

フュージョンエネルギー発電の開発動向 —Big Techが投資するスタートアップ—



MITSUI & CO.
GLOBAL STRATEGIC
STUDIES INSTITUTE

三井物産戦略研究所
技術・イノベーション情報部インダストリーイノベーション室
浅田隆利

Summary

- フュージョン（核融合）反応を用いた発電技術は1950年代から研究されてきたが、「研究」の段階から、各国の政策による開発推進や民間投資により「実証・初期の発電に向けた準備段階」へ移行しつつある。
- 有望視されているトカマク方式に加え、ヘリカル方式、レーザー方式、そして、これまでとは大きく異なるFRC方式、MTF方式についても実用化に向けた技術開発が加速している。
- フュージョン炉の開発はITER（国際熱核融合実験炉）の遅れで実現が遠のいたかと思われたが、大量の脱炭素電源を求めるBig Techの支援の下、スタートアップによる開発が加速している。

1. フュージョンエネルギーの概況

太陽や恒星で起こっている反応¹と同じフュージョン（核融合）反応で得られるエネルギーを用いて発電するフュージョン炉が開発されている。フュージョン炉は、発電時に二酸化炭素を排出しない脱炭素電源であるとともに、広く燃料を入手でき²、運転条件を外れるとフュージョン反応が急速に弱まるため安全性が高い、次世代の発電技術である。近年、日本では「核融合」に代わって「フュージョン」という呼称が広がるとともに開発加速に向けた動きがある。2023年に内閣府からフュージョンエネルギー・イノベーション戦略が打ち出され、2025年6月に改訂された。民間ではフュージョンエネルギー産業協議会（J-Fusion）が設立されており、国内でスタートアップが台頭している。また、海外においてもスタートアップが多額の資金を集め、開発が加速している。本稿では、AIデータセンターの拡張を背景に、低炭素な電力を求める一部のBig Techの出資先企業が開発している技術に着目し、その課題と将来性について述べる。

¹ 太陽の中心では、1600万℃の高温と2400億気圧の高温高压の環境でpp（陽子—陽子）連鎖反応と呼ばれる4つのフュージョン（核融合）反応が起こっている。フュージョン炉ではpp連鎖反応は起こせないため、フュージョンという点で原理的には同じだが、その反応条件が異なる。なお、太陽よりも温度が高い恒星では、炭素・窒素・酸素サイクル（CNOサイクル）という、太陽とも異なるフュージョン反応が生じている。

² 最も開発が行われている重水素—トリチウムのD-T反応に使用する重水素については容易に入手可能であるが、トリチウムは天然の存在量が少ないため、炉内での増殖が前提となる。

1-1. フュージョンエネルギー実現に向けた民間主導の開発

フュージョン炉では、軽い原子核同士が高温のプラズマ状態でフュージョン反応することで生じたエネルギーで発電を行う。実証を目指した国際協力³が行われ、国際熱核融合実験炉のITERが開発されている。ITERは完成すれば世界最大となるフュージョン炉だが、運転開始が2034年に延期されることが2024年7月に発表された。

フュージョン炉の実現には巨額の資金が必要であるため、これまでは公的資金で開発が支えられてきた。しかし、FIA⁴の年次調査では、民間投資額は2024年までの累計67億ドルに対し、2025年には22億ドル増加して89億ドルに達した。これは、民間の動きが活発化していることを示す。米国では、エネルギー省が2023年にMBFDP⁵にて民間企業8社の選定・支援を行うとともに、2024年にはFusion Energy Strategy 2024を発表している。加えて、州レベルの支援も行われており、スタートアップが活動しやすい環境となっている。図表1に示す通り、米国以外でも民間の開発を加速させるための支援が世界各国で行われている。

³ 日本、EU、米国、ロシア、韓国、中国、インドが参加。

⁴ Fusion Industry Association

⁵ Milestone-Based Fusion Development Program

図表1 フュージョン関連政策、支援例

国	政策名/支援名/法案名	支援内容
米	Milestone-Based Fusion Development Program	初期46百万ドル（プログラム開始から18カ月）のマイルストーン型の支援であり、CHIPS and Science Actにて総額415百万ドルの予算が認可 選定された8社は以下 ・ Commonwealth Fusion Systems ・ Tokamak Energy ・ Type One Energy ・ Thea Energy ・ Realta Fusion ・ Xcimer Energy ・ Focused Energy ・ Zap Energy
	HB1018（ワシントン州）	フュージョン施設をEFSEC（エネルギー施設認証）制度の対象に追加
	S-364（ニュージャージー州）	州のクリーンエネルギーファンド等の支援適格化
	EUROfusion	ITER実験の準備 実証核融合発電所DEMOのコンセプト開発
仏	France 2030 – Innovative Nuclear Reactors	ステラレータ方式のフュージョン炉開発のRenaissance Fusionへ10百万ユーロ（約11.6百万ドル）の助成
独	Fusion 2040 – Research on the way to a fusion power plant	長期R&D資金を提供 2040年頃の実用炉を視野に基礎・実証研究を支援
英	Fusion Industry Programme & JET Operations	フュージョン関連技術の開発支援に42.1百万ポンド（約48.9百万ドル） 実験施設の支援で84百万ポンド（約97.6百万ドル）
	Plan for Change to deliver jobs and growth in UK leading fusion industry	フュージョン関連の開発を行う研究者への410百万ポンド（約476.2百万ドル）の投資
加	Strategic Innovation Fund	国内でのフュージョン実証を支援 2023年にGeneral Fusionへ5百万カナダドル（約3.6百万ドル）支援
日	フュージョンエネルギー・イノベーション戦略（2023年4月策定/2025年6月改定）	2030年代の発電実証を目指し、フュージョンを新産業と捉えてエコシステムを構築することを目的に、技術開発・人材育成・サプライチェーン整備を推進

出所：各種報道資料から三井物産戦略研究所作成

1-2. フュージョン炉の技術分類と各国の開発動向

フュージョン炉の方式は大きく分けて、強磁場でプラズマを閉じ込める磁場閉じ込め（MFE⁶）、強い衝撃で圧縮・加熱する慣性閉じ込め（IFE⁷）に分類される。MFEは最も研究が進むトカマク方式とヘリカル（ステラレータ）方式の他、ミラー方式や磁場反転配位（FRC⁸）方式が開発され、IFEではレーザーを用いるレーザー方式が開発されている。そして上記以外のその他の方式として、低磁場でプラズマを閉じ込め外部から急圧縮するMFEとIFEを組み合わせた磁化標的方式（MTF⁹）、強い電流で自己磁場圧縮を行うZピンチ方式等が開発されている。各方式と開発する主な企業を図表2に示し、特に開発企業数の多いトカマク、ヘリカル、レーザーの3方式について図表3に概要や技術の特徴を示す。

図表2 フュージョン炉の方式の分類と開発企業

方式区分	方式	米国、カナダ	EU・英国・国際協力	日本
磁場閉じ込め	トカマク （球状トカマク）	Commonwealth Fusion Systems	ITER機構 （英）Tokamak Energy	量子科学技術研究開発機構
	ヘリカル （ステラレータ）	Type One Energy Thea Energy	（独）Proxima Fusion （仏）Renaissance Fusion	核融合科学研究所 Helical Fusion
	ミラー	Realta Fusion	—	LINEA イノベーション
	FRC	TAE Technologies Helion Energy	—	
慣性閉じ込め	レーザー	Xcimer Energy Focused Energy Blue Laser Fusion	（独）Marvel Fusion	EX-Fusion
その他	MTF	General Fusion	—	—
	Zピンチ	Zap Energy	—	—

注：赤字企業名は米国DOEのMBFDP（Milestone-Based Fusion Development Program）で選定された8社を示す。

Tokamak Energyについては米国子会社が選定された。

出所：各種資料から三井物産戦略研究所作成

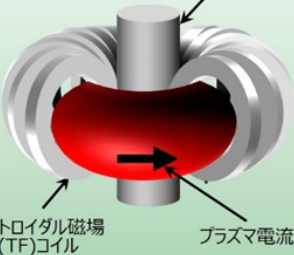
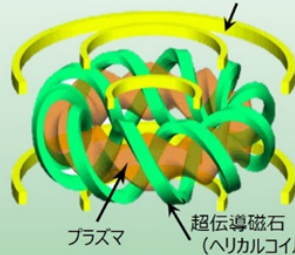
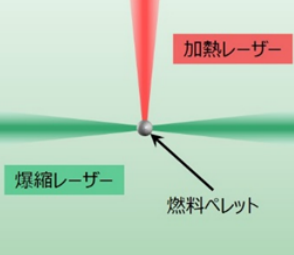
⁶ Magnetic Fusion Energy

⁷ Inertial Fusion Energy

⁸ Field-Reversed Configuration

⁹ Magnetized Target Fusion

図表3 トカマク方式、ヘリカル方式、レーザー方式の原理と特徴

●トカマク型（磁場閉じ込め）	●ヘリカル型（磁場閉じ込め）	●レーザー方式（慣性閉じ込め）
 中心ソレノイド(CS)コイル トロイダル磁場(TF)コイル プラズマ電流	 超伝導磁石(ポロイダルコイル) 超伝導磁石(ヘリカルコイル) プラズマ	 加熱レーザー 燃料ペレット 爆縮レーザー
○TFコイルが作る磁場と、プラズマ電流が発生させる磁場を重ね合わせ、ドーナツ状のねじれた磁場のかごを形成 ○閉じ込め性能が高く、核融合反応に必要な条件のプラズマ生成に成功⇒ITERで採用 ○プラズマ電流はCSコイルや加熱装置により発生⇒プラズマの安定性に課題 ○日本は、JT-60でイオン温度5.2億度(世界記録)達成など、世界トップレベル	○ドーナツ状のねじれた磁場のかごを作るためにねじれたコイルを使い、プラズマ電流を必要としないことが特徴 ○プラズマの安定性に優れ、長時間運転に優位性⇒LHDによる定常運転(約1時間)は世界記録 ○プラズマはコイルに沿ってらせん状になる⇒粒子が飛び出しやすく、閉じ込め性能に課題	○燃料ペレットをレーザーで瞬時に加熱・蒸発させ、中の燃料に爆発的な圧力をかける爆縮という現象が発生 ○閉じ込め時間は燃料プラズマが慣性によりその場に留まるほんの一瞬であり、その間に核融合反応を起こす必要 ○レーザーの効率向上や、大量のペレットに順次レーザーを精密に照射し続けること等が課題
核融合実験炉ITER<ITER機構> 大型トカマク装置JT-60SA <(国研)量子科学技術研究開発機構>	大型ヘリカル装置LHD <(共)核融合科学研究所>	激光XII号・LFEX <大阪大学>

出所：文部科学省ウェブサイト

(https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/019.htm)

米国およびカナダを合わせた北米地域では、主要な方式が網羅的に開発されている。日本ではトカマク方式のJT-60SAが量子科学技術研究開発機構により運用され、ITERの支援研究を行っている。また、ヘリカル方式では(日) Helical Fusionが、レーザー方式については(日) EX-Fusionが開発を行っている。

1-3. Big Techの動向

近年では、図表4に示すようにBig Techと呼ばれるGoogle、Microsoftをはじめとした企業および著名な投資家の投資やPPA¹⁰契約が目立っている。Googleは、トカマク方式を開発する(米) Commonwealth Fusion Systems(以下CFS)へ出資するとともに200MWの長期PPAを締結し、2030年代前半の送電開始を目標に掲げている。CFSはマサチューセッツ工科大学のスピンアウト企業で、高温超電導磁石について高い技術力を有しており、2025年3月時点でフュージョン関連では最大の外部資金調達に成功している。また、三井物産を含む日本企業12社¹¹で構成されるコンソーシアムが2025年9月に出資を行った。

Googleはまた、FRC方式の商用炉開発を目指す(米) TAE Technologies(以下TAE)へも出資を行っており、開発に向けた技術支援も行っている。MicrosoftはFRC方式の炉を開発する(米) Helion Energyと50MWのPPA

¹⁰ Power Purchase Agreementの略であり、電力購入契約を意味する。

¹¹ 三井物産株式会社、三菱商事株式会社、関西電力株式会社、株式会社JERA、株式会社商船三井、日揮株式会社、株式会社日本政策投資銀行、NTT株式会社、株式会社フジクラ、株式会社三井住友銀行、三井住友信託銀行株式会社、三井不動産株式会社の12社。

を締結しており、2028年の送電開始を目標としている。これが実現すると世界初のフュージョンエネルギーでの発電となるが、情報公開を絞る方針で開発が行われているため、外部からの評価が難しく実現性には懐疑的な目もある。また、Amazonの元CEOであるジェフ・ベゾス氏はMTF方式で開発を進める（加）General Fusion（以下GF）へ出資を行っている。2章では、前節の図表3で示した主要3方式とは異なるFRC方式およびMTF方式について詳細に説明する。

図表4 Big Tech企業と関連する投資家による原子力、フュージョン分野への投資・PPA契約

	大型軽水炉	SMR	フュージョン炉
Google(Alphabet)	—	Kairos Power (PPA 50MW ^{*1})	Commonwealth Fusion Systems (PPA 200MW) TAE Technologies
Amazon(AWS)	サスケハナ原発 (PPA 1,920MW)	X-energy	—
ジェフ・ベゾス (Bezos Expeditions)	—	—	General Fusion
Microsoft	スリーマイル原発 (PPA 835MW)	—	Helion Energy (PPA 50MW)
ビル・ゲイツ (Breakthrough Energy)	—	TerraPower(創業)	Type One Energy Zap Energy
Meta Platforms	クリントン原発 (PPA 1,121MW)	—	—
Apple	—	—	—
OpenAI	—	—	—
サム・アルトマン (個人)	—	Oklo	Helion Energy
Anthropic	—	—	—

*1：PPAはKairos Power社とテネシー峡谷開発公社（TVA）が締結。GoogleとTVAとの別の契約により電力を供給。

注：赤字の2社は次章で言及するFRC方式、MTF方式を開発する企業、赤枠は本レポートで注目するフュージョン炉をそれぞれ示す。

出所：各種報道資料から三井物産戦略研究所作成

2. Big Techや投資家が出資するフュージョン技術

2-1. (米) TAE Technologiesの開発するFRC方式フュージョン炉

FRC方式は、主に自己電流による磁場でプラズマを閉じ込める単純なプラズマ構造であるため、システムが簡素化されることから、小型化および低コスト化のポテンシャルが高い。日本においてもLINEAイノベーションがFRC方式を用いた検討を行っている¹²。本技術では磁場を発生させるコイルを小さくできるが、高温・高密度のプラズマを安定して維持できる時間が短いという課題がある。

TAEの開発するビーム駆動型のFRC方式¹³は図表5のように動作する。燃料供給領域に供給されたガスから低温の初期プラズマを形成し、その初期プラズマに中性粒子ビームを入射して高温のFRCプラズマを得る。その後、さらに中性粒子ビームで加熱し、フュージョン反応を発生させる。また、将来的には商業運転時の放射性廃棄物を少なくできるアニュートロニック燃料「軽水素¹⁴-ホウ素 ($p-^{11}B$)」の使用を目指している。2020年代末には実証機で出力エネルギー>入力エネルギーを達成し、2030年代前半に商用炉Da Vinciの運転を開始する計画である。

同社は、プラズマの安定性という課題を、発生させる磁場や中性粒子ビーム、燃料供給等の制御を行うことで解決することを検討している。しかし、 $p-^{11}B$ を燃料とした場合には、10億℃以上の高温プラズマが必要となる¹⁵ため技術的な課題は大きい。これまでに複数の試作機が建設され、間欠的なプラズマの発生・維持の実証試験は進んでいるが、フュージョン反応を起こすためには、さらに高温プラズマを生成する必要がある。また、現状は間欠的な動作を行う試験段階であるため、将来的に高温のプラズマを連続して維持するためにはさまざまな技術開発が必要となる。例えば、中性粒子ビーム入射システムの高出力化・連続稼働や、反応後不要となる粒子を回収する装置「ダイバータ」が必要となる。

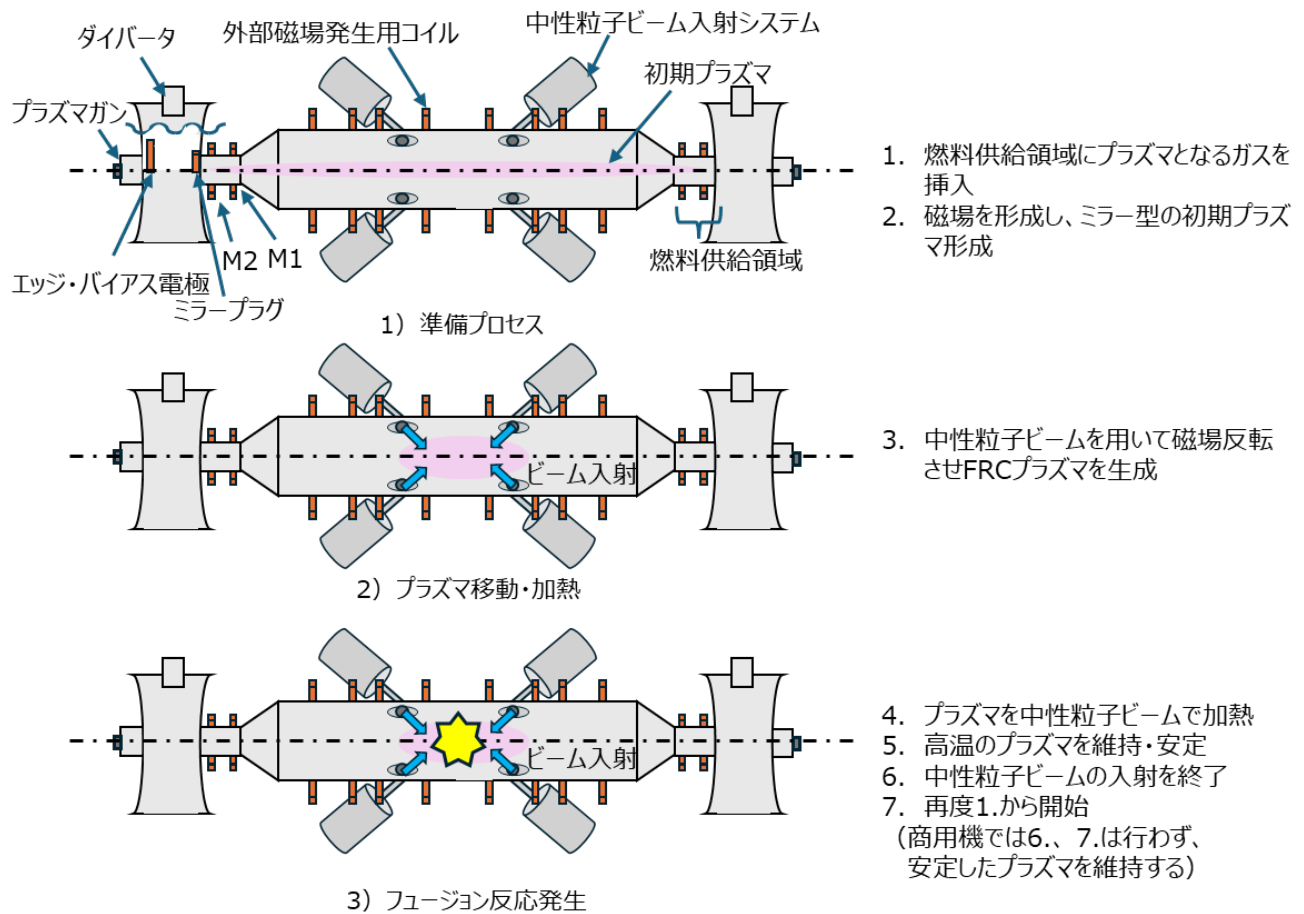
¹² LINEAイノベーションは、FRC方式とミラー方式を組み合わせしており、FRCプラズマを両端で発生させ、2つのプラズマを中心部で衝突させる衝突合体法を用いている。

¹³ TAE Technologiesは過去に衝突合体法を検討していたが、最新型では中性粒子ビームのみでFRCプラズマを発生させるシステムが想定されている。

¹⁴ 自然界における存在比が最も高い水素同位体。他の同位体である重水素、三重水素（トリチウム）と区別するためにこの語を用いる。

¹⁵ D-T反応では1億5,000万℃の高温プラズマが必要とされる。

図表5 FRC方式の動作イメージ図



出所：Nature Communications (<https://www.nature.com/articles/s41467-025-58849-5>) から三井物産戦略研究所作成

2-2. (加) General Fusionの開発するMTF方式フュージョン炉

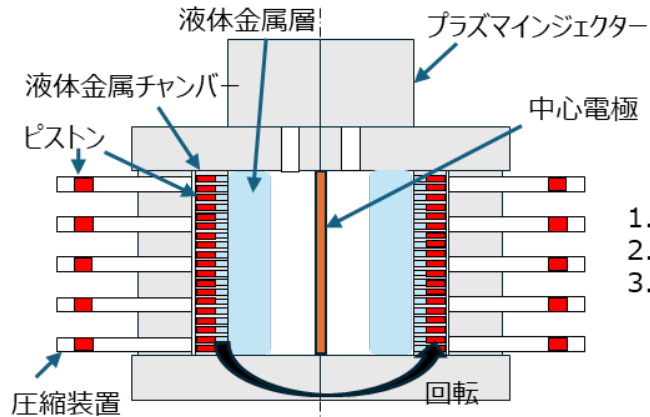
MTFはトカマク方式よりも低磁場でプラズマを維持し、外部からの衝撃圧縮によってプラズマを高温高压の反応条件まで高めるため、磁場閉じ込めと慣性閉じ込めの中間に位置付けられる。GFは、図表6に示すように液体リチウムの層（液体金属層）が作る円筒状の空洞に球状トカマク形状のプラズマを形成・注入し、ピストンで液体金属層を駆動して急激に球状に圧縮することでフュージョン反応を発生させようとしている。液体金属が熱や中性子の緩衝壁の機能を持ち、壁面の損傷を軽減するとともに燃料のトリチウム増殖も行う。さらに、低磁場でプラズマを維持するため超電導コイルが小型化可能であり、コストも低減される。GFは、商用規模の約50%のスケールとなるLawson Machine 26において、2025年にプラズマ生成および圧縮を達成した¹⁶。試験は継続されており、1,000万℃、1億℃の高温プラズマの生成・圧縮を目指すとともに

¹⁶ Lawson Machine 26では液体金属は使用されず、固体リチウムを使用し、固体リチウムを電磁力で押し込んで空洞を圧縮している。

に、最終的には出力エネルギーが入力エネルギーと同程度になることを計画している。本試験結果を基に、10年以内での商用炉実現を目指している。

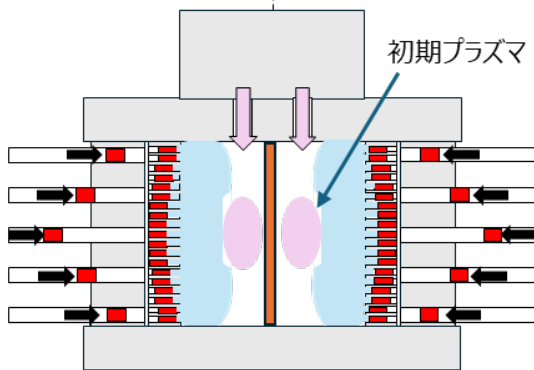
本システムはピストンの同期制御や繰返し動作の再現性、液体金属の循環と冷却の安定性、炉内におけるトリチウムの製造・回収などの課題がある。また、プラズマ生成と圧縮の繰返しを1秒間に複数回実現することは容易ではなく、衝撃圧縮時の不均一性がプラズマの崩壊を招くリスクがあり、制御精度を上げる必要がある。

図表6 MTF方式のイメージ図



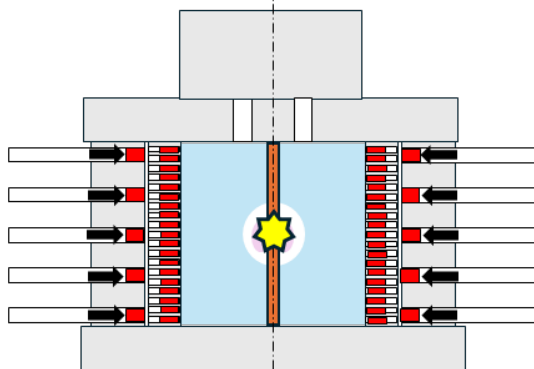
1) 準備プロセス

1. 液体金属チャンバー内へ液体金属を供給
2. 液体金属チャンバーが回転開始
3. 液体金属がチャンバー壁面にて液体金属層を形成し、内部に円筒の空洞が発生



2) プラズマ注入・圧縮開始

4. プラズマインジェクターから初期プラズマを空洞内に注入、球状トカマクプラズマを形成
5. 中心電極に電流を流し磁場を形成
6. 圧縮装置のピストンが中心に向けて位相差を持って稼働



3) フュージョン反応発生

7. ピストンの動作により液体金属が球形の空洞を形成
8. さらに圧縮を継続し、フュージョン反応が発生
9. 発生した熱を液体金属で回収
10. 液体金属を熱回収システムへ循環
11. 1から再度繰り返す

出所：General Fusion社ウェブサイト (<https://generalfusion.com/fusion-demo-plant/core-fusion-technologies/>) から三井物産戦略研究所作成

3. 今後の展望

ITERの運転開始が初期計画より遅れる一方で、スタートアップが投資を集め、ITERよりも早い2025～2028年までの運転開始や限定的な送電開始を目標に掲げて開発を進める企業も出てきている。どの方式においても、送電を行うためには継続的な発電が必要不可欠であり、トカマク方式やFRC方式では長時間の高温プラズマ維持、レーザー方式やMTF方式では安定した間欠運転が必要となる。そのためにはプラズマの安定化や加熱技術だけでなく、高温耐性材料、燃料再生産、熱回収や発電といった多くの課題の解決が必要である。

方式によらず高温耐性やプラズマ不安定性の解明といった共通の技術課題があるため、ITERのような大型の装置や既存のJT-60SAにおける研究開発による進展を期待したい。また、スタートアップが開発しているFRC方式やMTF方式などコンパクトなフュージョン炉では、建設コストや導入リードタイムが短縮できる可能性がある。Big TechによるPPAの締結や、計算技術支援といった技術提供は、スケールアップのための資金調達や技術開発の加速に重要な役割を果たしている。データセンターによる電力需要と、低炭素かつ安定した電源の確保という背景から、フュージョン炉への期待は高く、実用化に向けた活動は今後も継続するだろう。

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的な見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社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。