販売単価の低下などの問題を解決するため、2003年頃より輸出税金還付率の低減や輸出関税の増税、輸出企業の許可証管理強化等の対策を行っている。
- ✓ 中国政府は毎年「タングステン・アンチモン・シルバー国営貿易輸出企業リスト」を発表し、輸出許可証管理を強化している。最新リスト（2019年12月6日）では、Fanyaが保有していたAPT在庫を買収した洛陽栾川鉬業集団销售有限公司（China Molybdenumグループ）が初めて収載された。

（産業育成関連政策、他）

- ✓ 近年、中国政府は、ハイエンド製品であるタングステン超硬合金の輸出促進を中心に、中国タングステン産業の健全な発展に向けた中長期戦略を策定。輸出税金還付率の調整だけでなく、ハイエンド加工技術企業の招致を目的とした各種の優遇策、タングステン関連の重点実験室の開設、有力企業の海外進出サポートなどを行っている。
- ✓ 2020年9月に施行された「資源税法」では、タングステンの資源税率（6.5%）に変更はなかったものの、徴収対象が精鉱へと変更されたほか、免除・控除対象が更に具体的に記載された。これにより、上流から下流に広がるタングステンに係るサプライチェーンが強化されることが予想される。

② 中国におけるタングステンの生産概況

【メインプレイヤーの顔ぶれ】

注目すべき企業

川上から川下まで複数の事業を統合している大手グループの存在感が大きく、以下の10社は中国タングステン市場の約8割のシェアを占めていると見られている。中でも、廈門鎢業股份有限公司（アモイタングステン）は、カザフスタンの鉱山会社を買収したり、タイで超硬合金の生産に乗り出したりと、国内外での活発な事業展開で存在感を発揮している。

表.7-5 中国タングステン市場のメインプレイヤー

No.	企業名	強み
1	中鎢高新材料股份有限公司	中国最大の超硬合金メーカーで、中国唯一の超硬合金国家実験室を保有
2	江西鎢業控股集团有限公司	タングステン精鉱メーカー、傘下企業を117社保有
3	廈門鎢業股份有限公司	世界最大のタングステン精錬加工企業、世界有数のタングステンパウダー生産基地
4	洛陽栾川鉬業集团股份有限公司	国内最大の大型タングステン・モリブデン鉱山（栾川三道庄タングステン・モリブデン鉱山）を保有
5	崇義章源鎢業股份有限公司	5つの採掘権認証済み鉱山、5つの探査権認証済み鉱山、5つの精錬工場・加工工場を保有
6	湖南辰州鉬業有限責任公司	灰重石(CaWO ₄)製品を国内及び東南アジア、欧米へ輸出
7	広晟有色金属股份有限公司	傘下に先端技術を有する現代化鉱山を5つ有する
8	広東翔鷺鎢業股份有限公司	広東省最大のタングステン製品企業
9	安泰天龍鎢鉬科技有限公司	難溶材料加工分野のパイオニア
10	贛州海盛鎢鉬集团有限公司	民営企業として、タングステンの輸出ライセンスを保有

出所：公開情報を基に矢野経済研究所作成

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● タングステン粉

概要

タングステン粉は高比重材（線/棒/板）、ダイヤモンド工具、メタライズ、焼結部品などの原料として使用されている。標準品（3N）の他、4N、5Nの高純度タングステン粉も製品化されている。

製造方法

APT（パラタングステン酸アンモニウム）、三酸化タングステンを経由し生成される。また、還元後、必要に応じ添加物をドーピング。なお、国内では日本新金属、アライドマテリアルがAPTの製造を行っている。

用途

線材：照明用フィラメント、電子管、電極、高温炉部材、プローブピン用（半導体検査用）など

※コンタクトプローブ（東京特殊電線HP）

狭ピッチ電極の電子部品検査に適した超極細径のワイヤプローブとして、導体部にパラジウム合金や銅銀合金、タングステン、レニウムタングステン、ペリリウム銅等を使用。用途は、ICパッケージ基板の導通検査、狭ピッチパターンプリント基板の導通検査、液晶パネルの導通検査、各種コネクタの導通検査、多層基板のケルビン抵抗測定（擬似接触の検出）等。

棒材：電極、高温炉部材用など

板材：高温炉部材、スパッタリングターゲット材、電極用など

タングステン粉：ダイヤモンド工具、メタライズ、焼結部品などの原料

プレイヤー

日本新金属（秋田工場）、アライドマテリアル（富山製作所）、日本タングステン（飯塚工場）、東邦金属、東芝マテリアル

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

• タングステンカーバイド（WC）

概要

タングステンとカーボンの結合により六方晶と呼ばれる非常に緻密な結晶構造を形成、ヤング率は約550 GPaであり鋼の約2倍の剛性。灰色から黒色の粉末で高硬度、高強度、高弾性等、工具材として理想的な特性を有し、超硬合金の主原料として粉末冶金法により使用される。

製造方法

金属タングステン粉末とカーボン粉末を反応させWCを生成する一般炭化法のほか、酸化タングステンとカーボンを直接反応させ粒子成長を抑制することでより粒度の細かいWCを生成する直接炭化法（アライドマテリアル）等がある。
※粒度：一般炭化法（0.5～15 μ m）、直接炭化法（0.06～0.7 μ m）

用途

WC粉末は主に超硬合金原料として使用され、切削工具（チップ、プリント回路基板ドリル、エンドミル、ドリル）や耐摩耗工具（金型、ダイス、ロール、ノズル）等で活用されている。

プレイヤー

日本新金属（秋田工場）、アライドマテリアル（富山製作所）、日本タングステンなど

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 超硬合金

概要

炭化タングステン（WC、タングステン・カーバイド）と結合剤（バインダ）であるコバルト（Co）とを混合して焼結したものである。超硬合金の材料特性を使用目的に応じてさらに向上させるため、炭化チタン（TiC）や炭化タンタル（TaC）などが添加されることもある。
また、結合剤を含有しないバインダレス超硬合金も製品化されており、機械特性、耐食性、鏡面加工性等の点からメカニカルシールリングや超精密金型等に応用されている。

製造方法

タングステンカーバイド粉にコバルト粉、複炭化物粉等を添加し、均一に混合した後、成型に供される完粉とする。その後、成型、焼結し、超硬合金となる。

用途

耐磨耗性が要求される金属加工用の切削工具をメインに、シールドマシンの刃やアルミ缶等の深絞り用金型、打ち抜き用金型等で使用される。

超硬工具

切削工具（ドリル、エンドミル、ホブ、フライス、旋盤、ピニオンカッタなど）として、自動車部品（エンジン部品、トランスミッション部品、ステアリング部品等）の金属加工に多用されている。
※超硬工具のメーカーとしては、タンガロイ、三菱マテリアル、住友電工ハードメタル、京セラ、富士ダイス、共立合金製作所、本山合金製作所等がある。

金型

加工しづらいことがネックとなり、ダイスやパンチ等の金型部品での利用が中心であったが、近年、切削加工ができるようになったり、放電や研削加工技術が進化したことから、金型そのものに超硬合金を活用しようという動きが広がり、冷間鍛造型やプレス型、レンズ金型などに適用されている。

プレイヤー

日本新金属、アライドマテリアル、日本タングステン、東邦金属、東芝マテリアル、東海合金工業等
欧米メーカーとしてはKennametal（米国、独Widiaを2002年に買収）、Umicore（ベルギー）、CERATIZIT（オーストリア）、Extramet products（スイス）等が挙げられる。

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 配線材料

概要

集積回路の配線材料としてタングステンが使用されている（具体的には、銅配線のコンタクト電極）

製造方法

タングステンコンタクトは六フッ化タングステン（ WF_6 ）と水素（ H_2 ）を用いた熱CVDにより形成するのが一般的。なお、六フッ化タングステンの製法には、フッ素ガスと金属タングステン粉末を反応させる製法やパラタングステン酸アンモニウム（APT）とフッ酸を反応させる製法がある。

用途

LSI、パワーデバイス等の多層配線（コンタクト電極）

※7nm世代や5nm世代などの最先端ロジック（マイクロプロセッサ、グラフィックプロセッサ）では、インターコネクトの構造は基本的に変わらないものの、コンタクトと配線の金属材料が大きく変わる。コンタクトはタングステンからコバルトへ、配線は銅からコバルトへ移行すると見られている。

※六フッ化タングステン（ WF_6 ）はフッ素ガスと金属タングステン粉末を350から400℃で反応させることで製造。

プレイヤー

WF_6 の製造メーカーとしては、関東電化工業、東横化学等。また、セントラル硝子は六フッ化タングステン等の製造・販売を行う目的のための合併会社を中国に設立している。

(6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- タングステン原料に関しては、APT価格が高騰した2012年以降、国内での供給源の多角化が進展。現在では、中国以外（ロシア、モンゴル、ベトナム、ブラジル他）からの調達拡大、リサイクル率（再生原料の使用増加）の向上等を通じ、中国依存度は一定レベルまで低下したものとみられる。
- しかし、中国は、世界的に見てもタングステン資源の埋蔵量が多く、タングステン原料の供給では依然として支配的な立場にあることから、引き続き中国の動向を注視せざるを得ない側面があり、さらに、同国の「輸出管理法」に関連し、将来のタングステン供給に不透明感、懸念が高まっている状況にある。
- また、供給源の多角化では、再生原料の取り組み拡大が挙げられる。業界ではコスト負担の面から国内での回収・リサイクル拡大は困難との見方が強いが、一部では、タングステン・リサイクルで出てくるコバルト残渣の活用や、半導体製造時のガスの回収等が新たな開発テーマとして挙げられている。

(タングステン原料・副資材)

- ✓ 日本は、パラタングステン酸アンモニウム（APT）、三酸化タングステン（ WO_3 ）を輸入し、タングステン粉・タングステンカーバイド粉を製造している。世界的に見ると、タングステン原料の供給は中国が支配的な立場にあるが、日本企業はAPT価格が高騰した2012年以降、供給源の多角化に取り組み、現在はロシアやモンゴル、ベトナム、ブラジルからの調達拡大や、再生原料の使用増を通じ、中国への依存度を一定レベルまで低減させている。
- ✓ また、主力製品であるタングステンカーバイド粉では、炭素粉末はもとより、結合剤（コバルト粉末）、粒成長抑制剤（VC、 Cr_3C_2 、TaC等の炭化物）などが必要となるが、これらについてもBCP対策として複数購買が採られているとのこと。

(再生原料)

- ✓ タングステン原料の供給源多角化の取り組みの一環として、タングステンの回収・再生が進展している。
- ✓ 超硬工具は不純物が少なく、回収効率が良いことから、リサイクル比率（タングステンカーバイド粉を製造する際に、リサイクルから得られた原料（APT）を使用する比率）は生産状況によって3割前後に達するケースもあると聞かれた。
- ✓ しかし、メーカー各社ともリサイクルの重要性は認識しているものの、市況との兼ね合いは無視できず、実際のところ、APTの市況によっては再生原料を使用すると収益性がかなり悪化してしまうケースもある様子が伺えた。そのため、人件費や薬品コスト、電気代、排水処理費用等の負担が大きい国内では、設備投資をして、リサイクルの能力を大きくしていくことは難しいようだ（再生原料のこれ以上の使用拡大は困難）。

(7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- 原料供給に関するリスクへの対策が引き続き大きな課題と位置づけられる中、タングステン原料の国家備蓄の強化、官民一体となった鉱山開発等の取り組みが求められる。
- また、リサイクル技術の高度化（コバルト残渣の活用やガス回収等）が、再生原料の取り組み拡大の課題と位置づけられる。

	(原料)	(素材)	(製品・用途)
	APT 三酸化タングステン	タングステンカーバイド粉末 タングステン粉末	超硬合金 半導体配線材料 超硬工具（自動車等） 半導体
課題・リスク	● 中国依存度の高さ タングステン資源の埋蔵量の観点からも、中国がタングステン原料の供給では依然として支配的な立場。 さらに、中国「輸出管理法」（供給停止等のリスク）、中国メーカーによる海外展開加速化（資源争奪）に懸念。	● 差別化戦略 汎用分野では中国メーカーとの競争激化。	● 競争力の底上げ（超硬合金・工具の分野では、再生原料の使用拡大による「クリーンなものづくり」を志向する動きも） 政府政策の後押しを受け、中国タングステン産業の競争力強化が進展。超硬工具の分野では中国勢の品質がかなり上がっているとの声も。ハイエンドとされてきた超硬合金・超硬工具の競争環境にも今後変化が生じていく可能性がある。
		● 安定供給 WF₆向けを含めた、高純度品の増産を急ぐ。	● 需要増への対応 半導体配線材料（WF₆）では国内外で設備投資が活発化。タングステン材料の調達拡大を急ぐ中、価格高騰等のリスクを注視。
対応策	● 中国以外のソース確保 ロシア、モンゴル、ベトナム、ブラジル他からの調達拡大、リサイクル率（再生原料の使用増加）の向上等を通じ、中国依存度は一定レベルまで低下。ベトナム企業への出資等を通じ、非中国ネットワークを強化する動きも。 ⇒ 取り組みのさらなる強化（官民一体となった鉱山開発） ● タングステン原料の国家備蓄の強化 原料供給に関するリスクへの対策が引き続き大きな課題。タングステン原料の国家備蓄の強化は求める声は強い。 ● リサイクル技術の高度化（コバルト残渣の活用やガス回収等） 人件費、薬品コスト、電気代、廃水処理費用等の負担が大きく、国内でのさらなる回収・リサイクル拡大は困難との声も聞かれる。回収した資源をフル活用するなどの取り組みを通じ、リサイクル事業の収益性を向上させる必要がある。		

08. タンタル（Ta）

- （１）概要
- （２）世界需要・供給
- （３）日本の輸出入等の動向
- （４）主要国（中国）における生産・輸出管理動向
- （５）エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- （６）国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- （７）サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

(1) 概要

- タンタルは、王水に不溶で、かつ、白金に比肩する化学的耐性を持つとともに、融点が2,980℃と実用金属の中ではタングステンに次いで耐熱性に優れる。また、タンタルは空気に触れると、きわめて密度の高い酸化被膜 (Ta_2O_5) を形成するが、その被膜は他の誘電材料と比べて極めて高い誘電率（アルミニウムの2.7倍）を示すという特長を有する。
- タンタルの結晶構造は、タングステン、モリブデンと同様に体心立方構造であるが、脆性から延性への遷移温度がマイナス200℃と室温よりもはるかに低いレベルであるため、曲げ、打ち抜き、プレス、深絞りといった成形加工がしやすいことも特長の一つである。
- タンタルは、タンタライトをはじめとした各種鉱石があり、ほとんどの鉱石でニオブがともに含有されている。また、錫製錬の錫鉱滓から得られる合成精鉱もタンタル資源として利用されているが、近年は錫鉱滓からの生産よりもアフリカを中心にタンタル鉱山からの採掘が主流となっている。さらに、最近豪州においてリチウム鉱石の副産物としてタンタル精鉱の生産が開始されている。
- 一般的には、鉱石をフッ酸に溶解した後、溶媒抽出法により濃縮した溶液から五酸化タンタルや五酸化ニオブ、フッ化タンタル酸カリウム（「Kソルト」とも呼ばれるフッ化物）を抽出し、得られた五酸化タンタルやフッ化タンタル酸カリウムを精錬することで、タンタル粉末や酸化タンタルを製造する方法が採られる。また、使用済みのタンタルコンデンサーや光学ガラス、SAWフィルター向けタンタル酸リチウム単結晶の工程内スクラップなどから回収リサイクルした再生原料（スクラップ、くずと呼ばれる）も一部で使用されている。
- 日本では、フッ化タンタル酸カリウムがタンタル粉の精錬用に米国、ドイツ、タイから輸入されているほか、タンタル塊・粉、くずが化合物や線・板・棒の製造用に米国、ドイツ、カザフスタン、中国、インドネシア等から輸入されている。また、線・板・棒等の加工品が製品として中国、米国から輸入されているケースもある。
- タンタルは、ノートPCやスマートフォンに内蔵されるタンタルコンデンサーを中心に、耐熱・耐食材料、合金添加物（スーパーアロイ、耐熱合金）、スパッタリングターゲット材（半導体配線バリア用）等に使われているほか、タンタルの酸化物や炭化物などの化合物が、通信デバイスに欠かせないSAWフィルター（表面弾性波フィルター）や超硬工具、光学レンズで用いられている。また、線・板・棒は、プラント部品や真空部品、フィラメント、ヒータ等に使われている。

(2) 世界需要・供給

【世界需要】

2018年以降、米中貿易摩擦、新型コロナウイルス感染症の拡大等の影響から需要低迷も、タンタルコンデンサー、半導体用途（スパッタリングターゲット）を下支えに2021年は回復基調に転じるとみられる

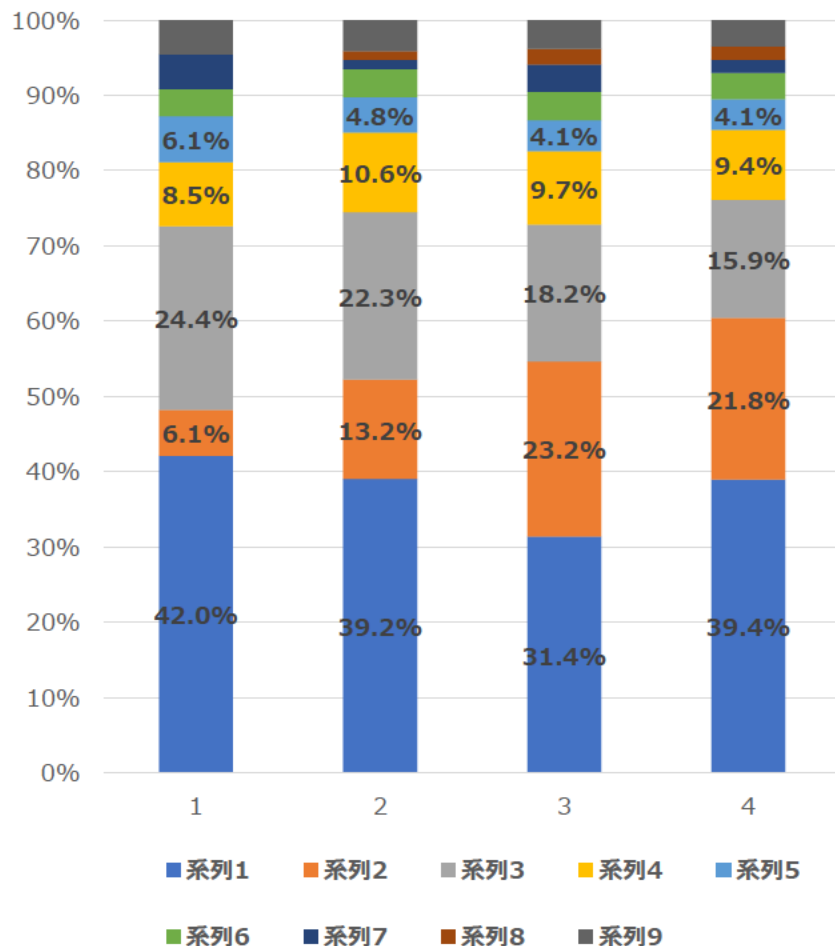
- 業界関係者によると、世界のタンタルの需要量は概ね年間2,000t（Ta純分換算値）で推移しているとされる。その1/3程度がタンタルコンデンサー向けとされる。
- タンタルコンデンサーは、電子デバイスの小型化、高性能化に欠かせず、スマートフォンやノート PC等の携帯端末、情報通信インフラや自動車関連、コンシューマー製品、医療・産業機器等で広く使用されている。とりわけコンピュータ機器や携帯端末、自動車関連での使用量が増加していた。
- また、タンタル需要の20%程度を占めるとみられる化合物も、SAW フィルター向けの原料である五酸化タンタル（スマートフォン）、超硬合金添加用の炭化タンタル（自動車関連）を中心に需要が増加傾向にあったほか、同程度の需要を抱える耐熱超合金添加用も、航空機やロケット等のジェットエンジン、産業用タービン等での耐熱超合金の堅調な消費に支えられ、底堅い動きにあったとされる。
- しかし、2018年後半以降、米中貿易摩擦、新型コロナウイルス感染症の拡大等を背景に世界経済が停滞しており、そのあおりを受ける形で、タンタルの需要も低迷しているものとみられる。特に新型コロナウイルスの影響から大きな落ち込みを見せる航空機産業をユーザーとして抱える耐熱超合金添加用では小さくない影響が出ているとされるが、タンタルコンデンサーは小型電子機器向けを中心に安定した需要で推移しているほか、巣ごもり需要の増加等により半導体市場が好調なことから、2021年にはタンタル製品の需要はコンデンサー、スパッタリングターゲット（半導体用途）を下支えにプラスに転じるとみられている。

(2) 世界需要・供給

【世界供給】

主要生産国であるDRコンゴ及びルワンダの生産シェアは、2017年66.4%から2019年49.6%と低下
米国が安全保障上の理由から中国等の非同盟国からのタンタル輸入を禁止することを発表

図.8-1 タンタル鉱石生産量における国別構成比



- 米USGSによると、2019年のタンタル鉱石生産量は1,850t。新型コロナウイルスの影響で、ブラジルやルワンダの鉱山が一時的に閉鎖されたことが要因として挙げられている。また、豪州では、タンタルを副産物として生産しているリチウム鉱山が、リチウムの低価格を理由に2020年は稼働を控え、メンテナンスを実施していたとのこと。一方、DRコンゴの2020年の生産量は主な輸出先である中国での需要増を反映し拡大していると推定している。
- タンタルは、DRコンゴ及びその周辺国の生産が多く、紛争鉱物の対象となっている。現在は、既に多くの精錬所がSSN (Standard Smelter Name) 認証取得を完了しており、紛争鉱物でないことを証明したものだけが正式に流通するようになっている。
- また、2018年に豪州の2社がリチウム事業の副産物としてタンタル精鉱の生産を開始するなど、タンタル鉱石生産の供給源の多様化が進んでいる（豪州に関しては精鉱供給が予定より遅れているものの、ブラジルでの生産増もあり、DRコンゴ及びルワンダのシェアは徐々に低下してきている）。
- この他、注目される動きとしては、米国防総省が中国、イラン、北朝鮮ロシアからのタンタル金属・合金の取得を禁止する「2020年度国防権限法」の条項を実施するために、国防連邦調達規則補則を改正する暫定規則を2020年10月1日に発効したことが挙げられる。タンタルおよびその他の重要な材料に関わるサプライチェーンのセキュリティを強化するための措置と位置づけられるもので、とりわけ中国のタンタルサプライヤーに大きな影響が出ることが予想されている。

(3) 日本の輸出入等の動向

- タンタルコンデンサーやスパッタリングターゲット用のタンタル粉末の原料として使用されるフッ化タンタル酸カリウムの輸入量は2019年655t（純分換算301t）、2020年840t（同386t）と推移している。タンタルコンデンサーの国内生産が好調であった2018年の反動等もあり、2019年は前年を下回ったものの、2020年は引き続き増加基調に転じている。
- フッ化タンタル酸カリウムの輸入については、近年、タニオビスとGAMの精錬所があるタイ、ドイツ、米国の3地域への集約が進んでいる。
- 粉末・塊としては、酸化タンタル製造等で利用されるタンタル粉末や線・板・棒等の加工品用のインゴット等が含まれる。酸化タンタルは輸入くずも原料として使用しているため、市況等によって粉末及びくずの輸入量が変動する。

表.8-1 タンタルの輸入状況（フッ化タンタル酸カリウム、粉末・塊）

2826.90910 フッ化タンタル酸カリウム

輸入	2017年	2018年	2019年	2020年
数量 (t)	715	773	655	840
純分換算 (46%)	329	356	301	386
米国	347	458	514	468
タイ	45	35	96	218
ドイツ	200	219	206	154
中国	13	5	-	-
CIF日本 (円/kg)	(19,644)	(18,959)	(18,053)	(15,838)

8103.20000 粉末・塊

輸入	2017年	2018年	2019年	2020年
数量 (t)	37.7	45.2	51.6	37.3
カザフスタン	8.5	13.3	12.7	13.7
ドイツ	13.1	10.5	9.0	7.9
米国	1.1	5.5	15.3	4.0
中国	8.5	7.7	9.7	3.2
CIF日本 (円/kg)	(45,170)	(50,843)	(48,013)	(45,098)

出所：財務省貿易統計を基に矢野経済研究所作成

(3) 日本の輸出入等の動向

- 純分換算したタンタルの総輸入量は2019年395.6t、2020年475.1tと推移している。2020年は需要が回復していることが伺える。一方、くずの輸入量は2017年の水準からは依然として低いレベルにとどまっている。主な需要先である酸化タンタル及び炭化タンタルの動きの鈍さを反映していると見られている（デジタルカメラレンズ向けでの需要縮小、超硬合金向けでの需要低迷）。また、中国がタンタル原料の輸出に制限をかけ始めているとの見方も出てきている。

※日本機械工具工業会・統計データ（超硬工具主要資材消費実績推移）によると、炭化タンタルの消費量は2017年19,778t、2018年23,135t、2019年19,550t、2020年14,900tと推移。特に2020年は減少している。

表.8-2 タンタルの輸入状況（くず及び製品その他）

8103.30000 くず

輸入	2017年	2018年	2019年	2020年
数量 (t)	80.2	43.6	19.1	30.6
米国	2.3	14.2	4.0	10.1
インドネシア	20.1	7.9	3.3	9.8
タイ	10.4	4.1	5.2	3.9
中国	6.5	0.3	2.5	1.9
*2020年は香港				
CIF日本 (円/kg)	(14,671)	(21,597)	(24,538)	(16,525)

8103.90020 製品その他

輸入	2017年	2018年	2019年	2020年
数量 (t)	27.7	27.8	23.9	20.8
中国	11.8	11.6	11.5	10.8
米国	5.1	6.5	8.5	5.2
オーストリア	9.7	9.0	3.8	3.5
CIF日本 (円/kg)	(57,939)	(61,861)	(60,505)	(56,497)

総輸入量（純分換算）	474.6	472.6	395.6	475.1
------------	-------	-------	-------	-------

総輸入量（純分換算）は、フッ化タンタル酸カリウム、粉末・塊、くず、製品その他の輸入量の合計。

出所：財務省貿易統計を基に矢野経済研究所作成

(3) 日本の輸出入等の動向

- 総輸出量は2019年194t、2020年256tと推移している。前頁でみた総輸入量と同様にタンタルコンデンサー向けの粉末を中心に回復基調にあるものとみられる。
- また、2020年はくずの輸出がドイツ、米国で大幅に増加している。超硬合金の需要落ち込み等により化合物の生産が低調であったこと（国内でのくずの使用量減）に加え、米国での対中輸入規制に絡む代替需要も影響した可能性があると考えられる。なお、同年はくずの輸出単価も大幅に下落しているが、くずは品位がまちまちのため、単純には比較できない。

表.8-3 タンタルの輸出状況（粉末・塊、くず、製品その他）

8103.20000 粉末・塊

輸出	2017年	2018年	2019年	2020年
数量 (t)	162.0	166.0	118.0	151.1
インドネシア	92.0	96.5	72.5	84.4
米国	14.5	15.6	12.0	21.2
イスラエル	11.8	26.2	6.5	18.4
チェコ	26.8	14.5	19.0	10.5
FOB日本 (円/kg)	(53,570)	(56,752)	(57,520)	(54,968)

8103.30000 くず

輸出	2017年	2018年	2019年	2020年
数量 (t)	66.0	94.0	57.0	92.9
米国	39.0	48.8	25.2	51.4
ドイツ	5.0	13.2	10.5	28.2
カザフスタン	2.6	6.4	13.6	12.7
FOB日本 (円/kg)	(16,439)	(15,501)	(16,020)	(8,244)

8103.90000 製品その他

輸出	2017年	2018年	2019年	2020年
数量 (t)	27.0	35.0	19.0	12.0
米国	13.4	17.7	10.5	6.6
インドネシア	8.9	13.8	3.2	1.2
FOB日本 (円/kg)	(74,643)	(68,074)	(61,859)	(56,599)

総輸出量	255.0	295.0	194.0	256.0
------	-------	-------	-------	-------

(3) 日本の輸出入等の動向

- タンタルの需要について、タンタル粉末は2019年77tと2018年からさらに減少しているが、Appleの新製品投入、自動車市場の好転等により、2020年後半あたりからはタンタル粉末の需要が回復基調にあるとされる。一方、化合物も2018年180t、2019年154tと需要が2年連続で減少している。酸化タンタルの主要用途の一つである光学レンズ向けがデジタルカメラ市場の縮小により一段と弱含んでいることに加えSAWフィルター向けも5Gスマホの市場立ち上がり期待されたほど進まなかった影響を受けた。タンタル粉末と同様、SAWフィルターはスマホ向けで需要が回復基調にあるが、光学レンズ向けは依然として厳しい状況にあるものとみられる。

表.8-4 タンタルの国内需要推移 (t, Ta純分)

(単位：t, Ta純分)

区分	2015	2016		2017		2018		2019	
			前年比		前年比		前年比		前年比
粉末	119	115	96.6%	115	100.0%	110	95.7%	77	70.0%
国内生産	87	75	86.2%	96	128.0%	99	103.1%	51	51.5%
輸入品	32	40	125.0%	19	47.5%	11	57.9%	26	236.4%
化合物	206	317	153.9%	240	75.7%	180	75.0%	154	85.6%
国内生産	140	193	137.9%	161	83.4%	120	74.5%	98	81.7%
輸入品	66	124	187.9%	79	63.7%	60	75.9%	56	93.3%
製錬小計	325	432	132.9%	355	82.2%	290	81.7%	231	79.7%
国内生産	227	268	118.1%	257	95.9%	219	85.2%	149	68.0%
輸入品	98	164	167.3%	98	59.8%	71	72.4%	82	115.5%
加工品	110	106	96.4%	133	125.5%	154	115.8%	155	100.6%
国内生産	91	88	96.7%	112	127.3%	130	116.1%	140	107.7%
輸入品	19	18	94.7%	21	116.7%	24	114.3%	15	62.5%
合計	435	538	123.7%	488	90.7%	444	91.0%	386	86.9%
国内生産	318	356	111.9%	369	103.7%	349	94.6%	289	82.8%
輸入品	117	182	155.6%	119	65.4%	95	79.8%	97	102.1%

出所：新金属協会資料等を基に矢野経済研究所作成

(4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向

- 中国は、タンタル資源があまり豊富でなく、いまのところ大規模な鉱産会社が育っているわけではない。しかし、タンタル製品（タンタルコンデンサー等）は軍事用途で利用されていることが少なくないことや、半導体製造にも関わる素材であることから、あまり表面化していないだけで、タンタル産業の育成が水面下で進められている可能性もある。
- タンタル業界の関係者の間では、近年、中国が自国での利用を優先する目的でタンタルくずの輸出を制限しているとの話が挙がっている。これを規定するような法令等は確認できないことから、どのような経緯で輸出の制限を行っているかは定かでないが、このような中国の動きに対する懸念が日本国内でも広がってきているのは確かである。
- また、2020年10月、米国防総省は自国のサプライチェーンを混乱にさらす可能性のあるソースへの依存を減らすことを目的に、中国を含む非同盟国からのタンタル輸入を禁止することを発表した。このような米国の動きに対し、中国がどのようなリアクションをとるのが注目される。

（生産管理関連政策）

- ✓ 許可証（鉱山資源探査権許可書・鉱山採掘権許可書）制度で市場参入を管理。
- ✓ タンタルの生産割当規制はないものとみられるが、無闇な採掘を抑制するため、採掘利用率を規定した政策がもうけられている。

（輸出管理関連政策）

- ✓ 2007年よりタンタル及びその製品を「輸出許可証管理貨物リスト」の規制対象に追加し、以降その規制対象を徐々に拡大している。ただし、最近これを目に見える形で強化している様子は伺えない。
- ✓ 一方で、自国企業の国際競争力強化を目的とし、輸出税還付率を徐々に引き上げている。また、中米貿易摩擦の影響下、2019年5月より米国から輸入するタンタル関連商品に対し、さらに10%の追加関税を賦課している。

（産業育成関連政策、他）

- ✓ タンタル鉱山のある西部地域での産業育成を推進（加工業の集積化も奨励している）。

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● タンタル粉（電子部品グレード）

概要

最大用途であるタンタルコンデンサーとターゲット材に使われており、「電子部品グレード」と称されている。これとは別に、酸化タンタル製造等で利用される「工業品グレード」と呼ばれるものもあるが、粒径や粒度分布、含有不純物などにおいて電子部品グレードの方が厳しい基準となっている。

製造方法

粉末種類（アンギュラー／粉碎粉、ノジュー／還元粉、フレーク／片状粉）によって製法が異なる。アンギュラータイプは電子ビーム溶解、ノジュー状およびフレーク状の粉末の多くは（フッ化物（ K_2TaF_7 ））をナトリウム還元することで得ている。なお、フレーク状粉末はグローバルアドバンスドメタル（GAM）独自製法による。

用途

コンデンサー用粉（タンタルコンデンサー）：電子機器、スマートフォン、携帯基地局
ターゲット材：半導体（配線バリア用）

プレイヤー

グローバルアドバンスドメタル（GAM, 米国）、タニオビス（独、旧H.C.Starck）
*GAMは米国及び日本に拠点を保有。米国（ペンシルベニア州ポイヤータウン工場）ではコンデンサー用粉末及び冶金用製品、日本（会津）ではコンデンサー用粉末を製造。
*タニオビスは、ドイツ（ゴスラー）、日本（水戸）、タイ（マープタープット）に拠点。ドイツ及びタイは中間原料であるフッ化物から一貫で製造。日本はドイツ、タイからフッ化物を輸入し、タンタル粉末を製造している。なお、ドイツ及び日本はターゲット材向けの粉末、タイはコンデンサー向けの粉末をメインに生産している。

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 化合物（酸化タンタル／ Ta_2O_5 ）

概要

最も大きな需要はSAWフィルター向けLT（タンタル酸リチウム／ LiTaO_3 ）単結晶で、この他、光学レンズ（屈折率調整）用添加剤としても使われている。

製造方法

輸入くず、または輸入タンタル粉を酸素気流中で強熱すると得られる。

用途

LT単結晶：SAWフィルター
光学レンズ用添加剤：光学レンズ：デジタルカメラ

プレイヤー

三井金属鉱業（三池レアメタル工場）、多木化学（兵庫県）

住友金属鉱山（住鉱国富電子／北海道、大口電子／鹿児島、青梅事業所）、山寿セラミックス（愛知県）などがLT単結晶（タンタル酸リチウム）を製造している。

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 化合物（炭化タンタル／TaC）

概要

超硬工具（WC）添加剤（主に粒成長抑制剤）に使用される。
純粋なTaC(Nb-free)だけでなく、ニオブを含んだ TaNbC(90: 10)や TaNbC(2: 1)などの品種が存在する。

製造方法

溶媒抽出を用いた分離・精製技術により抽出された酸化物を炭化处理。

用途

超硬工具添加剤：超硬合金：超硬工具

プレイヤー

三井金属鉱業（三池レアメタル工場）、タニオビス（水戸工場）
アライドマテリアル、日本新金属等のタングステンカーバイド粉を製造する企業でも生産されている。

(6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- 近年、中国がスクラップを含む、タンタル資源の輸出を制限しているとの話も挙がっているが、あくまでも調達先のひとつに過ぎず、直接的な影響は出ていないとされるなど、サプライチェーン全体を通じ、安定供給リスクへの対策が進展している。
- 米国政府が中国を含む非同盟国からのタンタル輸入を禁止するなど、新たな分断リスクも生じているが、サプライチェーンの組みかえ等により対応がとられていくものとみられる（この影響からかこのところ日本からスクラップの対米輸出が増加傾向にある）。
- こうした観点から、サプライチェーンのさらなる強化に向けては、スクラップをより柔軟に使いこなせるようになることが重要となるため、スクラップの種類を問わず、酸化物・メタルに幅広く使用できるようにするためのリサイクル技術の開発等が課題と位置づけられる。

(原料調達面)

- ✓ タンタル原料としては、鉬石、くず、副原料（錫スラッジ等の低品位原料を濃縮した合成精鉬）があるが、日本国内では主に鉬石から生産されたフッ化物、酸化物及びくずを原料にタンタル粉末や酸化物などのタンタル製品が生産されている。
- ✓ 一頃は、世界のタンタル供給をアフリカのタンタル鉬山に大きく依存し、紛争鉬物調達の問題と合わせ、サプライチェーンが極端に不安定となっていた時期もあったが、この10年でブラジル、豪州等、アフリカ以外でのタンタル生産が本格化したことに加え、紛争鉬物調達排除のスキームが構築され、スクラップの流通拡大などを含め、タンタルに係るサプライチェーンの安定化が進展している。実際、国内の業界関係者の間からも、「タンタルという狭い世界では、特定の原料・製品・供給先に依存すること自体が大きなリスクになるとの認識が定着してきており、業界全体でサプライチェーンの多様化が進んでいる」との意見が聞かれた。

(リサイクルの状況)

- ✓ タンタルコンデンサーの製造工程で発生するオフスペック品やSAWフィルター向けタンタル酸リチウム単結晶の工程内スクラップ等が「くず」として広く流通しており、再生原料として使用されている（ただし、不純物等の関係でくずの種類によって使いみちはある程度決まってしまうとのこと）。
- ✓ また、使用済み電気電子機器からのタンタル回収の取り組み（主には電気電子機器で使用されているタンタルコンデンサを分離・選別・回収し、タンタルを濃縮・精製・抽出）が一部で実施されており、純分ベースで95%以上のコンデンサーに含まれるタンタルが回収可能なレベルに達しているとされる。

(7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- 紛争鉱物調達排除のスキーム構築等を契機に、サプライチェーン全体を通じ、安定供給リスクへの対策が進展
- サプライチェーンのさらなる強化に向けて、くずの種類を問わず、酸化物・メタルに幅広く使用できるようにするためのリサイクル技術の開発等が課題

	(原料)	(素材)	(製品・用途)
	タンタル原料・くず	タンタル粉末・化合物・加工品	電子部品 (タンタルコンデンサー等)
課題・リスク	● アフリカ鉱山への依存 ● 紛争鉱物調達排除等 ● 中国によるタンタル資源の輸出制限	● 米国政府による中国を含む非同盟国からのタンタル製品の輸入禁止（日本企業、原料資材面で制約を受ける可能性がある） ● スクラップの使いこなしに課題 不純物等の関係でスクラップの種類によって使いみちはある程度決まってしまう。	● 増産体制 Appleの新製品投入、自動車市場の好転等が重なり、2020年後半よりタンタルコンデンサーの需給が逼迫。大手サプライヤーの設備投資も活発化しているが、供給体制が整うには時間を要するとみられている。 ● コンデンサーでは引き続き小型大容量化がテーマ（これに伴い1個あたりのタンタル消費量は減少）
対応策	ブラジル、豪州でのタンタル生産本格化 紛争鉱物調達排除のスキームが構築 スクラップの流通拡大 ⇒サプライチェーンの安定化が進展	● くずの種類を問わず、酸化物・メタルに幅広く使用できるようにするためのリサイクル技術の開発等	

09. イットリウム（Y）

- （１）概要
- （２）世界供給
- （３）日本の輸出入等の動向
- （４）主要国（中国）における生産・輸出管理動向
- （５）エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- （６）国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- （７）サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

(1) 概要

- イットリウム（Y）は希土類元素の一つである。原子番号は39、原子量88.91の銀白色の金属で、六方最密構造を備えている。融点は1522℃、沸点は3338℃であり、空気中では容易に表面が酸化され、酸に可溶であるが、アルカリには不溶である。熱水と反応する。延性、展性に乏しい。スウェーデンのイッテルビー村で採取されたガドリ石から発見された元素であり、元素名は村名に由来する。
- イットリウムは単独で鉱石中に存在するのではなく、何種類かのレアアースが混じって鉱石をつくっている。レアアースを含む鉱石は、フッ化炭酸塩のバストネサイト、リン酸塩のモナザイト、ゼノタイム及びイオン吸着鉱の4種類に大別できる。イットリウムは主に重希土鉱物のゼノタイムから抽出されるほか、バストネサイト、モナザイト、イオン吸着鉱などにも微量含まれる。
- ゼノタイムは、精鉱を苛性ソーダで加熱処理した後にろ過し水酸化物ケーキを得る。これを塩酸で溶解し、中和処理やろ過、焼成の工程を経て酸化イットリウムとしている。
- 酸化イットリウムの分離精製方法にはイオン交換法と溶媒抽出法がある。イオン交換法は様々な組成の溶液を同一プロセスで処理でき、かつ高純度の分離ができるというメリットを持ちながらも、処理時間が長いと大量生産には不向きである。溶媒抽出法は一つのプラントで一つの元素しか処理できないが、連続プロセスであるため工業的分離精製方法の主流となっている。
- 日本は酸化イットリウムとして輸入するケースがほとんどである。1980年以降のイオン吸着鉱の輸入に伴い、ゼノタイムの処理は行われていない。また、リサイクル原料（工程内スクラップ、家電製品スクラップ）の分離・精製による再製品化も行われている。
- イットリウムの主な用途は、三波長蛍光管や冷陰極管などに使用される蛍光体、各種保護膜、アルミ合金やマグネシウム合金、光学ガラスの添加剤、触媒、YAG（イットリウム、アルミニウム、ガーネット）結晶などである。保護膜では半導体製造用のエッチング装置向けでの需要拡大が見込まれている。YAG結晶は、レーザ活性媒体として波長1030nmでの使用に最も適した結晶の一つである。
- また、ジルコニアに安定化材として酸化イットリウムを添加したイットリア安定化ジルコニア（YSZ : yttria stabilized zirconia）が、自動車の酸素センサーや燃料電池の固体電解質膜に利用されている。

(2) 世界供給

- 米国地質調査所（USGS）の調査によると、レアアース鉱石に含まれるイットリウム（REO換算）は8,000～12,000tと推定されている。主な生産地は中国とミャンマーである。中国は福建省、広東省、江西省を中心とした南部の風化花崗岩を鉱体とするイオン吸着型鉱床、ならびに広西省と湖南省の少数の鉱床から生産している。ミャンマーも同様のイオン吸着型鉱床である。
- イットリウムの世界埋蔵量は50万t以上と推定されている。主な埋蔵国は、オーストラリア、ブラジル、カナダ、中国、インドである。ミャンマーの鉱石生産量は多いが、埋蔵量に関する情報は得られていない。
- 中国では、レアアース産業の健全な発展を目的に政府主導でレアアース関連企業の統合が進み、六大レアアース集団が形成された。採掘事業者だけでなく分離・精製や電解 還元事業者も同時に統合されたため、六大レアアース集団がグループ内で採掘から還元までの実施能力を持つ。また、中国の産業政策「中国製造2025」においては、レアアース鉱石からレアアース磁石等の製品に至る分野のシェア拡大が掲げられており、一帯一路構想の下、中国企業による世界のレアアース資源確保の動きが加速している。
- 中国政府はレアアース採掘による環境悪化を抑えるとともに高価格を維持するため、レアアースに採掘枠、分離枠を設けている。採掘枠は2015年以来10.5万tを続けていたが、2018年は12万t、2019年は13.2万tになった。分離枠も2018年11.5万t、2019年に12.7万tと増加基調が続く。2020年は採掘枠14万トン、分離枠13.5万トンと過去最高に引き上げられている。採掘枠のイットリウム含有量は明記されていない。
- 2021年1月15日に中国工業情報省がレアアースの採掘や加工、利用、輸出の管理を強化する新たな条例の草案を公表した。条例の対象となるのは中国国内でのレアアースの採掘、分離、加工、総合的な利用、流通に関する活動。これまでは生産分野を管理してきたが、輸出を含めたサプライチェーン全体に統制の対象を広げる。
- 条例案は29条で構成されており、採掘や分離事業への投資は政府の認可を受けると明文化。輸出入に際しては関連法を順守するよう明記されており、輸出管理法（2020年12月1日施行）との連携も想定されている。
- 中重希土類は米国や豪州でも産出されるが、分離・精製を実施可能な国は中国のみである。中重希土類のサプライチェーンは全て中国を経由することとなり、中国政府によるレアアースの統制強化の動きは日本企業に大きな影響を及ぼすとの懸念が生じている。

(3) 日本の輸出入等の動向

- 2019年の酸化イットリウム（純分）の輸入量（純分）は、1,229t（前年比94.9%）だった。前年割れとなったのは、2012年以来7年ぶりである。中国依存度は96.2%と前年より1.8ポイント上昇しており、これは2016年以来の高い水準である。ただ、中国からの酸化イットリウムの輸入平均単価が下落傾向にあったため、日本の産業への影響はほぼなかったとされている。なお、2019年の輸入平均単価は567円/kgと、前年比54円安であった。1万円を超えていた2011年に比べ、8年間で約20分の1になった。
- オーストリアからの輸入量は15tであり、前年の40tから大きく減少。米国は前年比3tの減少となる27tであり、輸入量2位となった。

表 9-1 酸化イットリウムの輸入量推移

2846.90210 酸化イットリウム

輸入	単位：t			
国名	2016年	2017年	2018年	2019年
中国	816	930	1,223	1,183
米国	1	33	30	27
オーストリア	16	46	40	15
ドイツ	2	4	3	4
韓国	-	-	0	0
その他	0.1	0.3	0.0	0.0
合計	834	1,014	1,296	1,229
（中国依存度）	97.8%	91.7%	94.4%	96.2%

※純分換算率：79%

(3) 日本の輸出入等の動向

- イットリウム2019年の国内需要は車載用酸素センサー向けなどが牽引し、1,080t（前年比106.9%）となった。車載用酸素センサーは、ジルコニアに安定化剤として酸化イットリウムを添加したYSZ（イットリア安定化ジルコニア）を固体電解質にするもので、高温加熱時に電解質の両側の酸素濃度が異なる際に起電力が生じる性質を利用している。自動車の排ガス規制強化の動きが強まる中、酸素濃度を厳密にチェックする酸素センサーの需要はここ数年拡大傾向にある。
- 一方、2019年は米中貿易戦争の長期化などを背景に半導体製造用エッチング装置の出荷が低調。構成部品の保護膜として用いられる酸化イットリウムの需要も伸び悩んだ。また、LEDランプの普及に伴い蛍光ランプ需要の縮小が続いている。新金属協会希土類部会が公表した需要実績によると、2019年1～12月の蛍光ランプ国内出荷個数は前年比で約12%減。この結果、赤色蛍光体原料として使用されるイットリウムの需要も減少した。
- 国内の主要サプライヤーは信越レア・アース、フジミインコーポレーテッド、日本イットリウム、ソルベイ・スペシャルケム・ジャパン（旧阿南化成）等。中国企業が分離精製した酸化イットリウムを輸入し、ユーザー、用途に合わせて高純度化した粒子径、形状等の酸化イットリウムを供給している。

表 9-2 イットリウムの国内需要推移

区分	2016年	2017年		2018年		2019年	
			前年比		前年比		前年比
国内需要	820	900	109.8%	1,010	112.2%	1,080	106.9%

（単位：REOT）

（出所）新金属協会

(4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向

- 最新の動きとして、2021年1月15日に中国工業情報省がレアアースの採掘や加工、利用、輸出の管理を強化する新たな条例（レアアース管理条例）の草案を公表した。条例の対象となるのは中国国内でのレアアースの採掘、分離、加工、総合的な利用、流通に関する活動。
- 生産分野だけでなく、利用、流通などサプライチェーン（供給網）全体を管理対象としたのが特徴。採掘量の総量を国が定めて許可業者のみに採掘を認めるほか、備蓄についても定めた。
- また、条文の中で、総量指標に関連し、「レアアース製錬分離企業は総量指標以外に外国産レアアースを利用して製錬分離することができる」と記載したほか、トレーサビリティシステムへの情報入力（生産販売データ・包装・領収情報）を義務付けていることが注目される。

（生産・輸出管理関連政策）

- ✓ レアアースに関する生産・輸出関連政策では、2000年頃より輸出割当制度、輸出関税の導入等を通じ、管理強化が進められ、2010年の尖閣諸島沖中国漁船衝突事件に端を発する「レアアースショック」で見られたように、中国政府による実質的な輸出規制が国際社会でも度々取り上げられるようになった。しかし、その後も、中国政府は、レアアースを重要戦略資源と明示するとともに、国家安全保障の観点から輸出管理をさらに強化する方針を明らかにしていた。
- ✓ 実際、2017年6月に発表された、デュアルユースアイテム、軍用品、核およびその他の国際義務の履行と国家安全の擁護にかかわる貨物、技術、サービスなどの品目の輸出管理を規定した「輸出管理法（出口官制法）」の草案において、「重要な戦略である希少資源の保護」に言及、将来レアアースを含む希少資源を輸出管理法の対象とする可能性に含めを持たせていた。
- ✓ 「輸出管理法」は2020年12月に施行されたが、現時点で公表されている規制リストにレアアース等の鉱物資源関係のものとは含まれていない。しかし、工業情報省は2021年1月15日、レアアースの採掘や加工、利用、輸出の管理強化を目的とした「レアアース管理条例」の草案を公表。その条文（第15条）に、輸出に関わる企業は外国貿易法、輸出管理法、その他の法令を遵守しなければならないと明記されている（輸出管理法と組み合わせた、レアアースの輸出管理を示唆するものとみられている）。

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

半導体製造装置向け保護膜

概要

半導体製造用エッチング装置内部は、反応性が高いハロゲン系ガスを使用したプラズマに長時間晒される。この際に問題になるのが、構成部材にガス腐食あるいはプラズマエロージョン（損傷）が生じることによるパーティクルの発生である。このパーティクルがウェハー上に形成するパターンを断線させ、製造歩留りや装置稼働率の低下の要因になってしまう。そこで、耐プラズマ性・耐食性の向上を目的に、構成部材に酸化イットリウムやアルミナを保護膜としてコーティングしており、特に耐プラズマ性に優れた酸化イットリウム保護膜が多用されている。最近では半導体のさらなる微細・高集積化等の実現に向けたパーティクルの一層の低減のため、保護材料は酸化物系からフッ化物系のイットリウムへ研究・開発がシフトしつつある。

製造方法

酸化イットリウム保護膜は流動性に優れる球状造粒粉を用いて、溶射により形成される。造粒粒子径は数十 μm 。純度は3N～5N。

溶射は何らかの熱エネルギー源によって皮膜となる材料を溶融・半溶融状態にすると同時に、運動エネルギーを付与して高速で飛行する溶滴を作り出し、これを次々と基材表面に衝突、積層させて皮膜を形成する表面処理プロセスである。溶射に用いる熱源と溶射材料の違いによって様々な手法があるが、酸化イットリウム保護膜の形成には主に大気プラズマ溶射が用いられている。一般的には、大気中においてアルゴンを作動ガスに用いて電極の間にアークを発生させることで作動ガスがアークによってプラズマ化され、ノズルから高温高速（5000～10000℃）のプラズマジェットとなって噴出。このプラズマジェットに酸化イットリウム粉末を投入し、基材に吹き付けて高密度な皮膜を形成する。

用途

エッチング装置のチャンバー内壁、チャック等の保護膜

プレイヤー

信越レア・アース、フジミインコーポレーテッド、日本イットリウム、Oerlikon Metco（スイス）等

(6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- イットリウムの分離・精製工程は中国企業が独占
- 半導体製造装置向け保護膜としてイットリウムの代替材料の開発は進んでいない

(イットリウムの原料調達面)

- ✓ イットリウムの分離・精製は、中国企業のみが行っている。
- ✓ 日本企業は酸化イットリウム（イットリウム粗酸化物）を輸入し、ユーザー、用途に合わせて高純度化した粒子径、形状等の酸化イットリウムを供給している。
- ✓ 分離・精製に係る中国企業の技術・品質にバラツキがあるため、用途によって酸化イットリウムの調達先はある程度限定される傾向にある。

(代替素材の開発状況)

- ✓ もともと、半導体の微細化に伴うコンタミ発生のさらなる抑制を目的に、保護膜の材料はアルミナから酸化イットリウムに移行してきた。
- ✓ 近年は酸化イットリウムからフッ化物系イットリウムへのシフトが進み始めている。しかしながら、国内でイットリウム自体を代替する材料の開発は進んでいない。

(リサイクルの状況)

- ✓ 現在、国内でイットリウムのリサイクルは行われていない。

(7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- 分離・精製工程を中心とした供給源の多角化、代替材料の開発等による中国依存からの脱却が求められる
- また、中国がレアアースの輸出管理強化の動きをみせるなか、酸化イットリウムの備蓄強化の重要性が増している

	(原料)	(素材)	(製品・用途)	
	鉬石	酸化イットリウム (イットリウム粗酸化物)	半導体製造装置 向け保護膜	半導体製造装置
課題・リスク	● 中国以外のソース確保 埋蔵国は世界各地に存在するものの、鉬石生産は中国が支配的立場にある。 - 分離・精製工程は中国企業の独占状態にある。 - 中国におけるレアアースの輸出管理強化による、酸化イットリウムの調達不安、価格の上昇に懸念。		● 半導体分野での中国企業との競争激化 現在、中国企業は主にFPD製造装置向け保護膜として酸化イットリウムを供給。 - 中国企業の技術力の高まりとともに、半導体製造装置向けの展開が想定される。	● 日本企業の競争力低下 酸化イットリウムの供給が不安定となることで、保護膜の材料をアルミナに戻す、すなわちコンタミ発生による製造歩留まりの低下となる可能性がある。 - このことは、日本の製造装置メーカーの競争力低下につながる懸念がある。
対応策	● 分離・精製工程を中心とした供給源の多角化 国際協調推進のもと、中重希土類の分散・精製工程における中国一國集中からの脱却、中重希土類に富む新たな鉬山開発を進めていく。 ● 備蓄制度の見直し 中国がレアアースの輸出管理強化の動きをみせるなか、酸化イットリウムの供給リスクに十分に対応できる量の確保が必要である。		● 製品での差別化 よりコンタミの発生を抑制できるフッ化物系イットリウムなどの供給など、製品で差別化できる余地がある。	● 代替材料の開発 近年は酸化イットリウムからフッ化物系イットリウムへのシフトが進み始めているが、今後はイットリウム自体を代替する材料の開発が重要となる。

10. ルテニウム（Ru）

- （１）概要
- （２）世界需要・供給
- （３）日本の輸出入等の動向
- （４）主要国（中国）における生産・輸出管理動向
- （５）エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- （６）国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- （７）サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

(1) 概要

- ルテニウムは(Ru)は、プラチナ(Pt)、ロジウム(Rh)、パラジウム(Pd)、オスミウム(Os)、イリジウム (Ir)と同じ白金属元素である。鉱物資源分野では、これら6元素の金属グループを白金族金属 (PGM : Platinum Group Metals) と呼んでいる。
- ルテニウムの比重は12.43、融点は2250℃、沸点は4155℃。六方最密格子の結晶構造を有するものがほとんどである。高い硬度を有するほか、酸化や腐食を受けにくく、展性に富むといった特性がある。また、王水などの酸類には侵されないが、酸素や酸化剤が存在すると室温でも溶ける。
- PGMは鉱石中に共存し、同一の鉱石から製錬・生産される。PGMの鉱床は南アフリカのBushveld、ジンバブエのGreat Dyke、米国のStillwater、カナダのSudbury、ロシアのNorilskの主に5地域にある。南アフリカやジンバウエ、米国では、白金鉱石中に多く含まれるプラチナとパラジウムが主産物として採掘される。その他、ルテニウムなどは鉱石中の含有量が少なく、白金やパラジウムの副産物として得られる。一方、ロシアやカナダの鉱床は主産物としてニッケルや銅を採掘する硫化物鉱床であり、副産物として回収可能な量のPGMを含んでいる。
- ルテニウムは、主に化学、電子材、電気化学の分野で用いられている。
- 化学分野では、触媒向けが中心となる。不均一系では脂肪族カルボニル化合物および芳香環の水素化に高活性を示し、工業的な使用例としてアンモニアの合成やソルビトールの合成、都市ガスの製造などがある。
- 電子材分野ではハードディスクの軟磁性下地層及び非磁性中間層、積層セラミックコンデンサの電極、チップ抵抗器抵抗体、色素増感太陽電池電極など、電気化学分野ではクロール・アルカリやバラスト水の電解用電極などに用いられている。
- その他、チタン、ニッケル、レニウムなどの合金添加剤、万年筆ペン先などの用途がある。

(2) 世界需要・供給

【世界需要】

- 2019年のルテニウムの世界需要は36.5tとなった。内訳は化学10.4t、電子材12.4t、電気化学7.7t、その他6.0tである。
- 化学分野では、中国におけるカプロラクタムとアジピン酸向け触媒の需要が堅調である。
- 電子材分野では、主たる用途のHDDがパソコンや携帯端末、ゲーム機等でSSDへの移行が続いている。一方、クラウドサービスの普及などに伴い、データセンターで使用するニアラインストレージの需要が拡大。この用途向けにHDDの大容量化（ドライブ1台当たりディスク枚数平均6枚/ドライブが1.5倍程度に増加）が進んでおり、ルテニウムの需要を牽引している。
- 電気化学分野ではクロール・アルカリ向けの電極用途が底堅いほか、今後は船舶バラスト水規制管理条約（2017年9月8日発効）の順守に向けたバラスト水の電解電極向けの需要が本格化してくる。この条約は船舶の建造時期及び大きさに応じ、排出基準を満たすバラスト水処理を義務化するものである。バラスト水に含まれる生物等を殺滅させる方法としては、物理的手法（熱・電気・超音波・紫外線・キャビテーション等）、機械的手法（フィルタリング法等）、化学的手法（オゾン、塩素、化学薬品等）等があり、塩素を用いた化学的手法でルテニウムが用いられる。

表.10-1 ルテニウムの世界需要推移

(単位：t)

区分	2016年	2017年		2018年		2019年	
			前年比		前年比		前年比
化学	11.4	12.3	107.9%	8.0	65.0%	10.4	130.0%
電子材	13.6	13.6	100.0%	13.0	95.6%	12.4	95.4%
電気化学	5.5	5.2	94.5%	6.2	119.2%	7.7	124.2%
その他	4.8	5.4	112.5%	5.8	107.4%	6.0	103.4%
合計	35.3	36.5	103.4%	33.0	90.4%	36.5	110.6%

※2019年は暫定推定値

出所：Johnson Matthey「PGM市場レポート」

(2) 世界需要・供給

【世界供給】

- 2019年の世界のルテニウム産出量は33t、前年比94.3%と推計される。内訳は南アフリカ29.7t（構成比90%）、ロシア2.64t（同8.0%）、その他0.66t（同2.0%）。鉱山からの供給量として最大となる南アフリカは2017年以降シャフトの閉鎖やプラントの停電などの影響があるものの、30t近い産出量で推移している。この他、リサイクルを通じた回収量が一定程度あるとみられる。
- 主要サプライヤーはAnglo American Platinum、Sibanye-Stillwater、Impala Platinumの南アフリカ企業3社とロシアのNorilsk Nickel。Sibanye-Stillwaterは2015年にAnglo American PlatinumのRustenburg 鉱山とPGM企業である豪Aquarius Platinumを買収して以降、米国Stillwater Mining（2016年）、英国Lonmin（2019年）を相次ぎ傘下に収めている。
- ルテニウムの価格は2018年に大きく上昇し、10年ぶりの高値を記録した。米USGSによると、2018年の平均価格は244.41ドル/toz（高値275.00ドル/toz、安値195.00ドル/toz）で着地。2019年は262.59ドル/toz（高値275.00ドル/toz、安値255.00ドル/toz）と前年から7.4%上昇した。

表.10-2 ルテニウムの世界産出量推移

(単位：t、下段：構成比)

区分	2016年	2017年		2018年		2019年	
			前年比		前年比		前年比
南アフリカ	20.25 75.0%	28.56 84.0%	141.0%	29.40 84.0%	102.9%	29.70 90.0%	101.0%
ロシア	5.40 20.0%	4.42 13.0%	81.9%	4.55 13.0%	102.9%	2.64 8.0%	58.0%
その他	1.35 5.0%	1.02 3.0%	75.6%	1.05 3.0%	102.9%	0.66 2.0%	62.9%
合計	27.00 100.0%	34.00 100.0%	125.9%	35.00 100.0%	102.9%	33.00 100.0%	94.3%

出所：（株）フルヤ金属IR資料をもとに矢野経済研究所作成

(3) 日本の輸出入等の動向

- 2019年の輸入量（ルテニウム、イリジウム、オスミウムの合計）は18.87t、前年から9.23t（32.8%）の減少となった。最大の輸入相手国である南アフリカからの輸入量が7.04t減少し、同国の依存度は62.2%に低下している。この他、主な輸入相手国はドイツ、英国、台湾、米国、ロシアである。
- 2019年の輸出量（ルテニウム、イリジウム、オスミウムの合計）は前年から3.51t（34.7%）減少し、6.61tとなった。マレーシアや英国からの輸入量の落ち込み幅が大きい。輸出相手国別では中国が1.63tと最も多く、マレーシア、ドイツ、米国、台湾と続く。

表.10-3 ルテニウム、イリジウム、オスミウムの輸出入推移

7110.41000 イリジウム、オスミウム及びルテニウム(加工していないもの及び粉状のもの)

7110.49000 イリジウム、オスミウム及びルテニウム(その他のもの)

輸入					輸出				
				単位：t					単位：t
国名	2016年	2017年	2018年	2019年	国名	2016年	2017年	2018年	2019年
南アフリカ	10.41	17.09	18.79	11.75	中国	2.74	1.75	1.86	1.63
ドイツ	0.80	0.71	4.29	3.92	マレーシア	1.13	2.43	3.27	1.54
英国	1.38	0.77	1.83	1.50	ドイツ	0.10	0.20	1.60	1.51
台湾	0.93	0.90	1.32	1.03	米国	0.68	0.69	1.01	1.03
米国	0.16	0.23	0.28	0.41	台湾	0.23	0.24	0.25	0.44
ロシア	0.48	0.02	0.14	0.23	英国	0.02	0.05	1.98	0.22
その他	0.07	0.02	1.45	0.04	シンガポール	0.73	0.28	0.08	0.14
合計	14.22	19.73	28.10	18.87	その他	0.92	0.37	0.15	0.26
（南ア依存度）	73.2%	86.6%	66.9%	62.2%	合計	5.83	5.73	10.12	6.61

出所：財務省貿易統計を基に矢野経済研究所作成

(3) 日本の輸出入等の動向

- ルテニウムの国内の需給動向を示す統計がないが、2019年の国内需要はおよそ20tになるとみられる。触媒資源化協会によれば、ルテニウムの国内回収量は2019年で1.8tである。
- 国内の主要サプライヤーはフルヤ金属と田中貴金属の2社。いずれも鉾山で精製されたルテニウムを用途に応じてさらに再精製することで、高純度パウダーや有機・無機化合物、スパッタリングターゲットなどの加工品として供給している。両社は2011年にイリジウム事業の競争力確保を目的に資本・業務提携を締結した。また、リサイクル事業を積極的に展開している。
- 2007年以前、ルテニウムは500円/g以下と白金族金属の中では最も安価であった。しかしながら、2007年にHDD向けの用途開発が進み、ルテニウムターゲットの需要が急増。一時的な供給不足が生じ、価格は3,000円/g超に高騰した。その後、フルヤ金属が使用済みルテニウムターゲットのリサイクルフローを確立したことで、価格は下落した。

表.10-4 ルテニウムの国内回収量推移

(単位：t)

区分	2016年	2017年		2018年		2019年	
			前年比		前年比		前年比
触媒からの回収	0.8	0.2	20.3%	0.4	269.7%	0.4	83.1%
触媒以外からの回収	0.7	0.5	64.9%	2.2	478.4%	1.4	62.4%
合計	1.5	0.6	41.3%	2.7	423.9%	1.8	65.9%

出所：触媒資源化協会

(4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向

- 資源保護の観点から、探査・採掘、輸出に関する許可制度が導入されているが、国内の資源埋蔵量自体が少ないこともあり、ルテニウムに関する政策方針に目立った動きは見られなかった。
- 2019年9月に施行された「資源税法」では、ルテニウム（原鉱又は選鉱）に5～10%の税率が設定されている。以前徴収されていた鉱産資源補償費（4%）と比べ、多少高い税率が設定されているが、資源税法では控除・免除制度もあるため、税率上昇の影響はそれほど大きなものにならないとみられる。

（生産管理関連政策）

- ✓ ルテニウムの探査・採掘に関して、許可証（鉱山資源探査権許可書・鉱山採掘権許可書）制度で市場参入を管理されている。しかし、甘粛省、雲南省など一部限定された地域しかルテニウム鉱産資源がないことから、ルテニウムの生産割当規制は特にないものとみられる。

（輸出管理関連政策）

- ✓ 国内で採掘生産されたルテニウム資源は基本的に国内で利用されており、輸出されるケースはほとんどない。しかし、限られたルテニウム資源の海外流出を防ぐため、2007年より輸出許可証制度（輸出許可証管理貨物リスト）が導入されている。

（産業育成関連政策、他）

- ✓ ルテニウムの産業育成に関しては、中央政府ではなく、ルテニウム資源の主要生産地である各省が個別に将来計画を策定している。具体的には、甘粛省及び雲南省がそれぞれの鉱産資源全体計画において、ルテニウムを含む白金系金属の産業発展に言及している。

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

ルテニウムターゲット

概要

エレクトロニクス分野に用いられるルテニウムターゲットは、ノイズ発生を防止し、特性を向上させる目的から4N（99.99%）から5N（99.999%）レベルの高純度品が求められている。形状は、円盤状に仕上げたプレーナタイプが多い。主に、HDDの磁気ディスクを構成する薄膜材料として用いられているほか、次世代技術の瓦磁気記録方式や熱アシスト方式での採用も期待されている。この他、DRAM・SRAMの置き換え需要が期待されるSTT-RAM（参照層）、半導体製造の最先端プロセスであるEUV（マスク）向けでの需要も立ち上がる見通しである。

製造方法

ルテニウムターゲットの製造方法は溶融法と焼結法に大別でき、現在は焼結法が多用されている。焼結法は、原料粉末を高温下で溶着・焼結させて成形するものであり、HDD向けでは主に放電プラズマ焼結（Spark Plasma Sintering：SPS）法が採用されている。SPS法は、パルス通電による被加工物の自己発熱、粒子間に発生する放電プラズマエネルギーを利用することで、迅速かつ緻密な焼結を短時間で実現する。また、STT-RAMやEUV向けでは溶融法で得られるルテニウムターゲットが用いられるものとみられる。

用途

現在、HDDの主流となっている垂直磁気記録方式では、基板上に軟磁性下地層（Soft magnetic Under Layer：SUL）、非磁性中間層、磁気記録層が順次積層されており、ルテニウムはSUL及び非磁性中間層の材料として用いられている。

SULは、記録ヘッドから記録層に入射した磁界を再び記録ヘッドへと回収する役割を担う。ただ、通常の軟磁性膜は、磁化の向きがそれぞれ異なる複数の磁区に分割された複雑な磁区構造をとりやすい。磁区と磁区の境界からは大きな漏れ磁場が発生するため、信号再生時のノイズの原因となる。そのため、上下で磁化方向が異なる二層の軟磁性層を用いるとともに、その間に非磁性層を挿入した多層構造とする。この非磁性層が上下軟磁性層の磁化を反平行結合させ、磁性的な安定状態を作り出すことでノイズを大幅に抑圧する仕組みとなっている。非磁性中間層は記録層の結晶配向性の確保、分離構造の促進を目的に設けられる。

今後は、次世代メモリのMRAM（磁気抵抗メモリ）の量産に向けたルテニウムターゲットの市場投入が計画されている。MRAMは記憶素子に磁性体を用いた不揮発性メモリである。SRAM並みの高速な読み書きが可能で、低消費電力、高集積性などの特長を有する。ルテニウムは、磁化固定層の非磁性中間層の材料として使われる。

プレイヤー

フルヤ金属、田中貴金属、Materion（米国）、Soleras Advanced Coatings（ベルギー）、American Elements（米国）等

(6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- 2021年1月に阪和興業とJOGMECが南アフリカ・ウォーターバーグPGMプロジェクトの鉱業権を取得した。
- ルテニウムターゲットに加え、HDDからのルテニウム回収再利用に向けた研究開発が始まる。

(Ruターゲットの原料調達面)

- ✓ ルテニウムはプラチナ等の副産物として得られるため、需要に応じて産出量をコントロールできない。
- ✓ フルヤ金属と田中貴金属が事業提携し、南アフリカ3鉱山からの調達ルートを確保。
- ✓ 2021年1月に阪和興業とJOGMECが共同参画する南アフリカのウォーターバーグ白金族金属（PGM）プロジェクトにおいて、南アフリカ鉱物資源省から鉱業権を取得。これにより、同地域における鉱山開発が可能となった。

(回収再利用の取り組み)

- ✓ フルヤ金属はつくば工場と土浦工場でルテニウムの精製・回収ラインを保有しており、土浦工場のリサイクル能力を現状比約7割増の月間5tに引き上げる計画がある。田中貴金属はウエハに成膜されなかったルテニウムプリカーサーをトラップして回収し、分解物や不純物を除去、精製してプリカーサーに戻すという、独自のリサイクルプロセスを開発している。
- ✓ 2019年度には環境省「CO₂型リサイクル等設備技術実証事業」において、フルヤ金属がHDD、電極等のルテニウム含有使用済製品からのルテニウム回収再利用の拡大可能性と事業性を評価した。その結果、HDメディアからのルテニウムリサイクルにおいては、HDD調達量の確保、調達・解体プロセスにおけるコスト削減、解体、剥離プロセスにおける成果物売却先の検討、剥離物及び溶解液の精製工程へのライン間の調整、表面剥離前処理の自動化および電気パルスの自動化、スケールアップ設備設計の検討などが事業化に向けた課題として挙げられている。

(代替素材の開発状況)

- ✓ 二層の軟磁性層の磁化を互いに反平行とする効果は、種々の元素で観測される。大学等の研究機関でMgOなどの開発が行われてきたが、ルテニウムは反平行結合の効果が非常に大きく、代替材料は実用化されていない。

(7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- 鉱山が南アフリカとロシアに偏在しており、インフラ不全や労働争議の勃発等による鉱石の産出量減少が懸念材料となっている。
- ルテニウム市場のさらなる成長に向けた新規用途の開発は不可欠であるものの、当該新規用途での需要急増によりルテニウム地金価格が上昇する可能性がある。

	(原料)	(素材)	(製品・用途)	
	鉱石	ルテニウム地金	ルテニウムターゲット	HDD
課題・リスク	● 鉱山が南アフリカとロシアに偏在 停電等のインフラ不全、労働争議の勃発、社会の混乱などによる採掘作業の中断・鉱石の産出量減少。	● 新規用途での需要急増による需給バランスの悪化、価格の上昇 HDD向けの用途開発が進み、2007年にルテニウムの価格が高騰。 現在は電極触媒、次世代メモリなど新規テーマの本格採用に向けた開発が進む。	● 新規用途の開発 次世代メモリ（MRAM等）向けのターゲットの大型化などへの対応	● ストレージ市場の主役はHDDからSSDへ クラウドサービスの普及などに伴いデータセンター向け大容量HDDの需要が拡大、ディスク枚数の増産によりルテニウムターゲットの需要は堅調推移 ただし、ストレージ市場では2020年に年間出荷台数でSSDがHDDを上回った。中長期的にHDDの需要は縮小基調となり、ルテニウムターゲットの需要も低調なものになると予想される。
対応策	● 供給源の多角化 阪和興業とJOGMECが南アフリカのウォーターバーグPGMプロジェクトで鉱業権を取得（2021年1月） JOGMECが南アフリカのプラットリーフ・プロジェクトへの探鉱出資・技術協力、カナダのパラス地域において民間会社と共同探鉱調査を実施。 ⇒ 取り組みのさらなる強化（官民一体となった鉱山開発） ● リサイクル技術の高度化（ターゲット以外の回収再利用） フルヤ金属がHDD、電極等のルテニウム含有使用済製品からのルテニウム回収再利用の拡大可能性と事業性を評価。 ⇒取り組みの継続化		—	—

11. ゲルマニウム (Ge)

- (1) 概要
- (2) 世界需要・供給
- (3) 日本の輸出入等の動向
- (4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向
- (5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション
- (6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等
- (7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

(1) 概要

- ゲルマニウムは原子番号 32 の元素。炭素族に属し、ケイ素より狭いバンドギャップ（約 0.7 eV）を持つ半導体で、灰白色、結晶構造は金剛石構造（ダイヤモンド型構造）の硬い金属として知られており、ゲルマナイト、レニエライトといったゲルマニウム鉱石も存在するが、亜鉛製錬や石炭灰の副産物から、化学処理を経て、四塩化ゲルマニウム、酸化ゲルマニウム、金属ゲルマニウムが精製されている。
- 初期のトランジスタにはゲルマニウムが使われ、安定性に優れるケイ素（シリコン）が登場するまでは主流だった。電圧降下が小さいことからダイオードや、バンドギャップが比較的狭いことから光検出器に用いられる。また、ガンマ線の放射線検出器（半導体検出器）にも用いられる。素子を液体窒素等で冷却する必要があるという欠点もあるが、エネルギー分解能に優れることから利用されている。
- 赤外線に対して透明で、赤外域で高い屈折率を示す材料として有用である。この性質を利用して石英を用いたレンズにゲルマニウムを添加すると屈折率が上がり、また赤外線を透過するようになるため、光学用途にも利用されている。

- 現在の主な用途としては、以下の3 用途が挙げられる。

① PET 樹脂の重合触媒（二酸化ゲルマニウム）

国内におけるゲルマニウム関連の最大用途。

② 光ファイバーの屈折調整剤（四塩化ゲルマニウム）

光通信用石英ファイバー（光ファイバー）のコアの光屈折率を高めるために、四塩化ゲルマニウムがドーパ材として使用されている。

③ 電子・光学材料（金属ゲルマニウム）

赤外線検知素子用、半導体用エピタキシャル材料、太陽電池（人工衛星）、医療等の用途があり、特に赤外線センサー、監視カメラ、ナイトビジョンなどの光学用途での需要が大きい。

(2) 世界需要・供給

【世界供給】

- 二酸化ゲルマニウムと金属ゲルマニウムの2019年の推定平均年間価格は2018年の価格からそれぞれ15%と20%減少した。主に光ファイバー向け等の需要低迷を背景に、中国で金属ゲルマニウムがだぶついたことが要因とみられている。
- 2019年の世界の光ファイバーケーブル需要は、5Gネットワーク技術の展開が減速し、大手通信会社によるケーブル敷設への支出が減少したことから、2018年に比べて減少したと推計される。なお、光ファイバーケーブルの製造は、世界のゲルマニウム消費量の約3分の1を占める。
- カナダの鉱山会社（テック・リソーシズ）は2018年1月、カナダの鉛亜鉛精錬所での爆発によりスラグ発煙炉が損傷したことを受け、一部ゲルマニウム製品について販売を停止していたが、2019年2月より販売を再開した。
- 中国のニュースソースによると、いくつかのゲルマニウム生産者は、メンテナンスのためか、あるいは低価格のゲルマニウムに対応するために、2019年に一時的に生産を停止した。特に注目すべきは、雲南省の大手ゲルマニウム生産者が6月に10t/年のゲルマニウム金属生産ラインを停止したと報じられたことである。フル生産時には年間40t～50tのゲルマニウム金属を生産していた。シャットダウンは6ヶ月間続くと予想されていた。同社は2019年1月1日から2019年6月27日までの間に9件、合計360万元の政府補助金を受けている。同年10月、中国雲南省政府は、現在は廃業した「方亜金属取引所」が保有していたゲルマニウム金属92.3tを競売にかけた。昆明栄家新材料有限公司が全量を取得したとのことである。

【世界需要】

- USGSによると、2019年の世界供給は130tと前年から横ばい。2014年（165t）のピークからは縮小している。国別で見ると、中国（85t）、ロシア（6t）、その他（40t）。中国は2018年の95tから減少した。環境規制の強化や、長引く相場低迷から供給を絞っているものとみられている。また、その他はベルギー、カナダ、ドイツ、日本、ウクライナが含まれる。
- 中国では、品質保証及び供給の安定性に強みを持つ大手3社への資源集約が進んでおり、中国でゲルマニウム生産が一番多い地域は雲南省で全体の約60%を占めるとされている。なお、世界的に、消費されるゲルマニウムの約30%がリサイクル材から生産されている。ほとんどの光学機器の製造では、使用されるゲルマニウム金属の60%以上が新しいスクラップとして回収され、リサイクルされている。また、米国等では戦車などの軍用車両の窓からもゲルマニウムのスクラップが回収されている。

(3) 日本の輸出入等の動向

- 日本国内では2019年の金属ゲルマニウム輸入量が5年ぶりに縮小した。相場の先安感が強まり、需要家の多くが原料在庫の消費を優先（新規調達を抑制）したことに加え、シリコンテクノロジーが2018年4月に金属ゲルマニウムの国内生産に参入したことも影響したとみられている。しかし、金属ゲルマニウムの輸入における中国シェアは依然として70～80%と高い水準にある（2020年で見ると、塊・粉・くず、製品・その他の合計で中国依存度は84.9%）。

表.11-1 ゲルマニウムの輸入状況

2825.60100 酸化ゲルマニウム

輸入		単位 : kg			
国名	2017年	2018年	2019年	2020年	
カナダ	11,600	8,120	10,621	11,890	
中国	1,531	4,672	3,054	2,073	
米国	1,036	1,492	1,550	1,170	
ロシア	700	1,468	1,260	771	
合計	14,867	15,767	16,485	15,904	

8112.92910 金属ゲルマニウム（塊・粉・くず）

輸入		単位 : kg			
国名	2017年	2018年	2019年	2020年	
中国	4,197	4,540	4,119	3,296	
ロシア	233	1,393	258	151	
米国	648	425	327	1,026	
その他	81	502	5	143	
合計	5,159	6,860	4,709	4,616	

8112.99200 金属ゲルマニウム（製品・その他）

輸入		単位 : kg			
国名	2017年	2018年	2019年	2020年	
中国	1,996	2,562	1,937	2,625	
その他	141	144	45	98	
合計	2,137	2,706	1,982	2,723	

出所：財務省貿易統計

(3) 日本の輸出入等の動向

- ゲルマニウムの国内生産量は統計が存在しないため不明であるが、国内のゲルマニウムの主要用途はPET 樹脂の重合触媒（二酸化ゲルマニウム）、光ファイバーの屈折調整剤（四塩化ゲルマニウム）、電子・光学材料（金属ゲルマニウム）となる。このうち、PET 用重合触媒はPET ボトルの薄肉化や他触媒への移行により需要が大きく縮小している。
- 一方、光ファイバー向けは近年、品質が重視される長距離用光ファイバーを中心に日本メーカーが海外需要を取り込んでいたことなどから堅調な需要を示していたが、2018年以降は中国をはじめとする海外メーカーとの競争激化等により、特に光ファイバ芯線の生産及び輸出が低迷。これを受けて、ドープ材の需要も縮小に転じているとされる。
- 光通信ケーブル市場は、データセンター投資が活発な北米等を中心に需要が拡大しているが、国内光ファイバ芯線の輸出が回復するとは考えにくく、今後もドープ材は厳しい状況が続くとみられている。
- 金属ゲルマニウムは、赤外線検知素子、赤外線用レンズ、半導体エピタキシャル材料（ターゲット材料）、太陽電池（人工衛星）、医療等などに使用され、電子材料分野では、赤外線フィルター関係に利用されている。また、民生用の暗視カメラ関係にも利用されている。赤外線レンズ・透過窓などが新型コロナ対策で空港や大規模施設向けのサーモグラフィで引き合い増となっており、これがゲルマニウム金属・酸化物の国内需要を下支えしている。
- 金属ゲルマニウム（塊、粉、くず）は主にレンズメーカーがゲルマニウムレンズの原料として輸入している。

表.11-2 光ファイバー製品の生産・販売

単位：100万kmコア

	2016	2017	2018	2019	2020	20/19
○通信用ケーブル						
生産	10.63	12.40	12.17	13.17	16.89	128.2%
販売	10.48	11.89	11.83	12.64	16.06	127.1%
通信・電力業	4.28	3.58	3.34	3.93	3.62	92.1%
○光ファイバ芯線（ユーザー向け）						
生産	36.60	35.70	37.31	27.73	23.80	85.8%
販売	36.58	35.72	36.90	27.67	24.26	87.7%
その他（輸出）	36.03	35.19	36.45	27.24	23.86	87.6%
生産合計	47.23	48.10	49.48	40.90	40.69	99.5%
販売合計	47.06	47.60	48.73	40.30	40.32	100.0%

出所：経済産業省・生産動態統計

(4) 主要国（中国）における生産・輸出管理動向

- ゲルマニウムは軍事用途との結びつきも強いいため、具体的な施策方針は明らかとされないケースが多いが、これまでの生産や輸出に係る政策を並べると、近年は明らかにステージが変わってきており、中国企業のサプライチェーン強化が進んでいることが伺える。さらに、2020年9月施行の「資源税法」により、この動きが一層加速する可能性もある。
- ゲルマニウム大手3社は、光学部品やウエハ、光ファイバードープ材等の川下までサプライチェーンを構築していることから、少なくとも自社製品用のゲルマニウム原鉱又は選鉱は資源税法の免税対象となる点が注目される。
- 中国は主に石炭灰のバイプロとして金属ゲルマニウムを製造しているため（同工程では酸化物を経由しない）、影響がゲルマニウム業界全体に拡がるとは考えにくいですが、金属ゲルマニウムを主原材料とする光学部品関連のサプライチェーンでは、競争環境に変化が生じる可能性がある。

（生産管理関連政策）

- ✓ 大手3社への集約が既に進んでいることもあり、ゲルマニウムの市場参入規制に係る政策は策定されていない状況にある。同様に、ゲルマニウムに関しては生産割当規制も確認されなかった。
- ✓ しかし、2017年7月、再生ゲルマニウム生産のための原材料に関して輸入規制を設定（2018年3月にはゲルマニウムくずを対象に輸入検査標準を強化）。この結果、中国における再生ゲルマニウムの生産量が低下し、供給減の状況が続いている。なお、2021年1月1日より同輸入検査標準は廃止されたが、修正版はまだ発表されていない。

（輸出管理関連政策）

- ✓ 2007年よりゲルマニウムを対象とした輸出規制（加工貿易禁止リスト）を敷いてきたが、中国のゲルマニウム製品の加工技術が向上するにつれて、ハイエンド製品の輸出優遇政策へ切り替わってきている（輸出税還付率を2018年、2020年に引き上げ）。

（産業育成関連政策、他）

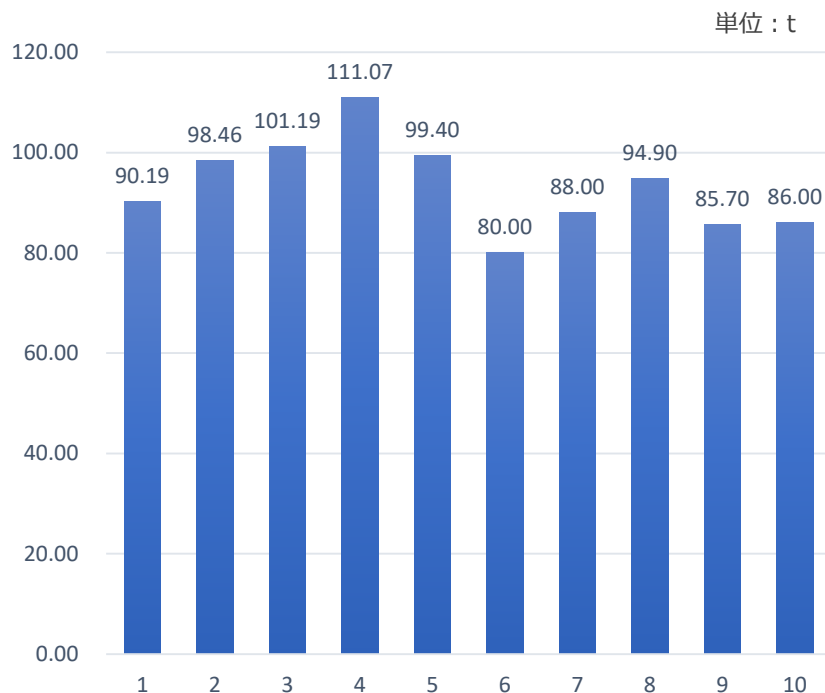
- ✓ 有色金属工業発展計画（2011年、2016年）にゲルマニウムを対象としたプロジェクト（リサイクル、ゲルマニウム・ウエハ）が設定された。また、ゲルマニウム鉱石の主要産地である雲南省政府はゲルマニウムを含む重要非鉄金属企業に対し、総量80万トンの買取活動を促進している。
- ✓ 2020年9月より施行された「資源税法」において、（ゲルマニウム原鉱又は選鉱）2～10%の資源税率が設定されているが、大手3社が光学部品やウエハ、光ファイバードープ材等の川下までサプライチェーンを構築していることから、中国市場への影響は軽微とみられている。

② 中国におけるゲルマニウム生産概況

- 2019年の中国のゲルマニウム生産量は85.7t（USGSデータ, 再生ゲルマニウムを含まない）。
- 中国有色金属工業協会によると、中国の再生ゲルマニウム生産量は2017年3t、2018年20t、2019年21tであることから、これらの生産量を合計すると、2019年のゲルマニウム生産量は約107tとなる。
- また、中国の金属ゲルマニウム輸出量はここ数年増加基調にあるが、2020年は日本やベルギー、米国向けの減少、ロシア向けの増加という極端な動きを示した。

図.11-1 中国におけるゲルマニウム生産量の推移

（再生ゲルマニウムは含まれない）



出所：USGS等の公開情報を基に矢野経済研究所作成

※2020年は2021年1月に発表されたUSGSレポートに掲出の推計値

表.11-3 中国の金属ゲルマニウム輸出量

		数量 (kg), カッコ内は単価 (米ドル/kg, FOB中国)			
		2018	2019	2020	20/19
○塊・粉・くず (HS81129210)					
小計 (その他含む)		16 (3,625)	17 (2,059)	16 (1,987)	94.1% 96.5%
○製品・その他 (HS81129910)					
小計 (その他含む)		20,316 (1,331)	22,844 (1,045)	28,974 (905)	126.8% 86.6%
日本向け		4,518 (1,616)	5,100 (1,145)	3,653 (973)	71.6% 85.0%
ベルギー向け		5,845 (1,230)	6,750 (1,027)	2,250 (864)	33.3% 84.1%
ロシア向け		4,113	4,793	6,650	138.7%
米国向け		4,049	4,793	2,455	51.2%

出所：中国海関実績

(5) エレクトロニクス分野における材料・アプリケーション

● 多結晶・単結晶ゲルマニウム（インゴット）

概要

従来、ゲルマニウムの用途としてはPET 樹脂の重合触媒（二酸化ゲルマニウム）、光ファイバーの屈折調整剤（四塩化ゲルマニウム）がメインであったが、近年は、軍事用途を中心に赤外線レンズ等の光学部品材料として、優れた赤外線透過性を有するゲルマニウムが使用されるようになっている。

製造方法

金属ゲルマニウムや二酸化ゲルマニウム、加工スクラップ(端材、切削屑等)などの低純度なゲルマニウムを回収し、フローティングゾーン法（FZ法）により、5N（99.999％）以上の高純度な多結晶ゲルマニウムに精製。さらに、この高純度多結晶ゲルマニウムを原料とし、単結晶ゲルマニウムの引上げ（CZ法）を行っている。その後、切断、研磨、コーティングなどの後工程を経て、光学部品やウエハが製造される。

用途

レンズ、センサ、半導体製造装置、監視カメラ等の光学部品で主に使用される。赤外線レンズとして需要が大きく、世界的には軍事用途としての利用がメイン。監視カメラや車載カメラ等の民生分野での利用も一部があるが、ゲルマニウム製の赤外線レンズは高価なため、最近はSiやカルコゲナイドガラスを用いた赤外線レンズが使用されるケースが増えてきている。

プレイヤー

長野県に拠点を置くシリコンテクノロジーが、2018年4月からは赤外線カメラのレンズ材料などに使う精製ゲルマニウムの国産化にも乗り出している。また、光学部品メーカーの中には、中国等から多結晶ゲルマニウムのインゴットを調達し、光学レンズ等を製造しているケースもある。海外では、Umicore（ベルギー）、5N Plus（カナダ）、雲南臨滄鑫圓鎔業、南京中鎔科技（いずれも中国）などが挙げられる。

(6) 国内企業における供給源の多角化及び技術開発動向等

- 光学部品（赤外線レンズ等）はこれまで、主に中国から多結晶ゲルマニウムのインゴットを調達し、製造されていたが、長野県に拠点を置くシリコンテクノロジーが2018年4月より赤外線カメラのレンズ材料などに使う精製ゲルマニウム（多結晶・単結晶ゲルマニウム）の国産化に踏み切った。国内亜鉛精錬所での二酸化ゲルマニウム生産と併せ、“自前のサプライチェーン構築”に一定の目処はついたものの、現在は中国のゲルマニウム市況が下がっていることもあり、光学部品メーカーが中国品の調達量を増やしているともされる。そのため、今後は、回収再利用の拡大等と合わせ、国産ゲルマニウム材料の価格競争力強化が課題となってくるものとみられる。

（金属ゲルマニウム・二酸化ゲルマニウムの調達面）

- ✓ 金属ゲルマニウムは主に電子・光学材料、二酸化ゲルマニウムは光ファイバードープ材（四塩化ゲルマニウム）の原料として使用される。四塩化ゲルマニウムは金属ゲルマニウムからも製造は可能であるが、コスト的には酸化物を用いた方が有利とされる。なお、シリコンテクノロジーは二酸化ゲルマニウムを還元した上で多結晶・単結晶ゲルマニウムを製造している（中国依存度を低減したいとのユーザー側のニーズに対応）。
- ✓ ゲルマニウム原料は石炭灰もしくは亜鉛製錬のバイプロとして生産されるが、資源的な面から中国は石炭灰、カナダは亜鉛製錬をメインのゲルマニウムソースとしている点に大きな違いがある。そのため、日本国内では、金属ゲルマニウムは中国から、二酸化ゲルマニウムはカナダから輸入することがほとんどとなっている。また、二酸化ゲルマニウムに関しては日本国内の亜鉛精錬所で一部生産されている。
- ✓ 国内の光学部品メーカーは主に中国から多結晶ゲルマニウムのインゴットを調達し、赤外線レンズを製造しているが、国産のインゴットが調達可能となったことから、現在は中国インゴット（金属ゲルマニウム）、国産インゴット（二酸化ゲルマニウム）、再生原料（スクラップ）の市況を見ながら調達している。

（回収再利用の取り組み）

- ✓ ゲルマニウムの含有量の点から、光学部品については一般的に加工スクラップ（端材、切削屑等）を含め、回収・再利用されている。
- ✓ 米USGSのレポートでは、使用されるゲルマニウム金属の60%以上がスクラップとして回収され、世界的に消費されるゲルマニウムの約30%が再生原料から生産されているとの記載があるが、ユーザーの求める仕様によって変わってくるほか、市況にも左右されるため、実際の再生原料の使用比率は10～30%との声も聞かれた。

(7) サプライチェーン上の課題・安定供給を脅かすリスク

- 中国に依存しないサプライチェーンの構築で一定の成果も、今後、中国の攻勢が予想される中、この“自前のサプライチェーン”をいかに維持強化していくかが大きな焦点となってくるものと見られる。

		(原料)	(素材)	(製品・用途)	
		金属ゲルマニウム	二酸化ゲルマニウム	多結晶・単結晶ゲルマニウム 四塩化ゲルマニウム	光学部品 光ファイバー
課題・リスク	● 中国に依存 2020年は中国品の市況が下がったことから、中国品の調達量を増やすといった動きが業界で見られたとされる。	● カナダに依存 プラント事故等による供給停止リスクを抱える（2018年末から2019年に掛けて、実際に起こった）。他にロシアも候補となるが、コストが高く、品質も不安定とされる。 ● 光ファイバー市場が拡大すると、二酸化ゲルマニウムの需給バランスがタイト化する可能性がある。	● 中国政府による輸出促進 大手を中心に川下展開が進展。原料からの一貫による競争力を活かし、川中～川下での世界シェア拡大の可能性も ● 特に川中は中国企業の攻勢にさらされやすい構造 中国品と技術的な差がなく、市況に影響されやすい。事業継続性に課題。	● 民生分野でのゲルマニウム需要に大きな伸びは期待しにくい状況 光学部品（赤外線レンズ等）については、民生分野では他素材（シリコン他）との競合もあり、大きな需要の拡大は見込みにくい。が、軍事用途を中心に底堅く推移するとみられる。	
	対応策	● 国産原料の供給（国内亜鉛製錬での二酸化ゲルマニウム生産） ● 回収再生原料の取り組み拡大 ユーザーは、中国インゴット、国産インゴット、再生原料を市況を見ながら調達（安定してサイクルを回していくことが困難とも）	● 自前サプライチェーンの維持強化として、防衛省との連携等も有効	また、光ファイバーでは、「5G通信」普及に伴う地上設備のデータ量増加や、旺盛なデータセンタ投資が市場拡大を後押し。住友電工が光ケーブルの国内生産能力を拡大する等の動きが見られる一方で、中国によるAD関税引き上げ（光ファイバー母材）等の動きもあることから、今後も予断を許さない市場環境が続くものとみられる。	