

令和4年度重要技術管理体制強化事業 (重要製品における鉍物使用量調査)

調査報告書

2023年2月28日
株式会社矢野経済研究所

目次

調査概要	3
01. 半導体	4
01-1. NANDフラッシュメモリ	6
01-2. DRAM	11
01-3. ロジックIC	15
01-4. パワー半導体	21
02. 車載用駆動モータ（主機モータ）	33
03. フラットパネルディスプレイ	47
04. 車載用リチウムイオン電池	56
04-1. 車載用リチウムイオン電池 – 正極材	61
04-2. 車載用リチウムイオン電池 – 負極材	75
04-3. 車載用リチウムイオン電池 – 電解質	84
05. 水電解装置	90
05-1. 固体高分子膜型水電解装置	97
05-2. アルカリ型水電解装置	102
06. 通信/電力ケーブル	107
07. ガスタービン	119
08. 超硬工具	134

調査概要

本事業では、半導体やLiB、駆動モータ等のデジタル化、グリーンシフトにより今後重要となる製品に着目。それら製品の製造に必要な資源量や今後の資源の必要量の変化について調査・分析を実施した。

業務実施内容

- 本調査では、経済安全保障上我が国で製造することが求められ、かつ鉱物資源を多く使用する製品として以下の8製品を対象とした。
- 文献調査ならびにヒアリング調査を基に、これら製品の構成部材を整理し、各構成部材の原単位を調査。各構成部材の材料構成と原単位から製品を構成する鉱物量（元素換算量）を分析した。

01. 半導体
02. 車載用駆動モータ
03. フラットパネルディスプレイ
04. 車載用リチウムイオン電池
05. 水電解装置
06. 通信/電力ケーブル
07. ガスタービン
08. 超硬工具

（これら製品で使用される以下の元素について算出ツールを作成）

レアアース	2He	22Ti	31Ga	50Sn	77Ir
レアメタル(遷移金属元素)	3Li	24Cr	32Ge	59Pr	78Pt
レアメタル(典型金属元素)	5B	25Mn	35Br	60Nd	
レアメタル(半金属元素)	6C	26Fe	36Kr	66Dy	
遷移金属元素	9F	27Co	40Zr	72Hf	
典型金属元素	10Ne	28Ni	41Nb	73Ta	
半金属元素	13Al	29Cu	42Mo	74W	
非金属元素	14Si	30Zn	49In	75Re	

01. 半導体

2He

9F

10Ne

14Si

22Ti

27Co

29Cu

32Ge

35Br

36Kr

40Zr

72Hf

73Ta

74W

(1) 概要

- 半導体製品としては、集積回路（Integrated Circuit）、ディスクリート半導体、光半導体、センサーがある。また、集積回路（IC）には、マイクロ（MPU、MCU、DSP）、ロジック（特定用途向け標準品や顧客固有のロジックIC、標準ロジックファミリ等）、メモリ（NAND、DRAM等）、アナログ（汎用アナログIC、専用アナログIC）がある。
- 本調査では、微細化、集積密度向上の取り組みが活発な先端半導体としてロジック、メモリに注目。最終製品に含まれる鉱物量について調査を行った。
- また、自動車分野で需要が拡大しているパワー半導体については、特にxEV（HEV, PHEV, BEV）を中心に採用増加が見込まれるSiCパワー半導体を中心に製造技術等の調査を実施。SiC半導体特有の部材や製造装置において将来サプライチェーン上のチョークポイントとなりうるものがないかを分析した。
- なお、SiC半導体は、現状成熟した半導体製造技術（プロセスルールは90～130nmが中心で、レガシーFabを転用するケースも多い）をベースとしていることから、最終製品に含まれる鉱物量に係る算出ツールの作成は行わなかったが、高温活性アニール炉（SiC対応）のカーボン部材の入手性を懸念する声が挙がっていたほか、先端半導体と同様にタングステンがメタルゲート電極に今後使用される可能性が出てきている点はここで付記しておく。

9F

10Ne

14Si

22Ti

32Ge

36Kr

74W

01-1. NANDフラッシュメモリ

01-1. NANDフラッシュメモリ

(1) 概要

- NANDフラッシュメモリは、電源がなくても記憶を保持できる不揮発性メモリの一種。従来のフラッシュメモリと比べて書き込みや消去が高速で、しかも回路規模が小さくコンパクトかつ安価に大容量化できるといった特徴を有する。
- USBメモリやSDカード、SSDといったデータストレージとして広く活用されており、PCやスマートフォン、デジタルカメラ、カーナビなどの記憶媒体として利用されている。また、容量あたりの単価が安く大容量のデータ保存に向いていることから、クラウドストレージやIoT領域の機器などに搭載される記憶媒体でもNANDフラッシュメモリの需要が高まっている。
- フラッシュメモリのメモリセル構造（断面）は以下の図の通り。絶縁体に囲まれた電荷蓄積膜に、電子を出し入れすることによってデータを記憶する。なお、メモリセルはデータを記憶する最小単位となる。
- フラッシュメモリは数千億個ものメモリセルから構成されているが、このメモリセルを直列に配置した構造のメモリをNAND型フラッシュメモリと呼ぶ。
- NANDフラッシュメモリはメモリセルを高密度に配置できる特徴を持つ。近年は平面構造のフラッシュメモリを上積み上げていくことで、面積あたりのメモリセルの数を増やす3次元化（多層化）が進展している。

01-1. NANDフラッシュメモリ

(2) 構造

- 多層化以外にも、大容量化の手段として、一つ一つのメモリセルに記憶できるデータの量を増やす多値化技術が挙げられる。
- 一般的に、メモリセルに記憶できるデータを増やすことで、フラッシュメモリの容量が大きくなる（データ量当たりのコスト減）が、多値化するためにはしきい値電圧分布を細くしなければならないため、性能や寿命が悪化する傾向にある。そのため、用途に応じて多値化技術が使い分けられている（3次元NANDフラッシュはプレーナNANDよりビット当たりの電荷量が増えているため多値化しやすく、TLC方式から実用化されている）。
- 3次元NANDフラッシュは積層方向によってチャンネルスタック（Channel Stack）とゲートスタック（Gate Stack）の2種類に分類されるが、現在、実用化されている3次元NANDの多くは、ゲート層を積層した後にチャンネルを形成するゲートスタック構造（GS）が採用されている。
- また、電荷の保持方法の違いから浮遊ゲート方式（Floating Gate）とチャージトラップ方式（Charge Trapping Layer）があるが、メモリセルが小さくなるにつれ、物理損傷の影響の受けにくいチャージトラップ方式（CTL）が主流となっている。
- 近年、3次元NANDフラッシュは記憶密度が飛躍的に上昇している。
- 2021年には垂直に連なるセルトランジスタの積層数、あるいはワード線の積層数は最大で176層に到達。2022年から2023年に掛けて200層を超えるレベルに達することが見込まれている。また、学会等での発表からは1個のメモリセルが記憶するビット数を増やす“多値化”のトレンドも見られるようになってきている。
- 3次元NANDフラッシュでは、記憶密度の“高層化”が進んでおり、2021年には垂直に連なるセルトランジスタの積層数、あるいはワード線の積層数は最大で176層に到達。
- 2022年11月、Samsungは1TbのTLCを持つ第8世代の垂直型NAND（V-NAND）の量産を開始したことを発表。Cell-on-Peri（COP）構造によって高いビット密度を達成したとしている。また、Micronは2022年7月下旬に232層3D NANDを、2022年12月上旬には232層ソリューションを搭載した最新クライアントSSDを発表している。

01-1. NANDフラッシュメモリ

(3) 構成部材・材料構成

- 3次元NANDフラッシュメモリの構造については、各社のノウハウでもあるため、詳細は明らかになっていないが、SamsungのTCAT（Tera bit Cell Array Transistor）に類似した技術をキオクシア / Western Digital、SK hynixも採用していると見られている。
- TCATはタングステン（W）のゲートを採用することでゲート酸化膜との界面の空乏化を抑え、ワード線の抵抗を低くしている点が大きな特長。また、ゲートと酸化膜の間にもゲート絶縁膜が回り込んでいる。
- MicronはCMOSアンダーアレイ（CUA）アーキテクチャを適用した置換ゲート（RG）技術を採用している。

01-1. NANDフラッシュメモリ

(4) 市場データ

- 2021年は前年より好調であったPC、タブレット、データサーバー向けの需要が一巡したこともあり、年後半にはNANDのコントラクト価格が下落する等、需給環境が軟化。2022年に入って、さらに値下がりが顕著となっており、NANDメーカーによる減産と設備投資の先送りの動きが目立つようになっている。
⇒キオクシア、2022年9月にNANDフラッシュメモリ工場へのウェハ投入量を10月以降は約3割削減するとともに、需要動向に沿った生産調整を実施すると発表。

01-2. DRAM

9F
10Ne
14Si
22Ti
35Br
36Kr
40Zr
72Hf
74W

01-2. DRAM

(1) 概要

- DRAM(Dynamic RAM)は、コンデンサに電荷を蓄積することで情報を保持するタイプの揮発性メモリ。
- 大容量（～16Gb）、ビット単価が安い、消費電力小といった点から、スマートフォンやパソコンなどにおける主記憶装置として採用されている。
- DRAMには、スタンダードなSDRAM（Synchronous DRAM）と、低消費なSDRAM（LPDRAM, Low Power DRAM）がある。LPDRAMは電源電圧を低くするなどにより、スタンダードなSDRAMに比べ動作時/待機時の消費電力を半分以下に抑えている。
- LPDRAMはモバイル製品搭載を想定したSDRAMであったが、現在は様々な組み込みアプリケーションで採用されている。
- SDRAMでは、クロック信号の立ち上がり、立ち下がり両方でデータのやり取りを行うDDR（Dual Data Rate）のものが普及しており、クロックの速さの違いにより、DDR, DDR2, DDR3, DDR4, DDR5が製品化されている。
- この他、DRAMに代わるメモリとしてPRAMやMRAMなどの次世代メモリの開発が進められているが、次世代メモリは一長一短であり、現状ではDRAMを本格的に代替するには至っていない。

01-2. DRAM

(2) 構造

- DRAMは、コンデンサとトランジスタ1個ずつで構成された「DRAMセル」を複数組み合わせたものとなる。このコンデンサを用いて、電圧の高い状態を1、低い状態を0としてデータを記録する。トランジスタはこの際、コンデンサに電気を流すスイッチとして機能する。
- コンデンサに蓄えられた電荷は、一定時間が経つと自然放電により失われてしまうため、DRAMの動作中、リフレッシュを何度も繰り返すことで、コンデンサの自然放電をカバーし、データの消失を防止している。
- DRAMでは微細化によりコスト低減が図られてきたが、20nmプロセスノード以降は微細化が困難となってきたおり、微細化のペースが落ちている。このため、近年は容量を増加させる方法として、キャパシター絶縁膜の誘電率アップ（HfO₂、ZrO₂）、キャパシター面積の確保（高層化等）が進展している。
- Yole Developmentによると、DRAMのテクノロジーノードは現在1ynm（17nm）、1znm世代（16nm）から1anm、1βnm（13nm以下）世代に移行中（2022年11月、Micronが1βnm技術によるDRAMを広島工場にて量産開始、Samsungは2023年より12nmクラスのDDR5 DRAMを量産予定）。
- Samsungは2021年よりEUVをSNLP（Storage Node Landing Pad）/BLP（Bit Line Pad）リソグラフィに適用した1Znm技術をDDR5の製造に適用。EUV リソグラフィを使用して DRAM セルを縮小し、パターニング手順を削減することで、メモリの高密度化と製造工程の削減を実現している。
- Samsungは、2021年以降の1anm世代や1βnm世代でも引き続きEUV工程を増やしていく方針であることを明らかにしている。

01-2. DRAM

(3) 構成部材・材料構成

- キャパシター部の使用材料は上部電極 (TiN)、容量膜 (ZrAlHfO)、下部電極 (TiN) の構成が主流と見られる。(アスペクト比から見て、1x世代)
- DRAM向けのALD (原子層堆積) 用前駆体の主要サプライヤーの一つであるトリケミカル研究所では、高アスペクト比となり、成膜面積が900m²に達すると指摘している。

2He
9F
10Ne
14Si
22Ti
27Co
29Cu
35Br
36Kr
72Hf
73Ta
74W

01-3. ロジックIC

01-3. ロジックIC

(1) 概要

- ロジックIC (Integrated Circuit) は、入力信号に対して論理演算を行うためのもので、複数の論理ゲートを持ち、それらが相互に接続されて特定の論理機能を実行する半導体デバイスである。
- 具体的には、モバイルSoC (システム・オン・チップ) やGPU (Graphics processing unit) 等の特定用途向け標準品 (ASSP)、顧客固有のロジックIC (ASIC)、標準ロジックファミリ (FPGA含む) が含まれる。
- ロジックICは、製品構造 (プロセス) により主にTTL (Transistor Transistor Logic)、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)、BiCMOSの3つに分類されるが、現在は低消費電力と低コストを両立できるCMOSロジックが主流である。
- CMOS (相補型金属酸化膜半導体) は、nMOSFETとpMOSFETを組み合わせた回路構造。スイッチング時しか電流が流れないため、低消費電力であることに加え、「スケーリング則」に従ってMOSFETを微細化することにより動作速度および集積度を向上させることができるという特長から、現代の半導体デバイスの基本構造になっている。

01-3. ロジックIC

(2) 構造

- MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)は、半導体集積回路(LSI)で一般的に使用されているトランジスタ構造。
- Si基板上に薄い酸化膜を介して金属電極を設けたMOSキャパシタの両側に、キャリアの供給源となるソース(S)領域とドレイン(D)領域が設けられている。ソースおよびドレイン領域は抵抗率を下げるために、高濃度に不純物を添加(ドーピング)してある。
- 絶縁膜上に形成されたゲート(G)電極は、ソース・ドレイン間のコンダクタンス(電流の流れやすさ、電気抵抗の逆数)を制御するために設けている。
- ゲート直下の電流が流れる領域をチャネルと呼び、チャネル内を電子が流れるものをnチャネル型、正孔が流れるものをpチャネル型と呼ぶ。
- スマホなどの先端デバイス向け等の先端デバイス用のMOSFETは、チャネルの複数方向をゲートで囲うFinFET(フィンフェット)やGAA(ゲートオールアラウンド)といった3次元的な構造を採用し、性能向上が図られている。
- 例えば、ソース/ドレイン領域をFin状に形成したFinFETでは、チャネルの3方向がゲートで囲われた状態となり、従来のプレーナー構造よりもゲート電圧による静電制御性が高く、高速でのスイッチングが可能となっている。また、最先端のMOSFETでは、チャネルとゲートの接触面積を増加することで、高性能化を図っている。

※MBCFET(マルチブリッジチャネルFET)はSamsungが2019年に公開した3nmGate-All-Around(GAA)プロセス「3GAE」で採用したGAAのバリエーション。2次元ナノシートを並べるチャネル構造を採用しており、ゲートとチャネルの接触面積を増やし、電流の増大を実現している。

01-3. ロジックIC

(2) 構造

- FinFETは2011年にIntelが世界に先駆けて22nm世代のマイクロプロセッサで取り入れた。それ以降、10年に渡って先端半導体のトランジスタとして採用されてきたが、5nm世代の半導体が量産されるようになってきた2022年では、FinFETでもゲートの薄型化、小型化が限界に近づくにつれ、リーク電流の増大が問題になってきている（さらなる微細化の限界）。
- こうした背景から、3nm世代以降では、4面全てをゲートで囲むことで、リーク電流を抑えるGate All Around (GAA) FET（全周ゲートFET）が注目されている。
- GAA FETでは、細いチューブを縦に並べたようなNanowire（ナノワイヤ）や細長いシートと重ねたようなNanosheet（ナノシート）が研究されてきた。
- Samsungは2022年6月、Nanosheetを用いたMBCFET技術による3nm世代プロセスの先端半導体量産を開始したと発表。最初の顧客は、ビットコイン採掘用のASICを設計するファブレスメーカーである中国・上海磐矽半導体（PanSemi）と報道されている。
- 一方、TSMCは2022年末より3nmプロセスによるチップ量産を開始しているが、3nm世代ではFinFETを採用することを明らかにしており、その先の2nm世代からNanosheetベースのGAA FETを採用するとしている。
- なお、TSMCは2022年6月にN2（2nmクラス）製造技術を正式に発表。2025年にも生産を開始することを明らかにしている。この中で、EUVリソグラフィを多用し、GAA FET（Nanosheet採用）と裏面給電を導入するとしている。

01-3. ロジックIC

(2) 構造

- ロジックICでは、チャンネル・ゲートの構造の他、裏面給電技術が注目されている。
- 現在、電源供給配線網（PDN：Power Delivery Network）を前面に配したFront-side PDNから電源を供給する方式が一般的であるが、回路の微細化により、最先端の超大規模高速ロジックICではMOSFETによる遅延時間よりも配線による遅延時間が回路の性能を左右する割合が増加しているとされる。
- 実際、テクノロジーノードが進むことで、トランジスタに近づくにつれ、金属配線がますます狭くなっており、材料を通る電子の流れに起因する電圧降下（IRドロップ）の問題が無視できなくなっている。また、電源/設置配線を含めたPDNはセルレベルでかなり広い面積を占めるため、セルハイトのスケーリング（密度向上）が制限される問題もある。
- このため、2nm世代以降では、PDNをシリコンダイの裏面側（BS：Back Side）にレイアウトした裏面給電技術（Back Side-PDN）が導入される見込みである。（TSMCは2nmノードから採用予定であることを明らかにしている）

01-3. ロジックIC

(3) 構成部材・材料構成

- 先端ロジックICの多くは、多層の複雑な銅配線スキームを組み込んでいる。
- 16/14nm世代以降は多くのチップメーカーがインターコネクットのライナーをタンタル（Ta）からコバルト（Co）に変更している。
- Intelは10nmプロセス以降、チップ抵抗を下げるため、ローカル相互接続層のM0、M1にコバルト（Co）を採用している。
- 他のチップメーカーはM0とM1に引き続き銅（Cu）を採用しているが、10nm/7nm当たりからコンタクトパッドにタングステン（W）からコバルト（Co）を使用し、配線抵抗を低減している。
- IMECによると、3nmプロセスではチップメーカーは引き続き銅デュアルダマシンプロセスを拡張して既存の材料を使用し続けるとのこと。
- 以前、銅の濡れ性、ギャップ充填性を改善できるルテニウム（Ru）がインターコネクットのライナーに使用される可能性も浮上していたが、ルテニウムはエレクトロマイグレーション寿命が短く、CMP等のユニットプロセスの課題もあることから、トーンダウンしてきているようである。

01-4. パワー半導体

01-4. パワー半導体

(1) 概要

- パワー半導体は、電源（電力）の制御・供給を行う半導体で、扱う電圧や電流が大きいことが特徴。
- 主に電圧、周波数を変えたり、直流を交流、交流を直流に変えるなどの電力変換に使われている。
- パワー半導体は、モータを低速から高速まで精度良く回したり、太陽電池で発電した電気を無駄なく送電網に送ったり、様々な家電製品、電気器具に安定した電源を供給する役割を担う。
- パワー半導体に関連する製品には、パワートランジスタやパワーダイオードなどのディスクリート製品という狭義のものと、パワーマネジメントICやスイッチ、レギュレータなどのアナログ半導体を含む広義のものがある。パワーコンバータはこれらのパワー半導体を組み合わせて回路を構成するものとなる。
- 近年、世界的な環境意識の高まりを背景に、低炭素社会の実現に向けた再生可能エネルギーや省エネ家電の普及が注目されている。パワー半導体は、省エネ家電の普及と再生可能エネルギーの利用拡大を支えるキーデバイスと位置付けられており、中でも、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）とMOSFET（Power Metal-oxide Semiconductor Field-Effect Transistor）は高い市場成長が見込まれている。特にIGBTはモータ制御用インバータに不可欠な部品で、用途も鉄道、産業機器、エレベータ、空調システム、太陽光発電システム、電気自動車などに広がっている。
- こうした点を踏まえ、本調査では、電力変換を直接担う狭義のパワー・ディスクリート、特にIGBTとパワーMOSFETに焦点を当てる。

01-4. パワー半導体

(2) 構造

- パワーMOSFETやIGBTでは、ゲート電極を埋め込み、チャンネルを縦に配置したトレンチゲート構造が主流となっている。チャンネルを縦に配置することで、セルピッチを小さくでき、セルをたくさん並べることができるため、同じチップ面積でもON抵抗をより小さくすることができるメリットがある。
- また、マスク工程が10工程以下に抑えられる等、製造工程を比較的簡便することができるため、ダイサイズを大きくしやすく、高電圧・大電流化などの要求に対応しながらも、コストパフォーマンスに優れた製品を製造できる特長を持つ。
- 三菱電機におけるIGBTの構造を見ると、1980年代にバイポーラトランジスタを第1世代チップに置換。その後、第1世代から第3世代まで約40%の電力損失低減を続け、現在の第5世代チップは第1世代チップ使用時の3分の1から4分の1の電力損失に達している。
- 三菱電機では、第4世代よりトレンチ構造を導入。第5世代では、さらなる低損失化を目指し、キャリア捕集層を追加しバルク抵抗を低減している。

01-4. パワー半導体

(2) 構造

- 現在、パワー半導体はSiベースの製品が大半であるが、小型化、低消費電力化、高効率化が見込まれるシリコンカーバイド（SiC）やGaNベースの製品の投入が活発化している。特に自動車分野では、SiC採用によるスイッチング効率の向上を通じたシステム全体の電力損失の低減が期待されており、EV化のトレンドと相まって、SiCの需要拡大が見込まれている。
- 他方、GaNについても2006年頃より通信基地局で採用されたのを皮切りに、そのワイドバンドギャップ特性、高耐圧特性からスマホ、PC向けの急速充電器などでも採用が進んでいる。
- SiCと比較した場合、電子移動度、電子飽和速度が高いため、スイッチング特性がさらに高く、部品小型化できる。そのため高周波デバイス用途での需要が見込まれているが、熱伝導率が低く、またデバイスの構造が横型構造のため、高耐圧大電流用途ではSiCが採用される方向にある。

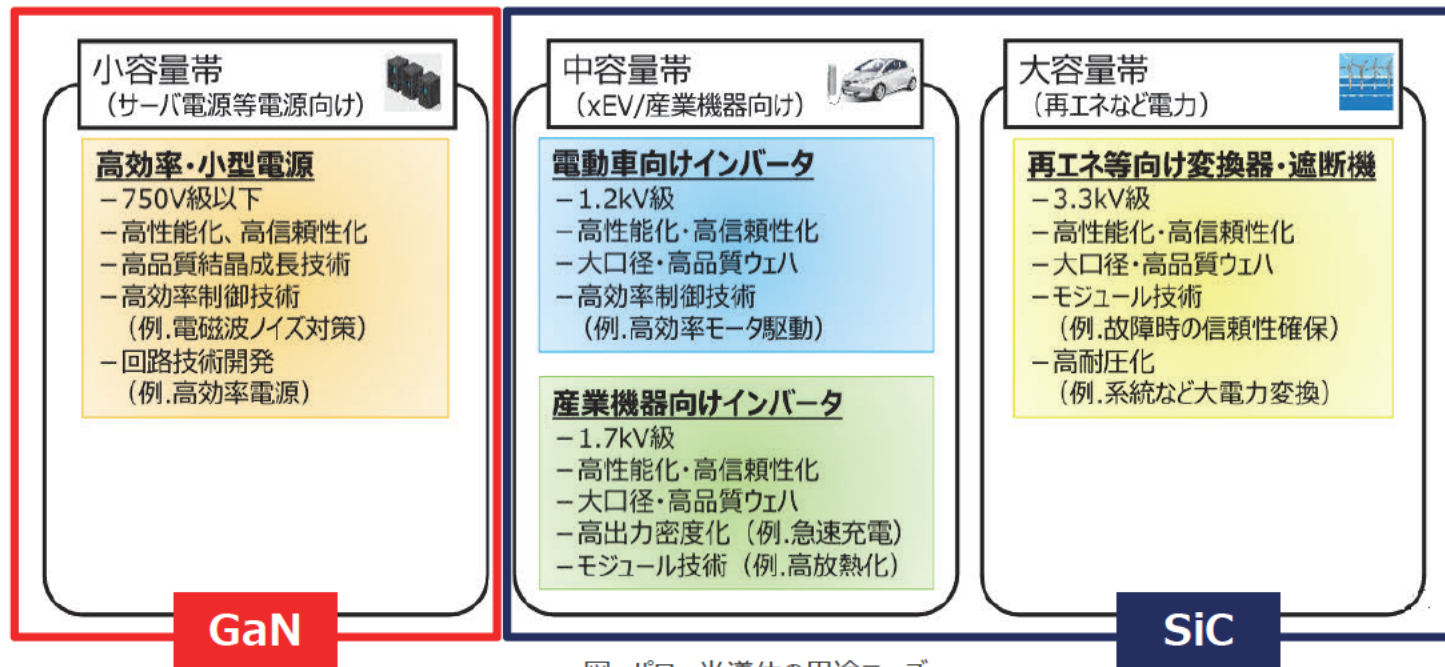


図 パワー半導体の用途ニーズ

出所：経済産業省「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画（案）の概要より抜粋

01-4. パワー半導体

(3) 製造プロセス

- パワー半導体の中でも、今後自動車用途を中心に需要が大きく拡大する見込みのSiCベースのパワー半導体では、日本国内での設備投資が活発化している。
- SiCのプロセスルールは90nm～130nmが中心になる見込みで、レガシーFabが転用できる点が国内での投資拡大の大きな追い風となっているものとみられる。
⇒ これらの点を踏まえ、ここではSiCベースのパワー半導体の製造プロセスについて調査を行った。
- SiCベースのパワー半導体の製造プロセスは主に以下の工程で構成されている。Si半導体製造技術がベースとなるが、SiCの材料特性から、高温アニール炉（Max：1950℃）や高温イオン注入装置（Max：700℃）といった特定のプロセスを導入する必要があるほか、基板薄型化のためのバックグラインド技術やバックサイドメタルデポジション技術等のさらなる開発も求められている。

- ① エピタキシャル成長
- ② イオン注入
- ③ 活性化アニール
- ④ ゲート酸化膜形成
- ⑤ ゲート電極形成
- ⑥ オーミック電極形成
- ⑦ Al電極・保護膜形成

01-4. パワー半導体

(3) 製造プロセス

- ① エピタキシャル成長
- ② イオン注入
- ③ 活性化アニール
- ④ ゲート酸化膜形成
- ⑤ ゲート電極形成
- ⑥ オーミック電極形成
- ⑦ Al電極・保護膜形成

- 4H-SiC基板上に2層構造のエピタキシャル構造を化学的気相成長法（CVD）により形成。
- 基板サイズは150mmがスタンダード。
※200mmウエハを量産しているのは米Wolfspeedのみ。同社は2022年4月に米国ニューヨーク州モホークバレーに200mmウエハーのSiC工場を開設。
※ただし、レゾナックHDが2022年9月より200mmウエハのサンプル出荷を開始している。
- （エピタキシャル成長）MOCVDが一般的とみられる。シリコン前駆体としてシランガス（ SiH_4 ）、炭素前駆体としてプロパンガス（ C_3H_8 ）を用い、水素ガス（ H_2 ）（アルゴンと混合することもある）をキャリアガスとして適用。

01-4. パワー半導体

(3) 製造プロセス

- ① エピタキシャル成長
- ② イオン注入
- ③ 活性化アニール
- ④ ゲート酸化膜形成
- ⑤ ゲート電極形成
- ⑥ オーミック電極形成
- ⑦ Al電極・保護膜形成

- n型不純物としてP（リン）イオンを、p型不純物としてAl（アルミニウム）イオンをイオン注入を用いて導入。
- 注入阻止マスクにはSiO₂膜を用い、注入部位のSiO₂を反応性イオンエッチング（RIE）にてエッチングし、それぞれのイオンを注入。イオン注入時には不純物注入によるSiC結晶の損傷を抑制するために高温に加熱。

（ドーピング） SiCは融点が高く、ドーパントの拡散定数が低いため、従来の熱拡散は実用的でない。このため、イオン注入が採用されている。イオン注入装置はMax700℃。

（エッチング） Si 用に開発された市販の RIE 装置を SiC のエッチングに使用することができる。

- エッチングガスはフッ素系、塩素系、臭素系が一般的
フッ素系:SF₆,CF₄,NF₃,BF₃
塩素系:Cl₂,BCl₃,
臭素系:Br₂,Ibr
- エッチングレートはSiと比較して相対的に低い。
- 炭素原子の除去を促進するため、キャリアガスはO₂やArを使用する。

（マスクング材料） Al、Ni、ITO、SiO₂等のハードマスクが適用される。

- AlマスクRIEにより不揮発性のAl₂O₃が形成され、表面を著しく粗面化させる。H₂ガスを流すと改善するが、エッチレートと選択性が低下する。
- 洗浄については半導体製造で標準的に用いられているRCA（SC1、SC2）等が用いられているものとみられる。

01-4. パワー半導体

(3) 製造プロセス

- ① エピタキシャル成長
- ② イオン注入
- ③ 活性化アニール
- ④ ゲート酸化膜形成
- ⑤ ゲート電極形成
- ⑥ オーミック電極形成
- ⑦ Al電極・保護膜形成

- イオン注入により導入した不純物をSiCの結晶構造に組み込み活性化するとともに、イオン注入により生じた結晶損傷を回復させるため、高温で加熱。
- SiCの場合は1600℃～1800℃という超高温処理が必須（アニール温度はMax1,950℃）。
- 超高温処理による表面元素の脱離を防ぐために、SiH₄雰囲気中でのアニールやグラファイトキャップを用いる手法が実用化していると共に、レーザアニールによる活性化も試みられているが実用化には至っていない。現状では、高周波誘導加熱や赤外線ランプ加熱、電子衝撃加熱等、いくつかの手法を用いた活性化アニール装置が実用化されている。
- また、アニール処理時の表面保護として、カーボンキャップ技術（RFスパッタ等でカーボン膜を堆積）を適用している例がある。

01-4. パワー半導体

(3) 製造プロセス

- ① エピタキシャル成長
- ② イオン注入
- ③ 活性化アニール
- ④ ゲート酸化膜形成
- ⑤ ゲート電極形成
- ⑥ オーミック電極形成
- ⑦ Al電極・保護膜形成

- ゲート酸化膜を形成するために酸素雰囲気中で酸化し、その後、窒化処理を行う。（基板全面にSiO₂を形成）
- SiC/SiO₂界面の品質向上として、酸化膜とSiCの界面に窒素（N）を導入することで、界面トラップを不動態化し、界面トラップ密度を改善する取り組みが進められている。
- 窒素の導入は、NOまたはN₂O環境下での酸化または酸化後のアニール、および酸化膜とN₂Oアニールの組み合わせが採られている。

01-4. パワー半導体

(3) 製造プロセス

- ① エピタキシャル成長
- ② イオン注入
- ③ 活性化アニール
- ④ ゲート酸化膜形成
- ⑤ **ゲート電極形成**
- ⑥ オーミック電極形成
- ⑦ Al電極・保護膜形成

- ゲート電極として、低圧CVDを用いて多結晶シリコンを基板全面に成膜。
- その後、この多結晶シリコンに導電性を持たせるためにリンを拡散させ、不要な部分はRIEを用いてドライエッチングにより除去。
- 低抵抗化等の観点からメタルゲート電極の採用も検討されており、CTE（熱膨張率）の面からモリブデン（Mo）やタングステン（W）が候補として挙げられている。
※サムコはSiC、GaN系のトレンチMOSFETへの適用を想定し、モノシランとWF6およびH₂を用いた熱CVDによるタングステンの成膜を実施。表面の凹凸が少ない滑らかな膜がカバレッジ性よく成膜できたことを明らかにしている。

01-4. パワー半導体

(3) 製造プロセス

- ① エピタキシャル成長
- ② イオン注入
- ③ 活性化アニール
- ④ ゲート酸化膜形成
- ⑤ ゲート電極形成
- ⑥ オーミック電極形成
- ⑦ Al電極・保護膜形成

- 基板表面のソース領域、基板裏面のドレイン領域にオーミック電極を形成。
- 具体的には、基板表面に層間絶縁膜としてSiO₂をプラズマCVDを用いて成膜。その後、電極形成部のSiO₂を除去しオーミック電極を形成する。この後、加熱することによりSiCとの合金化を行う。
- n-SiC/金属コンタクトの形成には一般的に Niが使用される。厚みは50～100nm。
- p-SiC/金属コンタクトの形成には一般的にAl/Ti合金が使用される。
- SiCにオーミックコンタクトを形成するには、通常、金属蒸着後に900～1000℃のアニールを行う。その後、厚いオーバーレイ金属を蒸着することで、表面粗さを減らし、ワイヤーボンディングに対応する。
- 各セル間の電氣的接続を行うため、配線形成を行う。ゲート電極及びソース電極上のSiO₂をRIEにてドライエッチングした後、スパッタリングによりAlを堆積し、リソグラフィとRIEにより不要なAlを除去。
- その後、デバイスの最終保護として厚さ2μmのSiO₂をプラズマCVDにより形成。

01-4. パワー半導体

(4) 市場データ

- Yole Developmentでは、2021年のSiCパワーデバイスの市場規模は10.9億ドル。2027年には約63億ドルに拡大すると予測している。
- 牽引役は自動車（用途別構成比でみると、2021年時点63%から2027年にはおよそ80%に拡大）。
- 自動車用途でのSiC採用拡大により、パワーデバイス市場におけるSiCのシェアは2027年に20%に達するとの見方である。

※GaNは2027年時点で8%

27Co

29Cu

31Ga

59Pr

60Nd

66Dy

02. 車載用駆動モータ（主機モータ）

(1) 概要

広い動作範囲での高効率化、低コスト、小型軽量化が要求される主機モータ

- 自動車では、スタータやオルタネータ、各種補機類から次世代車（HEV/PHEV/BEV）の駆動用に用いられる主機モータまで様々なモータが搭載されている。このうち、主機モータは「xEVに搭載され、車両が進むための駆動力の発生および制動時のエネルギー回生を担うモータジェネレータ」と定義することができる。
- 駆動モータの搭載個数は、パワートレインシステムや車種によって変化する。
- HEVの場合、モータはメイン駆動力ではなく、発進時の動力や巡航時にエンジンの働きをアシストする機能を持つ。また、システムによって搭載数も異なっており、駆動用モータとは別に発電用モータを備える場合も多い。そのため、それらの用途をそれぞれのモータが行なう 2モータ方式が現在の主流となっている。しかし、日産などの1モータ2クラッチ式やホンダが開発していた3モータ式など、2モータ以外の方式も存在する。
- BEVではエンジンがないため、メインの駆動力となる1個のモータを搭載するケースがほとんどであるが、TESLA「Model S」のようにフロントとリアの各車軸に1つずつの計2個を搭載する場合もある。
- 主機モータには、広い動作範囲での高効率化、低コスト、小型軽量化が求められる。モータの体積は搭載性に、重量と効率は燃費や航続距離に影響するため、理想はこれらの要素を高い次元で成立させる必要がある。
- また、市街地からハイウェイでの走行など様々な状況下で駆動する主機モータは、家電や産業用など他のモータと比較して動作領域が広く、広範での高効率が求められることから要求水準は高い。

(1) 概要

主な主機モータ（駆動用モータ）の仕様と搭載車種①

OEM	システム		搭載モータ数	駆動用モータの主な仕様*1			主な搭載車両
	種類	名称		モータ種類	最大出力 (kW)	最大トルク (Nm)	
トヨタ自動車	HEV	THS	2個	交流同期	45~165	163~335	トヨタ/Lexus/マツダのHEV
	PHEV	—	1個	交流同期	53	163	Prius PHV
本田技研工業	HEV	IMA	1個	交流同期	10~15	78	FREED、CR-Z
	HEV	i-DCD	1個	交流同期	22	160	Fit、Shuttle、VEZEL
	HEV	i-MMD	2個	交流同期	124	307	Accord、Odyssey
	HEV	SH-AWD	3個	交流同期	35	148	Legend、Acura RLX
				交流同期	27 (×2)	148 (×2)	
	HEV	e:HEV	2個	交流同期	80	253	Fit、Vezel、Step wagon、
	EV	—	1個	交流同期	100	315	Honda e
日産自動車	HEV	IDCC*2	1個	交流同期	30~50	160~290	Fuga、Cima、X-trail
	HEV	e-POWER	2個	交流同期	80	254	NOTE e-POWER
	EV	—	1個	交流同期	80/110	254/320	Leaf、e-NV200
	EV	CMF-EV	1個~2個	交流同期*3	160/290	300/600	ARIYA
SUBARU	HEV	—	1個	交流同期	10	65	XV Hybrid、Impreza
三菱自動車工業	PHEV	—	3個	交流同期	60	137	Outlander PHEV
				交流同期	60	195	
	EV	—	1個	交流同期	50	200	i-MiEV (iOn、C-ZERO)

出所：矢野経済研究所「車載モータ市場の最新動向と将来展望 2022」

*1:発電用モータを搭載するシステムについても駆動用MG側の仕様のみ記載、*2: Intelligent Dual Clutch Control、

*3:巻線界磁式交流同期モータを使用

(1) 概要

主な主機モータ（駆動用モータ）の仕様と搭載車種②

OEM	システム		搭載モータ数	駆動用モータの主な仕様*1			主な搭載車両
	種類	名称		モータ種類	最大出力 (kW)	最大トルク (Nm)	
Volkswagen	HEV	—	1個	交流同期	20～34	150～160	Jetta (US) 、Touareg
	PHEV	—	1個	交流同期	80～85	330	Golf、Passat
	EV	—	1個	交流同期	60～85	210～270	e-Up!、e-Golf
	EV	MEB	1個	交流同期	110	310	ID.3
Porsche	PHEV	—	1個	交流同期	70	310	Cayenne、Panamera
	EV	PPE	2個	交流同期	500/560	850/1050	Taycan
Audi	EV	PPE	3個	交流誘導	433	973	Audi e-Tron
BMW	HEV	—	1個	交流同期	40	210	Active Hybrid 3/5/7
	PHEV	—	1個	交流同期	65～83	165～250	225xe、330e、740e
	EV	—	1個	交流同期	96～125	250	i3 (PHEVのi8もモータは共通)
	EV	5th Gen. eDrive	2個	交流同期	210	400	iX3
Daimler	HEV	—	1個	交流同期	20	250	C300、E400、S300
	PHEV	—	1個	交流同期	60～85	340	C350e、S500e
	EV	—	1個	交流誘導	55/130	130/340	B-Class/Smart fortwo
	EV	eVD2	2個	交流誘導	300	765	EQC
	EV	eATS	2個	交流同期	245	568	EQS

出所：矢野経済研究所「車載モータ市場の最新動向と将来展望 2022」

*1: 発電用モータを搭載するシステムについても駆動用MG側の仕様のみ記載

(1) 概要

主な主機モータ（駆動用モータ）の仕様と搭載車種③

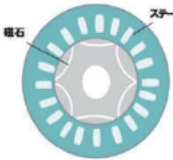
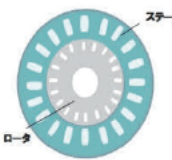
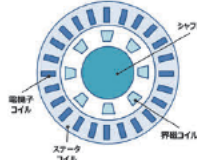
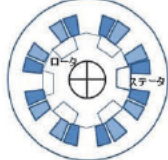
OEM	システム		搭載モータ数	駆動用モータの主な仕様*1			主な搭載車両
	種類	名称		モータ種類	最大出力 (KW)	最大トルク (Nm)	
Volvo	PHEV	—	2個	交流同期	34	160	XC90
				交流同期	65	240	
	EV	—	2個	—	300	660	C40 Recharge
GM	M-HEV	eAssist	1個	交流誘導	11	107	Lacross、Regal、Malibu、Impara
	HEV	2-mode	2個	交流同期	60 (×2)	—	Tahoe、Silverado
	PHEV	—	2個	交流同期	111	368	Chevrolet Volt
	EV	—	1個	交流同期	100	542	Spark EV
	EV	BEV2	1個	交流同期	150	360	Bolt EV
	EV	BEV3	2個	交流同期	255	440	Cadillac Lyriq
Ford	HEV	—	2個	交流同期	88	—	Fusion/C-MAX
	PHEV	—	2個	交流同期	88	—	Fusion/C-MAX
	EV	—	1個	交流同期	107	250	Focus Electric
Tesla	EV	—	1個～2個	交流誘導	193	—	Roadster、Model S/X
		—	1個～2個	交流誘導	211	350	Model3
		—	1個～2個	交流誘導	760	—	Model S Plaid
Hyundai/Kia	HEV	—	1個	交流同期	32～38	170～205	IONIQ Hybrid、Sonata Hybrid
	PHEV	—	1個	交流同期	45～50	205	IONIQ PHEV、Sonata PHEV
	EV	—	1個	交流同期	81～88	295	IONIQ EV、Soul EV

出所：矢野経済研究所「車載モータ市場の最新動向と将来展望 2022」

*1:発電用モータを搭載するシステムについても駆動用MG側の仕様のみ記載

(2) 構造

【モータ方式】 モータ方式別の特徴

	永久磁石型同期モータ (PSM)	非同期誘導モータ (IM)	巻線界磁同期モータ (WFSM)	リアクタンスモータ (SRM)
	Interior PMSM(IPM)	Induction Motor	Wound-field SM	Switched RM
モータ構造				
永久磁石	必要	不要	不要	不要
巻線形式	集中・分布巻き	集中・分布巻き	集中・分布巻き	集中巻き
小型・軽量	○	×	×	○
最大効率	◎	○	○	○
高回転	1万rpm	1.5万rpm	1.5万rpm	1.5万rpm
堅牢性	○	◎	○	○
耐熱性	×	○	△	○
最大トルク	○	◎	○	◎
静粛性	小	大	小	大
コスト	高価	安価	安価	安価
特徴	磁石トルクとリアクタンストルクが発生し、ロータは回転磁界と同一速度で回転。永久磁石をロータの中に埋め込む。	ロータに電流が流れ、回転磁界速度よりスリップ速度だけ遅れて回転。永久磁石が不要。	ロータに永久磁石の代わりとして巻線を配置し、低トルク領域での効率向上低出力範囲の拡大が期待できる。永久磁石が不要。	永久磁石を使用せず、ロータとステータの間で生じる磁気抵抗（リアクタンス）を利用して回転する。課題は振動や騒音が大さい。
採用 OEM 代表的な車種	Volkswagen ID.3	Tesla Model S 75D	Nissan ARYA	鉄道分野において三菱電機が最大出力450kWのSynRMを開発

(2) 構造

【モータ方式】

- 現状ではxEVの駆動用モータのほとんどに永久磁石式同期モータ（PSM）が採用されている。
- PSMはネオジム磁石を用いることによって界磁磁束が得られるため、高効率で高出力が実現でき、小型軽量化にも適している。特に、1分間にゼロから6,000～7,000回の範囲（あるいはそれ以上）で回転するため、磁石の飛散防止や信頼性の向上等を考慮したIPM（Interior PMSM）モータが主流となっている。
- しかし、将来的にBEV向けの主機モータ等として、より高回転化のニーズが拡大することを想定すると、現在主流であるPSMだけでは難しいとする意見もある。これは高速回転時の誘起電圧上昇に伴う弱め界磁制御が行われ、高速低負荷時の効率低下が見込まれるためである。
- また、レアアースの供給不安やコスト変動といった点でも課題が残る。もちろん、ネオジムの使用量を大幅に削減し、高温の環境下でも使用できる「省ネオジム耐熱磁石」や解析によってモータ内部の発熱を抑える構造設計のようにレアアース削減の工夫が各社で図られている。
- 一方で、レアアースを使用しない誘導モータ（IM）、巻線界磁同期モータ（EESM）、スイッチリラクタンスモータ（SRモータ）も注目を集めている。
- 誘導モータ（IM）は巻線構造をもった固定子に交流電圧を加えることで回転磁界をつくり、誘導電流によって磁極の移動する方向に向かう力を利用して回転する。車載向けでIMの採用実績があるのはTESLA（台湾の富田電機が生産）やMagna等に限られるが、TESLAは、高回転域の効率を重視して「ModelS」に誘導モータを採用したとみられる（ただし、台数は限定的）。
- 構造が簡単で安価、高速回転に対して堅牢な反面、トルク発生の際、原理的に回転子の導体に誘導電流が流れるため、発熱と効率の低下が伴う。また、回転子の冷却も必要となることからモータ体格が大きくなるといった欠点もある。

(2) 構造

【モータ方式】

- 巻線界磁同期モータ（EESM）はロータに永久磁石の替わりとして巻線を配置し、電流を流すことでロータの磁束量を調整するもので、低トルク領域の効率向上、定出力範囲の拡大が期待できる。また、永久磁石を使用しないためレアアースの供給不安に懸念がない点もメリットとなっている。
- 日産は2022年春に発売を開始した新型EV「アリア」の駆動モータにEESMを採用している。米国市場も想定し、高速走行時の効率を重視したことのほか、音や振動の抑制、レアアースのリスク低減等を採用理由に挙げている。ただし、モータの効率を総合的に捉えると、PSM、EESMのいずれも一長一短があり、低速低回転側はPSM、高速高回転側はEESMが優れているとしている。
- 日産以外には、Renault（Zoe）及びBMW（iX3）がEESMを採用している。
- ステータと突極を持った積層電磁鋼板から成るロータによって磁界による吸引力で回転を生み出すスイッチリラクタンスモータ（SRモータ）は、簡易な構造で永久磁石を使わないことから堅牢で安価に生産が可能である。さらに永久磁石の飛散という問題がないため高速回転化が可能である。但し、半径方向にも吸引力が働くため騒音、振動といった課題があるほか、低速時に回転力が変動することから車載向けで実用化されづらかった。しかし、近年は電力制御用半導体素子が発達したことで可変速運転が可能となり、今後の普及が期待されている。
- この他に車載用向けで今後が期待されるモータとしては、大型産業用ポンプなどで採用されるSynRM（シンクロナスリラクタンスモータ）が挙げられる。このモータもSRモータと同様にロータの磁気的な突極性により生じるリラクタンストルクを利用することから、永久磁石が不要となる。欠点は遅れ電流の無効成分で磁束を発生させるため、力率が低いことである。

⇒ 当面はPSMを主流に、一部EESMが採用される流れ

(2) 構造

【巻線方式】

- 主機モータで主に用いられるPSMモータは、集中巻と分布巻の 2 種類が用いられる。
- 集中巻は構造的にシンプルのため生産性も高く、コイルエンドが小さいためロスも少ないが、出力トルクあたりの磁石使用量が多いことや、コギングトルクが大きくなる傾向にあることが課題である。
- 一方で、分布巻は出力トルクあたりの磁石量が少なく、コギングトルクも集中巻と比べて小さくなるが、コイルエンドが大きくなるため、小型軽量化が困難になるという課題がある。分布巻の小型化に対しては、コイルエンドを小さくして搭載性を改善した波巻と重ね巻が挙げられるが、波巻は部品点数、端末接続数が多くなり、重ね巻は生産自動化が難しいといった問題をそれぞれ持つ。
- また、ステータに用いられる巻線はコイルの積占率を上げられる平角線の採用が集中巻/分布巻ともに広がっており、小型・高出力化に寄与している。
- 巻線においては、現在銅が主に使用されている。一方で、安価かつ軽量、モータの部材に使用される鋼鉄などと一緒にリサイクル可能なアルミニウム製の巻線も開発されている。現時点では導電率が低く、焼き付きが起こるなど課題が多いため、銅線に匹敵する電力密度を備えたアルミニウム巻線を開発できるかが今後の課題となっている。

(3) 構成部材・材料構成

【永久磁石】

- 高効率モーター用磁性材料技術研究組合（MagHEM）がまとめた、NEDO/未来開拓研究プログラム「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」のモーターに関する成果報告（2022年）によると、製品1台当たりの磁石重量はHV：1.2kg/台、EV、PHEV：2.0kg/台とのこと。エアコン（0.1kg/台）や洗濯機（0.125kg/台）、自動車補機（0.021kg/台）、HDD-VCM（0.007kg/台）と比べ、xEVは製品1台当たりの磁石使用量が大きいことが分かる。
- NEDO「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」の成果報告書（2022年）によると、2030～2050年の高性能磁石の用途別世界需要は、自動車向けを中心に、いずれの用途においても現状に比べ1オーダー高い需要量が見込まれると試算している。

(3) 構成部材・材料構成

【永久磁石】

- 主機モータでは、磁石材料の中でも高磁性を有するNd-Fe-B系磁石材料が使用されている。Nd-Fe-B磁石の主相である $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ は高い飽和磁化を有するが、（高温時等の）実用上必要な保磁力を確保するため、重希土類元素であるジスプロシウム（Dy）やテルビウム（Tb）がNdに置換する形で添加されている。
- しかし、重希土類元素を含有する鉱石は中国に偏在しているため、その安定調達が懸念されている。また、最近の自動車電動化の進展によるNd-Fe-B磁石需要の伸長のため重希土類及びNd、Pr、ジジム（Nd-Pr混合物）の価格が上昇傾向にある。そのため、近年は省重希土、省Ndの取り組みが活発化している。
- 省重希土、省Ndという観点では、Sm-Co系、Sm-Fe-N系や非希土類系（FeNi）の磁石材料の研究も進められているが、自動車メーカー等は実績や性能・コストのバランスの面でNd-Fe-B系磁石が今後も長年にわたって主力であり続けることは間違いなく、その省・脱重希土類技術の開発が最も重要な課題であるとしている。
- こうした流れの中で、現在は、従来と比べ重希土類元素の使用量を大幅に削減し、同時に磁気特性を大きく向上させることのできる粒界拡散（GBD）法を採用したNd-Fe-B系焼結磁石が世界の磁石メーカーから製品化されている。

⇒ Nd-Fe-B系焼結磁石の具体的な組成については不明であるが、MagHEMがまとめた、NEDO/未来開拓研究プログラム「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」のモーターに関する成果報告に、 $\text{Nd}_{24.8}\text{Pr}_{5.0}\text{Dy}_{1.8}\text{Fe}_{\text{bal}}\text{B}_{0.96}$ （重量比）の焼結体にTb合金を塗布した事例が示されていたことから、これをスタンダードな組成として取り扱っている。

(3) 構成部材・材料構成

【永久磁石】

- Nd-Fe-B系焼結磁石のほか、熱間プレス機を用いて成形する熱間加工Nd-Fe-B系磁石の取り組みも進展している。
- 熱間加工Nd-Fe-B系磁石は、焼結磁石対比1桁程度結晶粒が細かいため、高保磁力かつ保磁力の温度係数が比較的小さい（温度上昇による保磁力低下の度合いが比較的小さい）ことが大きな特長となっている。大同特殊鋼グループにおいて量産されており、リング形状製品がFAロボット用モータや電動パワーステアリング（EPS）用モータ等に適用されているほか、板形状磁石が重希土類フリーNd-Fe-B磁石としてHEV駆動モータで採用されている。ただし、異方性があるため、特に板形状のものをモータに適用する場合はモータ設計に工夫が必要としている。

⇒ 電気製鋼（第92巻第1号 2021年）に掲載の「熱間加工ネオジム磁石の粒界拡散法による高特性化」（大同特殊鋼他）に、熱間加工磁石の一般的な組成は $\text{Nd}_{12.9}\text{Fe}_{77.7}\text{Co}_{3.9}\text{B}_{5.54}\text{Ga}_{0.5}$ （重量比）とあるが、保磁力の向上を目的にNd-Cu等の共晶合金を拡散材として塗布されるため、実際の組成は不明である。

- その他、トヨタがネオジムの使用量を削減した上で、高温環境でも使用可能な性能を確保した「省ネオジム耐熱磁石」を開発している。
- 高耐熱ネオジム磁石に必要なテルビウム（Tb）やジスプロシウム（Dy）を使わないだけでなく、ネオジムの一部をレアアースの中でも安価で豊富なランタン（La）やセリウム（Ce）に置き換えることでネオジム使用量を削減している点が特長。磁石を構成する粒の微細化、粒の表面を高特性にした二層構造化、ランタン、セリウムの特定の配合比を組み合わせることで保磁力を高温でも維持できる性能を実現したとしている。
- トヨタでは自動車の電動パワーステアリングなどのモータでは2020年代前半での実用化を、さらに要求性能が高い電動車の駆動用モータでは2030年までの実用化を目指していくとしている。

(4) サプライチェーン

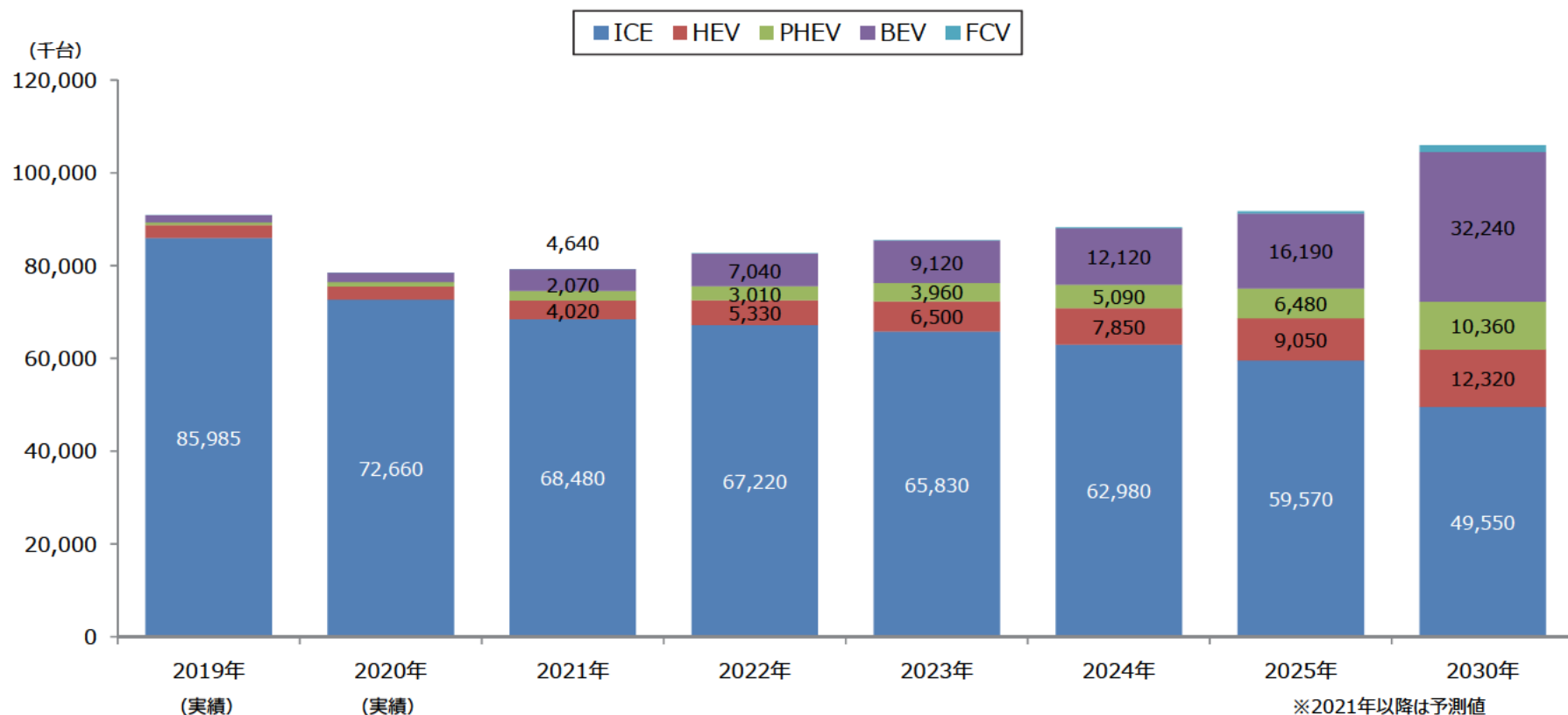


出所：各種資料より矢野経済研究所作成

(5) 市場データ

- 矢野経済研究所ではAggressive予測として、各国が示す電動車の普及目標や、OEM各社が示す意欲的な目標を達成するというシナリオを想定。現在、xEVにおいてHEVが最も普及しているが、欧米中が中心となってBEVシフトに舵を切り、各国が普及のため支援策を実施していることから、2030年の世界全体予測ではBEVのシェアが30.4%と最も多くなると推計した。

図 世界パワートレイン別販売台数推移 (Aggressive 予測)



※12V MHEVおよび48V MHEVといったMHEVはICEとしてカウントしている。
出所：矢野経済研究所「車載モータ市場の最新動向と将来展望 2022」

30Zn

31Ga

49In

50Sn

03. フラットパネルディスプレイ

(1) 概要

面積ベースではLCD（液晶ディスプレイ）がFPDの大部分を占める

- FPD（フラットパネルディスプレイ）は薄型で、平坦な画面の薄型映像表示装置の総称である。
- 表示方式の違いによって、LCD（液晶ディスプレイ）、OLED（有機ELディスプレイ）、PDP（プラズマディスプレイ）、電子ペーパーなどに分類されており、開発当初はそれぞれの製品に求めるスペックや大きさによって使い分けられていたが、現在はLCDの技術革新が進み、ほぼ一人勝ちの状態となっている。
- ただし、スマートフォンなどの小型・軽量のモバイル製品向けではOLEDの採用が増加している。OLEDはLCDよりも消費電力が少なくすむほか、バックライトが不要な構造となるためディスプレイユニットの厚みを薄くすることが可能となる。
- LCDはテレビ、スマートフォン、液晶モニター、ノートPC、タブレット端末、カーナビなどの用途で採用されているが、テレビ向けの需要がメインとなる。面積ベースで見ると、LCD全体の7割程度をテレビ向けが占めているとみられる。

*有機EL（Organic Light Emitting Diode, OLED）：有機ELと呼ばれる現象を応用した発光素子の一種で、発光材料に有機化合物を用いるもの。

*LCD（Liquid Crystal Display）：液晶物質の性質を利用し、バックライトを変調することで画像を表示する表示装置のこと。このうち、薄膜トランジスタ（Thin Film Transistor, TFT）を使用したものはTFT-LCDと呼ばれる。

(1) 概要

FPDでは透明電極や酸化物半導体等の部材でレアメタルが使用される

- TFT-LCD（液晶ディスプレイ）は、TFTおよび画素電極を形成したガラス基板と、カラーフィルター（RGB）および対向電極を形成したガラス基板で液晶層を挟み込み、両方のガラス基板の外側に偏光板を貼り合わせた後、裏面にバックライト光源を配置した構造となる。液晶にかける電圧を変化させることで偏光板2枚を含めた透過率が変化し、バックライトからディスプレイ表面に通過する光の量が変化することでフルカラー画像の表示が可能となる。
- FPDでは、ITOやIZOなどの透明電極部材にインジウム（In）、スズ（Sn）、亜鉛（Zn）が使用されるほか、酸化物半導体IGZOにインジウム（In）、ガリウム（Ga）、亜鉛（Zn）が使用される。これらの材料は主にスパッタリングターゲットの形態によって供給される。各種材料はパネル性能やコスト、生産プロセスとの相性などに応じて選定・使用されている。

*LCD（Liquid Crystal Display）：液晶物質の性質を利用し、バックライトを変調することで画像を表示する表示装置のこと。このうち、薄膜トランジスタ（Thin Film Transistor, TFT）を使用したものはTFT-LCDと呼ばれる。

*ITO（Indium Tin Oxide）：酸化インジウムに酸化スズを添加した化合物のこと。透明導電膜材料として使用される。

*IZO（Indium Zinc Oxide）：酸化インジウムに酸化亜鉛を添加した化合物のこと。透明導電膜材料として使用される。

*IGZO（Indium Gallium Zinc Oxide）：インジウム（In）、ガリウム（Ga）、亜鉛（Zn）、酸素（O）で構成された透明な酸化物半導体のこと。

(2) 構造

LCD駆動方式

- LCDの主流となる駆動方式にはVA方式とIPS方式がある。
- VA方式の液晶分子配列は、電圧がOFFのときは液晶分子が垂直（A）、最大電圧のときは水平（C）に並ぶ。IPS方式は水平に寝かせた液晶分子を横方向に回転させることでバックライト光量を制御する仕組みとなる。VA方式ではコントラスト比を高くしやすいという特徴がある一方で、IPS方式では視野角による輝度変化/色変化が少ないという特徴を持つ。
- 両者ともに成熟した技術であるため明確な技術トレンドがあるわけではなく、バイヤーの意向やサプライチェーン上の影響力などによってシェアは変化する。

*VA（Vertical Alignment）：液晶パネルの表示方式の一つ。初期状態では偏向板に対して垂直となっている液晶分子を、電圧をかけることで偏向板と平行に倒し、それによって光を透過する方式のこと。

*IPS（In-Plane Switching）：液晶パネルの表示方式の一つ。液晶分子に電圧をかけるとパネル面に水平な方向に回転する方式のこと。

(3) 構成部材・材料構成

【透明電極】

- 透明電極は高い電気導電性と可視光透過性を兼ね備えた材料のことで、ITOやIZOがメインとなる。
- IZOはJX金属独自の透明導電膜材料で低温時にエッチングが容易であるという特長を有しており、有機EL等の電極材料に適している。
- ITOは酸化インジウム（ In_2O_3 ）に酸化スズ（ SnO_2 ）が少量含まれている複合酸化物で、使用比率は9：1が主体。IZOは酸化インジウム（ In_2O_3 ）と酸化亜鉛（ ZnO ）を使用する。なお、IZOの各レアメタル使用比率は不明であるが、ここではITOと同じ比率とした。

ITO/IZOスパッタリングターゲットの組成比

製品	透明電極	
部材	ITO	IZO
In	74.4%	74.4%
Sn	5.5%	—
Zn	—	5.5%
O	20.1%	20.1%
計	100.0%	100.0%

[矢野経済研究所作成]

(3) 構成部材・材料構成

【酸化物半導体TFT】

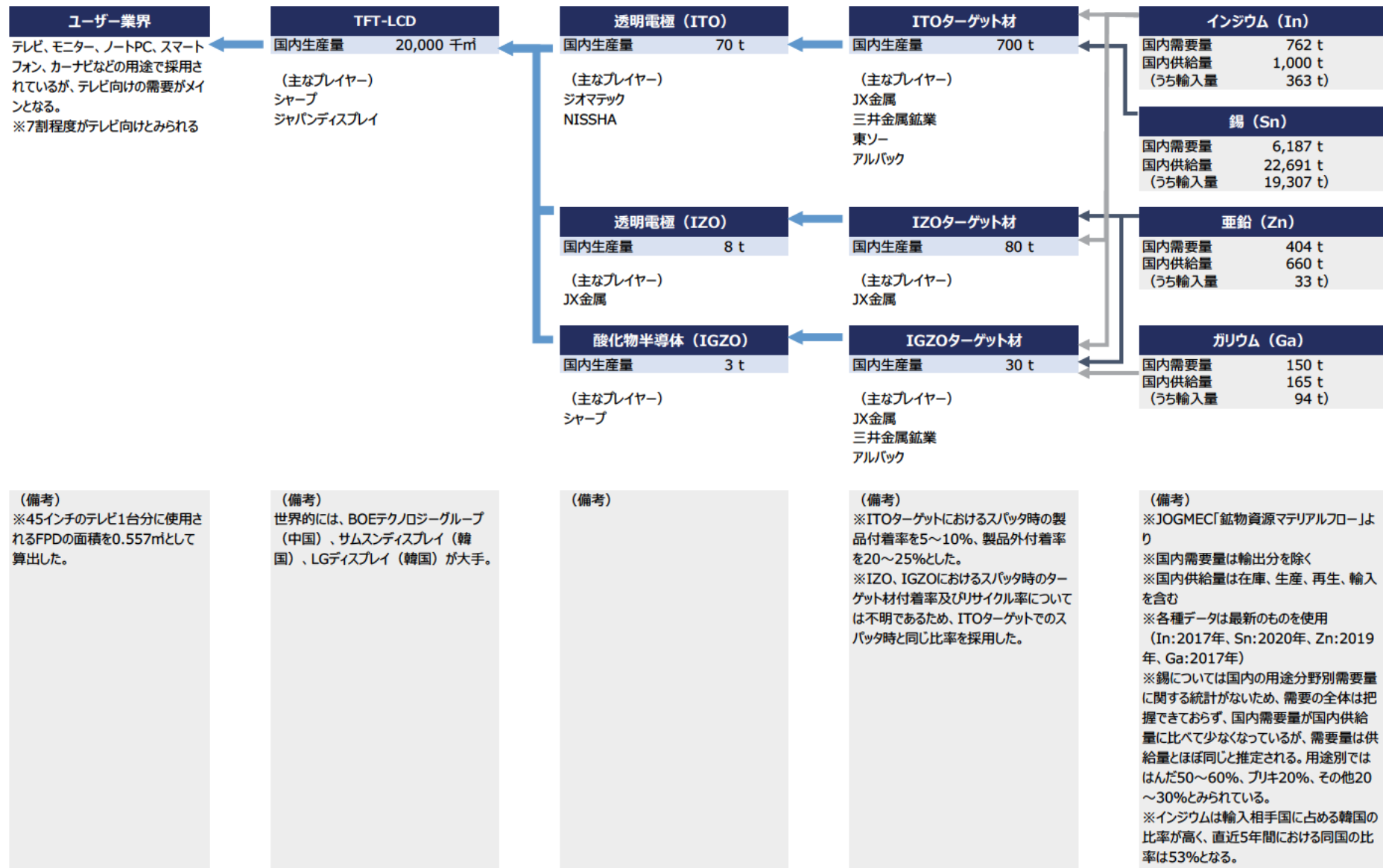
- 酸化物半導体TFTはa-Si TFT及びLTPSの課題を克服したTFTで、高精細化及び低消費電力化などを特徴とする。
- 組成比の算出においては酸化物半導体として量産実績のあるIGZOを対象とした。IGZOでは、 In_2O_3 と Ga_2O_3 、 ZnO を使用する。組成比はさまざまな検討がなされているが、一般的な1：1：1を基準とし、原子量をもとに分子量に換算して原単位を算出した。

IGZOスパッタリングターゲットの組成比

製品	酸化物半導体
部材	IGZO
In	42%
Ga	26%
Zn	12%
O	20%
その他	極僅か
計	100%

[矢野経済研究所作成]

(4) サプライチェーン



(5) 市場データ

表 各種製品国内出荷統計（一般社団法人電子情報技術産業協会統計をもとに矢野経済研究所作成）

（単位：千台、下段カッコ内は構成比）

	2018年度	2019年度		2020年度		2021年度	
			前年比		前年比		前年比
薄型テレビ	4,510	4,867	107.9%	5,426	111.5%	5,387	99.3%
29型以下	878 (19.5%)	816 (18.1%)	92.9%	728 (16.1%)	89.2%	691 (15.3%)	94.9%
30～39型	779 (17.3%)	1,030 (22.8%)	132.2%	1,054 (23.4%)	102.3%	1,040 (23.1%)	98.7%
40～49型	1,143 (25.3%)	1,614 (35.8%)	141.2%	1,785 (39.6%)	110.6%	1,602 (35.5%)	89.7%
50型以上	1,054 (23.4%)	1,407 (31.2%)	133.5%	1,860 (41.2%)	132.2%	2,054 (45.5%)	110.4%
液晶モニタ	—	6,220	—	6,030	96.9%	5,450	90.4%
ノートPC	5,600	6,903	123.3%	10,775	156.1%	5,948	55.2%
スマートフォン	9,615	8,968	93.3%	10,462	116.7%	10,189	97.4%

※液晶モニタの出荷量は1～12月累計

※2018年の液晶モニタ出荷量は該当データなし

一般社団法人電子情報技術産業協会統計をもとに矢野経済研究所作成

(5) 市場データ

表 インジウム 国別輸入量推移 (財務省貿易統計)

・塊、くず及び粉 インジウムもの：HS8112.92-100

輸入							単位：t
国名	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
韓国	84	206	327	186	117	55	64
中国	50	80	113	36	27	32	27
台湾	26	31	30	27	35	40	31
タイ	0	0	0	0	0	0	0
フィリピン	0	0	0	0	0	0	0
マレーシア	1	0	0	0	0	0	0
英国	0	0	2	0	0	0	0
フランス	1	8	22	8	0	1	0
ロシア	0	0	0	0	0	1	0
モンテネグロ	0	0	0	0	0	0	0
ドイツ	0	0	0	0	0	1	0
カナダ	30	37	20	27	34	23	16
アメリカ合衆国	1	0	1	1	1	1	1
合計	193	363	515	286	214	155	140
(韓国比率)	43.7%	56.8%	63.4%	65.2%	54.8%	35.5%	46.0%

(出所) 財務省貿易統計

3Li
6C
9F
22Ti
25Mn
27Co
28Ni

04. 車載用リチウムイオン電池

(1) 概要

- リチウムイオン電池（LiB）は正極・負極の活物質にリチウムイオンを挿入、ならびに脱離することができるホスト構造を有する材料を用い、これらの電極間でリチウムイオンをやり取りすることで充放電が行われる二次電池である。ニッケル水素電池や鉛蓄電池、レドックスフロー電池、ナトリウム硫黄電池などの他の実用電池に比べ、単位体積あるいは単位質量当たりのエネルギー密度が高く、小型・軽量化することが可能である。また、自己放電が少なく、サイクル寿命も比較的長いことから様々な用途に用いられている。
- 実用化当初は、携帯電話やスマートフォン、ノートパソコンなど民生用の小型電子機器に搭載されていた。その後、世界各国での「燃費規制/ZEV（Zero Emission Vehicle）規制」、「排ガス規制」といった環境規制強化の波を受け、自動車の電動化が進むとともに車載用LiBの需要が拡大している。
- この他、グリッド用（系統安定用途、ピークシフト/ピークカットバックアップ用）、UPS、建設機器、フォークリフト、鉄道車両など様々な分野でLiBの採用が広がっている。

(2) 構成部材

- LiBの基本的な構成部材は、正極材、負極材、セパレータ、電解液であり、それぞれに使用される材料は以下の表のとおりである。
- 正極と負極はリチウムイオンを貯めるために使用され、セパレータは正極と負極の分離、電解液はリチウムイオンを移動させるために用いられる。
- 本事業では、ポリオレフィン系多孔質フィルムが使用されるセパレータを除く、正極材、負極材、電解液・電解質を取り上げる。

図表 LiBの部材構成

構成部材	種類
正極材	三元系（NCM）、マンガン酸リチウム（LMO）、ニッケル酸リチウム（NCA） リン酸鉄リチウム（LFP）、コバルト酸リチウム（LCO）
負極材	黒鉛系（天然黒鉛、人造黒鉛）、カーボン系（ハードカーボン、ソフトカーボン） シリコン系（一酸化珪素系、シリコンカーバイド系等） 酸化物系（主にチタン酸リチウム）
電解液／ 電解質	・有機溶媒：プロピレンカーボネート（PC）、エチレンカーボネート（EC） ジメチルカーボネート（DMC）、ジエチルカーボネート（DEC） ・リチウム塩：六フッ化リン酸リチウム（LiPF ₆ ）
セパレータ	ポリオレフィン系多孔質フィルム

出所：矢野経済研究所作成

(3) 市場データ

- 2021年における電動車（xEV）の世界生産台数は前年比177.8%、1,407万6,000台と推計する。
- EVに関してはTeslaが大きな存在感を示している。また、VWをはじめとする欧州OEM各社がxEVのラインナップを強化するとともに、手厚い補助金政策が実施されたことでEVやPHEVの生産台数が増加した。
- 中国では補助金政策が2022年まで延長されたこと、低容量EVが人気を博したことなどから、2021年の新エネルギー車の販売台数が300万台を超えた。
- 日本は引き続きHEV中心であり、コロナ禍の需要縮小の反動で2021年の生産台数は前年を上回った。

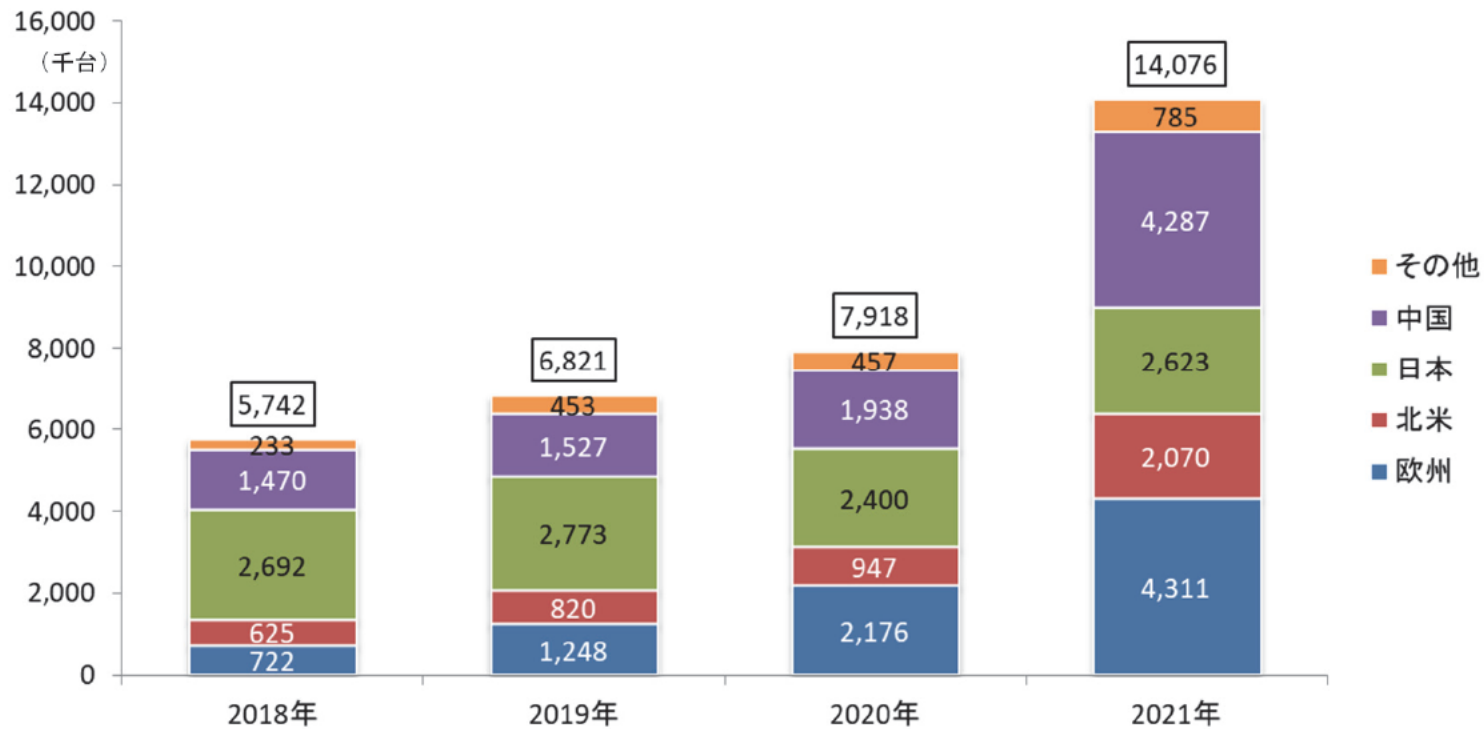


図 地域別xEV生産台数推移

出所：矢野経済研究所推計

(3) 市場データ

- 2021年における車載用LiBの生産量は前年比220.9%、380,663MWhと推計する。
- 地域別では中国が前年比およそ2.5倍の生産量となり、シェアは2年ぶりに50%を超えた。欧州や北米も前年から生産量を大きく伸ばしたが、シェアは欧州が4ポイント程度低下、北米は前年並みを維持した。
- 日本は生産量が減少傾向にあり、1%強にまでシェアが低下している。
- 車載用LiBの歩留まりは97～98%と推計する。

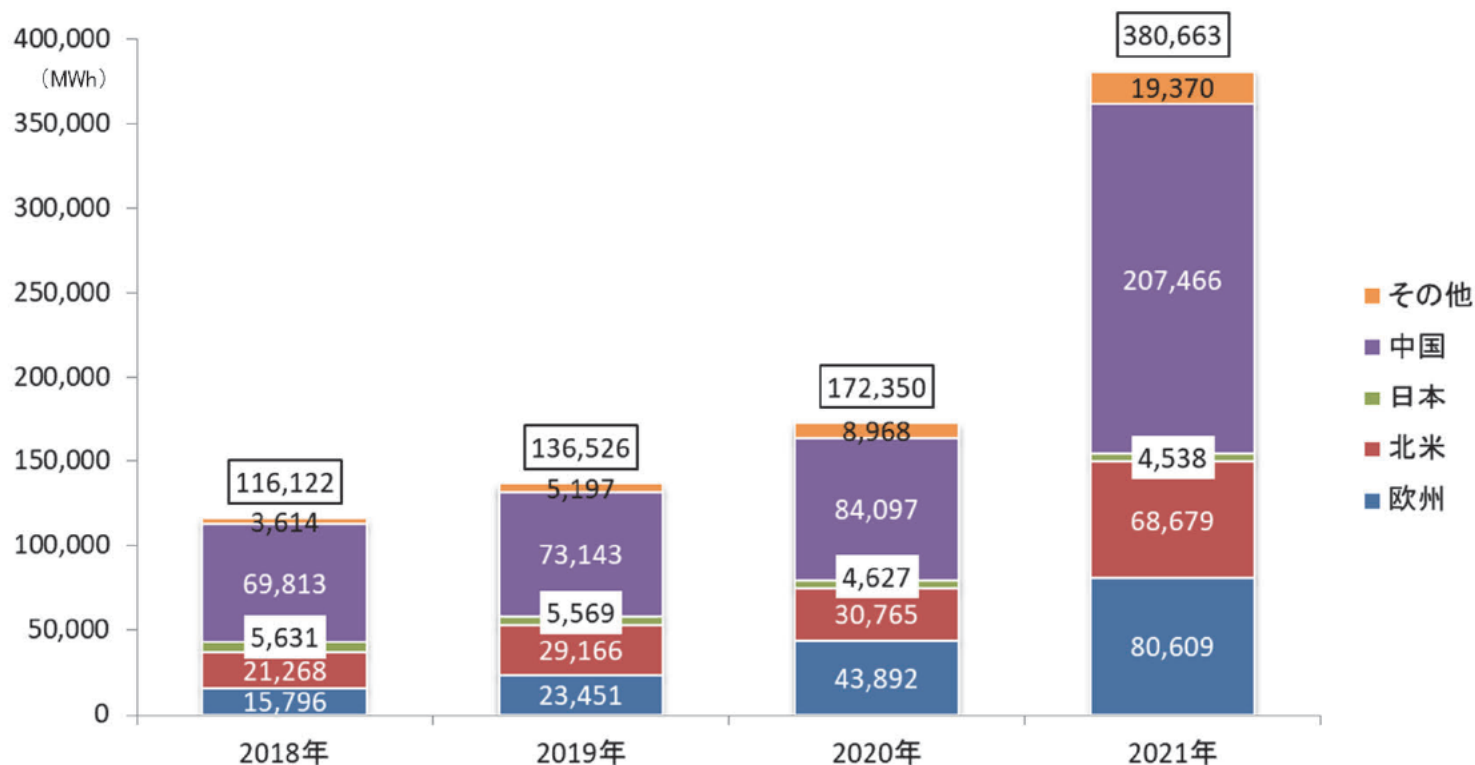


図 地域別車載用LiB生産量推移

3Li

25Mn

27Co

28Ni

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

(1) 構成部材・材料構成

- 正極材は、三元系（NCM）、マンガン酸リチウム（LMO）、ニッケル酸リチウム（NCA）、リン酸鉄リチウム（LFP）、コバルト酸リチウム（LCO）に大別される。このうち、車載用LiBにはLCOを除く4種の正極材が使用されている。
- LiBの反応機構はリチウムイオンの挿入および離脱によって生じる電気化学的な反応である。充電時には正極側からリチウムイオンが離脱し負極側に挿入される。充電した状態の電池を放電した時には逆の反応が生じる。LiBは放電状態で作製されるため、リチウム（Li）は正極材側に合成される。よって正極材は全てLiを含んでいる。
- NCMはニッケル（Ni）、コバルト（Co）、マンガン（Mn）の3種を混合した正極材であり、組成比により性能をコントロールできる。当初は、NCM＝1：1：1の組成比でCoの使用率低減による低コスト化、Niによる容量維持、Mnによる充電時の化学的安定性の高さを持つ正極材として注目された。その後、容量アップを図るべくNi比率を高めたNCM＝5：2：3、さらなるNiリッチを目指したNCM＝6：2：2、NCM＝8：1：1といった材料開発が進んでいる。
- LMOは重量エネルギー容量が低いものの、作動電圧が高いほか、資源的に豊富かつ安価なMnを原料に用いる利点がある。また、充電時の熱安定性に優れ、過充電時の発火リスクも低い。
- NCAは現在使用されている5種の中で最も容量が大きい。一方、充電時における材料の化学的安定性や熱安定性が低い点に課題を残す。
- LFPは資源的に豊富な鉄を原料とし、充電時の熱安定性が正極材の中で最も高い。また、充放電の初期～末期までの電圧が非常に平坦であり、理論的に容量の95%以上を充放電に利用できるほか、サイクル特性にも優れている。一方、作動電圧と容量の低さが課題とされている。

表 正極材の平均電圧・理論容量、実容量、質量エネルギー密度、容量当たり元素換算量

	平均作動電圧 V	理論容量 mAh/g	実容量 mAh/g	質量エネルギー密度 Wh/kg	容量当たり 元素換算量 kg/kWh
NCM111	3.7	280	160	592	1.7
NCM523	3.7	278	165	611	1.6
NCM622	3.7	277	170	629	1.6
NCM811	3.7	276	200	740	1.4
LMO	4.0	148	120	480	2.1
NCA	3.7	279	199	736	1.4
LFP	3.3	170	165	545	1.8

出所：各種資料より矢野経済研究所作成

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

(1) 構成部材・材料構成

- 正極材の元素組成、および各種元素の質量パーセントは以下の表のとおりである。

表 正極材 元素組成および各種元素の質量パーセント

種別	元素組成	元素	Li	Ni	Co	Mn	O	Al	Fe	P	計
		分子量	6.941	58.693	58.933	54.938	15.999	26.982	55.845	30.974	
NCM111	$\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$	モル比	1	0.33	0.33	0.33	2				
		モル質量 (g/mol)	6.941	19.545	19.625	18.294	31.998				96.403
		質量パーセント (%)	7.2	20.3	20.4	19.0	33.2				100.0
NCM523	$\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$	モル比	1	0.5	0.2	0.3	2				
		モル質量 (g/mol)	6.941	29.347	11.787	16.481	31.998				96.554
		質量パーセント (%)	7.2	30.4	12.2	17.1	33.1				100.0
NCM622	$\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$	モル比	1	0.6	0.2	0.2	2				
		モル質量 (g/mol)	6.941	35.216	11.787	10.988	31.998				96.929
		質量パーセント (%)	7.2	36.3	12.2	11.3	33.0				100.0
NCM811	$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$	モル比	1	0.8	0.1	0.1	2				
		モル質量 (g/mol)	6.941	46.954	5.893	5.494	31.998				97.281
		質量パーセント (%)	7.1	48.3	6.1	5.6	32.9				100.0
LMO	LiMn_2O_4	モル比	1			2	4				
		モル質量 (g/mol)	6.941			109.876	63.996				180.813
		質量パーセント (%)	3.8			60.8	35.4				100.0
NCA	$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$	モル比	1	0.8	0.15		2	0.05			
		モル質量 (g/mol)	6.941	46.954	8.840		31.998	1.349			96.082
		質量パーセント (%)	7.2	48.9	9.2		33.3	1.4			100.0
LFP	LiFePO_4	モル比	1				4		1	1	
		モル質量 (g/mol)	6.941				63.996		55.845	30.974	157.756
		質量パーセント (%)	4.4				40.6		35.4	19.6	100.0

出所：各種資料より矢野経済研究所作成

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

(1) 構成部材・材料構成

- 正極材に用いられる原料の純分換算値は以下の表のとおり。
- 炭酸リチウムは、リチウム純分18.8%を含む化合物である。水酸化リチウムは炭酸リチウムを水酸化カルシウムと加熱反応させることで合成する（リチウム純分16.6%）。水酸化リチウムは炭酸リチウムに比べて高コストになるものの、比較的低温での反応性・拡散性が良好なことなどからハイニッケル化が進む車載用の三元系、ならびにNCA向けに採用が広がっている。なお、水酸化リチウムは二酸化炭素と反応して炭酸リチウムに変質するため長時間の輸送には向かず、需要地に近い場所で生産することが望ましいとされている。
- NCMの場合、正極材メーカーが共沈法によってNi-Co-Mn複合水酸化物を前駆体として生成しているため、原料としては各種メタル、または溶融し易い硫酸ニッケル、硫酸コバルト、硫酸マンガンが使用されている。メタル、化合物のどちらを使用するかはコスト、並びに正極材メーカーの生産設備・生産技術力に依存している。
- LMOでは、電解二酸化マンガン、硫酸マンガン、電解金属マンガンといったマンガンの化成品が原料として使用されている。どの原料を使用するかは各プレーヤーで概ね固定されており、日本では硫酸マンガン、あるいは電解金属マンガンが選択されているものとみられる。
- NCAの場合、自社で一次原料（ニッケル化合物）を用いるケースと、二次原料（前駆体）を購入してリチウムとの混合・焼成合成を行うケースに分けられる。

表 正極材 原料の純分換算値

正極材	原料		形状・サイズ	純分
Li	炭酸リチウム		数～数十μm	18.8 %
	水酸化リチウム		数百μm	16.6 %
NCM	Ni	硫酸ニッケル	数～数十μm	22.0 %
	Co	硫酸コバルト	粒径：1mm前後	20.0 %
	Mn	硫酸マンガン	粒径：1mm前後	30.0 %
		電解金属マンガン	数十mm	99.9 %
		四三酸化マンガン	45μm以下	70.0 %
LMO	Mn	電解二酸化マンガン	数μm～十μm前後	61.0 %
		硫酸マンガン	粒径：1mm前後	30.0 %
		電解金属マンガン	数十mm	99.9 %
NCA	Ni	硫酸ニッケル	数～数十μm	22.0 %
	Co	硫酸コバルト	粒径：1mm前後	20.0 %

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

(2) 製造プロセス：三元系（NCM）

- NCMの代表的な製造プロセスは以下の図のとおり。前駆体としてNi-Co-Mn複合水酸化物が用いられる。
- 前駆体の製法には主に共沈法が適用されている。共沈法は目的とする金属イオン数種類含む溶液に沈殿剤を添加し、溶液中のイオン濃度を溶解度積よりも高くなる過飽和状態にすることにより、複数種の金属イオンを水酸化物などの難溶性塩として沈殿、析出させる方法である。この沈殿物に高温での熱処理を施すことで、多元系の酸化物粒子を得ることが出来る。

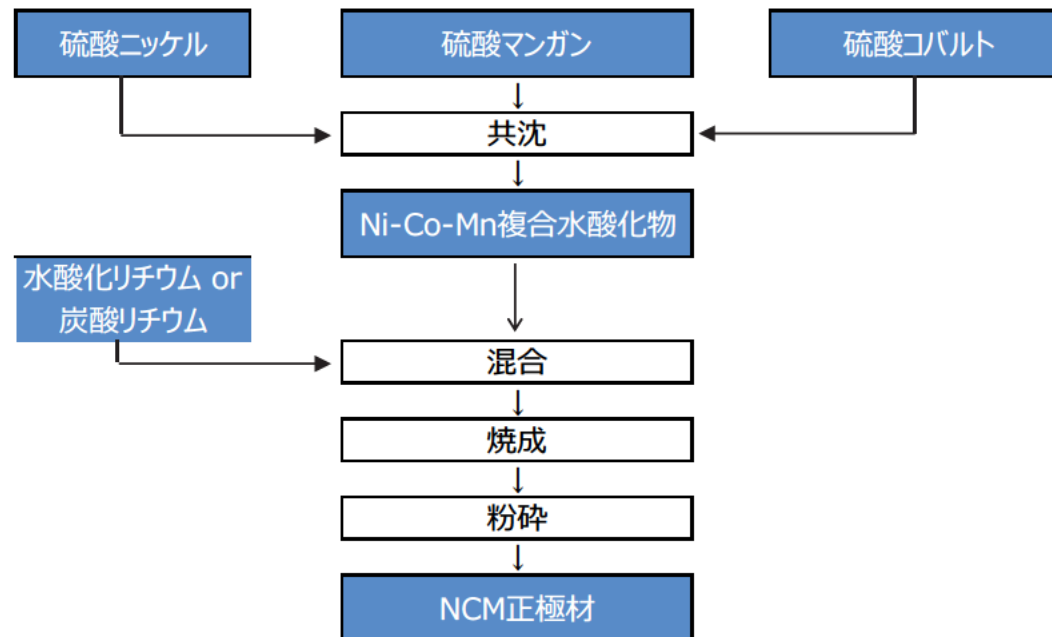


図 NCM正極材の製造プロセス（代表例）

出所：矢野経済研究所作成

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

(2) 製造プロセス：マンガン酸リチウム（LMO）

- LMOの製造プロセスは固相法と液相法の2つに大別され、日本では液相法が主流である。原料には電解金属マンガンあるいは硫酸マンガンが使われている。
- 硫酸マンガンを出発原料とする場合は、アルカリ水溶液を用いた液相反応（抽出、沈殿等）で四三酸化マンガンを生成する。次に四三酸化マンガンと炭酸リチウムを混合、焼成合成し、解砕・粉砕によって所望サイズの微粉末製品として仕上げる。
- 電解金属マンガンを使用する場合は、溶融により数 μm レベルで前駆体を生成した後、リチウム化合物との焼成合成を行い、顧客ニーズに合致する粒子サイズに粉砕、分級する。

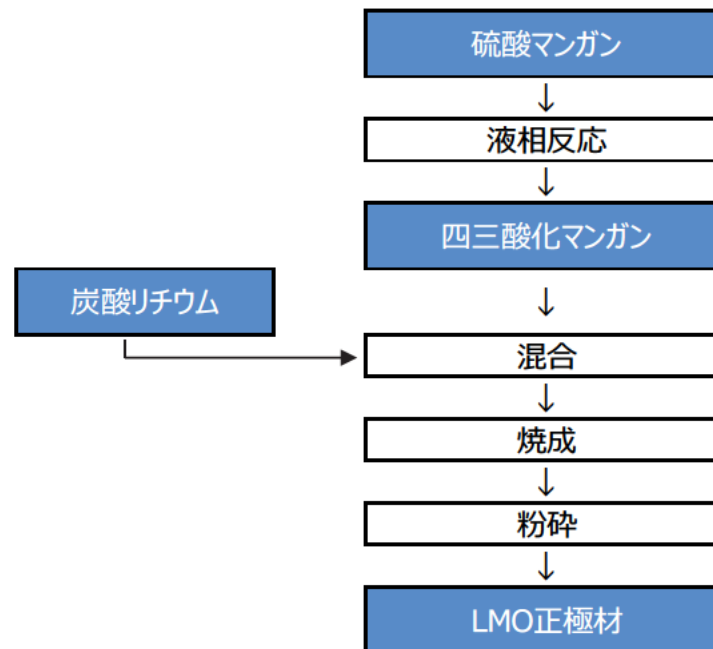


図 LMO正極材の製造プロセス（代表例）

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

(2) 製造プロセス：ニッケル酸リチウム（NCA）

- NCAにおいては、前駆体としてニッケル・コバルト・アルミニウム複合水酸化物が用いられている。
- 前駆体は水酸化ニッケルプリカーサ、硫酸コバルト（または酸化コバルト）、アルミニウムを混合し、共沈法やスプレードライ法などの成長法を経て粉末として製造される。水酸化ニッケルプリカーサの原料には硫酸ニッケルが用いられる。上記プロセスを経て生成された前駆体に水酸化リチウム（もしくは炭酸リチウム）などを混合し、固相プロセスの焼成合成によりNCAが合成される。
- 合成されたNCAは解砕、粉砕によって所望サイズの微粉末製品として仕上げられる。

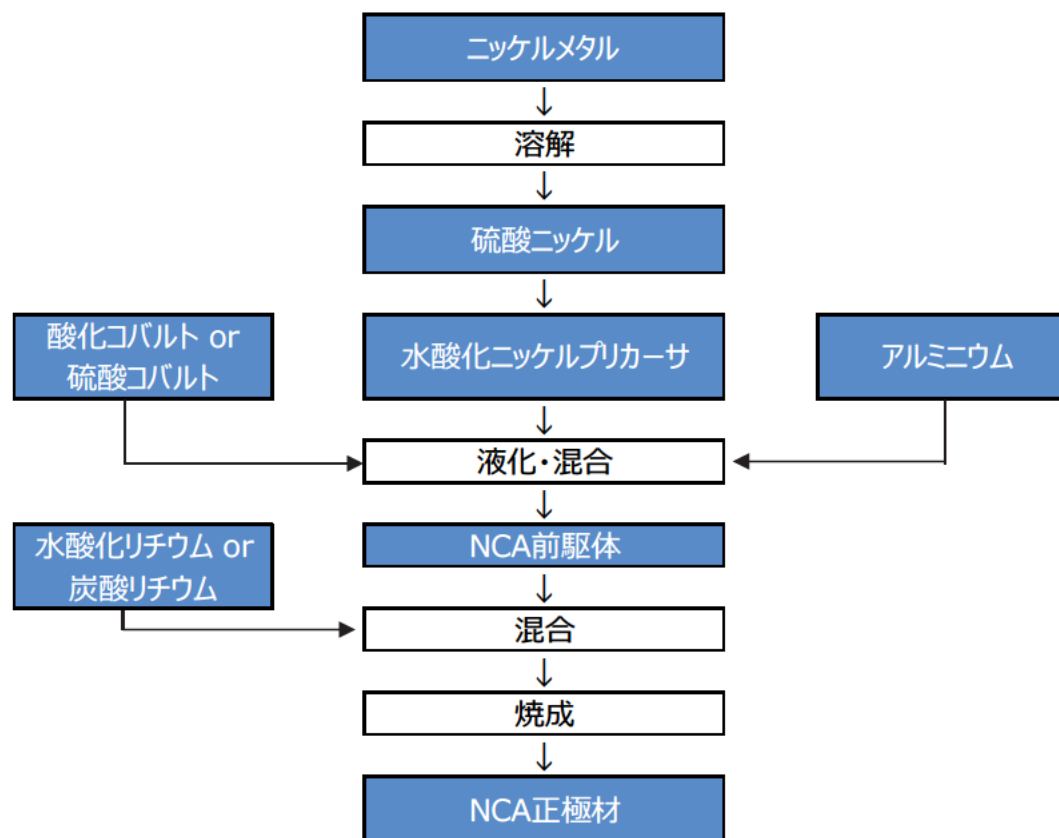


図 NCA正極材の製造プロセス（代表例）

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

(2) 製造プロセス：リン酸鉄リチウム（LFP）

- LFPの製造プロセスは固相プロセスと液相プロセスの2つに大別され、国内では液相法（水熱合成法）が採用されている。
- 水熱合成法は原料物質と溶媒、あるいは反応物質として働く水溶液とをオートクレーブに入れ、高温高压条件下で処理することで、固体反応物質が溶解し互いに反応したり、水溶液の成分と反応したりすることで生成物が得られる。この生成物は高い結晶性を有し、合成条件（温度、反応時間等）を制御することで生成物の粒子径や結晶形状の制御が可能となる。また、全ての工程を液相法で行えるため、粉碎工程が多い固相法に比べて異物混入の防止が容易である。
- LFPを製造する場合は硫酸鉄、炭酸リチウム、リン酸等の各原料化合物を高圧の水蒸気が存在する環境で混合し、化合物の合成と結晶成長を行う。

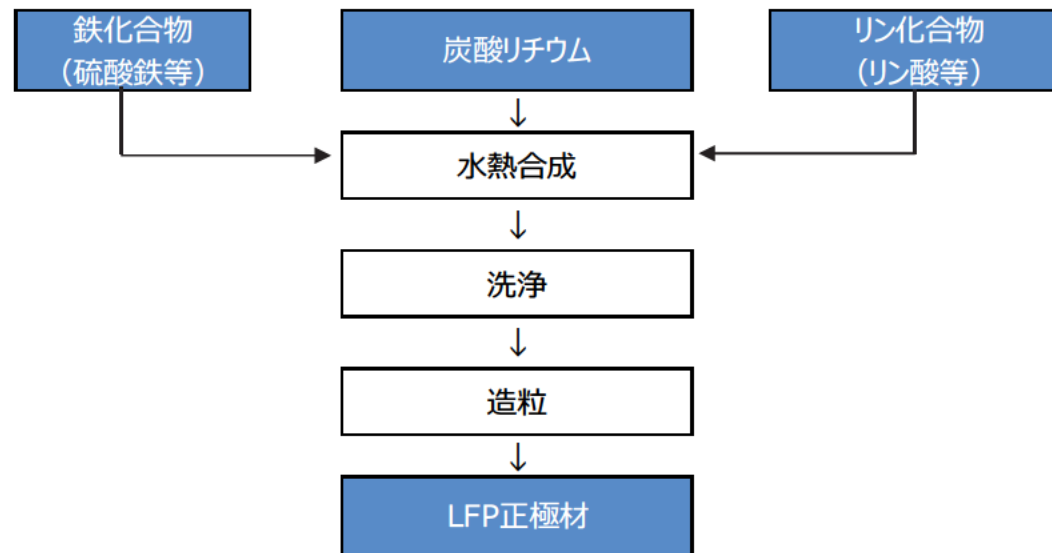


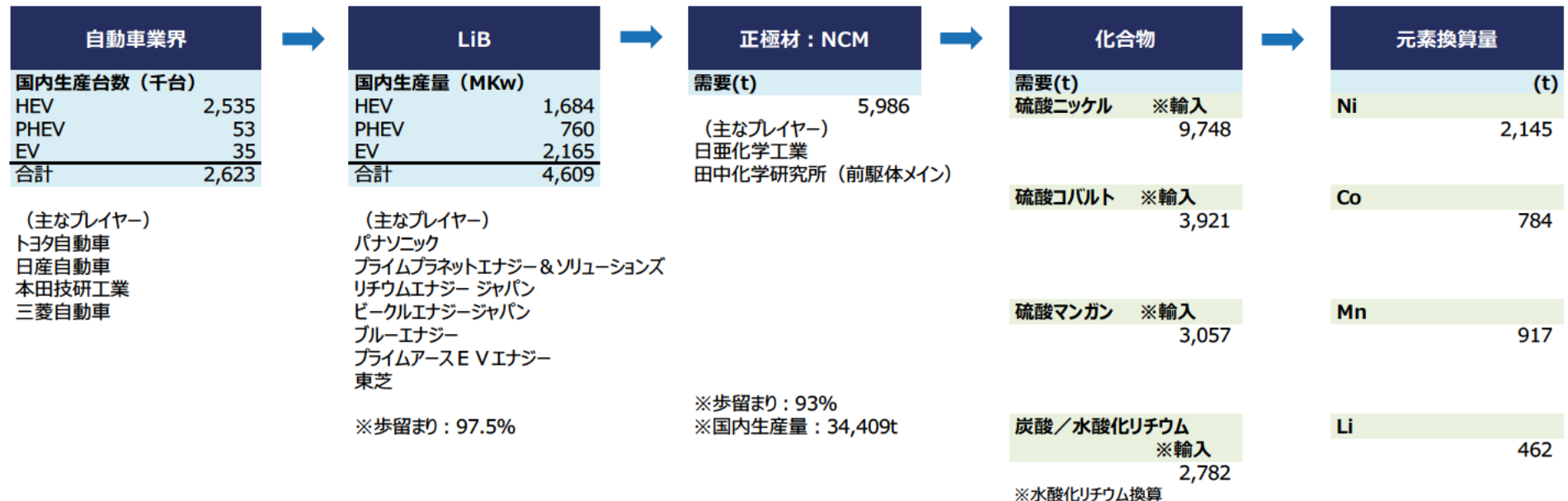
図 LFP正極材の製造プロセス（代表例）

出所：矢野経済研究所作成

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

(3) サプライチェーン：三元系（NCM）

2021年

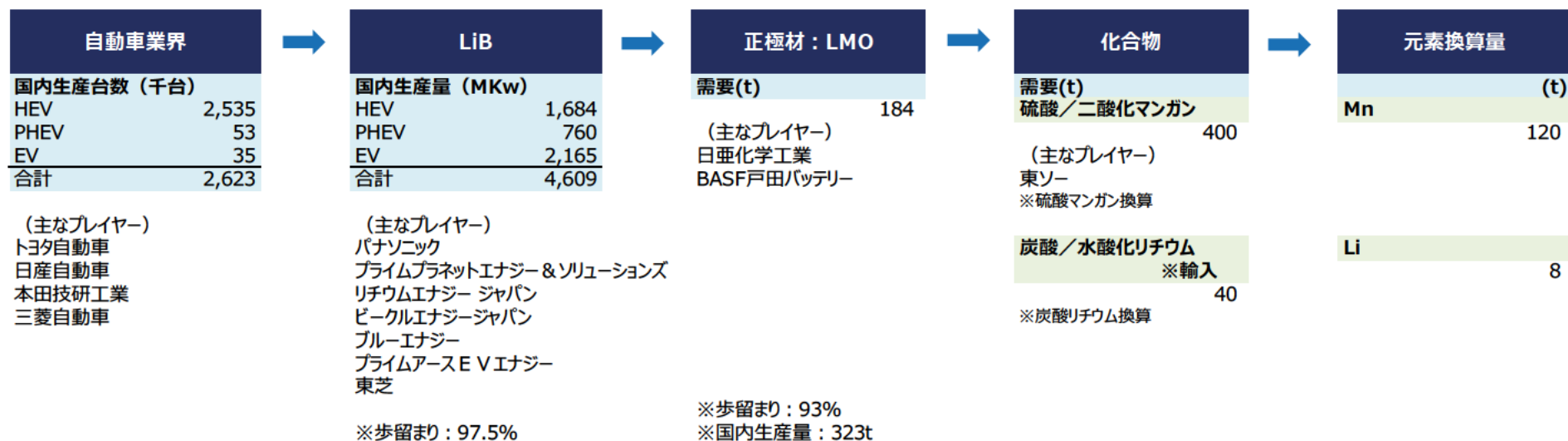


出所：矢野経済研究所作成

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

(3) サプライチェーン：マンガン酸リチウム（LMO）

2021年

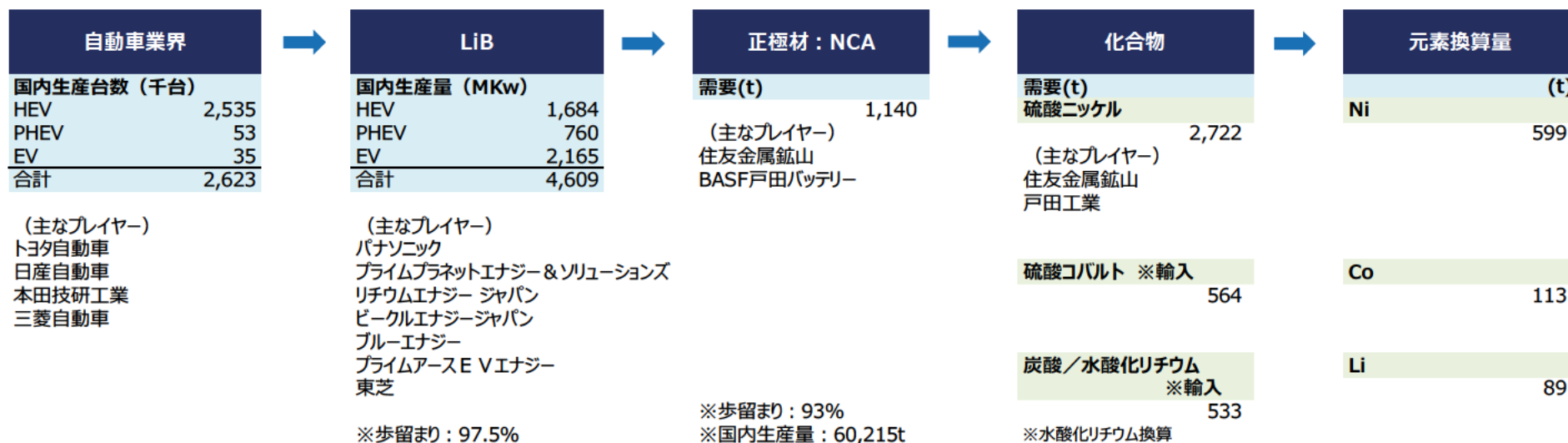


出所：矢野経済研究所作成

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

(3) サプライチェーン：ニッケル酸リチウム（NCA）

2021年

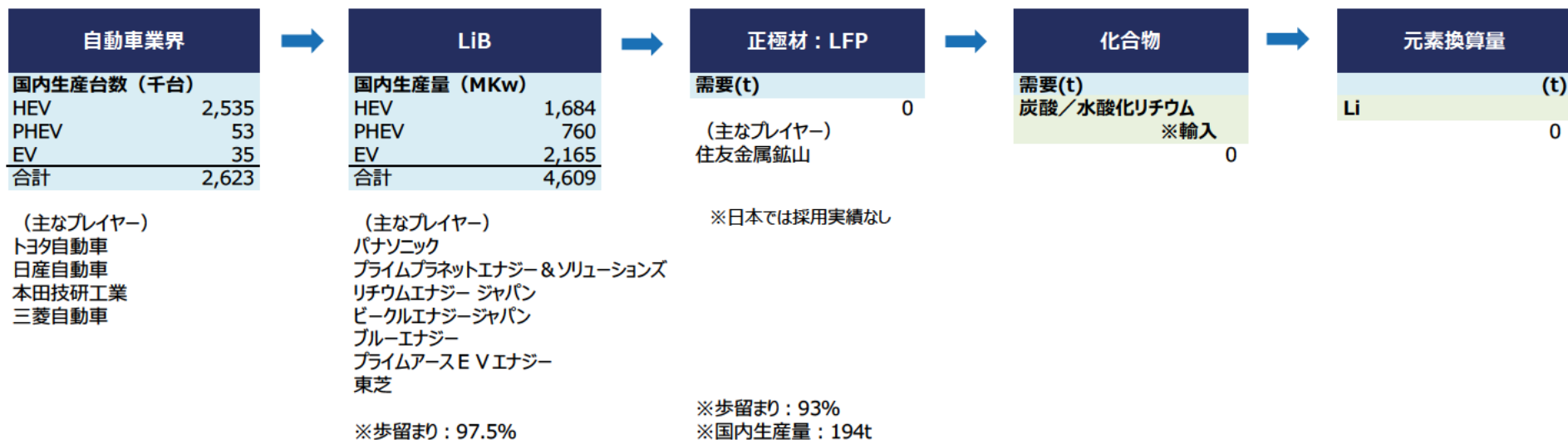


出所：矢野経済研究所作成

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

(3) サプライチェーン：リン酸鉄リチウム（LFP）

2021年



出所：矢野経済研究所作成

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

(4) 市場データ

- 2021年における車載用LiB正極材の世界生産量は、116万6,294tと推計する。
- 構成比をみると、NCM市場が44.2%、LFP市場が41.9%、LMO市場7.5%、NCA市場6.4%となる。NCMは日本や韓国製のLiB、および中国製LiBの高容量タイプに使用されている。LFPは安全性と安価な点が評価され、中国を中心に採用が急増した。NCA市場ではTesla向けが需要を牽引しており、LMO市場では低容量EV向けの需要が拡大傾向にある。

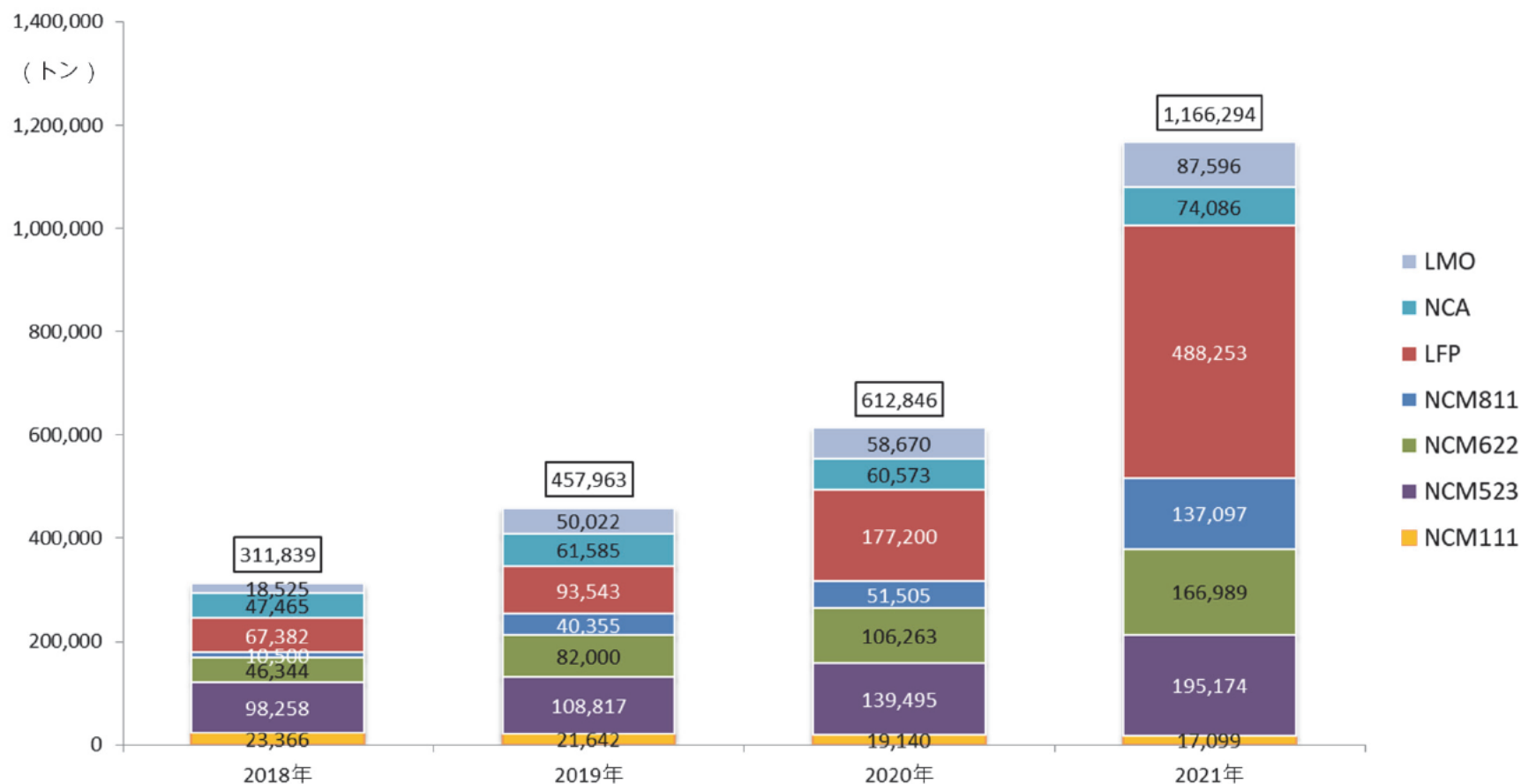


図 車載用LiB正極材 材料別世界生産量推移

04-1. 車載用リチウムイオン電池-正極材

(4) 市場データ

- 2021年における車載用LiB正極材の国内生産量は、95,140tと推計する。
- 主なサプライヤーはNCMとLMOが日亜化学工業、LFPとNCAが住友金属鉱山である。
- 正極材の歩留まり（原料ロス含む）は約93%と推計される。

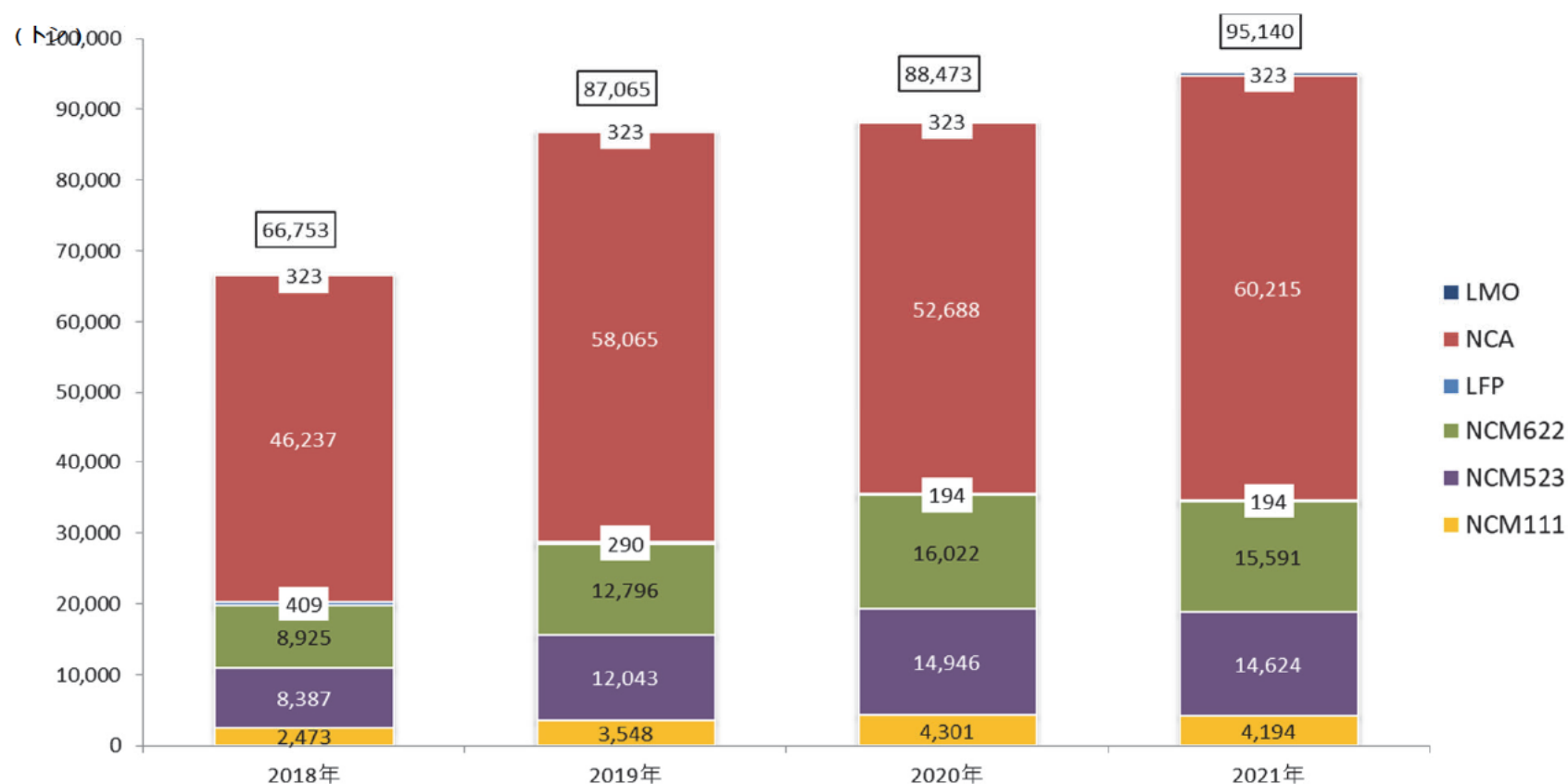


図 車載用LiB正極材 材料別国内生産量推移

3Li

6C

22Ti

04-2. 車載用リチウムイオン電池-負極材

04-2. 車載用リチウムイオン電池-負極材

(1) 構成部材・材料構成

- 負極材は黒鉛系（天然黒鉛、人造黒鉛）、酸化物系（主にチタン酸リチウム）、シリコン系（SiO系、SiC系等）、カーボン系（ハードカーボン、ソフトカーボン）の4つに大別でき、重要鉱物を使用する負極材として天然黒鉛とLTOが挙げられる。
- 天然黒鉛は炭素鉱物の一種であり、炭素が六角網目状に規則正しく配列し、その炭素平面が何層にも積層している層状の結晶構造を有する。その層間にリチウムイオンが挿入・脱着され、充放電する機構となっている。リチウムイオンが黒鉛に挿入されて生成する LiC_6 の実容量は340-360mAh/gであり、理論容量である372mAh/gに近い値を示している。
- チタン酸リチウム（LTO）は黒鉛系よりも理論容量が小さいものの、リチウムイオン挿入・脱離電位が高く、充放電に伴う体積変化も小さい。急速充電が可能な点や優れた寿命特性、スピネル型構造由来の高い安全性から、ESSなど産業用途を中心に電動バスや乗用車のISS（Idling Stop System）向けのLiB等に採用されている。

表 天然黒鉛負極材・LTO負極材の平均電圧、理論容量、実容量、質量エネルギー密度、容量当たり元素換算量

	平均作動電圧 V	理論容量 mAh/g	実容量 mAh/g	質量エネルギー密度 Wh/kg	容量当たり 元素換算量 kg/kWh
天然黒鉛	3.7	372	340	1258	0.79
LTO	2.4	175	165	396	2.53

出所：矢野経済研究所作成

04-2. 車載用リチウムイオン電池-負極材

(1) 構成部材・材料構成

- 天然黒鉛は結晶性の高い鱗片状黒鉛や鱗状黒鉛、結晶性がやや低い土状黒鉛に分類される。黒鉛化度は、鱗状黒鉛が100%で最も高く、次いで鱗片状黒鉛が99.9%以上、土壌黒鉛は28%。日本企業は、負極材として鱗片状黒鉛を使用しており、平均粒径は18～23μm。粒度分布は用途やLiBメーカーのよって異なる。
- LTOにおける各種元素の質量パーセントはLi6.0%、Ti52.1%。LTOのリチウム源として、日本の負極材メーカーは炭酸リチウム、あるいは水酸化リチウムを使用している。

表 天然黒鉛負極材・LTO負極材 原料の純分換算値

負極材	原料		形状・サイズ	純分
天然黒鉛	鱗片状黒鉛	固定炭素	粉末：18～23μm	99.9 %以上
LTO	Li	炭酸リチウム	数～数十μm	18.8 %
		水酸化リチウム	数百μm	16.6 %
	Ti	酸化チタン	0.数μm	59.9 %

出所：矢野経済研究所作成

表 LTO負極材 元素組成および各種元素の質量パーセント

種別	元素組成	元素	Li	Ti	O	計
		分子量	6.941	47.867	15.999	
LTO	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	モル比	4	5	12	
		モル質量 (g/mol)	27.764	239.335	191.988	459.087
		質量パーセント (%)	6.0	52.1	41.8	100.0

出所：矢野経済研究所作成

04-2. 車載用リチウムイオン電池-負極材

(2) 製造プロセス：天然黒鉛

- 天然黒鉛の製造プロセスは、以下のとおりである。
- 黒鉛鉱山（及び付随する加工場：1次加工メーカー）において、浮遊選鉱（粗選、掃選と各段階の精選）により採掘された黒鉛鉱石（鱗片状黒鉛）から黒鉛以外の不純物を取り除かれる。その後脱水・乾燥、分級等の処理により、固定炭素比率～90%程度にまで品位が高められる。
- この黒鉛を球形化メーカー（鉱山を保有していない場合）が購入し、フッ酸を用いてシリカを除去し高純度化（固定炭素比率99.9%以上）する。さらに、水洗・乾燥や熱処理を行って天然黒鉛中に残留するフッ酸を除去した後、角落とし等の加工を施して球形化する。
- 日本の負極材メーカーは球形化黒鉛を調達し、フェノール樹脂やコールタールピッチなどで被膜処理を行い、単体ないし人造黒鉛と配合して、LiBメーカーに出荷している。この製造工程における歩留り（原料ロス含む）は96～98%。

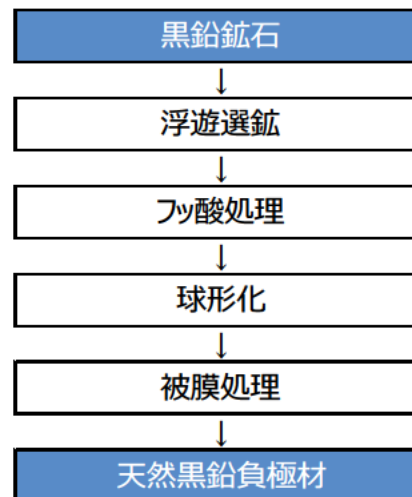


図 天然黒鉛負極材の製造プロセス（代表例）

出所：矢野経済研究所作成

04-2. 車載用リチウムイオン電池-負極材

(2) 製造プロセス：チタン酸リチウム（LTO）

- LTOは、チタン源とリチウム源とを混合し、加熱焼成する乾式法（固相反応法）、あるいはチタン源とリチウム源の混合物を水熱処理し、その後加熱焼成する湿式法（液相反応+固相反応法）により得られる。乾式法は製造コストを低く抑えられることから広く採用されており、日本でも主流になっているものとみられる。歩留まりは96～98%。
- 日本の負極材メーカーは、チタン源となる酸化チタンを自社で製造し、リチウム源の炭酸リチウム／水酸化リチウムを、外部から購入している。
- 酸化チタンの製造方法には主に硫酸法と塩素法の2種類がある。酸化チタンの製造プロセスにおける歩留まりは硫酸法で95～98%、塩素法は99%である。硫酸法は、安価だが純度の低いイルメナイト鉱石（ TiO_2 含有率約40～60%）を出発原料として利用する。イルメナイト鉱石を濃硫酸に溶かし、鉄分を硫酸鉄として分離。このとき生成した硫酸チタンを水で加水分解すると、チタンの水酸化物となり沈殿する。この沈殿物を洗浄・乾燥し、高温で焼成することで酸化チタンが生成される。塩素法は、イルメナイト鉱石から鉄分を抽出し、 TiO_2 の品位を高めた合成ルチル（ TiO_2 含有率約90～95%）を用いる。合成ルチルを塩化ガスと反応させ塩化、精製・蒸留したものから四塩化チタンを精製する。さらに四塩化チタンと酸素との気相反応によって酸化チタンを得る。

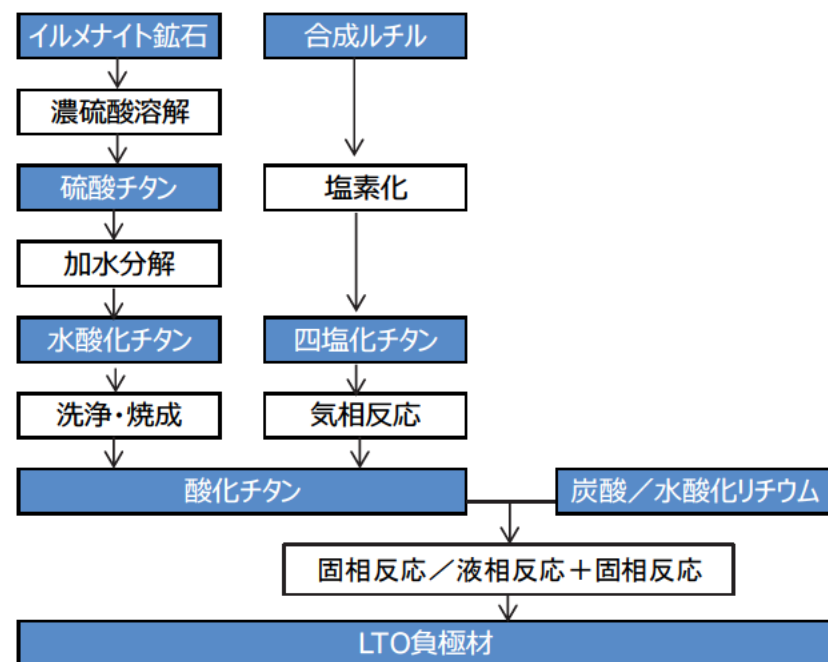
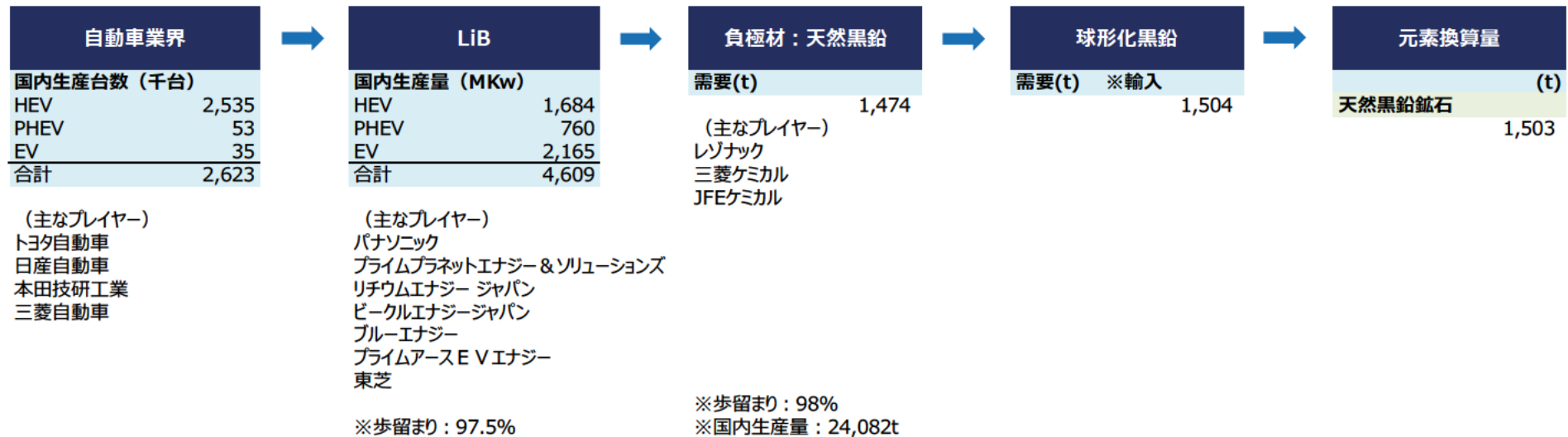


図 LTO負極材の製造プロセス（代表例）

04-2. 車載用リチウムイオン電池-負極材

(3) サプライチェーン：天然黒鉛

2021年

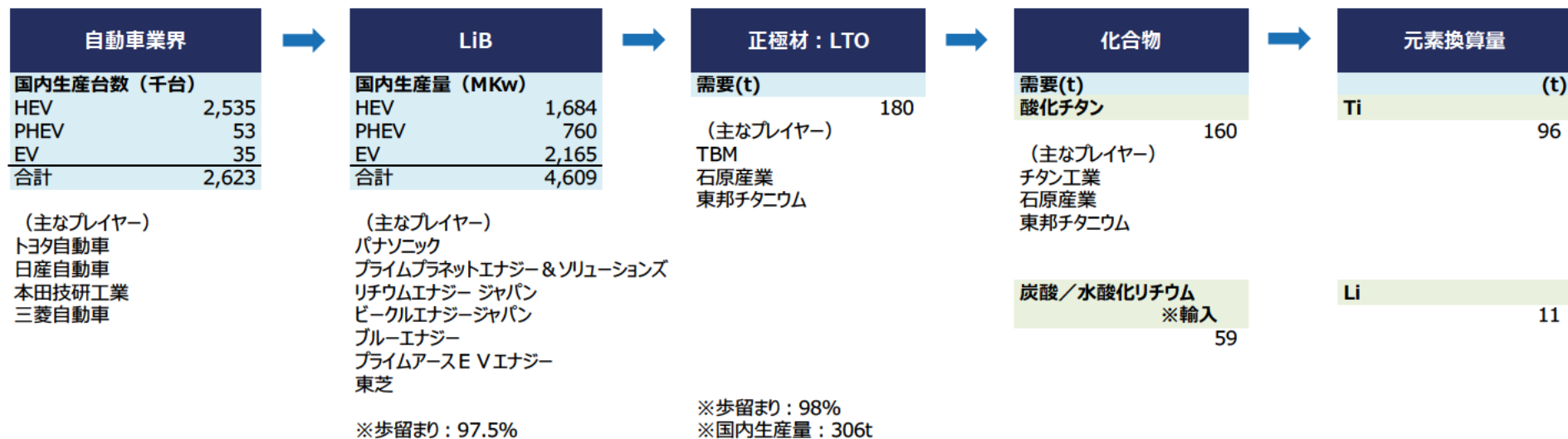


出所：矢野経済研究所作成

04-2. 車載用リチウムイオン電池-負極材

(3) サプライチェーン：チタン酸リチウム（LTO）

2021年



出所：矢野経済研究所作成

04-2. 車載用リチウムイオン電池-負極材

(4) 市場データ

- 2021年における車載用LiB負極材の世界生産量は、73万3,998 tと推計する。
- 材料別では黒鉛系負極材（天然黒鉛+人造黒鉛）が約98%のシェアを占め、なかでも人造黒鉛の需要が急増している。
- カーボン系は黒鉛系に比べ優れたレート特性を有し、頻繁な充放電や瞬間加速が求められる車載用LiBセル向けに使用されている。LTO は急速充電が可能な点や優れた寿命特性、スピネル型構造由来の高い安全性から電動バスや乗用車のISS 用LiBなど、Si系はTesla向けが需要を牽引している。

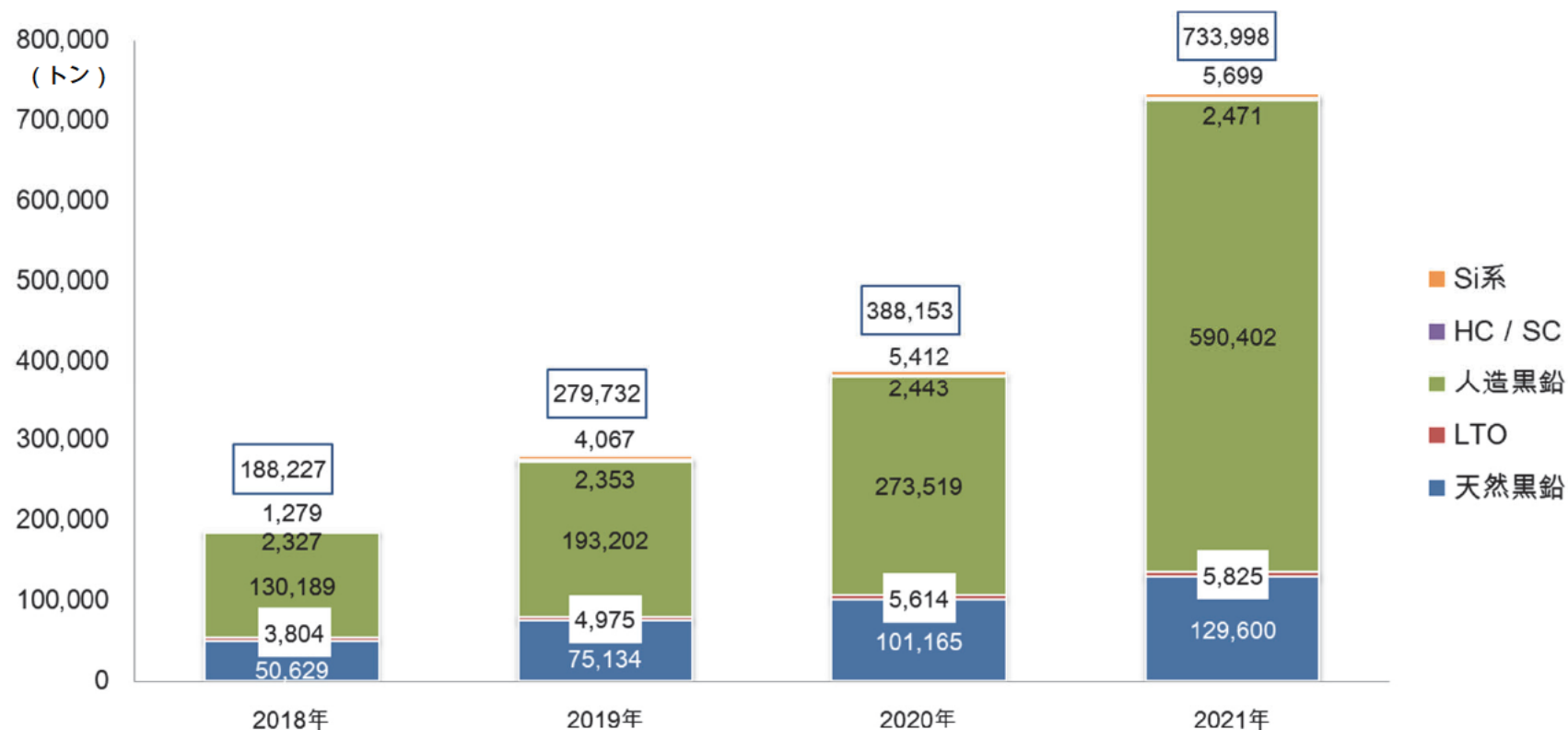


図 車載用LiB負極材 材料別世界生産量推移

04-2. 車載用リチウムイオン電池-負極材

(4) 市場データ

- 2021年における車載用LiB負極材の国内生産量は、55,602 tと推計する。
- 主な負極材メーカーを挙げると、黒鉛系はレゾナック（旧・昭和電工マテリアルズ）、三菱ケミカル、JFEケミカルである。LTOはTBM。ハードカーボンがクレハ、JFEケミカル。ソフトカーボンはレゾナック、Si系は信越化学工業などである。

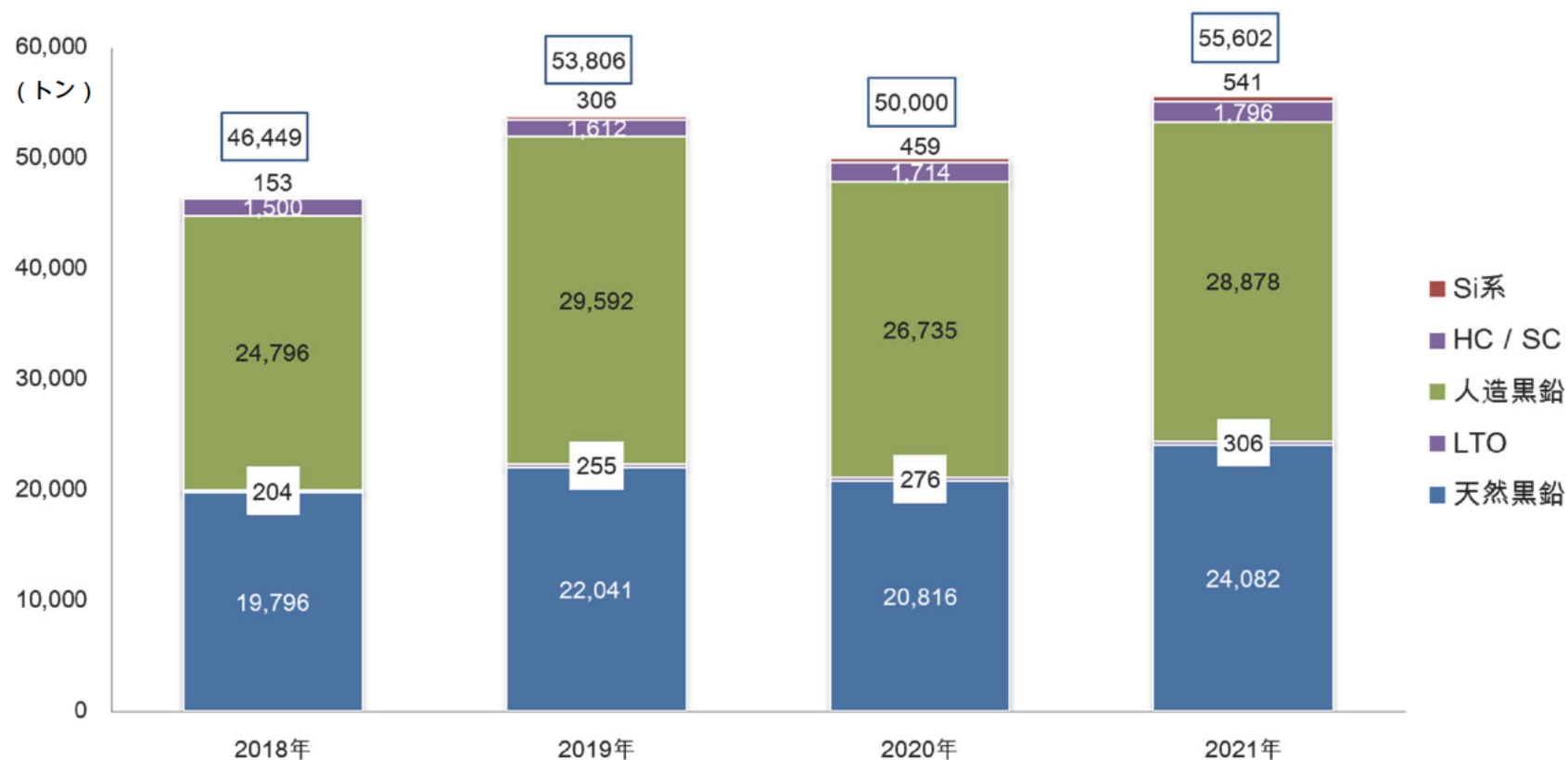


図 車載用LiB負極材 材料別国内生産量推移

04-3. 車載用リチウムイオン電池-電解質

04-3. 車載用リチウムイオン電池-電解質

(1) 構成部材・材料構成

- LiBの電解液には高いイオン導電率はもとより、高電位の正極に対する耐酸化性、負極に対する耐還元性、電極界面での電荷移動抵抗の低さなどが求められる。現在はプロピレンカーボネート（PC）やエチレンカーボネート（EC）などの環状炭酸エステルと、ジメチルカーボネート（DMC）やジエチルカーボネート（DEC）といった鎖状炭酸エステルを混合した有機溶媒に、電解質としてリチウム塩を溶解させた電解液が用いられている。
- 電解質には六フッ化リン酸リチウム（ LiPF_6 ）が広く用いられている。この他、四フッ化ホウ酸リチウム（ LiBF_4 ）や過塩素酸リチウム（ LiClO_4 ）などの適用が検討されてきたが、安全性などの点から採用事例は非常に少ない。
- 最近では添加剤として用いられてきたリチウムビス（フルオロスルホニル）イミド（LiFSI）への注目度が高まっている。LiFSIを数%添加することでLiBの低温特性、サイクル特性、レート特性等の向上につながるとされており、中国のLiBメーカーにおいて添加剤用に限らず主剤（電解質）としての採用が始まっている。LiFSIは高電圧下で電解液が分解するなどの問題が指摘されているが、中国では作動電位が低いLFP電池に適用されている。
- 電解液メーカーは電解質の LiPF_6 、およびビニレンカーボネート（VC）などの添加剤を有機溶媒に溶かし、粘度やイオン伝導率などの調整を行ってLiBメーカーに供給する。この配合ノウハウがLiBの特性に大きな影響を及ぼし、電解液メーカーの差別化の源泉となる。電解液における有機溶媒、電解質、添加剤の一般的な配合率は有機溶媒80%、電解質14%：添加剤6%になる。

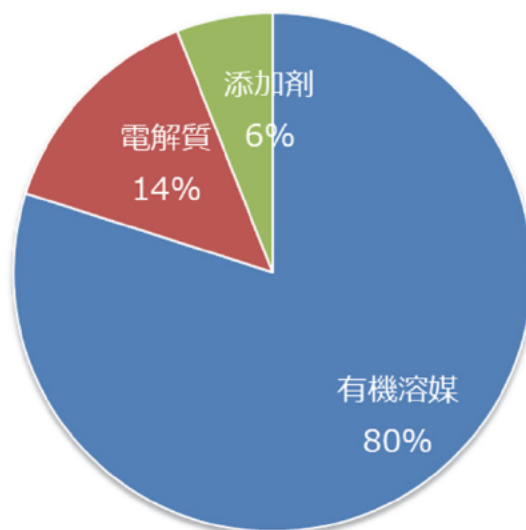


図 電解液における有機溶媒、電解質、添加剤の重量構成比

04-3. 車載用リチウムイオン電池-電解質

(1) 構成部材・材料構成

- 電解質の LiPF_6 は無臭の白色結晶粉末で、密度は 2.7g/cm^3 。電解質メーカー間で物性の差異はほとんどない。
- LiPF_6 に含まれる各種元素の質量パーセントは、Li4.6%、P20.4%、F75.0%である。

表 LiPF_6 元素別質量パーセント

	元素	Li	P	F	計
	分子量	6.941	30.974	18.998	
LiPF_6	モル比	1	1	6	
	モル質量 (g/mol)	6.941	30.974	113.988	151.903
	質量パーセント (%)	4.6	20.4	75.0	100.0

出所：矢野経済研究所作成

- 電解質 (LiPF_6) の容量当たり元素換算量を「車載用LiB世界生産量／車載用電解質世界出荷量」の式で算出した。2018～2021年の平均値は 0.19kg/kWh である。

表 LiPF_6 容量当たり元素換算量

	2018年	2019年	2020年	2021年
車載用LiB世界生産量 (MWh)	116,122	136,526	172,350	380,663
車載用電解質世界生産量 (t)	18,678	27,485	35,093	70,681
容量当たり元素換算量 (kg/kWh)	0.16	0.20	0.20	0.19

出所：矢野経済研究所作成

04-3. 車載用リチウムイオン電池-電解質

(2) 製造プロセス：六フッ化リン酸リチウム (LiPF_6)

- LiPF_6 はフッ化カルシウム（蛍石）を加工したフッ化水素（HF）と五塩化リン（ PCl_5 ）、炭酸リチウムを反応させるのが一般的な精製法になる。
- 最終的にはフッ化リチウム（ LiF ）と五フッ化リン（ PF_5 ）の反応になるが、フッ化リチウムは炭酸リチウムとフッ化水素、五フッ化リンは五塩化リンとフッ化水素のハロゲン交換で得られる。反応時間や冷却スピードなどの反応条件の調整が各社のノウハウとなる。歩留まり（材料ロス含む）は99.5%。原料となる炭酸リチウムのLi純分は18.8%、フッ化水素のF純分は95.0%である。

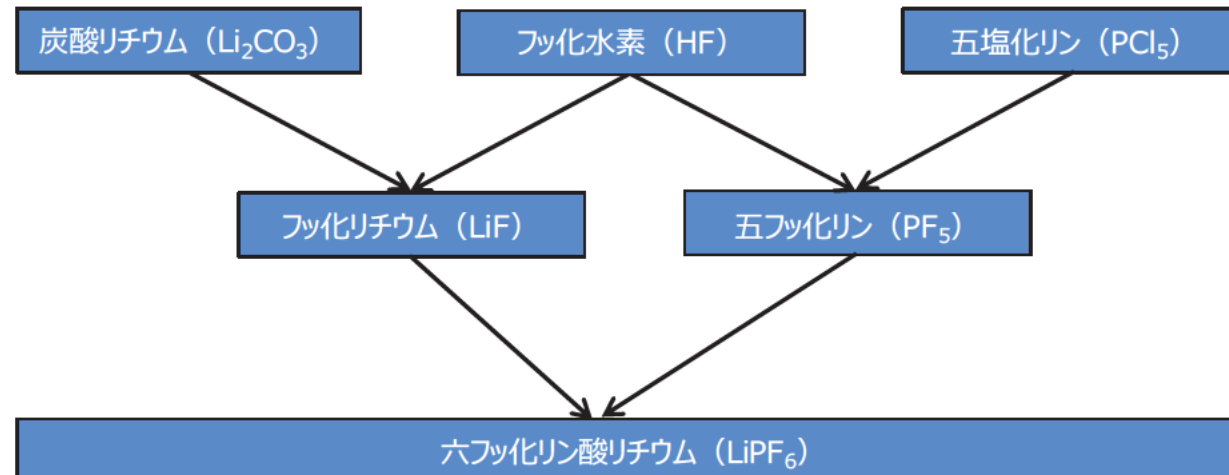


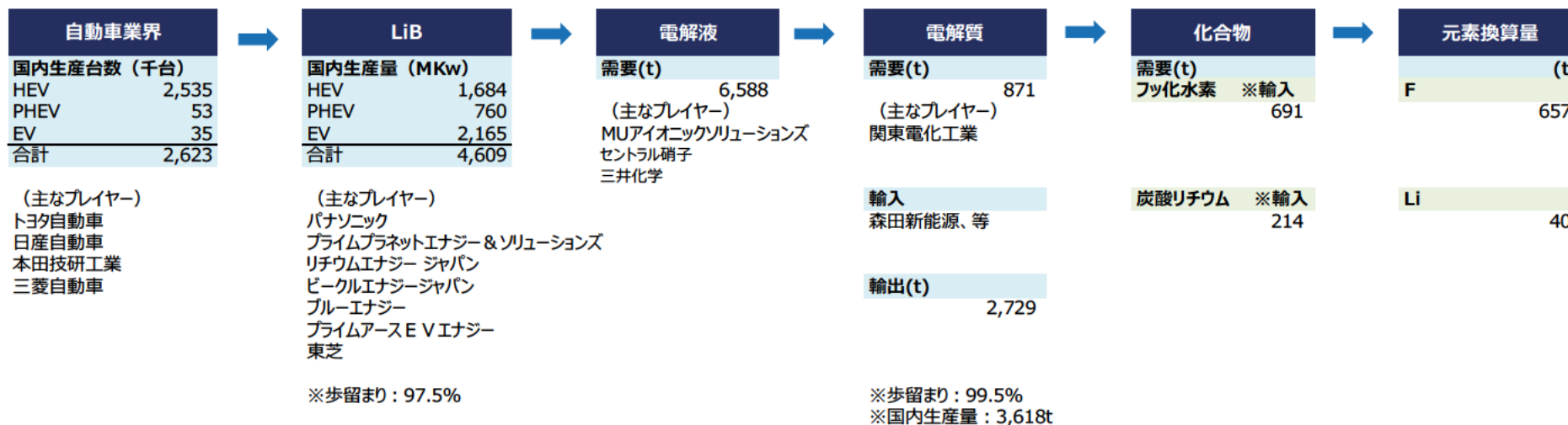
図 電解質 (LiPF_6) の製造プロセス（代表例）

出所：矢野経済研究所作成

04-3. 車載用リチウムイオン電池-電解質

(3) サプライチェーン：六フッ化リン酸リチウム（LiPF₆）

2021年



出所：矢野経済研究所作成

04-3. 車載用リチウムイオン電池-電解質

(4) 市場データ

- 2021年における車載用LiB向け電解質（ LiPF_6 ）の世界生産量は7万4,654t、うち国内生産量は3,618tになるものと推計する。車載用LiB市場が高い成長率を維持していることから、電解質市場も順調にその規模を拡大させている。

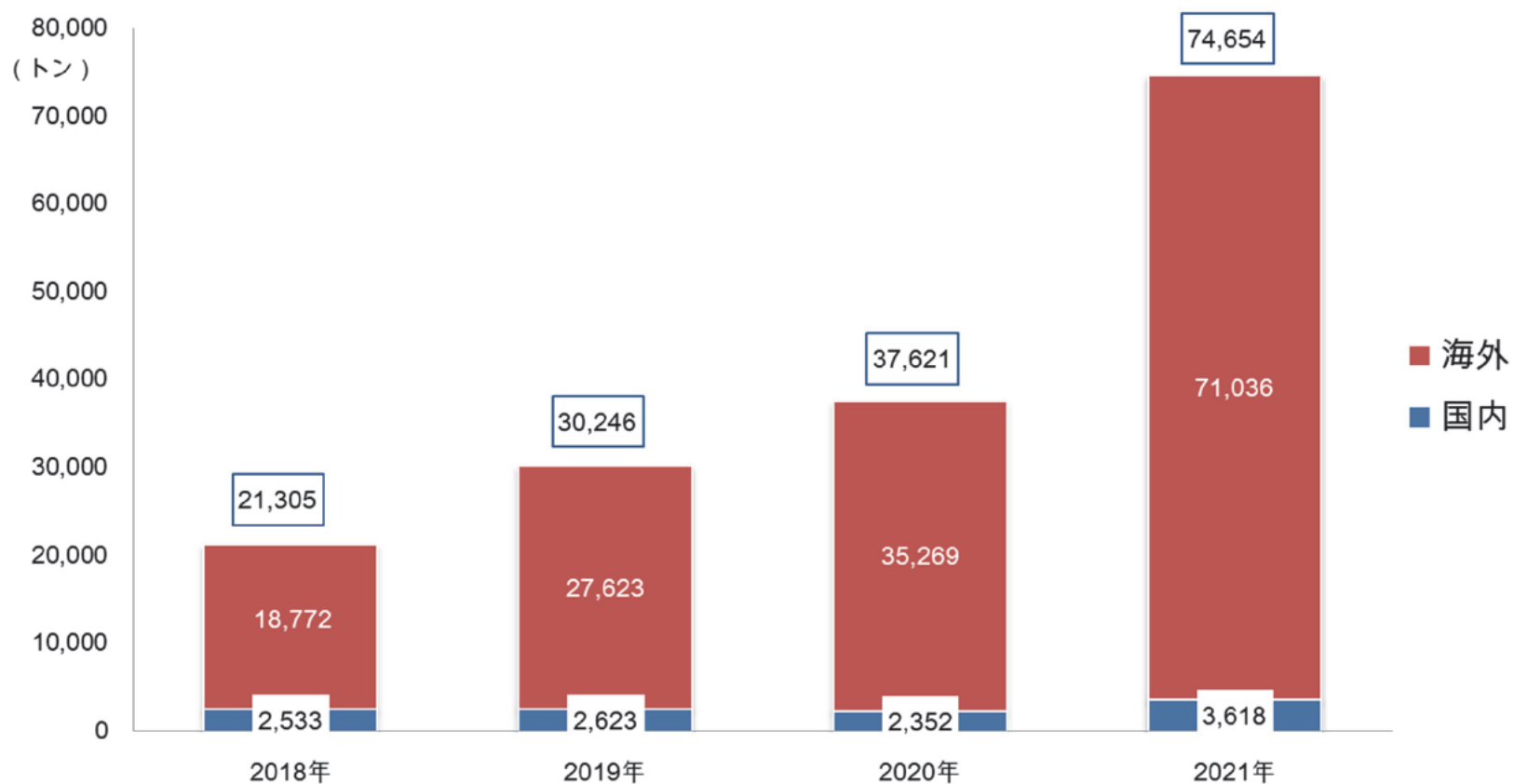


図 車載用LiB向け電解質 生産量推移

出所：矢野経済研究所推計

27Co

28Ni

77Ir

78Pt

05. 水電解装置

(1) 概要

- 水電解は、電気の力を利用して水を酸素と水素に分解し、水素を製造する仕組みである。
- 水電解を行う代表的な装置は、触媒を持つ固体高分子膜に純水を通して触媒で反応させ、水素と酸素に分解する「固体高分子膜（Polymer Electrolyte Membrane: PEM）型水電解※1」、強アルカリ水溶液に直接電流を流して水素と酸素を発生させる「アルカリ型水電解」、水蒸気を高温で電解する「固体酸化物型電解セル（Solid Oxide Electrolysis Cell: SOEC）水電解」に大別される。
- 最近ではPEM型の電解質膜をプロトン伝導性のものからアニオン伝導性の材料へと変え、アルカリ条件での電解装置としたアニオン交換膜（Anion Exchange Membrane : AEM）型電解装置の研究開発も活発化している。

※1：近年はプロトン交換膜（Proton Exchange Membrane : PEM）型とも呼ばれている。

表 水電解の方式

	固体高分子膜型水電解（PEM）	アルカリ型水電解	固体酸化物型水電解（SOEC）
電解質	フッ素樹脂系イオン交換膜	20～30%KOH水溶液	安定化ジルコニア
伝導イオン	H ⁺ （AEM型はOH ⁻ 等が移動）	OH ⁻	O ²⁻
温度（℃）	常温～150	50～100	900～1100
特徴	高電流密度、コンパクト	大規模	高効率
商用化	小規模装置中心に商用化進展	肥料製造・食塩電解などで実績	海外で小規模装置が一部商用化

セル模式図

(1) 概要

- 現在、日本ではグリーンイノベーション基金を通じ、アルカリ型ならびにPEM型の水電解装置を対象とした技術開発支援が重点的に行われている。
- 既に商用化されているアルカリ型とPEM型が水電解装置市場の主流になると予想される。SOECは日本が強みを持つ燃料電池技術を活用できる、AEM型は高コストな貴金属を使用せずに済み、かつPEM型並みの高い電流密度を目指せるといった特長を持つ。ただ、いずれも日本では研究開発段階にあり、普及拡大は2035～2040年になる見通しである。
- 上記の点を踏まえ、本調査ではアルカリ型及びPEM型にスコープを当てた。
- 経済産業省、あるいは環境省の支援を受けた水電解装置の主な実証プロジェクトは以下の表のとおりである。
- 現在、水電解装置の容量が最大となる福島水素エネルギー研究フィールド（FH2R）と、やまなし・ハイドロジェン・エネルギー・ソサエティ（H2-YES）は、グリーンイノベーション基金事業「再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造」において、実用規模（2030年にPEM型、アルカリ型のいずれも100MWシステム）を想定した水電解装置の大型化・モジュール化技術等の開発に取り組んでいる。

表 水電解装置の主な実証プロジェクト

管轄	プロジェクト名	場所	種類	水電解装置容量 (MW)	メーカー
経済産業省	福島水素エネルギー研究フィールド (FH2R)	福島県	アルカリ	10	東芝エネルギーシステムズ、旭化成
	やまなし・ハイドロジェン・エネルギー・ソサエティ (H2-YES)	山梨県	PEM	1.5	日立造船（セルは東レ）
環境省	白糠町PJ	北海道	PEM	0.2	東芝エネルギーシステムズ
	京浜臨海部PJ	神奈川県	PEM	0.05	
	室蘭市PJ	北海道	PEM	0.005	神鋼環境ソリューション
	富谷市PJ	宮城県	PEM	0.05	
	北九州市PJ	福岡県	PEM	0.05	
	能代市PJ	秋田県	PEM	0.013	三菱化工機、高砂熱学工業

出所：環境省「2021年度 注目国内動向」を基に矢野経済研究所作成

(1) 概要

- 2019年3月に水素・燃料電池戦略協議会において改訂された「水素・燃料電池戦略ロードマップ」では、日本が水電解による水素製造の分野において世界最高水準の競争力を確保していくため、これまでに掲げてきた水電解装置システムコスト5万円/kWの目標値に加え、PEM型、アルカリ型のそれぞれについて、メンテナンスコストやスタックの電流密度、触媒使用量などの目標値が掲げられた。
- 2020年6月には水素・燃料電池戦略協議会の下に設置されたワーキンググループが、同ロードマップの対応状況を公表した。水電解技術に関しては、2009年度末時点の実証値（PEM型はこれまでの検証結果から達成見込みの値、アルカリ型は福島水素エネルギー研究フィールドでの実証値）が示されている。

表 PEM型水電解装置の現状と目標値

項目	単位	現状値（2009年度末）		ロードマップの目標値	
		メーカー想定値※ ¹	実証値（見込み）※ ²	2020年	2030年
エネルギー消費量	kWh/Nm ³	5	4.6-4.8	4.9	4.5
電流密度	A/cm ²	1.0-2.0	2.2以上（最大性能）	2.2	2.5
触媒貴金属（PGM）	mg/W	0.5-1.5	2.7以下	2.7	0.4
触媒貴金属（白金）	mg/W	0.2-0.5	0.7以下	0.7	0.1

※1水電解装置メーカーのカタログ値・試算値

※2本格的な実証開始前であるが、これまでの検証結果から達成見込みの値

表 アルカリ型水電解装置の現状と目標値

項目	単位	現状値（2009年度末）※ ¹		ロードマップの目標値	
		メーカー想定値※ ²	実証値	2020年	2030年
エネルギー消費量※ ³	kWh/Nm ³	4.3 (0.15A/cm ² 時) - 5.0 (1.0A/cm ² 時)	4.3 (0.15A/cm ² 時) - 5.0 (1.0A/cm ² 時)	4.5	4.3
電流密度	A/cm ²	0.15-1.0	0.15-1.0	0.7	0.8
触媒でのコバルト使用量	mg/W	0.7以下	0.7以下	3.4	0.7

※1前提条件：水素純度99.9%、水素圧力0.05MPa

※2水素製造量100,000-200,000Nm³（ノルマルリューベ）/hの場合の水電解装置メーカーによる試算値

※3劣化前

(2) 市場データ

- IEA（International Energy Agency：）によれば、水電解装置の世界導入容量は2021年に512MWとなった。内訳はアルカリ型197MW、PEM型93MW、その他14MWである。
- IEAの予測では、現在進行中のグリーン水素プロジェクトに基づくと、水電解装置の世界導入容量は2022年に1,398MW、2023年には5,517MWに達する。さらに、現段階で計画されているグリーン水素プロジェクトが全て実現すれば、水電解装置の世界導入容量は2030年に最大240,000MW（240GW）に拡大する。内訳はアルカリ型1,459MW、PEM型1,125MW、現時点で方式が決定されていない、もしくはオープンになっていない“未定”のプロジェクト分が2,933MWとなる。

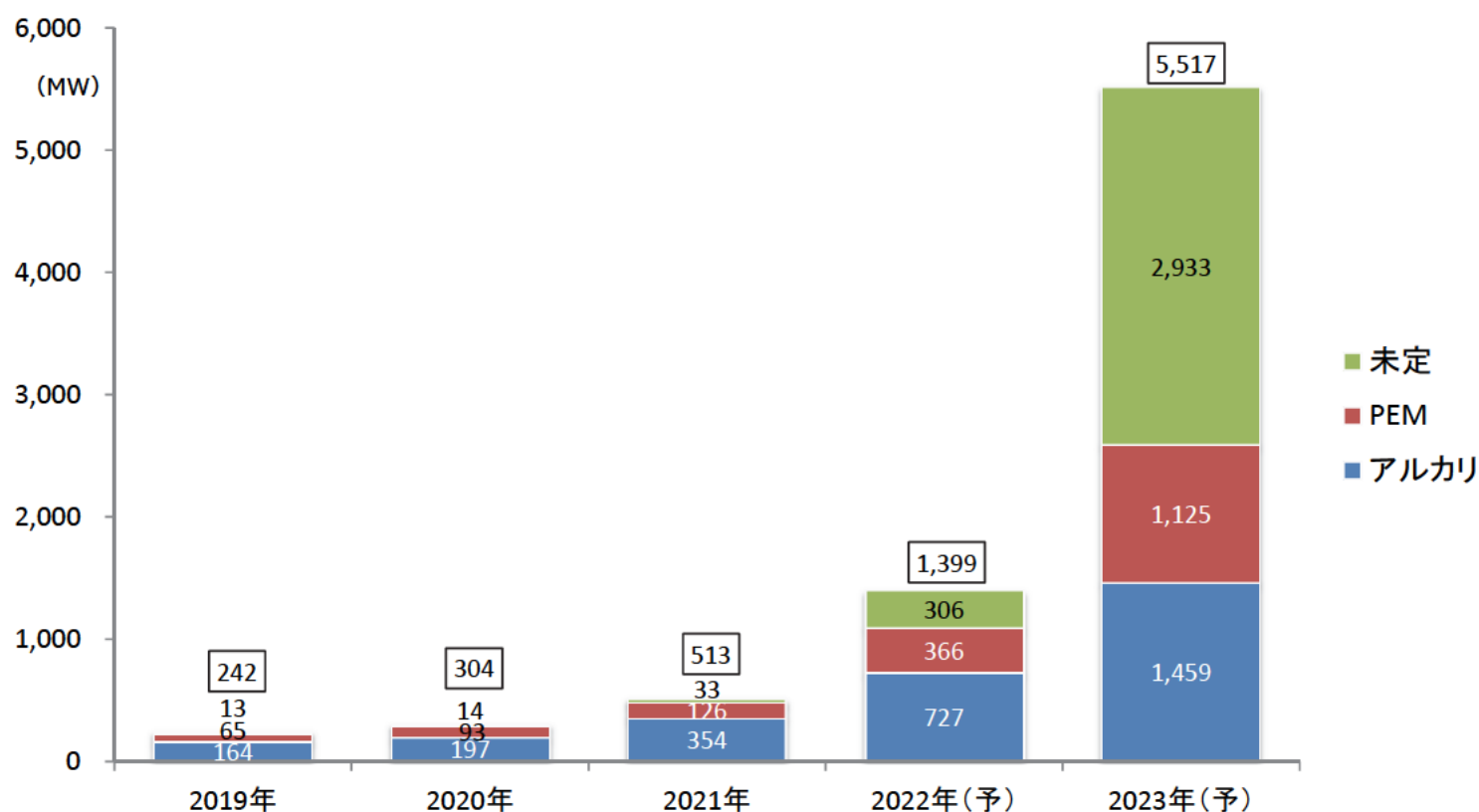


図 水電解装置の方式別世界導入容量推移

出所：IEA (2022), Electrolysers, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/electrolysers>, License: CC BY 4.0を基に矢野経済研究所作成

(2) 市場データ

- IEAによれば、水電解装置の世界生産能力は2021年に約8GW/年、2030年には61GW/年に達する可能性がある。エリア別では、中国と欧州で水電解装置の生産能力が高まるものと予想している。
- 方式別では、2030年に約65%がアルカリ型、20%がPEM型になるとの見通しである。ただし、メーカー各社から発表されている約40GW/年分の設備投資計画においては、工場の稼働開始時期が未定とされている。

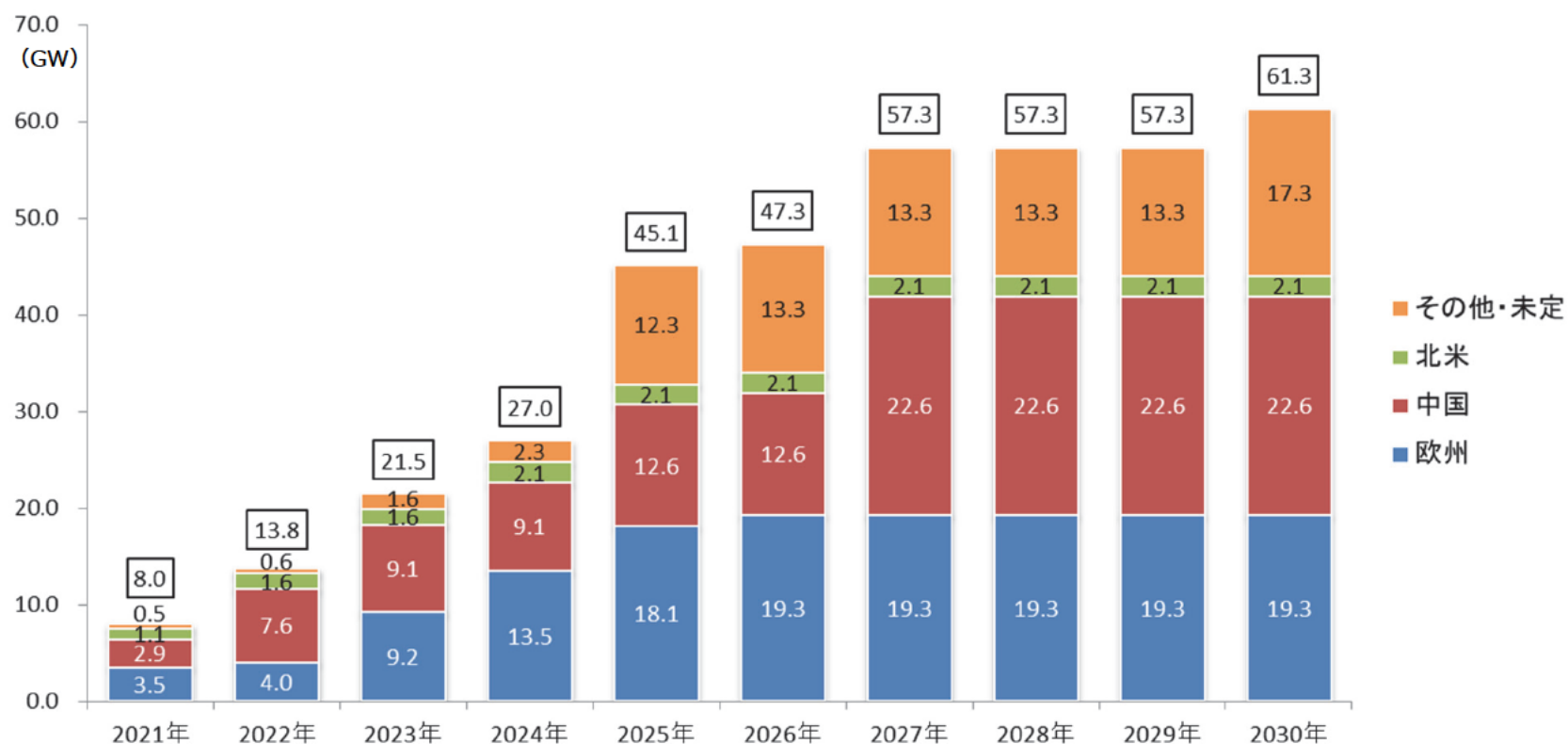


図 水電解装置の地域別世界生産能力推移

出所：IEA (2022), Electrolysers, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/electrolysers>, License: CC BY 4.0を基に矢野経済研究所作成

(2) 市場データ

表 主要水電解装置メーカーの生産体制

国（本社）	企業名	種別	生産拠点	生産能力 (GW/年)	備考
日本	日立造船	PEM	大阪府大阪市	-	
	神鋼環境ソリューション	PEM	兵庫県加古郡	-	
	旭化成	アルカリ	神奈川県川崎市	-	2024年初頭パイロット試験設備運転予定
Germany	Thyssenkrupp nucera	アルカリ	Duisburg, Germany	1.25	2025年までに5GWに増強
	Sunfire	アルカリ	Monthey, Switzerland	0.04	2023年500MW、1GWまでの増強計画あり（場所未定）
		SOEC	Dresden, Germany	-	
	Siemens energy	PEM	Berlin, Germany	0.25	2023 年後半稼働予定、2025年までに3GWに増強（Air LiquideとのJV）
France	McPhy Energy	アルカリ	Toscana, Italy	0.3	
			Grenoble, France	(1.0)	2024年稼働予定
	Elogen	PEM	Essonne, France	0.16	2030年までに1GWに増強
Belgium	John Cockerill	アルカリ	Alsace, France	0.2	2030年までに1GWに増強
			中国江蘇省蘇州市	1.0	Cockerill Jingli Hydrogen（Suzhou Jingli HydrogenとのJV）
			Andhra Pradesh, India	(2.0)	この他、中国、中東、欧州で各1GWの新工場を建設
			Morocco	(1.0)	2025年までに計7拠点、8GWに増強
UK	ITM Power	PEM	Sheffield, UK	1.0	2024年までに1.5GWに増強
Norway	Nel Hydrogen	アルカリ	Herøya, Norway	0.5	2024年4月に第二ライン（500MW）稼働予定
		PEM	Wallingford, USA	0.05	欧州・米国で計10GW（アルカリ・PEM）に増強
	Hydrogen pro	アルカリ	中国天津市	0.3	2023年1.3GW（欧米）、2025～2027年5GW（欧米他）
Denmark	Haldor Topsoe	SOEC	Herning, Denmark	(0.5)	2024年稼働予定
USA	Cummins (2019年Hydrogenics買収)	PEM	Minnesota, USA	0.5	2022年10月稼働、1GWに増強（時期未定）
			Evel, Belgium	1.0	
			Castilla-La Mancha, Spain	(0.5)	2023年末完工予定、1GWに増強（時期未定）
			中国広東省仏山市	(0.5)	Cummins Enze（中国石油化学とのJV）、2023年末完工、1GWに増強（時期未定）
	Ohmium International	PEM	Karnataka, India	0.5	2GWに増強（時期未定）
	Bloom Energy	SOEC	California, USA	1.0	
			Delaware, USA	1.0	
	Plug Power	PEM	New York, USA	1.0	
中国			韓国仁川	(1.0)	2024年稼働予定（SK E&SとのJV）
	LONGi Hydrogen	アルカリ	中国江蘇省無錫市	1.5	2025 年までに 5 -10 GWに増強
	Peric Hydrogen Technologies	PEM/アルカリ	中国河北省邯鄲市	1.5	
	Sungrow Hydrogen Energy	PEM/アルカリ	中国安徽省合肥市	1.1	
	AUYAN New Energy Technology	アルカリ	中国山東省諸城市	1.0	
	Guofu Hydrogen Energy	アルカリ	中国江蘇省張家港市	1.0	

05-1. 固体高分子膜型水電解装置

05-1. 固体高分子膜型水電解装置

(1) 構造

- 固体高分子膜（Polymer Electrolyte Membrane：PEM）型水電解装置のシステム概要は以下の図のとおりである。心臓部である電解槽に純水を供給すると同時に、整流器より直流電流を電解槽へ供給する。電解槽では水の電気分解により水素と酸素が発生する。
- PEM型は電解槽にある水電解セルの電極間の距離が短い（電気抵抗が小さい）ため、高い電流密度で運転できる。また、過電圧が低くエネルギー効率が非常に高いほか、水素気液分離器等が小さいため、装置のコンパクト化が可能。ガス分離能が高く、純度の高い水素を得られるため、精製工程を必要としない。
- PEM型電解槽は多数の水電解セルを接続している。
- 水電解セルの陽極（アノード）－陰極（カソード）間に外部の電力を印加すると、それぞれの触媒上で電気分解反応が起こる。陽極では $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ の酸化反応によって、水が分解し酸素が生成されるとともに、電子・水素イオンを放出する。この後、水素イオンは電解質膜内、電子は外部回路を通過して陰極へと移動し、陰極では $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$ の還元反応によって水素が生成される。したがって、全体では水（ H_2O ）から H_2 と O_2 が生成される反応となる。
- なお、電気分解反応では電位の高低で陽極・陰極を区別するため、陽極＝アノード、陰極＝カソードとなる。一方、電池反応では電子が流れ出すか流れ着くかで区別することから、正極＝カソード、負極＝アノードとなる。

05-1. 固体高分子膜型水電解装置

(2) 構成部材・材料構成

- 水電解セルは電解質膜とアノード触媒、カソード触媒からなる電極接合体（Membrane Electrode Assembly：MEA）、および物質の輸送が行われる集電体、流路を持つセパレータなどを組み合わせた構造である
- 電解質膜には陰イオンの輸率が小さく O_2 の通過を阻止し、かつ陽イオンの輸率が大きく H^+ のみを通過させることが求められる。現在は主に米・Dupontが製造するNafion®イオン交換膜など、スルホン酸基を有するフッ素系高分子膜が用いられている。
- アノード触媒にはIr、Rh、Pd、あるいは酸化物の IrO_2 、 RuO_2 、 PdO_2 など、なかでも耐酸性に優れる IrO_2 が広く使われている。一方、カソード側には主にPt系触媒が用いられている。
- 集電体の材料はアノード側でPt被覆多孔質チタン、カソード側でチタン、あるいはカーボンなどである。また、セパレータの材料にはアノード側でチタン、カソード側でカーボンが多用されている。なお、German Mineral Resources Agency (DERA) が発表した「Raw materials for emerging technologies 2021」によれば、チタンは集電体とセパレータ向けに計28.3kg/MW使われる（今後の材料使用量の低減を考慮した2040年頃の推定値）。

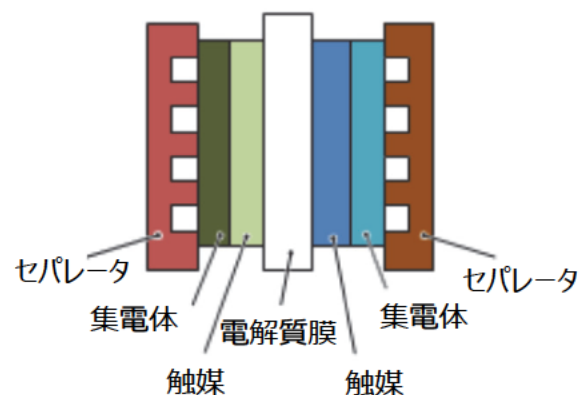


図 PEM型水電解セルの基本構成

出所：各種資料をもとに矢野経済研究所作成

05-1. 固体高分子膜型水電解装置

(2) 構成部材・材料構成

- PEM型水電解装置において、重要鉱物が使用されている部材は電解槽の電極（触媒、集電体）である。
- アノード触媒にはイリジウムが2～2.5t/GW、カソード触媒にはプラチナが0.7t/GW使用されているとみられる。また、酸化による不動態化を防止するため、アノード集電体にはプラチナコーティングが施されており、その使用量は0.5t/GWとなる。

表 PEM型水電解槽の容量当たり元素換算量

方式	構成部材		鉱物	容量当たり元素換算量 (t/GW)		
				2022年 ^{※1}	2030年 ^{※2}	2040年 ^{※3}
PEM型	電極	アノード（触媒）	Ir	2 ～2.5	0.4	0.01
		アノード（集電体）	Pt	0.5	—	0.01
		カソード（触媒）	Pt	0.7	0.1	

出所：※1：資源エネルギー庁「水素・燃料電池戦略ロードマップの達成に向けた対応状況」、DERA「Raw materials for emerging technologies 2021」およびヒアリング情報

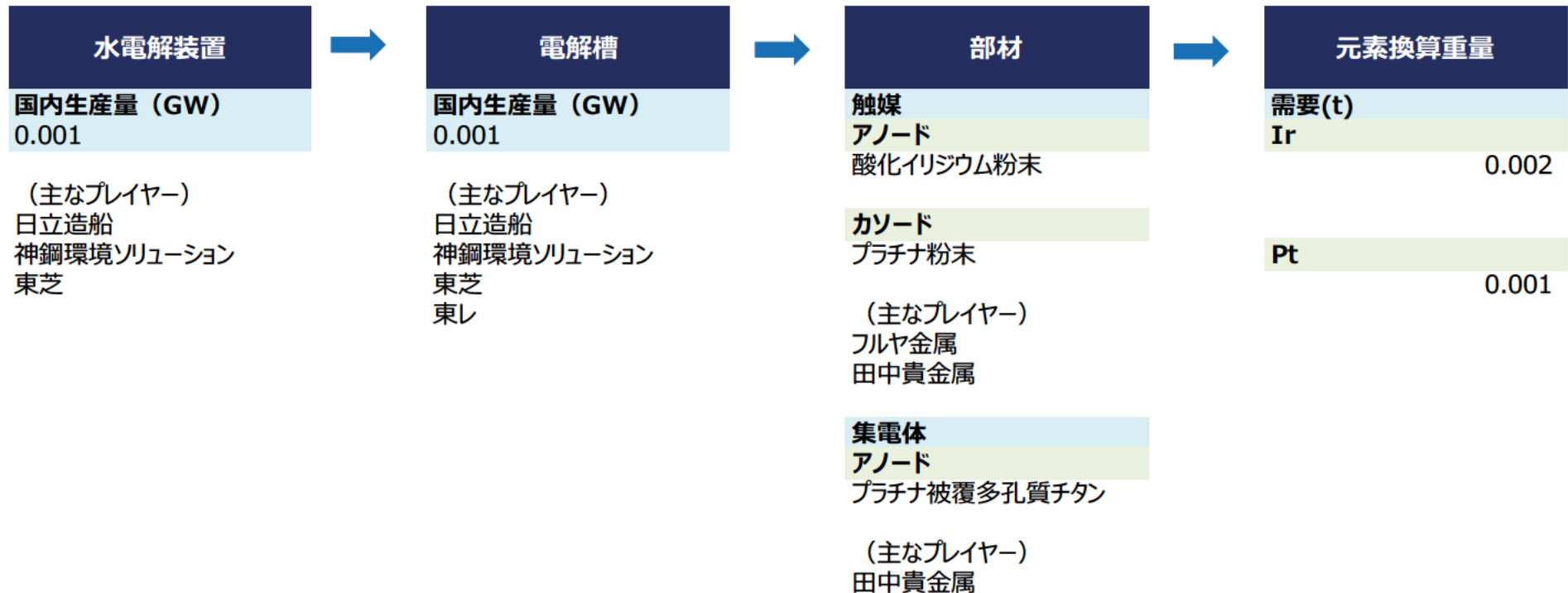
※2：資源エネルギー庁「水素・燃料電池戦略ロードマップの達成に向けた対応状況」

※3：IEA「The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions」

05-1. 固体高分子膜型水電解装置

(3) サプライチェーン

2021年



出所：各種資料より矢野経済研究所作成

05-2. アルカリ型水電解装置

05-2. アルカリ型水電解装置

(1) 構造

- アルカリ水電解装置のシステム概要は以下の図のとおりである。電解槽の各セルで発生した水素と酸素はそれぞれ別々に、電解液と一緒にセルの上部から取り出される。さらに、気液分離タンクで電解液から分離され、次工程に送られる。一方、電解液は消費した分の水を追加して、循環ラインから電解槽の各電解セルへ再び供給される。
- アルカリ水電解は、食塩電解などで商用利用の実績を有する技術であり、メンテナンスを行うことで数十年にわたり稼働可能な高い耐久性を持つ。PEM形水電解と比較すると設備の専有面積は大きくなる傾向にあるが、材料コストが低く、また大型化が比較的容易である。

05-2. アルカリ型水電解装置

(2) 構成部材・材料構成

- アルカリ水電解は20–30%KOH 水溶液を電解質とし、電流を流すことで以下に示した式の反応が起き、陽極で酸素陰極で水素が発生する。
アノード： $4\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$
カソード： $4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^- + \text{H}_2$
- アノード材料としては、Niなどの金属をはじめ、ニッケルやコバルトを含むスピネル系導電性酸化物、あるいはペロブスカイト系導電性酸化物などが報告されている。
- カソードに用いられる代表的な材料として、表面をラネーニッケルとして高比表面積化したものがある。Alをコールドロールやプラズマスプレー等でNi上に製膜したり、NiZnを共析したあと熱拡散処理で合金化、活性化処理としてアルカリ展開してAlやZnなどの両性金属を溶出して高比表面積の活性な表面を調製する。このほか、NiとMo、Fe、Co、Cr、Snなどの複合めっきが検討されている。
- 隔膜材料には安価で耐久性に優れているアスベストが使用されていたが、人体への有害性の問題から親水化したPTFE（ポリテトラフルオロエチレン）やグラフト重合膜、 ZrO_2 などのセラミックスと結着材の複合代替材料が検討されている。

05-2. アルカリ型水電解装置

(2) 構成部材・材料構成

- アルカリ型水電解装置において、重要鉱物が使用されている部材は電解槽の電極と付帯設備（配管）である。いずれの部材にもアルカリ溶液に対して優れた耐食性を有するニッケルが多用されており、その使用量はおよそ1,000t/GWに達する。また、アノードの活性を高めるために0.7t/GWのコバルトが使用されるケースもある。
- この他、IEAが作成した「The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions」によれば、アルカリ水電解槽にはアルミニウム500kg/MW、鉄10t/MWが使われる。
- 2023年2月にNEDOが公表した「水電解技術開発ロードマップの策定に向けた課題整理」では、高い電極活性と耐久性を実現する新たな革新的材料の開発はもとより、現状の電極材料を用いた電極の高活性化、さらにはNiの使用量低減による配管部材の低コスト化が重要な技術課題と位置付けられた。なお、今回は解決優先度の高い技術開発課題の抽出に重きを置いており、今後具体的なコストや性能目標、目標達成のために各要素が満たすべき条件、技術開発課題の改訂などを検討し、「水電解技術開発ロードマップ」として取りまとめる予定となっている。

表 アルカリ型水電解槽の容量当たり元素換算量

方式	構成部材		鉱物	容量当たり元素換算量（t/GW）		
				2022年※1	2030年※2	2040年※3
アルカリ型	電極	アノード	Co	0.7	0.7	0.3
			Ni	1,000	—	423.1
		カソード	Ni			
	配管		Ni			

出所：※1：資源エネルギー庁「水素・燃料電池戦略ロードマップの達成に向けた対応状況」、IEA「The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions」およびヒアリング情報

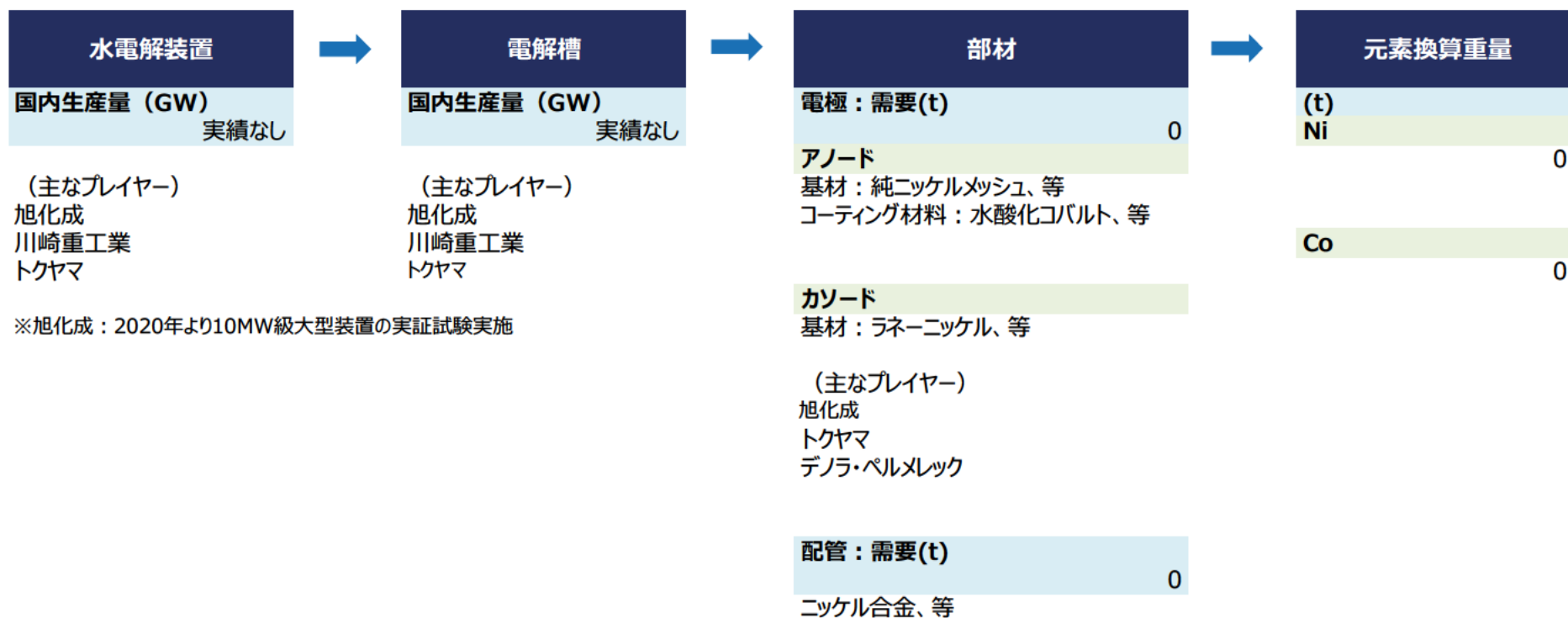
※2：資源エネルギー庁「水素・燃料電池戦略ロードマップの達成に向けた対応状況」

※3：DERA「Raw materials for emerging technologies 2021」

05-2. アルカリ型水電解装置

(3) サプライチェーン

2021年



※旭化成：2020年より10MW級大型装置の実証試験実施

出所：各種資料より矢野経済研究所作成

13Al

14Si

29Cu

32Ge

06. 通信/電力ケーブル

(1) 概要

- 通信/電力ケーブルとしては電線、光ファイバが挙げられる。
- 電線とは電力や電気信号を伝える金属線の総称で、導体には銅やアルミが使われている。
- 電線とケーブルには明確な区別はないが、一般的には構造が複雑で、シース（外装）のあるものをケーブルと呼ぶ。
- 電線には、電力用電線と通信用電線がある。
- 電力用電線は電力を輸送するために用いられる。火力、原子力、水力などの発電所で起こされた電気は、鉄塔に張られている**架空送電線**又は地下に敷設された**地中送電線**で超高圧変電所、1次変電所、2次変電所と順次電圧を下げて送られる。その後、3次変電所（配電変電所）で電圧を下げられ、**配電線**により電気が消費者まで届けられる。
- 一般家庭用としては、柱上変圧器で電圧を下げてから消費者の軒先まで引き込み、軒先から屋内に配線されている。多量の電気を消費するビルなどでは地下ケーブルで供給されている。
- **配線**は、最終使用箇所、すなわち工場・ビルなどにある機械設備や電気機器照明、一般家庭に電気を配る役目を担っている。
- 通信用電線には、電気信号を伝えるメタル通信ケーブルと光信号を送る光ファイバケーブルがあり、音声、画像、映像などの情報を伝送する役割を担っている。メタル通信ケーブルの代表的なものとしては**電話用ケーブル**と**同軸ケーブル**がある。
- 長年、市内の電話局間には市内ケーブル、比較的近い都市間には市外ケーブル、中距離の都市間には搬送ケーブル、長距離の都市間には同軸ケーブルがそれぞれ用いられてきたが、現在では、これらの電話用ケーブルは光ファイバケーブルに移行している。また、国際電話や海外にインターネット接続するための海底通信ケーブルも**海底光ファイバケーブル**となっている。
- その他、同軸ケーブルには、テレビ送信所のアンテナ給電用同軸ケーブルテレビのアンテナから受像機まで映像と音声信号を伝えるテレビ受信用同軸ケーブルがある。

(2) 構造

【電線】

- 電線は、導体の材料（銅、アルミ）、導体の構成（単線、より線）、被覆の有無（裸線、被覆線、さらに被覆の材料別）、ケーブルの構造（単心、多心）によって分けられる。
- 工場、ビル、家庭などの電気引込口に至る送電・配電線路では、架空送電線（鋼心アルミより線等）、地中送電ケーブル（アルミ被OFケーブルや高圧架橋ポリエチレンケーブル等）、配電ケーブル（架橋ポリエチレンケーブル等）が使用されている。

⇒ **主に高圧電線の領域**

(2) 構造

【電線】

- 柱上変圧器や地上変圧器からの引込線や屋内配線にはビニル絶縁ケーブル（VV）や架橋ポリエチレンケーブル（CV）が用いられている。
- また、最終使用箇所の配線段階で使用する配線用電線は、低圧ビニル絶縁電線（IV、HIV）やビニル絶縁ビニルシースケーブル（VV）、低圧架橋ポリエチレンケーブル（CVT）等、非常に多岐にわたる電線が使われている。
⇒ **低圧電線が主に使用されるが、一部高圧電線も用いられる。**
- 電話用ケーブルには市内線路用、市外線路用、構内配線用及び加入者配線用などがあり、多対細心化した専用の電線（市内線路用：CCPケーブル、PECケーブル、市外線路用：市外PEF-LAPケーブル）が使用されている。
- 同軸ケーブルは、アンテナや高周波機器の接続、内部配線、給電線に使用されるもので、軟銅線、軟銅より線又は銅覆鋼線の内部導体をポリエチレンで絶縁し、外部導体として軟銅線編組などを用い、ビニルシースを施した同心円状の構造となっている。

(2) 構造

【光ファイバ】

- 光通信分野において光信号の伝送路として使用されている。
- 光ファイバは、中心のコア部とコアを取り囲むクラッドで構成され、主材料は石英（ SiO_2 ）ガラスである。コアの屈折率を GeO_2 などの添加物によりクラッドより高めることで、光はコアを伝播する。
- 標準的な光ファイバの外径は $125\mu\text{m}$ で、その周囲には保護のために樹脂が被覆される。被覆された光ファイバは複数本並べ樹脂でテープ状に固定され、さらに保護・補強されたケーブルとして敷設されることが多い。
- 通信用途としては、石英ガラス以外に、プラスチックが使用されるケースもあるが、伝送損失に劣ることから家庭用等の数mほどの短い距離で使用する用途に限られている。（通信用途ではほぼ石英ガラス）

(2) 構造

【光ファイバ】

- 光ファイバは、光の伝播状態（モード）が複数存在する「多モードファイバ」とモードが1つしか存在しない「単一モード（SM）ファイバ」に分類される。また、多モードファイバには、コアの屈折率が均一な「ステップインデックス（SI）型」と屈折率分布が放射線状の「グレーディッドインデックス（GI）型」がある。
- 現在敷設されている通信用光ファイバの99%はSMファイバである。短距離用途では、比較的高速の信号を伝播でき光源や受光器との接続が容易なGIファイバが用いられている。
- SI型の多モードファイバは、コアの屈折率が一定のため、光がコア内で反射を繰り返す。そのため、電波信号がゆがみやすく、伝送帯域も他のファイバに比べて狭いことから、一般の情報通信では使用されていない（主にレーザー光のデリバリーケーブルなどの光パワー伝送で用いられている）。

※一般的に、SMファイバは高速・大容量・長距離、GIファイバは短距離・低コストと認識されている。

近年、接続技術や信号のデジタル演算処理技術の開発が進んだことから、大容量（細径）、高速、低損失に勝るSMファイバの利用が広がった。しかし、エンタプライズデータセンタといった大量のケーブルを使用する分野では伝送距離によってはGIファイバを利用した光ケーブルが利用されているケースも見られる。

(3) 構成部材・材料構成

【電線】 導体にはタフピッチ銅、純アルミを使用

- 導体はタフピッチ銅（純度：99.9%以上）、純アルミ（1060、純度99.6%）が使用されており、絶縁体は（高圧）架橋ポリエチレン、（低圧）ビニルが一般的に用いられている。
- シースはビニルが主流であるが、燃焼時に有害ガスやダイオキシン等を発生しないノンハロゲンケーブル（エコ電線、絶縁体やシースにポリオレフィンを採用）も各社で製品化されている。

(3) 構成部材・材料構成

【光ファイバ】 SiO_2 と GeO_2 （投入形態は四塩化ゲルマニウム）が主な使用鉱物

- 主材料は石英（ SiO_2 ）ガラスであるが、コアやクラッドの屈折率を調整するため、ゲルマニウム（Ge）やホウ素（B）、フッ素（F）、リン（P）が添加される。
- 具体的には、SMファイバではコアに GeO_2 を添加することが一般的である。コア内 GeO_2 濃度は6wt%（ヒアリング情報）。母材製造工程において四塩化ゲルマニウム（ GeCl_4 ）の形態で投入される。
- GIファイバも同様に GeO_2 がコアに添加されており、コア内 GeO_2 濃度は11wt%（ヒアリング情報）。
- 海底ケーブル向けの大口径極低損失光ファイバ（SMファイバ）では純石英コアとクラッド（フッ素添加）の組み合わせで伝送損失0.17dB/km以下を達成した製品も実用化されている。ヒアリング情報（住友電工）によると、フッ素源は四フッ化ケイ素。使用量自体は極めて少ないため、これまでに供給面での懸念等が社内であがったことはなかったとのことである。
- その他、ステップインデックス（SI）型の多モードファイバでは、クラッドに B_2O_3 が添加されたものがあるほか、米Corningが採用するMCVD法では、ガラス管が熱変形しないようガラス熔融温度を下げるP（リン）等の添加剤が必要とされるが、MCVD法は通信用光ファイバの量産製造方法としては一般的ではなく、デバイス用光ファイバ等の特殊用途に活用されるのみとなっているとのことであった。
- 日本では、独自の母材製造方法であるVAD法（Vapor Phase Axial Deposition）が採用されている。
- 母材大型化が可能で経済性に富む製法として改良が進む。現在は世界の光ファイバの6割近くがコア/クラッド母材の製造にVAD法を用いている。

(4) サプライチェーン



○ 電線（銅およびアルミ）のリサイクルについて
経済産業省/非鉄金属等需給動態統計のデータや過去の調査データからリサイクル率を推計した。電線ケーブルの中でも、長尺かつ流通構造が確立されているインフラ系（通信電力）はリサイクル体制が整っているため、銅スクラップの使用率は電線業界の平均値よりも高い水準とみられる。このような観点から、アルミについても同水準と推計している。

(4) サプライチェーン



※kmc:コア長

出所：各種情報を基に矢野経済研究所作成

(5) 市場データ

- 電力会社における設備投資の抑制や公衆回線の廃止が計画される通信部門における需要漸減の影響から、2021年は2020年並みとなった。2022年も自動車部門の正常化の遅れ等から大きな伸びは見込みにくい環境にある。
- アルミ線についても、銅電線と同様、電力部門は電力会社の設備投資の抑制などが想定されたため、需要の伸びは見込みにくい状況である。

表 電線 生産実績推移（経済産業省）

製品区分	2017	2018		2019		2020		2021	
			前年比		前年比		前年比		前年比
裸線	44,912	37,880	84.3%	39,318	103.8%	31,837	81.0%	33,970	106.7%
巻線	138,138	137,357	99.4%	130,481	95.0%	117,011	89.7%	125,810	107.5%
機器用電線	42,674	46,300	108.5%	42,788	92.4%	38,199	89.3%	43,293	113.3%
輸送用電線	44,998	45,830	101.8%	41,744	91.1%	35,854	85.9%	40,383	112.6%
通信用電線・ケーブル	18,331	17,608	96.1%	16,918	96.1%	15,193	89.8%	13,928	91.7%
電力用電線・ケーブル	233,868	227,984	97.5%	248,803	109.1%	222,994	89.6%	208,977	93.7%
その他の絶縁電線	126,595	126,595	100.0%	125,387	99.0%	110,682	88.3%	110,066	99.4%
銅線 合計	649,516	639,835	98.5%	645,439	100.9%	571,770	88.6%	576,427	100.8%
アルミ線	32,579	34,037	104.5%	34,168	100.4%	35,654	104.3%	36,712	103.0%

出所：経済産業省

(5) 市場データ

表 国内光ケーブル需要量（日本電線工業会）

製品区分	2017年度	2018年度		2019年度		2020年度		2021年度		2026年度予測	
			前年比		前年比		前年比		前年比		CAGR
公衆通信	3,418	3,369	98.6%	3,707	110.0%	3,483	94.0%	3,717	106.7%	3,870	0.8%
公共関連	167	219	131.1%	229	104.6%	296	129.3%	263	88.9%	270	0.5%
一般民需	2,226	2,718	122.1%	2,478	91.2%	3,024	122.0%	3,573	118.2%	3,680	0.6%
国内需要合計	6,603	6,306	95.5%	6,415	101.7%	6,802	106.0%	7,553	111.0%	7,820	0.7%

単位：千kmc（コア長）

出所：日本電線工業会

- 高度・無線化事業（5G等のブロードバンド基盤の整備）が収束する一方で、新型コロナ禍によるリモートワークの増加や、ローカル5Gを中心とする設備増強といった需要の継続が見込まれる。公共関連部門は官公需の更新需要があるものの、鉄道部門の設備投資は伸びない見通し。一般民需はデータセンタ関連の需要が底堅いが、全体としては横ばいで推移するとみられる。
- 汎用の光ファイバ（陸上の通信網）では価格競争が激しくなっている。日本メーカーは「価格競争の厳しいファイバより付加価値の取れるケーブル」での事業展開を強化中。データセンタ（超多心）や海底ケーブル（極低損失）等の高付加価値用途での拡販に注力している。
- ただし、現状はまだ心線や母材の輸出の比率は高い。性能を決める“コアな部分”（コアとクラッドの50μmくらい）は丁寧に純度を上げて作り、そこから先は製造速度を上げてコスト競争力を高める等の取り組みも行っている。

07. ガスタービン

5B

6C

13Al

14Si

22Ti

24Cr

25Mn

26Fe

27Co

28Ni

40Zr

41Nb

42Mo

72Hf

73Ta

74W

75Re

(1) 概要

国内ガスタービンは主に発電用途（大型ガスタービン）が総出力の90%以上を占める

- 空気を圧縮機で圧縮し、この圧縮した空気を燃焼器に導いて燃料を連続的に燃焼させて高温・高圧のガスを発生させる。これを円板に多数の翼を付けた翼車で膨張させ回転エネルギーに変換。この回転エネルギーにより前段の圧縮機を回すとともに、残りのエネルギーを出力軸で取り出すのが産業用ガスタービンである。
- ディーゼルエンジンやガソリンエンジンと同じ内燃機関の一種であり、その作動原理も吸気・圧縮・燃焼（膨張）・排気という同じサイクルで作動している。しかし、基本的運動が、レシプロエンジンの往復運動に対して、ガスタービンは回転運動である。そのため、往復運動を回転運動に変えるメカニズムは不要。
- レシプロエンジンはその構造上、作動流体を増やして出力を高めるということが困難であるが、ガスタービンは作動流体を連続的に処理できるため、大出力化が容易である。また、レシプロはサイクルの全工程をシリンダとピストンで行うが、ガスタービンは、圧縮は圧縮機、燃焼は燃焼器、膨張はタービンで、それぞれ専門的に行う。その他、レシプロエンジンは断続的に燃焼するが、ガスタービンは燃焼が連続して行われるため、一度着火して起動させると、燃料供給を停止させるまで燃焼が続くといった特長がある。

（本調査におけるガスタービンについて）

ガスタービンは主に産業用（発電用）、船舶用、航空機用（ジェットエンジン）に分類されている。日本国内では主に産業用（発電用）のガスタービンが多く製造されており、2020年に生産された台数でみると174台（うち、出力が22,065kW～の大型ガスタービンは17台、全ガスタービンの総出力の90%以上を占めている）。

航空用ガスタービン（ジェットエンジン）については、Trent1000やGEnxなど、海外製のエンジンが多い状況。日本では製品（ガスタービン）ではなく、主に部品製造が行われている。

⇒ このような背景から、本調査では、産業用の中でも、発電用途（大型ガスタービン）について見ていくこととする。

(1) 概要

ガスタービンの種類としては、ターボジェットエンジン、ターボファンエンジン、1軸・2軸式ガスタービンがある

【ターボジェットエンジン】

- ジェット噴流を利用して、推進力を得る最も基本的な形式のガスタービンで、構造的にも最も簡単なタイプとされている。このエンジンは、高速飛行する航空機に適しており、超音速旅客機、ジェット戦闘機のエンジンとして利用されている。

【ターボファンエンジン】

- ターボジェットエンジンの後ろに別のタービンを置き、それによりエンジン前部の大きなファンを回すもので、このファンによって空気流量を増やし、推力を増大させていく。この形式のものは騒音も少なく、亜音速域で燃費が良いため、現在ほとんどの旅客機用のエンジンとして使用されている。

【1軸式ガスタービン】

- 出力を回転力として取り出すガスタービンで、タービンと圧縮機が1軸に結合されているもの。タービンの出力の一部は圧縮機駆動用に使われ、残りが出力軸へ取り出される。用途としては、交流発電機駆動用などの定速回転を要求されるものに適している。

【2軸式ガスタービン】

- 圧縮機の駆動用タービンの後に別のタービンを置き、ジェット噴流のエネルギーを回転力として取り出すようにしたもの。この後ろのタービンを出力タービンと呼ぶが、その出力タービン軸と圧縮機軸が機械的に結合されていないため、任意の出力回転数を選ぶことが出来、回転数域の広いものを駆動するのに適している。プロペラ機、ヘリコプターのほか、ポンプ・コンプレッサ駆動、船用主機、発電機駆動等にも広く使われている。

(1) 概要

ガスタービン発電では排気温度の高さを利用したコンバインドサイクルやコージェネレーションが増加

コンバインドサイクル発電：

- 廃熱回収ボイラでガスタービンから高温の排気を取り入れ、水を沸騰させて高温高圧の蒸気を発生させ羽根車（タービン）を回転させて発電を行う。
- コンバインドサイクル発電では、ガスタービン発電で使用されなかった排ガスの熱を回収し二重に発電を行っているため、高発電効率を得られる。
- 大型ガスタービン発電の設備は、ほとんどがコンバインドサイクル発電システムを採用している。

コージェネレーション：

- コージェネレーションでは、排気から熱を回収し、暖房や給湯などのシステムに熱エネルギーを供給。電気と熱の両方を利用するため、コージェネレーションと呼ばれている。
- コージェネレーションシステムでは、ガスタービン発電で廃棄された熱が有効利用されているため総合的に高い効率となる。
- このシステムは、電気と熱を同時に作るため、両方を大量にするビルや大規模工場などでの導入が進んでいる。

(2) 構造

【圧縮機】

- 圧縮機では取り入れた空気を圧縮する。軸流圧縮機や遠心圧縮機などといった様々な形態が存在し、用途や大きさに応じ使い分けられたり、2つを組み合わせで使用されたりする。
- 大型のガスタービンにおいて主流である軸流圧縮機は、軸方向に空気を流しながら、圧縮していくものである。大きな送風機を軸方向にいくつも繋げたようなもので、空気に力を与えて圧力を上げる（回転している）翼列の「動翼列（ローター）」と、気流の向きを整える（回転しない）翼列「静翼列（ステーター）」を一つの段として、軸方向に幾重にも段を重ねることにより大きな圧力上昇を生み出す。
- ガスタービン用の圧縮機では最新のジェットエンジンにおいて機体を大気圧の40倍以上に圧縮するものも存在する。

- 圧縮機で使用されている耐熱合金は、主にNi基のものとなる。
- 各種資料等によると、Inconel 738、Inconel 625、Inconel 718が主に使用されているとのこと。

- Inconelは特徴として特に耐熱性、耐食性に優れていることが挙げられる。
- Inconel 625においては孔食、隙間腐食、粒間腐食に対して非常に優れた耐性があるほか、高温環境下で高い疲労強度がある。
- Inconel 718においては、焼鈍した状態での製造加工特性が良く、引張強度、疲労強度、クリープ破断強度が優れている。特に、700℃までの高温において強度が高く、1000℃の温度までの耐酸化性も高い。

(2) 構造

【燃焼器】

- 燃焼器では、圧縮機を出た高圧の気体に燃料を噴射し、燃焼させる。一度燃焼器内の気体に点火したら、そこに燃料を噴射し続けることにより、炎が持続する仕組みになっている。燃料には軽油や灯油から、天然ガスなど用途に応じて幅広い燃料が利用されている。
- ガスタービンの燃焼温度は非常に高温であり、燃焼温度が高いほどより多くの出力を効率よく発生できることから、新材料の開発や、新しい冷却手段等により燃焼ガスの温度（タービン入り口温度）の上昇にも対応できる部品が開発されている。最新のもので対応温度が1500℃以上となっており、1700℃に達するものも研究開発段階にある。
- Hastelloy X、TomilloyなどのNi基耐熱合金が使用されている。そのほかでは、Co基合金やオーステナイト系ステンレス鋼も用いられているケースもある。
- 産業用ガスタービンの燃焼器材料としては、Hastelloy Xが一般的とされる。
- 燃焼器用材料は、Cr量を約20%以上含有させて耐食性を向上させ、又板金成形性や溶接性に優れていなければならぬ。このため、燃焼器用鍛造合金はC（炭素）量が0.1%以下に抑えられている。
- そのほか、Haynes 188合金も、1095℃までの高温強度並びに優れた耐酸化性、熱安定性をもつ。同耐熱合金は、燃焼器、尾筒、アフターバーナー構成部品に使用されている。

(2) 構造

【タービン】

- タービンでは、圧縮機、燃焼器を経た高温ガスから、回転の動力を取り出す。その仕組みは風車と同じで、高温高压のガスがタービン羽根車に吹き付けられることによって回転する。風車と異なる点は、羽根車に風を整えてから吹きつける点である。
- タービンは、空気を整流する静翼列（ステーター）と高温高压ガスの流れを受け止め回転する動翼列（ローター）からなり、静翼列と動翼列をあわせて一つの段としている。
- タービン動翼用の耐熱合金はほとんどがNi基耐熱合金である。これは、Ni基合金の高温強度がCo基耐熱合金と比較して高いためである。
- 近年では、鋳造合金（CC：Conventional Casting）だけでなく、一方向凝固耐熱合金、単結晶超合金なども使用されている。（第2・3世代などと称されている）
- しかし、第2・3世代の耐熱合金はコスト面から発電用ではあまり使用されていない。特に結晶超合金などは、Hf、Reなど、高価な元素を含む合金を使用するため、コストが高いことが背景にある。
- タービン静翼に用いられる耐熱合金はCo基合金が多い。理由としては、Co基合金は一般に、熱疲労強度が高く、溶接補修もやり易く、鋳造性や耐高温腐食性も優れていることが挙げられる。
- 一方で、Co基合金は高温クリープ強度が不足するため、現在ではNi基合金も適用されている。

(3) 構成部材・材料構成

- ガスタービンの高温部品に要求される耐熱合金の性質は次の通り。

部品	要求性質	部品	要求性質
タービン動翼	・クリープ強度	燃焼器	・耐酸化性、耐高温腐食性（硫化物）
	・クリープ破断強度		・熱疲労強度
	・熱疲労強度		・高サイクル疲労強度
	・低サイクル疲労強度		・低サイクル疲労強度
	・高サイクル疲労強度		・高融点
	・靱性		・溶接性
	・耐酸化性、耐高温腐食性（硫化物）		・板金成形性または鋳造性
	・組成安定性	タービンディスク	・靱性
	・比重の低いこと		・クリープ強度
	・鋳造性または鍛造性		・クリープ破断強度
タービン静翼	・熱疲労強度		・低サイクル疲労強度
	・低サイクル疲労強度		・高サイクル疲労強度
	・クリープ強度		・組織安定性
	・耐酸化性、耐高温腐食性（硫化物）		
	・組織安定性		
	・鋳造性または鍛造性		
	・溶接性		

出所：各種情報を基に矢野経済研究所作成

(3) 構成部材・材料構成

ガスタービンで使用される耐熱合金はNi基、Co基、Fe基があるが中でもNi基が大半を占める

- 航空用ガスタービンで見た場合、耐熱合金の使用箇所は、動翼、静翼、燃焼器、翼車となる。具体的には：ディスク、燃焼室、ボルト、ケーシング、シャフト、排気系、ケース、ブレード、ベーン、バーナーカン、アフターバーナー、リバーサーが挙げられる。
- 使用されている耐熱合金は、Ni基、Co基、Fe基であり、中でもNi基が大半を占めている。
- 代表的な耐熱合金としては、Inconel、Hastelloy、Udimet、Reneなどが挙げられる。

鉬物の配分により、耐熱性・強度も異なってくるため、国内でも耐熱合金開発が行われている

- Ni基耐熱合金では、クロム（Cr）、コバルト（Co）の含有率が高く、そのほかにはモリブデン（Mo）、タングステン（W）、チタン（Ti）、ボロン（B）、レニウム（Re）、ハフニウム（Hf）などが含まれている。
- Co基耐熱合金ではニッケル（Ni）、Crの含有率が高く、そのほかにはW、タンタル（Ta）、ニオブ（Nb）、アルミニウム（Al）、B、ジルコニウム（Zr）が含まれる。

(3) 構成部材・材料構成

第2世代耐熱合金以降、ハフニウム（Hf）とレニウム（Re）の含有率が増加

- 近年開発されている耐熱合金はハフニウム（Hf）とレニウム（Re）の含有量が増加している傾向にある。なかでも、下図のTMS-138、TMS-162、TMS-196はNIMS研究所開発によるNi基耐熱合金である。
- 第4世代以降の単結晶超合金の開発は、米GE、仏ONERAや、NIMS（物質・材料研究機構）の新世紀耐熱材料プロジェクトにより進められてきた。貴金属元素の添加により、第3世代単結晶合金の問題点となっている組織安定性を向上させ、それによる高温長時間でのクリープ強度向上を図っている。

(3) 構成部材・材料構成

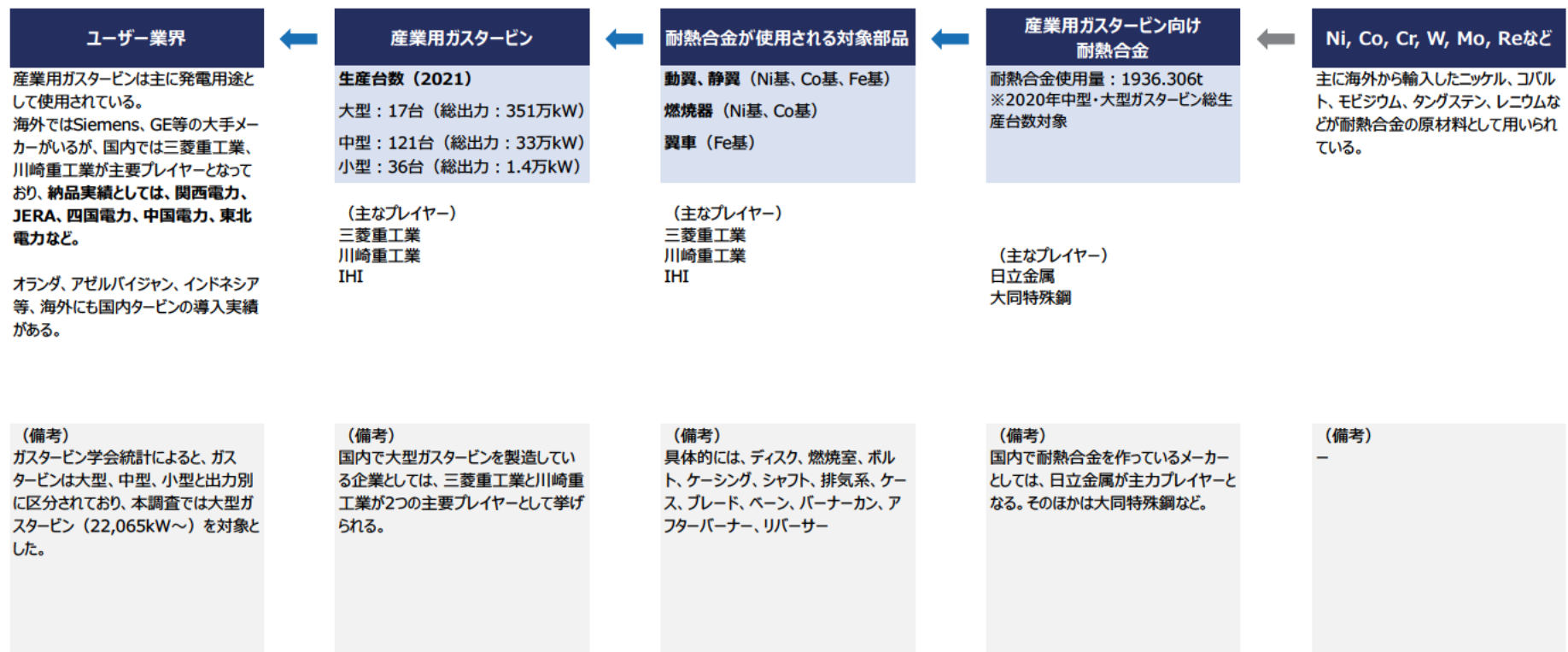
ハフニウム（Hf）の価格が高騰。1kgあたり\$5000以上、国内タービンサプライチェーンへの影響も危惧

- ハフニウムは、主に航空宇宙産業向けの超合金において使用量が増加している。化合物および金属の両方の形態で高い熱安定性、高屈折率、高誘電率などの特長を持つ。
- このような特性から、ガスタービン、ジェット・ロケットエンジンでハフニウム含有超合金の開発が近年では進められており、タービンブレードとベーン（高温部での使用）で使用されるMAR M 247超合金でも重要な鉱物と位置付けられている。
- ハフニウムは通常、鉄、ニオブ、タンタル、チタンなどのほかの金属と組み合わせられるケースが多く、さらには、炭素、酸素、窒素に対する親和性により第2相の粒子分散中に強化するのにも役立つとされている。

※ハフニウムは、豪州、南アフリカで世界の全埋蔵量の80% を占める。

※炭化ハフニウムと窒化ハフニウムの融点は、それぞれ3,890℃と3,310℃。

(4) サプライチェーン



（参考）

使用済みとなる大量のタービン翼は、従来、廃棄タービン翼、すなわちスクラップとして市場に流通し、その過程でW、Reなど、抽出コストの見合う高価格の元素は化学的に抽出されて原料として再使用されてきた。このような元素抽出によるリサイクルは、原材料の安定供給には寄与してきたが、複雑なプロセスを要することから、プロセスコストが高く、材料コスト低減にはつなげていないのが現状。

(5) 市場データ

- ガスタービン学会がまとめたデータによると、2020年のガスタービン生産台数は小型、中型、大型を合計して181台であった。小型（735kW以下）は2019年比で51%減少の37台となった。中型（736～22,064kW）は同比2%減少の125台、大型（22,056kW～）は同比4%増加の19台となった。
- 用途別でみると、ベースロード発電用が総出力としては最も多く、非常発電用が台数では最も多い結果となっている。
- 国内向けは総台数の82%、全出力の9%を占めており、全体に占める割合を2019年と比較すると、台数では7%減少、出力では3%減少となっている。
- 出力区分別に台数を2019年と比較すると、小型で35台減少、中型で9台減少、大型では1台増加した。
- 輸出は総台数の18%、全出力の92%を占めており、2019年と比較した全体に占める割合は、台数では7%増加、出力でも3%増加した。2019年より台数は10台増加したほか、出力は309MW増加している。
- 出力区分別に台数を2019年と比較すると、小型は前年同様、2020年も実績がなかったほか、中型で7台増加、大型で3台増加となっている。
- 輸出先別でみると、台数ではアジア（91%）、ロシア・NSI諸国（6%）の順で、アジアは2019年から30%増加。
- 中型ガスタービン（出力：736～22,064kW対象）においては、2011年の東日本大震災後、需要並びに生産台数が増加している。
- 構造は、大型タービンのものとほぼ同じだが、下図の通り、燃焼器の位置が異なる。なお、多くの大型ガスタービンのタービン段数が4段であることに対して、中型のものはタービンの段数が3段であるものが多い。
- また、入口温度（TIT：Turbine Inlet Temperature）については、大型ガスタービンが1600℃～1700℃レベルのものもあるのに対して、中型は高くとも1300℃程度となっている。加えて、小型については高くとも1000℃である。

(5) 市場データ

水素ガスタービン

- カーボンニュートラルな社会の実現には、発電用大型ガスタービンにおける水素の大規模利用が重要視されている。三菱重工業グループでは、天然ガスと水素の混焼方式と水素専焼方式の大型ガスタービンの開発を進めており、現在水素30%の混焼試験に成功している。
- 現在、NEDO助成金のもと、発電用大型ガスタービンにおいて、燃料のLNG（Liquefied Natural Gas）に水素を30%以上混ぜて使用することを進めており、水素の燃焼により懸念されるNOxの排出も、従来レベルに抑制できるとしている。700MW相当（タービン入口温度1600℃）の出力に対応できる技術で、従来のガスタービン複合発電と比較し、発電時のCO2排出を約10%削減できる。

トピックス

- 三菱日立パワーシステムズが2020年に、米ユタ州で水素だきの大型ガスタービンコンバインドサイクル発電設備を受注したと発表している。
- 「JAC形」ガスタービンを中核とした84万キロワット級の設備で、2025年に水素30%の混焼で運転を開始。2045年までに100%での運転を目指す。

（水素ガスタービンの材料面について）

- ヒアリング情報によると、今のところ、水素ガスタービンは一部燃焼器の冷却部分の構造を見直す以外に構造面・材料面に大きな変更を加える必要はないというのが業界内での一致した見方とのこと。
- 材料面で水素ガスタービン特有のニーズはほぼなく、現行の耐熱合金が引き続き使用される見通しとしている。

(5) 市場データ

アンモニアガスタービン

- カーボンニュートラル実現が求められる中、水素（ガスタービン）に加え、アンモニア（ガスタービン）も注目されている。
- 東北大学が2019年に行った研究によると、天然ガス用の燃焼器に最小限の改造を施すだけでアンモニア/天然ガス混焼の低エミッション燃焼を実現している。
- さらに、2022年1月より、IHI、東北大学、産総研の液体アンモニア専焼ガスタービンの研究開発に関する事業がNEDO事業として採択されている。ガスタービンコジェネレーションシステムからGHG排出量を削減するという目的に向け、2MW級ガスタービンにおいて液体アンモニア専焼（100%）技術を開発するとともに、発電事業におけるアンモニア利用の課題、ガスタービンへの長期影響（耐久性）についても検証するとしている。

トピックス

- 2022年6月、IHIは2,000kW級ガスタービンで液体アンモニアのみを燃料とするCO₂フリー発電を実現し、燃焼時に発生するGHGを99%以上削減することに成功。
- 今後の開発では、さらにNO_xを削減していくとともに運用性の向上や、長時間の耐久性評価を行い、2025年の液体アンモニア100%燃焼ガスタービン実用化に向けた取り組みを進めていく。

（アンモニアガスタービンの材料面について）

- アンモニアガスタービンについても水素ガスタービンと同様に燃焼器の改善（アンモニア燃焼に対応できる燃焼器の開発）以外、材料面でアンモニアガスタービン特有のニーズはほぼなく、従来のガスタービンで使用されている耐熱合金が採用される見通し。

6C

22Ti

27Co

73Ta

74W

08. 超硬工具

(1) 概要

- 切削工具とは、金属を切ったり削り取ったりして所定の形に近づけていくための道具（刃物）。
- 代表的な切削加工は、旋削加工・フライス加工・穴あけ加工の三つに大別される。加工形状に合わせ適切な工具を選択することで、硬い金属を能率良く加工することが可能となる。
- 機械加工用の切削工具には、高速度鋼（ハイス鋼）、超硬合金（超硬）、サーメット等が使用されている。このうち、超硬は、硬度が高く、耐熱性に優れるため、マシニングセンタの高速加工等で多用されている。また、アルミや銅等の非鉄金属の切削加工では、凝着を防止するためコーティングを施したコーテッド超硬合金が用いられている。
- コーティングには、CVD法（化学蒸着）やPVD法（物理蒸着）等があり、窒化チタン（TiN）、炭窒化チタン（TiCN）、アルミ窒化チタン（AlTiN）、窒化ジルコニウム（ZrN）、ダイヤモンドライクカーボン（DLC）等のコーティングが適用されている。
- 経済産業省の機械統計によると、超硬合金を用いた超硬工具の生産高（2021年）は約2,800億円。一方、ハイス鋼等を用いた特殊鋼工具の生産高（2021年）は760億円となっている。超硬工具はハイス工具と比べ高価であるものの、加工品質やサイクルタイムの点でメリットが大きいことから、現在では、自動車部品等の切削加工用工具のスタンダードとなっている。

（切削加工）

旋削加工とは、バイト等を使用した切削加工。主に被加工物（ワーク）を回転させ、丸状に加工する機械を旋盤と呼ぶ。フライスとは、加工物の表面や溝を削る工具で、表面を加工する正面フライスと溝等を加工するエンドミルに大別される。正面フライスやエンドミルを使用した加工を転削加工と呼び、工具が回転するのが特長。転削加工に使用される機械をフライス盤と呼ぶ。

穴あけ加工は、加工物が回転して切削する加工と、ドリルが回転して切削する加工がある。ドリル加工に使用される機械は、ボール盤、旋盤、フライス盤等となる。

(2) 構造

超硬工具としては、ドリル、フライス・エンドミル、バイト等がある

【ドリル】

- 先端に切れ刃をもった加工工具。切粉を排出性とクーラントの潤滑性をよくするため、らせん状の溝がついているものが一般的である。
- 「シャンク」とよばれる本体と「切れ刃」で構成されている。シャンクにはテーパタイプとストレートタイプがある。テーパタイプはドリルの保持力が高くなるため、回転による振動に強くなる（φ13mmを超えるドリルは一般的にテーパタイプ）。
- ドリルの構造にはソリッドドリル、チップ交換式ドリル、ヘッド交換式ドリルがある。
- ソリッドドリルは、ボディとシャンクが一体構造（単一素材）になったもの。最も汎用的で、多く流通している。他の構造と比べ加工精度に優れる。ただし、切れ味が下がってくると再研磨する必要がある。
- チップ交換式ドリルは、先端の刃物部分がチップ式になっているドリルのこと。刃先が磨耗してきたらチップを交換すればいいという手軽さが特長。交換するのがチップだけのため長期的なランニングコストが抑えられるメリットがある。ただし、チップはねじ止めとなるため精度が出にくいほか、機械に剛性がないと芯がぶれてしまうことから、ボール盤等では利用できない。
- ヘッド交換式ドリルは、ドリルの先端がまるごと交換できる、交換式のドリル。チップ交換式よりも、加工精度が高いのが特長。マシニングセンタなどの量産ラインで広く採用されている。

(2) 構造

【フライス・エンドミル】

- フライス加工で使われるフライス工具には、エンドミル、正面フライス（フェイスミル）、平フライス、側フライス、メタルソー/スリワリフライス、溝フライス等がある。このうち、エンドミルは、工具の外周と底面に切れ刃をもった、代表的なフライス工具。形状はドリルと似ているが、外刃でも加工ができる点に特長がある。さまざまなフライス加工が1本でできるため、万能工具として使われている。
- 一方、正面フライス（フェイスミル）は、工具の円周上に複数の切れ刃をもったフライス工具。「フェイスミル」や「フェイスカッター」ともよばれ、加工ワークの平面を効率的に削ることができる。その他、工具の外周に切れ刃をもった、筒状のフライス工具（平フライス、プレーンカッターとも呼ばれる）や外周と側面に切れ刃をもった円盤状のフライス工具（側フライス、サイドカッターとも呼ばれる）等が代表的な工具となる。
- エンドミルは、エンドミルの切れ刃の構造によって3つに分けられる。
- スローアウェイエンドミルは使い捨てのチップ（切れ刃）をねじで固定した刃先交換式のエンドミル。マシニングセンタなどの量産ラインで使われる。チップには高速度工具鋼（ハイス）や超硬合金、ダイヤモンドなどが用いられている。
- ソリッドエンドミルは高速度工具鋼（ハイス）や超硬合金から削り出された、一体成型のエンドミル。摩耗したエンドミルはNC工具研削盤で再研磨する。
- ろう付けエンドミルは工具の本体に切れ刃をろう付けしたエンドミル。ソリッドタイプよりコストが低いため、直径の大きなエンドミルに使われる。
- エンドミルの刃数は1～8枚のものが一般的で、工具外径を測定・管理しやすい2枚刃・4枚刃などの偶数刃が多用される。また、刃先の形状によっても種類がある（フラットエンドミル、ラジアスエンドミル、ボールエンドミル、テーパエンドミル、ラフィングエンドミル）。

(2) 構造

【バイト】

- バイトは、棒状の金属の先に切れ刃をもった旋削加工用の工具。NC旋盤以外にも、「ターニングセンタ」や「削り盤」など、さまざまな工作機械で活用されている。
- 片刃バイト（外周加工、端面加工）、剣バイト（曲面削り、テーパ削り）、突切りバイト（溝入れ、突切り）、中ぐりバイト（中ぐり加工）、ねじ切りバイト（ねじ切り）等、加工方法に応じたバイトがある。
- バイトの構造は、「シャンク」とよばれる本体と「チップ・インサート」とよばれる切れ刃で構成されている。スローアウェイバイト（刃先交換式）が一般的であるが、ろう付けバイトやソリッドバイト（ムクバイトとも呼ばれる）もある。
- 旋削加工では、加工ワークの切粉がバイトに溶着し、刃先の一部になってしまう現象（構成刃先）が起こりやすい。構成刃物が発生すると、切粉で加工ワークの表面を引っかく状態になるため、加工面が粗くなってしまう。加工条件（切り込み量、切削速度、加工温度）の他、チップ形状や加工ワークとバイト材料の親和性も影響するため、加工ワークの材質に適した多種多様なチップ・インサートが製品化されている。

(3) 構成部材・材料構成

切削工具で使用される超硬合金は、P種（鋼用）、M種（汎用）、K種（鋳鉄用）に分けられる

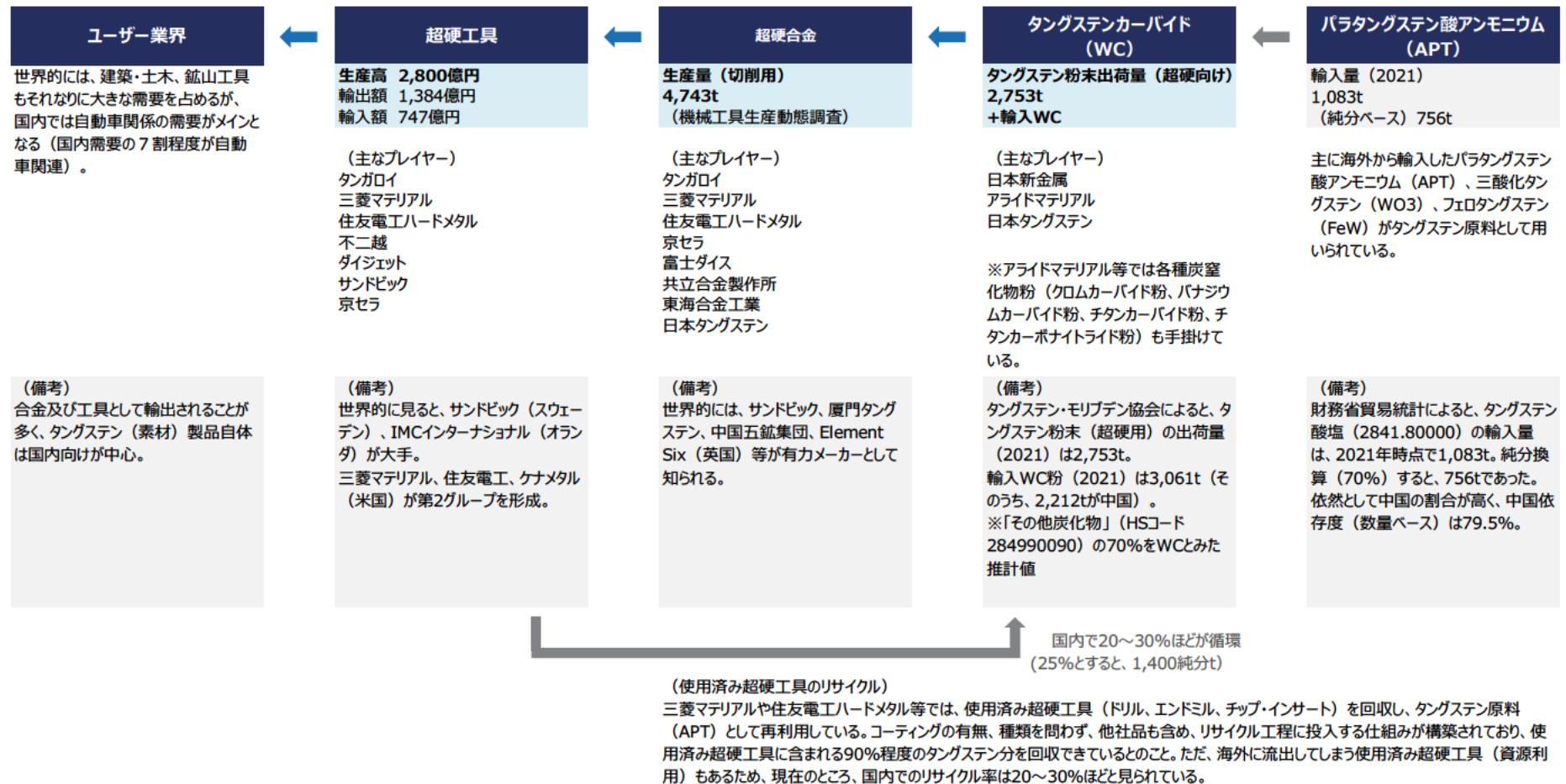
- P種に分類されるものは識別色が青に指定され、工具の一部が青に塗られている。タングステンとコバルトのほか、炭化チタンやタンタルカーバイトを加えた合金で、合成成分はWC-TiC-TaC-Coで表される。
 - 耐熱性や耐溶着性に優れ、熱的損傷にも強く作られている点がP種の特長。鋼や合金鋼、ステンレス鋼など、一般的な鋼材の切削に適している。
 - M種の識別色は黄で、合成成分はWC-TiC-TaC-Co。炭化チタンと炭化タンタルを適度に含ませ、熱的損傷と機械的損傷の両方に強い特性を持たせているのが特長で、P種とK種の間隔的な性能を持つ。主にステンレス鋼加工用に開発されているが、鋼や鋳鉄、ダクタイル鋳鉄、非鉄金属など幅広い材質の切削に適用できる。
 - K種の識別色は赤で、合成成分はWC-Co。靱性に優れ機械的損傷に強いのが特長で、鋳物やダクタイル鋳鉄、アルミニウム合金、銅合金などの加工に適している。
 - その他、非鉄金属やアルミニウム合金に適したN種、チタン合金、耐熱合金といった熱伝導率の低い被削材に適したS種、高硬度材料や焼き入れ鋼に使用されるH種がある。
-
- 超硬合金の分類には、切削工具用に「ISO使用分類」が用いられる。
 - 「ISO使用分類」はJISでも「JIS B 4053：2013 切削用超硬質工具材料の使用分類及び 呼び記号の付け方」に同一に規定されている。
 - なお、分類にはそれぞれのアルファベットの後ろに01～50までの表記（結合剤の含有量）があり、数字が小さいほど硬度（耐摩耗性）が高くなり、靱性が低下する。

(3) 構成部材・材料構成

超硬合金の成分は、概ねISO使用分類に準じるが、詳細はメーカーによってもまちまち

- 超硬合金の成分は、各社によっても微妙に異なる。配合に関しては微量添加するものもあり、ユーザーに対しても秘匿しているケースがある。
- 最近では耐摩耗性の向上が見込まれる超微粒タイプの超硬合金も製品化されている。
- なお、JISにおいても、異なる製造業者の製造する同じ使用分類に属する材料は、それらが使用分類及び性能レベルが同じであっても、材料としては異なることもあり得ると記載している。

(4) サプライチェーン



(備考)

超硬工具の資材消費実績から推計した超硬合金の消費量は6,686t (2021)。これには輸入の超硬合金、WC粉が含まれる。WCの輸入「その他炭化物」(HSコード284990090) の70%をWCとみた推計値3,061tを適用 (うち、中国が2,212t、他、オーストリア、カナダ、韓国、ドイツ、チェコ)。

出所：各種資料より矢野経済研究所作成

(5) 市場データ

- 2021年の超硬工具生産額は2,799億円。新型コロナウイルス感染症拡大による需要減から回復途上にある。
- 超硬工具の輸出額（財務省貿易統計）は1,384億円（前年比131.3%）。回復が鮮明となっており、コロナ禍前の2018年（約1,420億円）に近い水準まで戻ってきている。
- 生産額で見ると、超硬チップ、エンドミル、ドリルの主要3品が全体の8割弱を占める。

表 超硬工具生産額推移 機械統計（経済産業省）

（上段）生産額、百万円、（下段）構成比

超硬工具	2018	2019		2020		2021	
			前年比		前年比		前年比
ドリル	41,144	42,294	102.8%	31,448	74.4%	38,200	121.5%
	(13.2%)	(14.2%)		(13.8%)		(13.6%)	
エンドミル	57,895	54,586	94.3%	40,394	74.0%	50,965	126.2%
	(18.6%)	(18.4%)		(17.7%)		(18.2%)	
カッタ	9,852	9,625	97.7%	6,632	68.9%	7,966	120.1%
	(3.2%)	(3.2%)		(2.9%)		(2.8%)	
バイト	6,091	5,778	94.9%	4,284	74.1%	4,747	110.8%
	(2.0%)	(1.9%)		(1.9%)		(1.7%)	
その他超硬工具	39,500	38,440	97.3%	31,312	81.5%	33,757	107.8%
	(12.7%)	(12.9%)		(13.7%)		(12.1%)	
超硬チップ	142,201	133,159	93.6%	103,598	77.8%	128,578	124.1%
	(45.6%)	(44.8%)		(45.3%)		(45.9%)	
超硬サーメット	15,190	13,500	88.9%	10,889	80.7%	15,740	144.5%
	(4.9%)	(4.5%)		(4.8%)		(5.6%)	
計	311,873	297,382	95.4%	228,557	76.9%	279,953	122.5%

※超硬サーメット：サーメットのうち、タングステンカーバイドを主成分とするサーメット。
ここでは超硬サーメットを用いた工具を指す。

出所：経済産業省 機械統計

(5) 市場データ

表 超硬工具 生産推移 新会員統計（日本機械工具工業会）

機械工具生産動態調査 (新会員統計)	2018年	2019年		2020年		2021年	
			前年比		前年比		前年比
生産（千個）							
ドリル	168,240	147,785	87.8%	159,125	107.7%	167,010	105.0%
エンドミル	14,338	13,135	91.6%	10,380	79.0%	13,341	128.5%
カッタ	5,767	5,476	95.0%	3,998	73.0%	5,517	138.0%
ねじ加工工具	437	496	113.5%	268	54.0%	378	141.0%
バイト	2,567	2,328	90.7%	1,753	75.3%	2,002	114.2%
リーマ	2,059	1,855	90.1%	1,355	73.0%	1,498	110.6%
鋸刃カッタ	107	103	96.3%	87	84.5%	111	127.6%
インサート	642,166	573,201	89.3%	473,754	82.7%	643,482	135.8%
耐摩耗工具	11,734	10,105	86.1%	7,967	78.8%	8,845	111.0%
鉋山土木工具	101,400	112,818	111.3%	90,897	80.6%	99,778	109.8%
超硬工具	948,817	867,301	91.4%	749,585	86.4%	941,966	125.7%
（耐摩耗工具・鉋山土木工具除く）	835,681	744,379	89.1%	650,720	87.4%	833,339	128.1%
生産（百万円）							
ドリル	44,800	44,243	98.8%	33,575	75.9%	40,572	120.8%
エンドミル	48,768	45,762	93.8%	34,178	74.7%	43,200	126.4%
カッタ	7,624	6,949	91.1%	4,557	65.6%	5,957	130.7%
ねじ加工工具	4,014	4,877	121.5%	2,524	51.8%	3,594	142.4%
バイト	12,342	12,211	98.9%	8,375	68.6%	10,176	121.5%
リーマ	3,768	3,863	102.5%	2,684	69.5%	3,052	113.7%
鋸刃カッタ	695	745	107.2%	581	78.0%	773	133.0%
インサート	177,094	162,531	91.8%	126,342	77.7%	164,688	130.4%
耐摩耗工具	39,654	38,923	98.2%	31,695	81.4%	35,100	110.7%
鉋山土木工具	8,493	8,870	104.4%	7,804	88.0%	8,479	108.6%
超硬工具	349,255	328,967	94.2%	252,311	76.7%	315,591	125.1%
（耐摩耗工具・鉋山土木工具除く）	299,105	281,181	94.0%	212,816	75.7%	272,012	127.8%

出所：日本機械工具工業会

(5) 市場データ

表 超硬工具 輸出推移 新会員統計（日本機械工具工業会）

機械工具生産動態調査 (新会員統計)	2018年	2019年		2020年		2021年	
			前年比		前年比		前年比
輸出（千個）							
ドリル	1,961	1,800	91.8%	1,524	84.7%	2,001	131.3%
エンドミル	5,015	4,744	94.6%	4,104	86.5%	4,895	119.3%
カッタ	0	1	-	0	-	0	-
ねじ加工工具	235	248	105.5%	138	55.6%	200	144.9%
バイト	717	635	88.6%	509	80.2%	645	126.7%
リーマ	34	29	85.3%	25	86.2%	29	116.0%
鋸刃カッタ	14	13	92.9%	0	-	3	-
インサート	287,876	243,725	84.7%	214,236	87.9%	271,458	126.7%
耐摩耗工具	723	502	69.4%	731	145.6%	856	117.1%
鋇山土木工具	784	731	93.2%	681	93.2%	755	110.9%
超硬工具	297,361	252,429	84.9%	221,955	87.9%	280,852	126.5%
（耐摩耗工具・鋇山土木工具除く）	295,852	251,195	84.9%	220,536	87.8%	279,231	126.6%
輸出（百万円）							
ドリル	9,394	9,278	98.8%	6,941	74.8%	9,451	136.2%
エンドミル	15,713	14,704	93.6%	11,659	79.3%	14,352	123.1%
カッタ	68	78	114.7%	66	84.6%	71	107.6%
ねじ加工工具	1,393	1,649	118.4%	967	58.6%	1,488	153.9%
バイト	3,523	3,251	92.3%	2,493	76.7%	3,286	131.8%
リーマ	395	365	92.4%	252	69.0%	278	110.3%
鋸刃カッタ	40	34	85.0%	13	38.2%	19	146.2%
インサート	81,547	72,297	88.7%	60,070	83.1%	78,857	131.3%
耐摩耗工具	5,098	4,458	87.4%	4,096	91.9%	4,761	116.2%
鋇山土木工具	5,254	5,170	98.4%	4,443	85.9%	5,571	125.4%
超硬工具	122,364	111,281	90.9%	91,001	81.8%	118,138	129.8%
（耐摩耗工具・鋇山土木工具除く）	112,073	101,656	90.7%	82,461	81.1%	107,802	130.7%

出所：日本機械工具工業会

(5) 市場データ

表 超硬工具主要資材消費実績推移 新会員統計（日本機械工具工業会）

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	酸炭化チタン	炭化タンタル	複合炭化物
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%)	75,394	14,900	44,088
2021年	1,381,015 (125.4%)	4,612,814 (133.8%)	527,703 (136.1%)	163,991 (123.1%)	122,445 (162.4%)	19,574 (131.4%)	61,052 (138.5%)

出所：日本機械工具工業会

表 超硬合金 生産量推移 新会員統計（日本機械工具工業会）

機械工具生産動態調査 (新会員統計)	2018年	2019年		2020年		2021年	
			前年比		前年比		前年比
超硬合金生産量（重量t）							
（切削用）	5,568	4,712	84.6%	3,730	79.2%	4,743	127.2%
（耐摩耗・耐蝕用）	1,137	1,017	89.4%	835	82.1%	951	113.9%
（鉋山土木用）	186	209	112.4%	159	76.1%	177	111.3%
（その他）	11	13	118.2%	10	76.9%	13	130.0%
合計	6,902	5,955	86.3%	4,732	79.5%	5,879	124.2%

出所：日本機械工具工業会

(5) 市場データ

表 タングステン製品 需要別出荷推移 (タングステン・モリブデン工業会)

(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
2020年	2,084	397	2,481	60	88	114	262
2021年	2,753	495	3,248	72	90	152	313

出所：タングステン・モリブデン工業会