

Mizuho Short Industry Focus Vol.253

革新的技術シリーズ¹

核融合の産業化に向けた日本の取り組み方向性の考察

～2030年代発電実証を通じた早期実用化と産業化に向けて～

〈要旨〉

- ◆ 本稿では、エネルギー問題と地球環境問題を解決する次世代エネルギーである核融合について、研究開発の現状と各国政策を概観し、日本の強みを確認した上で、2030年代発電実証とその先の産業化に向けて取り組むべき方向性を考察する。
- ◆ 従来の核融合研究開発は、国際協調の下、各国政府の計画に基づきアカデミア主体で進められてきた。トカマクと呼ばれる方式で、装置を大型化することで、核融合反応から大きなエネルギーを生み出すことを目指した。国際協力が進められた国際熱核融合実験炉 (International Thermonuclear Experimental Reactor、以下、ITER) 計画に多くの研究リソースが投入されたが、建設遅延やコスト増加により現時点で完成していない。
- ◆ これに対しスタートアップは、ITER の大型化による課題を踏まえて、トカマク方式の小型化や、トカマク方式以外の方式を採用することにより、装置建設の時間とコストを削減し、研究のサイクルを早めている。ただし、現時点では ITER もスタートアップも核融合によりエネルギーを生み出すことができていない点は同じであり、実用化には電気としてエネルギーを取り出し、経済合理的に発電を行うことが必要である。
- ◆ 各国政府は、明確な発電実証の時期を掲げて自国の強みを踏まえた主体と方式を選定し、その実現に向けて民間企業の力を取り込もうとしている。例えば、多数のスタートアップによる多様な方式の研究開発が進む米国では民間主導の装置計画を支援、球状トカマクに強みがある英国は政府主導で官民協力による装置建設を計画している。
- ◆ 日本は、トカマク方式以外にもヘリカル方式やレーザー方式などの多様な方式の研究基盤を有しており、原子力産業や素材産業等の産業基盤がこれを支えてきた。主要機器の製作経験を有するトカマク方式を中心に、実用化段階における国内でのサプライチェーン構築も可能である。ただし、スタートアップの装置建設に向けた資金調達には課題であり、産業化に向けては装置開発への政策支援が必要である。
- ◆ 2030年代発電実証の実現に向けて、政府主導の原型炉計画における小型化の追求と、民間企業によるプラズマ実験や装置開発への支援の双方が求められる。前者においては、日本の宇宙戦略基金や英国の核融合政策を参考にして民間企業の開発への関与を促進し、後者においては、米国における宇宙政策、核融合政策を参考にした民間計画に対するマイルストーン型支援を行うことが考えられる。今後数年間で発電実証の目標や選定基準を具体化し、2030年までに主体や方式を選定することが必要となる。
- ◆ 2030年代発電実証を通じて、日本が有する核融合の研究基盤とそれを支えてきた産業基盤を結集し、スタートアップがもつ“fail fast”の精神で装置の小型化によりイノベーションを創出し、日本が産官学で力を合わせて早期発電の実現に貢献しつつ、産業化を主導することに期待したい。

¹ 日本産業の競争力強化や社会課題の解決に寄与する技術・イノベーション領域をとり上げるレポート。

1. はじめに

核融合は実現すれば夢のエネルギー

核融合²は、軽い原子核同士が融合して、重い原子核に変化する反応である。この反応では質量が減少するため、それに応じてエネルギーが発生する。核融合エネルギーは、カーボンニュートラル、豊富な燃料、固有の安全性、環境保全性という特徴を有することから、エネルギー問題と地球環境問題を同時に解決する次世代のエネルギーとして期待されている(【図表 1】)。

【図表 1】核融合エネルギーの特徴

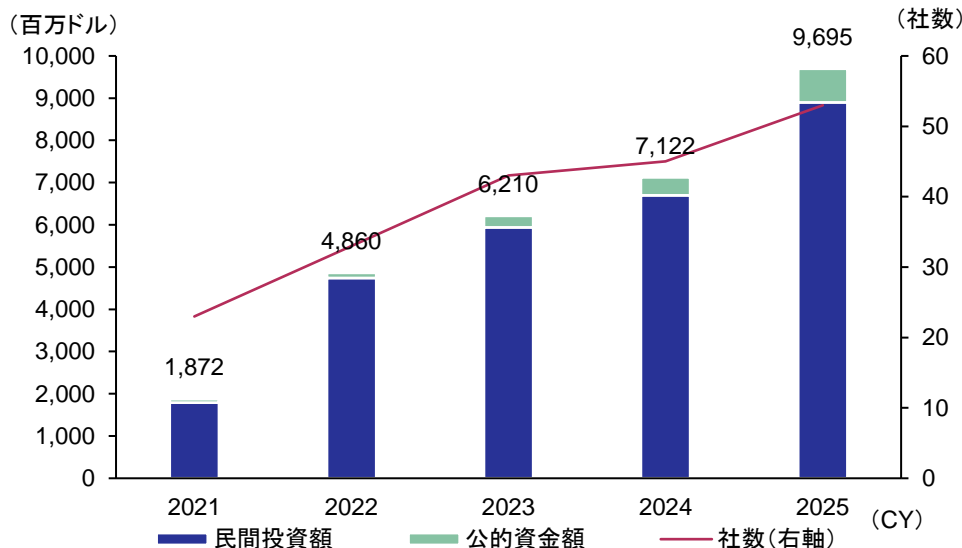
核融合エネルギーの特徴			
カーボンニュートラル	豊富な燃料	固有の安定性	環境保全性
<ul style="list-style-type: none"> ■ 発電の過程において二酸化炭素を発生しない 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 燃料は海水中に豊富に存在し、ほぼ無尽蔵に生成可能な上に、少量の燃料から膨大なエネルギーを発生させることが可能 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 燃料の供給や電源を停止することにより反応が停止 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 発生する放射性廃棄物は低レベルのみであり、従来技術による処分が可能

(出所)内閣府「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」より、みずほ銀行産業調査部作成

核融合発電の実現を目指すスタートアップが増加、資金調達に成功している

長年、大学や研究所などのアカデミアにおいて進められてきた核融合研究開発であったが、近年は民間のスタートアップによる研究開発が盛んになっている。世界全体では2024年7月時点で45社の核融合スタートアップが資金調達を行っており、累積で20億ドル超の資金調達を実現している米国のCommonwealth Fusion System(以下、CFS)など、一部の核融合スタートアップは多額の資金調達に成功している。累積資金調達額は約97億ドルと、2021年の約19億ドルから4年間で78億ドル以上増加している(【図表 2】)。このように、民間投資家からの資金が流入したことにより、核融合研究開発が加速している。

【図表 2】核融合スタートアップの累積資金調達額と社数



(注) 資金調達額は2025年6月末時点の各社アンケートによる回答額の合計、社数はアンケートの回答者数
(出所) Fusion Industry Association, *The global fusion industry* より、みずほ銀行産業調査部作成

日本政府は産業化を目指した国家戦略を策定

グローバルでのスタートアップによる研究開発加速の動きを受けて、日本政府は、「世界の次世代エネルギーであるフュージョンエネルギーの実用化に向け、技術的優位性を生かして市場の勝ち筋を掴む、「フュージョンエネルギーの産業化」をビジョンに掲げた

² 原子力(核分裂)との混同を避ける観点や、英国や米国では学術用語としての“Nuclear Fusion”をエネルギー分野では“Fusion”と呼称していることから、フュージョンとも表現されているが、本稿では過去から使用されている核融合を用いる。

「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」を 2023 年 4 月に策定した。2025 年 6 月の改訂では、世界に先駆けた 2030 年代の発電実証という野心的な目標を明記した。

本稿では、2030 年代発電実証を目指すことを前提に日本の研究開発戦略を考察

本稿では、フュージョンエネルギー・イノベーション戦略で示した 2030 年代の発電実証を目指すことを前提に、実証の実現とその先の核融合発電実現と実用化時における産業化に向けて、今後数年の間に取り組むべき戦略を考察する。そのために、まずアカデミアによる核融合研究開発の歴史を振り返り、現在スタートアップが進める研究開発のアプローチとの比較分析を行う。そのうえで、各国の研究開発戦略を参考にしつつ、日本の強みも踏まえた今後進めるべき研究開発の方向性を検討する。

2. 核融合研究開発の歴史と政府主導の研究開発

核融合研究は 1950 年代後半以降国際協調で進められてきた

核融合研究は 1950 年代、当初は米国・旧ソ連・英国で秘密裏に行われていた。しかし、1958 年の第 2 回原子力平和利用国際会議で各国の研究が公開されたことを機に、平和利用を目的とした国際協力体制へと転換した。以降、各国は研究を競いつつも、その成果を共有しながら核融合発電の実現を目指してきた。

1970 年代以降はトカマク方式が核融合研究開発の中心に

核融合反応は、分子が陽イオンと電子に電離したプラズマ状態で発生する。核融合発電の実現に向けては、このプラズマを高温度・高密度で長時間維持する(閉じ込める)ことが大きな課題である。大学における基礎研究ではプラズマを閉じ込める様々な方法が模索されたが、トカマク方式³と呼ばれる磁場を用いた閉じ込め方式が有力とされた。1969 年に、旧ソ連のトカマク装置 T-3A による実験で 1keV⁴という高温で長時間の閉じ込め時間を達成したことにより、1970 年代以降世界の核融合研究の中心はトカマク方式となった。

1990 年代に核融合反応がエネルギーを生み出すことが証明

トカマク方式での核融合発電実現に向けては、大規模な装置でプラズマ性能を高める研究が進められた。日本原子力研究所(当時)の JT-60、米国プリンストンプラズマ物理研究所の TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor)、欧州共同プロジェクトで英国カラム研究所に建設された JET(Joint European Torus)は三大トカマクと呼ばれ、1990 年代に JT-60 と JET で核融合反応による出力がプラズマ加熱の入力を上回る臨界プラズマ条件を達成した。臨界プラズマ条件の達成により、トカマク方式による核融合反応がエネルギーを生み出すことが証明された。

1990 年代以降は ITER 計画による国際協力での研究へ

三大トカマクによる研究と並行して、さらなるプラズマ性能の実現と、プラズマの長時間維持を目指して、三大トカマクを上回る規模の実験炉を建設することが必要となった。1985 年、レーガン・ゴルバチョフ対談において、米ソ間で平和目的のための核融合研究国際協力に合意したことを機に、国際協力による ITER 建設が進められることとなった。1990 年代には設計活動が進められ、2005 年には建設サイトがフランスのサン・ポール・レ・デュランスに決定すると、2007 年に欧州、日本、米国、ロシア、中国、韓国、インドの 7 極が参加する ITER 機構が発足した。

ITER は建設遅延・コストオーバーランにより未完

ITER は、発足時点では 2018 年の運転開始、2026 年の核融合運転⁵を予定しており、建設コストは約 50 億ユーロとの見積りのもとで建設が始まった。しかし、機器製作の遅れ等によりスケジュールは 4 度見直されており、いまだ完成していない。2024 年に見直された最新のスケジュールでは、運転開始は 2034 年、核融合運転は 2035 年とされており、建設コストは当初の約 5 倍となる約 250 億ユーロまで増加している(【図表 3】)。

³ トカマク方式は、核融合におけるプラズマの閉じ込め方式の 1 つであり、ドーナツ型の磁場によってプラズマを閉じ込める方式。ロシア語の「電流」「容器」「磁場」「コイル」の頭文字を組み合わせた tokamak が語源。

⁴ eV(電子ボルト)は、イオンなどが持つエネルギーの単位であり、真空中で 1 個の電子が 1V の電圧で加速されたときに得るエネルギーが 1eV になる。核融合発電の実現には、プラズマを数 10keV 以上に加熱する必要がある。

⁵ 運転開始時はプラズマを生成する初期運転を実施し、核融合運転で燃料を投入して核融合反応を起こす。

【図表 3】ITER の運転開始時期と建設コスト

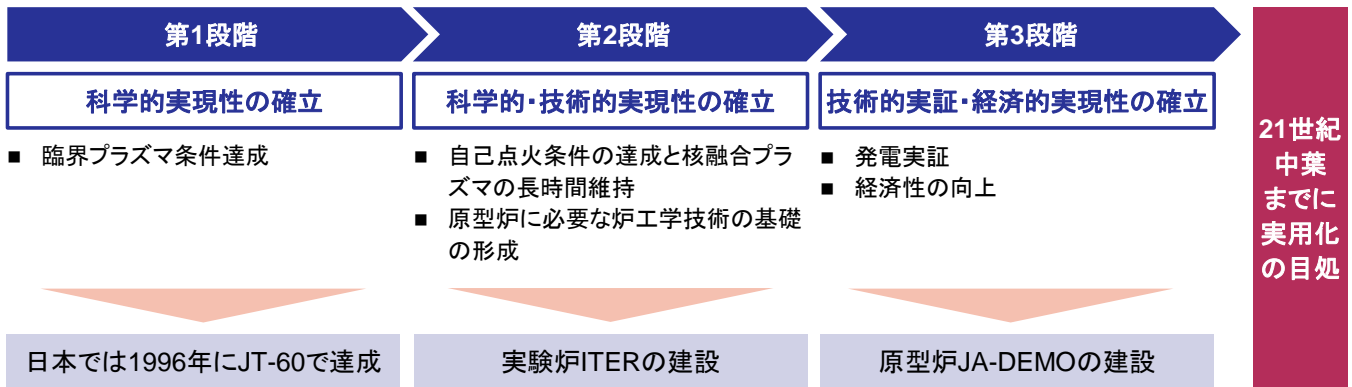
計画	運転開始	核融合運転	建設コスト
2007年時点 (ITER協定発効時)	2018年	2026年	約50億ユーロ
2010年時点 (ベースライン2010)	2019年	2027年	約150億ユーロ
2016年時点 (ベースライン2016)	2025年	2035年	約200億ユーロ
ベースライン更新案 (2024/6提案)	2034年	2035年	約250億ユーロ

(出所)文部科学省資料より、みずほ銀行産業調査部作成

日本政府は核融合研究開発基本計画に基づき計画的な研究開発を推進

こうした国際的な核融合研究開発の流れの中で、日本政府は 1968 年に「核融合研究開発基本計画」を策定し、以降は本計画に基づいた研究開発を進めてきた。日本原子力研究所(現在は量子科学技術研究開発機構)が中心となり、高温プラズマの安定維持、臨界プラズマ条件の達成を実現し、現在は核融合プラズマが熱を止めても核融合エネルギーにより持続する状態である自己点火条件の達成、長時間燃焼の維持、原型炉の開発に必要な炉工学技術の形成の 3 つを主要目標として、ITER によりその達成を目指してきた(【図表 4】)。

【図表 4】核融合研究開発の段階と日本政府の方針



(注)平成 17 年 10 月原子力委員会「今後の核融合研究開発の推進方策について」にて策定
(出所)文部科学省資料より、みずほ銀行産業調査部作成

ITERによるトカマク研究の代替手段としてスタートアップが設立

トカマク方式を採用する ITER に核融合研究開発のリソースが集中する一方、大学等では異なるコンセプトの研究も進められてきた。政府の核融合研究開発予算が ITER に重点的に充当される中で、研究者は民間の投資家に研究費を求め、大学等からのスピノフによりスタートアップを設立した。次章ではこうしたスタートアップによる核融合研究開発が採用するアプローチを確認し、政府主導の核融合研究開発との違いを明らかにする。

3. スタートアップによる研究開発と核融合研究開発の現在地

方式ごとのスタートアップのアプローチを確認

核融合反応を起こす方法は多様であるが、資金調達額上位のスタートアップには、ITER と同様のトカマク方式を採用するスタートアップと、それ以外の方式を採用するスタートアップの双方が存在する(【図表 5】)。本章では、それぞれの方式において、スタートアップがどのような研究開発のアプローチを採用することで、政府主導の研究開発や ITER と差別化しているかを確認する。

【図表 5】核融合スタートアップの資金調達額上位 10 社

企業名	所在国	設立年	調達金額	核融合方式
Commonwealth Fusion Systems	米国	2018	20.6億ドル	トカマク
TAE Technologies	米国	1998	13.0億ドル	FRC
Helion Energy	米国	2013	10.0億ドル	FRC
Pacific Fusion	米国	2023	9.0億ドル	パルス磁気
SHINE Technologies	米国	2010	8.0億ドル	その他(非発電)
ENN	中国	2006	5.5億ドル	トカマク
Marvel Fusion	ドイツ	2019	4.4億ドル	レーザー
General Fusion	カナダ	2002	3.5億ドル	MTF
Tokamak Energy	英国	2009	3.3億ドル	トカマク
Zap Energy	米国	2017	3.3億ドル	Zピンチ

(注 1) FRC(Field Reversed Confinement、磁場反転配位)方式は磁場閉じ込め方式の一種であり、直線型装置の両端からプラズマを衝突・合体させて、FRC プラズマを形成し閉じ込める。トカマク方式などと比較して、小さな磁場で効率よくプラズマを閉じ込めることができる

(注 2) パルス磁気方式は、大電流のパルスにより瞬間的に磁場を作り、燃料を圧縮・加熱して核融合反応を起こす方式

(注 3) レーザー方式は、慣性閉じ込め方式とも呼ばれ、レーザーにより燃料を圧縮・加熱して瞬間的に核融合反応を起こし、これを繰り返すことにより反応を継続させる方式

(注 4) MTF (Magnetized Target Fusion、磁化標的核融合)方式は、磁場閉じ込め方式と慣性閉じ込め方式の中間的な方式であり、磁場で閉じ込められた小さなプラズマの固まりを繰り返し生成し、ピストンなどで圧縮することで核融合反応を起こす

(注 5) Zピンチ方式は磁場閉じ込め方式の一種であり、外部磁場を使わず電流によって発生する磁場のみにプラズマを閉じ込める。超伝導磁石を使用しないことで小型かつシンプルな装置設計が可能となる

(出所) Fusion Industry Association, *The global fusion industry in 2025* より、みずほ銀行産業調査部作成

(1)トカマク方式

スタートアップは強磁場化による小型化を志向

トカマク方式は、米国の CFS や、英国の Tokamak Energy (以下、TE) が採用している。前章では、ITER が装置の大型化によってプラズマ性能を向上させるアプローチであることを指摘した。これに対して、スタートアップは磁場を強くして閉じ込め性能を向上させ、トカマク装置の小型化を実現するコンセプトを掲げている。

高温超電導技術の採用により強磁場化が可能に

従来、磁場の発生には低温超伝導 (Low Temperature Superconductor、以下、LTS) コイルが採用されてきたが、LTS では磁場の強さに限界があった。これに対し、CFS や TE は、高温超伝導⁶ (High Temperature Superconductor、以下、HTS) を採用することで、トカマク装置の小型化実現を目指している。例えば、CFS が建設を進めているトカマク実験装置 SPARC は、磁場を 12.2T と ITER よりも高めることにより、ITER より小さな装置で ITER と同程度のエネルギー増倍率実現を目指している(【図表 6】)。

⁶ 超伝導とは、一定の温度以下の低温状態で電気抵抗が 0 になる現象である。液体ヘリウム (-269℃) で超伝導となる物質を低温超伝導体、液体窒素 (-196℃) で超伝導となる物質を高温超伝導体と呼ぶ。高温超伝導体を使用したコイルは、強い磁場を発生することが可能となる。

【図表 6】 ITER と SPARC の主要パラメータ比較

パラメータ	ITER	SPARC
B_0 : 磁場	5.3T	12.2T
R_0 : プラズマ主半径	6.2m	1.85m
a : プラズマ小半径	2.0m	0.75m
A: アスペクト比	3.1	2.5
I_p : プラズマ電流	15.0MA	8.7MA
Q: エネルギー増倍率	Q \geq 10	最大Q=11

(出所) Creely, A.J., et al, *Overview of the SPARC tokamak* より、みずほ銀行産業調査部作成

従来のトカマク研究の成果と新技術の組み合わせ

ITER では 2001 年に設計が完了した後、個別機器等の技術開発とその製作に取り組んできた。トカマク方式を採用するスタートアップは、こうしたトカマク研究の成果を活用することができる。したがって、スタートアップは HTS コイルなど、既存のトカマク研究で採用されていない要素技術を開発し、核融合での適用可能性を示すためにトカマク装置の設計・建設を進めている。

実験装置の建設には巨額の資金調達がハードルに

ただし、トカマク方式は HTS コイル等による小型化を実現した場合でも、実験装置は相応の規模となる。ITER と同等のエネルギーを生み出す実験装置を建設する場合、最低でも数千億円規模の資金調達が必要となると考えられる。CFS は、SPARC で入力エネルギーよりも高い出力エネルギーを得られるというシミュレーション結果や、開発した HTS で 20 テスラ⁷を超える強磁場を達成するなどの研究成果を示すことで、2021 年 12 月に 18 億ドルという大型の資金調達に成功した。しかし、現状トカマク方式を採用するスタートアップで、独力で ITER に対抗できる実験装置の建設に進んでいるのは CFS の 1 社のみである。

(2) 革新的閉じ込め方式

トカマク方式とは異なる方式による小型装置での実現を志向

上述の通り、トカマク方式では小型化しても装置サイズが大きいため、実用化に向けた実験を進めるために時間とコストがかかり、実用化した場合の発電プラント建設の難易度も高い。トカマク方式以外の方式を採用するスタートアップは、このことをトカマク方式の根源的な問題であると捉え、小型装置で実現可能な異なる方式を選択し、研究開発を行っている。

トカマク方式以外にも多様な方式が存在

トカマク方式以外を採用するスタートアップの中では FRC 方式を採用する TAE Technologies (以下、TAE) や、Helion Energy (以下、Helion)、Z ピンチ方式を採用する Zap Energy、MTF 方式を採用する General Fusion (以下、GF) などが多額の資金調達に成功している。これらの方式は総称して革新的閉じ込め方式と呼ばれ、プラズマ性能でトカマク方式に劣るため、政府主導の核融合研究開発においては、研究費の配分が限定的であった。

革新的閉じ込め方式はトカマク方式より小型の装置で、研究サイクルを早く回す

革新的閉じ込め方式に取り組むスタートアップは、小型でシンプルな装置設計により、スピード感を持って実験を進めている。例えば、1998 年に創業した TAE は、多数の実験装置を建設し、段階的にプラズマの性能を高めてきた(【図表 7】)。小型装置であることにより、装置建設の時間とコストを低減できる。シンプルな構造であることにより、特定の機能に絞った実験を同時並行的に進めることも可能となる。トカマク方式よりも早く研究を進めることで、プラズマ性能の向上を目指している。

⁷ テスラ(T)は、磁場の強さ(磁束密度)を表す単位である。

【図表 7】 TAE Technologies の装置開発

装置	目標	達成	時期
A,B,C-1	プラズマ物理学と加速器物理学の組み合わせによるコンパクトな線形構造のコンセプトの探求	コンパクトで安定したプラズマコアと燃料注入方法を開発	1998-2000年代
C-2	完全に統合された装置による検証	プラズマ閉じ込め技術の実証(2012年)	2009-2014年
C-2U	コアの安定性を検証するのに十分な時間プラズマを閉じ込められることの実証	プラズマを無限に維持(2015年)	2015-2016年
C-2W (Norman)	先進ビーム駆動型FRCのスケールアップに必要な温度でプラズマ閉じ込めを維持できることの実証	3,000万度以上で維持(2019年) 7,500万度以上で動作(2022年)	2017年-現在
Copernicus	装置の運転に必要な電力よりも多くの電力を得る	(未達成)	建設中
Da Vinci	世界初のp- ¹¹ B核融合発電所のプロトタイプにより電力系統に供給	(未達成)	2030年代前半以降

(出所)TAE Technologies ホームページより、みずほ銀行産業調査部作成

資金調達には段階的に実験成果を示す必要

革新的閉じ込め方式で資金調達に成功しているスタートアップは、資金調達により小型の実験装置を建設して目標とする成果を達成し、その成果を示しながら次の実験装置に必要な資金を調達するというサイクルを実現している。上述の TAE は、1998 年の創業から合計 10 回以上の資金調達ラウンドを実施し、累計 13 億ドル超の資金調達に成功している。2021 年 4 月には Norman によるプラズマ 5,000 万度達成と同時に 2.8 億ドルの資金調達を公表、2022 年 2 月にはプラズマ 7,500 万度達成と同時に 2.5 億ドルの資金調達を公表し、調達した資金をもとに Copernicus の開発を進めている。

(3)レーザー方式

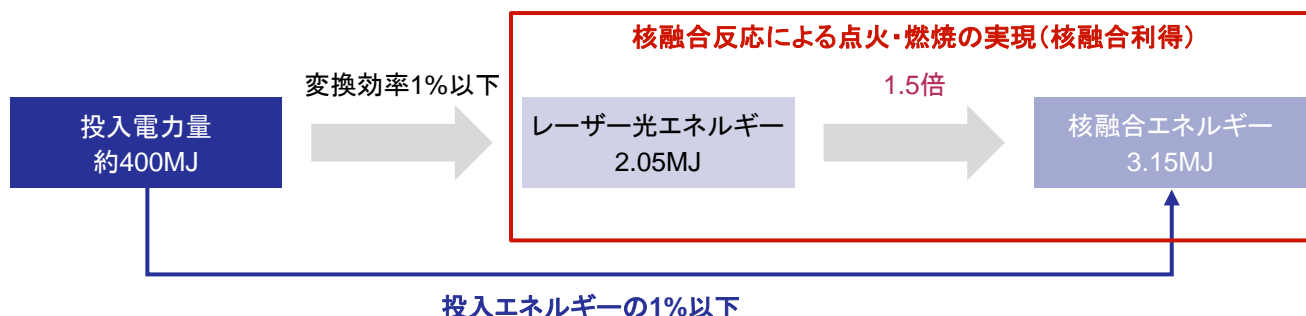
2022 年の米国での研究成果によりレーザー方式も注目

2022 年 12 月に、米国のローレンス・リバモア国立研究所にある国立点火施設 (National Ignition Facility、以下、NIF) におけるレーザー核融合の実験で、レーザーで投入したエネルギーよりも高いエネルギーを取り出すことに成功した。この結果により、レーザー方式での核融合発電実現にも期待が集まり、資金が流入している。例えば、レーザー方式に取り組む Marvel Fusion は、2025 年 3 月までに総額 3.85 億ユーロ(うち民間投資 1.7 億ユーロ、官民連携 2.15 億ユーロ)の調達を実現している。

レーザー方式は高効率・高繰り返し・高出力レーザーの開発が課題

レーザー方式の課題は、高出力レーザーの高効率化と高繰り返し化である。上述の NIF における実験では、レーザー投入エネルギーよりも高い出力エネルギーを実現したが、レーザーに投入した電力量と比較した場合、出力は 0.8%に過ぎない(【図表 8】)。したがって、レーザー自体の効率を高めなければ、経済的な核融合発電は実現できない。加えて、NIF のレーザーは発射後に冷却が必要となるため、8 時間に 1 回程度しか照射できない。レーザー方式の実現には、1 秒間に 10 回程度の照射が必要と考えられており、高繰り返し化も大きな課題である。

【図表 8】 2022 年 12 月の NIF における核融合反応における点火・燃焼



(注)投入電力量は推測値

(出所)NIF 公表情報より、みずほ銀行産業調査部作成

スタートアップはレーザーの開発に注力

レーザー方式は核融合反応を起こすこと自体は検証済みであることから、核融合反応を起こすまでの技術的な課題はレーザーによるところが大きい。また、磁場閉じ込め方式とは異なりコイルによる炉設計の制約がないことから、よりシンプルな装置設計が可能となる。したがって、レーザー方式に取り組むスタートアップは、主にレーザーの開発に注力することでレーザー方式の実現性を示すことを目指している。

(4)まとめ

スタートアップは装置の小型化により研究費の削減と開発の加速を実現

スタートアップは、装置の小型化により、実験装置の製作に係るコストと時間を削減している。例えば、EU が ITER 後の原型炉として計画する EU DEMO は、2018 年時点で資本費が 85 億ドルと見積もられている。これに対し、CFS が 2030 年代に発電を目指す ARC の建設までにかかるコストは 75 億ドルと試算でき、必要な研究費を約 10%削減しつつ、20 年早く発電を実現することが可能となる。また、TAE は Da Vinci を 2030 年代前半に建設して発電を目指しているが、これは CFS の 3 分の 1 以下の研究費と試算できる(【図表 9】)。

【図表 9】 発電実現までの研究費概算と発電時期目標

方式	主体	発電までの装置計画	研究費概算	発電時期目標
トカマク(従来型)	EUROFusion	EU DEMO	85億ドル	2050年代
トカマク(小型)	Commonwealth Fusion systems	SPARC, ARC	75億ドル	2030年代前半
FRC	TAE Technologies	A,B, C-1, C-2, C-2U, C-2W, Copernicus, Da Vinci	20億ドル	2030年代前半

(注 1)EUROFusion は、2014 年に設立された欧州の核融合研究開発機関であり、EU における原型炉 EU DEMO の設計を実施
(注 2)トカマク(従来型)の研究費概算は EU DEMO の資本費。トカマク(小型)の研究費概算は、CFS の総調達額+出所レポートにおける ARC の資本費推計値。FRC の研究費概算は、TAE の総調達額+Da Vinci の資本費当部推計値
(出所) R. D. Farina, *Assessing the economic viability of an ARC-like magnetic fusion power plant: Cost Estimation, LCOE, and Sensitivity Analyses* より、みずほ銀行産業調査部作成。

HTS の採用は開発事項を増やすが更なるコスト低減にも寄与

HTS を採用する ARC では、コイルのコストが全体の 50%弱を占めており、その 90%弱が線材のコストである。線材は大量生産によるコスト低減が期待できることから、HTS を採用した核融合研究開発により需要が高まることは、線材コストの低減に寄与し、ひいてはトカマク装置のコスト低減にも寄与する。仮に、HTS 線材のコストが 10 分の 1 になれば、ARC の開発コストは 54 億ドルから 30 億ドルまで 24 億ドル低下する。

装置コストの低さは実験回数の向上に寄与

HTS の量産化によるコスト低減を前提にすれば、EU DEMO を 1 基建設する費用があれば、SPARC と ARC を 2 基ずつ建設することが可能である。また、FRC 方式では、トカマク方式と比べて実験装置のコストが小さい。例えば、TAE は Copernicus の建設前に 5.3 億ドルを調達していることから、EU DEMO を 1 基建設する費用があれば、Copernicus と同規模の装置を 16 基建設することができる。このように、装置コストの低減により研究費あたりの装置数を増やすことで、実験の回数を増やすことができる。

2035 年までに成果を上げることが必要

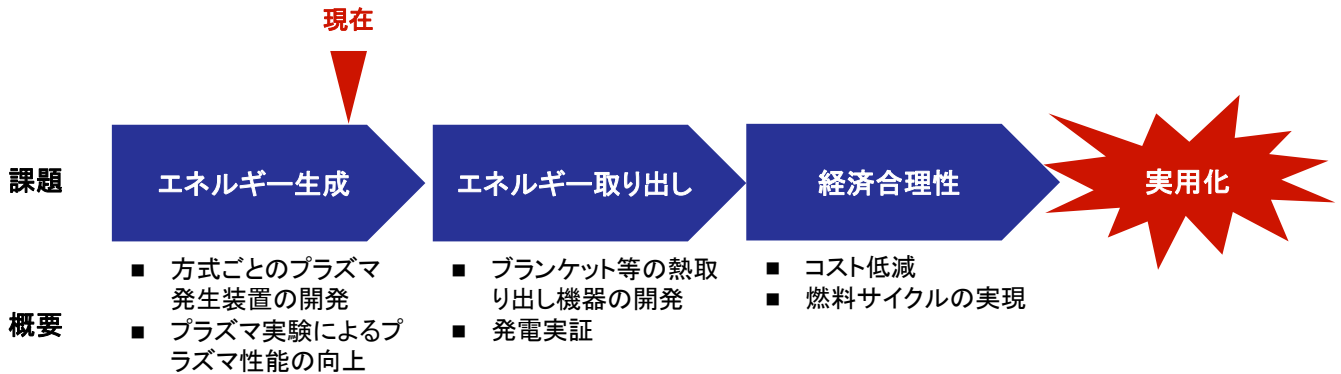
ITER の運転開始予定が 2035 年であることに鑑みると、スタートアップは 2035 年までに発電またはそれに準ずる実験成果を挙げることが求められている。今後 10 年間で、スタートアップが実験を重ねることで核融合プラズマから大きなエネルギーを生み出すことに成功すれば、有力な方式として官民の両部門から更なる資金が流入することが期待される。

実用化までにエネルギー取り出しや経済性のハードルは残存

ただし、ITER もスタートアップも未だエネルギーを生み出していない点は共通しており、政府主導とスタートアップ主導のいずれの核融合研究開発も、現在の課題は核融合反応により大きなエネルギーを生み出すことである。発電の実現には、性能の高いプラズ

マによりエネルギーを生み出したうえで、エネルギーを電気として取り出す技術の開発が必要である。さらに、これらを総合的に経済合理的に実現できなければ、実用化には至らない。実用化までには、この3つの課題を段階的にすべて克服することが必要であり、スタートアップも含めて現状は1段階目にあることは認識しておく必要がある(【図表10】)。

【図表 10】核融合発電実用化までの主な課題



(出所) みずほ銀行産業調査部作成

4. 産業化に向けた各国政府の研究開発戦略

各国が核融合領域の戦略を策定

スタートアップにより核融合研究開発が加速していることを踏まえて、各国政府は新たに核融合領域の戦略を策定している(【図表 11】)。本章では、米国、英国における政府の核融合研究開発戦略と、具体的な取り組みについて確認する。

【図表 11】各国の核融合戦略

国	年月	戦略	主な内容
米国	2024/6	Fusion Energy Strategy 2024	<ul style="list-style-type: none"> 核融合エネルギーの研究開発加速 2030年代に民間主導の核融合パイロットプラントの建設 核融合の大規模商業展開の道筋の準備 核融合の公平な開発・実装
英国	2021/10 2023/10改訂	Towards Fusion Energy	<ul style="list-style-type: none"> 正味エネルギーを生み出す原型炉の建設 世界有数の核融合産業構築
ドイツ	2024/3	Fusion 2024 - Research on the way to a fusion power plant	<ul style="list-style-type: none"> 核融合発電の早期発電に向けた研究開発戦略
中国		(統一的な国家戦略はない)	

(出所) 各種公開情報より、みずほ銀行産業調査部作成

(1) 米国

米国は2030年代に民間主導で核融合パイロットプラントの実証を行う方針

米国は、バイデン政権下の2022年3月に、Bold Decadal Vision for Commercial Fusion Energy を発表し、今後10年間の核融合の商用化に向けたビジョンを策定している。2024年6月には、Fusion Energy Strategy 2024 を発表し、官民パートナーシップを活用して2030年代に民間主導で核融合パイロットプラント(以下、FPP)の実証を行うことを明記している。

DOE は宇宙を参考にしたマイルストーンプログラムを実施

具体的な民間計画の支援策の一つとして、米国エネルギー省(以下、DOE)が主導するマイルストーンプログラムがある。同プログラムでは、スタートアップの商用化計画を複数採択し、国立研究所や大学と協力しながら科学技術的課題に対して取り組む。各計画には開発目標としてのマイルストーンが設定されており、マイルストーン実現に向けた開発費用

の50%を政府が負担する。マイルストーンごとに計画の絞り込みを行い、最終的に2030年代に実証を行うFPPを選定する。

マイルストーンプログラムでは8つの計画が採択

マイルストーンプログラムでは、2023年5月に、8件の計画が採択された(【図表12】)。採択された計画は、トカマク方式、ステラレータ方式、レーザー方式、ミラー方式、Zピンチ方式と多様な方式が存在している。また、採択されたスタートアップの一部は、採択後に民間からの追加的な資金調達に成功している。

【図表12】マイルストーンプログラム採択案件

機関	タイトル	方式
Commonwealth Fusion Systems	コンパクトで高磁場のARC発電所による10年単位での商業融合発電	トカマク
Focused Energy	高利得プロトン高速点火による慣性核融合エネルギー	レーザー
Princeton Stellarators	平面成形コイルのアレイによるステラレータ融合パイロットプラント	ステラレータ
Realta Fusion	高磁場軸対称ミラーによる融合エネルギーへの迅速なパス	ミラー
Tokamak Energy	核融合パイロットプラントのST-E1予備設計レビュー	トカマク
Type One Energy Group	商業融合エネルギーへの高磁場ステラレータのパス	ステラレータ
Xcimer Energy	低コスト高エネルギーエキシマードライバーとHYLIFEコンセプトによるIFEパイロットプラント	レーザー
Zap Energy	せん断流安定化Zピンチに基づく核融合パイロットプラント設計の開発	Zピンチ

(注1)ステラレータは、磁場閉じ込め方式の一つであり、捻じれたコイルにより外部の電磁石のみで磁場を形成してプラズマを閉じ込める方式。後述のヘリカル方式と同様

(注2)ミラーは、2つの円形のコイルにより発生する直線型の磁場によりプラズマを閉じ込める方式

(出所)U.S. Department of Energy 公表情報より、みずほ銀行産業調査部作成

米国は多様な民間による核融合研究を活かす

米国がこうした支援策をとる背景には、米国では大学・研究所における多様な核融合研究の基盤があり、そこからスピノフした多数のスタートアップが存在し、資金調達にも成功していることが考えられる。また、本プログラムは宇宙領域におけるNASAのCommercial Orbital Transportation Services(以下、COTSプログラム)を参考に行っている。COTSプログラムでは、支援対象先であったSpaceXが成長し、ロケット打ち上げコストの大幅な圧縮に成功した。米国は、SpaceXと同様に、本プログラムにおいて核融合分野でのイノベーションを期待している。

(2)英国

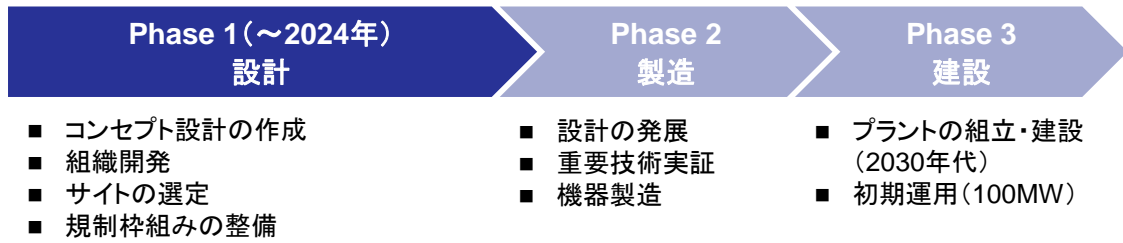
英国は2040年までに政府主導で核融合原型炉を開発する方針

英国は、2021年10月にビジネス・エネルギー・産業戦略省(BEIS)が「英国政府の核融合:核融合エネルギーに向けて」を発表し、核融合発電原型炉の建設と、世界をリードする核融合産業を構築することを目指している。さらに2025年1月には、Plan for Change to deliver jobs and growth in UK leading fusion industryにおいて、核融合研究開発の加速と経済成長のために4億1,000万ポンドの投資を発表した。

原型炉は球状トカマク方式を採用

原型炉については、球状トカマク方式の原型炉であるSpherical Tokamak for Energy Production(以下、STEP)を英国政府が主導して建設することとしている(【図表13】)。2023年10月には、英国原子力公社(UKAEA)の100%出資により、英国核融合プログラム実行機関(UKIFS)を設立し、UKIFSが民間パートナーと連携しながら段階的に設計、製造、建設を進めていく。

【図表 13】 STEP の概要



(出所)STEP ウェブサイトより、みずほ銀行産業調査部作成

STEP は民間企業と連携しながら推進

STEP の推進にあたっては、政府調達を通じて民間のパートナー企業を選定している。例えば、現在設計パートナーを2者、建設パートナー3者を候補先として選定しており、2025年末から2026年初頭までに各1者に絞り込み、建設プロセスを進めていくこととしている。

英国は強みのある球状トカマク方式を軸に産業化を進める

英国は、気候変動対策に精力的に取り組んでいるとともに、EU と欧州原子力共同体からの離脱により独自の核融合研究開発を進める動機が存在する一方、米国に比べるとスタートアップの数も少なく、国家予算も限定的である。英国には MAST と呼ばれる球状トカマクの実験装置があり、その研究成果をもとに設立されたスタートアップである TE も存在する。したがって、政府としては強みのある球状トカマク方式に絞って原型炉開発の方針を掲げ、政府調達により民間企業を巻き込むことで産業化を進める方針をとっている。

(3)まとめ

各国は自国の強みを生かしつつ民間の力を取り込む政策へシフト

スタートアップによる核融合研究開発が進展する中、各国政府は新たな研究開発戦略を策定している。新たな戦略では、明確な発電実証の時期を設定し、ITER による国際協調でのトカマク方式の研究成果を待たずに、早期の実用化を目指している。その際は、自国が有する研究と産業の基盤、及び早期の実用化を目指すスタートアップの存在を踏まえて、研究開発戦略において支援を行う中心的な主体と方式を選定している(【図表 14】)。この発電実証の実現に向けて、要素技術を有するサプライチェーン企業等の民間の力を結集することで、早期の実用化とその先の産業化を目指した戦略を推進している。

【図表 14】 各国の核融合研究開発戦略の比較

	米国	英国	日本
発電実証	民間主導	政府主導	政府または民間
スタートアップ	多数	少数	少数
方式	多様	球状トカマク	トカマク/多様
アプローチ	<ul style="list-style-type: none"> ■ 核融合スタートアップによる多様な方式のコンセプトを絞り込み、2030年代に発電実証を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 強みのある球状トカマク方式で、スタートアップ含む民間企業とのパートナーシップにより2040年までに発電実証を実施 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ITERサイズの原型炉開発を維持しつつ、多様な方式を採用するスタートアップのFPP計画を今後評価し、2030年代の発電実証を実施

(出所) U.S. Department of Energy, *Fusion Energy Strategy 2024*, U.K. Department for Energy Security & Net Zero, *Towards Fusion Energy2023*、内閣府「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」等より、みずほ銀行産業調査部作成

5. 日本の核融合研究開発の強み

日本の核融合研究開発戦略の検討にあたり強みを特定

前章までで、スタートアップがこれまでの政府主導による研究開発とは異なるアプローチで核融合研究開発を加速させる中、各国政府も自国の強みを生かしつつ他国に先駆けた実用化と産業化を目指した研究開発戦略を策定していることを確認した。本章では、日本の核融合研究開発戦略を検討するために、日本の核融合研究基盤、産業基盤、スタートアップの3要素を確認し、その強みを特定する。

(1) 研究基盤

日本はトカマク研究で世界をリード

2章でも指摘した通り、日本は段階的研究開発によりトカマク研究開発を進めてきた。臨界プラズマ条件を達成したのは、日本のJT-60と欧州のJETの2つの装置のみであり、米国のTFTRは達成することができなかった。JT-60を改修して2022年に運転を開始したJT-60SAは、現存する世界最大のトカマク型プラズマ発生装置である。このように、日本は世界におけるトカマク研究をリードしてきた。

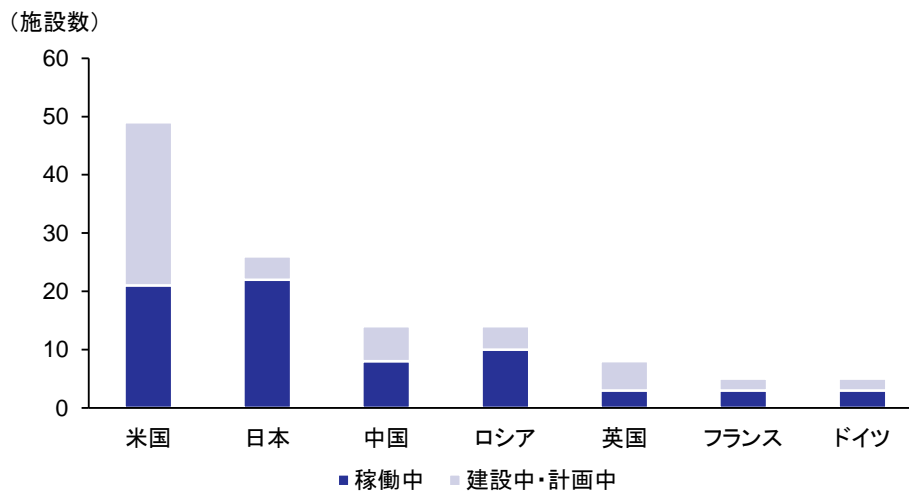
ITERでは単独の国では最大の貢献

ITERは、7極による国際協調プロジェクトであり、各極が費用を分担している。費用の分担割合は建設期と運転期で異なるが、ここまでの建設期ではホスト国のEUを除き一律で9.1%の割合で分担をしている。しかし、日本はITERの候補地として立候補した経緯から、調達分担においては、EUから一部の分担を譲り受け、一国として最大の18.2%を割り当てられている。したがって、単独の国としては日本がITERに最大の貢献をしているといえる。

トカマク以外の方式についても研究基盤が存在

他方、日本では、トカマク以外の方式についても、大学や研究所での研究が進められてきた。例えば、現時点で稼働中の核融合実験施設は合計22施設であり、これは2025年7月時点で世界最多である(【図表15】)。閉じ込め方式についても、トカマク方式が11施設と最多であるが、ヘリカル方式が3施設、レーザー方式が2施設、その他の方式が6施設と、トカマク方式を中心としつつも様々な閉じ込め方式の研究基盤が存在する。

【図表15】 主要国の核融合実験施設数



(出所) IAEA, Fusion Device Information System より、みずほ銀行産業調査部作成

ヘリカル方式は日本で生まれた閉じ込め方式

ヘリカル方式⁸は、磁場閉じ込め方式の一種であり、二重らせん状のヘリカルコイルを使用することで、磁場とプラズマ電流を用いるトカマク方式とは異なり電磁石の磁場のみでプラズマを閉じ込める方式である。電流の制御が不要であることからプラズマを長時間安定的に閉じ込めることができる一方、プラズマの性能向上や複雑な構造のヘリカルコイルの製作が課題である。ヘリカル方式は、1950年代後半から京都大学で独自に研究が進められ、核融合科学研究所(以下、NIFS)が1990年代に建設した大型ヘリカル装置(LHD)が世界有数のプラズマ発生装置となっている。

⁸ ヘリカル方式は、ステラレータの一種であり、英語で「らせん状の」を意味する helical に由来する名称。

レーザー方式では大阪大学が独自の高速点火方式を研究

大阪大学レーザー科学研究所(以下、阪大レーザー研)では、レーザー方式による核融合実現に向けた研究開発が行われている。阪大レーザー研は、大型レーザーで燃料を圧縮することで核融合反応を起こす(点火する)「中心点火方式」とは異なり、燃料の圧縮と加熱を異なるレーザーで行う「高速点火方式」を提案している。高速点火方式は、中心点火方式よりも小型レーザーで核融合を実現することができると考えられており、阪大レーザー研が保有する激光 XII 号などを活用して研究が進められている。

大学ではその他の方式の研究も行われている

日本の大学では、多様な方式の研究が行われている。東京大学では、球状トカマク研究が行われている。日本大学では、FRC 方式の研究を進めており、FAT-CM という装置を保有して、TAE Technologies との共同研究も実施している。筑波大学では、磁場閉じ込め方式の一種であるミラー方式の装置である GAMMA10/PDX を保有しており、核融合関連機器等の試験装置としても活用されている。

(2) 産業基盤

原子力による大型プロジェクト経験と素材産業の高い技術力が強み

前述の多様な方式の研究基盤は、日本企業が有する様々な技術を結集することで構築されてきた。特に、ここでは原子力等の大型プロジェクトを通じて培ったプロジェクトマネジメントや大規模工事、大型機器製作のエンジニアリング経験と、川下産業からの高い品質要求に応じて発展した素材産業の高い技術力を取り上げたい。

トカマク方式等の実験装置建設は原子力発電所の建設に類似

トカマク方式の実験装置は、大型の構造物を高い精度で建設するという観点で、原子力発電所の建設と類似している。日本には複数の原子力プラントメーカーが存在し、それぞれが国内を中心としたサプライチェーンを有し、多くの原子力発電所を建設してきた。プラントメーカーは、ゼネコンとの綿密なすり合わせにより、短納期での建設を実現してきた。核融合研究開発においても、着工から運転開始まで JT-60 は 10 年、LHD は 8 年と短期間での建設を実現している。

大型機器の製作や据付も原子力の経験が生きる

原子力においては、圧力容器や炉内構造物などの大型機器の製作も重要となる。こうした機器の製作においては、精度の高い溶接などの組立加工の技術・技能が求められる。例えば、日本は ITER において高さ 16.5m、幅 9m、総重量 300t のトロイダル磁場コイルと呼ばれる大型コイルの製作を担っており、三菱重工業、東芝エネルギーシステムズ等の原子力プラントメーカーが担当している。

核融合には耐高温・耐高圧・耐放射性・耐プラズマ性を持つ素材が必要

次に、核融合は高温・高圧の極限環境で、放射能やプラズマからの影響にも耐えうる高機能な素材が必要となる。高い技術力を有する日本の素材企業は、従来からこうした核融合向け素材の研究開発に協力してきた。例えば、日本原子力研究所(現:日本原子力研究開発機構)は、日本鋼管(現:JFE スチール)と共同で、1985 年ごろに低放射化フェライト鋼 F82H と呼ばれる核融合向けの構造材料を、世界に先駆けて開発している。

レーザー核融合向けの素材開発も進む

レーザー核融合に必要な高出力レーザーにおいても、素材領域における日本の強みが発揮されている。例えば、媒質と呼ばれる光を増幅する物質には高い耐プラズマ性が必要となる。神島化学工業は、阪大レーザー研と共同で YAG セラミックスと呼ばれる耐プラズマ性の高い媒質を開発し、海外の大型レーザー向けでも採用されている。

長年の HTS 開発により線材でも強み

磁場閉じ込め方式における小型化・低コスト化の鍵となる HTS は、1986 年に発見されて以降、日本企業が先行して研究開発に取り組んできた。現在は、HTS を利用した核融合研究開発の加速により、日本企業の線材がグローバルで採用されている。フジクラは CFS への納入、古河電気工業は TE への出資や協業を進めており、英国 STEP でも両社ともにサプライヤーとして選定されている。

ITER や JT-60SA の建設によりトカマク装置の製造経験を有する

こうした原子力産業や素材産業における強みを生かし、ITER ではトロイダル磁場コイルを含めた主要機器の製作を日本が担当しており、多数の日本企業が関与している。また、前述の JT-60SA は、欧州との共同で取り組む「幅広いアプローチ」活動の一つとして、前身の JT-60 を改修することで ITER 計画を補完・支援するプロジェクトであり、日本企業は ITER で製造しなかった機器の製作や、ITER で経験できなかった据付工事を実施した(【図表 16】)。

【図表 16】日本企業によるトカマク装置の主要機器製作経験

機器等	ITER	JT-60SA
真空容器	-	○
クライオスタット	-	○
トロイダル磁場コイル	○	-
中心ソレノイドコイル	○	○
ポロイダル磁場コイル	-	○
高周波加熱装置 (RF)	○	○
中性粒子入射加熱装置 (NBI)	○	○
ブランケット	○	N/A
ダイバータ	○	○
トリチウムプラント	○	N/A
遠隔保守機器	○	N/A
水冷却系機器	-	○
計測装置	○	○

(出所) 量子科学技術研究開発機構資料より、みずほ銀行産業調査部作成

京都フュージョニアリングは日本の技術を集めてグローバルの核融合研究に提供

スタートアップ企業である京都フュージョニアリングは、こうした日本企業の技術を結集して、核融合スタートアップの研究開発市場において周辺機器やシステムを提供している。プラズマを加熱する装置であるジャイロトロンシステムの販売に加え、核融合反応から発生した高熱を電気に変える熱サイクルシステムと、炉心からトリチウムを廃棄・分離・循環させる燃料サイクルシステムの研究開発に取り組んでいる。英国、米国、カナダ、ドイツ等で事業を展開し、英国原子力公社や TE へのジャイロトロン販売や、カナダ原子力研究所との JV による燃料サイクルシステムの技術開発等、各国の研究機関やスタートアップと関係を構築し、コンサルティングや機器販売で事業機会を獲得しながら技術開発を進めている。

トカマク方式を中心に国内でサプライチェーンを構築できる可能性

このように、日本はこれまで原子力産業や素材産業等の国内産業が有する技術を活用して核融合研究開発を進めてきた。トカマク方式では主要機器一式の製造経験を日本企業が有しており、京都フュージョニアリング等により海外でもその経験が活かされている。HTS やレーザー関連素材等、足下の多様な核融合研究においても重要な技術を有している。今後、Tier1 となる商用核融合発電のプラントメーカーを国内で創出することができれば国内企業を中心としたサプライチェーンを構築することも可能だろう。

(3) スタートアップ

日本では 4 社のスタートアップが早期の実用化を目指す

核融合発電の実用化を目指すスタートアップは、将来的な商用核融合発電のプラントメーカーになり得る主体である。日本では、前述の京都フュージョニアリングの子会社である Starlight Engine、Helical Fusion、Ex-Fusion、LINEA イノベーションのスタートアップ 4 社が早期の実用化を目指した核融合研究開発を行っている。

Starlight Engine は 2030 年代の発電実証を目指す

京都フュージョニアリングは、2024 年 11 月に、2030 年代の発電実証を目指す FAST (Fusion by Advanced Superconducting Tokamak) プロジェクトを開始し、2025 年 4 月にその主体として新会社 Starlight Engine を設立した。FAST では、HTS を活用した小型トカマクを採用し、D-T 燃焼の実証、エネルギー取り出しと利用、トリチウム生成と燃料サイクルの実証、システムインテグレーションの 4 つの課題に取り組むこととしている。

Helical Fusion は長時間運転に強みがあるヘリカル方式の核融合発電実現を目指す

Helical Fusion は、NIFS の研究成果を活用して、ヘリカル方式による核融合発電の実現を目指すスタートアップである。装置の小型化実現に向けては、HTSを使用したヘリカルコイルの開発を実施している。ブランケットには液体金属を採用するなど、商用化を見据えて企業・大学と要素技術の開発を進めつつ、世界初の定常核融合炉実現を目指している。2025年7月には、Helix Program を公表し、統合実証装置 Helix HARUKA と発電を行う Helix KANATA を段階的に開発することとしている。

Ex-Fusion は独自のレーザー技術で高速点火方式による核融合発電を目指す

Ex-Fusion は、阪大レーザー研の高速点火方式研究をベースに、レーザー核融合発電の実現を目指すスタートアップである。レーザー方式の実現に向けては、レーザーの高繰り返し化と制御技術が必要であり、Ex-Fusion は自社の制御技術を磨きながら、10kJ-10Hz⁹級のレーザーを開発している。また、レーザー技術は他産業でも応用可能性があり、レーザー加工や宇宙デブリの捕捉・除去、材料加工等に制御技術を応用している。パルス運転を実施することから、ピーク電源として活用することで、定常運転を行う磁場閉じ込め方式との共存も可能である。

LINEA イノベーションは日本大学の FRC 研究と筑波大学のミラー研究を統合

LINEA イノベーションは、プラズマの閉じ込めは FRC 磁場、ビームの閉じ込めはミラー¹⁰磁場と、日本大学と筑波大学で研究されている 2 種類の閉じ込め方式を組み合わせた方式を採用するスタートアップである。燃料に軽水素の陽イオンである陽子と、質量数 11 のホウ素であるボロンを用いた p-¹¹B 反応での先進燃料核融合発電¹¹の実現を目指している。p-¹¹B 反応では、一般的な D-T 反応とは異なり反応により中性子が発生しないことから、放射性廃棄物の発生や材料の脆化等の課題が解決される。また、ボロンを加熱してプラズマ状態にした後、軽水素のビームを打ち込むことで反応を起こすビーム駆動核融合¹²で核融合反応を起こすことが特徴である。

商用化までの資金調達には課題が残存

2025年7月時点での4社による資金調達総額は230億円であり、CFS1社で20億ドル超を調達している米国に比べると少ない。特に、トカマク方式を採用する FAST 及びヘリカル方式を採用する Helix Program では、発電実証の実現に向けては CFS に準ずる資金を確保する必要がある。Ex-Fusion は出力高繰り返しレーザーの開発、LINEA イノベーションは FRC-ミラー方式における核融合反応の実現可能性検証等で成果を出し、実用化に向けた研究を続けることが必要になる。

(4)まとめ

裾野の広い研究と産業の基盤は日本の強み

日本は、トカマク方式では世界をリードしており、ヘリカル方式やレーザー方式でも競争力の高い実験装置を保有している。大学でのその他の方式の研究も含め、裾野の広い核融合研究の基盤を有している。加えて、原子力産業で培った大型プラントの建設能力や、素材産業における強みを生かし、トカマク方式の機器製作経験や核融合実現に必要な技術を有している。こうした強みを下に、現在の核融合研究開発市場においても事業機会を獲得しており、実用化段階におけるサプライチェーンを構築することもできるだろう。

装置建設によるサプライチェーン構築が必要に

日本には核融合の実用化を目指すスタートアップも複数の方式で存在している。ただし、採用する方式にもよるが、プラズマ実験や発電実証を進めるためには、装置開発のための更なる資金が必要である。したがって、現在有している研究基盤と産業基盤双方の強みを、サプライチェーン構築による産業化につなげるためには、装置開発とそのための資金に対する政策支援が必要となるだろう。

⁹ Jはレーザー出力、Hzは繰り返し回数の単位。一般的なレーザー核融合発電の実現に向けては、MJクラスのレーザーで10Hz(1秒間に10回)の繰り返しが必要となる。日本は高繰り返しレーザーに強みを持つことから、Ex-Fusionは高繰り返しレーザーの高出力化を目指した開発を進めている。

¹⁰ ミラー方式は、磁場閉じ込め方式の一種であり、2つのコイルを並べて同じ方向電流を流すことによって磁場を形成する。FRCと同様に開いた磁力線構造(開放端)であり、シンプルな構造であるものの、両端からプラズマが外に逃げる端損失が発生する。

¹¹ 一般的には、反応に必要な温度が比較的低い(1億℃程度)重水素とトリチウムを燃料としたD-T反応による核融合発電を目指す。それ以外の燃料でも核融合発電は可能であり、それらを総称して先進核融合燃料と呼ぶ。p-¹¹B反応では、一般的に10億℃まで加熱が必要になる。LINEAイノベーションが採用する方式の一つであるFRC方式は、低磁場で高い閉じ込め性能を発揮することから先進核融合燃料を比較的活用しやすい。

¹² ビーム駆動核融合は高エネルギービームイオンを入射することで核融合反応を起こす、TAE Technologiesが過去から研究している方法。

6. 日本が今後取るべき研究開発戦略の具体化

2030年代発電実証を誰がどのように進めるかが重要に

前章で、日本は裾野の広い核融合研究基盤と今後サプライチェーンを構築しうる産業基盤を有しており、複数のスタートアップによる核融合研究開発も進んでいる一方、装置開発のための資金面に課題があることを述べた。これに対し、日本政府は国家戦略であるフュージョンエネルギー・イノベーション戦略を策定して2030年代発電実証の目標を掲げ、バックキャスト型の研究開発を進めることで、民間投資も呼び込みながら発電実証の早期実現と産業化に向けた取り組みを進める方針である。今後は、この2030年代発電実証を、誰がどのように進めるかが重要となる。

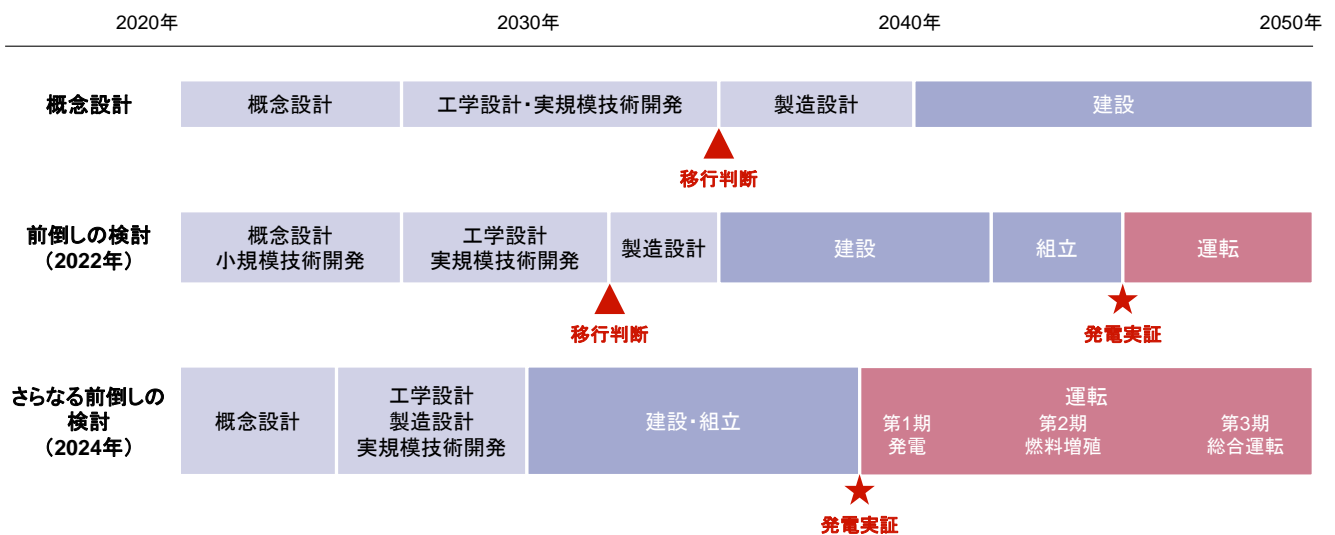
2030年代発電実証は原型炉計画とスタートアップが併存

2030年代の発電実証には、政府主導による原型炉計画と、国内のスタートアップによるパイロットプラントの2つの方向性が存在している。前者の原型炉計画は、従来の段階的研究開発に基づき、実験炉であるITERの次に開発を進めているものである。これまで、産学連携したオールジャパン体制の原型炉設計合同特別チームにより設計が進められており、量子科学技術研究開発機構(National Institute for Quantum Science and Technology、以下、QST)が主体となって民間企業も参画した実施体制を構築することとしている。後者は、5章で取り上げたスタートアップが個々で取り組んでいる装置計画である。各社の開発ロードマップにより装置の位置づけは異なるが、発電を実施するものはパイロットプラントと総称されている。

原型炉計画は民間投資の呼び水にはならない

ただし、政府主導による原型炉計画とスタートアップの計画は双方に課題が存在している。まず、原型炉計画の課題は、民間投資につながらない点にある。原型炉計画は、数十万kWの電気出力、実用に供しうる稼働率、燃料の自己充足性という3つの目標の達成を目指している。従来は、ITERの1.4倍サイズで2050年ごろの運転を目指していた計画を前倒し、ITERと同規模の装置を多段階で改造することにより、2030年の発電実証を実現しつつ、目標の達成を目指すことが検討されている(【図表17】)。したがって、原型炉計画には、民間投資を呼び込む早期実用化に向けたロードマップが存在しない。

【図表17】 原型炉前倒し計画



(出所) 文部科学省原型炉開発総合戦略タスクフォース資料より、みずほ銀行産業調査部作成

従来の原型炉目標から離れた小型化の検討が必要

上述の原型炉計画の目標は、2017年に核融合科学技術委員会で策定された「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」で定められたものである。さらに遡ると、原型炉は1992年に原子力委員会で策定された「第三段階核融合研究開発基本計画」により位置づけられた計画である。政府主導による2030年代の発電実証を進めるにあたっては、30年以上も前の研究開発計画に従った原型炉目標から離れ、発電実証後の参画企業による実用化に向けた投資や、実用化に期待する投資家からの投資を呼び込むために、さらなる小型化の追求が必要となるだろう。

政府主導の計画は JAXA の宇宙戦略基金を参考に

政府主導の原型炉、あるいは原型炉とは異なる計画を 2030 年代発電実証として採用する場合は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の宇宙戦略基金が参考になる。宇宙戦略基金では、JAXA が技術開発テーマを設定し、民間企業等の複数年度にわたる技術開発を支援している。核融合においても、装置開発の主体は QST としつつも、機器や部品の開発は民間主体として、QST は資金配分機関となることで民間企業の開発への関与や民間への技術移転を促すことができる。これは、英国が行う STEP におけるアプローチにも近い。

スタートアップは統合装置建設の経験がない

他方、スタートアップによる発電実証計画の課題は、統合装置建設の経験がないことにある。マイルストーンプログラムを実施する米国では、CFS や TAE 等の複数のスタートアップが民間投資家からの資金調達により、政府支援に頼らずに実験装置の建設を行っている。米国政府は、こうしたスタートアップが採用する多様な方式の研究成果を比較したうえで、政府として支援する対象を選定することができる。これに対し、日本のスタートアップは現状要素技術の開発と設計の段階であり、自前での実験装置建設には移行していない。

発電実証の前にプラズマ実験や装置開発を側面支援

政府として 2030 年代発電実証にスタートアップの計画を採用するためには、その前段階に実機を用いたプラズマ実験や小型装置の開発等による成果を求める必要がある。例えば、フュージョンエネルギー・イノベーション戦略では、スタートアップ等への供用により民間企業が実規模での技術開発ができるよう、QST、NIFS、阪大レーザー研等の拠点を整備することを明記している。スタートアップにこうした機会を提供することで、自社計画の優位性を示す研究成果等を求めることが有効であろう。

民間支援は多様な方式への分散と早期実用化への集中が必要

また、政府主導の原型炉との重複を避けつつ、民間の力を取り込む観点からは、民間の核融合研究への支援は多様な方式への分散と早期実用化への集中が必要となる。これまで、SBIR (Small/Startup Business Innovation Research) 制度ではスタートアップへの支援が行われているが、磁場閉じ込め方式と燃料サイクルの要素技術のみが採択されており、多様な方式への支援がなされていない。また、ムーンショット型研究開発制度では挑戦的な研究開発の支援が行われているが、「2050 年の社会」からのバックキャストであることもあり、足下の産業化には寄与していない (【図表 18】)。

【図表 18】民間核融合研究への支援策と現状の課題

SBIR制度		ムーンショット型研究開発制度	
<ul style="list-style-type: none"> スタートアップ等による研究開発を促進し、その成果を円滑に社会実装し、それによって日本のイノベーション創出を促進するための制度 核融合分野では、原型炉等に向けた核融合技術群の実証に対して補助金で支援 		<ul style="list-style-type: none"> 日本発の破壊的イノベーションの創出を目指す、従来技術の延長にない、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発を推進する大型研究プログラム 2050年の社会からバックキャストし、その鍵となる課題解決に挑戦する研究開発を実施 	
採択スタートアップ	開発内容	研究課題	開発内容
MiRESSO	ベリリウム低温精錬技術	高周波加速器	加速器設計
Helical Fusion	高温超電導導体	超伝導コイル	線材量産技術 コイル設計・製造技術
LiSTie	リチウム回収技術	デジタルプラットフォーム	デジタル空間における 既存装置の実験再現
京都フュージョンアリング	革新的ブランケット		
<p>磁場閉じ込め方式と燃料サイクルに関する要素技術のみが採択され、多様な方式を支援できていない</p>		<p>早期実用化ではなく、2050年からのバックキャストであることもあり学術研究にとどまる</p>	

(出所) 内閣府ホームページ等より、みずほ銀行産業調査部作成

民間主導の計画は NASA の COTS プログラムを参考に

民間主導の計画を 2030 年代発電実証として採用する場合は、米国におけるマイルストーンプログラムと同様に NASA の COTS プログラムが参考になる。日本で実施する場合は先述の QST、NIFS、阪大等の拠点整備や民間研究支援をパッケージ化し、それぞれの計画に対してマイルストーンを設定し、その達成度合いに応じて支援対象を絞り込む。支援対象となったスタートアップ等とは、委託契約等を締結し、発電実証に向けた実験装置建設を支援する。

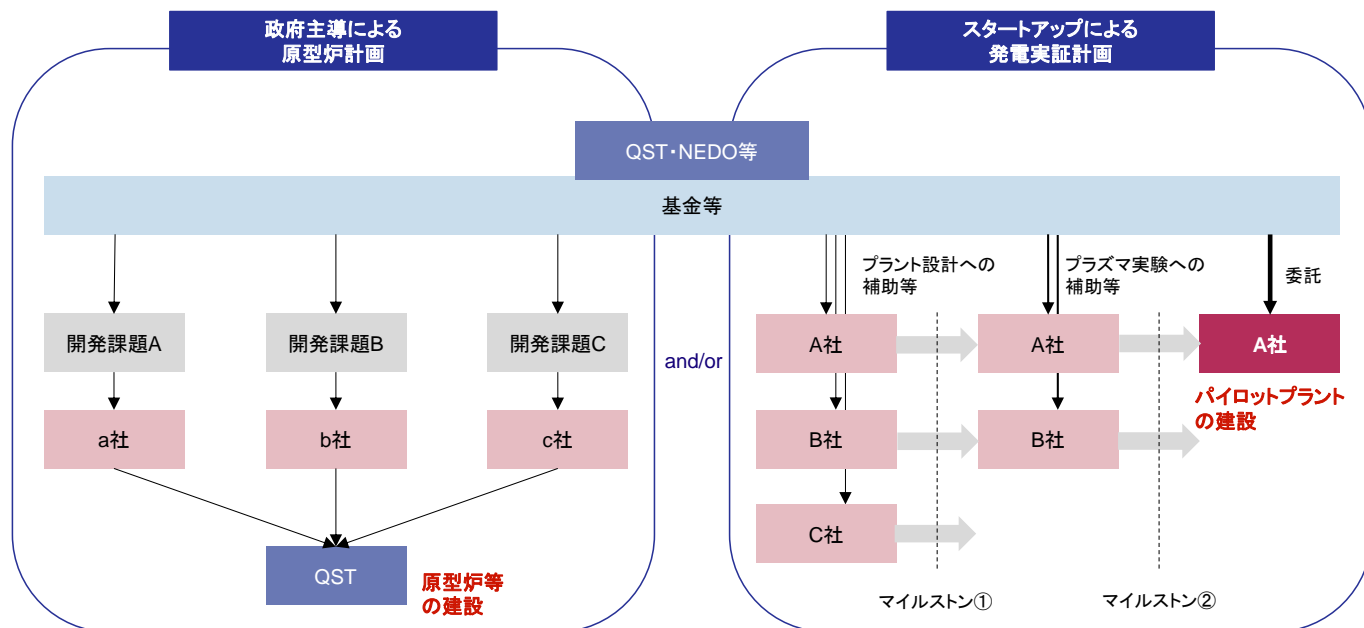
2030 年代発電実証は低コストでエネルギー取り出しの技術開発に取り組むために実施

また、フュージョンエネルギー・イノベーション戦略では、2030 年代発電実証の定義自体も明確化されていない。2030 年発電実証を目指す意義は、研究開発段階からのサプライチェーン構築、エネルギー取り出しや、燃料サイクル技術開発の環境整備、そして早期実用化への挑戦が挙げられる。したがって、原型炉計画とは異なる、発電以外の目標も定義することが必要である。また、フュージョンエネルギー・イノベーション戦略では、技術成熟度を評価して発電実証計画を選定するとされているが、原型炉のような技術目標だけでなく、小型化による建設コストの低減、サプライチェーン構築への寄与、試験設備としてのユーザビリティなども踏まえた評価が求められる。

発電実証の位置づけを踏まえて 2030 年までには主体と方式を選定

2030 年代発電実証を実現するためには、建設期間等を踏まえると 2030 年までには発電実証の主体と方式を選定することが必要となる。そのため、今後数年間は政府計画の具体化と民間計画支援の双方を進めながら(【図表 19】)、並行して発電実証における目標や選定基準を策定していくこととなる。トカマク方式を採用する場合は、政府計画と民間計画を統合することも考えられ、建設コストの多寡に応じて複数計画を並行することも考えられるだろう。

【図表 19】 今後の核融合研究開発支援の体制



(注) NEDO: 新エネルギー・産業技術総合開発機構。核融合に関する支援実施には法改正が必要
(出所) みずほ銀行産業調査部作成

おわりに

2030 年代発電実証を目指してトカマク方式の小型化や、トカマク以外の方式を採用することは、従来の原型炉計画に比べて開発のリスクを伴う。しかし、建設コストを低減することができれば、早期の実験開始や複数の装置建設により、実験の回数を増やすことが可能となる。実験回数が増加することで、実験による学びの回数を増やすことが可能であり、これが核融合研究開発におけるイノベーションの創出に寄与する。2030 年代発電実証を通じて、70 年超にわたる核融合研究開発の継続により蓄積された研究基盤と、これまでの核融合研究を支えるとともに実用化時のサプライチェーンを担う産業基盤を結集し、スタートアップの持つ fail fast¹³の精神を加えることで、早期の核融合発電実用化と、その先の産業化を実現することに期待したい。

¹³ fail fast は「早く失敗する」の意で、早く失敗し、失敗から学ぶことで、より早く成功に近づくというシリコンバレー等のスタートアップに通底する考え方。

みずほ銀行産業調査部
次世代インフラ・サービス室戦略プロジェクトチーム 荒井 周午
shugo.arai@mizuho-bk.co.jp

Mizuho Short Industry Focus／253

© 2025 株式会社みずほ銀行

本資料は情報提供のみを目的として作成されたものであり、取引の勧誘を目的としたものではありません。本資料は、弊行が信頼に足り且つ正確であると判断した情報に基づき作成されておりますが、弊行はその正確性・確実性を保証するものではありません。本資料のご利用に際しては、貴社ご自身の判断にてなされますよう、また必要な場合は、弁護士、会計士、税理士等にご相談のうえお取扱い下さいますようお願い申し上げます。
本資料の一部または全部を、①複写、写真複写、あるいはその他如何なる手段において複製すること、②弊行の書面による許可なくして再配布することを禁じます。

編集／発行 みずほ銀行産業調査部

東京都千代田区丸の内 1-3-3 ird.info@mizuho-bk.co.jp