

## 2023年に注目すべき技術

### (2) アップサイクル技術—廃棄物に付加価値を付け循環型社会の実現を目指す—

三井物産戦略研究所 技術フォアサイトセンター 阿部 裕

#### アップサイクル技術とは

アップサイクル (Upcycle) 技術とは、廃棄物または未利用資源から付加価値の高い再生品・素材を作り出す技術である。従来、循環型社会を目指す取り組みとしては、①リサイクル (Recycle)、②リユース (Reuse)、③リデュース (Reduce) が行われてきた。①リサイクルは、廃棄物から使える部分を取り出して再利用すること、②リユースは、使用済みの製品をごみとして廃棄せずに繰り返し使うこと、③リデュースは、そもそも廃棄物を出さないようにすることである。これらは「3R」と呼ばれ、企業や地域社会などでさまざまな取り組みが展開されるとともに関連技術も開発され、現在に至っている。アップサイクルは、廃棄物を再利用対象物として捉え、新たに別の分野に取り込み、物質循環させることを目指す技術でもある。本稿では、複雑な再処理プロセスを必要としない、シンプルなアップサイクル技術を紹介する。

#### 有望な活用分野

##### (1) 魚の鱗 (コラーゲン) をナノ・カーボン・マテリアルにアップサイクル

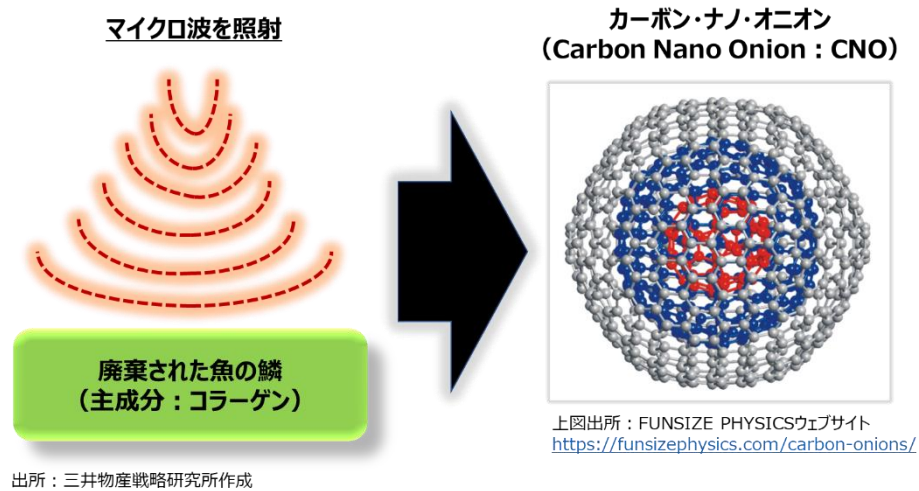
一つ目は、廃棄された魚の鱗から、カーボン・ナノ・マテリアル (Carbon Nano Material : CNM) の一つであるカーボン・ナノ・オニオン (Carbon Nano-Onion : CNO) にアップサイクルする事例である。CNMは、炭素原子により構成される極微細な素材である。鱗をCNOに転換するには、主成分であるコラーゲンにマイクロ波を照射することで生じる急激な温度上昇と熱分解反応 (マイクロ波熱分解) を利用する。現時点で詳しい原理は解明されていないものの、電子レンジでの調理と同じようにマイクロ波を照射するだけで転換することが可能だという<sup>1</sup> (図表1)。既存の製造方法では、高温・真空環境での長時間反応に加え、後処理には化学溶媒を用いることが必要となるなど、環境負荷が高い点が課題となっており、マイクロ波照射だけでCNOに転換できることで、今後、産業での利用促進が期待できる。

CNMは形状により4つに分類される。シート状のものはグラフェン、円筒形のものにはカーボン・ナノ・チューブ、球状のものはフラーレン、またフラーレンが複数の層に入れ子になっているものがCNOである (図表2)。CNOは、LEDの青色発光薄膜や次世代固体光源<sup>2</sup>として、またその形状特性から潤滑剤 (エンジンオイル、機械加工油など)、グリースや樹脂材料への添加剤としての利用が期待できる。

<sup>1</sup> 名古屋工業大学のカーボン・ナノ・オニオンの合成および生成メカニズムの解明に関する研究論文 <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/gc/d1gc04785j>は、英国王立化学会 Green Chemistry誌 (Impact Factor: 10.182) の Back Coverおよび Cover Profileに選ばれている。

<sup>2</sup> 発光材料の評価で重要とされる絶対PL量子収率 (吸収した (光) エネルギーをどの程度の効率で発光させられるかを表す指標) は40%と、従来の製造法によるCNOの10倍という世界最高性能の数値が得られている。

図表1 魚の鱗をナノ・カーボン・マテリアルにアップサイクル



図表2 カーボン・ナノ・マテリアルの種類

種類	特徴
グラフェン (Graphene)	六角形の炭素原子がシート状に結合された形状
カーボン・ナノ・チューブ (Carbon Nanotube)	円筒形状。円筒は単層、もしくは複数構造になっている
フラーレン (Fullerene)	六角形の炭素原子が球形 (サッカーボール状) に合わさっている
カーボン・ナノ・オニオン (Carbon Nano-Onion)	フラーレンが複数の層の入れ子状になっている

出所：各種情報から三井物産戦略研究所作成

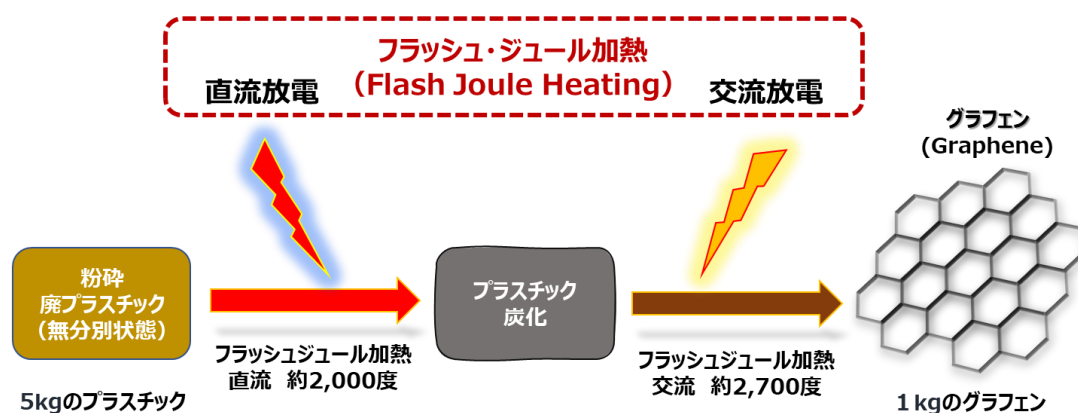
## (2) 廃棄プラスチックをグラフェンにアップサイクル

二つ目は、廃棄プラスチックを直接放電によりグラフェンにアップサイクルする事例である<sup>3</sup>。廃棄プラスチックをグラフェンに転換するには、フラッシュ・ジュール加熱 (Flash Joule Heating : FJH) と呼ばれる方法を利用する。図表3の通り、廃棄プラスチックの塊を放電 (直流放電と交流放電) により加熱、炭化させることで、純度の高いグラフェンに転換することが可能となる。実際にピックアップトラックのバンパー、カーペット、マットなどのプラスチック材 (塩化ビニル、ポリウレタンなど) を、特に分別することなく混合状態で洗浄・粉碎し、そのままFJHでグラフェンに転換する実験を行い、良好な結果を得ている。

FJHにより生成されたグラフェンは純度が高く、この方法では環境負荷の高い精製プロセスが不要なため (必要なプロセスはFJHによる放電工程のみ)、ライフサイクルコストは既存の生成方法と比較して約10分の1程度に抑えられる。5kgの廃棄プラスチックから1kgのグラフェンが得られ、用途としては、電池材料、抗菌材料、ろ過材などがある。

<sup>3</sup> Kevin M. Wyss et al., “Upcycling end-of-life vehicle waste plastic into flash graphene”, communications engineering, Nature, May 26, 2022 <https://www.nature.com/articles/s44172-022-00006-7>

図表3 廃棄プラスチックをグラフェンにアップサイクル



出所：各種資料を基に三井物産戦略研究所作成

### (3) 廃棄メタンをタンパク質に転換

三つ目は、廃水処理施設やゴミ埋立地、石油ガス施設などから発生する廃棄メタンを、微生物の力を借りてタンパク質にアップサイクルする事例である。既に米Calysta社、印String Bio社、日揮が事業化に向けて取り組んでいる。この廃棄メタンからタンパク質を作り出す際の微生物には「メタン資化菌」が利用される。メタン資化菌により生成されたタンパク質には、解毒作用や抗腫瘍作用があるメチオニンなどの必須アミノ酸が含まれるため、畜産飼料、特に飼料用魚粉の確保に課題を抱える水産養殖用の飼料<sup>4</sup>への利用が期待されている。

科学ジャーナルNature Sustainabilityによれば、米国内には産業起源のメタン排出源（電力プラント、廃水処理プラント、埋立地、石油・ガス施設など）が約9,700カ所あり、1日の廃棄メタン量は約67,400トンだという<sup>5</sup>。この廃棄メタンから排出源毎にタンパク質生産コストを試算しており、①電力プラント：1,783ドル/トン、②廃水処理プラント：1,645ドル/トン、③埋立地：1,546ドル/トン、④石油・ガス施設：1,531ドル/トンとなっている。石油・ガス施設起源の廃棄メタンで生成されたタンパク質は魚粉の価格より安いとの分析結果を得ており、養殖飼料原料の大部分を占める魚粉などの動物性タンパク質の代替品となる可能性がある。

日本は、水溶性のメタンを産出する南関東ガス田<sup>6</sup>を有しているため（図表4）、国内資源の活用を視野に入れた取り組みにも期待したい。

<sup>4</sup> 水産資源の減少などにより、養殖用飼料への魚粉の配合率は過去20年間で低下している。飼料に含まれる魚粉の平均的な割合は、1995年で、鯉10%、鮭45%、海産魚50%。2017年には、鯉1%、鮭12%、海産魚14%にまで減少。そのため、魚粉に替わる養殖飼料が必要。<https://www.nature.com/articles/s41893-021-00796-2>

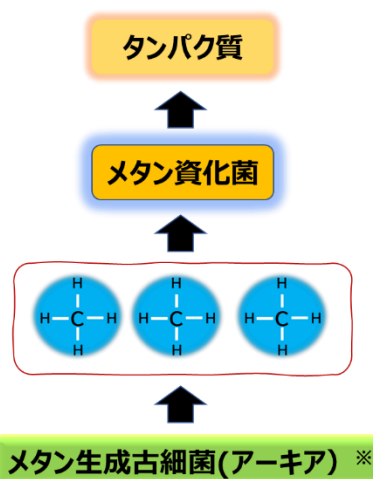
<sup>5</sup> 二酸化炭素の25倍超の温室効果を持つメタンガスの削減を目指す国際枠組み「グローバル・メタン・プレッジ (Global Methane Pledge)」がCOP26で発足、2030年の世界のメタン排出量を2020年比で30%削減することを目標としている。

<sup>6</sup> 南関東ガス田は可採埋蔵量が3,685億<sup>m</sup>3のわが国最大の水溶性天然ガス田で、世界有数のヨード鉱床でもある。産出される天然ガスは99%以上がメタンであるというメタン濃度の高さも特徴。このガス田を開発している関東天然瓦斯開発社の鉱区における天然ガス可採埋蔵量は約1,000億<sup>m</sup>3。これは、現在の年間生産量で計算すると約600年分に相当する。

図表4 南関東ガス田のメタン資源



地図出所：合同資源  
<https://www.godoshigen.co.jp/learn/gas/kanto/>



※新種細菌*Atribacter laminatus* RT761株  
 (DNA細胞内膜がある原核細菌)

出所：合同資源、産業技術総合研究所資料に基づき  
 三井物産戦略研究所作成

#### (4) アップサイクル・リサイクルへの挑戦

アップサイクル・リサイクルとは、アップサイクルする際の処理過程で排出される残渣などの廃棄物を再度利用し、可能な限り循環させる取り組みである。この節では、アップサイクル・リサイクルの可能性を示す事例として、①廃棄木材に含まれるリグニンを、触媒（炭化モリブデン触媒）反応を利用して航空燃料の原料に転換する、②廃棄木材に化学溶液処理と圧縮処理を施すことで超硬木材を作製する<sup>7</sup>2つの取り組みを紹介する。

木材は、主にセルロース、ヘミセルロース、リグニンの3要素からなる。世界では毎年、莫大な量の廃棄木材が発生しており、これを有効活用することが循環社会を目指す上で必要となる。

① リグニンは、植物の構造体を支える鉄筋としての役割を果たしており、生体物質としては極めて硬く、化学反応で分解させることが最も難しい物質である。しかし、米国立再生可能エネルギー研究所によれば、リグニンを高価な触媒を使用せずに航空燃料の原料に転換することが可能だという<sup>8</sup>。航空機業界は、ジェット燃料を年間1,060億ガロン（2019年）消費していることから、環境に配慮したSAF（Sustainable Aviation Fuel：持続可能な航空燃料）に注目している。また日本の航空会社は、2030年までに既存の航空燃料のうち10%をSAFに切り替える目標を掲げている。国内の間伐材などの活用にも新たな道が拓かれる可能性があり、このアップサイク

<sup>7</sup> Jianwei Song et al. “Processing bulk natural wood into a high-performance structural material”, Nature, volume 554, pp.224-228, February 8, 2018 <https://www.nature.com/articles/nature25476>

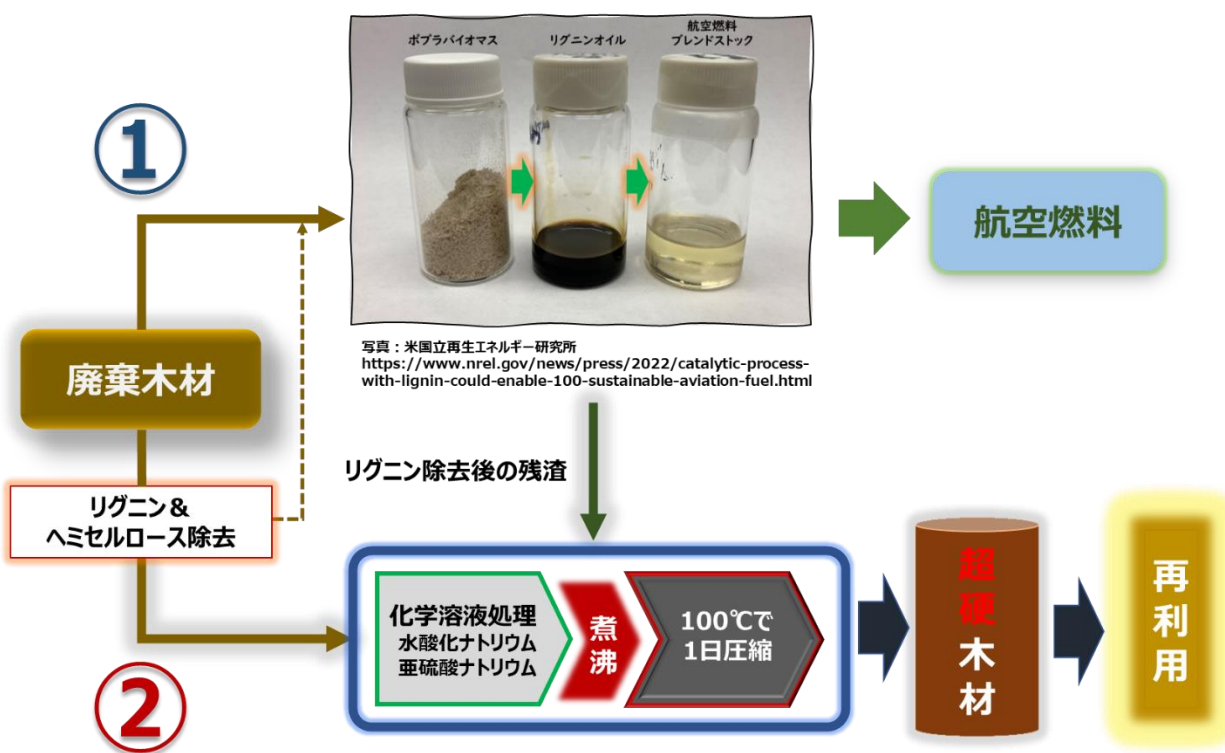
<sup>8</sup> NREL, “Catalytic Process with Lignin Could Enable 100% Sustainable Aviation Fuel” Sept. 22, 2022 <https://www.nrel.gov/news/press/2022/catalytic-process-with-lignin-could-enable-100-sustainable-aviation-fuel.html>

ル・リサイクルの社会的意義は大きいと考えられる<sup>9</sup>。

② リグニンとヘミセルロースを除去した木材を化学溶液（水酸化ナトリウム（NaOH）と亜硫酸ナトリウム（Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>））に浸した後に7時間煮沸し、さらに24時間加熱（100℃）圧縮すると元の大きさの5分の1になり、強度が11.5倍に向上する。また木材を煮沸後、単純にプレス圧縮するだけでも強度は3倍になることが確認されている。このように廃棄木材を超硬木材にアップサイクル・リサイクルすれば、木造建築物の高層化や戸建て住宅の耐震性向上が可能となり、建築分野での活用が期待できる。

図表5に示すように、リグニンの航空燃料へのアップサイクル過程で出る残渣を超硬木材へのアップサイクルの補助材料として再利用出来れば、廃棄物の排出を最小限に抑えることができる。また超硬木材に関しては、建築資材として利用された後は、地球環境に悪影響を与えない形で自然に還元される。今後はさまざまな産業分野で、3R活動とともにアップサイクル・リサイクルに挑戦し、経済活動と地球環境保全の両立を目指すようになるのではないだろうか。

図表5 廃棄木材のアップサイクル・リサイクル例



出所：各種資料を基に三井物産戦略研究所作成

<sup>9</sup> リグニンに関しては、酵素変換によりフェニルプロパノン化合物を基点とするバイオプラスチックへの転換を可能とする研究<sup>\*1</sup>があり、また、リグニンとグリオキシル酸を反応させてジエステルプラスチックの前駆体に直接変換する<sup>\*2</sup>など、アップサイクル研究が進行している。

\*1 : <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20161220-2/index.html>

\*2 : <https://actu.epfl.ch/news/new-pet-like-plastic-made-directly-from-waste-biom/>

## 今後の展望

本稿では、注目すべき技術として、主にシンプルな方法で廃棄物をアップサイクルする技術を紹介した。今後も、大量の廃棄物が生じる国際商品（廃棄タイヤ、コーヒー、パーム油脂、電池、太陽光パネルなど）を中心としたアップサイクル技術が開発され、有効性と経済性を検証する社会実験が行われるだろう。日本においては、大量生産・大量消費・大量廃棄型の線形経済から循環経済への移行を打ち出した「循環経済ビジョン2020」<sup>10</sup>が公表され、循環型社会への取り組みが本格化しつつある。しかし現状では、有価性の高い金属類を除き、リサイクル品の収益確保が難しい事業環境となっているため、廃棄物に付加価値を付与するアップサイクル技術の研究開発と、迅速な社会実装が今後の課題となる。

この他、特記すべきポイントとしては、都市廃棄物（自治体が回収する家庭ゴミ、食品廃棄物、段ボール、粗大ゴミなど）問題がある。OECDによると、日本では一般廃棄物の国民1人当たりの年間排出量が336kg（2019年）<sup>11</sup>で、これはほとんどリサイクルされることなく、回収後、直ちに焼却処理されている。この都市廃棄物問題は世界共通であり、米国ではゴミ分別を各家庭に要求せずに、回収した混合プラスチックをダイレクトにアップサイクルするBOTTLEプロジェクト<sup>12</sup>など、解決に向けた取り組みを始動している。また、前述のSAF製造に関しても、都市廃棄物などを原料にする取り組みが行われている（図表6）。

今後、ESGの観点から、産業廃棄物のみならず都市廃棄物も含めたアップサイクルが重要であるという認識が広がれば、同技術の研究開発に対する投資が積極的に行われ、循環型社会の実現に向けた一歩を踏み出すことになるだろう。

図表6 米国における廃棄物原料による持続可能な航空燃料（SAF）製造の取り組みおよび調査事例

区分	利用廃棄物	概要
原料調達 (調査)	森林残渣、藻類利用	サウスカロライナ州が、木質バイオマスベース、および藻類からのバイオエネルギー製造に関する調査を米国農務省からの資金提供（Rural Business Enterprise Grant）を受け実施
原料調達 (民間移行調査)	都市廃棄物、農業廃棄物	ハワイ州が、食物残渣などセルロース系の都市廃棄物、農業残渣、木質系廃棄物などを利用した燃料原料調達、燃料生産の評価を実施。軍主導から民間移行の可否調査を実施
原料調達 (モデル構築)	国産廃食用油	日揮、レボインターナショナル、コスモ石油が、廃食用油を原料とするバイオジェット燃料製造サプライチェーンモデルを構築
SAF製造	廃棄デンプン	Archer Daniels Midland社が、豆類の廃棄デンプンからイソブタノールを生成しバイオジェット燃料へ転換
SAF製造	建設廃棄物、森林草木類	AVAPOCOが、建設廃棄物、森林残渣などからバイオジェット燃料を製造
SAF製造	食物廃棄物	米国立再生可能エネルギー研究所およびquasar energy groupが、食物廃棄物から揮発性油脂を抽出し、バイオジェット燃料を製造

出所：各種資料を基に三井物産戦略研究所作成

<sup>10</sup> 経済産業省「循環経済ビジョン2020」 <https://www.meti.go.jp/press/2020/05/20200522004/20200522004-2.pdf>

<sup>11</sup> OECD, Municipal waste <https://data.oecd.org/chart/6b1W>

<sup>12</sup> 米国立再生可能エネルギー研究所（NREL）” BOTTLE Project Outlines New Strategy for Valorization of Mixed Plastic Waste” Oct 13, 2022 <https://www.nrel.gov/news/press/2022/bottle-project-outlines-new-strategy-for-valorization-of-mixed-plastic-waste.html>

# 「アップサイクル技術」に関する知財レポート

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部 知的財産室 松浦 由依

本稿では、「2023年に注目すべき技術」で取り上げた「アップサイクル技術」について知財の国際動向を調査・分析しレポートする。すべての調査・分析はPatSnap社が提供するグローバル特許検索・分析ツールであるPatSnap Analyticsおよび各種技術情報検索ツールであるPatSnap Discoveryを利用して実施した。各種データの取得日は2022年12月5日である。

## 各図表の見方

### 【図表1】 関連特許の出願動向

縦軸は特許ファミリー件数、横軸は出願年であり、2006年から2022年の年ごとの出願件数推移を示している。特許ファミリーとは、同一の特許出願に由来して各国へ出願された一群の出願グループを指す。たとえば、米国にした特許出願を中国にも出願した場合、これらは2件の特許出願としてカウントせず、1件の特許ファミリーとしてカウントしている。

特許出願は、原則として出願日から1年6月経過後に公開される。そのため2023年1月現在、2021年以降の特許出願の一部は公開されていない。しかし、本レポートの性質上、最新の特許出願状況を参照することが好ましいと考え、2021年以降の特許出願件数については予測値として掲載している。

### 【図表2】 出願人の国 上位ランキング

2003年から2022年までの特許出願につき、どの国の出願人が何件出願しているか、すなわち発明の出所（国）のランキングを示している。バブルの大きさは出願件数に比例する。

### 【図表3】 特許権者 上位ランキング

2003年から2022年までの特許出願につき、現在有効な特許を所有する上位特許権者のランキングを示している。

# アップサイクル技術

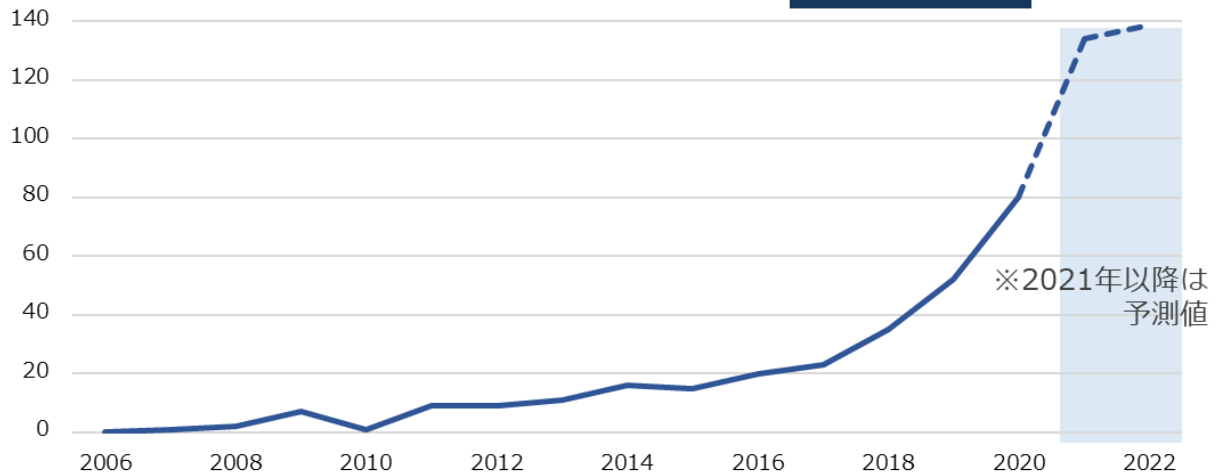
2023/01

【図表1】 アップサイクル技術関連特許の出願動向

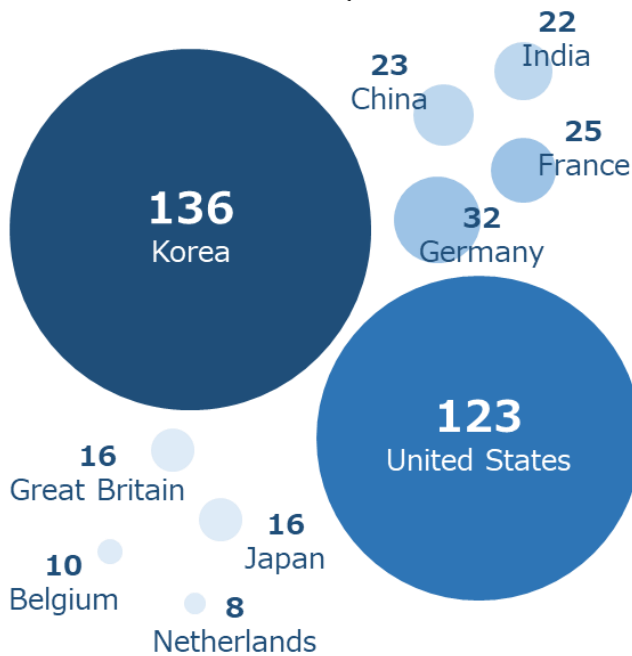
全出願件数 (2003-2022)

**485**

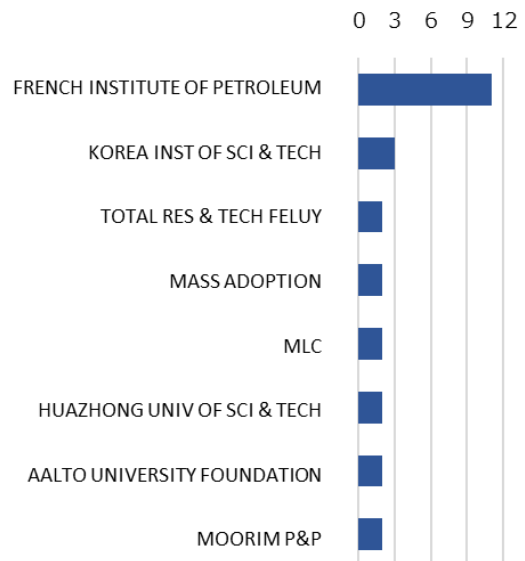
特許ファミリー



【図表2】 出願人の国 Top 10



【図表3】 特許権者 Top 8



学術論文件数  
(2017-2022)

**1,369**

資金調達額  
(2017-2022)

**634M (USD)**





「2023年に注目すべき技術」（フルレポート）はこちら

-----  
当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できると思われる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社及び三井物産グループの統一的な見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社及び三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。

