

核融合発電技術の展望と課題

Research Report
2023年2月投資工学研究所
成田 和弥
社会システム研究所
中澤 安弘

要 約

核融合による発電は、CO₂を排出しないクリーンエネルギーとしてカーボンニュートラル推進に貢献できる期待の技術と位置付けられて、世界各国で注目されている。日本も参画している核融合の国際共同プロジェクト「国際熱核融合実験炉」(ITER)は、2007年10月からフランスにて実験炉建設を開始、2025年に実験炉の運転を目指している。また、2022年12月には、米国ローレンス・リバモア国立研究所の国立点火施設(NIF)において、レーザー方式により入力エネルギーの1.5倍の出力を得られたことが話題となった。また、国内外のスタートアップ企業への資金流入も増加しており、官民両方による商用核融合発電の実現に向けた研究開発が加速しつつある。ただし、核融合発電の商用化には、まだ克服すべき課題が技術面だけでなく、経済性などそれ以外にも残されている。

本稿では、核融合発電の原理や利点、技術開発の進捗状況、国際共同プロジェクトやスタートアップ企業の動向、核融合発電の実用化への課題などについて取り上げた。

目次

- はじめに
- 核融合発電とは
 - 核融合と核分裂の違い
 - 核融合発電がなぜ注目されるのか？
- 核融合エネルギーに対する各国の取り組みと国際プロジェクト
 - 核融合エネルギー実用化に向けた各国の取り組み
 - 国際協調から国際競争の時代へ
- 核融合発電の種類と利点・弱点、各プロジェクトの進捗状況
 - 核融合発電におけるプラズマの閉じ込め方法
 - 各プロジェクトの進捗状況
- 核融合発電の技術研究開発における各プレーヤーの動向
 - 巨額の資金を集める欧米のスタートアップ企業
 - 日本の核融合関連注目スタートアップ企業4社

6. 核融合発電の実用化への課題

6.1. 技術面でのハードル

6.2. 制度・インフラ・経済性などの面でのハードル

7. まとめ

1. はじめに

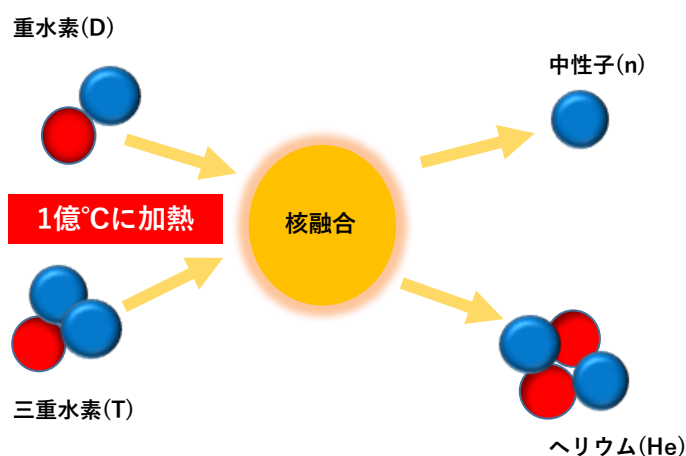
核融合発電の研究は、太陽の中心部で起こる核融合反応を地球上において再現しようとする試みで、「夢の技術」と捉えられてきた。研究開始から約 70 年の歴史があるが、実用化には更に 30 年程度を要するとみられている。しかし、ここ 2 年間で、日米欧など世界の核融合実験炉においていくつかの注目される成果が発表されるとともに、関連するスタートアップ企業への多額の資金流入もあり、実用化に向けて研究開発が加速しつつある。もはや、「夢の技術」は「夢」でなくなりつつある。本稿では、核融合発電の原理や利点、技術開発の進捗状況、国際共同プロジェクトやスタートアップ企業の動向、核融合発電の実用化への課題などについて報告する。

2. 核融合発電とは

2.1 核融合と核分裂の違い

核融合反応は、原子力発電の炉内で起こる核分裂反応とは全く異なる反応である。核分裂は、ウラン 235 のように質量の重い原子核が分裂するときに莫大な熱が発生する反応であり、分裂が始まると連鎖的に反応が続く。一方、核融合では、図表 1 のように重水素 (Deuterium) や三重水素 (Tritium) のような軽い原子核同士が融合しヘリウムなどの元素に変わる時に中性子が分離し、質量欠損に伴い莫大なエネルギーが発生する。

図表 1 核融合反応のイメージ図



(注)赤丸は陽子、青丸が中性子、通常の水素は中性子を持たないが、重水素は 1 つ、三重水素は 2 つの中性子を持つ
(出所) 文部科学省資料などをもとに日興リサーチセンター作成

現状の核融合炉の研究では、図1に示した重水素と三重水素を燃料として核融合反応を起こさせる方式が主流である。この反応を各燃料の頭文字を取ってDT反応と呼ぶ。この反応を起こさせるために1億℃レベルに加熱し、重水素と三重水素を高温プラズマの状態（原子核と原子核の周りを回る電子を超高温状態にすることでバラバラに飛び回る状態）とし、原子核同士がぶつかり合い合体（融合）しやすい環境を作る必要がある。太陽中心部の温度は約1600万℃で、通常の水素である軽水素同士が反応して核融合を起こすが、これは太陽の強い重力により高密度状態であるため、この反応が起こる。しかし、地球上での反応では、そこまでの高密度は再現できないため、1億℃レベルの加熱が必要となる。因みに重水素同士のDD反応では5億℃以上の加熱をしないと地球上では核融合反応を起こせない。

2.2 核融合発電がなぜ注目されるのか？

最近、日本でも核融合発電が注目され始めたのは、2021年秋に岸田政権発足後に打ち出された「新しい資本主義」における成長戦略の中で、脱炭素の実現に向けたクリーンエネルギー政策として、「核融合発電」が盛り込まれたことも関係する。2023年3月には国家戦略として「核融合戦略」が策定される予定である。また、この2年程度で日本の国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構（QST）、米国のローレンス・リバモア国立研究所（LLNL）の国立点火施設（NIF）、英国の公的研究機関 UK Atomic Energy Authority（UKAEA）のSTEP（Spherical Tokamak for Energy Production）など、国内外でのプロジェクトで実用化に向けて研究開発の進展が見られたことも挙げられよう。加えて、これらに関連した日米欧などのスタートアップ企業に対し、ベンチャーキャピタルや民間企業、著名IT系企業経営者などから多額の資金が流れ始めており、核融合エネルギーの研究開発が加速しつつある。

核融合発電のメリットとして、①**特定の国に偏在しない豊富な資源**～海水から燃料である重水素やリチウム（三重水素生成に使用）がほぼ無尽蔵に入手可能、②**少ない燃料から莫大なエネルギーを取得可能**～燃料1gから石油8トン分（タンクローリー1台分）のエネルギーが取得可能（原子力発電の場合、ウラン燃料1gから石油1.8トン分のエネルギー）、③**原子力発電と比較して安全**～核融合反応は燃料投入や加熱を止めれば、反応は停止、④**環境保全性**～発電時に二酸化炭素は排出しない、などが挙げられる。加えて、反応後の放射性廃棄物管理については、原子力発電（核分裂）が出す高レベルの放射性廃棄物は出さず、**低レベルの放射性廃棄物**にとどまる。原子力発電が出す高レベルな放射性廃棄物は半減期が極めて長く、1万年以上経過しないと安全な放射性レベルには達しない。一方、核融合反応で出る放射性廃棄物は半減期が比較的短く、100年で100万分の1になり、安全な放射性レベルに達する。

図表 2 次世代エネルギー候補として注目される核融合発電

核融合発電のメリット	
①	特定の国に偏在しない豊富な資源(重水素やリチウムは海水から入手可能)
②	少ない燃料から莫大なエネルギーを取得可能(燃料1gから石油8トン分のエネルギー)
③	原子力発電と比較して安全(燃料投入を止めれば、核融合反応も停止、暴走しない)
④	環境保全性(発電時にCO2を排出しない)

(出所) 文部科学省および内閣府などの資料をもとに日興リサーチセンター作成

核融合エネルギーは実用化までには未だ 30 年以上かかる見通しで、詳細は後述するが、課題としては、①技術的なハードル、②経済性の問題が挙げられる。前者では、超高温レベルの長時間の維持、もう一つの燃料である三重水素の核融合炉内での増殖効率向上、熱効率の大幅な向上などが挙げられる。一方、後者では膨大な投資規模がある。後述する国際プロジェクト ITER の実験炉は発電機能を有さない施設ながら、3兆円近い投資規模に膨らみ、発電機能を有する原型炉の建設には更に2兆円規模の投資が必要、将来、商用核融合炉1基を建設するのに5千億～1兆円程度の投資規模となる可能性もある。

ただ、投資規模は巨額とは言え、核融合発電は、燃料がほぼ無尽蔵で、少ない燃料で莫大なエネルギーを取得でき、CO2を排出しない電源となる可能性があり、長期的な観点で、環境問題とエネルギー安全保障問題を解決できる次世代のエネルギーとして重視する必要もあろう。燃料資源に乏しく、海に囲まれる島国日本にとって、理想的な発電方式になる可能性を秘めていると捉えられる。

3. 核融合エネルギーに対する各国の取り組みと国際プロジェクト

3.1 核融合エネルギー実用化に向けた各国の取り組み

核融合発電技術は、エネルギー自給率を向上させ、CO2を排出しないクリーンエネルギーとしてカーボンニュートラル推進に貢献できる期待の技術と位置付けられる。

核融合発電における核融合炉の実用化までの開発には1兆円単位の巨額な投資が必要なため、宇宙産業と同様に主要国が協力し技術開発を進める国際共同プロジェクトが行われている。この核融合エネルギーの国際共同プロジェクトは、1985年に米国と旧ソ連の首脳会談において、核融合研究を国際協調のもとで進めることが提唱されたことに端を発している。その後、日米中露を中心として検討が進められ、2001年11月に国際共同プロジェクト「国際熱核融合実験炉」(ITER、イーター)設立に向けた政府間協議を開始、2006年11月には日本、欧州、米国、ロシア、インド、中国、韓国の7極がITER協定を締結、ITER計画が本格的に始動した。2007年10月にフランスのサン・ポール・レ・デュランスにて実験炉の建設を開始、2025年に実験炉の運転、2035年に核融合反応の実証を目指している。

図表 3 国際共同プロジェクト ITER と日本における核融合実験炉



(出所) 文部科学省資料 (https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/019.htm)

核融合発電の研究は、実用化に向けて3つの段階に分けられ(図表 3)、プロジェクトが進められている。

(1) 科学的実現性の確立

核融合プラズマ生成に必要な加熱エネルギーにより、核融合反応(DT反応)が起きた時に出力されるエネルギーが大きくなる状態「臨界プラズマ条件」を達成する。「臨界プラズマ条件」の達成については目途が立ちつつある。

(2) 科学的・技術的実現性の確立

核融合プラズマが加熱を止めても核融合エネルギーにより、反応が持続する状態「自己点火条件」の達成と核融合プラズマの長時間維持を目指す。実験炉建設を通して炉工学技術の進化、エネルギー源である中性子に耐えうる材料開発、核融合炉から熱を取り出す技術など、研究開発が進む。

(3) 技術的実証・経済的実現性の確立

実際に発電を行い、発電効率を高めるなど経済性の向上を図る段階。日本においても核融合原型炉(発電機能を有する核融合実験炉)JA-DEMOの建設が検討されている。

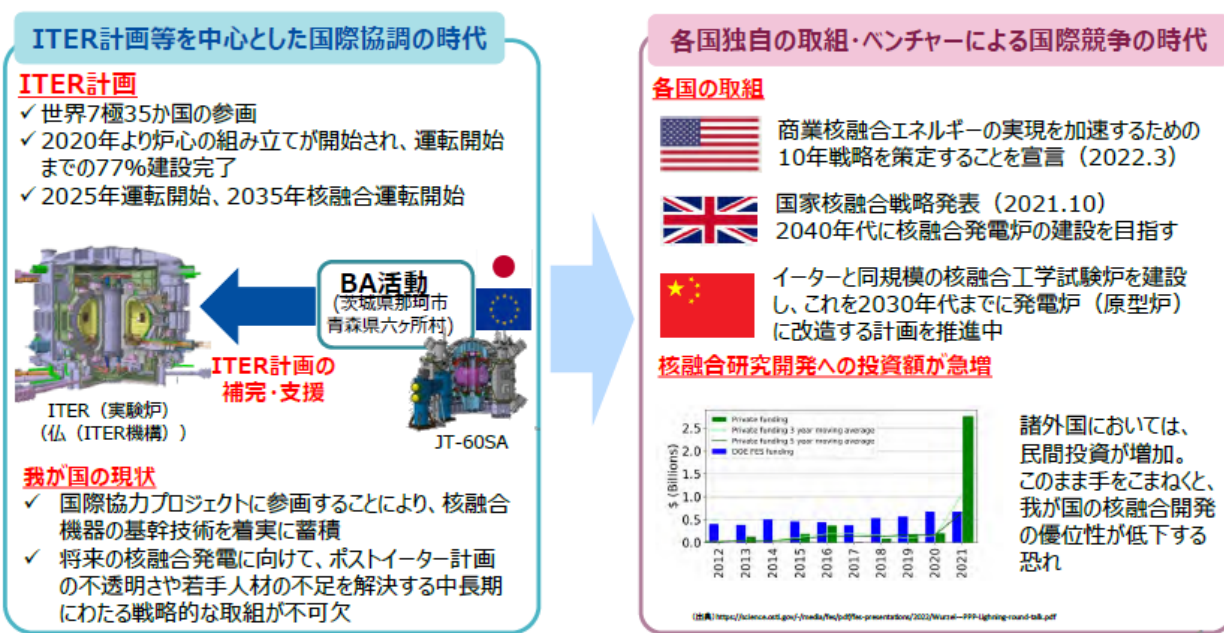
大型国際共同プロジェクト ITER 計画の目標は、①高い核融合エネルギー増倍率、②長時間燃焼の実証、③核融合炉工学技術の実証であるが、現状では上記の(2)の段階にある。ITER 計画では、上記(1)科学的実現性の確立、(2)科学的・技術的実現性の確立をクリアし、50万kW(大型原子力発電所は約100万kW/基)の核融合出力を長時間継続するという最終目標の達成に向け、各要素技術や各装置・部品・素材の開発や実験が進められている状況にある。

3.2 国際協調から国際競争の時代へ

7極が参画するITER計画では、2025年を目標に核融合実験炉ITER（発電機能のない実験炉）の運転開始を目指し、2.5兆円以上の投資規模となっている。また、日欧の国際条約である、より広範な取り組みに対する協定（BA協定、Broader Approach Agreement）が締結されており、核融合炉の原型炉（熱から電気を取り出す発電機能実証のための実験炉、「DEMO」と呼ぶ）の稼働を目指したITER計画を補完する研究開発プロジェクト(BA活動)も進められている。日本はITER計画では準ホスト国、BA活動では、ホスト国として主導的な役割を果たしている。本格的なBA活動は、ITER計画において核融合実験炉が運転に成功することが前提であるが、設備設計や必要となる装置・部品・材料の開発などの準備は着実に進められているようだ。ITER計画、BA活動の計画では、2035年頃を目途に原型炉の完成、運転開始を目指している。

ITER計画の進捗状況や研究成果は各国に共有されるとともに、主要国にある各実験炉や関連研究所はITERへの装置、材料などの供給で貢献をしている。ITER計画の進捗や世界の核融合実験の成果を見極めながら、米国、英国、中国など主要国でも核融合炉の開発を加速する動きもみられ、核融合技術を有するスタートアップ企業に対する資金流入も大型化しつつある。もはや、核融合エネルギーの研究開発は、ITER計画を中心とした「国際協調の時代」から、各国独自の取組・ベンチャーによる「国際競争の時代」に突入しつつある(図表4)。日本としても、核融合発電の開発において、主要装置・部品の研究開発を加速し、諸外国との技術優位性を確保しつつ産業競争力の強化につなげる必要がある。岸田内閣は、国家戦略のひとつとして、2022年より有識者会議なども開催し「核融合戦略の策定」(産業支援策)を進めてきた。2023年1月に骨子はまとまっており、3月には完成する予定である。

図表4 核融合エネルギー開発は国際協調から国際競争の時代へ



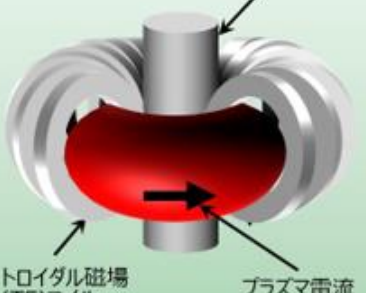
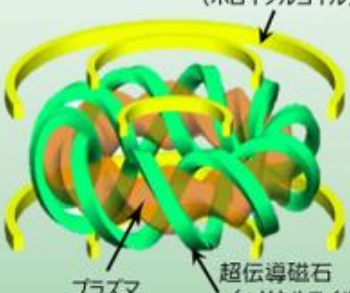
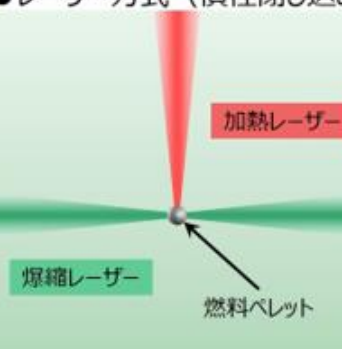
(出所) 内閣府「核融合戦略の策定について」(<https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/index.html>)

4. 核融合発電の種類と利点・弱点、各プロジェクトの進捗状況

4.1 核融合発電におけるプラズマの閉じ込め方法

核融合反応における高温プラズマを包み込む方法として、磁場閉じ込め方式であるトカマク型とヘリカル型、慣性閉じ込め方式であるレーザー方式と主に3つが挙げられる(図表 5)。ここでは、この3つの方式について解説する。

図表 5 核融合反応における3つの方式

<p>●トカマク型 (磁場閉じ込め)</p> <p>中心ソレノイド(CS)コイル</p>  <p>トロイダル磁場(TF)コイル</p> <p>プラズマ電流</p>	<p>●ヘリカル型 (磁場閉じ込め)</p> <p>超伝導磁石 (ポロイダルコイル)</p>  <p>超伝導磁石 (ポロイダルコイル)</p> <p>プラズマ</p> <p>超伝導磁石 (ヘリカルコイル)</p>	<p>●レーザー方式 (慣性閉じ込め)</p>  <p>加熱レーザー</p> <p>燃料ペレット</p> <p>爆縮レーザー</p>
<ul style="list-style-type: none"> ○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 <p>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></p>	<ul style="list-style-type: none"> ○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 <p>大型ヘリカル装置LHD <(共)核融合科学研究所></p>	<ul style="list-style-type: none"> ○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 <p>激光XII号・LFEX <大阪大学></p>

(出所) 文部科学省資料 (https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/019.htm)

4.1.1 トカマク型

トカマク型は炉内での高温プラズマ状態を、磁場を使って閉じ込めるため、図表 5 左のように D の形をした TF コイルを円状に並べ、コイルの中にドーナツ状の磁場を発生させる。一方、ドーナツの穴を通した円筒形の CS コイルと加熱装置により、ドーナツ中心部にもプラズマ電流を流すことで磁場を発生させ、この2つの磁場の重ね合わせにより作られた磁場のかごによって、高温プラズマを包み込む形である。

4.1.2 ヘリカル型

ヘリカルとは日本語で「螺旋」、「捻れ」を意味する。トカマク型と同様にドーナツ状の磁場のかごで安定的にプラズマを閉じ込めるために捻れた磁力線を作る必要がある。この捻れを作るためにヘリカル

コイルという捻れたコイルを使用する。複雑な形状のコイルであるため製作の難易度が高いが、トカマク型のようにプラズマに誘導電流を流す必要がない。トカマク型との比較では、定常運転能力に優れるが、プラズマはコイルに沿って螺旋状になり、粒子が飛び出しやすく閉じ込め性能に課題が残る。

4.1.3 レーザー方式

強力なレーザーを、燃料を封じ込めた直径数ミリ程度のペレット内燃料球に照射し、「爆縮」を起こしてペレットの中心部に高温プラズマ状態を作り核融合反応を発生させる。「爆縮」とは、非常に強力なレーザーをごく瞬間的(10億分の1秒程度)に燃料球に照射し、燃料球が固体密度よりも高密度に圧縮され超高温状態となりプラズマ状態が形成され核融合反応が起こる。一瞬の強力なレーザーの照射で圧縮・加熱を起こす中心点火方式と、圧縮時の強度レーザー照射、加熱時の超強度加熱レーザー照射の二段階にレーザー照射を行う高速点火方式(図表5右は同方式のイメージ図)がある。今後の課題として、核融合発生率の向上などが挙げられる。

図表6 磁場閉じ込め方式と慣性(レーザー)閉じ込め方式の比較

方式	磁場閉じ込め方式(トカマク型/ヘリカル型)	慣性(レーザー)閉じ込め方式
主な施設名	国際共同プロジェクトITER、JT-60SA(量子科学技術研究開発機構)、LHD(核融合科学研究所)など	米国NIF(ローレンス・リバモア国立研究所)、小型核融合炉CANDY、大阪大学レーザー科学研究所など
利点	長年の研究実績とデータの蓄積 (国際共同プロジェクトITER計画)	核融合発生領域が狭い(数mm程度) 要素技術の独立した形での開発が可能 レーザー入射頻度で発電量を調整可能
課題	定常運転(ヘリカル型は定常運転に優れる点があるが、閉じ込め性能に課題が残る)、要素技術の同時実現・設計等に課題、巨額な投資の抑制	核融合発生率(反応効率/安定性)の向上、燃料ターゲットは狭いが、レーザー光を照射するため、通常の核融合炉並みの施設スペースが必要

(出所) 文部科学省資料など各種資料や講演を参考に日興リサーチセンター作成

4.2 各プロジェクトの進捗状況

ここで、前節で紹介した核融合発電の各方式における研究開発の進捗状況について紹介する。

4.2.1 トカマク型

トカマク型は、IAEA(国際原子力機関)の統計¹によれば、世界に約140施設の実験炉があるなか77施設で同方式が採用されている。核融合の3方式の中では、国際プロジェクトITERをはじめ、世界で最も多くの研究施設で採用されており最も研究が進められている方式である。日本においても、QST那

¹ IAEA(International Atomic Energy Agency) FusDIS <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx>

珂研究所の JT-60SA などでの方式が採用されているおり、トカマク型の核融合実験におけるこれまでの世界最高プラズマ温度は、JT-60SA の前身である JT-60U が 1996 年に達成した 5.2 億℃である。また、エネルギー増倍率 Q も 1998 年に 1.25 を記録しており、これもトカマク型としては、2023 年 2 月現在の世界最高値である。

また、民間企業においても、2022 年 3 月 10 日に英国の核融合ベンチャーであるトカマク・エナジーが民間資金で建設された施設では初めて、商用核融合発電を行える温度であるプラズマ温度 1 億℃を核融合実験装置「ST40」にて達成させたことを発表している。

今後トカマク型は、ITER 実験などを通して、エネルギー増倍率 Q の増大 (ITER 実験ではエネルギー増倍率 $Q \geq 10$ が目標。商用化にはエネルギー増倍率 $Q \geq 30$ 程度が必要) やプラズマ持続時間を延ばすことを目指し、商用核融合に繋げていくことを計画している。

4.2.2 ヘリカル型

IAEA 調査によれば、世界の実験炉 15 施設でヘリカル型 (欧米ではステラレーター型、日本ではヘリオトロン型と呼ぶこともある) が採用されている。ヘリカル型の世界最大級の核融合炉が日本の核融合科学研究所にある大型ヘリカル装置 (LHD ; Large Helical Device) である。LHD では、1 時間以上のプラズマの維持を 2005 年に達成しており、1.2MW の出力時でもプラズマの維持を 48 分間達成している。日本の「大規模学術フロンティア推進事業」の一環であった、重水素を用いた LHD プロジェクトは 2022 年度で終了するが、今後は軽水素を用いてプラズマの性質についてより学術的な研究を行う方針である。

海外のヘリカル型核融合実験炉としては、ドイツにあるマックス・プランクプラズマ物理学研究所が建設したヴェンデルシュタイン 7-X が著名である。これまでの実績として、2018 年に「プラズマ温度 4000 万℃、閉じ込め時間 0.2 秒」、「プラズマ温度 2000 万℃、閉じ込め時間 100 秒」を達成し、当時の核融合積 (プラズマ温度、プラズマ密度、閉じ込め時間の積でプラズマの品質を表す指標の一つ) の最高値を達成した。現在はコロナの影響のため計画がやや遅れているものの、30 分に及ぶ長時間のプラズマの持続を目標に装置のアップデートを行っている。

4.2.3 レーザー方式

世界の実験炉 11 施設でレーザー方式が採用されている。2022 年 12 月 5 日、米国の LLNL の NIF が、史上初めて核融合エネルギー (3.15MJ) が投入エネルギー (2.05MJ) を上回る核融合点火状態を達成した。NIF は、2023 年にはレーザーエネルギーをさらに 8%アップグレード (2.2MJ) にすることでより高いエネルギー増倍率を達成することを計画している。

日本においては、大阪大学レーザー科学研究所にある「激光 XII 号」などで採用されている。

レーザー方式全般の実用化への課題としては、定常運転性能を上げることが求められている。今回の NIF による実験では 1 回のレーザー射出に 8 時間必要だが、商用化するには、その射出頻度を 1 秒間に

10 回程度に高める必要がある。また、エネルギー増倍率 Q も 100 以上を目指す必要があり、高効率のレーザー装置の開発が行われている。

5. 核融合発電の技術研究開発における各プレーヤーの動向

5.1 巨額の資金を集める欧米のスタートアップ企業

米核融合産業協会（Fusion Industry Association ※以下、FIS）の 2022 年版のレポートやブルームバーグなどによると、2022 年現在、全世界の核融合のスタートアップ企業に投じられた資金は累計 48 億ドル超となっている。2021 年時点では、調達資金の総額は 20.3 億ドルであったため、1 年間で倍以上となっており、核融合に世界的な注目が集まっていることをスタートアップ企業への投資額からも読み取れる。また、資金だけでなく、直近は前述した 1 億℃のプラズマ温度を達成させたトカマク・エナジーのように公的な機関に匹敵する技術力を持ったスタートアップ企業もいくつか誕生しており、技術的にも民間企業への注目が高まっている。国際的にスタートアップ企業の数も増えているが、ここでは FIS の 2022 年版のレポートに記載されている 33 社のスタートアップ企業のうち資金調達金額上位 10 社を図表 7 に示す。

図表 7 核融合技術の海外スタートアップ企業（資金調達金額上位 10 社）

会社名	所在国	設立年	調達金額	核融合方式
COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS	アメリカ	2018	200,000万ドル超	磁場閉じ込め
TAE TECHNOLOGIES	アメリカ	1998	100,000万ドル超	磁場閉じ込め
HELION ENERGY	アメリカ	2013	57,700万ドル	複合式（磁場、慣性）
GENERAL FUSION	カナダ	2002	30,000万ドル超	複合式（磁場、慣性）
TOKAMAK ENERGY	イギリス	2009	25,000万ドル	磁場閉じ込め
ENN	中国	2006	20,000万ドル	磁場閉じ込め
ZAP ENERGY	アメリカ	2017	20,000万ドル	磁場閉じ込め
FIRST LIGHT FUSION	イギリス	2011	9,781万ドル	慣性閉じ込め
MARVEL FUSION	ドイツ	2019	6,500万ドル	慣性閉じ込め
TYPE ONE ENERGY GROUP	アメリカ	2019	5,175万ドル	磁場閉じ込め

（出所）各社ホームページ、FIS の 2022 年版のレポートより日興リサーチセンター作成

10 社の国別の内訳は、アメリカが半数の 5 社、イギリスが 2 社、カナダ、中国、ドイツが各 1 社となっており、欧米の企業がスタートアップでは中心的地位にいたることが分かる。また、核融合の方式に

については、磁場閉じ込め方式が 6 社、慣性閉じ込め方式が 2 社、磁気閉じ込めと慣性閉じ込めの複合方式が 2 社となっており、磁場閉じ込め方式が多くなっている。ただし、大別すると同じ磁場閉じ込め方式でも各社によって実際の核融合の方式が異なっており、それぞれ独自技術や装置の研究開発を行い商用化の実現を目指している。

上位 5 社について直近の取り組み内容について簡単に紹介する。

(1) COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS

COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS は、マサチューセッツ工科大学からスピンオフした核融合ベンチャーである。高温超電導磁石の開発に強みがあり、2021 年 9 月には、プラズマの閉じ込め性能に関わる磁場強度について、世界最高レベルの 20 テスラの磁場を発生させることに成功している。現在は、ITER より小型の核融合炉 (SPARC) を MIT プラズマサイエンス&フュージョンセンターと協働し、2025 年稼働を目標にマサチューセッツ州に建設中である。SPARC では、自己点火条件を達成し、50～100MW の核融合電力を生成し、エネルギー増倍率 Q は 10 を超えることを目標にしている。また、2030 年代初頭に世界初の商業核融合炉 (ARC) の稼働を計画している。

図表 8 核融合技術の海外スタートアップ企業 ①COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS

企業名	COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS
会社HP	https://cfs.energy/
設立年	2018年
本社所在地	アメリカ
社長/CSOなど	Bob Mumgaard, Dan Brunner, Brandon Sorbom, Dennis Whyte, Martin Greenwald, and Zach Hartwig
資本金/資金調達規模	200,000万ドル超
核融合方式	トカマク式
従業員数	300名以上
母体大学/提携企業・提携大学等	マサチューセッツ工科大学、Eni、Breakthrough Energy Ventures

(出所) 各社ホームページ、FIS の 2022 年版のレポートより日興リサーチセンター作成

(2) TAE TECHNOLOGIES

TAE TECHNOLOGIES は、1998 年に物理学者ノーマン・ロスターカーを含む科学者によって設立された。磁場反転配位型という手法で核融合発電を目指している。2022 年に第 5 世代原子炉であるノーマンが 7500 万℃以上のプラズマを維持することを達成し、住友商事も出資するコペルニクスと呼ばれる第 6 世代の研究用原子炉を現在建設中である。

また、日本の自然科学研究機構核融合科学研究所と連携し、LHD を用いて、DT 反応と比較して放射性中性子を発生させないクリーンでより安価な水素-ホウ素 (p-B11) 核融合反応について研究を行うことが決まっている。

図表 9 核融合技術の海外スタートアップ企業 ②TAE TECHNOLOGIES

企業名	TAE TECHNOLOGIES
会社HP	https://tae.com/
設立年	1998年
本社所在地	アメリカ
社長/CSOなど	Michl Binderbauer
資本金/資金調達規模	100,000万ドル超
核融合方式	逆転磁場配位型（磁場閉じ込め方式）
従業員数	400名程度
母体大学/提携企業・提携大学等	カリフォルニア大学、Google、核融合科学研究所(NIFS)

(出所) 各社ホームページ、FIS の 2022 年版のレポートより日興リサーチセンター作成

(3) HELION ENERGY

2020年に第6世代核融合発電炉「Trenta」では、16カ月以上連続稼働し、1万回以上の高エネルギー核融合パルスを発生させる実験を実施した。本実験ではプラズマ温度1億400万℃を達成している。なお、1億℃を達成したのは民間核融合会社としては、HELION ENERGYが初めての会社である。

現在は、第7世代核融合発電炉「Polaris」のプロトタイプを2024年に稼働させることを目指して開発中。本実験では、投入エネルギーよりも大きい核融合エネルギーの生成を目標としている。また、重水素と重水素による核融合（DD反応）によるヘリウム3の生成も実証する。また、同時に核融合の定常運転のために、核融合反応の頻度を高めることも目標にしている。Trentaでは、10分に1回だった反応を、Polarisは1秒に1回に向上させる予定である。

図表 10 核融合技術の海外スタートアップ企業 ③HELION ENERGY

企業名	HELION ENERGY
会社HP	https://www.helionenergy.com/
設立年	2013年
本社所在地	アメリカ
社長/CSOなど	David Kirtley
資本金/資金調達規模	57,700万ドル
核融合方式	磁気慣性核融合方式（磁場閉じ込め方式と慣性方式の複合）
従業員数	90名
母体大学/提携企業・提携大学等	NASA、国防総省、Y Combinator、Mithril Capital Management

(出所) 各社ホームページ、FIS の 2022 年版のレポートより日興リサーチセンター作成

(4) General Fusion

General Fusion は、2002年にミシェル・ラベルジュ博士によって設立された。現在、英国原子力公社（UKAEA）と実証用プラント建設に合意し、英国政府によって財政的に支援を受けて、2025年稼働

を目標に商用発電所に必要なサイズの70%相当で、プラズマ温度1億5千万℃を目指す核融合発電所をイギリスに建設中である。2030年代に商用核融合炉の稼働を目指している。

図表 11 核融合技術の海外スタートアップ企業 ④General Fusion

企業名	General Fusion
会社HP	https://generalfusion.com/
設立年	2002年
本社所在地	カナダ
社長/CSOなど	Michel Laberge
資本金/資金調達規模	30,000万ドル超
核融合方式	磁気慣性核融合方式（磁場閉じ込め方式と慣性方式の複合）
従業員数	207名
母体大学/提携企業・提携大学等	ジェフ・ベソス、イリノイ大学など

(出所) 各社ホームページ、FISの2022年版のレポートより日興リサーチセンター作成

(5) TOKAMAK ENERGY

TOKAMAK ENERGYは2009年にイギリスに設立され、ITERと同じくトカマク型で核融合発電を目指している。2022年3月に球状トカマク型核融合実験装置「ST40」で、民間資金で建設された実験装置では、世界で初めてプラズマ温度1億℃を達成した。また、商用核融合を見据えた実験を行うため、新しい高温超電導磁石を用いた核融合炉「ST80-HTS」を建設中である。最終的には2030年代半ばに商用核融合発電所を世界的に展開することを目指している。

図表 12 核融合技術の海外スタートアップ企業 ⑤TOKAMAK ENERGY

企業名	TOKAMAK ENERGY
会社HP	https://www.tokamakenergy.co.uk/
設立年	2009年
本社所在地	イギリス
社長/CSOなど	Chris Kelsall
資本金/資金調達規模	25,000万ドル
核融合方式	トカマク式
従業員数	190名
母体大学/提携企業・提携大学等	Culham Centre for Fusion Energy、英国原子力庁、東京大学、イリノイ大学、オックスフォード大学

(出所) 各社ホームページ、FISの2022年版のレポートより日興リサーチセンター作成

5.2 日本の核融合関連注目スタートアップ企業4社

ここでは前節に続き、日本の核融合関連スタートアップ企業として、京都フュージョニアリング、ヘリカルフュージョン、EX-Fusion、クリーンプラネットの4社を取り上げる。

(1)京都フュージョニアリング

2019年10月に設立。ITERに主要部品であるブランケットやジャイロトロンを納入する契約を締結。欧米の大学関連企業や国際共同で建設が進められている複数の核融合炉プロジェクトに対してブランケット(三重水素生成用装置)、ダイバータ(ヘリウム等不純物排出装置)、ジャイロトロン(プラズマ発生用電磁波発生装置)などの主要機器やプラント設計を供給することにより、核融合発電実用化に向けて貢献することを目指す。「究極的なエネルギーソリューション『核融合』によって地球の課題を解決し、人類に新たな未来をもたらす。」をビジョンに、「核融合を産業として確立させ、日本ならではの技術優位性に立脚した産業競争力を身につける。」をミッションに掲げる。

図表13 日本のスタートアップ企業 ①京都フュージョニアリング

企業名	京都フュージョニアリング株式会社
会社HP	https://kyotofusioneering.com/
設立日	2019年10月1日
本社所在地	東京都千代田区大手町一丁目6番1号 大手町ビル6階 Inspired.Lab
社長/CSOなど	共同創業者&CEO 長尾 昂(たか) /共同創業者&Chief Fusioneer 小西 哲之(さとし)
資本金/資金調達規模	1億円/累計調達額16.7億円と京都銀行、三井住友銀行、三菱UFJ銀行と総額7億円の無担保融資契約
主要な株主	京都大学イノベーションキャピタル(株)、Coral Capital、JICベンチャー・グロース・インベストメント、ジャフコグループ、大和企業投資、DBJキャピタル、JGI MIRAI Innovation Fund L.P.(日揮グループ)
シリーズ	シリーズBラウンドで総額13.3億円の資金調達(2022年2月2日付リリース)
従業員数	50名
事業内容	核融合炉に関する装置の研究開発・設計・製造、装置・コンポーネントの輸出
母体大学・研究所/提携企業・大学等	京都大学エネルギー理工学研究所/ 日揮HDなど

(注)資本金、資金調達額は会社HPやニュースリリースより日興リサーチセンター推計
(出所) 各社HP、日興リサーチセンター作成

(2)ヘリカルフュージョン

2021年10月に設立。磁場閉じ込め方式で核融合エネルギーの早期実現を目指す。DNA に似た二重らせん構造の超伝導ヘリカルコイルを用いて高温のプラズマを安定に閉じ込めるヘリカル型に独自の最先端技術を取り入れた、世界初の定常運転の核融合炉の開発を目指している。「必要なエネルギーを必要な時に安心して得られる社会を」をビジョンに、「核融合エネルギーを実装した持続可能な世界を実現する」ことをミッションに掲げる。

図表 14 日本のスタートアップ企業 ②ヘリカルフュージョン

企業名	株式会社HELICAL FUSION (ヘリカル・フュージョン)
会社HP	https://www.helicalfusion.com/
設立日	2021年10月22日
本社所在地	東京都中央区銀座1丁目12番4号N&E BLD.6F
社長/CSOなど	共同創業者 代表 (研究開発担当) 宮澤 順一、共同創業者 代表 (経営担当) 田口 昂哉、共同創業者 取締役 柳 長門(ながと)、共同創業者 取締役 後藤 拓也
資本金/資金調達規模	N.A. /累計調達額約2億円
主要な株主	KDDI Green Partners Fund、Nikon-SBI Innovation Fund、日本マイクロソフト元社長 成毛 眞、レオス・キャピタルワークス代表取締役社長 藤野 英人、医学博士・メディアデザイン学博士 浅田 一憲、ユークレナ代表取締役社長 出雲 充、リバネス代表取締役社長 丸 幸弘、Sony Innovation Fund、Plug and Play Japan、BIOTOPE
シリーズ	シリーズA (2022年11月7日時点)、プレシードラウンドで6500万円を調達 (2022年 5月10日リリース)
従業員数	10名
事業内容	核融合炉の設計、要素技術の開発・提供など
母体大学・研究所/提携企業・大学等	核融合科学研究所/総合研究大学院大学、青山学院大学、徳島大学、東北大学

(注)資本金、資金調達額は会社 HP やニュースリリースより日興リサーチセンター推計
(出所) 各社 HP、日興リサーチセンター作成

(3)EX-Fusion

2021年7月に設立。レーザー核融合商用炉の開発。レーザープラズマの受託研究、プラズマ連続発生装置の製造、核融合システムの技術提供を手掛ける。大阪大学レーザー科学研究所と光産業創成大学院大学の研究者が共同創始者。浜松ホトニクスとの共同研究により1秒間10回の強力なレーザーの照射が可能になる。高速点火という独自のレーザー方式により、2035年の核融合実用化を目指す。

図表 15 日本のスタートアップ企業 ③EX-Fusion

企業名	株式会社EX-Fusion(エクスフュージョン)
会社HP	https://www.ex-fusion.com/ja
設立日	2021年7月19日
本社所在地	大阪府吹田市山田丘2-8 大阪大学テクノアライアンス棟 C806
社長/CSOなど	共同創設者兼CEO 松尾 一輝、共同創設者兼CTO 森 芳孝、CRO 増田 晃一
資本金/資金調達規模	6,865万円/ 1.35億円
主要な株主	大阪大学ベンチャーキャピタル、ANRIなど
シリーズ	シード (2022年3月時点)
従業員数	10名
事業内容	レーザー核融合商用炉の開発。レーザープラズマの受託研究、プラズマ連続発生装置の製造、核融合システムの技術提供。
母体大学・研究所/提携企業・大学等	大阪大学レーザー科学研究所/光産業創成大学院大学 (GPI)、トヨタ自動車、浜松ホトニクス、ジェイテック・コーポレーション

(注)資本金、資金調達額は会社 HP やニュースリリースより日興リサーチセンター推計
(出所) 各社 HP、日興リサーチセンター作成

(4) クリーンプラネット

2012年9月に設立。「量子水素エネルギー」の基礎研究・実用化研究を進める。「量子水素エネルギー」は同社の造語で、ごく微少な金属粒子(金属メゾ触媒)に水素を吸蔵させ一定の条件下で刺激を加えることで、投入熱量を上回るエネルギーを放出する反応システムを指す。東北大学と産学連携体制によって量子水素エネルギーの実用化開発に取り組む。「ビッグサイエンスファースト」を企業哲学とし、原子物理学、量子力学、物性物理学、材料工学、熱力学、電気工学の世界トップレベルの研究者と共に研究開発を進め、国内外で40件以上の特許を取得(2022年時点)。ボイラー大手の三浦工業と量子水素エネルギーを利用した産業用ボイラーの共同開発を進める。

図表 16 日本のスタートアップ企業 ④ クリーンプラネット

企業名	株式会社クリーンプラネット
会社HP	https://www.cleanplanet.co.jp/ja/
設立日	2012年9月10日
本社所在地	東京都千代田区丸の内1-5-1 新丸の内ビル10階
社長/CSOなど	代表取締役社長兼CEO 吉野 英樹/執行役員 CSO 伊藤 岳彦、東北大学 特任教授 岩村 康弘、東北大学 名誉教授 笠木 治郎太(じろうた)、執行役員兼CEO(Chief Engineer Officer) 遠藤 美登(よしと)、執行役員兼CTEO(Chief Thermal Engineering Officer) 吉野 伸
資本金/資金調達規模	3億2,888万円/ 累計調達額約20億円
主要な株主	三浦工業、三菱地所など
シリーズ	シリーズCラウンド(2022年6月15日時点)
従業員数	20名
事業内容	量子水素エネルギー※(常温核融合)の基礎研究・実用化研究 ※「量子水素エネルギー」は同社の造語で、ごく微少な金属粒子に水素を吸蔵させ一定の条件下で刺激を加えることで、投入熱量を上回るエネルギーを放出する反応システムを指す。
母体大学・研究所/提携企業・大学等	東北大学/三菱地所、三浦工業、三菱商事など

(注)資本金、資金調達額は会社 HP やニュースリリースより日興リサーチセンター推計
(出所) 各社 HP、日興リサーチセンター作成

6. 核融合発電の実用化への課題

6.1 技術面でのハードル

核融合発電実用化に向けて着実に前進しているが現実にはまだ課題は存在する。

技術的には、大きく分けて以下の3つの課題が存在すると考えられている。

図表 17 核融合発電実用化への課題

核融合発電のメリット	
①	高温プラズマの長時間維持
②	ブランケット内での燃料となる三重水素の効率的な増殖
③	得られたエネルギーからの発電効率の向上

(出所) 日興リサーチセンター作成

① 高温プラズマの長時間維持

商用発電するためには、実験のような瞬間的な核融合ではなく、高温状態のプラズマを長時間維持して核融合反応させる定常長時間運転を可能にする必要がある。現状、磁場閉じ込めでは、プラズマ温度を1億℃以上で数十秒程度維持できているが、これを数カ月～1年間維持する必要がある。また、レーザー方式では、NIFの2022年12月の実験では、1回射出するのに8時間程度かかっているが、こちらも1秒間に10回程度の頻度でレーザーを射出できるようにする必要がある。

② ブランケット内での燃料となる三重水素の効率的な増殖

燃料となる三重水素は自然界にはほとんど存在しない（水素同位体における天然存在比 10^{-18} ）。したがって、三重水素は核融合によって発生する中性子をリチウムに衝突させることで生成することになる。この生成をより効率よく増殖させるブランケットについて、今のところ結論が出ていない。ITER実験とは別に、最良のブランケットを見つけるITER-TBM計画が行われることが決まっている。ITER-TBM計画では、日本を含む4カ国がそれぞれ独自に開発したブランケットの性能試験を行う予定になっている。

③ 得られたエネルギーからの発電効率の向上

②にも関連するが、ブランケットの役割は三重水素の生成だけではなく、核融合によって発生した中性子をとらえて熱エネルギーに変換させ、その熱を冷媒に伝える役割も担っている。現在、より効率的に熱エネルギーを取り出すためにブランケット素材などについて研究が行われている。

なお、上に挙げた3つの技術的な課題は、単体では克服するのは可能だが、商用核融合炉では、3つの課題を同時にすべて達成することが求められる。

またそれ以外にも、核融合によって高温になる炉の部品についても耐熱性を高めるとともに排熱性能を高める研究なども併せて行われている。

6.2 制度・インフラ・経済性などの面でのハードル

技術的な課題のほかにも、核融合発電が実用化されるためには制度、経済性などの面でのハードルも存在している。2022年12月現在、核融合のみを対象とした規制が制定されている国はまだないが、アメリカ、イギリス、EUでは規制に関して議論が行われている段階にある。日本においては、ITER誘致時に規制について議論が行われたことがあり、文部科学省核融合科学技術委員会 原型炉開発総合戦略タスクフォースで提示された案において、規制に関するスケジュールが示されており、2027年ごろまで検討を行い2035年までに安全審査までを行える体制にすることを計画している。

経済性についても見ていく。現時点において将来の核融合の発電コストは原子力（核分裂）と同程度になると考えられている。なお、経済産業省（2021）によると2030年時点の電源別の発電コストを比較すると、最も発電コストが安いのは太陽光発電になるとの試算も発表されている。太陽光などの再生

可能エネルギーと比較して天候など自然状況に左右されないというメリットはあるものの、核融合が実用化、普及していくには発電コストが下がる必要があると考えられる。また、日渡・後藤ら（2019）、岡野（2022）によると実用核融合炉の建設費については、初号機は 92.6 億ドルかかり、10 基目では 79.7 億ドルかかると 2019 年に試算されている。なお、原子力発電と比較すると、日本において新しく原子力発電所を建設する場合の費用は 5,000 億円程度と言われており、核融合発電所との差はまだ大きく実用化には建設費の縮小も重要になるだろう。

そのほか、核融合に関する産業技術・人材の確保や育成の検討も必要である。また、核融合に対するリテラシーを高めることも実用化にむけて大きな課題である。日本の「核融合」に関する認知度やイメージに関する分析（武田・長嶋(2020)『『核融合』の国内認知度・イメージ分析』）によると、核融合を知っているかの一般認知度は 40.0%であること、核融合については「危険」、「不安」、「信頼できない」などマイナスイメージが強いことが示されている。また、この調査では 86.0%が「核融合」と「原子力（核分裂）」を混同していることも示されている。国民の「核融合」に対する正しい理解が無いままでは、技術的課題を克服しても実用化は難しいことが想像できる。

7. まとめ

核融合発電が実用化するまでの道のりは長く、越えなければならないハードルは多い。技術的な課題としては、①プラズマ高温の長時間維持、②ブランケット内での燃料となる三重水素の効率的な増殖、③得られたエネルギーからの発電効率の向上などである。

ただ、これら技術的な課題については、突然のブレイクスルーで前倒しとなる可能性は十分にあると思う。それは、サイエンスの世界と捉えたい。新型コロナウイルスワクチンの開発を思い出してほしい。2020 年初頭に新型コロナウイルスが世界中に蔓延した時、多くの感染症の専門家は、彼らの長年の経験則からワクチン開発製品化には 2~3 年以上はかかると主張していた。ところが、モデルナという米国のベンチャーはその常識を大きく打ち破り、新型コロナウイルスの遺伝子情報を入手、ウイルスのタンパク構造を同定して、約 2 ヶ月で臨床試験用のワクチン候補を設計・製造し臨床試験を開始した。約 7 ヶ月間の臨床開発を経た後に FDA に申請し承認を取得、わずか 11 ヶ月程度で実用化に結び付けたのだ。現代は、見えなかったものが見える技術があり、途方もなく時間がかかっていた計算は超高速・短時間で計算できるコンピューターがあり、AI ツールもある。30 年という道のりが少しでも短くなり、核融合発電が 2050 年カーボンニュートラルを実現するために一躍を担い、2050 年以降の未来永劫の地球と人類に優しいエネルギーの主役であり続ける存在となることに大いに期待したい。

参考文献

内閣府 イノベーション政策強化推進のための有識者会議「核融合戦略」各種資料

<https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/index.html>

The global fusion industry (2022)、「The global fusion industry in 2022」

経済産業省 資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 (第 48 回会合)、「資料 1 発電コスト検証について」

日渡・後藤 (2019)「Assessment on Tokamak Fusion Power Plant to Contribute to Global Climate Stabilization in the Framework of Paris Agreement」、Plasma and Fusion Research: Letters Volume 14

岡野 (2022)「ITER 建設後の知見に基づく核融合実用炉のコスト」、国際環境経済研究所
<https://ieei.or.jp/2022/06/expl220629/>

武田・長嶋(2020)「『核融合』の国内認知度・イメージ分析」、Journal of Plasma and Fusion Research Vol.96

「核融合エネルギーのきほん」出版委員会編「図解でよくわかる 核融合エネルギーのきほん」、成文堂 新光社

文部科学省ホームページ 核融合の実現に向けて(Fusion Energy-Connect to the Future-)

https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/fusion/

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

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構ホームページ

<https://www.qst.go.jp/site/fusion/>

日本原子力学会誌「よくわかる核融合炉のしくみ」

<http://www.aesj.or.jp/~fusion/aesjfmt/jp/publications/rensai1/rensai01.pdf>

(End)