

核融合エネルギーのキープレイヤーと応用先： 特許と事業戦略から読み解く市場動向

エグゼクティブサマリ

本レポートは、核融合エネルギー分野における主要プレイヤーの技術特許と事業戦略を詳細に分析し、市場の動向、応用先の可能性、そして潜在的なリスクを解明するものです。

- 技術分野の市場概観と重要性

核融合エネルギーは、豊富な燃料資源（海水からの重水素、リチウムから生成される三重水素）を用い、高レベル放射性廃棄物を（原理上）生み出さない、究極のクリーン・ベースロード電源として期待されています¹。2022年のローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)による「点火」達成²以降、技術開発は加速。各国政府は、脱炭素化³と長期的なエネルギー安全保障¹の両立、さらには地政学的な技術覇権の観点から、核融合を国家戦略の重要技術と位置づけています⁵。Fusion Industry Association (FIA) によれば、民間核融合企業への累計投資額は2025年7月時点で97億ドル超⁷、IAEAは100億ドル超⁸に達したと報告しており、市場は「科学的研究」から「産業化」のフェーズへと明確に移行しています。

- 本レポートで分析する「主要な戦略グループ」の分類と、そこに属する主要プレイヤー

本分析では、技術的アプローチ、資金調達規模、および商用化タイムラインの戦略的志向に基づき、市場のプレイヤーを以下の4つの戦略グループに分類します。

1. **グループ1: 国家主導型・基盤科学プロジェクト:** 巨額の公的資金を背景に、数十年単位で基礎科学の確立と工学的実証を目指す。(例: ITER機構、日本の量子科学技術研究開発機構(QST)、英国原子力公社(UKAEA))
2. **グループ2: VBC型・グリッド直結スプリンター:** 巨額のVC資金を調達し、2020年代後半から2030年代前半というアグレッシブな期限で、大手企業とPPA(電力購入契約)を締結。グリッドへの「最速」接続を目指す。(例: Commonwealth Fusion Systems (CFS), Helion Energy)
3. **グループ3: VBC型・深層技術R&D:** グループ2と同様にVC主導だが、D-T燃料より困難だがクリーンとされる技術(p-B11など)を追求。R&Dマイルストーン達成を優先し、派生技術のスピノフも行う。(例: TAE Technologies, General Fusion)
4. **グループ4: 技術イネーブラー・短期収益化型:** 核融合「発電」そのものではなく、核融合プロセスで生じる「中性子」の応用(医療)や、炉に必要な「基幹部品」の販売で、早期に収益を上げる。(例: SHINE Technologies, Kyoto Fusioneering)

- 主要な技術応用先の分類

核融合技術の応用先は、収益化のタイムラインによって明確に分類されます。

1. 現在(商用化済): 核融合反応を「エネルギー源」としてではなく「中性子源」として利用。SHINE Technologiesなどが、医療用同位体(がん治療用のLu-177、診断用のMo-99)の製造⁹や、材料試験¹⁰ですでに事業化しています。

2. 未来(**PPA締結済**): グループ2が牽引する、グリッドスケールの電力供給。Helion EnergyとMicrosoft (2028年, 50MW) ¹¹、CFSとEni (2030年代前半, 400MWe) ¹² など、具体的な納品契約が締結されています。
 3. 長期(**R&D段階**): 宇宙推進システムなど ¹³。
- 市場全体の主要トレンドと今後の課題
 - **トレンド**: 2023年以降のMicrosoft ¹¹ やEni ¹² によるPPA締結は、市場の最大のトレンドです。これにより、投機的なR&Dから、具体的な納期(例: 2028年)と納品物(例: 50MW)が設定された「商用化競争」へとパラダイムがシフトしました。
 - **課題**: 市場の最大の課題は、「物理学」と「工学」の進捗の非対称性、すなわち「TRLギャップ」です。プラズマ物理学(Q>1)の達成が目前に迫る一方、D-T炉の燃料自給に不可欠な「トリチウム増殖ブランケット」(TRL 2: 技術成熟度レベル2)や、中性子に耐える「材料」(TRL 3)などは、依然として基礎研究段階にあります ¹⁵。グループ2が掲げる2028年というアグレッシブな期限は、この深刻な工学的課題とどう両立するのか、市場は重大な岐路に立たされています。

本文

【第1章】技術分野の定義と市場概観

対象技術の範囲定義

核融合エネルギーとは、主に重水素(Deuterium, D)や三重水素(Tritium, T)といった軽元素の原子核が、超高温・超高压環境下で融合し、より重いヘリウム(Helium)などの原子核に変わる際に放出される莫大な質量エネルギーを利用する技術です ²。太陽がエネルギーを生み出す原理と同じであり、地球上での実現には、1億度を超えるプラズマ状態の燃料を、いかに安定的かつ長時間、高密度で「閉じ込める」かが技術的課題となります。

本レポートでは、この「閉じ込め方式」の違いに基づき、現在開発が競われている主要な技術アプローチを分析対象とします。

1. 磁気閉じ込め方式 (**Magnetic Confinement Fusion, MCF**): 超電導磁石などで生成した強力な磁場の「カゴ」でプラズマを閉じ込める方式。
 - トカマク型 (**Tokamak**): ドーナツ状の磁場配位。最も研究が進んでおり、ITER ¹⁶、

Commonwealth Fusion Systems (CFS)¹⁷、QST (JA-DEMO)¹⁸、UKAEA (STEP)¹⁹ など、公的機関から民間スプリンターまで、主流のプレイヤーが採用しています。

- ヘリカル型 (**Helical/Stellarator**): 磁場コイル自体をねじることで、トカマク型で必要とされるプラズマ内の大電流を不要にし、原理的に定常運転に適しています。日本では核融合科学研究所 (NIFS) の大型ヘリカル装置 (LHD)²⁰ や、そこからスピニアウトした Helical Fusion²¹ が代表的です。
- 磁場反転配位 (**Field-Reversed Configuration, FRC**): プラズマ自身の電流で磁場を形成する、よりコンパクトな方式。Helion Energy²² や TAE Technologies²³ が採用しています。
- 2. 慣性閉じ込め方式 (**Inertial Confinement Fusion, ICF**): 燃料ペレットに強力なレーザーなどを全方向から照射し、瞬時に爆縮・点火させる方式。米国の国立点火施設 (NIF)¹⁸ が代表です。
- 3. 磁化ターゲット融合 (**Magnetized Target Fusion, MTF**): MCFとICFのハイブリッド方式。磁場で閉じ込めたプラズマを、液体金属ピストンなどで機械的に圧縮して点火します。General Fusion²⁴ が採用しています。

現在の市場規模と成長予測

核融合エネルギーは、商用発電が開始されていない黎明期の技術であるため、「市場規模」の定義は分析レポートによって大きく異なります。この数値の乖離を理解することは、市場の現状を正確に把握する上で不可欠です。

- 視点1: 将来TAMの混入(数百億～数千億ドル規模)
一部の市場レポート、例えばPrecedence Research (2025年発行)²⁵ や Market.us (2024年発行)²⁶、Maximize Market Research (2024年発行)²⁷ は、2024年または2025年時点の市場規模を「3,000億ドル超」と算出しています。2024年時点で商用発電による売上が存在しないことを鑑みると、これらの数値は、現在の年間キャッシュフロー(売上高)ではなく、(a) ITER 16 に代表される世界的な公的プロジェクトの巨額な(累計)建設・研究予算、あるいは (b) 2030年代に核融合が獲得すると期待される「将来の電力市場のTAM(Total Addressable Market)」を現在価値に割り引いたもの、が混入していると推定されます。
- 視点2: 累計民間投資額(約100億ドル規模)
市場の実態を最も的確に反映しているのは、「民間セクターへの累計投資額」です。Fusion Industry Association (FIA) の2024年のレポートによれば、民間核融合企業への累計投資額は71億ドル超に達し²⁸、2025年7月に発行された最新レポートでは、直近12ヶ月で26.4億ドルの新規資金が投じられ、累計投資額は97億6,600万ドルに達したと報告されています⁷。国際原子力機関 (IAEA) も2025年10月、民間の累計投資額が100億ドルを超えたと発表しており⁸、これが現在の「市場の期待価値」を示す最も信頼できる数値です。
- 視点3: R&Dコンポーネント市場(数億ドル規模)
Coherent Market Insights (2025年発行)³⁰ は、市場規模を2025年時点で3億4,488万ドルと、より保守的に推定しています。これは、上記100億ドルの累計投資から、R&D活動のために

「年間」で支出されている実際のコンポーネント、材料、および研究開発サービス（後述するグループ4の市場）の規模を反映している可能性が高く、実態経済としての市場規模を示していると分析されます。

本レポートでは、市場の「規模」＝「累計民間投資額（約100億ドル）」⁷、市場の「成長性」＝「年平均成長率（CAGR）5.5%～7.4%の範囲」²⁵と定義して分析を進めます。

ビジネス上の重要性

「なぜ今、この技術が重要なのか」という問いに対し、核融合エネルギーは3つの明確な戦略的価値を提供します。

1. 脱炭素化の切り札 (Decarbonization)

気候変動対策 4 と2050年のカーボンニュートラル達成 3 は、現代における最大の課題です。太陽光や風力といった変動性再生可能エネルギーとは異なり、核融合は天候や時間帯に左右されず、安定した電力を供給できる「クリーンなベースロード電源」としてのポテンシャルを持ちます 2。化石燃料の発電所を直接リプレイスできるため、経済活動を維持したまま脱炭素を達成するための「切り札」と見なされています。

2. エネルギー安全保障 (Energy Security)

核融合の主燃料である重水素は海水中に、また三重水素の原料となるリチウムは海水や地殻に豊富に存在します 1。特定地域に偏在する化石燃料やウランとは異なり、燃料供給リスクが（事実上）存在しません。この「燃料の非偏在性」は、地政学的リスクから解放された長期的なエネルギー安全保障の確立に直結します 1。

3. 地政学的戦略技術 (Geopolitical Strategy)

核融合技術は、単なるエネルギー源ではなく、次世代の産業覇権を握るための戦略技術です。米国エネルギー省 (DOE) が2025年10月に発表した「核融合科学技術ロードマップ」⁵ は、商用化に向けた科学技術的課題の克服と、米国が世界の核融合導入をリードする必要性を強く打ち出しています。同レポートは、もし米国がリソースを投入しなければ「他国がそのギャップを埋め、米国は世界のリーダーシップをすぐに譲り渡すことになる」⁵ と警告しており、核融合開発が国家間の経済的・安全的優位性を賭けた技術覇権競争であることを明確に示しています。

【第2章】キープレイヤーの特定と戦略グループ分類

核融合エネルギー市場は、異なるミッション、資金源、タイムライン、およびリスク許容度を持つ多様なプレイヤーによって構成されています。本レポートでは、主要なプレイヤーを3つの分析基準（技術蓄積：特許動向、事業規模：現在の能力や将来のPPA、戦略投資：IR、投資額、アライアンス）に基づき、その市場構造を最もよく表す、以下の4つの「戦略グループ」に分類して分析します。

この分類は、核融合という複雑な市場を理解するための分析の根幹をなすものです。特に、従来の「トカマク型」「レーザー型」といった技術分類では見えない、各社の「ビジネスモデル」と「戦略的意図」の違いを明確にすることを目的とします。

- **グループ1:「国家主導型・基盤科学プロジェクト」(State-Led Foundational Science)**

- 選定理由:

このグループは、巨額の公的資金(税金)によって運営され、直接的な短期利益を追求しません。彼らのミッションは、(a) D-T(重水素-三重水素)燃焼の実証、(b) 基礎科学の確立、(c) 将来の商用炉に必要な工学技術の基盤構築、の3点にあります。彼らのタイムラインは数十年単位であり、民間セクターが依拠するための「共通基盤」を構築する役割を担います。

- 主要プレイヤー:

- **ITER機構** (国際熱核融合実験炉): 33の国と地域が参加する世界最大の核融合実験プロジェクト⁸。
- **量子科学技術研究開発機構 (QST)** (日本): 「核融合エネルギーイノベーション戦略」³²に基づき、原型炉「JA-DEMO」の開発を主導¹⁸。
- **英国原子力公社 (UKAEA)** (英国): 2040年の稼働を目指す原型炉「STEP (Spherical Tokamak for Energy Production)」³⁴を推進。

- **グループ2:「VBC型・グリッド直結スプリンター」(VBC-Backed Grid-Direct Sprinters)**

- 選定理由:

このグループは、ベンチャーキャピタル (VC) や企業の戦略投資部門 (CVC) から10億ドル単位の巨額の資金を調達しています²⁹。彼らの最大の特徴は、2020年代後半から2030年代前半という、グループ1とは比較にならないほどアグレッシブな商用化タイムラインを掲げている点です。さらに決定的なのは、Microsoft 11 や Eni 12 といった大手電力消費者やエネルギー企業と、法的な拘束力を伴う(と推定される)**PPA(電力購入契約)**を締結し、具体的な「納品期限」と「納品量」にコミットしている点です。

- 主要プレイヤー:

- **Commonwealth Fusion Systems (CFS)**: Eni, Google, 三菱商事などが出資¹²。
- **Helion Energy**: Microsoft, NucorとPPAを締結¹¹。

- **グループ3:「VBC型・深層技術R&D」(VBC-Backed Deep-Tech R&D)**

- 選定理由:

このグループもグループ2と同様にVC主導で巨額の資金(10億ドル超)⁴⁰を調達していますが、その戦略は異なります。彼らは、D-T燃料よりも物理的に困難だが、実現すれば(中性子発生が少ないなど)究極的に優れるとされる**先進的燃料(p-B11 41)**や、**ユニークな方式(MTF 24)**を追求しています。そのため、PPAによる「納品コミットメント」よりも、「1億度達成」⁴²といった「R&Dマイルストーンの達成」をIR活動の中心に据えています。また、TAE 43 のように、核となるR&Dから派生した技術(スピンオフ)を別事業として収益化する戦略も併せ持ちます。

- 主要プレイヤー:

- **TAE Technologies**: Google, Chevronなどが出資⁴⁰。
- **General Fusion**: Bezos Expeditions(ジェフ・ベゾス)などが出資⁴⁴。

- **グループ4:「技術イネーブラー・短期収益化型」(Tech Enabler / Near-Term Monetization)**

- 選定理由:

このグループは、核融合「発電」そのものではなく、(a) 核融合プロセス(中性子発生)を応用した「別製品」を販売する、あるいは (b) 核融合炉に必要な「基幹部品」を開発・販売する、というビジネスモデルを採ります。彼らは、グループ1~3の全プレイヤーを顧客とする「ツルハシ(Picks and Shovels)」戦略を採り、核融合エネルギーの成否に関わらず、現在の「R&Dブーム」の中で短期(現在)での収益化を実現しています。

○ 主要プレイヤー:

- **SHINE Technologies:** 核融合中性子源を利用し、医療用同位体を製造・販売⁹。
- **Kyoto Fusioneering:** ジャイロトロン(加熱装置)やブランケット(熱交換・燃料増殖)など、核融合炉の基幹部品を開発・販売⁴⁶。

【第3章】主要な技術応用先の分析

核融合技術の応用先(アプリケーション)は、その収益化タイムラインによって、「現在」「未来」「長期」の3つに明確に分類できます。

「現在」の応用先: 商用化

現在すでに商用化されている応用先は、核融合反応を「エネルギー源」としてではなく、「高エネルギー中性子源」として利用するものです。これはグループ4のプレイヤー(SHINE Technologiesなど)によって牽引されています。

1. 医療用同位体(アイソトープ)製造

核融合反応(D-D反応やD-T反応)は、高エネルギーの中性子を発生させます。この中性子をターゲットとなる物質に照射することで、医療診断や治療に用いられる希少な放射性同位体を製造できます¹⁰。

○ **SHINE Technologies** はこの分野のリーディングカンパニーであり、すでに複数の施設を商業稼働させています⁹。

- **モリブデン99 (Mo-99):** 医療画像診断(SPECT)で最も広く使われるテクネチウム99mの親核種。従来は老朽化した少数の原子炉で生産され、供給不安が深刻な問題でした⁴⁷。SHINEは「Chrysalis」施設で、核分裂法(ただし低濃縮ウランを使用)を用い、その中性子源として核融合技術を活用してMo-99を生産しています⁹。
- **ルテチウム177 (n.c.a. Lu-177):** 前立腺がんなどの放射性リガンド治療(セラノスティクス)に用いられる、需要が急拡大している治療用核種。SHINEは2024年に北米最大級のLu-177生産施設「Cassiopeia」を開設し、年間10万患者回分の供給能力を持つと発表しています⁹。

2. 非破壊検査・材料試験

中性子源は、航空宇宙部品や防衛機器の内部構造を透視する「中性子イメージング」や、電子

機器や材料の中性子に対する耐性を試験する「耐放射線性試験」にも利用されます。

- SHINEは、Phase 1ビジネスとして、これらの非破壊検査サービスや、コンポーネントの信頼性試験を行う「FLARE (Fusion Linear Accelerator for Radiation Effects Testing)」サービスを提供しています⁹。
- このほか、IAEAも核融合炉開発のための「中性子源」の必要性を広く認識しており⁵⁰、これが産業用アプリケーションとして確立しています。

「未来」の応用先：開発段階

核融合技術の本命である「エネルギー源」としての応用は、開発段階にあります。しかし、2023年以降のPPA締結ラッシュにより、「3～5年後」の具体的な商用実証と、「10～15年後」の本格的なグリッド導入という2段階の未来が明確に見えています。

1. 3～5年後（～2030年）の応用（PPAに基づく実証発電）

これはグループ2のスプリンター（Helion Energy）が設定した、極めてアグレッシブなタイムラインです。

- **Helion Energy - Microsoft (2028年)**: 2023年5月に発表された世界初の核融合PPA¹¹。Helionは、2028年までにMicrosoftに対し、**50MW**（メガワット）以上の電力を供給することに合意しました¹¹。
- **Helion Energy - Nucor (2030年)**: 2023年9月、大手鉄鋼メーカーNucorは、**2030年までにHelionから500MWe（メガワット電力）**の供給を受ける契約を発表しました³⁹。これは、グリッド（電力網）全体への供給だけでなく、「特定産業（製鉄所）への直接・大規模電力供給」という、具体的かつインパクトの大きい応用先を示すものです。

2. 10～15年後（2030年代）の応用（グリッドスケール商用発電）

グループ2およびグループ3の主要プレイヤーの多くが、本格的な商用発電所の稼働時期として2030年代前半から中盤を設定しています。

- **Commonwealth Fusion Systems (CFS)**: 2030年代前半に、初のグリッドスケール商用発電所「ARC」の稼働を計画¹⁷。イタリアのエネルギー大手**Eni**（10億ドル超）¹² および**Google**⁵⁴ とPPA（電力購入契約）を締結済みです。
- **TAE Technologies**: 2030年代前半に、プロトタイプ発電所「Da Vinci」の稼働を計画しています⁵⁵。
- **General Fusion**: 2030年代前半から中盤にかけての商用発電所建設をロードマップとしています²⁴。

3. 長期的な応用先（R&D段階）

- **宇宙推進（ロケットエンジン）**: 核融合ロケットは、化学推進（現在のロケット）や核分裂推進に比べ、圧倒的に高い比推力（燃費）と推力を両立できる可能性があります。NASA¹³ や大学⁵⁸ において、火星有人探査などの長距離・高速宇宙ミッション用¹⁴ として研究が進められています。

ポテンシャルと導入障壁

応用先ごとに、市場のポテンシャルと克服すべき障壁は異なります。

1. 応用先: 電力(グリッド／産業用)

- ポテンシャル: 世界の数兆ドル規模の電力市場を脱炭素化する、最大のポテンシャルを持ちます²。HelionとNucorの契約³⁹が示すように、24時間稼働が必要な製鉄、化学、データセンターといった産業への直接供給も巨大な市場です。
- 障壁: **LCOE(均等化発電原価)**です。技術的に発電が成功しても、最終的に太陽光＋蓄電池、風力、あるいはSMR(小型モジュール炉)といった他のクリーンエネルギー源とのコスト競争に勝てなければ、市場でのシェアは限定的となります。Microsoft¹¹やEni¹²とのPPAで合意された電力価格(非公開)が、持続可能なLCOEを反映しているのか、それとも初期の技術実証のためのプレミアム価格なのかは、現時点で不明です。

2. 応用先: 医療・中性子源(グループ4)

- ポテンシャル: すでにSHINE⁹によって商用化されており、技術的ハードルは(エネルギー生産に比べ)格段に低いです。特にLu-177⁹のような高付加価値な治療用核種市場は急成長しており、早期の確実なキャッシュフロー源となります。
- 障壁: 市場規模が電力市場に比べて限定的(ニッチ)であることです。

3. 応用先: スピンオフ技術(グループ3)

- ポテンシャル: TAE Technologiesが示す「電源管理技術」⁴³が代表例です。核融合炉のプラズマ制御には、大電力・高電圧・高速応答のパワーエレクトロニクス技術が不可欠です。この技術は、EVの急速充電、バッテリー性能向上、グリッドの安定化など、即時性が高く巨大な他市場に直接応用(スピンオフ)可能です。
- 障壁: これらは核融合R&Dの「副産物」であり、本業の進捗が(スピンオフ事業の)技術開発のドライバーとなります。

この分析から、市場の戦略的構造が浮かび上がります。グループ2(CFS, Helion)は、PPA 11によって「2028-2030年」という期限にコミットし、LCOEという障壁に正面から挑む「ハイリスク・ハイリターン」戦略を採っています。

一方で、グループ3のTAE 43やグループ4のSHINE 9は、スピンオフ技術や中性子応用という「ヘッジ戦略」を採っています。彼らは、たとえ核融合「発電」が2030年代に間に合わなかったとしても、別事業で企業として存続・成長できる、リスク分散型のビジネスモデルを構築していると分析できます。

【第4章】主要戦略グループ別の詳細分析

本章では、【第2章】で定義した4つの戦略グループに属する主要プレイヤーについて、その事業戦略、技術的ロードマップ、IR(投資家向け情報)、およびアライアンスを網羅的に分析します。本章は、

市場の「今」を理解する上で最も重要な分析パートとなります。

4-1. グループ1「国家主導型・基盤科学プロジェクト」の戦略

このグループのミッションは「商用化の競争に勝つこと」ではなく、「科学的・工学的な基盤を確立すること」にあります。彼らのタイムラインは、民間セクターの戦略を評価する上での「基準線（ベースライン）」として機能します。

A. ITER機構（国際熱核融合実験炉）

- ミッション: 核融合がエネルギー源として科学的・技術的に成立可能かを実証すること。具体的には、投入したエネルギーの10倍の熱出力を得る($Q \geq 10$)こと、およびD-T(重水素-三重水素)燃焼プラズマを長時間維持することを目的としています¹⁶。
- 主要技術: 世界の主流であるトカマク型を採用⁸。33の国と地域が参加し、知見と技術を集約する、人類規模のプロジェクトです⁸。
- ロードマップの変遷と現状(新ベースライン):
ITERのロードマップは、本レポートで分析する民間プレイヤーの戦略的「機会」を理解する上で、極めて重要です。
 - 旧ベースライン (2016年承認): 2016年に承認された計画では、「**2025年12月**」に最初のプラズマ(ファーストプラズマ)を生成し⁵⁹、その後、装置のアップグレード(ダイバータや遮蔽材の設置など)を経て、「**2035年**」に本格的なD-T運転(真の核融合実験)を開始する予定でした¹⁶。
 - 新ベースライン (2024年発表): 2024年、ITER機構は、製造・組立工程における技術的課題(真空容器の寸法不整合、熱遮蔽材の配管問題など)が発覚したことを受け、スケジュールの大幅な見直しを発表しました³¹。
 - ITER新機構長ピエトロ・バラバスキ氏は、旧計画の「2025年ファーストプラズマ」は、主要コンポーネントの多くが未設置状態での「象徴的」なものであったと認めました³¹。
 - 最新の計画(2024年ベースライン)³¹:
 - **2034年**:「運転開始」(重水素のみのプラズマ、ただし旧計画より多くのシステムを統合した状態)。
 - **2036年**:「フルプラズマ電流運転」に到達。
 - **2039年**:「D-T運転」開始。
 - 戦略的分析:
ITERのD-T運転が2035年から2039年へと遅延した³¹ことは、市場全体に巨大な戦略的示唆を与えます。グループ2のスプリンター(Helion, CFS)がPPAで目指す「2028年～2030年代前半」¹¹と、国家プロジェクトが目指す「2039年」³¹との間には、約10年以上のギャップが生まれました。
これは、(a) 国家プロジェクトが民間の「速度」に追い抜かれることを事実上容認した、とも、(b) ITERが直面している工学的課題(製造・組立)の困難さが、民間の楽観的なタイムラインにも同

様の遅延リスクをもたらすことを裏付けている、とも解釈できます。

B. 量子科学技術研究開発機構 (QST) (日本)

- ミッション: 2023年4月に内閣府で策定され、2025年6月に改定された「核融合エネルギーイノベーション戦略」³²に基づき、原型炉(DEMO)「JA-DEMO」を実現し、将来の核融合産業のエコシステムを構築することです。
- 主要技術: ITER¹⁶と、日欧で共同推進する「JT-60SA」(2020年に統合試運転開始)³³の知見を基にした、先進的なトカマク型¹⁸です。
- ロードマップと段階的アプローチ (Phased Approach):
QSTの戦略の最大の特徴は、核融合の3大課題(発電、燃料自給、経済性)を一度に解決しようとせず、一つずつ着実にクリアする、極めて現実的かつリスク管理された「段階的アプローチ」を採用している点にあります³²。
 - 目標: 2030年代に「発電実証」を達成する³²。
 - **Phase I:「発電実証」**³²
 - 概要: まずは「発電」機能に特化。ITERと同等のプラズマ体積を確保し、短時間パルス(数分)で P_{net} (正味電力) $\simeq 0$ の発電を実証します。この段階では、燃料増殖を行わない「遮蔽ブランケット」を使用します。
 - **Phase II:「トリチウム増殖実証」**³²
 - 概要: Phase Iの炉のブランケットを、燃料(トリチウム)を生産する「増殖ブランケット」に交換。長時間パルス(数時間)で、燃料の自給($TBR > 1$)を実証します。この段階でも $P_{net} \simeq 0$ です。
 - **Phase III:「定常運転実証」**³²
 - 概要: 最後に、プラズマ加熱・電流駆動装置の高効率化などにより、プラズマ性能を向上させ、定常運転で $P_{net} \simeq 100\text{MW}$ レベルの経済性を実証します。
- 戦略的分析:
QSTの戦略は、ITERの遅延³¹や、後述する工学的ボトルネック(TRL 2のブランケット 15)を直視した、最も堅実な国家戦略と言えます。「発電」と「燃料自給」という全く異なる工学課題を分離(Phase IとII)して開発するアプローチは、民間(グループ2)の「一足飛び(All-in-one)」戦略とは対極にあり、技術的リアリズムに基づいています。

C. 英国原子力公社 (UKAEA) (英国)

- ミッション: 「STEP (Spherical Tokamak for Energy Production)」³⁴と呼ばれる原型炉発電所を建設し、2040年までにグリッドへの電力供給を実証することです。
- 主要技術: 球状トカマク (Spherical Tokamak)¹⁹。従来のトカマク(アスペクト比大)に比べ、リングのような形状(アスペクト比小)をしており、よりコンパクトなサイズで、より効率的にプラズマを閉じ込められる(高ベータ)可能性がある、英国が得意とする技術です。
- ロードマップ:
 - 2024年: コンセプトデザインレビュー³⁴。
 - 2028年: STEPサイト(ノッティンガムシャー州ウェストバートン)での建設開始³⁴。
 - 2040年: 「STEP First Plasma」(プロトタイプ稼働)³⁴。
- 戦略的分析 (デュアル戦略):

UKAEAの戦略は、自らプレイヤー(STEP)として2040年の目標を追求する 34 だけでなく、同時に、英国を世界の核融合産業の「ハブ」として機能させるという、ハイブリッドな国家戦略を展開しています。

- ハブ戦略: UKAEAは、長年の核融合研究の拠点であるCulhamキャンパス⁶²を、積極的に民間の核融合企業に開放し、連携しています。
- 連携事例:
 - Tokamak Energy (英国企業): UKAEAと同じ球状トカマクを開発する同社と、技術開発で協力⁶³。
 - General Fusion (カナダ企業): 2021年、General Fusion(グループ3)は、UKAEAのCulhamキャンパスに商用実証プラントを建設する計画を発表しました(2023年に計画変更、後述)⁶⁴。
- このデュアル戦略により、英国は、自らのSTEP計画が成功裏に進むだけでなく、仮に民間の他社(例:General Fusion)が先に成功した場合でも、その経済的・技術的恩恵が英国内に落ちる(インフラ提供、サプライチェーン構築)という、巧みなポジションを築いています。

4-2. グループ2「VBC型・グリッド直結スプリンター」の戦略

このグループは、核融合開発のパラダイムを「科学」から「ビジネス」へと決定的に転換させた主役です。彼らの戦略の中心は「PPA(電力購入契約)」であり、その成否は2028年から2030年にかけて明らかになります。

A. Commonwealth Fusion Systems (CFS)

- ミッション: 最も確立されたトカマク方式を、革新的な「HTS磁石」技術によって劇的に小型化・高速化し、最速で商用化する¹⁷。
- 主要技術: HTS(高温超電導)磁石⁶⁹。CFSは、MIT(マサチューセッツ工科大学)のプラズマ科学・核融合センター³⁷との長年の共同研究に基づき、2018年にスピンアウトしました³⁷。
 - 彼らのコア技術は、REBCO(希土類バリウム銅酸化物)⁶⁹という高温超電導材を用いた磁石です。
 - 2021年9月、CFSとMITは、このHTS磁石で20テスラという、核融合用としては世界最強の磁場を実証しました³⁶。
 - 磁場の強さはプラズマ性能(閉じ込め)を劇的に向上させるため(性能は磁場の4乗に比例するとされる)、従来の低温超電導磁石(ITERなど)を用いた場合に比べて、理論上、装置を40分の1まで小型化できると主張しています³⁶。
- 特許戦略:

CFSの特許ポートフォリオは、GreyBの分析⁷⁰によれば57件、19ファミリーと、件数自体はTAE(後述)に比べて少数精鋭です。その内容は、MITとCFSが共同出願人となっているものが多く71、"high-field magnet assembly"(高磁場磁石アセンブリ)⁷¹や、"Techniques for automated maintenance of a tokamak"(トカマクの自動保守技術)⁷²など、HTS磁石という「コア技術」と、それを用いた小型高磁場トカマクの「運用技術」に極めて集中しています。

- **ロードマップ:**
CFSのロードマップは、HTS磁石の実証成功を受け、非常に直線的かつ高速に進められています³⁶。
 1. *HTS Magnets (Enabling Technology)*: 完了 (2021年)³⁷。
 2. *SPARC (実証炉)*: 「建設中 (In Progress)」⁶⁹。2025年に試運転 (Commissioning)³⁶。世界で初めて $Q > 1$ (正味のエネルギーゲイン) を実証することを目指します³⁷。
 3. *ARC (商用炉)*: 「2025年開始 (Starting 2025)」⁶⁹。SPARCの成功を受け、**2030年代前半**にグリッド接続³⁷。ARCは、天然ガス発電所と同等の約**400MWe**のクリーン電力を供給する、世界初の商用核融合発電所となる計画です¹⁷。
- **資金調達・アライアンス:**
CFSは、2021年のシリーズBラウンド(18億ドル)³⁷を含め、累計20億ドル超³⁶の資金を調達しています。投資家リスト³⁷には、Tiger Globalのような純粋な金融投資家に加え、Bill Gates, Google, Eni, Equinor といった、気候変動技術やエネルギー分野の戦略的投資家が名を連ねています。日本からも2025年、三菱商事を中心とする日本企業12社が共同出資しています³⁸。
- **PPA戦略(最重要):**
CFSの商用化戦略は、2025年に発表された2つの大規模PPAによって、確固たるものとなりました。
 - **Google**: 2025年7月以前に、GoogleがCFSとPPAを締結したことが報じられました⁵⁴。
 - **Eni**: 2025年9月、CFSはイタリアのエネルギー大手Eniと、**10億ドル超**のPPAを締結したと発表しました¹²。Eniは2018年からCFSに出資する初期からの戦略パートナーであり⁵³、この契約は、バージニア州チェスターフィールド郡に建設予定のARC発電所(400MWe)⁷⁶から、2030年代前半に電力を購入するというものです¹²。
- **戦略的分析:**
CFSの戦略は「一点突破」です。最も実績のある「トカマク」⁶⁸というプラットフォームを、HTS磁石⁶⁹という「鍵」(特許⁷¹)でこじ開け、小型化・高速化する。このロジックは明快であり、MITの権威³⁷とHTS磁石の20テスラ実証³⁷という「技術的証拠」が、Eni¹²やGoogle⁵⁴という「商業的証拠(PPA)」に結びつきました。彼らの成功は、2025年に予定されるSPARCの $Q > 1$ 実証³⁷にかかっています。

B. Helion Energy

- **ミッション:** 独自のFRC方式とD-³He燃料を用い、高効率な「直接エネルギー変換」を実現。タービンを不要にし、2028年という世界最速のタイムラインで電力を供給する¹¹。
- **主要技術:**
Helionの技術は、CFSのトカマクとは根本的に異なり、3つの独自技術の組み合わせから成ります。
 1. **FRC (磁場反転配位)**: トカマクのような中心構造物(センターソレノイド)を必要としない、コンパクトなプラズマ配位です²²。
 2. **D-³He燃料サイクル**: D-T燃料ではなく、D(重水素)と³He(ヘリウム3)を反応させます²²。この反応は、D-T反応に比べて発生する中性子が大幅に少なく(Aneutronicに近い)、炉壁の損傷や放射化を低減できます。³Heは、D-D反応で生じたトリチウム(T)がベータ崩壊し

てできるため、D-D反応を回しながら ^3He を「自己供給」するサイクルを目指します²²。

3. **直接エネルギー変換 (Direct Energy Conversion):** Helionの最大の特徴です。D- ^3He 反応は、中性子ではなく高エネルギーの荷電粒子(陽子、ヘリウム)を主に放出します。Helionの装置はパルス式であり、プラズマが膨張するエネルギーを、発電機(コイル)で直接、電力として「回収」する(Harvesting)と主張しています²⁴。これにより、D-T方式で必須となる蒸気タービン(熱交換)が不要となり、理論上、高効率化・小型化・低コスト化が可能となります。

- **特許戦略:**

Helionの特許ポートフォリオ(37件、18ファミリー)⁷⁹は、この独自のビジネスモデルと完璧に一致しています。出願特許は、"Advanced fuel cycles"(先進的燃料サイクル)²²や、"Apparatus and methods for harvesting energy from an axially expanding plasma"(軸方向に膨張するプラズマからエネルギーを回収する装置と方法)⁷⁸、"generating a pulsating, high-strength magnetic field"(パルス式高強度磁場の生成)⁸⁰など、D- ^3He 燃料と直接エネルギー変換のコア技術に極めて集中しています。

- **ロードマップ:**

Helionは「お金によるマイルストーン」ではなく、「プロトタイプ世代」でロードマップを管理しています。

- 第6世代「Trenta」: 2021年に1億度のプラズマ温度を達成¹¹。
- 第7世代「Polaris」: 現在建設中²⁴。2024年中に「世界で初めて核融合による発電を実証する」ことを目標としています¹¹。

- **PPA戦略(最重要):**

Helionは、2023年に立て続けに2件のPPAを発表し、世界を驚かせました。これがグループ2の戦略を定義づけました。

1. **Microsoft PPA (2023年5月):** 世界初の核融合PPA¹¹。Helionは、2028年までに **50MW** 以上の電力をMicrosoftに供給します。この電力はMicrosoftの「2030年カーボンネガティブ」目標¹¹に貢献し、電力マーケットとしてConstellationが送電を管理します¹¹。
2. **Nucor PPA (2023年9月):** 大手鉄鋼メーカーNucorは、Helionの発電所(**500MWe**)を自社の製鉄所に誘致し、2030年までに電力を購入する契約を締結しました³⁹。Nucorはこの提携の一環としてHelionに3,500万ドルを出資しています³⁹。

- **戦略的分析:**

Helionの戦略は、業界で最もアグレッシブであり、ハイリスク・ハイリターンです。彼らは、CFSの「SPARC」³⁷のような中間的な \$Q > 1\$ 実証ステップを公表せず、いきなり「2028年 50MW」¹¹という最終製品の納品契約(PPA)にコミットしました。

この戦略は、2024年に予定される「Polaris」での発電実証¹¹が成功することを前提としています。もしHelionが2028年のPPA(Microsoft)¹¹と2030年のPPA(Nucor)³⁹を達成できれば、彼らは市場を独占するでしょう。しかし、もし失敗すれば、業界全体の信頼を失墜させ、後述する「核融合の冬」を招きかねない、極めて重大な賭けです。

4-3. グループ3:「VBC型・深層技術R&D」の戦略

このグループは、グループ2が「工学的課題(D-Tをどう実現するか)」を解こうとしているのに対し、「物理的課題(D-Tより優れた燃料をどう実現するか)」に挑んでいます。

A. TAE Technologies

- ミッション: 究極のクリーン燃料「p-B11(水素-ホウ素)」⁴¹を用い、中性子も放射性廃棄物も(原理上)生み出さない、真にクリーンで経済的な核融合炉を実現すること²³。
- 主要技術:
 1. **FRC (磁場反転配位)**: Helionと同様、FRC²³を採用していますが、TAEはパルス式ではなく「定常」運転を目指します。
 2. **p-B11 (水素-ホウ素) 燃料**: TAEの最大の差別化要因です⁴¹。この燃料は、D-TやD-³Heよりもはるかに高温(数億度)のプラズマが必要ですが、反応生成物が3つのヘリウム原子のみであるため、「Aneutronic(中性子非発生)」⁴¹であり、炉の放射化や材料損傷の問題を根本的に解決できると期待されています。
 3. **ビーム駆動 (Beam-Driven)**: 高温プラズマを維持・加熱するために、強力な中性粒子ビーム入射(NBI)技術²³を使用します⁸²。
- 特許戦略:

TAEの特許戦略は「圧倒的な量による要塞化」です。グローバルで2,300件以上の特許を出願し、約1,400件が承認されています²³。GreyBの分析⁸⁴によれば、2020年から2023年のわずか4年間だけで317件を出願しています。CEOのMichl Binderbauer個人でも148件の特許を持つ⁸⁴ことから、p-B11という困難な物理を実現するために必要な、FRCの形成・維持⁸²、ビーム技術⁸²、プラズマ制御など、あらゆる基盤技術を網羅的に抑える「知財ポートフォリオ戦略」を採っています。
- ロードマップ:

TAEは「Money by Milestone」モデル⁸¹を採用しており、次の技術的マイルストーンを達成するたびに、次の資金調達ラウンドに進むという手法を20年以上にわたり続けています。

 1. 第5世代「*Norman*」: 2021年、7,000万度超の安定プラズマを達成⁴⁰。
 2. 第6世代「*Copernicus*」: 現在建設中。「今十年代末(**by the end of the decade**)までにネットエネルギー実証」を目指します⁵⁵。
 3. 第7世代「*Da Vinci*」: プロトタイプ発電所。「2030年代前半に運転開始」を計画⁵⁵。
- 資金調達とスピンオフ戦略(最重要):

TAEは累計13億ドル超⁴⁰の資金を調達。投資家には、2014年から協業するGoogle⁴⁰やChevron⁴⁰が含まれます。

TAEの戦略で最も注目すべきは、「スピンオフ事業」です⁴³。TAEは、核融合炉の大電力・高速制御電源システムから生まれた「電源管理(Power Management)技術」を、別事業として急速に商業化しています⁴³。

 - 応用先: このスピンオフ技術は、**EV(電気自動車)**の航続距離延長、効率向上、急速充電、さらには住宅用・産業用・電力系統用のグリッドアプリケーション⁴³に向けられています。
- 戦略的分析:

TAEは、グループ2とは異なる、洗練された「デュアル戦略(二正面作戦)」を採っています。

 - 本命: 「p-B11核融合(Da Vinci)」⁵⁵という、2030年代の実現を目指す、ハイリスク・超ハイ

リターンの長期戦。

- ヘッジ:「電源管理スピンオフ」43 という、核融合R&Dの過程で生まれた技術を、EVやグリッドという巨大な既存市場で短期的に収益化する、ローリスク・ハイリターンの事業。
Google 40 やChevron 40 といった投資家は、この「技術ポートフォリオ全体」に投資していると推定されます。

B. General Fusion (GF)

- ミッション: 独自の「磁化ターゲット融合 (MTF)」²⁴ により、高価な超電導磁石や高出力レーザーを不要にし、「実用的」かつ「低コスト」なアプローチで商用化を目指す ⁸⁶。
- 主要技術: 磁化ターゲット融合 (MTF)。これは、MCF(磁気閉じ込め)とICF(慣性閉じ込め)のハイブリッド方式です ⁸⁶。
 1. まず、適度に磁化されたプラズマ(ターゲット)を生成します。
 2. 次に、液体リチウムなどで作られたライナー(筒)を、多数のピストンで機械的に高速圧縮します。
 3. プラズマが圧縮されることで、核融合に必要な温度と密度に達し、点火します ⁸⁶。
この方式の利点は、超高精度なレーザー(ICF)や超強力な定常磁場(トカマク)を必要とせず、比較的「枯れた」技術(機械工学的なピストン)で実現できる可能性がある点です。
- ロードマップと戦略的ピボット:
GFのロードマップは、2023年に大きな「戦略的ピボット(方針転換)」を経験しています。
 - 当初の計画 (2021年): 英国政府の支援を受け、UKAEAのCulhamキャンパスに、商用規模の70%の大きさを持つ実証プラントを建設し、2027年までにフル稼働させる計画でした ⁴²。
 - 計画の「調整」(2023年8月): 2023年8月、GFはこの計画を「調整 (adjustment)」⁴² し、まずはカナダ・バンクーバーの本社に、より小規模だが重要な科学的実証を行う新しい実証機「Lawson Machine 26 (LM26)」を建設すると発表しました ²⁴。
 - 最新のロードマップ (LM26):
 - LM26は、2025年までに1億度の融合条件を達成 ²⁴。
 - **2026年までに科学的ブレークイーブン(相当)**を達成 ²⁴。
 - LM26で得られたデータは、将来の英国での商用実証機の設計に組み込む ⁶⁷ と説明されています。
 - 商用化目標: 2030年代前半～中盤にグリッド接続 ²⁴。
- 資金調達・アライアンス:
GFは累計4億ドル超 18 を調達しています。最大の支援者は、Amazon創業者ジェフ・ベゾスの個人投資会社「Bezos Expeditions」であり、2011年のシリーズB ⁸⁷ から継続的に支援しています ⁴⁴。
- 戦略的分析:
GFは、MTFというユニークな技術 ⁸⁶ と、Bezos ⁴⁵ という強力な支援者を持つ、注目のプレイヤーです。しかし、2023年の英国計画からカナダのLM26への「調整」⁴² は、技術的・資金的なハードルに直面し、大規模な商用実証(英国)の前に、まずは小規模な科学実証(LM26)へと、一度ステップを「仕切り直し」た可能性を示唆しています。2026年のブレークイーブン目標 ⁴² を達成できるかが、同社の将来を左右する正念場となります。

4-4. グループ4:「技術イネーブラー・短期収益化型」の戦略

このグループは、核融合「ブーム」の受益者であり、ブームが続く限り安定した収益が見込める、最も賢明なポジションを築いています。

A. SHINE Technologies

- ミッション: 核融合技術を「中性子源」として利用し、まず医療用同位体市場で確固たる収益を上げ、その利益を将来の核融合エネルギー開発(Phase 4)に再投資する⁹。
- ビジネスモデル (4段階フェーズ戦略)⁹:
 - **Phase 1**: 中性子試験サービス: 航空宇宙・防衛産業向けの非破壊検査(中性子イメージング)や、耐放射線性試験(FLARE)を提供⁹。(現在収益化)
 - **Phase 2**: 医療用同位体製造: 核融合中性子源を用いた医療用同位体の製造・販売⁹。これが現在のコアビジネスです。
 - Mo-99(診断用): 「Chrysalis」施設で生産⁹。
 - Lu-177(治療用): 「Cassiopeia」施設(北米最大級)⁹で生産。(現在収益化)
 - **Phase 3**: 核燃料リサイクル: 使用済み核燃料のリサイクル技術(R&D)。
 - **Phase 4**: 核融合エネルギー: 最終的な目標としての核融合発電(将来)。
- 特許戦略:
SHINEの特許は、「Mo-99の製造」プロセス⁴⁹など、現在の収益源であるPhase 2のビジネスに直結しています。
- 戦略的分析:
SHINEの戦略は、核融合セクターの中で最も「堅実」かつ「リスクヘッジ」が効いています。彼らの現在のビジネス(Phase 1, 2)は、「核融合エネルギーが(電力源として)2030年に実現可能か」という問いから完全に独立しています。彼らはすでに「核融合技術(中性子源)」⁹を使って商業的な売上を上げており、核融合R&D(Phase 4)は、その収益の「投資先」の一つとなっています。

B. Kyoto Fusioneering (KF) (京都フュージョニアリング)

- ミッション: 核融合炉を実現するために不可欠な、しかしこれまで開発が遅れていた「周辺技術(工学技術)」のコンポーネントと、試験サービスを提供する、業界全体のサプライチェーン・イネーブラーとなる⁴⁶。
- ビジネスモデル: 「作る(コンポーネント製造)」と「試す(試験サービス)」の両輪で、核融合炉開発のボトルネックを解消します⁴⁶。
- 主要コンポーネント(製造)⁴⁶:
 - ジャイロトロン (Gyrotron): プラズマを1億度に加熱するための高出力マイクロ波発生装置(真空管)⁹³。すでにUKAEAやTokamak Energy(英国)への供給実績があります¹⁸。
 - ブランケット (Blanket): 核融合で発生した中性子の運動エネルギーを「熱」として取り出し、同時に中性子をリチウムと反応させて燃料(トリチウム)を「増殖」させる、炉心で最も重

要かつ困難なコンポーネント⁴⁶。

- その他: トリチウムポンプ、熱交換器、液体金属ループなど⁴⁶。
- 主要サービス(試験施設)⁴⁶:
 - **UNITY-1** (京都): ブランケットと熱サイクル(熱取り出し)の統合試験施設⁴⁶。発電実証も行います。
 - **UNITY-2** (カナダ・チョークリバー): トリチウムの抽出・精製・再循環という、トリチウム燃料サイクル全体を統合して試験できる、世界でもユニークな施設⁴⁶。
- 戦略的分析:

KFの戦略は、核融合産業の「最大の弱点」を「最大のビジネスチャンス」に変えるものです。専門家フォーラムの分析¹⁵によれば、核融合の最大のボトルネックは、プラズマ物理学(Q>1)ではなく、工学分野の低い技術成熟度(TRL)にあります。具体的には、ブランケット (TRL 2)、トリチウムハンドリング (TRL 3)、耐中性子材料 (TRL 3) が致命的に遅れています。

グループ2のスプリンターたち(CFS, Helion)は、2028-2030年 11 に発電所を稼働させると言いますが、このTRL 2のブランケット技術(特にトリチウム増殖)なしには、持続可能な商用運転は不可能です(外部から高価なトリチウムを買い続ける必要があるため)。

Kyoto Fusioneeringは、まさにその「TRL 2」の技術(ブランケット、トリチウムサイクル)⁴⁶を専門に開発・試験する「サービス」と「製品」を提供しています。彼らは、グループ1~3の「ゴールドラッシュ」において、最も強靱な「ツルハシ」を売るポジションを確立しようとしています。三菱商事 38 がCFS(グループ2)とKF(グループ4)の両方に出資している事実は、このサプライチェーン戦略の重要性を裏付けています。

【第5章】特許戦略と事業戦略の整合性

ここでは、【第4章】で分析した主要企業群について、彼らの特許戦略(技術蓄積)と事業戦略(IR、ロードマップ、PPA)が「一致」しているか、あるいは「ギャップ」があるかを評価します。この整合性(またはギャップ)から、各社の「本気度」や「隠れた戦略」を推定します。

- **Commonwealth Fusion Systems (CFS)**
 - 評価: 極めて高い整合性 (**High Alignment**)
 - 分析: CFSの事業戦略¹⁷は、「HTS(高温超電導)磁石」という単一の技術的ブレークスルーに100%依存しています。彼らの特許ポートフォリオ⁷⁰は、まさにそのHTS磁石の構造、製造、および関連するトカマクの保守技術に集中しています。事業戦略と特許戦略の間にギャップは一切なく、リソースを「SPARC」と「ARC」³⁷の実現という一点に集中投下する、極めて高い「本気度」がうかがえます。隠れた戦略は見当たらず、「公表している戦略」が「真の戦略」である可能性が極めて高いと判断されます。
- **Helion Energy**
 - 評価: 高い整合性、ただしタイムラインに潜在的ギャップ (**Aligned, but Potential Timeline Gap**)
 - 分析: Helionの事業戦略¹¹は、D-³He燃料サイクル²²と直接エネルギー変換²⁴という2つ

のコア技術に基づいています。彼らの特許ポートフォリオ⁷⁷も、"Advanced fuel cycles"⁷⁷と"harvesting energy"(エネルギー回収)⁷⁸に完全に一致しており、技術と戦略の整合性は高いです。

- 潜在的ギャップの推定: ギャップは「技術」と「戦略」の間ではなく、「戦略」と「タイムライン」の間に存在する可能性があります。PPA¹¹は「2028年」に「50MW」の電力を供給することを約束しています。一方で、彼らが特許で追求するD-³He燃料²²は、CFSやITERが採用するD-T燃料よりもはるかに高温(数億度)が必要であり、物理的な難易度が格段に高いとされています。
- 推定される仮説: Helionが2028年にMicrosoftに納入する「50MW」の電力は、(A) 真に特許通りの、困難だがクリーンな「D-³He・直接変換マシン」なのでしょうか？ それとも(B) PPAの期限を守るために、より容易だが中性子が発生する「D-T燃料・タービン発電マシン」(あるいはD-Dマシン)を「暫定的に」納入し、D-³Heは将来のアップグレードとするのでしょうか？ 特許戦略は(A)を指していますが、事業戦略上の「2028年」という期限¹¹は、(B)という「戦略的妥協」を採るリスク(あるいは隠れた戦略)を内包していると推定されます。

● TAE Technologies

- 評価: 二重戦略との完全な整合性 (Perfectly Aligned Dual-Strategy)
- 分析: TAEは、(A) p-B11核融合⁴¹という極めて困難な物理の実現(長期)と、(B) 派生技術である「電源管理」スピンオフ⁴³(短期)という、明確な「二重戦略」を採っています。彼らが保有する「2,300件超」という広範かつ大量の特許ポートフォリオ²³は、この両方の事業を支えるために完璧に機能しています。
- 隠れた戦略の推定: TAEの本気度は、むしろ「スピンオフ事業」⁴³にある可能性も示唆されます。核融合R&Dを「世界最高のR&Dラボ」として、また「世界最高のマーケティング」として活用し、Google⁴⁰などから巨額の資金(13億ドル超)⁴⁰を調達しつつ、その過程で生まれた(より実現可能性の高い)パワーエレクトロニクス技術で収益を上げる、という極めて高度な戦略です。特許の「量」²³は、この両面作戦を支える「堀(Moat)」として機能していると分析できます。

● SHINE Technologies

- 評価: 完璧な整合性 (Perfect Alignment)
- 分析: 事業戦略⁹は「Phase 2: 医療用同位体」で収益を上げること。特許⁴⁹は「Mo-99の製造」に集中しています。ギャップは一切ありません。彼らの「本気度」は、現在の同位体ビジネス(Phase 2)⁹にあり、核融合エネルギー(Phase 4)⁹はその収益による「将来の夢」として位置づけられていることが明確です。

【第6章】主要戦略グループおよび企業の競合比較

【第2章】で定義した戦略グループ間のポジショニング、および【第4章】で分析した主要企業の戦略を、マトリクスを用いて比較・分析します。

戦略グループ間ポジショニング比較

- グループ1 (国家主導) vs. グループ2 (スプリンター)
「科学的確実性」と「2040年」³¹を目指す国家に対し、「市場速度」と「2028年」¹¹で挑む民間の構図です。グループ1の遅延³¹が、グループ2の存在意義を際立たせています。
- グループ2 (スプリンター) vs. グループ3 (深層R&D)
これは「工学」と「物理」の戦いです。グループ2 (CFS, Helion) は、D-TやD-³Heという「物理」を前提に、「工学」(HTS磁石⁶⁹、直接変換²⁴)で勝負し、「PPA(納品契約)」¹¹という商業的リスクを取ります。一方、グループ3 (TAE, GF) は、p-B11⁴¹やMTF²⁴といった「物理」そのものの革新で勝負し、「スピンオフ(TAE)」⁴³という形でリスクをヘッジします。
- グループ4 (イネーブラー) vs. 全グループ
これは「ゴールドラッシュの勝者」の比較です。グループ4 (SHINE, KF) は、他の全グループ(金鉱掘り)の「ブーム」を前提に、リスクをヘッジした「技術販売(ツルハシ)」ビジネス⁹を展開します。彼らは、誰が金(Q>1)を掘り当てても、利益を上げられるポジションにいます。

【表】主要核融合企業 戦略ポジショニング・マトリクス

プレイヤー	戦略グループ	主要技術	目標燃料	商用化目標	主要PPA/顧客	累計調達額(推定)	特許戦略
ITER機構	グループ1	トカマク	D-T	2039年(D-T運転) ³¹	N/A (科学実証)	> 数百億ドル(公的)	基盤科学(オープン)
QST (日本)	グループ1	トカマク	D-T	2030年代(発電実証) ³²	N/A (国家)	N/A (公的)	段階的アプローチ ³²
UKAEA (英国)	グループ1	球状トカマク	D-T	2040年(プロトタイプ) ³⁴	N/A (国家)	N/A (公的)	国家ハブ戦略 ⁶⁷

CFS	グループ2	HTSトカマク	D-T	2030年代前半 (ARC) ¹⁷	Eni (\$1B+), Google ¹²	> 20億ドル ³⁶	HTS磁石に集中 ⁷¹
Helion Energy	グループ2	FRC (直接変換)	D-³He	2028年 (50MW), 2030年 (500MWe) ¹¹	Microsoft, Nucor ¹¹	> 5億ドル ²⁹	FRC・直接変換に集中 ⁷⁷
TAE Tech.	グループ3	FRC (ビーム駆動)	p-B11	2030年代前半 (Da Vinci) ⁵⁵	N/A (スピンオフ事業あり) ⁴³	> 13億ドル ⁴⁰	圧倒的件数 (2300+ 件) ²³
General Fusion	グループ3	MTF	D-T	2030年代前半-中盤 ²⁴	N/A (LM26: 2026年目標) ⁴²	> 4億ドル ¹⁸	MTF技術に特化 ²⁴
SHINE Tech.	グループ4	中性子源	D-T/D-D	(Phase 2: 実施中) ⁹	医療市場 (Lu-177等) ⁹	N/A (収益化済)	同位体製造プロセス ⁴⁹
Kyoto F.	グループ4	コンポーネント	N/A	(現在販売中)	グループ1, 2, 3 ¹⁸	N/A (三菱商事出資 ³⁸)	ジャイロトロン, ブランケット ⁴⁶

【第7章】今後の市場リスクとビジネス機会

技術的ボトルネックとリスク

市場の最大の技術的リスクは、もはや「 $Q>1$ (エネルギーゲイン)」というプラズマ物理学の達成(これは時間の問題と見なされつつある)ではなく、その先にある「工学(Engineering)」の壁です。

1. 「TRL 2」の壁: 工学技術の致命的な遅れ

専門家フォーラム(Future Trends Forum)の分析¹⁵が明確に示す通り、商用炉の実現に不可欠な基幹コンポーネントの多くが、TRL(技術成熟度レベル)2~3という「基礎研究」段階に留まっています。

- トリチウム増殖ブランケット (TRL 2)¹⁵: D-T炉が持続的に運転するためには、炉内で消費するトリチウムを、リチウムと中性子の反応によって「増殖」(生産)するブランケットが不可欠です。これが機能しなければ、核融合炉は外部(主に原子炉)から有限かつ高価なトリチウムを「輸入」し続けることになり、エネルギー安全保障も経済性も成立しません。この最重要コンポーネントがTRL 2(技術コンセプトの策定)レベルにあります。
- 耐中性子材料 (TRL 3)¹⁵: D-T反応が発する高エネルギー中性子(14 MeV)に長期間耐える構造材料も、TRL 3(実験的実証)レベルです。
- トリチウム処理 (TRL 3)¹⁵: 燃料サイクルの確立も同様です。

2. サプライチェーンの欠如

上記のような低TRLコンポーネントを、工業的規模で、品質を担保して製造できるサプライチェーンは、世界に(まだ)存在しません⁹⁴。FIAの2025年サプライチェーンレポート⁹⁴によれば、民間企業からの支出は増加しているものの、依然として「カスタムビルドの研究開発コンポーネント」の段階にあります。

市場リスク

1. 「2028年」の崖 (The 2028 Cliff)

最大の市場リスクは、Helion EnergyとMicrosoftがPPA 11によって設定した「2028年」という明確な期限です。これは、産業界全体にとって「両刃の剣」です。

- シナリオA(成功): Helionが2028年に(何らかの形で)50MWの電力を供給すれば、市場の信頼は爆発的に高まり、さらなる資金流入が加速し、核融合産業は一気に離陸します。
- シナリオB(失敗): Helionが期限未達に終わる、あるいは供給した電力が「50MW」に遠く及ばない、または持続的でないことが判明した場合、市場全体の信頼が失墜します。「やはり核融合は30年先だった」という失望が広がり、投資家が一斉に資金を引き揚げ、産業界全体が停滞する「核融合の冬(Fusion Winter)」が訪れる可能性があります。
- CFSのPPA¹²も「2030年代前半」という期限を設定しており、グループ2のスプリンターたちは、自らのPPAによって、産業界全体の未来を賭けた「時限爆弾」をセットしたとも言えます。

2. LCOE(コスト)競争リスク

前述の通り、技術的に成功しても、最終的に安価な再生可能エネルギー+蓄電池、またはSMR(小型モジュール炉)とのコスト競争に勝てなければ、市場(グリッド)でのシェアは限定的となります。

競争が手薄な「空白地帯」(ビジネス機会)

核融合市場の「空白地帯」は、「発電(Q>1)」という全員が目指すレッドオーシャンではなく、その周辺、特に「現在の技術的ボトルネック」と「R&Dの副産物」に存在します。

1. 機会1: 短期応用(グループ4の領域)

核融合技術を「中性子源」として割り切り、高付加価値なニッチ市場を狙う戦略です。SHINE 9 が成功している医療用同位体(特にLu-177のような治療用核種)市場は、今後も拡大が見込まれます。また、半導体ウェハーへのドーピングや、材料試験(FLARE 9)など、産業用中性子源の市場も存在します。

2. 機会2: スピンオフ技術(グループ3の領域)

TAEの「電源管理」⁴³ が示すように、核融合R&D(高電圧、大電流、高速制御、AIシミュレーション、極低温技術)の過程で生まれる高度な派生技術は、それ自体が巨大なビジネス機会です。

- パワーエレクトロニクス(EV、グリッド)
- AI/機械学習(プラズマ制御、シミュレーション)
- 超電導応用(医療MRI、リニアモーターカー)
- ロボティクス(遠隔保守)

これらの技術は、核融合の成否に関わらず、即時性の高い他産業に転用・販売が可能です。

3. 機会3: 工学的ボトルネックの解決(KFの領域)

これが、市場で最も重要かつ「競争が手薄な」空白地帯です。

【第4章】で分析した通り、Kyoto Fusioneering (KF) ⁴⁶ は、この領域を真正面から狙っています。TRL 2-3 15 に留まっている「ブランケット」「トリチウムシステム」「耐性材料」を専門に開発・試験・製造する「コンポーネント・チャンピオン」を目指す戦略です。

CFSやHelionが2028-2030年 11 に商用炉を稼働させるためには、遅かれ早かれ、これらの「TRL 2の壁」¹⁵ を解決するKFのような企業の技術(あるいは試験サービス)⁴⁶ が不可欠となります。これは、核融合産業のサプライチェーン全体を支配しうる、極めて戦略的なビジネス機会です。

【総括】分析結果の客観的サマリー

本レポートは、核融合エネルギー市場に関する特許情報、IR資料、および市場レポートを網羅的に分析し、以下の客観的な事実を明らかにしました。

- 市場の構成: 核融合エネルギー市場は、単一の目的で動いているのではなく、「国家主導型・基盤科学プロジェクト」(グループ1)、「VBC型・グリッド直結スプリンター」(グループ2)、「VBC型・深層技術R&D」(グループ3)、「技術イネーブラー・短期収益化型」(グループ4)という、異なるミッション、タイムライン、ビジネスモデルを持つ4つの戦略グループによって構成されています。
- 国家と民間のタイムライン: グループ1(国家主導)は、ITERが2039年³¹、UKAEA (STEP) が

2040年³⁴、QST (JA-DEMO) が2030年代³² という、科学的・工学的実証のための着実なタイムラインを設定しています。

- **PPAによる市場牽引:** グループ2(スプリンター)は、2023年以降にMicrosoft¹¹ や Eni¹² といった大手企業とのPPA(電力購入契約)を締結しました。これにより、彼らは「2028年～2030年代前半」¹¹ という極めて早期の商用電力供給を公約する、市場の「速度」を定義する存在となっています。
- **多様な戦略:** グループ3(深層R&D)は、p-B11⁴¹ や MTF²⁴ といった、より困難またはユニークな物理を追求しつつ、TAE⁴³ のようにスピンオフ技術での収益化(リスクヘッジ)も図っています。
- **現在の商用化:** グループ4(イネーブラー)は、核融合技術を「中性子源」として応用した医療用同位体(SHINE⁹)や、核融合炉の「基幹部品(ジャイロトロン、ブランケット)」「(Kyoto Fusionneering⁴⁶)を販売することで、既に収益化、あるいはサプライチェーンの中核を担おうとしています。
- **主要な応用先:** 応用先は、「現在」の医療・中性子源⁹ と、「未来」の電力供給(グリッド¹² および特定産業³⁹)に明確に大別されます。
- **戦略と特許の整合性:** 主要プレイヤー(CFS¹⁷, Helion²⁴, SHINE⁹, TAE²³)の特許戦略と公表された事業戦略の整合性は、総じて高いレベルにあります。
- **最大のリスク:** 市場の最大のリスクは、(a) グループ2が設定した「2028年」というPPAの期限¹¹ が達成されるかという「市場リスク」と、(b) ブランケット¹⁵ など工学分野の低い技術成熟度(TRL 2)と商用化タイムラインとの「技術的ギャップ」の2点に集約されます。

引用文献

1. State Policy Options for Fusion Energy Deployment - Clean Air Task Force, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.catf.us/resource/state-policy-options-for-fusion-energy-deployment/>
2. Fusion Energy Could Supercharge the Economy - Joint Economic Committee, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.jec.senate.gov/public/index.cfm/democrats/2024/7/fusion-energy-could-supercharge-the-economy>
3. 経団連: エネルギー基本計画の見直しに向けた提言 (2024-10-15), 11月 11, 2025にアクセス、
https://www.keidanren.or.jp/policy/2024/071_honbun.html
4. The role of fusion energy in a decarbonized electricity system, 11月 11, 2025にアクセス、
https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2024/09/MITEI_FusionReport_091124_final_COMPLETE-REPORT_for_distribution.pdf
5. DOE fusion roadmap marks important step to commercializing fusion, but must be matched with federal investment, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.catf.us/2025/10/doe-fusion-roadmap-marks-important-step-to-commercializing-fusion-but-must-be-matched-with-federal-investment/>
6. U.S. Intelligence Community Says Breakthrough in Fusion Energy Would Meet Paris Agreement Goals, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.fusionindustryassociation.org/u-s-intelligence-community-says-breakthrough-in-fusion-energy-would-meet-paris-agreement-goals>

- [kthrough-in-fusion-energy-would-meet-paris-agreement-goals/](#)
7. Over \$2.5 Billion Invested in Fusion Industry in Past Year, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.fusionindustryassociation.org/over-2-5-billion-invested-in-fusion-industry-in-past-year/>
 8. Fusion Energy in 2025: Six Global Trends to Watch, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.iaea.org/newscenter/news/fusion-energy-in-2025-six-global-trends-to-watch>
 9. Shine Technologies - Wikipedia, 11月 11, 2025にアクセス、
https://en.wikipedia.org/wiki/Shine_Technologies
 10. Inertial electrostatic confinement - Wikipedia, 11月 11, 2025にアクセス、
https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_electrostatic_confinement
 11. Helion announces world's first fusion energy purchase agreement ..., 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.helionenergy.com/articles/helion-announces-worlds-first-fusion-ppa-with-microsoft/>
 12. Eni Signs \$1 Billion Power Purchase Deal in U.S. with Fusion Startup Commonwealth, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.esgtoday.com/eni-signs-1-billion-power-purchase-deal-in-u-s-with-fusion-startup-commonwealth/>
 13. Lattice Confinement Fusion - NASA, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.nasa.gov/glenn/glenn-expertise-space-exploration/lattice-confinement-fusion/>
 14. The global fusion industry in 2023, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2023/07/FIA%E2%80%932023-FINAL.pdf>
 15. Fusion Energy: A Revolution in Progress - Fundación Innovación Bankinter, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.fundacionbankinter.org/wp-content/uploads/2025/10/FTF-Report-Fusion-Energy.pdf>
 16. Print - ITER Newslines, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.iter.org/print/whatsnew/129>
 17. ARC™: Putting fusion energy on the grid - Commonwealth Fusion Systems, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://cfs.energy/technology/arc/>
 18. J-Fusion Fusion Energy White Paper, 11月 11, 2025にアクセス、
https://jfusion.jp/wp-content/uploads/2025/10/FusionEnergyWhitePaper_en.pdf
 19. UKAEA Fusion Energy: Home, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.ukaea.org/>
 20. 学術研究基盤事業大型ヘリカル装置 (LHD), 11月 11, 2025にアクセス、
https://www-lhd.nifs.ac.jp/pub/LHD_Project.html
 21. 核融合による次世代クリーンエネルギーを開発するHelical Fusion、自然科学研究機構発ベンチャーに認定 - PR TIMES, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000044.000089262.html>
 22. US20170011811A1 - Advanced fuel cycle and fusion reactors utilizing the same - Google Patents, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://patents.google.com/patent/US20170011811A1/en>
 23. FAQ - Company - TAE Technologies | Fusion Power Clean Energy Company, 11月

- 11, 2025にアクセス、<https://tae.com/faq-company/>
24. The global fusion industry in 2023, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2023/07/FIA%E2%80%932023-FINAL-1.pdf>
25. Fusion Energy Market Size to Hit USD 611.81 Billion by 2034 - Precedence Research, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.precedenceresearch.com/fusion-energy-market>
26. Fusion Energy Market Size, Share | CAGR of 6.2%, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://market.us/report/global-fusion-energy-market/>
27. Fusion Energy Market - Global Industry Analysis and Forecast (2025-2032), 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/fusion-energy-market/183962/>
28. FIA Launches 2024 Global Fusion Industry Report, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.fusionindustryassociation.org/fia-launches-2024-global-fusion-industry-report/>
29. The global fusion industry in 2024, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/2024-anual-global-fusion-industry-report.pdf>
30. Nuclear Fusion Market Size and YoY Growth Rate, 2025-2032, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.coherentmarketinsights.com/industry-reports/nuclear-fusion-market>
31. ITER fusion reactor hit by massive decade-long delay and €5bn ..., 11月 11, 2025にアクセス、
<https://physicsworld.com/a/iter-fusion-reactor-hit-by-massive-decade-long-delay-and-e5bn-price-hike/>
32. PowerPoint プレゼンテーション, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://conferences.iaea.org/event/392/contributions/35844/attachments/19822/36191/Takenaga.pdf>
33. QST Activities towards Japanese DEMO - FIRE, 11月 11, 2025にアクセス、
https://firefusionpower.org/FPA22_QST_JA_DEMO_Ikeda.pdf
34. UK Fusion Materials Roadmap 2021-2040 - Henry Royce Institute, 11月 11, 2025にアクセス、
https://www.royce.ac.uk/wp-content/uploads/2024/11/UK_Fusion_Materials_Roadmap_Interactive.pdf
35. UKAEA Launching the UK Fusion Materials Roadmap - Nuclear Universities, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.nuclearuniversities.ac.uk/wp-content/uploads/2021/09/UKAEA-Amanda-Quadling.pdf>
36. The Path to Commercial Fusion Energy - GIST, 11月 11, 2025にアクセス、
https://gist.grips.ac.jp/events/2024/CFS_Presentation_for_GRIPS_Workshop_RN.pdf
37. Commonwealth Fusion Systems Raises \$1.8 Billion in Funding to Commercialize Fusion Energy, 11月 11, 2025にアクセス、

- <https://www.cfs.energy/news-and-media/commonwealth-fusion-systems-closes-1-8-billion-series-b-round/>
38. Mitsubishi Corporation Invests in Commonwealth Fusion Systems, a US Fusion Energy Start-up from MIT | News Release, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.mitsubishicorp.com/jp/en/news/release/2025/20250902001.html>
 39. Helion and Nucor announce plans to develop a 500 MWe fusion power plant at a U.S. steel mill - Hogan Lovells, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.hoganlovells.com/en/publications/helion-and-nucor-announce-plans-to-develop-a-500-mwe-fusion-power-plant-at-a-us-steel-mill>
 40. TAE Technologies Secures \$150 Million To Build The World's First Commercial Fusion Power Plant - SuperbCrew, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.superbcrew.com/tae-technologies-secures-150-million-to-build-the-worlds-first-commercial-fusion-power-plant/>
 41. About Us - TAE Technologies, 11月 11, 2025にアクセス、<https://tae.com/about-us/>
 42. General Fusion - Wikipedia, 11月 11, 2025にアクセス、
https://en.wikipedia.org/wiki/General_Fusion
 43. Fusion Energy Milestone from TAE Technologies Validates Path to ..., 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.prnewswire.com/news-releases/fusion-energy-milestone-from-tae-technologies-validates-path-to-cost-competitive-carbon-free-baseload-energy-301265401.html>
 44. Bezos Expeditions - Wikipedia, 11月 11, 2025にアクセス、
https://en.wikipedia.org/wiki/Bezos_Expeditions
 45. General Fusion lands \$130M from Bezos and others as fusion energy sector keeps heating up - GeekWire, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.geekwire.com/2021/general-fusion-lands-130m-from-bezos-and-others-as-fusion-energy-sector-keeps-heating-up/>
 46. PowerPoint プレゼンテーション - FIRE, 11月 11, 2025にアクセス、
https://firefusionpower.org/FPA23_Konishi_Kyoto_Fusioneering.pdf
 47. Shine Technologies, 11月 11, 2025にアクセス、
https://wikipedia.nucleos.com/viewer/wikipedia_en_all_maxi_2024-01/A/SHINE_Medical_Technologies
 48. Sustained Availability of ^{99m}Tc : Possible Paths Forward - Journal of Nuclear Medicine, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://jnm.snmjournals.org/content/jnumed/54/2/313.full.pdf>
 49. Transcript of Advisory Committee on Reactor Safeguards Northwest Medical Isotopes Subcommittee - Nuclear Regulatory Commission, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.nrc.gov/docs/ML1718/ML17187A507.pdf>
 50. IAEA TECDOC SERIES, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1997web.pdf>
 51. Announcing Helion's fusion power purchase agreement with Microsoft, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.helionenergy.com/articles/announcing-helion-fusion-ppa-with-microsoft-constellation/>
 52. Nuclear fusion company Helion signs PPA with Microsoft - Power Technology, 11

- 月 11, 2025にアクセス、
<https://www.power-technology.com/news/helion-signs-ppa-with-microsoft/>
53. Eni secures fusion power deal - Nuclear Engineering International, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.neimagazine.com/news/eni-secures-fusion-power-deal-with-cfs/>
54. commonwealth fusion systems News and Press Releases | PR, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.prnewswire.com/news/commonwealth-fusion-systems>
55. TAE Technologies Raises \$150 Million in Latest Funding Round, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.prnewswire.com/news-releases/tae-technologies-raises-150-million-in-latest-funding-round-302470656.html>
56. Google Backs TAE Technologies to Help Commercialize Fusion Energy - ESG Today, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.esgtoday.com/google-backs-fusion-tech-company-tae-technologies/>
57. Nuclear Fusion Canada : Groundbreaking Achievement and the Path to Clean Energy - TorontoStarts, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://torontostarts.com/2025/05/07/nuclear-fusion-canada-breakthrough/>
58. UW-FDM-1226 The Fusion of Advanced Fuels to Produce Medical Isotopes Using Inertial Electrostatic Confinement - Fusion Technology Institute - University of Wisconsin-Madison, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://fti.neep.wisc.edu/fti.neep.wisc.edu/pdf/fdm1226.pdf>
59. ITER council confirms new first plasma date: December 2025 - FuseNet, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://fusenet.eu/iter-council-confirms-new-first-plasma-date-december-2025>
60. On The Road to ITER, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.iter.org/project/road-iter>
61. ITER: Why ten years between first plasma and start of D-T operation? : r/fusion - Reddit, 11月 11, 2025にアクセス、
https://www.reddit.com/r/fusion/comments/j2fou0/iter_why_ten_years_between_first_plasma_and_start/
62. UK FUSION MATERIALS ROADMAP 2.0, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://media.becbusinesscluster.co.uk/documents/uk-materials-roadmap-2-0.pdf>
63. Tokamak Energy and UKAEA to collaborate on developing Spherical Tokamak technology for commercial fusion energy, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://tokamakenergy.com/2022/10/10/tokamak-energy-and-ukaea-to-collaborate-on-developing-spherical-tokamak-technology-for-commercial-fusion-energy/>
64. General Fusion demo plant construction will begin this summer - American Nuclear Society, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.ans.org/news/article-4643/general-fusion-demo-plant-construction-will-begin-this-summer/>
65. Articles Tagged with: cnl -- ANS / Nuclear Newswire, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://www.ans.org/news/tag-cnl/>

66. Articles Tagged with: general fusion -- ANS / Nuclear Newswire, 11月 11, 2025にアクセス、<https://www.ans.org/news/tag-general%20fusion/>
67. World-Leading Fusion Research - Global Infrastructure | General ..., 11月 11, 2025にアクセス、<https://generalfusion.com/about/fusion-infrastructure/>
68. Commonwealth Fusion Systems: Home, 11月 11, 2025にアクセス、<https://cfs.energy/>
69. Technology | Commonwealth Fusion Systems, 11月 11, 2025にアクセス、<https://cfs.energy/technology/>
70. Commonwealth Fusion Patents – Key Insights and Stats, 11月 11, 2025にアクセス、<https://insights.greyb.com/commonwealth-fusion-patents/>
71. Patents Assigned to Commonwealth Fusion Systems LLC, 11月 11, 2025にアクセス、<https://patents.justia.com/assignee/commonwealth-fusion-systems-llc>
72. Commonwealth Fusion Systems 2025 Company Profile: Valuation, Funding & Investors, 11月 11, 2025にアクセス、<https://pitchbook.com/profiles/company/226641-88>
73. The High-Field Path to Practical Fusion Energy - National Academies, 11月 11, 2025にアクセス、https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/bpasite/documents/webpage/bpa_185099.pdf
74. Commonwealth Fusion Systems Raises \$863 Million Series B2 Round to Accelerate the Commercialization of Fusion Energy, 11月 11, 2025にアクセス、<https://cfs.energy/news-and-media/commonwealth-fusion-systems-raises-863-million-series-b2-round-to-accelerate-the-commercialization-of-fusion-energy/>
75. Nuclear Fusion Deals – Based on reality or a dream? - Australian Energy Council, 11月 11, 2025にアクセス、<https://www.energycouncil.com.au/analysis/nuclear-fusion-deals-based-on-reality-or-a-dream/>
76. Eni and Commonwealth Fusion Systems sign \$1 billion+ power ..., 11月 11, 2025にアクセス、<https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2025/09/pr-eni-commonwealth-fusion-systems-1-billion-power-production-energy.html>
77. Patents Assigned to HELION ENERGY, INC., 11月 11, 2025にアクセス、<https://patents.justia.com/assignee/helion-energy-inc>
78. Patents Assigned to Helion - Justia Patents Search, 11月 11, 2025にアクセス、<https://patents.justia.com/assignee/helion>
79. Helion Energy Patents - Insights & Stats (Updated 2023), 11月 11, 2025にアクセス、<https://insights.greyb.com/helion-energy-patents/>
80. Helion energy inc Patents | PatentGuru, 11月 11, 2025にアクセス、<https://www.patentguru.com/assignee/helion-energy-inc>
81. Fusion Energy Milestone from TAE Technologies Validates Path to Cost-Competitive Carbon-Free Baseload Energy Company Raises Additional \$280M for Reactor-Scale Demonstration Facility, 11月 11, 2025にアクセス、<https://tae.com/fusion-energy-milestone-from-tae-technologies-validates-path-to-cost-competitive-carbon-free-baseload-energy-company-raises-additional-280m-for-reactor-scale-demonstration-facility/>

82. Patents Assigned to TAE TECHNOLOGIES, INC., 11月 11, 2025にアクセス、
<https://patents.justia.com/assignee/tae-technologies-inc>
83. TAE Technologies applauds California's landmark fusion energy bill, 11月 11, 2025
にアクセス、
<https://tae.com/tae-technologies-applauds-californias-landmark-fusion-energy-bill/>
84. TAE Technologies Patents – Key Insights and Stats, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://insights.greyb.com/tae-technologies-patents/>
85. TAE Technologies - Wikipedia, 11月 11, 2025にアクセス、
https://en.wikipedia.org/wiki/TAE_Technologies
86. Fusion Startup General Fusion Lands \$22M in New Funding - TechNews180, 11月
11, 2025にアクセス、
<https://technews180.com/cleantech/fusion-startup-general-fusion-lands-22m-in-new-funding/>
87. General Fusion closes US\$19.5m Series B round - FusionXInvest, 11月 11, 2025にア
クセス、
<https://fusionxinvest.com/news/3120/general-fusion-closes-19-5m-series-b-round/>
88. Fusion Lightweight gets a boost from heavyweight investors, 11月 11, 2025にアク
セス、
<https://generalfusion.com/post/fusion-lightweight-gets-a-boost-from-heavyweight-investors/>
89. 11月 11, 2025にアクセス、
<https://betakit.com/general-fusion-powers-up-with-166-million-cad-round-for-its-energy-technology/#:~:text=Amazon%20founder%20Jeff%20Bezos'%20venture,round%20being%20prepared%20for%202022.>
90. Jeff Bezos invests in nuclear fusion firm's \$65m Series E - Silicon Republic, 11月 11,
2025にアクセス、
<https://www.siliconrepublic.com/machines/jeff-bezos-nuclear-general-fusion-investment>
91. Papers & Presentations - 2016 Mo-99 Topical Meeting | Argonne National
Laboratory, 11月 11, 2025にアクセス、
<https://mo99.ne.anl.gov/2016/pdfs/>
92. OPEN POSITIONS - Kyoto Fusioneering, 11月 11, 2025にアクセス、
https://kyotofusioneering.com/en/open_positions
93. Fusion Science & Technology Roadmap - Department of Energy, 11月 11, 2025にア
クセス、
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-10/fusion-s%26t-roadmap-101625.pdf>
94. IAEA World Fusion Outlook 2025, 11月 11, 2025にアクセス、
https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/p15935-25-02871E_WFO25_web.pdf