

# Biz Tech フォーカス 2025

三井物産戦略研究所  
技術・イノベーション情報部

## はじめに

新しい技術が研究開発される背景には、経済的価値の創造、市場ニーズへの対応、社会課題の解決、政策・規制への対応、保有資源の活用などの多様な理由があります。新しい技術の社会実装までの道のりもさまざまであり、異なるペースで開発は進展していきますので、わたくしどもが注目している技術分野に重要な変化の兆しがないかモニタリングしています。

そのような技術の中から、概ね2年以内にマイルストーンとなる進展（社会実装・商業規模開発への移行・大型の資金調達・関連政策の整備など）が予想される9つの技術を取り上げ、概要をまとめました。

「近い未来にフォーカスし、早く読める技術レポート」をコンセプトにしています。

Biz Tech フォーカス 2025が、皆様のご考察の一助となれば幸いです。

技術・イノベーション情報部 小川徹郎

## CONTENTS

- (1) 長時間エネルギー貯蔵技術 / 稲田 雄二、知財分析 / 石黒 隆介 ..... 2
- (2) 小型モジュール炉 / 浅田 隆利、知財分析 / 松浦 由依 ..... 9
- (3) 連続発酵技術 / 澤野 健史、知財分析 / 石黒 隆介 ..... 15
- (4) スマートホスピタル / 加藤 貴子、知財分析 / 松浦 由依 ..... 21
- (5) 標的タンパク質分解誘導 (TPD) 技術 / 戸口 侑、知財分析 / 松浦 由依 ..... 29
- (6) 半固体電池技術 / 趙 健、知財分析 / 石黒 隆介 ..... 35
- (7) チップレット / 小川 玲奈、知財分析 / 石黒 隆介 ..... 41
- (8) バイオものづくりを基盤としたリサイクル技術 / 佐藤 佳寿子、知財分析 / 松浦 由依 ..... 49
- (9) ヒューマノイドロボット / 辻 理絵子、知財分析 / 松浦 由依 ..... 54

# 長時間エネルギー貯蔵技術

## ー 圧縮空気貯蔵、蓄熱発電に普及の可能性ー

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部

執筆：インダストリーイノベーション室 稲田 雄二

知財分析：知的財産室 石黒 隆介

Biz Tech フォーカス 2025

### なぜこの技術を取り上げるのか

ネットゼロ達成に向けて再エネはますます導入拡大されるが、変動が大きいため主力電源になるためには需要に合わせた貯蔵能力が必須となる。長時間エネルギー貯蔵（LDES：Long Duration Energy Storage）は、長時間にわたる電力貯蔵を可能にする技術であり、再エネと組み合わせることで、不安定な電力供給を平準化する。低コストかつ十分な蓄電容量をもつ圧縮空気貯蔵や蓄熱発電といったLDES技術が開発されている。

### Summary

- 再エネの主力電源化のためには、LDES技術が不可欠とされる。従来の蓄電技術であるバッテリーや揚水発電に加え、圧縮空気貯蔵、蓄熱発電、フローバッテリー、重力貯蔵などの開発が進んでいる。
- 圧縮空気貯蔵や蓄熱発電は、LDESの中でも低コストかつ安全性の高い点で注目されている。これらの技術開発は実証段階から商用段階へと移行しつつあり、今後2～3年で普及が期待される。

## 1. 長時間エネルギー貯蔵（LDES）とは

再エネは、太陽光や風力が利用可能なときにしか発電できず、火力発電のように電力需要に応じた柔軟な調整が難しい。CO<sub>2</sub>削減の切り札である一方、調整が効かないことが弱点として挙げられる。今後も増加する再エネにより、電力需要を上回る余剰電力が大量に発生することが予想される。このため、余剰電力を一時的に蓄え、必要なときに必要な量を供給するための蓄電設備の整備が喫緊の課題となっている。

### 1-1. LDESの技術概要

LDESの技術概要および技術的課題を図表1に示す。LDESは、6時間以上の電力貯蔵を可能とする技術と定義される。この技術は、送電網を介して電力を一定時間貯蔵し、需要に応じて適切な量を送電し、需給バランスの調整を図るものである。現在、最も使用されているのが①バッテリーであり、これはLDESの中では電力をそのまま貯蔵する技術である。一方、電力を他のエネルギーに変換して蓄える方式も存在する。LDESにはさまざまな方式があり代表的な例として、②蓄熱発電：電気を熱に変換して貯蔵し、必要な際に再び電力に変換する方式、③圧縮空気貯蔵：電力で空気を圧縮し圧縮空気としてエネルギーを貯蔵する方式、④フローバッテリー：化学反応を利用して電力を蓄え放電する方式、⑤重力貯蔵：重量物を高所に持ち上げ、位置エネルギーとして貯蔵する方式などが挙げられる<sup>1</sup>。

<sup>1</sup> 揚水発電や電力を水素に変換して貯蔵する方式（水素変換）もLDESだが、揚水発電は既存技術であること、水素変換は3～5年程度で社会実装されると予想しづらいことから、本稿では対象外の技術としている。

バッテリーは、電力を直接貯蔵するため、エネルギー効率が90%以上と非常に高い。一方、蓄熱や圧縮空気などのLDESは、電力を熱や圧縮空気に変換し、再び電力に戻す過程を経るため、エネルギー効率が50~70%とバッテリーに比べて低い。しかし、大規模な電力貯蔵が必要となる場合は、低コストな長時間貯蔵を実現する可能性があり、社会実装に向けた開発が進められている。また、LDESのここ10年間の特許出願は着実な増加傾向にあり、特に空気と熱を蓄エネ媒体とする技術の進展が注目される。

図表 1 : 長時間エネルギー貯蔵技術の概要



蓄エネ技術	技術の概要	技術的課題など
バッテリー Batteries	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 化学エネルギーで貯蔵</li> <li>■ リチウムイオン、フローなど多種</li> <li>■ 比較的短時間変動に有効</li> <li>■ 蓄電時間の目安：数分から数時間</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 低コスト化と長寿命化</li> <li>□ 長時間・大容量でのスケールメリットが効きにくい</li> </ul>
蓄熱発電 Thermal Energy Storage (TES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 物質の蓄熱。顕熱、潜熱、化学蓄熱がある</li> <li>■ 蓄熱部は15\$/kWhという低コスト</li> <li>■ 電熱変換、蓄熱、熱電変換が独立して設計可能</li> <li>■ 蓄電時間の目安：数時間から数日</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 出力可変速度が遅い</li> <li>□ 発電時の熱損失が大きい</li> </ul>
圧縮空気貯蔵 Compressed Air Energy Storage (CAES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 地下空間やタンクに圧縮空気貯蔵</li> <li>■ 空気の圧縮膨張で発電する方式や圧縮膨張の際に蓄熱を使うタイプもある</li> <li>■ 蓄電時間の目安：数時間から数日</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 商用化したプラントは地下空洞を利用</li> <li>□ 好適な場所が限定される</li> </ul>
フローバッテリー Flow Battery	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 液体電解質を用いて電力を蓄えるシステム</li> <li>■ 2種類の化学物質を溶解させた液体をタンクに蓄え、ポンプで循環させることで充放電する</li> <li>■ 蓄電時間の目安：数時間から数日</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 初期コストが高い</li> <li>□ バナジウムを使用する場合は供給リスクの懸念</li> <li>□ 電解液が液体であるため、液漏れ対策が必要</li> </ul>
重力貯蔵 Gravity Energy Storage	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 物体を高い位置に持ち上げ、その位置エネルギーを利用して電力を蓄える</li> <li>■ コンクリートブロックなどの重い物体をクレーンなどで高い位置に持ち上げ、落下する際に発生する運動エネルギーを電力に変換</li> <li>■ 蓄電時間の目安：数時間から数日</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 高い位置に重量物を持ち上げる必要があるため、一定の広さの土地で安定した地盤が必要</li> <li>□ 地形が複雑な場所では設置が難しいこともある</li> </ul>

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

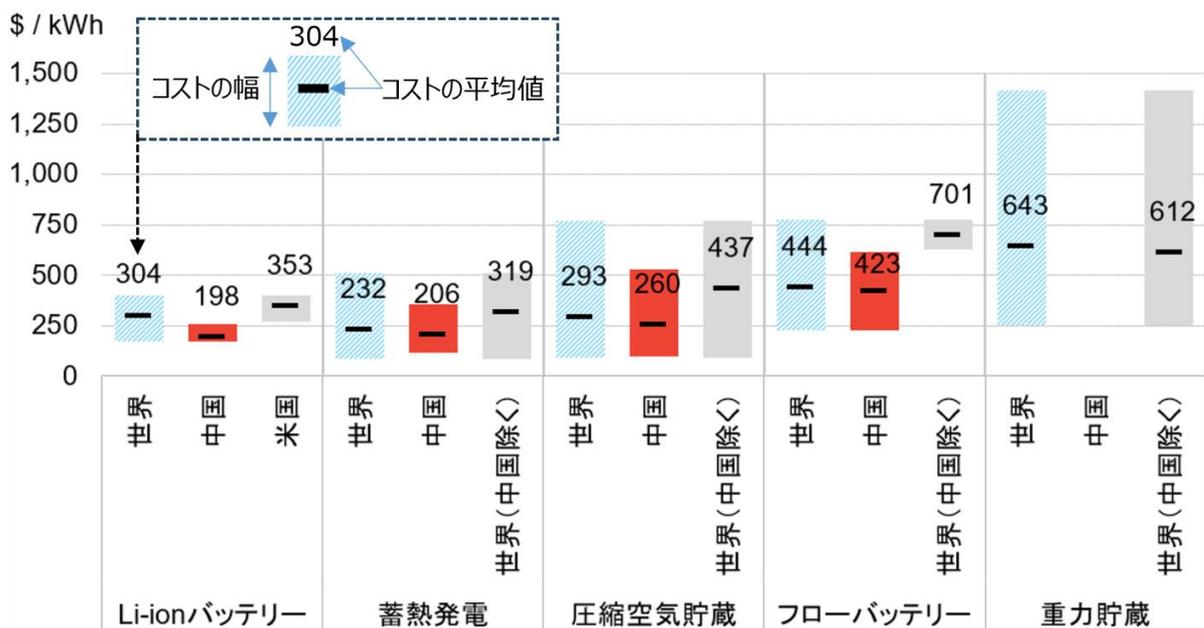
1-2. LDESのコスト

図表2に2023年時点における各LDES技術のコストを示す。重力貯蔵の世界平均コストは最も高く、電力貯蔵1kWh当たり643ドルである<sup>2</sup>。

次にフローバッテリーの444ドル/kWh、リチウムイオンバッテリー（Li-ion）の304ドル/kWh、圧縮空気貯蔵の293ドル/kWhと続き、最もコストが低いのは蓄熱発電で232ドル/kWhとなっている。

中国製のコストは世界の平均値を下回っており、特にリチウムイオンバッテリーは、世界で最も低コストである。そのため、中国では、蓄熱発電や圧縮空気貯蔵といった低コストのLDES技術であっても、リチウムイオンバッテリーに取って代わることは難しいと考えられる。

図表 2 : LDESのコスト



出所：BloombergNEFから三井物産戦略研究所作成

2. 注目すべき動向

現在、世界平均コストの比較で、Li-ionバッテリーと比較して安い、もしくは同レベル技術は蓄熱発電と圧縮空気貯蔵となっている。蓄熱発電は、電気を熱に変換し、岩石や熔融塩に熱を貯蔵、電力が必要なときに熱から蒸気をつくりタービンで発電する技術である<sup>3</sup>。ここでは、注目すべき動向として、圧縮空気貯蔵を取り上げる。この方式では、電力を用いて圧縮機を稼働させ、空気やCO<sub>2</sub>などを圧縮し、気体あるいは液体として地下空間やタンクに貯蔵する。蓄えた圧縮エネルギーは、電力需要に応じて解放され、空気タービンなどの発電機で電力に変換される（図表3[a]）。空気やCO<sub>2</sub>といった気体を作動流体に使うため、

<sup>2</sup> 重力貯蔵にダム式、揚水発電は含まれない。

<sup>3</sup> 蓄熱発電については、「脱炭素社会に向けて開発進む蓄熱発電」（三井物産戦略研究所、2021年2月）参照。

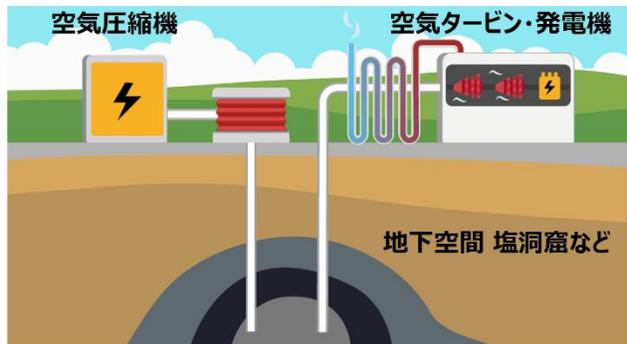
安全性が高い。また、気体を圧縮して発電する技術はすでに確立されたシンプルなものであり、適した地下空間を確保できるなど、低コストを実現する条件がそろえば今後普及が見込まれる。

中国国家エネルギー貯蔵会社は、300MW級の圧縮空気エネルギー貯蔵施設を2024年4月に稼働させている（図表3[b]）。この施設では、圧縮空気を地下約1000mに広がる塩洞窟に貯蔵する。塩洞窟は、岩塩の採掘後に形成される洞窟であり、密閉性と安定性に優れているため、高圧空気の貯蔵に適している。このような自然環境を利用することで、地上にタンクを設置する場合と比較してコストを削減できる。

（伊）Energy Domeは、2022年から2.5MW級の液化CO<sub>2</sub>エネルギー貯蔵設備を運用している（図表3[c]）。この技術では、気体のCO<sub>2</sub>を貯蔵タンク（ドーム）に入れ、電力を用いて圧力をかけ、冷却することで液体化し貯蔵する。電力が必要な際には、液体化したCO<sub>2</sub>を沸騰させて気体に戻し、タービンを駆動させて発電する仕組みである。液化することで、気体よりも高密度のエネルギーを貯蔵でき、貯蔵タンクの体積を削減できる利点がある。同社は米ウィスコンシン州で20MWの液化CO<sub>2</sub>エネルギー貯蔵設備の建設を発表しており、これが実現すれば約18,000世帯に10時間分の電力を供給できるとしている。上記2社に加え、（蘭）Corre Energy、（英）Highview Power、（加）Hydrostorなど、多くのスタートアップが、空気や水といった気体や液体を蓄エネ媒体とするエネルギー貯蔵技術の開発を進めている（図表3[d]）。

図表3：圧縮空気貯蔵の仕組みと事例

[a] 地下空間を利用した圧縮空気貯蔵



[b] 中国国家エネルギー貯蔵会社の300MW級圧縮空気エネルギー貯蔵施設

[c] Energy Domeの液化CO<sub>2</sub>エネルギー貯蔵設備

[d] 圧縮空気貯蔵のスタートアップ例



出所：

(a) 三井物産戦略研究所

(b) 新華社 <https://jp.news.cn/20240413/87aef01fd9374488855ed9fe2e786b6d/c.html> (2024年12月4日参照)

(c) Energy Dome

<https://energydome.com/energy-dome-signs-first-u-s-contract-with-alliant-energy-for-commercial-scale-deployment-of-its-co2-battery/> (2024年12月4日参照)

### 3. 今後の展望

LDES技術は、初期開発段階から実証段階、さらには商用規模へ移行しつつある。本稿では、特に圧縮空気貯蔵が技術的およびコスト面で優位性を示し、実用段階に入りつつあることを示した。

米国エネルギー省はLDESの重要性を認識し、2023年に最大2億8,600万ドルの資金をLDES技術の開発に提供すると発表した<sup>4</sup>。このうちEnergy Dome (Columbia Energy Storage Project) など6社が3,900万ドルを受け取り、実証規模の技術開発を進めている。政府の資金援助や投資家からの出資が活発化する中、LDES開発は加速しており、2～3年以内には社会実装が本格化すると考えられる。

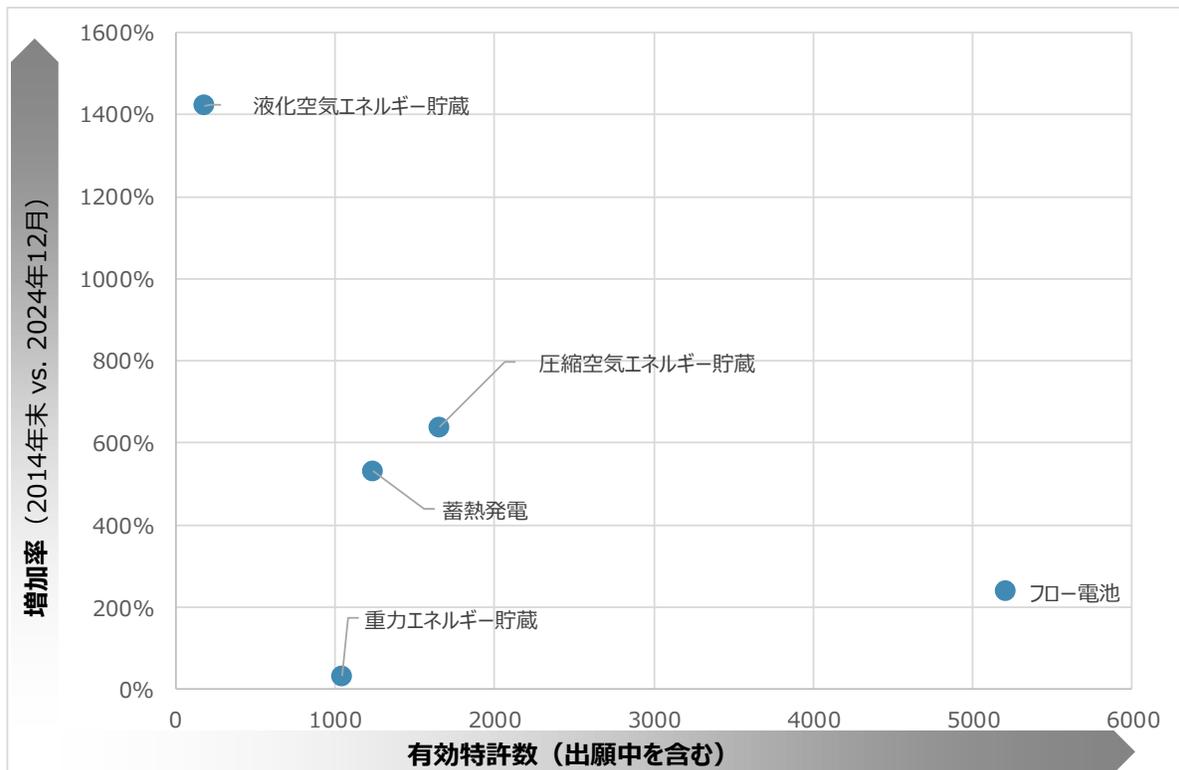
<sup>4</sup> US Department of Energy “Long-Duration Energy Storage Demonstrations Projects Selected and Awarded Projects”

## 長時間エネルギー貯蔵技術（LDES）に関する知財分析

長時間エネルギー貯蔵（LDES）を、フロー電池、圧縮空気エネルギー貯蔵、液化空気エネルギー貯蔵、蓄熱発電、重力エネルギー貯蔵の5つの技術別に分類した。それぞれと関連性の高い特許を特定（2024年12月時点で出願中を含む有効特許数<sup>5</sup>は9,142件）して、技術別、上位プレーヤー別の分析を行った。

図表4は、LDESの各技術の有効特許数とその増加率を比較した結果で、横軸が有効特許数、縦軸が2024年12月時点と2014年末時点での有効特許数を比較した増加率を表している。長時間エネルギー貯蔵技術のなかでも、フロー電池の特許数が特に多く、それと比較して少ないものの液化空気エネルギー貯蔵、圧縮空気エネルギー貯蔵、蓄熱発電は近年大きく特許数を伸ばしている。

図表4：有効特許数、増加率（技術分類別）



出所：LexisNexis PatentSightのデータから三井物産戦略研究所作成

図表5では、LDES関連の各技術の特許数における上位プレーヤーを比較した結果、いずれの分野でも中国の研究機関の存在感が大きいことが明らかとなった。フロー電池において、特許数でトップの（中）Chinese Academy of Sciences（CAS）の傘下で2位の（中）Dalian Institute of Chemical Physics（DICP）は、従来の2倍以上の出力密度を持つバナジウムフロー電池スタックを開発したことを2024年1月に発表している。

<sup>5</sup> 出願された特許、および審査を経て特許権としての権利行使が可能な状態にある特許の総数。

図表5：有効特許数（技術別上位プレイヤー）

フロ-電池			圧縮空気エネルギー貯蔵			液化空気エネルギー貯蔵		
#	企業・研究機関	特許数	#	企業・研究機関	特許数	#	企業・研究機関	特許数
1	(中) Chinese Academy of Sciences	432	1	(中) Chinese Academy of Sciences	155	1	(中) Chinese Academy of Sciences	33
2	(中) Dalian Institute of Chemical Physics	290	2	(中) China Huaneng Group	145	2	(中) Technical Institute of Physics & Chemistry	29
3	(日) Sumitomo Electric	160	3	(中) State Grid Corp	130	3	(中) State Grid Corp	12
4	(中) DALIAN RONGKE POWER TECHNOLOGY	128	4	(中) Tsinghua University	103	4	(中) ZHONGLV ZHONGKE ENERGY	9
5	(韓) LG Chem	90	5	(中) Xi'an Jiaotong University	87	5	(中) China Huaneng Group	7
6	(韓) Korea Institute of Energy Research	74	6	(中) PowerChina	86	6	(中) Shijiazhuang Tiedao University	6
7	(韓) Lotte Chemical	72	7	(中) China Southern Power	66	7	(中) ARREON ENTHALPY ENERGY TECH	5
8	(米) ESS Technology	63	8	(中) China Three Gorges	50	8	(中) HEBEI HCIG GUORONG ENERGY	5
9	(米) TRC COMPANIES INC	52	9	(中) State Power Investment	42	9	(中) HEBEI JIANTOU ENERGY STORAGE TECH	5
10	(中) Ansteel Group	50	10	(中) North China Electric Power University	41	10	(中) State Power Investment	5

蓄熱発電			重力エネルギー貯蔵		
#	企業・研究機関	特許数	#	企業・研究機関	特許数
1	(中) China Huaneng Group	98	1	(中) State Grid Corp	22
2	(中) Xi'an Jiaotong University	66	2	(中) Chinese Academy of Sciences	21
3	(中) Chinese Academy of Sciences	59	3	(中) China Huaneng Group	12
4	(中) State Grid Corp	38	4	(中) Xi'an Jiaotong University	12
5	(中) Zhejiang University	30	5	(中) State Power Investment	10
6	(中) Huaneng Power International	24	6	(中) China Southern Power	8
7	(中) China Energy Investment	23	7	(個人) YANG YIYONG	8
8	(中) Haier	23	8	(仏) CEA	7
9	(中) Tsinghua University	20	9	(中) North China Electric Power University	7
10	(中) North China Electric Power University	19	10	(個人) CHEN MING	6

出所：LexisNexis PatentSightのデータから三井物産戦略研究所作成

**稲田 雄二** Yuji Inada / シニアプロジェクトマネージャー  
 専門分野：エネルギー変換技術、低炭素燃料、炭素除去技術、プラントエンジニアリング

**石黒 隆介** Ryusuke Ishiguro / シニアマネージャー  
 専門分野：知的財産権、知財コンサルティング

## 小型モジュール炉

### — 溶融塩炉および高温ガス炉の技術動向 —

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部

執筆：インダストリーイノベーション室 浅田隆利

知財分析：知的財産室 松浦由依

**Biz Tech フォーカス 2025**

#### なぜこの技術を取り上げるのか

小型モジュール炉（SMR: Small Modular Reactor）は、既存の大型原子炉よりも小型でさまざまな利点から注目を集めている。（米）Amazonといった非電力関連企業がSMR導入を検討しており、2024年には（米）Googleが（米）Kairos PowerのSMRから電力を購入する契約を締結し、商業利用の期待が高まっている。このような動きは、SMRの技術開発と市場導入を加速させ、将来的には重要なクリーンエネルギーの選択肢の一つとして位置づけられる可能性がある。世界中でSMR開発が進む中、本稿では先進的なプロジェクトが多く進行している米国に焦点を当て、注目すべき動向と展望を詳述する。

#### Summary

- 溶融塩炉ではKairos Powerの実証炉「Hermes」が2027年に運転開始を計画しており、高温ガス炉では、（米）X-energyの「Xe-100」は2026年に建設を開始する予定である。
- 世界的にSMRの数が増加する中、開発されている炉の種類は多岐にわたる。複数台建設によるコスト削減（スケールメリット）が期待できる炉は限られており、経済性に基づいて淘汰されていく可能性が高い。

### 1. 小型モジュール炉（SMR : Small Modular Reactor）とは

SMRは1,000MW以上の既存の原子炉と比較して出力の小さい350MW以下の原子炉のことを指す<sup>6</sup>。脱炭素化に向けて原子力が注目を集めており、COP28では「原子力三倍化宣言<sup>7</sup>」がなされた。各国で既存の大型炉に加え、安全性や設置場所の拡大、モジュール化による建設コスト削減の観点からSMRの開発が加速している。欧州で2024年9月に公表されたドラギレポート<sup>8</sup>では、中期的にSMRを含めた原子炉のサプライチェーン構築の必要性が述べられている<sup>9</sup>。SMRは炉心冷却材で大分類され、①既存の商用炉と同じ軽水<sup>10</sup>を用いた加圧水型炉および沸騰水型炉の軽水炉に加え、②ナトリウム等を用いた液体金属冷却炉、③塩化物溶融塩等を用いた溶融塩炉、④気体を用いた高温ガス炉とさまざまなSMRが開発されている（図表1）。

しかし、小型化することでスケラビリティがなくなり既存の原子炉よりも発電コストが増加するとい

<sup>6</sup> 英国では液体金属冷却炉、溶融塩炉、高温ガス炉はすべて大きさにかかわらず先進モジュール炉に分類される。300MW以下と定義される場合もある。

<sup>7</sup> 2023年の国連気候変動枠組条約第28回締約国会議（COP28）において、原子力発電設備容量を2050年までに2020年比で3倍化を目指す宣言がなされた。一般社団法人日本原子力産業協会の試算によると、3倍化した場合の設備容量は1,200GW強となる。2024年11月時点では31カ国が署名している。

<sup>8</sup> 正式名称は「The future of European competitiveness」であり、マリオ・ドラギ氏が執筆したレポートである。

<sup>9</sup> 「The future of European competitiveness Part B | In-depth analysis and recommendations」において先進モジュール炉とSMRを含めたnew nuclearとして定義されている。

<sup>10</sup> 通常の水、重水素を含む場合は重水と呼ばれる。

う課題が存在する<sup>11, 12</sup>。本稿では、発電コストの課題に対して高温運転により発電効率が高い③熔融塩炉と④高温ガス炉を取り上げる。さらに、これらの炉は高温の熱を直接供給することができるため、化学工業分野などの脱炭素が難しい分野への適用が可能である。以降の2-1項では、米国での先進的企業2社が進める熔融塩炉および高温ガス炉の動向を述べる。2-2項ではSMR用燃料製造の動向について、2-3項ではSMRの熱利用技術を総括する。

図表1：代表的なSMRの仕様一覧と運転開始時期

炉型	モデル名	開発メーカー	炉心冷却材	単機出力 [MWe]	炉心出口温度[℃]	熱供給温度[℃]	運転開始時期
加圧水型炉	VOYGR	(米) NuScale Power	軽水	77	321	300	2029年
沸騰水型炉	BWRX-300	(日) 日立GE ニュークリア・エナジー (米) GE Hitachi Nuclear Energy	軽水	300	288	-	2029年
液体金属冷却炉	Natrium	(米) TerraPower	ナトリウム	345	500	-	2030年
熔融塩炉	KP-FHR	(米) Kairos Power	熔融塩	75	650	-	2030年以降
高温ガス炉	Xe-100	(米) X-energy	ヘリウム	80	750	565	2030年

MWe: 電気出力

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

## 2. 注目すべき動向

### 2-1. 熔融塩炉および高温ガス炉の動向

熔融塩炉の分野で先行しているのが、Kairos Powerの開発するフッ化物塩冷却高温炉KP-FHR<sup>13</sup>である。米エネルギー省（DOE）の支援を受けた実証炉Hermesの建設が米テネシー州で2024年7月に開始され、2027年の運転開始を計画<sup>14</sup>している。熔融塩炉は、構造材の腐食などの技術課題が指摘されている。これに対処するため、過去の炉では腐食耐性の強い Hastelloy 系合金が使用<sup>15</sup>されてきたが、Hermesでは低コストの316Hステンレス鋼<sup>16</sup>が採用され、米原子力規制委員会（NRC）の建設許可を受けた。

高温ガス炉の代表的な例として、X-energyが開発するヘリウムガス冷却炉Xe-100が挙げられる。同社は化学メーカーの（米）Dowと契約<sup>17</sup>を結び、2026年に米テキサス州において商業炉の建設を開始し、2030年から低炭素の電力と蒸気を供給する計画である。高温ガス炉は950℃を超える高温運転を前提としたものが

<sup>11</sup> （米）NuScale Power社が米アイダホ州にSMR「VOYGR」を建設予定であったが、建設コストが上昇し、発電コストが想定よりも高くなってしまったため、建設を断念している。

<sup>12</sup> 一般的にSMRの発電コストは、既存の軽水炉の倍程度が想定されている。

<sup>13</sup> Kairos Power Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactorの略であり、フッ化リチウムとフッ化ベリリウムを混合した熔融塩を使用する。高純度熔融塩の製造工場建設が2024年に開始され、安定供給が可能になる見込み。

<sup>14</sup> Hermesでは発電は行わずに熱エネルギーの出力35MWを確認する計画である。

<sup>15</sup> 米オークリッジ国立研究所の熔融塩実験炉Molten-Salt Reactor Experimentでは Hastelloy-N が使用された。

<sup>16</sup> ステンレス鋼の316Hは既存の原子炉で採用実績があり、ASME Code, Section III, Division 5にて高温材料として認められている。

<sup>17</sup> DowはUCC Seadriftの工場にSMRを導入することで既存の蒸気システムの代替とするとともに電力供給を計画している。

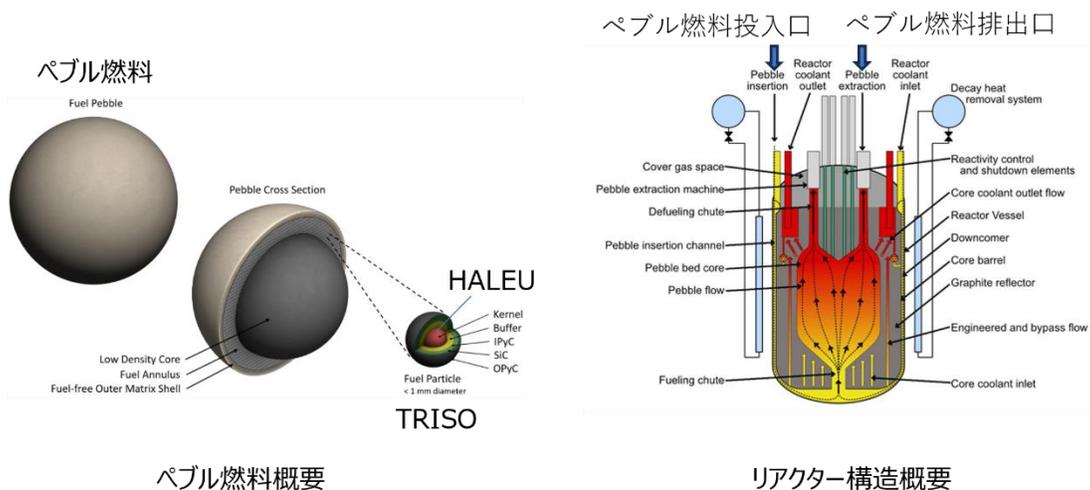
多く、構造材のコスト高につながっていた。また、燃料粒子の被膜が破損するというリスク<sup>18</sup>も存在している。これを解決するため、Xe-100では運転温度を750℃に引き下げることで、より多くの材料を使用可能にした。

## 2-2. SMR用燃料製造の動向

上記のSMRでは、運転温度が高いため、耐熱性に優れた燃料を使用することで安全性向上を図っている。一方、これらの燃料には新規の製造工場が必要となるため、この点も重要な視点として捉える必要がある。上記の2社が開発するSMRは、高純度低濃縮ウラン（HALEU<sup>19</sup>）を三重被膜した直径約1mmの燃料粒子（TRISO<sup>20</sup>）を多数埋め込んだ球状のペブル燃料を使用する。このシステムは、運転中でも新たな燃料を供給できる設計となっている（図表2）。

HALEUは他のSMRでも採用が検討されている燃料であり、SMRの需要増に伴い、その供給不足が懸念されている<sup>21</sup>。直近では（米）Centrus Energyが2023年10月にHALEUの製造を開始した。また、TRISOについては、（米）BWX Technologiesが米バージニア州で製造を開始しており、さらにX-energyは2025年にテネシー州にて製造開始を計画している。このように、各社の製造体制の拡充により、商用炉の運開時期には、安定した燃料供給が確保される見込みである。

図表2：燃料概念図、燃料供給システム図



出所：U.S.NRC資料から三井物産戦略研究所作成

<sup>18</sup> （独）のAVR reactorでは二重被膜のBISO燃料(Bi-structural Isotropic particle fuel)の高温耐久性に課題があったといわれている。

<sup>19</sup> ウラン235の濃縮度が5%から20%のHigh-Assay, Low Enriched Uraniumのこと。

<sup>20</sup> Tri-isotropicの略称。ウラン燃料を熱分解炭素で被膜(Inner Pyrolytic Carbon)した上から炭化ケイ素(Silicon Carbide)で被膜、さらに熱分解炭素(Outer Pyrolytic Carbon)で被膜している。約1600℃でも融解しない特性を持つ被膜構造により、核分裂生成物を内部に保持できるため、高い安全性を有しており、SMRの安全性をさらに向上させることが可能である。

<sup>21</sup> 2022年時には（露）Rosatom系の企業で市場供給の100%を占める状態であった。ロシアへの依存度を下げするために、HALEUの米国内サプライチェーンを構築するための支援をIRA法(Inflation Reduction Act)にて行っている。

### 2-3. SMRの熱利用技術

上記SMRは、高温の熱供給ができるため、脱炭素化が難しい化学プラントなどの産業分野への熱エネルギーの提供が可能だ。知財分析結果では、メタノール生成システム等へ熱を供給する特許が出願されていることが分かる。産業分野のプロセス温度と、それに適用可能なSMRの種類を図表3にまとめた<sup>22</sup>。前述のX-energyのSMRでは、高温の蒸気を用いた海水脱塩も想定されている。

図表3：産業分野におけるプロセス温度と適用可能なSMR

産業	プロセス温度	利用可能性
海水脱塩	70~130℃	
地域暖房	80~150℃	
アルミニウム製造(アルミナ水和)	100~300℃	
パルプおよび製紙製造	100~400℃	
化学	250~600℃	
オイルサンド(SAGD法)	約300℃	
ソーダ灰製造(ソルベイ法)	300~400℃	
石油精製	350~550℃	
アンモニア製造(アンモニア合成)	400~500℃	
オイルシール	約500℃	
石油精製(接触分解)	600~800℃	
アンモニア製造(天然ガス改質)	600~800℃	
水素製造(天然ガス改質)	約750℃	
化学(ナフサ分解)	800~900℃	
アルミニウム製造(アルミナ焼結)	800~1000℃	

出所：一般財団法人日本原子力産業協会資料から三井物産戦略研究所作成

### 3. 今後の展望

原子力エネルギーの新しい展開として注目されるSMRだが、市場の競争環境は非常に厳しいものになるだろう。DOEによれば、同一設計の原子炉を複数建設し、学習効果を活用してコストを削減するには、少なくとも5~10基が受注される必要があるとされる<sup>23</sup>。IAEA<sup>24</sup>の原子力発電導入予測によれば、「成長が期待されるケース」では、2050年までに原子力発電容量が578GW増加し、そのうちSMRは全体の24%を占めると見込まれている<sup>25</sup>。この予測を基に1基当たり350MWで換算すると、約390基のSMRが世界で導入される計算となる。

世界18カ国で80タイプのSMRが開発<sup>26</sup>されているが、NRCの許認可の取得期間が計画より長期化して開発負担に耐えられない、詳細設計時に建設コストが上昇し当初のコスト見込みを上回る、新規導入技術による

<sup>22</sup> 液体金属冷却炉の中にはより高温の動作環境を想定している場合もあるが一般的な液体金属冷却炉の温度を示す。

<sup>23</sup> U.S. Department of Energy発行の「Pathways to Commercial Liftoff: Advanced Nuclear」より。

<sup>24</sup> 国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency) を指す。

<sup>25</sup> IAEA発行の「Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050」では、2023年末の原子力発電稼働容量372GWに対し、2050年の高位ケースで950GW、低位ケースで514GWと試算されている。SMRの割合については高い割合で24%、低い割合では6%と試算されている。

<sup>26</sup> The Future of European Competitiveness part B section 1 chapter 1より。

低コスト化が想定通り進まない等で、一部の開発中SMRは市場競争力を失い淘汰される<sup>27</sup>可能性が高い。

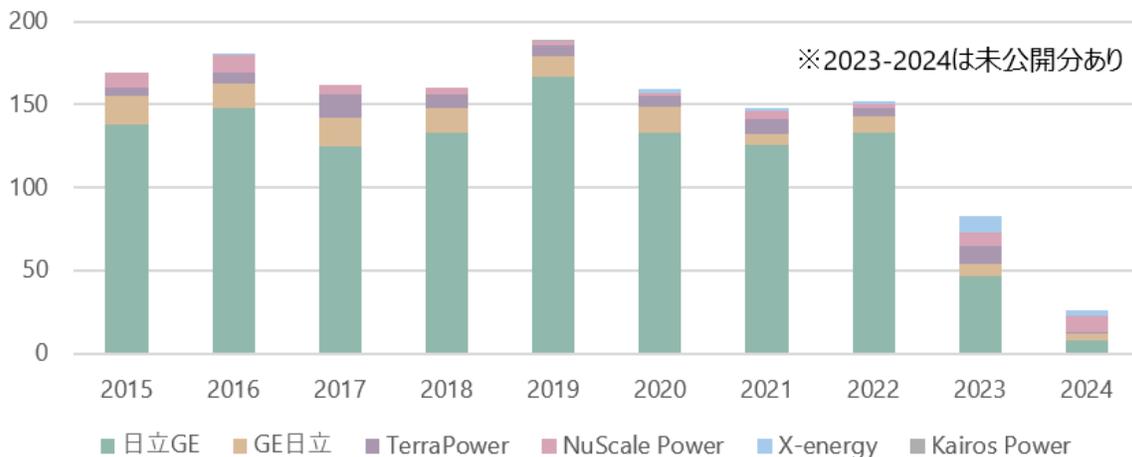
2030年にかけて初期のSMRが建設され安全性・コスト面の比較がなされていく。2030年代に入ると熔融塩炉や高温ガス炉の商用炉が稼働を開始する。その際、SMR製造企業の競争力の源泉として、①根本的な安全性確保と②低コストはもちろんのこと、③確実性の高いコスト見込み、④高温の熱供給とそれを生かすノウハウ、⑤原子力発電所の建設経験を持つ企業とのパートナーシップ（一時期の脱原発の動きにより、製造可能な企業数が減少）、⑥信頼性の高いサプライチェーンの構築などがある。

SMRには技術的、経済的な課題が存在するものの、安定した電気・熱の供給を可能とするため、脱炭素社会における重要な選択肢となる。

## 小型モジュール炉に関する知財分析

小型モジュール炉に関する知財分析として、図表1に記載の開発メーカー6社が出願する特許データを抽出し、技術をめぐる状況を分析した。分析対象は、グローバル特許検索ツールPatSnapを用いて検索した、2015年から2024年出願の1,431件（ファミリー件数）である。

図表4：開発メーカー6社による特許出願件数/年



出所：三井物産戦略研究所作成

図表4に示すように、企業により出願件数にバラつきはあるものの、技術開発は一定水準で続いている。（日）日立GEニュークリア・エナジー（以下日立GE）は全期間で最も出願数が多く（平均138件/年）、（米）GE Hitachi Nuclear Energy（以下GE日立）が平均14件/年、TerraPowerが平均8件/年、NuScale Powerが平均5件/年と続く。X-energyは2020年以降、連続して出願があり、2023年に10件/年と急増している。Kairos Powerの出願は2019年の1件のみである。

<sup>27</sup> 11月にSMRより小型のマイクロ炉を計画していた（米）Ultra Safe Nuclear Corporationが破産申請を行った。同社はアンカー投資家の確保に苦慮していたことが明らかになっている。

図表5：メーカーごとの注力分野と主な出願国（2015年～2024年）

企業名	件数	注力分野	主な出願国
(日) 日立GE	1,158	1. 原子力技術   原子炉格納容器、原子力施設の安全性 2. インフラ最適化および設備管理 3. 非破壊検査および解析技術	日本、米国、欧州
(米) GE日立	119	1. 原子力技術   冷却技術、次世代原子炉の安全性 2. センシングおよびモニタリング技術 3. AI・機械学習   データ解析に基づく高度なシステム開発	米国、欧州、日本、カナダ、メキシコ
(米) TerraPower	72	ナトリウム冷却高速炉技術	米国、中国、欧州、カナダ、日本、韓国、ロシア
(米) NuScale Power	59	1. 小型モジュール炉の核出力制御・熱サイクル管理技術 2. 原子炉システムの安全性およびモニタリング技術 3. 原子炉統合エネルギーシステム(IES)	米国、欧州、カナダ、韓国、中国、日本
(米) X-energy	20	高温ガス炉技術   核燃料の効率化・安全性向上	米国、欧州、韓国、中国、カナダ、日本、南アフリカ
(米) Kairos Power	1	熔融塩炉技術   不純物除去	米国

出所：三井物産戦略研究所作成

図表5にメーカーごとの出願件数、注力分野、主な出願国をまとめた。日立GEは、出願件数は多いが、約85%が日本国内のみへの出願であった。GE日立は、次世代原子炉の安全性や効率性向上を目指した技術開発に注力しており、これにはモジュール型の炉に向けた新しい設計が含まれる。加えて、AIを活用した故障予測や運転管理システムも今後の重要な技術分野とみられる。TerraPowerはナトリウム冷却高速炉、X-energyは高温ガス炉にそれぞれ注力している。これらの企業の出願には、小型モジュール炉（SMR）のみに限定される技術はないが、SMRに適用可能な技術は確認できる。

NuScale Powerの出願は、名称に「小型モジュール炉」を含むなど、SMRの開発に特化している。また、NuScale Powerは、環境負荷軽減や炭素排出削減を目的とする原子炉統合エネルギーシステム（Integrated Energy Systems: IES）に関連する技術を出願している点にも特徴がある。IES関連技術としては、原子炉の熱や電力を利用して二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を回収し、回収したCO<sub>2</sub>をメタノール生成に活用するシステムや、原子力発電で生成された蒸気から水素（H<sub>2</sub>）を生成し、さらに硝酸（HNO<sub>3</sub>）を生成するプラントなどが出願されている。

このように各メーカーは次世代の原子力技術の実現に向けて、個別の戦略的分野に注力していることが特許データから示されている。今後の技術動向を把握する上で、環境問題への対応や効率的なエネルギー利用の観点から原子力技術がどのように進化していくのかという観点も興味深い。

**浅田 隆利** Takatoshi Asada / シニアマネージャー  
専門分野：環境・エネルギー技術

**松浦 由依** Yui Matsuura / シニアアナリスト  
専門分野：知的財産権、知財コンサルティング

## 連続発酵技術

### —精密発酵の市場開発の鍵を握る革新技術に迫る—

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部

執筆：コンシューマーイノベーション室 澤野 健史

知財分析：知的財産室 石黒 隆介

**Biz Tech フォーカス 2025**

#### なぜこの技術を取り上げるのか

気候変動が深刻化する中、生物学的プロセスや生体由来の資源を活用し、エネルギー、化学品、医薬品、食品などの生産を行うバイオものづくりが世界的に推進されている。食品分野では特定の遺伝子を導入した微生物を利用して動物性タンパク質などを生産する「精密発酵」が注目を集めているが、最終製品の価格を左右するスケールアップと大量生産が市場開発のボトルネックになっている。スケールアップによらずとも、低コスト生産を実現する連続発酵技術の社会実装が精密発酵市場形成を加速させる可能性が高まっている。

#### Summary

- 連続発酵は最適化された発酵反応を長時間持続させる技術で、従来のバッチ発酵やフェドバッチ発酵に比べ、生産効率とコスト削減の点で優位性がある。汚染・安定稼働の面で課題を有しているが、スタートアップがこれらの課題解決に向けた技術開発を進めている。連続発酵技術の社会実装は、低コストで競争力のある精密発酵食品の流通を可能にし、市場形成を加速させると見込む。

### 1. 連続発酵とは

発酵リアクターに基質や培地を絶えず供給し、発酵産物の分離を連続的に行う生産方法である。リアクター内の環境（温度・pH・酸素濃度）や基質濃度、細胞密度などの各種データを基に、発酵条件のリアルタイム制御を行うことで、最適化された発酵反応を長時間持続することができる。

連続発酵生産と従来の発酵生産の違いについて整理した（図表1）。バッチ発酵生産は、微生物、基質、培地を一度に混合し、一定条件下で発酵させた後、まとめて発酵産物を分離する生産方法である。また発酵プロセスの途中で基質や新しい培地を追加して発酵反応を延長し、バッチ発酵よりも多くの発酵産物が得られるフェドバッチ発酵も活用されている。これらの生産方法では、次の生産に移行する際に洗浄と仕込みの時間（ダウンタイム）が必ず発生する。したがって生産コストを下げるためには、一度に大量生産することが求められるが、発酵条件のスケールアップと大型の発酵リアクターが必要になる。一方で連続発酵では、発酵反応を長時間持続させ、発酵産物を連続的に分離することで発酵リアクターの最大容量以上の発酵産物を得ることができるため、通常小型の発酵リアクターに適応される。これによりスケールアップが不要で、小型の発酵リアクターでも低コスト生産が可能になる。

優れた生産効率を実現する連続発酵にも課題は存在する。発酵プロセスが長時間にわたることに加え、生産に使用する微生物は培養液から分離し、循環させて再利用するため、微生物の変異による生産性の低下や発酵リアクターの汚染（コンタミネーション）のリスクが高まる。さらに現在の生産システムから連

連続発酵生産に移行する際に生じる時間とコストも課題として挙げられる。

**図表1：従来の生産方法（バッチ発酵・フェドバッチ発酵）と連続発酵**

	バッチ発酵	フェドバッチ発酵	連続発酵
基質・培地の添加	すべて一度に添加	培養中に追加	連続的に添加
成長段階	全段階を経る	指数期 <sup>※</sup> を延長	指数期 <sup>※</sup> を維持
生産性	低い	中程度	高い
リアクターサイズ	大型	中～大型	小型
汚染リスク	低い	中程度	高い
柔軟性	高い	中程度	低い
スケールアップの 必要性	あり	あり	なし/少ない
導入時の課題	既存の生産システムで対応可	既存の生産システムで対応可	生産システムの移行時に 時間とコストを要する

※微生物が最も活発に増殖し、数が急激に増える時期

出所：三井物産戦略研究所作成

## 2. 注目すべき動向

連続発酵の課題解決に乗り出すスタートアップが近年注目を集め始めている（図表2）。（米）Pow.Bioは、連続発酵における微生物の変異と汚染の問題を解決するため、微生物の成長プロセスと発酵プロセスで用いる反応リアクターを分離するデュアルチャンバーシステムを採用、AIによる高度なプロセス制御を組み合わせた連続発酵システムを開発している。ターゲット成分の発酵生産を行うリアクターでは、栄養素の乏しい培地を用いることで生産に用いる微生物以外の増殖を防ぎ、汚染のリスクを低減する。同社は30Lと300Lの発酵リアクターを用いて実証実験を進め、酵母を用いた食品タンパクの発酵生産において収量を従来比2.5倍、生産コストを約40%削減したと公表している<sup>28、29</sup>。また（デンマーク）Enduro Geneticsは、微生物の変異の問題を解決するため、独自の遺伝子改変技術「Enduro Sense」を用いて、連続発酵プロセスを通して高い生産性を維持できる微生物株の開発を行っている。このアプローチにより発酵プロセスの生産性の向上と長期間の安定生産が可能になるとしている<sup>30</sup>。また（オランダ）DAB.bioは、発酵リアクターから生成物を選択的かつ連続的に抽出する技術を有しており、現在の生産システムからシームレスに連続生産に移行させる連続発酵ユニットの開発を行っている。同社は本技術を用いたプロセス開発支援サービスを提

<sup>28</sup> [Pow.Bio | Continuous Fermentation for Biomanufacturing](#)

<sup>29</sup> [Pow.bio raises \\$9.5m to expand continuous fermentation platform | AgFunderNews](#)

<sup>30</sup> [Enduro Genetics: We can transform economics of biomanufacturing](#)

供しており、設備投資と運用コストを最大70%削減し、稼働後の生産コストを半減できるとしている<sup>31、32</sup>。

図表2：連続発酵の技術開発に取り組む注目のスタートアップ企業

企業名	本社拠点	解決が見込まれる課題	概要	注目の動向
Pow.bio	米国	微生物の変異 コンタミネーション	デュアルチャンバーシステムを用いた連続発酵技術と高度な発酵条件制御を組み合わせ、発酵生産システムの構築支援サービスを展開。	2023年10月、シリーズA（950万ドル）の資金調達を完了。1,000Lの発酵槽を備える実証施設の構築を目指す。2024年3月、（米）MeliBioと提携し、AIを活用した精密発酵ハチミツの製品化に向けた取り組みを開始。
Enduro Genetics	デンマーク	微生物の変異	独自の遺伝子改変技術「Enduro Sense」を用いて、菌株の設計サービスを展開。長期間の発酵プロセスでも高い生産性を維持できる菌株を作出。	2022年1月、米国エネルギー省バイオエネルギー技術局から資金提供を受けるAgile BioFoundryに参画。複数の米国国立研究所と連携し、技術のスケラビリティを実証中。
DAB.bio	オランダ	生産システムの移行	発酵槽から生成物を選択的かつ連続的に抽出する技術を有し、現在の生産システムからシームレスに連続生産に移行させる連続発酵ユニットを開発。	2024年5月、（米）Ginkgo Bioworksが発足したエコシステム（Ginkgo Technology Network）に参画し、パートナー企業の研究開発を推進する取り組みを開始。
Cauldron	オーストラリア	生産システムの移行	独自の連続発酵技術を駆使し、少ない設備投資でのコスト削減を実現。	2024年10月、クイーンズランド州政府から資金援助で「Cauldron Bio-fab」を建設することを発表。年間1,000トン以上の生産能力を持ち、食品や飼料、化学製品など多様な製品を製造予定。米国のバイオものづくり支援金の採択も受けている。

出所：三井物産戦略研究所作成

### 3. 今後の展望

このように連続発酵技術の課題解決が進み始めている。他方、本技術の活用先として有望な精密発酵の 카테고리において、米国における食品添加物の安全性認証であるGRAS（Generally Recognized As Safe）認証や自主GRAS認証<sup>33</sup>を取得する企業が増加している（図表3）。

例えば、2023年11月に（シンガポール）TurtleTreeは、精密発酵由来のラクトフェリンの自主GRAS認証を世界で初めて取得したことを発表した<sup>34</sup>。また2024年2月（米）New Cultureは、精密発酵由来の乳カゼインタンパクの自主GRAS認証を世界で初めて取得したことを発表している<sup>35</sup>。これらの企業が精密発酵食品の市場開発を推進していくためには、従来品に対して競争力のある価格を実現する必要がある。ほとんど全ての発酵生産設備において、従来の発酵方法が採用されており、生産コストを下げるためには、大型の発酵リアクターで大量生産することが求められる。しかしそもそもアクセス可能な大型の発酵リアクターの数が少なく、新たに大型の発酵リアクターを建設するには莫大な投資が必要となるため、市場開発の最大のボトルネックとなっている。このような状況下、連続発酵技術のニーズは自ずと増加するものと見込む。連続発酵技術の社会実装が実現すれば、スケールアップが不要かつ小型設備での低コスト生産が実現し、大きく市場形成が進む可能性があり、今後の動向に注目すべきであろう。

<sup>31</sup> DAB.bio :: Lux Research

<sup>32</sup> DAB | DAB.bio's FAST Reduces Biomanufacturing Costs by 50%

<sup>33</sup> 企業が自社製品の安全性について、専門家パネルによる評価を行い、宣言する。通常、自主GRAS認証取得後、FDAに通知を行い、「異議なし」の回答を目指すことが多い。

<sup>34</sup> TurtleTree obtains the world's first self-GRAS for animal-free lactoferrin, LF+™ now approved to commercialize in the U.S.

<sup>35</sup> New Culture | "GRAS" for New Culture Animal-free Casein

図表3：精密発酵成分の米国GRAS認証を取得するスタートアップ企業

企業名	本社拠点	精密発酵で生産している成分	アプリケーション事例	GRAS認証取得年月	販売状況
Impossible Foods	米国	大豆レグヘモグロビン	植物代替肉	2018年7月	上市済
Perfect Day	米国	乳ホエイ (βラクトグロブリン)	乳製品	2020年3月	上市済
		甘味タンパク (ブラゼイン)	菓子類	認証待ち	-
Remilk	イスラエル	乳ホエイ (βラクトグロブリン)	乳製品	2022年6月	上市済
Sweegen	米国	甘味タンパク (ブラゼイン)	菓子類	2023年5月	上市済
Imagindairy	イスラエル	乳ホエイ	乳製品	2023年8月 (自主GRAS)	発売準備中
The Every Company	米国	卵白タンパク	製パン・菓子類	2023年10月	上市済
TurtleTree	シンガポール	ラクトフェリン	機能性食品 サプリメント	2023年11月 (自主GRAS)	発売準備中
New Culture	米国	カゼイン	チーズ	2024年2月 (自主GRAS)	発売準備中
Vivici	オランダ	乳ホエイ (βラクトグロブリン)	乳製品	2024年2月 (自主GRAS)	発売準備中
Oobli	米国	甘味タンパク (ブラゼイン)	菓子類	2024年3月	JALの機内食で限定提供
		甘味タンパク (モネリン)	菓子類	2024年12月	-
21st.BIO	デンマーク	乳ホエイ (βラクトグロブリン)	乳製品	2024年9月 (自主GRAS)	-
Fermify	オーストリア	カゼイン	チーズ	2024年10月 (自主GRAS)	-
Onego Bio	フィンランド	卵白タンパク	製パン・菓子類	届出予定	-

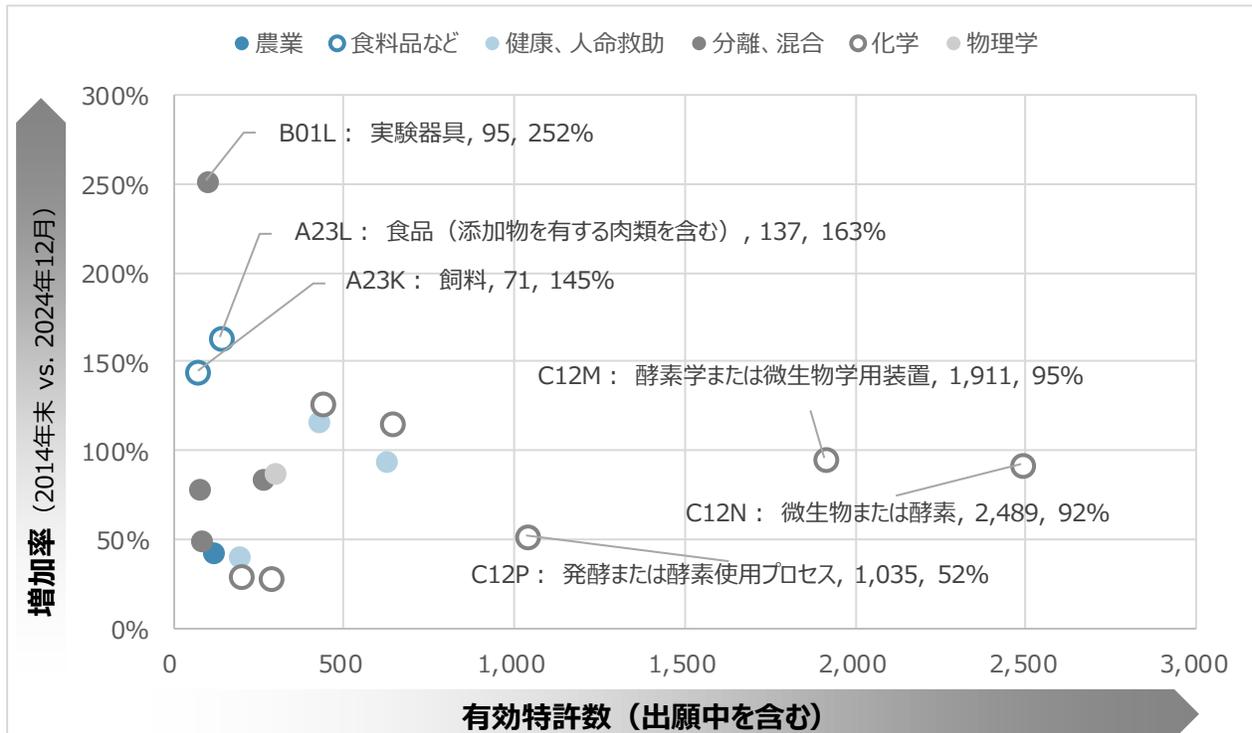
出所：三井物産戦略研究所作成

## 連続発酵技術に関する知財分析

本技術に関連性の高い「マルチチャンバー」、「連続発酵」などのキーワードや、微生物、酵素、発酵などに関連する技術分類コード（IPC）を特定（2024年12月時点で出願中を含む有効特許数<sup>36</sup>は3,371件）し、技術分類別、上位プレイヤー別の分析を行った。

図表4は、技術分類別に有効特許数とその増加率比較した結果で、横軸が有効特許数、縦軸が2024年12月時点と2014年末時点での有効特許数を比較した増加率を表している。その結果から、微生物、酵素、発酵の関連技術を中心に注目が強まっており、近年は食品や飼料への応用も盛んになっていることが明らかとなった。また、近年とくに伸びが大きい食品のなかでは、添加物を有する肉類の特許数の伸びが目立っている。

図表4：有効特許数、増加率（技術分類別）

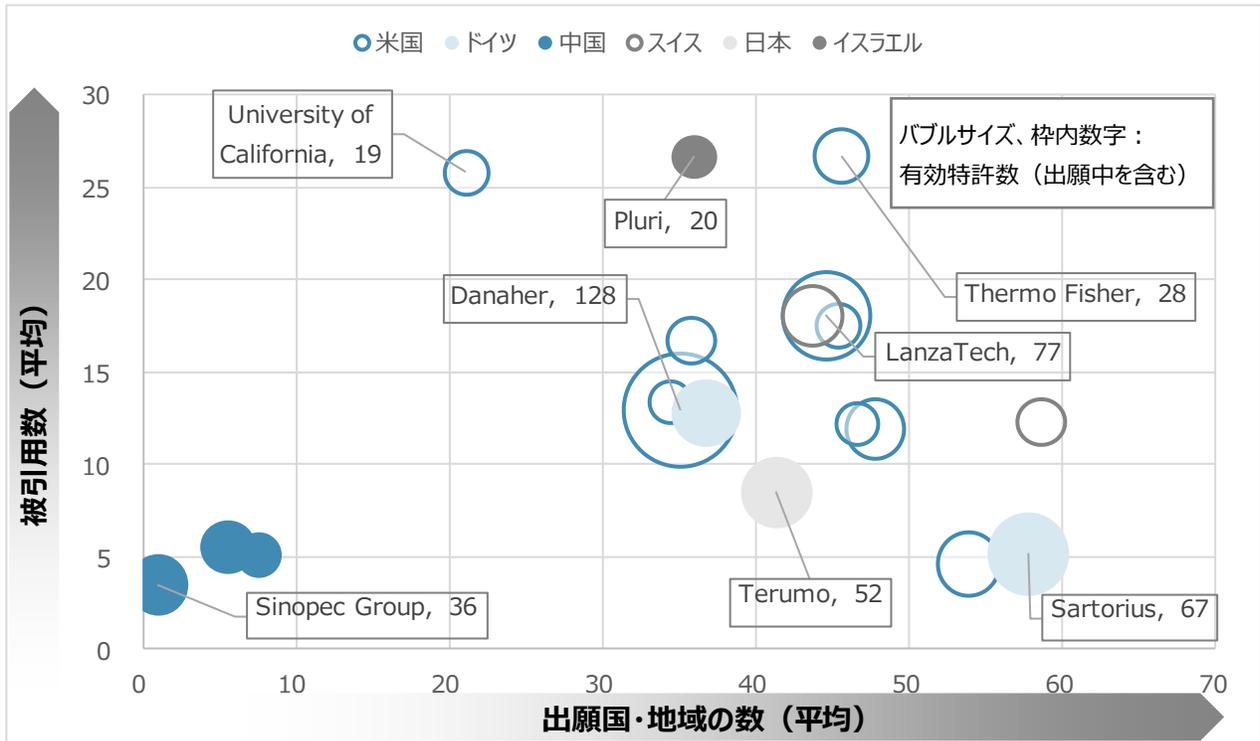


出所：LexisNexis PatentSightのデータから三井物産戦略研究所作成

図表5は、連続発酵関連の特許数における上位プレイヤーを比較した結果で、バブルサイズが有効特許数、横軸が出願国や地域の数の平均値、縦軸が技術影響度の大きさを示す被引用数の平均値を表している。この結果から、（米）Danaher、（米）LanzaTechなどの米国企業が目立ち、医療、化学といった複数業界の主要企業が上位を占めることがわかる。

<sup>36</sup> 出願された特許、および審査を経て特許権としての権利行使が可能な状態にある特許の総数。

図表5：有効特許数、出願国・地域数、被引用数（上位プレイヤー別）



出所：LexisNexis PatentSightのデータから三井物産戦略研究所作成

**澤野 健史** Takeshi Sawano / プロジェクトマネージャー  
 専門分野：食と農、機能性食品、次世代タンパク質、食のバリューチェーン

**石黒 隆介** Ryusuke Ishiguro / シニアマネージャー  
 専門分野：知的財産権、知財コンサルティング

# スマートホスピタル

## —デジタルツイン技術がもたらす病院の未来—

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部

執筆：インダストリーイノベーション室 加藤 貴子

知財分析：知的財産室 松浦 由依

**Biz Tech フォーカス 2025**

### なぜこの技術を取り上げるのか

デジタル技術やデータを活用したスマートホスピタルは、病院運営の効率化や患者ケアの質向上に寄与することが期待されている。近年、デジタルツインの医療分野への応用が注目されており、EU「DIGIPREDICT」、米国「FDT-BioTech」、英国「CVD-Net」、日本「BRIDGE」など、先進的なプロジェクトが進行している。これに伴い、特許数や文献数<sup>37</sup>も増加傾向にある。政府支援や民間投資を背景に、研究開発や社会実装が加速し、デジタルツインは病院の未来像を探る上で重要な技術であると考えられる。

### Summary

- 病院へのデジタルツイン導入はまだ初期段階で、小規模な実証実験を通じた進展が期待される。
- デジタルツインの構築には、デジタル技術の統合やデータの質・信頼性の確保が不可欠である。
- 将来的には、病院機能の強化や個別化ケアの向上、臨床試験効率化などさまざまな場面での活用が期待されるが、プライバシー保護や透明性の確保といった倫理的課題への対応が重要となる。

## 1. スマートホスピタルとは

スマートホスピタルとは、最新のデジタル技術とデータ活用により、病院運営の効率化や患者ケアの質向上を目指す概念である。これを支える技術には、IoT、AI、ロボティクス、自動化、センシング、ビッグデータ解析、AR/VR（拡張現実/仮想現実）などが含まれる。中でも、**デジタルツイン**への注目が高まっている。デジタルツインは、病院や患者の現実世界を仮想環境で再現し、リアルタイムのデータ分析を可能にする技術である。さらに、AIとの組み合わせにより複雑な課題への意思決定を支援し、「**未来を予測**」することで早期介入や予防・修正対策が期待される。本技術領域の特許出願は急増しており、デジタルツイン技術は研究段階を超え、実用化が加速する段階に入っている。

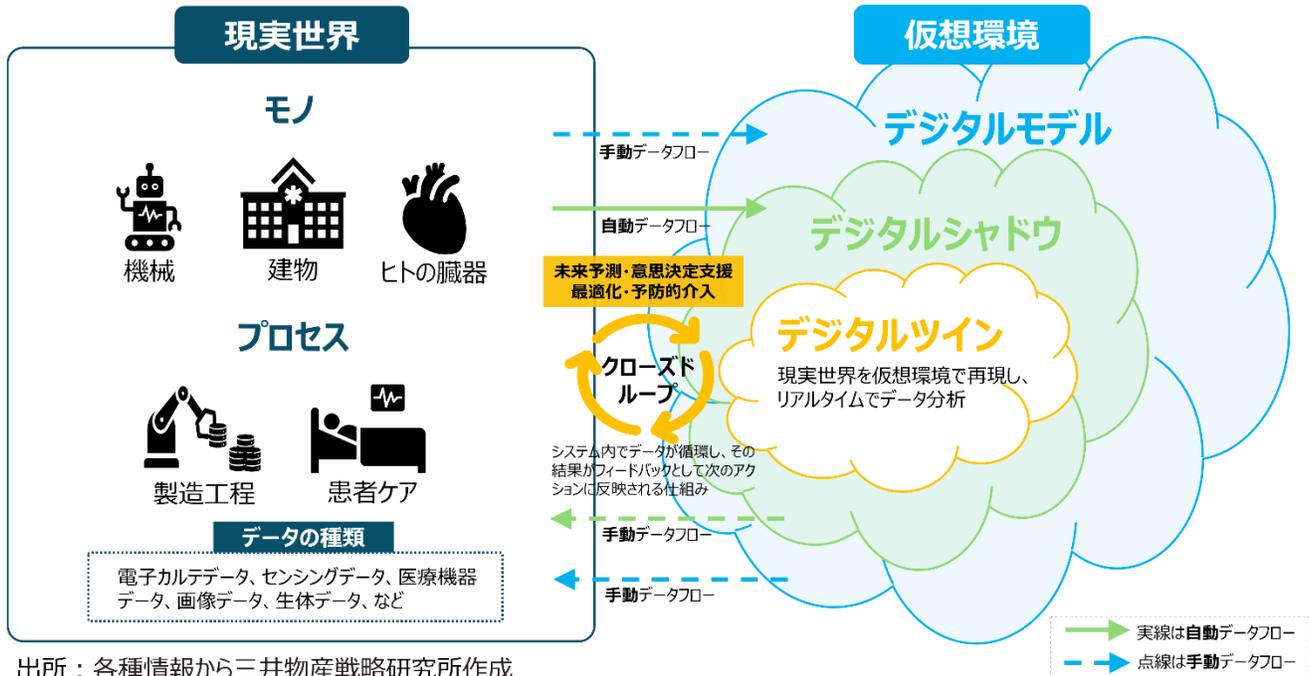
### 1-1. デジタルツインとは？

デジタルツインは、現実世界のモノ（例：機械、建物、ヒトの臓器）やプロセス（例：製造工程、患者ケア）を数値化し、仮想環境で数学的に構築された「**デジタルモデル**」を基盤とする。このモデルに現実世界から収集されたリアルタイムデータを用いて更新されるモデルを「**デジタルシャドウ**」と呼ぶ。「**デジタルツイン**」は、このデジタルシャドウに加え、仮想環境で得られたシミュレーション結果を現実世界

<sup>37</sup> Evangelia Katsoulakis et al., Digital twins for health: a scoping review Check for update, npj Digital Medicine | (2024) 7:77 (Digital twins for health: a scoping review | npj Digital Medicine)

に反映させるフィードバック機能「クローズドループ<sup>38</sup>」を備えている。この仕組みにより、デジタルツインは未来予測、意思決定支援、最適化、予防的介入を可能にする（図表1）。

図表1：デジタルツインのイメージ図



### 1-2. デジタルツインを支える要素技術

デジタルツインの構築には、ウェアラブルやインプラントブル機器などの①センサーや②IoTデバイスからデータを収集し、③エッジコンピューティングでローカルかつリアルタイムに処理した後、④リアルタイムデータストリーミングを介して⑤クラウドコンピューティングへ送信し、⑥統合データとして活用する仕組みが必要となる。統合データを基に処理・学習・予測を行うには、多様なデータに対応する⑦マルチモーダルAIが重要な役割を果たす。直感的な可視化には⑧3D/4Dモデリングが必要であり、データの安全性を確保する⑨サイバーセキュリティーや、複雑な予測を支える⑩大規模定量モデルも欠かせない。これらの技術がデジタルツイン構築を支えている（図表2）。

<sup>38</sup> デジタルツインにおけるクローズドループとは、仮想環境で得られたシミュレーション結果を現実世界に反映させ、その結果をさらにフィードバックして学習・改善を繰り返すプロセスのこと。

図表2：デジタルツインを支える要素技術

技術	用語解説
①センサー	物理的環境から情報を収集する装置。温度、圧力、動作などを検知可能。
②IoTデバイス	インターネットに接続された物理デバイス。データ収集・送信を担う。
③エッジコンピューティング	データを収集したその場でリアルタイムに処理する技術。遅延削減に有効。
④リアルタイムデータストリーミング	リアルタイムで大量のデータを継続的に送信する技術
⑤クラウドコンピューティング	インターネット経由でデータを保存、処理、分析する技術
⑥統合データ	異なるソースからのデータを一元的に統合したデータセット
⑦マルチモーダルAI	複数のデータ形式（例：テキスト、画像、音声）に対応する人工知能技術
⑧3D/4Dモデリング	3次元または4次元（時間軸を含む）で情報を可視化する技術
⑨サイバーセキュリティ	データの機密性、完全性、可用性を保護するための技術
⑩大規模定量モデル	複雑な現象を予測・シミュレーションするための数値モデル

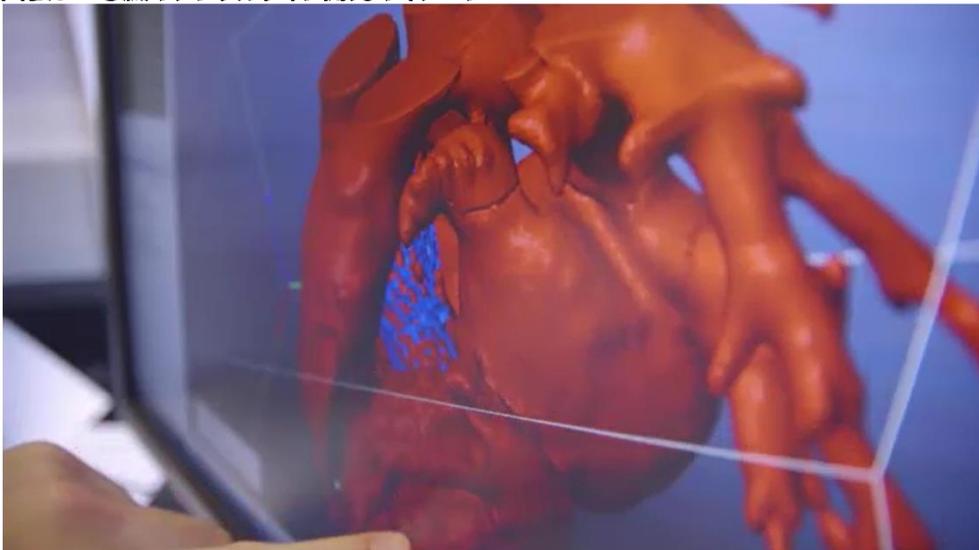
出所：各種情報から三井物産戦略研究所作成

### 1-3. スマートホスピタルにおけるデジタルツインの現状と導入目的

スマートホスピタルへのデジタルツイン導入はまだ初期段階にあり、専門家インタビューから、多くの事例がデジタルモデルやデジタルシャドウにとどまっていることが確認されている。医療分野では、数千の生体データや環境要因を1秒ごとに処理する高度なモデルの構築において、データ標準化の不足や医療情報のプライバシーの保護など、さまざまな課題が残されている。

病院がデジタルツインを導入する主な目的は、①病院運営の改善（例：医療従事者や患者フローの最適化、医療機器の故障予防など）、②患者ケアの向上（例：個々の患者データに基づく最適な治療法の検討、個別化ケアの提供、予防的介入の実施など）の2点である。デジタルツイン構築には時間とコストがかかるため、集中治療室の運用改善、病院リソースの最適化、医療機器の保全、心臓などの臓器（図表3）や糖尿病などの病態シミュレーションを活用した治療最適化など、目的を絞った開発が進められている。

図表3：心臓のデジタルツイン開発のイメージ



出所：Dassault Systèmes社ウェブサイト掲載動画より一部抜粋（2024年12月5日アクセス）

## 2. 注目すべき動向

当該分野における注目すべき動向について、大型プロジェクト、コンソーシアム、規格基準・標準化推進組織、病院・研究機関、企業の5つに分類し、図表4にまとめた。デジタルツインの医療分野における応用では、EU「DIGIPREDICT」、米国「FDT-BioTech」、英国「CVD-Net」、日本「BRIDGE」など、各国で先進的なプロジェクトが展開されている。これらのプロジェクトは、個別化医療や予測医療の実現を目指し、学术界、産業界、政府が連携している。今後5年での成果が期待され、デジタルツインの実用化が大きく進む重要な時期になるだろう。

図表4：デジタルツインの病院への応用で注目すべき動向

カテゴリ	地域	名称	概要
大型プロジェクト	EU	DIGIPREDICT	COVID-19の合併症予測、心血管疾患の予防・診断・治療の最適化などを目的としたデジタルツインプラットフォームの構築を目指すプロジェクト。EUのHorizon2020が支援（2021年開始）。デジタルバイオマーカー、Organ-on-chip、AIなどの技術開発も行っている。
	EU	Neurotwin	個別化された脳デジタルツインを構築し、非侵襲的な電気刺激によるアルツハイマー病治療の最適化を目指すEUのHorizon2020が支援するプロジェクト（2021年開始）。
	米国	FDT-BioTech	2024年10月、米国国立科学財団（NSF）は、米国国立衛生研究所（NIH）および米国食品医薬品局（FDA）と協力し、バイオメディカル向けデジタルツイン開発を推進するプロジェクトへの研究資金授与を公表。Foundations for Digital Twins as Catalysts of Biomedical Technological Innovation プログラム（FDT-BioTech）の一環。
	英国	CVD-Net	Engineering and Physical Sciences Research Council（EPSRC）が800万ポンドを助成するプロジェクト。心臓デジタルツインを作成して、肺動脈性肺高血圧症（PAH）患者の病状進行や治療反応をリアルタイムで追跡することを目指している。
	日本	BRiDGE（研究開発とSociety 5.0との橋渡しプログラム）	2023年7月、医療デジタルツインの発展を目指し、デジタル医療データバンクを構築する事業を開始。国立がん研究センター主導のもと、診療情報・ゲノム情報・医用画像情報・薬剤情報などの医療情報をデジタル化・構造化・収集することでデータバンクの構築を目指している。
コンソーシアム	グローバル	Digital Twin Consortium	デジタルツイン技術の普及と発展を目的とした国際的な組織。産業界、学界、政府機関の専門家が連携し、デジタルツインの開発、認知度向上、採用促進、相互運用性の改善に取り組んでいる。
規格基準・標準化推進組織	米国	The American Society of Mechanical Engineers（ASME）	米国機械学会では、医療機器向けの規格V&V 40を策定している。デジタルツインの分野でも、V&V 40の重要性は高く、コンピューターモデリングの信頼性を確保するために広く適用されている。
	欧州	Avicenna Alliance	コンピューターモデリングとシミュレーション（インシリコ法）の規制と普及を提唱する組織。デジタルツインの概念や定義、その実装に関するガイドラインの策定している。米ASMEが策定したV&V 40を参考に、欧州におけるデジタルツインの検証・妥当性確認の枠組みを整備している。
病院・研究機関	米国	Cleveland Clinic	2023年2月、米国NIHの助成金（314万ドル）を活用し、25万人以上の電子カルテ情報に基づき地域間の健康格差を分析・改善するモデル“Digital Twin Neighborhoods”を開発中。また、心臓手術の計画や患者モニタリングにデジタルツインを活用している。
	米国	Johns Hopkins	患者の心臓の仮想レプリカを作成する、「遺伝子型特異的デジタルツイン（Genotype-specific digital twin : Geno-DT）」を開発。また、心臓手術や小児外科手術の計画にデジタルツイン技術を導入している。
	スウェーデン	Karolinska Institute	2024年3月、自己免疫疾患の治療において、個々の患者のデジタルツインを用いて、最適な薬を見つける方法を開発。
	シンガポール	Singapore General Hospital	スマートホスピタル戦略の一環でデジタルツインの構築を行っている。4次元疾病発生監視システム（4D-DOSS）プロジェクトを推進。これは、病院内の物理的空間のデジタルレプリカ上に患者の臨床データ、検査結果、移動履歴などを統合するシステム。
	シンガポール	Changi General Hospital	報道によると、救急部門での人員配置とリソースのニーズを予測し、ワークフローの再設計を支援するデジタルツインモデルを構築中。
企業	オランダ	Phillips	CT、MRI、超音波診断装置などの医療機器について、詳細なデジタルモデルを構築し、シミュレーションを行うことで、機器の設計や性能評価に活用している。また、患者のデータを収集・分析し、デジタルツインモデルと連携させることで、個別化された診断や治療計画の立案を目指している。
	ドイツ	Siemens Healthineers	心臓モデルを開発。詳細な3Dモデルに基づいたシミュレーションを行うことができ、診断や治療計画に活用できる。本モデルは、「teamply」と呼ばれるプラットフォームに統合されており、他のベンダーのソフトウェアとも連携できる仕組み。
	フランス	Dassault Systèmes	心臓モデルの「Living Heart Project」を推進。詳細な3Dモデルを使ってシミュレーションを行い、医療現場での活用を目指している。近年、肺や脳、腎臓などの他の臓器モデルの開発にも取り組んでおり、病院システム全体でデジタルツインを活用する方向性を示している。
	英国	AnyLogic	NHS傘下の2病院（Cheltenham General HospitalとGloucestershire Royal Hospital）を対象に病院デジタルツインプロジェクトを実施。病院運営をシミュレーションすることで、リソースの最適化や患者の待ち時間が短縮された。
	米国	ANSYS（Synopsys傘下）	シミュレーション技術の強みを活かし、医療機器や患者の生体モデルの開発に取り組んでいる。特に、心臓や血管、呼吸器系などの生体モデルの構築に長けている。
	フランス	Sim&Cure	脳動脈瘤の治療計画立案に関するデジタルツイン技術を開発。具体的には、患者の画像データをもとに3Dモデルを構築し、シミュレーションを行うことで、最適な治療法や手術手順の検討を行うことができる。

出所：専門家インタビュー、各社ウェブサイトから三井物産戦略研究所作成

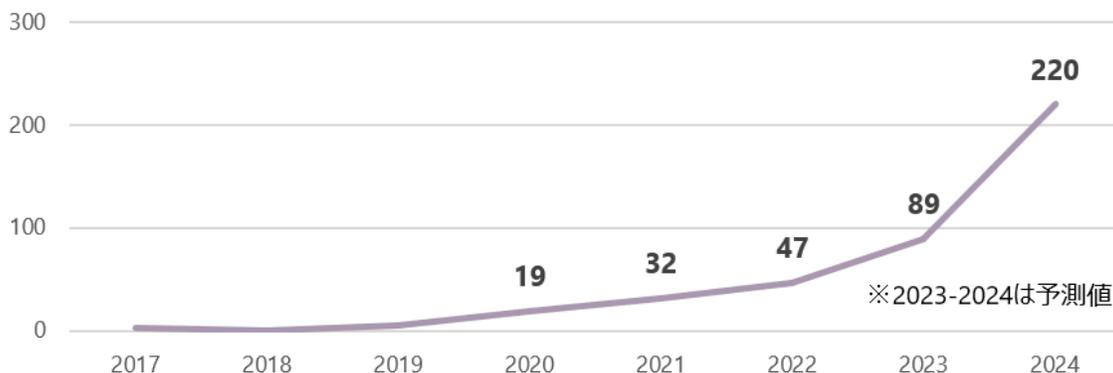
### 3. 今後の展望

スマートホスピタルへのデジタルツイン導入は、利用目的を明確にし、小規模な実証実験を重ねながら進展していくと考えられる。精度の高いデジタルツインを構築するには、最先端のデジタル技術の統合が不可欠で、データの質や信頼性の確保が成功の鍵を握る。特に、膨大なデータ量と高コストを伴う病院全体やヒト全体の構築は課題が多い。各病院が組織や臓器単位でデジタルツインを構築し、共通プラットフォームで共有する仕組みが求められる。病院は実証の場にとどまらず、データ提供者としても重要な役割を担う。将来的には、デジタルツイン活用により「病院内のリアリティの共有<sup>39</sup>」が進むことで、縦割り構造や階層的組織の変革が期待される。また、患者ごとのデジタルツイン構築で個別化ケアの進展が見込まれる。長期的には、モノとプロセス両方のデジタルツインが融合することで、治療戦略に基づいた病院機能の強化が実現するだろう。デジタルツインは、製薬分野の臨床試験効率化など多方面での活用も見込まれる。一方、プライバシー保護や透明性確保など倫理的課題への対応が重要となる。

## スマートホスピタルに関する知財分析

スマートホスピタルに関する知財分析として、デジタルツインの医療への適用に関する特許データを抽出し、技術をめぐる状況を分析した。分析対象は、グローバル特許検索ツールPatSnapを用いて検索した、2017年から2024年出願の211件（ファミリー件数）である。

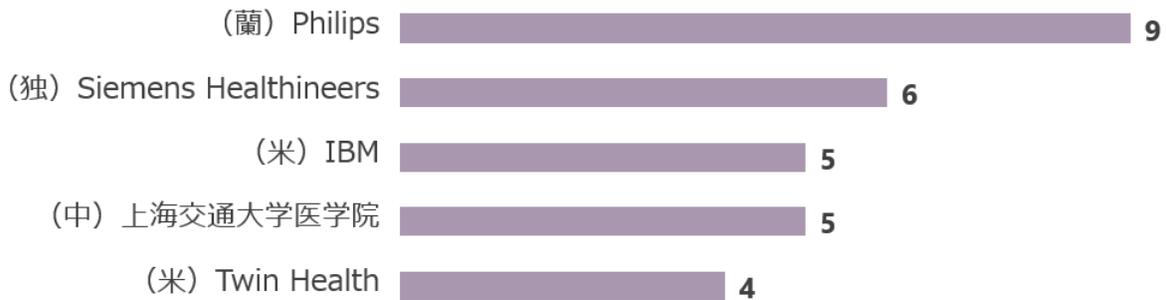
図表5：デジタルツイン×医療技術に関する特許出願件数/年



出所：三井物産戦略研究所作成

<sup>39</sup> リアリティの共有とは、医療環境の状況をデジタル上でリアルタイムかつ正確に再現し、それを関係者全員が共有すること。

図表6：出願人別件数上位ランキング（2017年-2024年）



出所：三井物産戦略研究所作成

図表5に示すように、転換点は2020年にあり、出願数が急増している。この成長トレンドは継続しており、イノベーションの加速に起因して特許取得競争が激化している様子がうかがえる。図表6に示すように、主要出願人としては、ヘルスケア分野の大企業（Philips、Siemens Healthineers）、IT企業（IBM）、学術機関（上海交通大学医学院）、新興企業（Twin Health）が挙げられ、多様な主体によって技術開発が推進されていることがわかる。この動向は、技術開発が特定の国や企業に集中するのではなく、世界中で幅広く進行していることを示している。

図表7：発明カテゴリ分類

発明カテゴリ	カテゴリ説明	件数
診断支援・治療支援	患者の仮想モデルを作成し、診断・治療プロセスをシミュレーションする	76
医療機器の管理・最適化	医療機器の仮想モデルを用いて、運用状況のシミュレーションや故障予測を実現する	48
リハビリテーション・運動補助	患者の身体動作をデジタルツインに反映し、進捗や効果を可視化する	26
仮想医療サービス	仮想患者モデルを用いて治療効果を予測し、リモートモニタリングを可能とする	13
教育・トレーニング	仮想的な病院や手術環境を構築し、リアルな訓練シナリオを提供する	12

出所：三井物産戦略研究所作成

デジタルツインの医療への適用に関する特許データを、発明カテゴリ別に分類すると図表7のようになる。診断支援・治療支援に関する発明が最も多く、デジタルツインを活用して治療効果を予測し、治療プランのカスタマイズを可能にするシステム、がん予後の予測を支援するなど治療の個別化に関する技術、体温

制御や安全管理など人体や作業環境を仮想的に再現して最適化を図るシミュレーション技術などが含まれる。

特許データからは、デジタルツイン技術が医療分野の具体的な課題（個別化、効率化、精度向上、地域格差など）を解決するための多様なアプローチを示していることが読み取れる。さらに新興国に特許が出願されていることから、新興国市場における医療の質の向上や、先進国との医療格差の縮小にデジタルツイン技術の活用が寄与することが期待される。

**加藤 貴子** Takako Kato / 主席研究員

専門分野：医療・ヘルスケア、ウェルネス、バイオテクノロジー

**松浦 由依** Yui Matsuura / シニアアナリスト

専門分野：知的財産権、知財コンサルティング

# 標的タンパク質分解誘導（TPD）技術

—難治性疾患に対する新たな治療法を提供—

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部

執筆：インダストリーイノベーション室 戸口 侑

知財分析：知的財産室 松浦 由依

**Biz Tech フォーカス 2025**

## なぜこの技術を取り上げるのか

TPD (Targeted Protein Degradation) 技術は、従来の低分子医薬や抗体医薬では標的化が困難であった「アンドラッグアブル (undruggable) <sup>40</sup>」な分子に対し、創薬の可能性を広げるとして注目を集めている。TPD技術の一つであるPROTAC (Proteolysis Targeting Chimeras) は、複数の候補品が臨床試験に進んでおり、新薬の上市（社会実装）が近づいている。本稿では、TPD技術の背景、メカニズムを解説するとともに、企業動向や課題、そして創薬における意義について論じる。

## Summary

- TPD技術を活用した創薬の臨床試験の進展や規制整備により、技術の実用化が近づいている。
- 技術の進展に伴い、低分子化合物や低分子医薬品への関心が高まり、効率的な創薬が期待される。
- 低分子化合物による経口薬の開発は、治療継続率の向上と患者負担の軽減により、慢性疾患治療の改善が見込まれる。

## 1. TPD（標的タンパク質分解誘導）技術とは

TPD (Targeted Protein Degradation) 技術は、細胞内で対象のタンパク質を選択的に分解し、その機能を制御する新しい創薬技術である。2001年に初めてカリフォルニア工科大学で開発された本技術は、従来の薬では標的にするのが困難だったアンドラッグアブルなタンパク質にもアプローチ可能な特徴を有する<sup>41</sup>。

これまで治療では、薬剤が結合しやすい「ポケット」を持つタンパク質が中心で、このポケットに薬剤が結合することで作用を発揮する酵素タンパク質や受容体タンパク質が、主に対象とされてきた。一方で、アンドラッグアブルとされるタンパク質は、分子構造上、薬剤が結合するためのポケットがない、または極めて小さいため、創薬の対象から外れてきた。このようなタンパク質は、タンパク質全体の約80%を占め、治療が困難な疾患に関連する重要なタンパク質も多い<sup>42, 43</sup>。TPD技術は、これらのタンパク質を分解することで、がんや免疫疾患への新たな治療の可能性を提供し、次世代の医薬品開発を支える基盤技術として期待されている。

<sup>40</sup> アンドラッグアブル (undruggable) とは、従来の創薬技術では標的化が困難または不可能と考えられてきた分子、またはその概念を指す。標的分子の構造や機能の特性上、従来型の低分子医薬品や抗体医薬品では効果的に作用できないもの含まれる (*Nature Digest* 12, 7 (2015))。

<sup>41</sup> *Proc. Natl. Acad. Sci.* 98, 15 (2001)

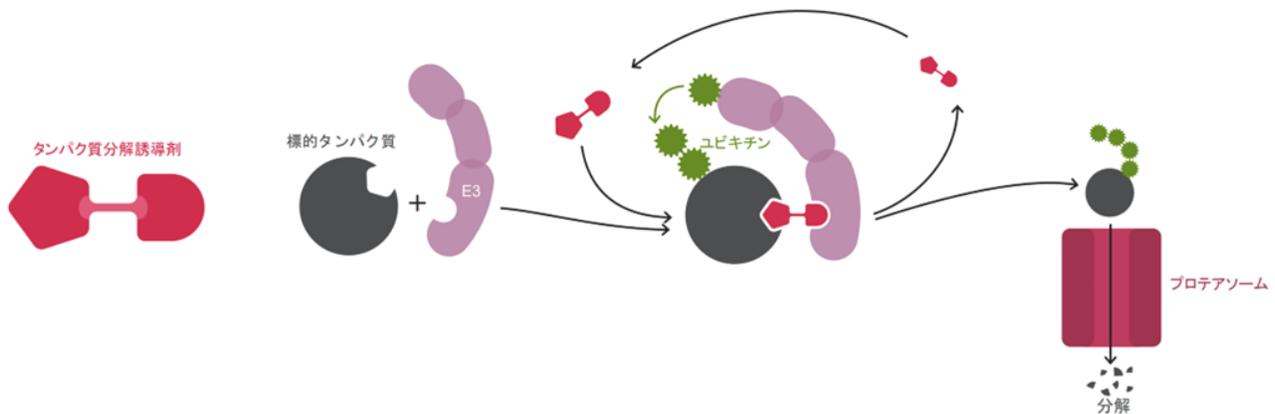
<sup>42</sup> アステラス製薬 R&Dミーティング (2022/12/9)

<sup>43</sup> *Harvey Lect.* 102 (2006)

1-1. TPD技術のメカニズム

TPD技術は、細胞が持つ「タンパク質分解システム」を活用した治療手法の総称であり、対象のタンパク質を選択的に分解することで、その機能を制御する。代表的な例として、PROTAC (Proteolysis Targeting Chimeras) が挙げられる (図表1)。PROTACでは、タンパク質分解誘導剤が、対象のタンパク質 (標的タンパク質) と分解の目印であるユビキチンを付加する役割を持つE3タンパク質を結びつける。この作用により、標的タンパク質にユビキチンが付加されると、標的タンパク質は細胞内の分解工場 (プロテアソーム) に送られて分解される。薬剤は触媒的に作用するため、ユビキチンを付加するために繰り返し利用され、タンパク質を効率よく分解することが可能である。

図表1 : PROTACによる標的タンパク質分解のメカニズム



出所 : アステラス製薬 R&Dミーティング(2022/12/9)

1-2. TPD技術の主要なアプローチ

TPD技術には、タンパク質の分解を誘導するさまざまな手法が存在する。それぞれ、メカニズムや適用範囲に特徴があり、治療対象や課題に応じて最適な手法が選択されている (図表2)。

図表2 : TPD技術の主要な手法

手法	メカニズム	特徴
<b>PROTAC</b> (Proteolysis Targeting Chimeras)	標的タンパク質にユビキチンを付加し、プロテアソームで分解	- アンドラッグアブルなタンパク質など広範なタンパク質に対応可能 - 触媒的に作用し、少量の薬剤で繰り返し分解を誘導
<b>分子グルー</b> (Molecular Glue)	小分子が標的タンパク質とE3タンパク質を結びつけ、分解	- 単一分子で分子間の接着剤として作用 - シンプルな設計で特定のタンパク質に作用
<b>LYTAC</b> (Lysosome Targeting Chimeras)	標的タンパク質をリソソーム (細胞内分解装置) に送り込み、分解する仕組みを活用	- 主に膜タンパク質や細胞外タンパク質を対象 - プロテアソームを介さず、リソソームを利用
<b>AUTAC</b> (Autophagy Targeting Chimeras)	オートファジー (細胞の自己分解機構) を利用し、異常タンパク質を分解	- 異常タンパク質や凝集体を対象

出所 : *Signal Transduction and Targeted Therapy* 7, 113 (2022) 、*Signal Transduction and Targeted Therapy* 9, 308 (2024)から三井物産戦略研究所作成

## 2. 注目すべき動向

### 2-1. 主要企業の戦略とパイプライン

近年、TPD技術を活用した医薬品の開発が進展し、PROTACをはじめとする複数の治療薬が臨床試験段階に進んでいる。TPD技術の特許出願動向は、PROTACを中心に2020年以降大きく増加している。多くの製薬企業やバイオテクノロジー企業が、がんや免疫疾患など治療が難しかった疾患に対する新しい治療法を目指し、TPD技術を活用している（図表3）。

注目すべきは、本技術をリードする（米）Arvinas社である。同社が（米）Pfizer社と共同開発している乳がんを対象とした医薬品候補ARV-471は、既にPhase1および2で有望な結果が得られている。同社のCSOであるCacase氏は、2025年初頭にPhase3試験の主要な結果を公表予定と述べており、本技術を用いた医薬品の初の上市が期待される<sup>44</sup>。

図表3：TPD技術に注力する主要企業の戦略と開発パイプライン

企業	注力手法	戦略動向	主なパイプライン/Phase	主な治療領域
（米）Arvinas	PROTAC	Pfizerや、Novartisなどの大手製薬企業との提携を通じた市場シェア拡大	ARV-471（乳がん/P3） ARV-110（前立腺がん/P2）	がん
（米）C4 Therapeutics	分子グループ PROTAC	独自の分解誘導技術プラットフォームを活用	CFT7455（多発性骨髄腫/P1） CFT8634（軟部肉腫/P1）	がん
（米）Kymera Therapeutics	PROTAC	免疫系疾患への適用を拡大、（仏）Sanofiと連携	KT-474（アトピー性皮膚炎/P2） KT-413（血液がん/P1）	免疫、がん
（米）Monte Rosa Therapeutics	分子グループ	がんの原因遺伝子を標的化	MRT-2359（血液がん/P1）	がん
（日）アステラス製薬	PROTAC	重点テーマに設定、強みを活かした実用化を目指す	ASP-3082（固形がん/P1）	がん
（スイス）Novartis	PROTAC 分子グループ	ArvinasやMonte Rosa Therapeuticsと提携 内部技術基盤の強化	DYK709（固形がん/P1）	がん
（米）Nurix Therapeutics	PROTAC	幅広い適応症への展開を図る	NX-5948（B細胞リンパ腫/P1） NX-1607（固形腫瘍/P1）	がん
（米）Foghorn Therapeutics	PROTAC	遺伝子発現制御に関するエピジェネティクスの知見を活かした開発を推進	FHD-609（軟部肉腫/P1）	がん

出所：Frost&Sullivan「Top 5 Growth Opportunities for the Pharmaceutical Industry, 2024」、*Nature Medicine* 30, 3030-3031 (2024)、*Signal Transduction and Targeted Therapy* 9, 308 (2024)、各社HP（2024年12月4日最終閲覧）から三井物産戦略研究所作成

<sup>44</sup> *Nature Medicine* 30, 11 (2024)

## 2-2. 規制緩和と市場動向、課題

TPD技術を活用した新薬の開発は、規制の緩和により、実用化に向けた環境が大きく改善されている。特に、米国FDAの迅速承認プログラムである「Breakthrough Therapy」や「Fast Track」に選定されるケースが増加しており、承認プロセスが加速している。これにより、新薬の迅速な実用化が進み、患者への治療提供までの期間が短縮されつつある。また、製薬企業間の提携も活発化しており、特に大手企業とTPD技術を有するバイオベンチャーとの協業が増加している点は、この分野への注目の高さを示している。

一方で、課題も残されている。現在、米国では安全性評価基準が見直されており、医薬品が本来の標的以外のタンパク質にも作用してしまう「オフターゲット効果」が課題とされている。この課題を克服することで、実用化がさらに拡大し、多様な疾患への応用が一層進むと期待される。

## 3. 今後の展望

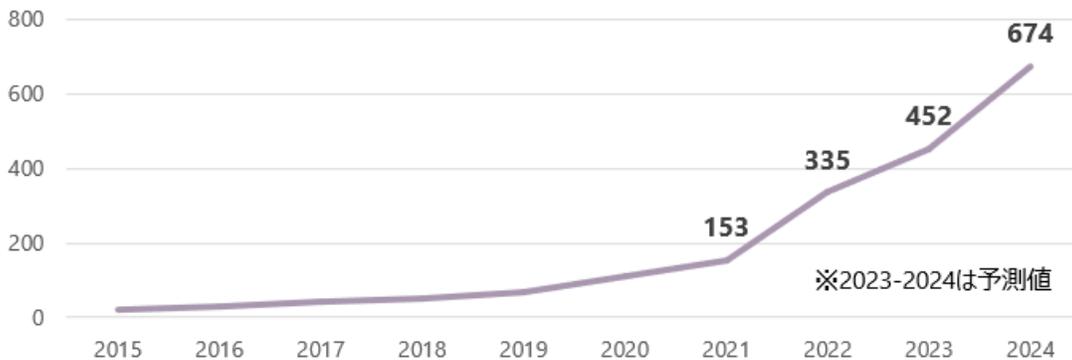
TPD技術は、アンドラッグブルなタンパク質を対象にできる点で、医薬品開発における新たな可能性を切り開いている。今後、本技術が進展し、より多くの疾患に適用範囲が広がっていくことで、バイオ医薬品を中心とした中分子・高分子創薬が主流になっている現在の流れに対し、変化をもたらすだろう。低分子を活用するTPD技術により、低分子医薬品や低分子化合物ライブラリーに再び注目が集まる可能性があると考えられる。また、AIを活用した分子スクリーニングやタンパク質の特性解析においては、低分子化合物は研究データが豊富で計算処理も比較的容易なため、バイオ医薬品に比べてAI創薬プロセスへの適用が進めやすい。

さらに、TPD技術を活用した治療薬は、患者視点でも大きな利点がある。多くの低分子医薬品は、経口薬として開発されるため、注射や点滴が必要なバイオ医薬品に比べて患者の負担を軽減することができる。特に、慢性疾患や長期間の治療が必要な場合、自宅で服用可能な経口薬の利便性が、治療の継続率向上に寄与する点は大きい。TPD技術は、難治性疾患に対する新たな治療法を提供し、医療経済の効率化や患者の生活の質（QOL）向上に寄与する重要な基盤技術として、医療の進歩を支える重要な役割を果たしていくだろう。

## TPD技術に関する知財分析

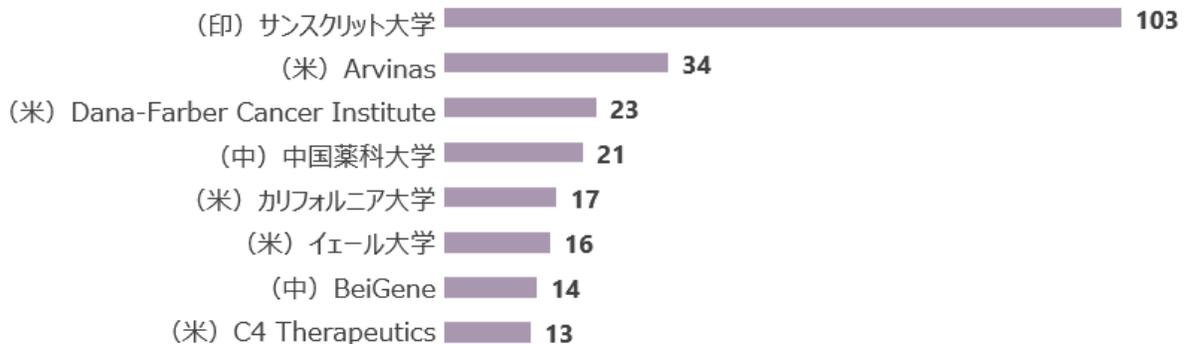
TPD技術に関する知財分析として、当該技術に関する特許データを抽出し、技術をめぐる状況を分析した。分析対象は、グローバル特許検索ツールPatSnapを用いて検索した、2015年から2024年出願の1,359件（ファミリー件数）である。

図表4：TPD技術に関する特許出願件数/年



出所：三井物産戦略研究所作成

図表5：出願人別件数上位ランキング（2015年-2024年）



出所：三井物産戦略研究所作成

図表4に示すように、2015年から2019年は年平均成長率：約30%と比較的緩やかに増加していた出願件数が、2020年以降は年平均成長率：約57%と急激に増加している。2020年以降の急増の要因として、新規プレイヤーの参入、既存プレイヤーの知財戦略強化などが考えられる。図表5に示す主要出願人のうち、サンスクリット大学やBeiGeneは2020年以降に登場している。これらの新規プレイヤーは、中国やインドにおける地域的な競争の活発化を裏付けている。Arvinasは全期間で出願活動を継続するが、2019年までに7件の出願、2020年以降に27件の出願と、知財活動を明らかに強化している。

図表6：主要出願人の注力分野（2015年-2024年）

出願人	注力分野	主な出願国	特徴
サンスクリット大学	タンパク質の標的デザインや薬物結合部位の探索 医薬品化学や分子モデリングに関連する技術開発	インド	学術研究に重点を置き、インド国内での技術リードを目指す
Arvinas	PROTAC がん治療やホルモン受容体関連の医薬品開発	米国、欧州、日本、中国、 オーストラリア、ブラジル、 カナダ、インド	競争力を強化するため、特許ポートフォリオを積極的に拡大
Dana-Farber Cancer Institute	がん治療を目的とした基礎研究と臨床応用技術 TPD技術を活用した新規治療法の開発	米国、欧州、オーストラリア、 カナダ、中国、日本	アジアや欧州でも市場を視野に入れ、多様な地域に出願
中国薬科大学	ユビキチンリガーゼを活用した医薬品開発 肝疾患や感染症の治療薬研究	中国	国内医療ニーズに特化した応用研究が多く、基礎研究寄り
カリフォルニア大学	免疫機能に関連するWASPタンパク質やオリゴマーに 関連する基礎研究 細胞内プロセスの可視化や診断技術	米国、欧州、オーストラリア、 カナダ、中国、日本	グローバル市場での技術移転やライセンス活動も想定
イエール大学	がん治療に向けた新規タンパク質分解技術 Arvinasとの共同研究が進行中	米国、欧州、日本、中国、 オーストラリア	学術研究と産業界の連携に強み
BeiGene	がん治療薬の研究開発 タンパク質標的化合物の設計	中国、米国、台湾、欧州、 アルゼンチン、日本	グローバル展開を視野に入れた特許戦略
C4 Therapeutics	PROTAC技術を利用した生体内分解モジュレーター がん治療や炎症性疾患に対する治療法	米国、中国、欧州	多国間出願で広範な市場をカバー

出所：三井物産戦略研究所作成

図表6に主要出願人の注力分野と特許出願の特徴をまとめた。サンスクリット大学や中国薬科大学は、国内市場を重視し、ローカルニーズに合わせた技術開発を進めている。米国企業およびBeiGeneは、国内市場を押さえつつ、欧州、日本、中国などグローバル市場への展開も強化している。イエール大学およびカリフォルニア大学は、学術研究を基盤にしなが、産業界との強い連携が確認できる。たとえば、イエール大学はArvinasとの共同出願が確認でき、イエール大学の研究成果であるPROTAC技術を基に、Arvinasが実用化や商業化を目指している例として、典型的な産学連携の成功例といえる。

特許データからは、Arvinas、C4 Therapeuticsなどの米国企業がAIを活用してTPD技術を発展させていることも確認できる。AI技術の活用により分子設計や薬理モデリングが進化し、新しい治療標的や効率的な分子設計が実現されることが期待される。

戸口 侑 Yu Toguchi / プロジェクトマネージャー

専門分野：医療・ヘルスケア、ウェルネス、Web3・ブロックチェーン

松浦 由依 Yui Matsuura / シニアアナリスト

専門分野：知的財産権、知財コンサルティング

# 半固体電池技術

## — 固体電解質、高性能負極など全固体電池向け技術の開発を後押し —

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部

執筆：コンシューマーイノベーション室 趙 健

知財分析：知的財産室 石黒 隆介

**Biz Tech フォーカス 2025**

### なぜこの技術を取り上げるのか

可燃性電解液を使用する液系リチウムイオン電池（以降LIB）と全固体電池の中間に位置する半固体電池は、液系LIBより高い安全性とエネルギー密度を備えながら、量産のハードルが全固体電池ほど高くないため、全固体電池が実用化されるまでのつなぎ役として世界中の電池企業が実装を図っている。半固体電池の実装は固体電解質や高性能正極、負極の開発と実装を促し、全固体電池開発の後押しとなるだけでなく、性能とコスト次第では、つなぎ役にとどまらずシェアを拡大する可能性を秘めている。

### Summary

- 固体電解質および高性能負極の使用により、半固体LIBのエネルギー密度は液系LIBの限界とされる300Wh/kgを超える。既存液系LIB製造ラインで製造が可能のため、量産のハードルも低い。
- 中国企業の多くはEVへの搭載に向けて酸化物系固体電解質を採用する半固体電池を開発している。米国など一部の次世代電池スタートアップは航空向けなど高付加価値需要を狙い、半固体電池の開発に参入。

## 1. 半固体電池技術とは

### 1-1. 半固体電池とは

半固体電池の定義は明確に存在していない。図表1に示すとおり、一般的に液体電解質と固体電解質の両方を使用する固液混合型と、電解質や電極材料をゲル化またはクレイ状にするゲルポリマー型・クレイ型に分けられる。

**図表1：半固体電池の定義と分類**

分類	定義	特徴	代表企業
固液混合型	正極側と負極側で異なる電解質を用いる技術（例えば、負極側に固体電解質、正極側に液体電解質をそれぞれ用いたもの）	高性能負極の使用が可能のため高いエネルギー密度が実現可能。安全性が高くなるほか、既存液系LIBの製造技術が活用できる	(中) WELION、 (米) SES AI
ゲルポリマー型・クレイ型	従来の電解質をゲル化したもの、または正極や負極の電極材料に電解液を練り込んだ粘土（クレイ）状の材料を用いたもの	流動性を下げることで従来の液系電池より液漏れや発火のリスクを抑制できる	(日) 京セラ、(米) 24M Technologies

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

固液混合型は既存LIBの製造工程が活用できるほか、液系LIBより高いエネルギー密度が実現可能なため、中国企業を中心にその開発と実装を図っている。ゲルポリマー・クレイ型は安全性が高いほか、原材料費低減と製造工程の簡素化に貢献する。代表的企業の(米) 24M Technologiesは、粘土状に練り上げた材料を用いた厚膜電極というシンプルな構造になっており、バインダーを不使用にしたほか、集電体やセパレータの体積も低減させることで、電池セルの単位体積当たりのエネルギー密度を高めることができた。

## 1-2. 性能と主なメリット

半固体LIBと液系LIB、全固体LIBとの主要材料と性能の比較は図表2に示す。

図表2：液系LIB、半固体LIB（注1）と全固体LIBとの比較

	液系LIB	半固体LIB	全固体LIB
正極	NMC（注2）、LFP（注3）	NMC、ハイニッケル系NMC（注4）、LFP	NMC、ハイニッケルNMC、LMR（注5）
負極	グラファイト、シリコン系	グラファイト、シリコン系、リチウム金属	グラファイト、シリコン系、リチウム金属
セパレータ	必要	必要	不要
電解液、電解質	電解液が電池重量の10%以上。リチウムイオン塩、可燃性有機溶媒、添加剤などを含む	固体電解質に一定比率（電池重量の10%未満）の電解液を配合	固体電解質（主に硫化物系、酸化物系、ポリマー系）を100%使用
エネルギー密度	～300Wh/kg	300Wh/kg～	350～500Wh/kg
電圧範囲	2.7～4.2V	2.7～4.2V	5V以上
安全性	発火リスクあり	液系より高い	最も高い
実装段階	実装済み	初期段階	2027年以降実装の予定
コスト	低い	高い	高い
メリット	技術が成熟しており、低いコストで大規模生産可能	液系LIBより性能や安全性が高く、製造は既存液系LIB製造ラインの一部が活用可能	現行液系LIBよりはるかに高い性能と安全性が実現できる
デメリット	有機電解液を使用するため、発火リスクがあり、エネルギー密度も限界に近づいている	性能は全固体電池に劣るほか、発火リスクの根本的な解決に至らない	より性能の高い新規材料が開発中。製法も液系LIBと異なるため、大規模量産技術は確立途中

注1 固液混合型を例として

注2 NMC：ニッケル（Ni）、マンガン（Mn）、コバルト（Co）を主成分とする三元系正極

注3 LFP：リン酸鉄リチウム（LiFePO<sub>4</sub>）正極

注4 ハイニッケルNMC：ニッケルの配合比率が高い三元系正極

注5 LMR：リチウム過剰系マンガンベース酸化物正極（Lithium-rich manganese-based cathode）

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

一般的に電解液含有量が電池重量の10%以下のものが半固体とされる。半固体LIBは電解液の使用減少で発火リスクを抑えるほか、固体電解質および高性能負極の使用により、エネルギー密度は液系LIBの限界とされる300Wh/kgを超えられると見られる。また、既存液系LIB製造ラインで製造が可能のため、量産が容易である。一方、半固体LIBはわずかながら可燃性有機溶媒を含む電解液を使用するため、電池が異常に発熱する時などの発火リスクをゼロにできないほか、固体電解質と高性能負極材料の採用によるコスト増加は普及のボトルネックになるだろう。例えば中国の新興EVメーカーNI0が採用した半固体LIBパッケージのコストは1.7～2.2元/Wh（約36～46円/Wh<sup>45</sup>）と試算され、主流のNMCの約0.73元/Wh（約15円/Wh）より遥かに高いため、NI0は販売せず、レンタル方式のみで顧客に提供する。

<sup>45</sup> 為替レート：1元=21円

## 2. 注目すべき動向

2024年現在、多くの中国企業と一部米国、韓国の企業が半固体LIBの実装計画を発表している（図表3）。

図表3：主要企業の半固体電池開発状況

電池メーカー	量産時期	主要部材			セルエネルギー密度 (Wh/kg)	EV向け電池パックの開発状況		
		正極	負極	電解質		容量 (kWh)	航続距離 (km)	提携企業など
(中) WELION	2023年	ハイニッケル NMC	Si/C負極	酸化物系とポリマー系	360	150	1,000	中国新興系EVメーカーNIO製ハイクラス車種ET7に搭載
	2025年	ハイニッケル NMC	Si/C負極	酸化物系とポリマー系	300	n/a	600~1,000	中国国有自動車中堅メーカーJAC傘下のEV子会社鐘威科技の新規車種に搭載する予定
(中) GanFeng Lithium	2023年	NMC	黒鉛	酸化物系	240~270	90	530	(中) SERES製輸出EV車種に搭載
	未定	NMC	Li金属	酸化物系	400	n/a	n/a	同社が研究開発中の第二世代半固体電池となる
(中) 清陶能源	2024年	ハイニッケル NMC	Si/C負極	酸化物系とポリマー系	368	130	1,000	(中) 上海汽車製智己L6に搭載。酸化物系+ハロゲン物+ポリマー系電解質を採用する第二世代を開発中
(中) 東風汽車	2025年	NMC	黒鉛	酸化物系	350	n/a	n/a	自社車両に実装する予定
	未定	ハイニッケル NMC	Li金属	不明	405	n/a	n/a	
(中) FARASIS	2025年	NMC	Si/C負極	不明	300~400	n/a	n/a	(中) 第一汽車、(中) JACとともに戦略提携
(米) 24M Technologies	2025年	NMC	Si系/Li金属	不明	391	n/a	1,600	独自開発のドライ電極、セルとパッケージ技術、セパレーターと電解質の組み合わせ
(米) QuantumScape	2025年	LFP/NMC	Li金属	酸化物セラミック	300	n/a	n/a	(独) フォルクスワーゲンとともに量産を図っている
(米) Enpower Greentech	2025年	NMC	Li金属	硫化物系	292~320	n/a	n/a	産業用、ドローン、eVTOL (注) やその他用途向け
(韓) LG Energy Solution	2026~2027年	不明	不明	酸化物系とポリマー系	n/a	n/a	n/a	パイボラ構造を採用する
(中) SVOLT	2026年	NMC	黒鉛	硫化物系	266	n/a	n/a	大容量電池パック搭載車種向け
(中) Talent New Energy	2027年	NMC	黒鉛	酸化物系	n/a	n/a	n/a	(中) 長安汽車とともに開発
(イスラエル) StoreDot	2028年	ハイニッケル NMC	Si系	有機・無機複合固体電解質	400	n/a	n/a	(典) Polestarと共同開発。3分の充電で100マイル(約160km) 走行可能を目指している
(中) Gotion	未定	NMC	黒鉛	不明	360	160	1,000	EV、eVTOL (電動垂直離着陸機) 企業と共同開発を行っているという
(中) ZENERGY	未定	NMC	Si系	不明	300~330	170	1,000	EV向けテストを行っているほか、eVTOL企業とも共同開発を行っている
(中) LISHEN	未定	ハイニッケル NMC	Si系	酸化物系	402	n/a	n/a	航続距離の長いEVやeVTOL向けに開発中

注 eVTOL：電動垂直離着陸機 (Electric Vertical Take-Off and Landing aircraft)

出所：各社公開情報から三井物産戦略研究所作成

液系LIBにおいて既に大きなシェアを握っている中国企業らは、外国企業による全固体電池のブレークスルーは液系LIBを主流製品とする市場を覆す可能性があるため、大きな脅威と見ている。しかし、中国電池企業の固体電解質開発は日本や韓国と比べて遅れており、全固体電池の実用化競争における勝算が見込みにくい。そこでまず量産ハードルが相対的に低い半固体電池の実装に対応し、技術力を引き上げながら最終的に全固体電池の実用化を実現するという二段階の戦略を取っている。また、中国企業の多くが研究開発をしている酸化物系固体電解質は、安定性と安全性が高いものの、イオン伝導率が低く、材質が硬いた

め活物質との接合加工が難しいという課題があり、全固体電池としての実用化にはまだ時間がかかる。電解液やポリマー電解質を配合する半固体電池にすれば、これらの課題への対応は容易となり、早期の実用化につながる。多くの中国企業はEVへの搭載を想定して、酸化物電解質を使用し、航続距離が液系LIBより長い半固体電池の実用化をEVメーカーらとともに図っている。

米国など一部次世代電池技術のスタートアップらは、固体電解質や高性能リチウム金属負極など自社技術の活用ができるとして、将来的な全固体電池への本格展開に備えつつ、半固体電池の開発にも参入している。開発中となる半固体電池の想定用途はEVのみならず、eVTOLなどの航空分野といった高付加価値分野への適用も視野に入れている。

一方、日本企業の技術力が世界をリードしている硫化物系固体電解質はイオン伝導率が高く、材質が柔らかいため、半固体にする必要性はほぼなく、そのまま全固体電池として実用化が図られる場合が多い。

### 3. 今後の展望

中国の市場調査会社GGIIによると、中国2024年の半固体電池出荷量はEV換算11.7万台分<sup>46</sup>に相当の7GWh（百万kWh）に、2030年までに65GWhに成長すると予想している。コスト面での課題などからシェアをどこまで拡大できるかはまだ様子を見る必要があるが、各社の取り組みは固体電解質、高性能負極など将来の全固体電池に生かせる技術の開発を促し、既存の液系LIB産業の延命にもつながるため、結果的に中国電池産業の進化にとって有益である。一方、小さな改良を積み重ねる中国勢と違って、性能面で差別化を図る欧米日電池企業にとって、高性能電池の需要創出は市場競争におけるキーとなるだろう。

また、今後の技術進歩により、半固体電池の安全性とコストパフォーマンスがさらに向上した場合、中長期的に一定の市場シェアを占めることとなり、全固体電池の実装を遅らせる可能性もある。そのため、半固体電池の実装と技術開発の動向には留意する必要がある。

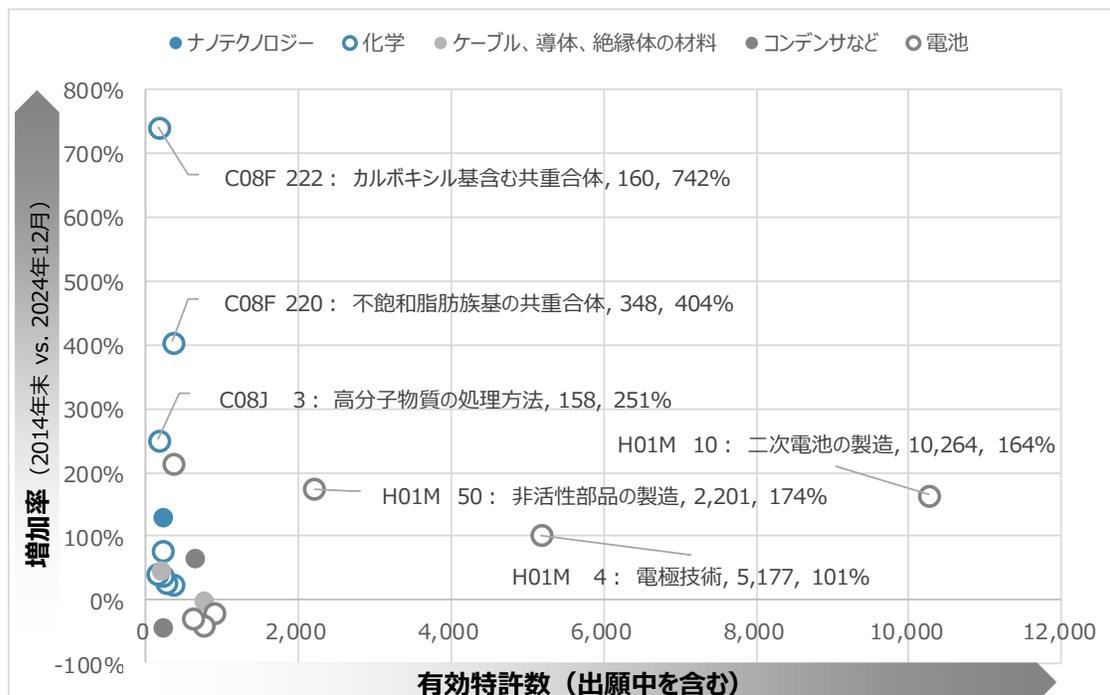
<sup>46</sup> 搭載電池パッケージ容量が60kWhとする。

## 半固体電池技術に関する知財分析

「(セミ) ポリマー」「ゲル」「電解質」などの、本技術と関連性の高いキーワードや、二次電池などに関連する技術分類コード（IPC）を特定（2024年12月時点で出願中を含む有効特許数<sup>47</sup>は11,030件）し、技術分類別、上位プレーヤー別の分析を行った。

図表4は、半固体電池関連の有効特許数とその増加率を比較した結果で、横軸が有効特許数、縦軸が2024年12月時点と2014年末時点での特許数を比較した増加率を表している。この結果から、二次電池や電極を中心に注目が強まっていることが明らかとなった。

図表4：有効特許数、増加率（技術分類別）

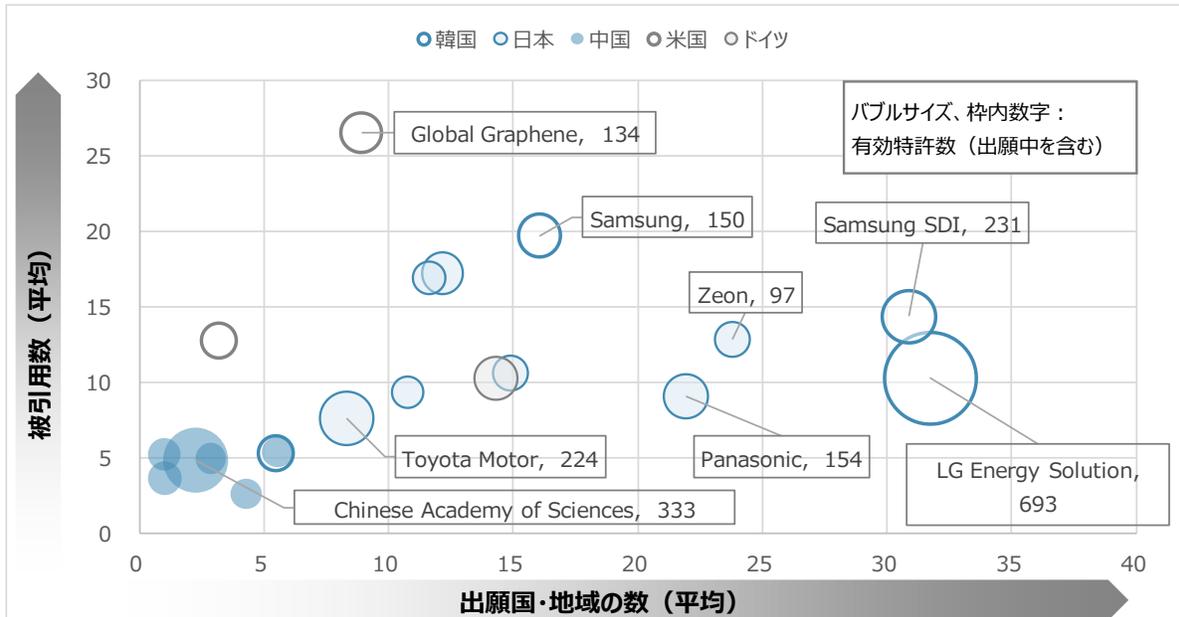


出所：LexisNexis PatentSightのデータから三井物産戦略研究所作成

図表5は、半固体電池関連の特許数における上位プレーヤーを比較した結果で、バブルサイズが有効特許数、横軸が出願国や地域の数の平均値、縦軸が技術影響度の大きさを示す被引用数の平均値を表している。この結果から、(韓) LG Energy Solutionが、特許数で2位に大きく差を付けてトップに立ち、同社の研究開発投資の積極性が明らかとなった。また、同社は、バッテリー技術における、特許権保護、特許侵害の取り締まりの強化や、公正な特許ライセンスの提供を目的とした特許プールを主導するなどの知財活動にも力を入れている。

<sup>47</sup> 出願された特許、および審査を経て特許権としての権利行使が可能な状態にある特許の総数。

図表 5 : 有効特許数、出願国・地域数、被引用数（上位プレーヤー別）



出所 : LexisNexis PatentSightのデータから三井物産戦略研究所作成

**趙 健** Jian Zhao / シニアプロジェクトマネージャー  
 専門分野 : 電力・エネルギー、インフラ・都市、SDGs

**石黒 隆介** Ryusuke Ishiguro / シニアマネージャー  
 専門分野 : 知的財産権、知財コンサルティング

# チップレット

## —新たな半導体の構造が変える競争環境—

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部

執筆：インダストリーイノベーション室 小川 玲奈

知財分析：知的財産室 石黒 隆介

**Biz Tech フォーカス 2025**

### なぜこの技術を取り上げるのか

2024年に入り、(米) Intelの生成AI向け半導体「Gaudi 3」や(米) Appleのヘッドセット「Apple Vision Pro」用半導体R1(台) TSMC製造)など、チップレット技術の進展を反映した製品の発表が相次いだ。

8月のUCIe 2.0仕様リリースにより、(英) ARM、Intel、TSMCのグループ会社ら主要プレーヤー賛同の下でダイ間・チップレット間の接続仕様が整ったことから、本技術採用の障壁が下がり、本格的な普及が始まるタイミングだと考えられる。

### Summary

- 求められる機能と価格のバランスにおいて、ハイパフォーマンスコンピューティングを皮切りに、チップレット技術の普及が進んでいる。
- チップレット技術は、標準化と業協による発展を志向しており、これによるサプライチェーンの変化や新規参入による非線形的な成長機会が設計・前工程起点で生まれつつある。

## 1. チップレットとは

チップレットは半導体業界の標準として、IEEE<sup>48</sup>により次のように定義されている：「パッケージの種類ではなく、パッケージング構造の一部である。より大きく、複雑な集積回路<sup>49</sup>を形成するために、他のチップレットと情報のやりとりを行うことを前提に設計された半導体集積回路ブロック」<sup>50</sup>。定義だけではイメージし難いと思われるので、定義についての補足説明を行いながら、チップレットに至るまでの経緯を説明する。

### 1-1. 半導体集積回路ブロックとSoC<sup>51</sup>

特定の機能を実現するための集積回路のまとまりを、半導体集積回路ブロックと呼ぶ。従来のスマートフォンで半導体を実現している機能の例を挙げると、ネットや電話の利用に不可欠な通信、情報の保存(メモリ)、情報処理(プロセッサ)などがある。サイズや通信の遅延の重要度が比較的低い用途では、それぞれの半導体集積回路ブロックが個別にパッケージングされたものが電子基板の上に載せられている

<sup>48</sup> エレクトロニクス全般に関する研究を目的とする世界最大規模の電気・電子関係の技術者が集まる非営利団体。IEEEはThe Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.の略で、日本語名称は電気電子学会。

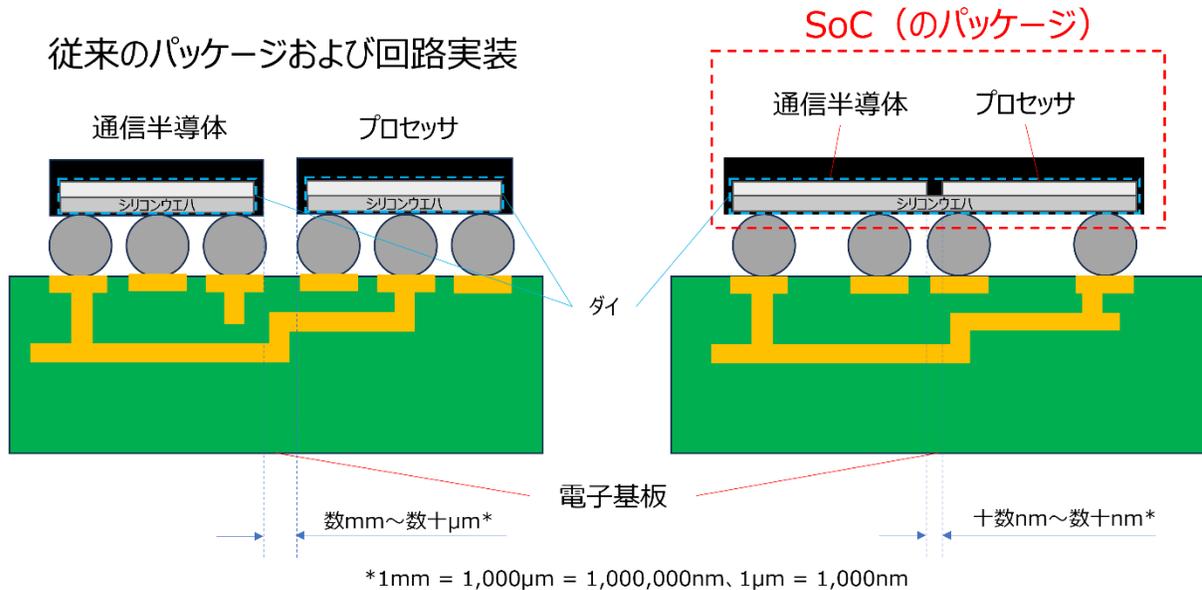
<sup>49</sup> 電子情報技術産業協会(JEITA)は「大きさ数mm~十数mm角のシリコン(Si)上に、トランジスタやダイオード、抵抗、コンデンサなどの回路素子を作り込み、それぞれの素子間を相互に配線することで、ある機能を持った電子回路として機能させるもの」と定義しており(出所)本稿でもこの説明に準じて使用する。

<sup>50</sup> IEEE EPS (Electronics Packaging Society: IEEEの専門分科会のうちの一つ) ウェブサイト [Chiplet Definition](#)

<sup>51</sup> System-on-Chipの略

(図表1の左図)。しかし、スマートフォンなどのようにサイズや高速処理を重視する用途では、半導体の微細化の進展で、半導体集積回路ブロック間の通信距離（速度）が性能向上のボトルネックとなり、それぞれの機能をより緊密に連携させる必要が生じてきた。そこで普及したのが、異なる機能の半導体集積回路ブロックを同じシリコンウエハ上で作り込むSoCである（図表1の右図）。

図表1：従来のパッケージおよび実装回路とSoCのイメージ



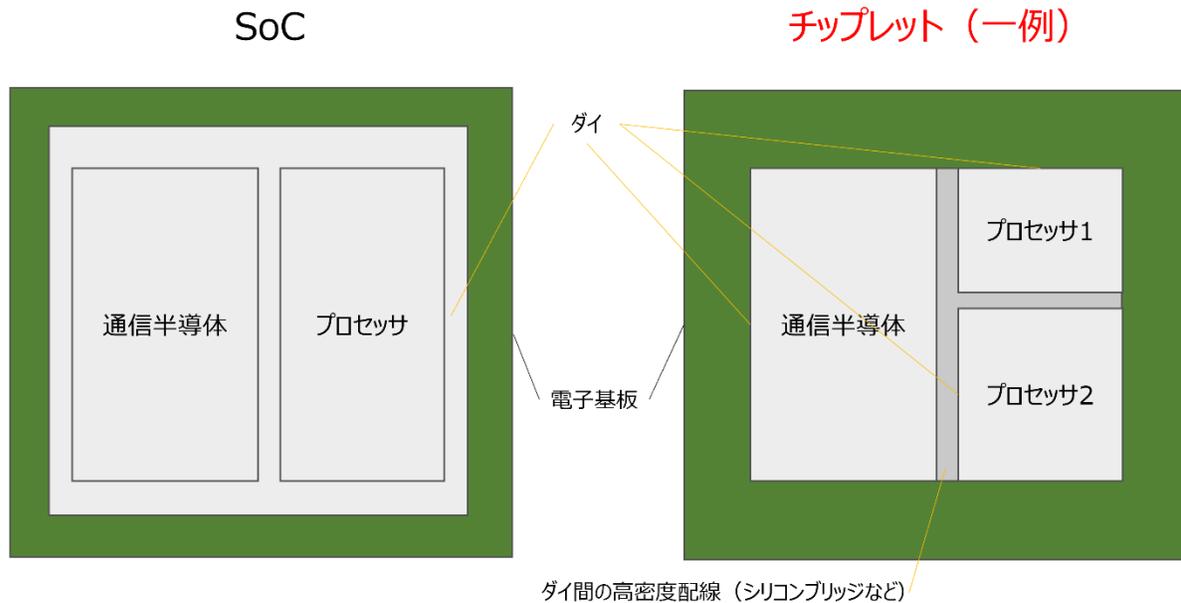
出所：各種情報から三井物産戦略研究所作成

### 1-2. SoCからチップレットへ

SoCがすべての機能を一つのダイ<sup>52</sup>に統合するのに対して、チップレットは機能ごとに分割して製造されたダイをSoCの通信距離に近いスケールの高密度配線をつなげるモジュール型である（図表2）。

<sup>52</sup> 本稿では、チップレット誕生前から存在する名称であるダイという語彙（ごい）を採用した。Intelは、チップレットを構成するダイを「タイル」と呼び（一例）、IEEEやアカデミア（一例）などは、半導体集積回路ブロックたるチップレットとの対比で機能ブロック（Functional Block）と呼んでいる。

図表2 : SoCとチップレットのイメージ



出所：各種情報から三井物産戦略研究所作成

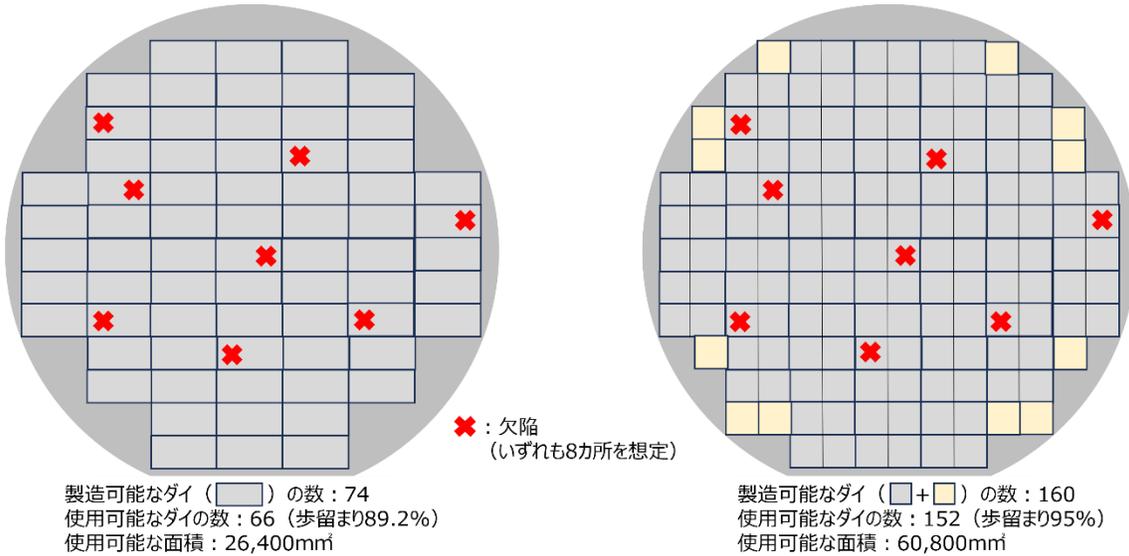
半導体産業では、提供する機能に対してコストが安くなければその技術は受け入れられない。しかし、サイズとコスト両面の最小化に貢献してきた微細化の効果が、設計・製造コストの急激な上昇<sup>53</sup>によって失われた。加えて、生成AIの急速な普及や自動車におけるCASE<sup>54</sup>時代の到来に対応すべく、SoCのサイズが巨大化すると、設計コスト、ウエハ1枚から製造可能なダイの数、欠陥一つに対して廃棄されるダイの面積の増大（図表3）といった課題が生じた。こうした背景の下、機能ごとに最適なプロセスで別々にダイを製造した後に、チップ間を接続するチップレットが性能とコスト両面で有利な状況となりつつある。

<sup>53</sup> 代表値としてTSMCのプロセスノード（世代）別ウエハ1枚当たりの価格がある。データはTech Power UpおよびTom's Hardwareの記事を参照のこと。設計コストについては [Semiconductor Engineering](#) にデータあり。

<sup>54</sup> Connected（クラウドや他の車両との無線通信）、Autonomous/Automated（自動化）、Shared/Service（シェアリングサービス）、Electric（電動化）という自動車に求められる新たな潮流。

図表3：ダイのサイズとウエハ1枚から製造可能なダイの数および欠陥が生じた際に使用不可能となるダイのイメージ

300mmウエハで20mm×20mmのダイを製造する場合



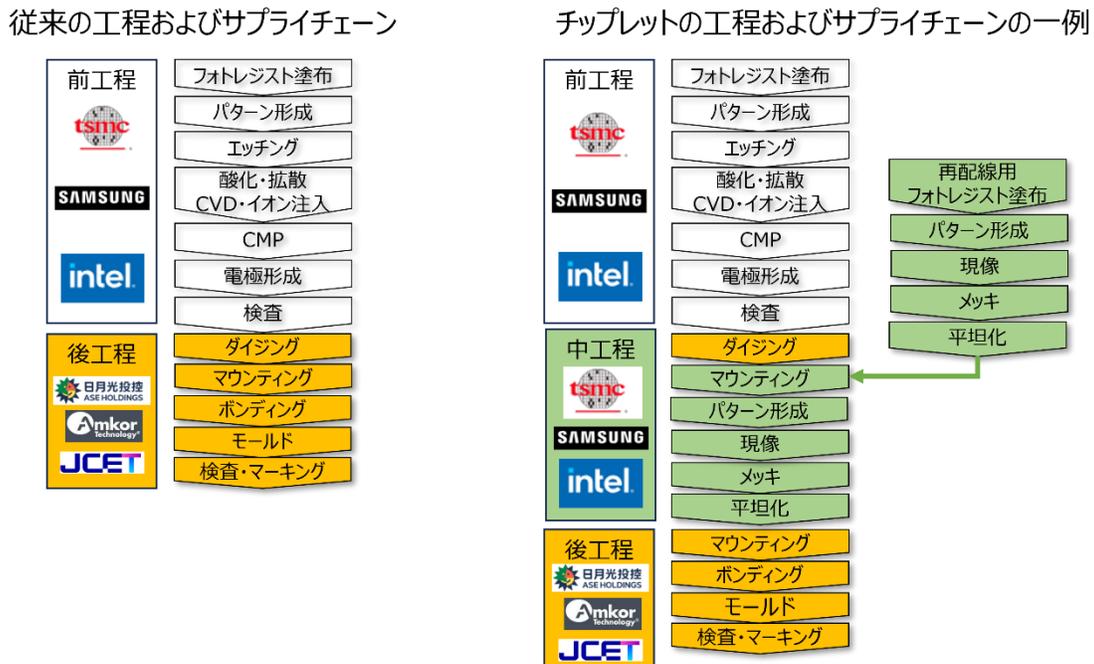
出所：各種情報から三井物産戦略研究所作成

### 1-3. チップレットで変わるパッケージングの構造、工程およびサプライチェーン

通常、ウエハから切り出したダイ一つ一つを樹脂やセラミックで封止し、ピンなどの導体を介して外部と電氣的に接続できるようなパッケージは、後工程で実施する。一方、チップレットでは、先にダイ間を電氣的に接続し、その後封止を行う。そのため、従来の半導体製造では明確に分けられていた前工程と後工程の間に新たな工程（中工程）が必要となる（図表4）。この中工程を担うのはTSMC、（韓）Samsung、Intelなどの前工程のプレーヤーである。中工程の設計に対応するために、2024年には、（米）Cadenceなど前工程に注力していたソフトウェアベンダーが、CAE<sup>55</sup>ソフトウェアメーカーを買収する動きが起きている。

<sup>55</sup> Computer Aided Engineeringの略。機械や装置の設計のような、半導体前工程よりも大きなスケールの設計で広く用いられてきた。CAEソフトウェアでは、加熱などによる温度変化や、荷重がかかった際の変形シミュレーションを行うことが多い。2024年1月16日には（米）Synopsysが（米）Ansys買収を、同3月5日にはCadenceが（米）BETA CAE買収をそれぞれ発表した。

図表4: チップレットによる工程およびサプライチェーンの変化



出所：各種情報から三井物産戦略研究所作成

## 2. 注目すべき動向

ダイ間、さらにはチップレット間の接続を標準化するために、2022年に設立されたUniversal Chiplet Interconnect Express (UCIe) コンソーシアムが、2024年8月に仕様の第二版となるUCIe 2.0仕様をリリースした。水平・垂直（上下に重ねる）方向での接続仕様や、製品の管理にまつわる仕様が出そろった今こそ、チップレット採用の障壁が下がり、普及が本格化するタイミングであろう。これまで率先して関連製品を発表してきたIntelに加え、Cadence、ファブレス<sup>56</sup>の（米）AMD、ARM、（英）Alphawave Semi、（台）Global Unichip<sup>57</sup>、（米）Google、検査装置メーカーの（日）アドバンテストらが、この進展を支持する声明を出している<sup>58</sup>。上記8社と並んで声明を出しているスタートアップ6社（図表5）の成長も期待される。

<sup>56</sup> 自社で製造設備を持たず、製造委託を活用した半導体製品の設計・販売や知的財産のライセンスを生業としている半導体企業のこと。ライセンス専門の企業を別にIPベンダー/パートナーと呼ぶが、ここでは簡単のためファブレスとまとめた。

<sup>57</sup> 台湾セミコンダクター・マニュファクチャリング・カンパニー（TSMC）が筆頭株主となっており、TSMCと緊密な連携の下、最先端のプロセスおよびパッケージ技術を用いた設計で業界をリードしている。

<sup>58</sup> 各社の声明は、UCIeコンソーシアムウェブサイト（下記）参照のこと。

[https://www.uciexpress.org/\\_files/ugd/0c1418\\_74c8a7bba0714b489dd54ef658c1c968.pdf](https://www.uciexpress.org/_files/ugd/0c1418_74c8a7bba0714b489dd54ef658c1c968.pdf)

図表5：チップレット関連の注目スタートアップ

企業名	本部所在地	概要	URL
Astera Labs	米国 カリフォルニア州 サンタ・クララ	元・テキサス・インスツルメンツのJitendra Mohan氏、Sanjay Gajendra氏、Casey Morrison氏が創業。データセンター向けにデータの流れを維持・効率化する技術を提供するファブレス企業。2022年「Next Billion-Dollar Startups（次世代のユニコーン）」に選出されている。	<a href="https://www.asteralabs.com/">https://www.asteralabs.com/</a>
Ayar Labs	米国 カリフォルニア州 サンノゼ	光を用いたデータ転送チップレットTeraPHY™を開発しているファブレス企業。チップレット内に光通信機能を持たせることで、従来のデータ転送と比較して4分の1～8分の1の電力で、5～10倍の帯域幅、遅延の10分の1短縮を実現できるとしている。NVIDIAからの出資を受けている。	<a href="https://ayarlabs.com/">https://ayarlabs.com/</a>
Blue Cheetah	米国 カリフォルニア州 サニーバール	16nm～3nmプロセスのチップ間接続を柔軟にサポートする BlueLynx D2D IP を提供。COOのTom Kelly氏をはじめ、Cadenceアナログ部門出身のメンバーが複数在籍している。	<a href="https://www.bcanalog.com/">https://www.bcanalog.com/</a>
Eliyan	米国 カリフォルニア州 サンタ・クララ	インターポーザを使うことなく、標準的な有機基板上でチップレット間を高速に接続する技術NuLink™を開発。5nmおよび3nmプロセスでの設計が完了し、IPを提供している。	<a href="https://eliyan.com/">https://eliyan.com/</a>
eTopus	米国 カリフォルニア州 サンノゼ	データセンターや5G通信、企業の自社運用情報システム向けに、異なるデータ転送や接続点での転送ロスを最小化するソリューションePHY™を提供している。	<a href="https://etopus.com/">https://etopus.com/</a>
Kandou Bus	スイス サン＝シュルピス（ローザンヌ市郊外）	電子部品間のデータ転送エラーや遅延を極小化する技術を提供。USBの最新規格や外付けメモリ等向けの高速度規格PCIeのためのデータ伝送技術の他、AR/VRグラスの電子部品間の高効率な接続を可能にするGlasswing™ IPを提供している。	<a href="https://kandou.com/about/">https://kandou.com/about/</a>

出所：各社ウェブサイトから三井物産戦略研究所作成

### 3. 今後の展望

すでに、CPUやGPUなどのダイと、メモリや複数のダイの間をシリコンでつなぐ、チップレット第一世代的位置付けの技術は、（米）NVIDIA、AMD、Intelの生成AI向けを含むハイパフォーマンスコンピューティング向けの半導体<sup>59</sup>で採用されている。今後、ダイ間の配線が現状の16nm～12nmプロセスから7nmプロセスに移行するタイミングで、GPUを機能分割してチップレットとして製造する「Ghilet」への移行が進むだろう<sup>60</sup>。

5年後には、車載用半導体でもチップレットの採用が始まると予想される。自動車用先端SoC技術研究組合<sup>61</sup>が、チップレット技術を適用した車載用半導体を2030年以降に量産車に搭載すべく開発に取り組んでおり、チップレットはCASEの進展にも重要な役割を果たすだろう。

<sup>59</sup> NVIDIAは、2016年発売のVR、AI向けGPU搭載のグラフィックスプロセッサGP100から2024年3月発表の生成AI特化型GのBlackwell GPUまで、GPUとメモリ（HBM）をシリコンのインターポーザで接続する、TSMCのCoWoS（Chip on Wafer on Substrate）という技術を採用している。AMDが2023年12月に発売したGPU Instinct MI300シリーズも、CoWoSを採用している。Intelが2024年4月に発表しているAI学習向けチップ Gaudi 3では、2つのダイを「EMIB（Embedded Multi-die Integrated Bridge）」と呼ばれるシリコンブリッジで接続し、一つのチップとして動作する構成となっている。

<sup>60</sup> 2022年9月にIntelが発表したハイパフォーマンスコンピューティング用のGPU「Ponte Vecchio」は、47個のダイをEMIBと3D接続を使って接続・一つのパッケージに収めた、Ghiletの手本的な製品とされる。EUVリソフレイヤーを用いる7nmプロセス設備の有効活用と、ダイの巨大化・微細化にかかるコストとのバランスに基づいた予想である。

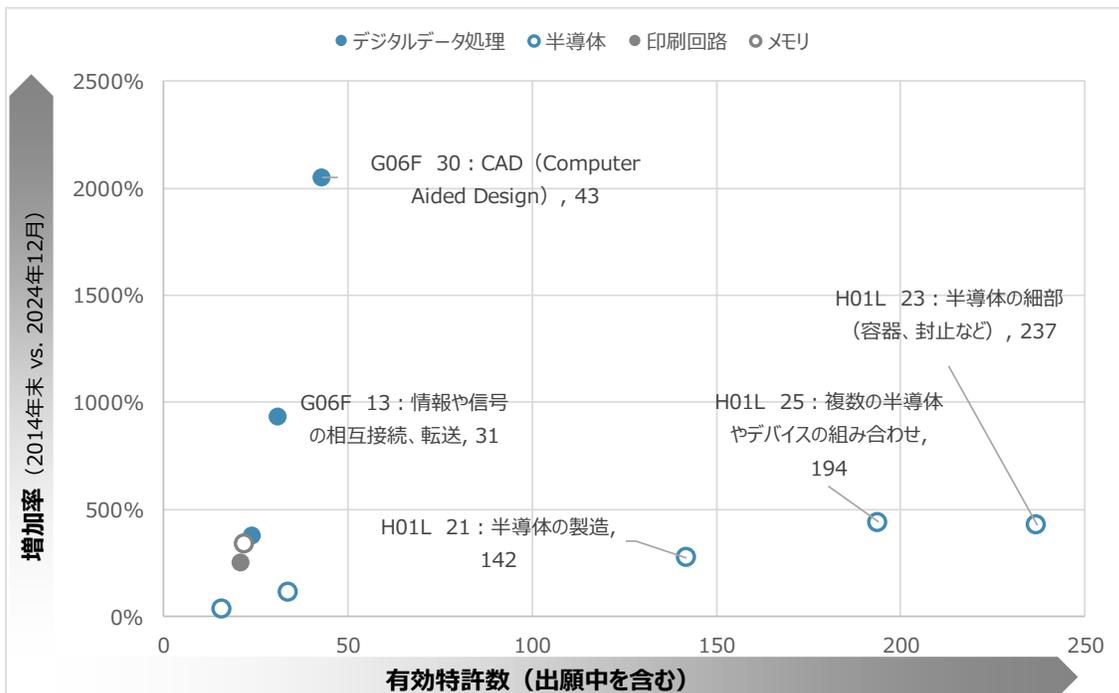
<sup>61</sup> 2023年12月1日に設立され、現在、（日）SUBARU（スバル）、（日）トヨタ自動車、（日）日産自動車、（日）ホンダ、（日）マツダ、（日）デンソー、（日）パナソニック オートモーティブシステムズ、（日）ソシオネクスト、（日）日本ケイデンス・デザイン・システムズ、（日）日本シノプシス、（日）ミライズテクノロジーズ、（日）ルネサス エレクトロニクス社の12社が参画している。

## チップレットに関する知財分析

本技術に関連性の高い「チップレット」などのキーワードや、半導体やCAD（Computer Aided Design）に関連する技術分類コード（IPC）などを特定（2024年12月時点で出願中を含む有効特許数<sup>62</sup>は289件）し、技術分類別、上位プレーヤー別の分析を行った。

図表6は、チップレット関連の有効特許数とその増加率を比較した結果で、横軸が有効特許数、縦軸が2024年12月時点と2014年末時点での有効特許数を比較した増加率を表している。この結果から、半導体細部（H01L30）やモジュールの関連技術（H01L25）を中心に注目が強まっており、近年はCAD（G06F30）に含まれる設計ツール（Electronic Design Automation：EDA）の特許数も大きく増加していることがわかる。

図表6：有効特許数、増加率（技術分類別）

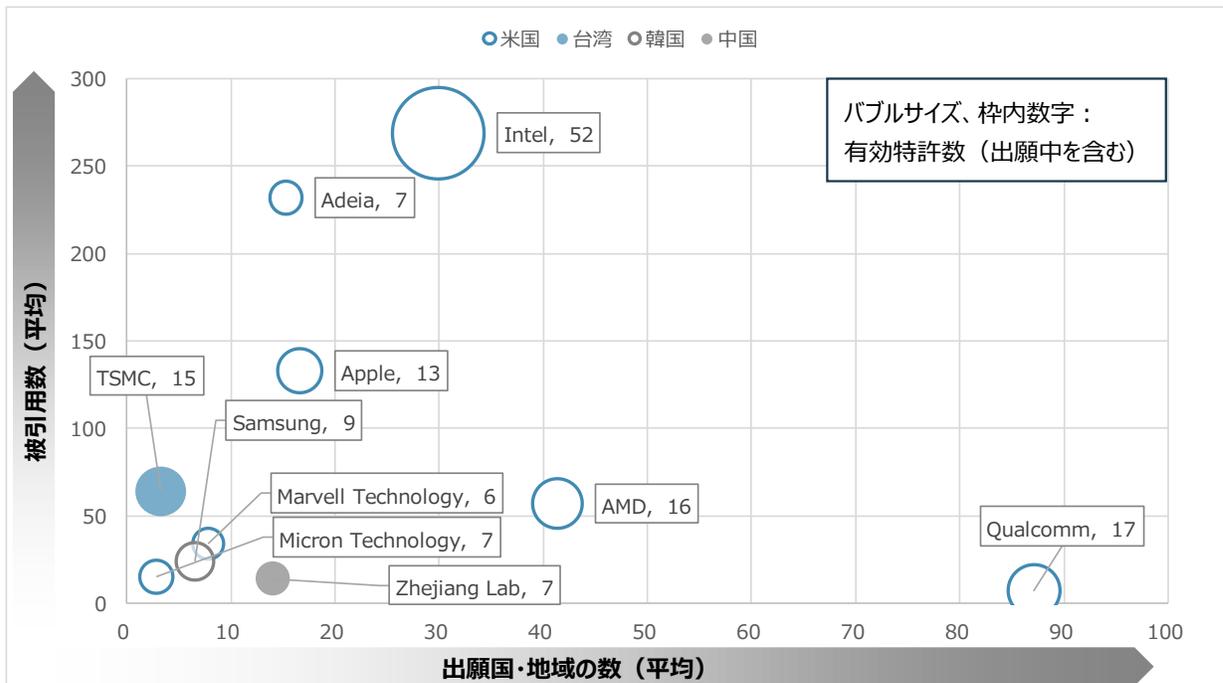


出所：LexisNexis PatentSightのデータから三井物産戦略研究所作成

<sup>62</sup> 出願された特許、および審査を経て特許権としての権利行使が可能な状態にある特許の総数。

図表7は、チップレット関連の特許数における上位プレーヤーを比較した結果で、バブルサイズが有効特許数、横軸が出願国や地域の数の平均値、縦軸が技術影響度の大きさを示す被引用数の平均値を表している。この結果から、米国企業が上位陣の多くを占め、チップレット技術における影響力の大きさを示している。2位以下に差を付けてトップのIntelは、2022年以降にUCIe規格と関連性が非常に高いと思われる特許（文献内にUniversal Chiplet Interconnect Express、またはUCIeの記載がある）を7件出願している。いずれも審査中ではあるものの同社の本気度がうかがえる。

図表7：有効特許数、出願国・地域数、被引用数（上位プレーヤー別）



出所：LexisNexis PatentSightのデータから三井物産戦略研究所作成

**小川 玲奈** Reina Ogawa / 主席研究員  
 専門分野：先進マテリアル、電子デバイス

**石黒 隆介** Ryusuke Ishiguro / シニアマネージャー  
 専門分野：知的財産権、知財コンサルティング

# バイオものづくりを基盤としたリサイクル技術 —スマートセルによる酵素を活用したプラスチックリサイクル—

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部  
執筆：インダストリーイノベーション室 佐藤 佳寿子  
知財分析：知的財産室 松浦 由依

Biz Tech フォーカス 2025

## なぜこの技術を取り上げるのか

2020年に宣言された「2050年カーボンニュートラル」を目指して、2021年に経済産業省によるグリーンイノベーション基金（2030年までに官民合わせて年間の投資規模を3兆円に拡大）が設立された。さらにバイオものづくり革命推進基金（予算規模3,000億円）が推進されるなど研究開発を官民あげて推進する機運が高まっている。また欧米で脱炭素やサーキュラーエコノミーの推進を背景として積極的に政策が制定されている。特にバイオものづくりを基盤としたプラスチックリサイクル技術については、企業が事業化に向けた活動を活発化しており、注目が高まっている。

## Summary

- バイオものづくりを基盤とする遺伝子改変微生物（スマートセル）によって生産された酵素を用いることで環境負荷が低く、品質が一定程度担保されたプラスチックリサイクルが可能となってきた。
- 酵素の大量生産という課題はあるもののAIを活用することで、本課題を解決するための技術が確立しつつある。

## 1. 「バイオものづくり」とは

### 1-1. バイオものづくり

バイオものづくりは、遺伝子技術を使って微生物が生成する物質の量や性質を変えることで、地球温暖化などの社会的課題を解決することを目指す注目の分野となっている。この考え方は、日本政府の「新しい資本主義のグランドデザイン」にも取り上げられているほか<sup>63</sup>、海外では、欧州においてEU域内におけるバイオ技術およびバイオものづくりの強化に向けた政策文書が2024年3月に発表されている<sup>64</sup>。また、米国では2022年9月に米国内バイオ産業振興の大統領令が出されており、国をあげて競争力強化を目指している<sup>65</sup>。

バイオものづくりとは、有用な物質を効率的な生産や従来の化学反応を環境への負荷が少ない条件で行えるようにする遺伝子改変微生物（スマートセル）を作り出し、それらを物質の生産に活用することを指す。

スマートセルを作り出すためには、以下のようなプロセスが繰り返し行われる。

設計（Design）：遺伝子改変や代謝経路の変更を行うための設計図を作成。

構築（Build）：設計に基づいて遺伝子改変を行い、スマートセルを作製。

評価（Test）：作製したスマートセルの機能を評価。

学習（Learn）：評価データを基に改善点を見つけ、より最適化されたスマートセルを設計。

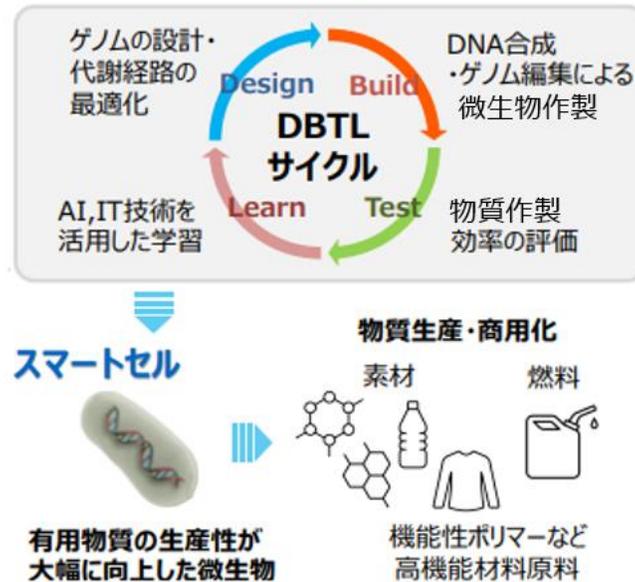
<sup>63</sup> 新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画 2024年改訂版

<sup>64</sup> 欧州委、域内のバイオ産業強化策をまとめた政策文書を発表(EU) | ビジネス短信 —ジェトロの海外ニュース— ジェトロ

<sup>65</sup> バイデン米大統領、国内バイオ産業振興の大統領令に署名(米国) | ビジネス短信 —ジェトロの海外ニュース— ジェトロ

この一連のプロセスはDBTLサイクル (Design, Build, Test, Learn) と呼ばれ、このサイクルを繰り返すことで、高効率に有価物生産できる微生物を開発することが可能となる (図表1)。

図表1：バイオものづくりの概念図



出所：バイオものづくり革命の実現 経済産業省 2023年4月19日  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shin\\_kijiku/pdf/014\\_05\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shin_kijiku/pdf/014_05_00.pdf)  
 から三井物産戦略研究所作成

## 1-2. バイオものづくりのリサイクル分野への活用

一般的なバイオものづくりではバイオマスを用いて物質生産を行うが、本技術を活用して開発されたスマートセルが生産する酵素を用いた、プラスチックリサイクル技術に関する研究成果報告が近年増加している。酵素は特定の分子構造や化学結合のみと反応するという生体由来の特徴から、メカニカルリサイクルやケミカルリサイクルと比較して高い選択性を保有している。そのため不純物にはほとんど反応せず、高効率なリサイクルを実現する。また高温・高圧や化学品を用いる従来のケミカルリサイクルと異なり、酵素を用いる場合は、常温・常圧で反応を進められるため、エネルギー消費を抑えることができる。さらに物理的な手法であるメカニカルリサイクルでは素材の性能が低下しやすいが、酵素を用いた場合には元の品質に近いリサイクル素材が得られる。

## 1-3. リサイクル分野への活用時の課題

一方で酵素が生体由来であるため従来技術よりも反応が遅くなる、精緻な温度やpHの管理が必要になる、酵素の大量生産方法が確立していないため生産コストが高いという課題がある。そのため前述したDBTLサイクルを用いることによって、より高性能な酵素が開発されつつあるものの、技術開発によるさらなる改善が期待されている。

## 2. 注目すべき動向

### 2-1. プラスチックリサイクル事例

代表的な例として（仏）Carbiosがあげられる。同社はPETを分解する酵素を用いてエチレングリコールとテレフタル酸（TPA）を回収する技術を開発中であり、2026年に商業プラントを稼働させる予定となっている。また（日）キリンHDも高効率でリサイクルが可能となるPET分解酵素を静岡大学、自然科学研究機構、大阪大学と共同で開発したことを発表している<sup>66</sup>。

PET以外のプラスチックリサイクル事例としては（豪）Samsara Ecoがナイロンのリサイクル技術を構築しており、スポーツウェア企業である（米）lululemonと提携することによって、リサイクルナイロン6,6生産に成功し、スポーツウェアを試作している。また（日）兼松は（豪）Samsara Ecoへの出資を行っておりリサイクルサプライチェーンの構築を目指している<sup>67</sup>。

図表2：プラスチックリサイクル研究・開発状況

企業名、研究機関名	リサイクル素材	概要
（仏）Carbios	PET	酵素を用いたPET解重合の先駆者として多くの企業との連携を進めている。Carbiosは、Indorama Venturesとの合併会社（JV）として工場を2025年稼働を目指す
（豪）Samsara Eco	ナイロン、PET	オーストラリア国立大学（ANU）の技術を活用した酵素開発を実施 PET分解に注力する企業が多い中でナイロンの酵素リサイクルのスケールアップを検討中
（ラトビア）Enzymity	PET、ポリエステル、ポリウレタン、ポリスチレン	機械学習機能を活用し最適化されたプラットフォームを保有 PET分解時間100hから15h。ポリエチレン分解時間50日から20日にまでの短時間化に成功
（英）Epoch BioDesing	ナイロン、ポリエステル	公開データセットと独自のデータセットの両方で生成AIを活用することにより、プラスチック解重合の可能性が高い酵素候補を設計します。同社は、温和な条件下でポリマーを分解する酵素の能力を評価するために、物理モデリングを実装
（日）キリンHD、静岡大学、自然科学研究機構、大阪大学	PET	耐熱性の高い酵素の開発に成功。PETとポリウレタン、PETとコットンの2種類の混紡繊維中のPETを選択的に分解することが可能であることも検証されており、PETとコットンの混紡繊維では、PET分解率が世界最高値の90%を達成

出所：三井物産戦略研究所作成

### 2-2. スマートセル創出におけるAIの台頭

AIの台頭によりこれまで以上に高効率な酵素を得るためのスマートセル設計のための時間は短縮されつつある。AIの活用には企業独自および公開されたデータセットの両方を活用することが重要となる。これまでは企業独自のデータセットを大量保有する企業が競争優位を持っていたが、最近では生成AIプラットフォームを提供する企業が出てきている。これによりデータセットを保有していない企業でもスマートセルの設計が可能となる。例えば（米）Ginkgo Bioworksはこれまでフレーバー等の物質生産を行ってきたが、2023年9月にGoogle Cloudとの提携を発表した。これはGinkgo Bioworksが保有するデータセットとGoogle Cloudが保有するAI技術を用いて、第三者に対するスマートセル設計のための生成AIプラットフォームを開発するためであり、2024年9月より本プラットフォームを第三者に提供している<sup>68, 69</sup>。このような新たなサ

<sup>66</sup> キリンHD、PET高効率分解 酵素使用のCR技術：化学工業日報 電子版

<sup>67</sup> 兼松、環境技術スタートアップ、豪 Samsara Eco 社へ出資 ～独自の酵素リサイクル技術によりプラスチックをモノマー化。CO<sub>2</sub>排出を抑え、何度もリサイクル可能～

<sup>68</sup> Google and Ginkgo: Foundry-Scale Data Meets AI - Ginkgo Bioworks

<sup>69</sup> Introducing Ginkgo's Model API: A Programmable Interface for Ginkgo's AI Research - Ginkgo Bioworks

ービスにより、スマートセルを用いた酵素開発に取り組む企業の広がりや研究開発の活発化、製品の市場投入の加速化が予測される。

### 2-3. 量産技術の推進

スマートセルの大量生産技術は発展途上であるが、（日）ちとせ研究所ではAI技術を活用して安定した大量生産を目指している。従来の培養技術では温度やpH、溶存酸素濃度など測定しやすいデータに加え、色・においとといった職人の経験や感覚に依存している部分が多くあった。しかし、ちとせ研究所では従来のデータに加えて、AIが学習しやすい多次元データ（電位データ、においデータ、画像データ等）を継続的・連続的に安価に収集し、最適な培養条件を導き出す「コンボリョーションナルデータ」の活用を進めている。これらの技術は、今後新しい微生物が設計される際に幅広く利用され、スマートセルの安定生産を支える重要な基盤となっていくと期待される。

## 3. 今後の展望

酵素を用いたリサイクル技術はエネルギー削減やGHG排出削減が期待できる。例えばPETのリサイクルでは、サプライチェーン全体においてPETの原料であるTPA1kgあたり化石燃料ベースの従来プロセスと比較して69%~83%のエネルギー削減、17%~43%のGHG排出削減が可能であると報告されている<sup>70</sup>。PETは、エステル結合を含んでいるため酵素による加水分解が比較的容易であること、一定のリサイクル手法が確立している背景から、多くの企業や研究機関において、より高効率なリサイクルを可能とする酵素開発が進められている。しかし今後は前述したようにAI技術を活用することでナイロンやポリエステルといったPET以外の汎用プラスチックに関しても酵素を用いた高効率なリサイクル技術が推進されると考えられる。

---

## バイオものづくりに関する知財分析

---

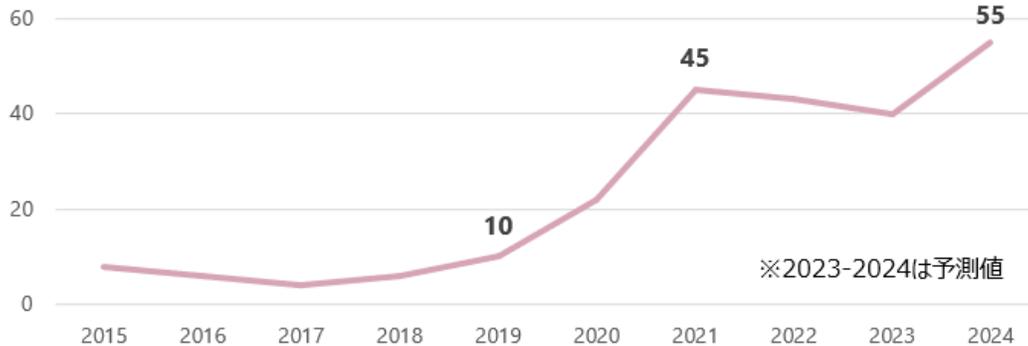
バイオものづくりに関する知財分析として、酵素を用いたリサイクル技術に関する特許データを抽出し、技術をめぐる状況を分析した。分析対象は、グローバル特許検索ツールPatSnapを用いて検索した、2015年から2024年出願の311件（ファミリー件数）である。

図表3に示すように、2019年から2021年の期間に出願件数が大きく増加しており、技術の成熟や市場の需要拡大が反映されている。2024年の予測値では、出願件数はさらに伸びる見込みであり、酵素リサイクル技術の重要性の高まりや市場の拡大を示している。図表4に示すように、主要出願人としては、研究機関（例：江南大学）や企業（例：Carbios）が確認できる。

---

<sup>70</sup> [Techno-economic, life-cycle, and socioeconomic impact analysis of enzymatic recycling of poly\(ethylene terephthalate\): Joule](#)

図表3：酵素リサイクル技術に関する特許出願件数/年



出所：三井物産戦略研究所作成

図表4：出願人別件数上位ランキング（2015年-2024年）



出所：三井物産戦略研究所作成

特許データより現状の技術状況を確認すると、特にPETの分解に特化した酵素技術が多く、実用化を目指した研究開発が進んでいる。CarbiosはPETの分解技術に注力し、工業規模での実用化に向けた設計に独自性がある。江南大学はポリエステルやポリスチレンを含む複数のプラスチック素材の分解技術を研究し、酵素の遺伝子工学的改良を通じた性能向上に独自性がある。

現状の特許群は酵素リサイクルが「技術的に可能」であることを示す実験室レベルの成果が中心であり、実際の導入には商業化の壁が残っている。Carbiosの特許は、短中期的に実用化可能なプロセスとして優位性が高い一方、江南大学をはじめとする研究機関の基礎研究は新規材料への挑戦に価値があり、長期的には新規市場を切り開く可能性があるといえる。

**佐藤 佳寿子** Kazuko Sato / シニアプロジェクトマネージャー  
 専門分野：先進マテリアル

**松浦 由依** Yui Matsuura / シニアアナリスト  
 専門分野：知的財産権、知財コンサルティング

# ヒューマノイドロボット

## ー生成AIによる技術進展と試験導入の始まりー

三井物産戦略研究所 技術・イノベーション情報部

執筆：コンシューマーイノベーション室 辻 理絵子

知財分析：知的財産室 松浦 由依

**Biz Tech フォーカス 2025**

### なぜこの技術を取り上げるのか

AIの進展により制御の精度が大幅に向上し、従来困難だった繊細な動作が可能となった。また、製造コストも大幅に低下し、量産が視野に入るようになった。これらを受け、(米) Amazonの物流倉庫、(独) BMWの自動車工場などで試験導入が始まり、社会実装に向けた動きが加速している。まだ雌雄が決まらない段階で状況を俯瞰し、自身のビジネス領域にどのような影響が起こるのか考える契機としたい。

### Summary

- 2024年はヒューマノイドスタートアップへの投資金額が過去最高を記録するなど、多額の資金が流れ込んだ。大企業も技術開発に取り組んでおり、連携する動きも活発になっている。
- 安全性やコストの問題など課題もあるが、汎用ヒューマノイドが実現した際の経済的インパクトは大きく、将来的な労働力不足の懸念がある産業や危険な作業を伴う領域などでの活用が見込まれている。

## 1. ヒューマノイドロボットとは

### 1-1. ヒューマノイドロボットの定義

ヒューマノイドロボット（以下、ヒューマノイドと呼ぶ）は、日本語では人型ロボットとも呼ばれ、厳密な定義はないが、通常、人間の形状や能力をモデルにした汎用の二足歩行ロボットのことを指す。多くは、物体をつかむ、コンテナを移動する、部品を配置するなどの工場を想定した作業から、洗濯物をたたむ、人間の話し相手をするなど家庭でのサービスを想定した作業まで、幅広いタスクに対応することを目指して設計される（図表1）。

**図表1：ヒューマノイドロボットの特徴**

要素	特徴	イメージ図
形状	人間に似た頭部、胴体、腕、脚を持つことが多く、サイズも人間の身長や体格に近いものが多い。関節が人間とは逆方向に曲がるなど異なる部分を持つものもある	
動作	人間のように二足で歩き、滑らかな歩行が可能。手を使って物をつかむなど細かい動作もできることが理想だが、指を持たない場合もある	
機能	人間のように自律的に判断し動作する能力が望まれる。工場作業、介護、警備、受付など、幅広いタスクに従事することを目指して設計される	

出所：各社資料から三井物産戦略研究所作成（画像はLos Angeles Times <https://www.latimes.com/business/story/2024-10-15/tesla-optimus-bots-were-remotely-operated-at-cybercab-event>（2024年12月28日最終閲覧））

人間に似た形状を持つことで社会での受け入れやすさが増し、また、人間を中心に設計された社会インフラに導入しやすいと考えられ、将来的には、人間が行う作業を補助・代替していくと見込まれる。

## 1-2. ヒューマノイドロボットを支える技術の進展

ヒューマノイドに関わる技術はソフトウェアからハードウェアまで多様で、総合的な技術力が必要である。その中でも近年は、AI技術が進展している。従来、現実のデータによる学習ではデータの取得に大きなコストと時間がかかっていたところ、仮想空間上で同時に多数のヒューマノイドをシミュレートし、歩行や転倒、物の移動などさまざまな動作を効率的に学習することが可能となったことで、ヒューマノイドの動作制御が大幅に改善した（図表2）。ただし、現実のすべてを仮想空間で再現することは難しく、仮想空間での学習をそのまま現実に適用すると食い違いが生じることがあるため、調整等が必要となり、現実のデータも引き続き重要である。（米）NVIDIAは、仮想空間上でロボットAIの学習が行える開発環境プラットフォーム「Isaacシリーズ」を提供しており、同社のGPU学習用ソフトウェアのCUDAが、AI開発においてGPUの優位性を確立し研究者を多く引き付けたのと同様に、ロボットAI分野でも優位性をつかもうとする意図が見える。

**図表2：仮想空間での学習の様子**



仮想空間に設置された段差や障害物の上を歩き学習するヒューマノイドたち

仮想空間(上部)で学習した動きを  
現実世界(下部)で再現

出所：各社資料から三井物産戦略研究所作成（画像左：NVIDIA Isaac <https://developer.nvidia.com/isaac>、右の上下とも：NVIDIAのYoutube <https://youtu.be/kr7FaZPfp6M?feature=shared>（すべて2024年12月28日最終閲覧））

また、近年はエンドツーエンド学習と呼ばれる学習手法や、大規模行動モデルといった人間の行動データからAI自ら学習する手法も発表されており、今後のさらなる進展が期待される。AI以外では、アクチュエータの変化や、センシング技術が成熟してきたこともロボットの精度向上に寄与している（図表3）。

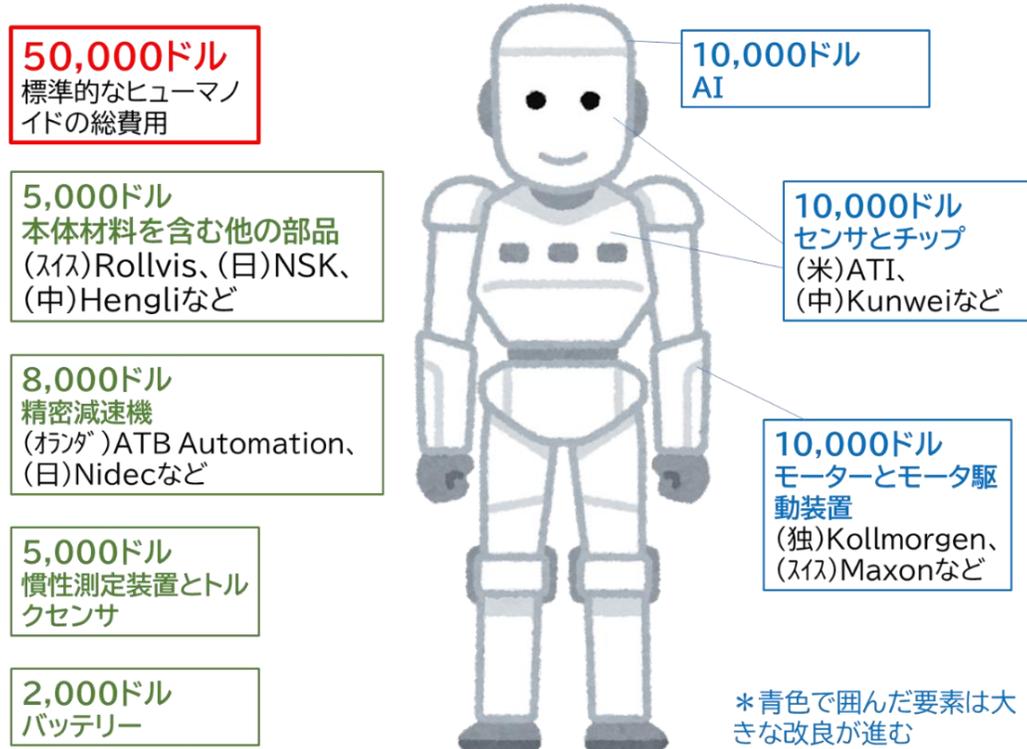
図表3：ヒューマノイドの制御精度向上に寄与する技術

要素	特徴
AI	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Sim2Real: 仮想空間上での学習を現実に適用させる手法</li> <li>● エンドツーエンド学習 (end-to-end Learning、E2E学習): AI学習を、認識や動作などいくつかのステップに分けるのではなく、最初から最後まで一気に学習する手法</li> <li>● ロボット基盤モデル: 言語、画像、行動等の大量データを学習したロボット向けの基盤となるモデル</li> <li>● 大規模行動モデル(LBM: Large Behavior Model): 人間の行動データを観察しそこから学習したモデル</li> </ul>
ハードウェア	<ul style="list-style-type: none"> <li>● アクチュエータ: 一般には、油圧から電動への駆動系の変化により価格が低下。また、TeslaのOptimusには高精度の制御を可能とするため、ボールねじや遊星ローラーなどのリニアアクチュエータが使用されているといわれる</li> <li>● センサ: LiDARやカメラなど異なる種類のセンシングデータを統合して扱えるようになった</li> </ul>

出所：各社資料から三井物産戦略研究所作成

コスト面では、過去長らく1台の製造コストが数千万～億円レベルでかかっていたものが、2023年の推定値で5万ドル程度まで低下してきており、量産が現実的な価格に近付いてきている（図表4）。

図表4：ヒューマノイドロボットの部品とコスト（2023年の推定値）、代表的なサプライヤー



出所：Global Xの資料などから三井物産戦略研究所作成

## 2. 注目すべき動向

ヒューマノイドを開発する企業が膨大な資金を調達している。2024年1月～3月期のヒューマノイド関連の資金調達額は7億7,500万ドルとなり、過去の通年ベースでの資金調達額と比較して既に過去最高を記録

した<sup>71</sup>。その大部分を占めるのが（米）Figure AIで、（米）OpenAIやNVIDIA、2024年2月にマイクロソフトやジェフ・ベゾス氏の投資会社など多くの有名組織から6億7,500万ドルを調達している。調達額ではFigure AIが突出しているものの、2024年は他にも、（米）Agility Robotics、（中）Unitree Robotics、（ノルウェー）1X Technologies、（加）Sanctuary AI、（中）Fourier Intelligence、（米）Appttronikなど、多くのスタートアップが資金を調達している（図表5）。また累積で1億ドル以上調達したスタートアップも増えており、本領域に対する注目の高さがうかがえる。

図表5：ヒューマノイドを開発するスタートアップと資金調達状況

会社名	シリーズ (直近の調達月)	推定累計調達額	推定企業価値	主な投資家
Figure AI	シリーズB (2024年2月)	8億4,500万ドル	27億ドル (2024年2月時点)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● OpenAI Startup Fund</li> <li>● NVIDIA</li> <li>● Microsoft</li> <li>● Bezos Expeditions</li> <li>● Intel</li> <li>● リベラ・ゲーミング・オペレーションズ(日本企業)</li> </ul>
Agility Robotics	シリーズB (2024年7月)	1億7,800万ドル	10億ドル (2024年10月時点)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Amazon</li> <li>● Sony Innovation Fund</li> <li>● TDK Corporation</li> </ul>
Unitree Robotics	シリーズC (2024年9月)	1億5,000万ドル	11億ドル (2024年9月時点)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Beijing Robot Industry Fund</li> <li>● Zhongguancun Science City Science</li> </ul>
1X Technologies	シリーズB (2024年1月)	1億4,000万ドル	4億ドル～6億ドル (2024年1月時点)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● OpenAI</li> <li>● Samsung Next</li> </ul>
Sanctuary AI	シリーズA (2024年6月)	1億4,000万ドル	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Accenture Ventures</li> <li>● BDC Capital</li> </ul>
Fourier Intelligence	シリーズD (2024年1月)	9,450万ドル	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Softbank Investment Advisors</li> </ul>
Appttronik	シード (2024年5月)	6,530万ドル	2億5,000万ドル (2024年8月時点)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Assembly Ventures</li> <li>● BlueLake Ventures</li> </ul>

出所：Crunchbase、PitchBookなどから三井物産戦略研究所作成

スタートアップ以外の企業もヒューマノイド開発に取り組んでいる。自社で開発に取り組む企業の例が、（米）Tesla、（中）UBTECH、（日）TOYOTAに加え、ヒューマノイド開発で長く注目を集め2020年に（韓）HYUNDAI傘下となった（米）Boston Dynamicsである。いわゆるビッグテックでは、（米）Google、（米）Meta、NVIDIAが、ヒューマノイドに関連するAI技術やロボットアームの開発等に取り組んでいる。企業間の提携も進んでおり、資本関係のあるFigure AIとOpen AIはもちろんのこと、2024年10月にはBoston DynamicsがTOYOTAの研究所であるToyota Research Instituteとヒューマノイド開発での提携を発表し、2024年12月にはAppttronikがGoogleとの提携を発表している（図表6）。現状の技術力については、繊細な手や指の制御など高度な技術力では、欧米系の企業が強いとみられる一方、大量生産に向けた動きでは中国系の企業が進んでいる。

<sup>71</sup> CB Insightsの発表「[Humanoid robotics in 5 charts: AI drives funding to record levels](#)」（発行日2024年3月7日、最終閲覧日2024年12月28日）による

図表6：ヒューマノイド開発企業の主な開発提携状況

ヒューマノイド開発企業	パートナー企業	取り組み内容
Figure AI	Open AI	Open AIがFigure AIのヒューマノイド向けAIモデルを構築する
Boston Dynamics	Toyota Research Institute (TRI)	Boston Dynamicsのハードウェアに、TRIのAI技術を実装する
Apptроник	Google Deep Mind	ApptроникのロボットプラットフォームとGoogle Deep MindのAI知識を組み合わせる

出所：三井物産戦略研究所作成

ヒューマノイドは、自動車製造工場、フルフィルメントセンター、商業施設、iPhone製造工場など多様な産業での試験導入が加速している。Teslaは現場を持つため独自で試験導入を行うが、それ以外の多くのヒューマノイド開発企業は、現場をもつ企業と提携してテストしている（図表7）。

ヒューマノイド開発企業の中でも、注目の3社の事例を解説する。

#### 1. Figure AIの「Figure 02」

BMWはFigure AIのヒューマノイドロボットFigure 02を自動車生産ラインに導入し、シャーシの組み立てや部品の運搬を実施している。2024年11月現在、導入から数カ月を経て、Figure 02の機能はアップデートされ、導入当初と比べ動作速度が400%向上した。これにより、1日当たり1,000件の自動車部品の配置を行う。

#### 2. Agility Roboticsの「Digit」

Agility RoboticsのDigitは逆関節の脚を持つロボットで、Amazonのフルフィルメントセンターと（米）GXO Logisticsの工場に試験導入され、ボックスの運搬など、繰り返し作業を担当している。

#### 3. Teslaの「Optimus」

Optimusは、Teslaの自動車製造工場での活用が見込まれる。2026年までに製品として販売予定で、価格は2万～3万ドルと予想される。汎用ロボットとして、買い物や芝刈り、さらにはベビーシッターまで幅広い作業を行えるよう設計されている。

図表7：主なヒューマノイドの特徴と試験導入例

開発企業 (ロボット名)	Figure AI (Figure 02)	Agility Robotics (Digit)	Tesla (Optimus)
試験導入例 (導入時期)	BMWの米国にある 自動車製造工場 (2024年8月)	Amazonの米国にある フルフィルメントセンター (2023年10月)	自社の 自動車製造工場 (予定)
従事作業	<ul style="list-style-type: none"> <li>シャーシの組み立て、部品の運搬</li> <li>1日当たり1000件の部品配置を実施 (2024年11月時点)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ボックスの運搬や棚だし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>デモ動画には、部品の設置や運搬の様子あり</li> </ul>
特徴 (計画含む)	<ul style="list-style-type: none"> <li>168cm、70kg</li> <li>自由度:41</li> <li>可搬重量:20kg</li> <li>➢ 会話可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>175cm、65kg</li> <li>自由度:32</li> <li>可搬重量:16kg</li> <li>➢ 指がない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>173cm、57kg</li> <li>自由度:42</li> <li>可搬重量:20kg</li> <li>➢ 環境認識に自動運転技術を活用</li> </ul>
写真	 シャーシを組み立てるFigure 02	 ボックスを運搬するDigit	 卵を壊さずに扱うOptimus Gen2
開発企業 (ロボット名)	Apptronik (Apollo)	Sanctuary AI (Phenix)	UBTECH (Walker S1)
試験導入例 (導入時期)	Amplifierの米国にある フルフィルメントセンター (2024年12月)	Canadian Tireのカナダにある アパレル店舗 (2023年3月)	FOXCONNの iPhone製造工場 (予定)
従事作業	<ul style="list-style-type: none"> <li>複数の運送業者の出荷コンテナごとに品物を仕分ける</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>商品のピッキングや梱包、清掃、タグ付け、ラベル付け、折りたたみなど110のタスク</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>iPhoneの組み立てプロセスにおいて労働者の健康問題を引き起こす可能性のある作業</li> </ul>
特徴 (計画含む)	<ul style="list-style-type: none"> <li>173cm、73kg</li> <li>自由度:一</li> <li>可搬重量:25kg</li> <li>➢ 胸部等のモニタで意思疎通可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>170cm、70kg</li> <li>自由度:ハンドのみで21</li> <li>可搬重量:25kg</li> <li>➢ 筐体はカーボン製</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>172cm、76kg</li> <li>自由度:41</li> <li>可搬重量:15kg</li> <li>➢ 胸部に緊急停止ボタンを備える</li> </ul>
写真	 品物を仕分けるApollo	 品物を陳列するPhenix(第5世代)	 ボックスを運搬するWalker S1

\* 自由度とは、ロボットの可動部である関節や軸の数を指す

出所：各社資料などから三井物産戦略研究所作成（画像上側左：BMWのサイト <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0444265EN/successful-test-of-humanoid-robots-at-bmw-group-plant-spartanburg?language=en>、上側中央：Agility Roboticsのサイト <http://agilityrobotics.com/products>、上側右：TeslaのYoutube <https://youtu.be/cpraXaw7dyc?feature=shared>、下側左：ApptronikのX <https://x.com/Apptronik/status/1872326657979421153/photo/1>、下側中央：Sanctuary AIのサイト <https://sanctuaryai.substack.com/p/sanctuary-ai-deploys-first-humanoid>、下側右：UBTECHのYoutube <https://youtu.be/UBbk18oZbTc?feature=shared>（すべて2024年12月28日最終閲覧））

### 3. 今後の展望

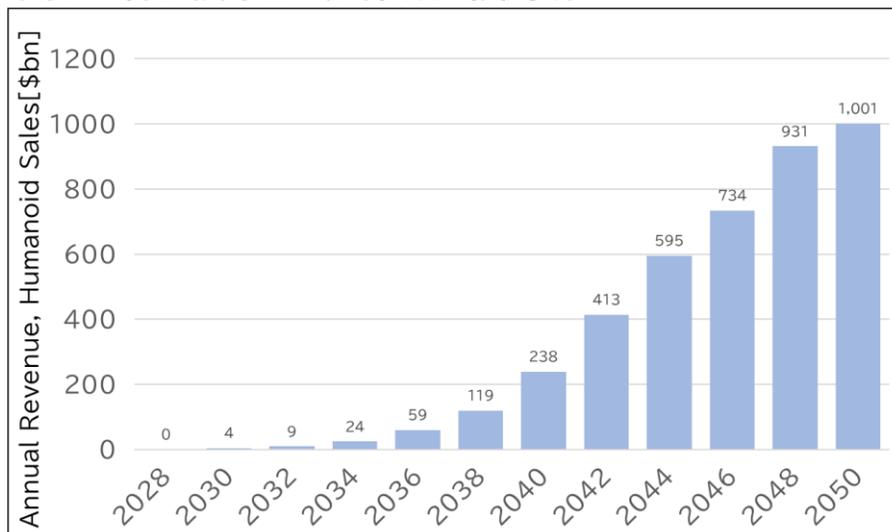
ヒューマノイドの課題としては、まず、AIモデルの解釈可能性<sup>72</sup>の向上が挙げられる。深層学習に基づくAI技術は、結果に至った理由を人間が理解するのが難しい。そのため、問題が起こった際の原因究明が困難であり、安全が求められる場面で使いにくい問題がある。また、安全性の確保も課題である。ヒューマ

<sup>72</sup> 深層学習によるAIモデルが予測や推定を行ったプロセスや結果を導き出した理由を、人間が解釈できるか否かを指す。

ノイドの重量は大人一人分ほどありつつ、人間と近距離での協業を想定していることから、もし不慮の動作をした場合に、物理的に与える影響が大きい。他には、精度のさらなる向上や、大量生産とコスト削減も課題であり、これらを克服することで、より広範な産業分野での導入が進むと考えられる。

現在は、試験導入などでその有用性が試されている段階であり、タスク特化の専用ロボットに対して当面のうちは性能とコストで劣るであろうが、現在の技術進展速度や資金流入状況に鑑みれば、今後十数年で、専用ロボットを上回ることも十分あり得る。そうなれば、汎用タスクに対応可能なヒューマノイドであれば、第2章で言及した物流、製造、小売り、医療、家庭向けに加えて、人口減少による労働力不足が問題となりつつある飲食や建設、極力人間の稼働を減らしたい防衛や災害対応といった多様な領域での導入が一気に広がる可能性がある。米国におけるヒューマノイドの人口は、2030年の4万台から、2040年には800万台、2050年には6,300万台、また売上は1兆ドルとなる予測<sup>73</sup>で、社会への浸透は思ったより早く広範なものとなるかもしれない（図表8）。

図表8：米国におけるヒューマノイドの売上推移予測



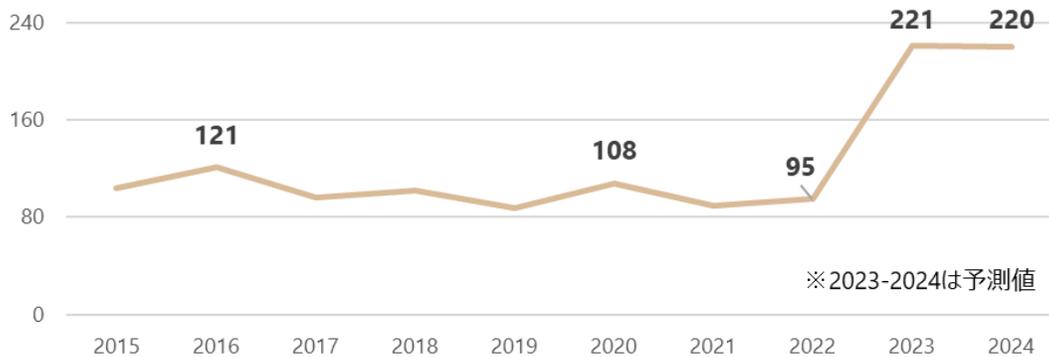
出所：Morgan Stanleyの資料から三井物産戦略研究所作成

## ヒューマノイドロボットに関する知財分析

ヒューマノイドロボットに関する知財分析として、文献をAIにより解析し“Humanoid robot”のタグが付与された特許データを抽出し、技術をめぐる状況を分析した。分析対象は、グローバル特許検索ツールPatSnapを用いて検索した、2015年から2024年出願の1,121件（ファミリー件数）である。

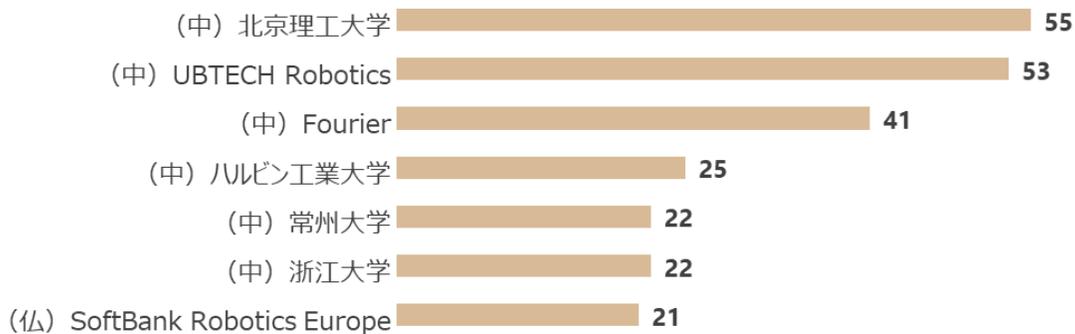
<sup>73</sup> Morgan Stanleyのレポート「Could AI Robots Help Fill the Labor Gap?」（発行日2024年8月13日、最終閲覧日2024年12月28日）による。

図表9：ヒューマノイドロボットに関する特許出願件数/年



出所：三井物産戦略研究所作成

図表10：出願人別件数上位ランキング（2015年-2024年）



出所：三井物産戦略研究所作成

図表9に示すように、出願件数は2023年に急増しているものの、2015年から2022年までも一定の出願があり、長年にわたり研究開発が進められてきた分野であることがわかる。図表10に示すように、出願件数上位のほとんどが中国の企業・大学である。唯一ランクインした欧州企業であるSoftBank Robotics Europeは、ヒューマノイドロボットの代表的製品である「Pepper」を手がける企業として知られているが、21件の出願のほとんどは2015年になされたものであり、現在は特許上の活動を確認できない。

一方で、中国以外の企業等もヒューマノイドロボット分野で独自の技術開発を進めており、たとえば本文に登場するAgility Roboticsはロボット操作用グリッパーやロボットの移動を改善するためのシステムといった基盤技術を出願している。これらはヒューマノイドに限らず多様なロボットに適用可能な技術であるため今回の検索範囲からは外れてしまうが、同社の技術力を示す重要な特許である。また、ランキング外ではあるが、日本企業としてはヒューマノイドロボット「Friends」を開発する川崎重工の特許出願が15件確認でき、産業用途やサービス分野での活用が期待されている。このようにヒューマノイドロボット技術は中国が出願件数でリードしているものの、各国企業や研究機関がそれぞれ異なるアプローチで技術開発を進めており、今後の市場競争や新技術の登場が注目される。

図表11：技術トピック分類

技術トピック	2020年以降 増加率	出願トレンドの変化
センシング技術	68%	複合センサの統合が進み、視覚・触覚・音声データを統合した環境認識技術が重要視されている
ロボット本体	62%	耐久性や安定性重視から、モジュール化・軽量化設計が加速 製造コスト削減やメンテナンス性向上を追求
人工知能・ 学習アルゴリズム	56%	機械学習・強化学習を活用し、環境適応型アルゴリズムや自己学習機能の開発が増加
制御システム	50%	動作精度の向上に加え、協調制御やリアルタイム制御へと進展 複数ロボット間の連携が注目
駆動・アクチュエーション	41%	従来型の駆動方式（空圧・油圧）から、電動アクチュエータや柔軟駆動へのシフトが顕著

出所：三井物産戦略研究所作成

ヒューマノイドロボットに関する特許データを、技術トピック別に分類すると図表11のようになる。2020年以降の出願件数増加率が最も大きい技術トピックはセンシング技術であり、高精度な3D画像処理や環境認識に対応するアルゴリズムに関する視覚センサの発明、触覚のリアルタイム処理能力の向上を課題とした触覚センサの発明、マルチモーダルデータのリアルタイム処理を可能とするセンサ統合技術に関する発明などが出願されている。センシング技術がもたらす競争優位性としては、リアルタイム性の向上（ロボットが即時に環境を認識し、最適な動作を選択する能力が向上）、高精度な操作の実現（力覚や触覚の精密検知により、繊細な作業が可能）、人間との自然な相互作用（表情や動作を理解し、適切な応答を行う視覚・触覚統合技術）などが挙げられる。

特許データは、ヒューマノイドロボットの開発が、①労働力不足の解決、②安全性の確保、③社会受容性の向上、という社会的課題の解決を目指していることを示している。これらは、ヒューマノイドロボットの産業分野、医療・介護分野、家庭・サービス分野での普及を後押しするものといえる。

**辻 理絵子** Rieko Tsuji / シニアマネージャー  
専門分野：人工知能、5G通信、LPWA

**松浦 由依** Yui Matsuura / シニアアナリスト  
専門分野：知的財産権、知財コンサルティング

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、当社および三井物産グループの統一した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、当社およ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。