

カウンター・ポイント・グローバル・インサイト

核融合

EDGE | 2025年9月

EDGEへようこそ。

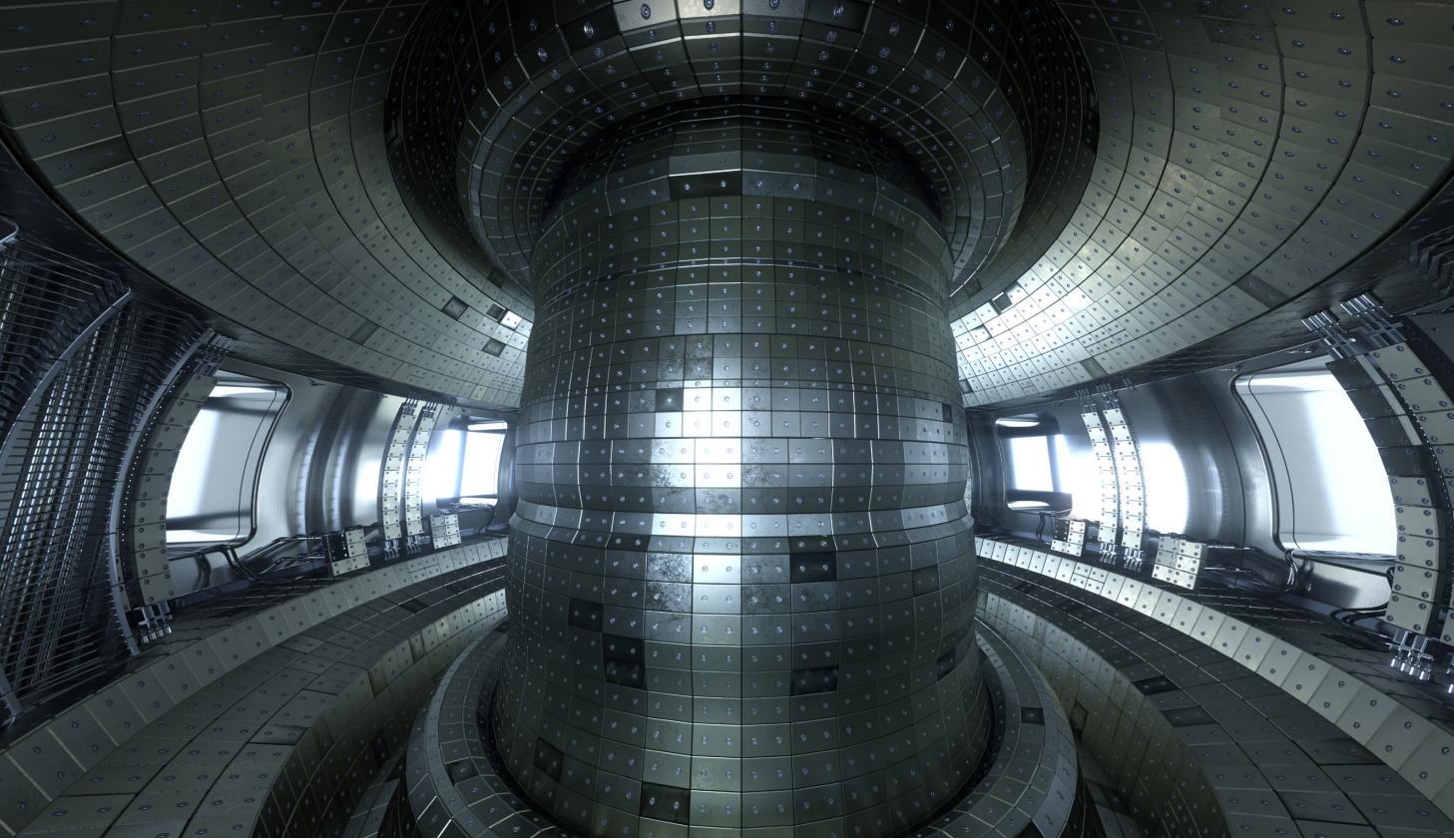
モルガン・スタンレー・インベストメント・マネジメントのカウンター・ポイント・グローバル株式運用チームは、ブロックチェーン、自動運転車、機械学習、遺伝子編集など、さまざまな方面に影響を与える大きなテーマについて独自の見解を投資家の皆様にお伝えしています。

カウンター・ポイント・グローバルは長期保有のマインドを基盤とし、視野の広い分野横断的な思考を重視しています。また、私たちの投資プロセスでは、持続可能な競争優位性を持つユニークな企業を見出すことに力点を置いています。EDGEシリーズでは、私たちが変化を捉える枠組みと、将来の投資環境を大きく変えるパターンを認識するプロセスについて皆様にお伝えしています。

カウンター・ポイント・グローバル・チームでは、長期投資のフレームワーク構築に向けてトライディショナルな基礎的リサーチを行っています。これは知的探究心と柔軟性、視野の広さ、自己認識、そしてパートナーシップを基盤としたリサーチであり、本稿はそれを補完するものです。

核融合はこの宇宙の太陽が輝くメカニズムでもあります。科学者やエネルギーの専門家は、核融合をエネルギー技術における重要な進歩だと考えています。経済的な意味で現実性のある核融合発電が実現すれば、クリーンで安全なエネルギーが事実上無限に利用できるという画期的な段階に私たちは到達するでしょう。核融合は、化石燃料に代わる持続可能な代替エネルギーとして、極めて高いエネルギー密度を提供できる可能性を秘めています。また、核融合には再生可能エネルギーと比較していくつかの利点があります。核融合は必要な時に確実に電力を供給することができ、インフラ開発に必要な土地面積が小さく、立地選定にも柔軟性があります。核融合の商業化はエネルギー分野に革命をもたらすと考えられており、ブルームバーグ・インテリジェンスの分析によれば、市場規模は2050年までに40兆ドルに達すると予想されています。¹ 地球上の核融合はSFの世界の話だと長い間考えられてきましたが、近年では技術開発が進んでおり、今後10年以内に商業化の実現もありえると言われています。

¹ Nuclear fusion market could achieve a \$40 trillion valuation | Insights | Bloomberg Professional Services (核融合市場は40兆ドル規模に成長する可能性 | インサイト | ブルームバーグ・プロフェッショナル・サービス)



核融合の仕組み

核融合とは、二つの軽い原子核が非常に高い熱と圧力の下で融合することです。これによりヘリウム原子核と中性子が生成され、同時に質量のごく一部がエネルギーに変換されます。太陽の非常に強い重力は極めて高い圧力と温度を生み出しており、太陽中心部の温度は約1,500万°Cにもなります。核融合反応はこの圧力と高温により自然に発生しています。地球上で、人間が制御できる方法により核融合を開始させるために必要な圧力と温度を再現することは極めて困難です。

研究者が利用できる核融合の燃料としてはさまざまな元素がありますが、中でも重水素(D)とトリチウム(T)という二つの水素同位体が重点的に利用されています。その理由は、これらの元素は比較的の低温で大量のエネルギーを発生することができるため、他の元素に比べて核融合しやすい点にあります。完全にイオン化されたガスプラズマが約1億°Cという高温下で生成されると、これに点火することにより核融合反応を開始させることができます。プラズマはこうした反応を毎秒数百万回持続させるため、最小限の燃料から膨大なエネルギーを生み出すことが可能です。

1930年代以来、科学者は太陽で自然に発生している核融合反応を再現しようと試みてきました。これを原子炉で実現するためには、

プラズマがローソン条件を満たす必要があります。ローソン条件とは、核融合反応を安定的に持続させるために満たすべき条件で、具体的には、プラズマ温度、プラズマ密度、プラズマ閉じ込め時間の3つの指標を掛け合わせた三重積の条件を指します。ローソン条件は、原子炉個別の設計、燃料の種類および閉じ込め機構によって大きく異なります。

核融合炉の建設にはいくつかの手法が存在し、それぞれが物理学、工学、複雑性、スケーリングおよび成熟度に関してさまざまな長所と短所があります。磁気閉じ込め核融合(MCF)は低密度、長い閉じ込め時間、および比較的の低温を特徴としています。慣性閉じ込め核融合(ICF)は非常に高い密度および同一温度条件下での極めて短い閉じ込め時間を採用したものです。

原子炉の設計はさまざまですが、ほぼ全てにおいて、燃料源を持続的に供給するためには核融合反応中にトリチウムを発生させる必要があります。トリチウムの半減期は約12.3年と短いため、大量のトリチウムが自然に発生することはありません。そのため、D-T核融合を利用する核融合炉では施設内でトリチウムを生成する必要があります。通常は、原子炉の炉心周囲に設置する増殖ブランケットと呼ばれる構造物を使用してリチウムからトリチウムを生成します。ここでは、核融合反応によって

放出された中性子がブランケット内のリチウムと相互作用してトリチウムが生成されます。この仕組みにより、燃料サイクルは閉鎖系となり、原子炉自体がトリチウムを生成することが可能になります。

いま核融合に注目する理由

近年、核融合は、民間セクターの急速な成長に伴い、科学実験の段階から現実的なエネルギー策の段階へと移行しつつあり、その現実性は一段と高まっています。

核融合の商業化は、さまざまな進展の結果として実現に近づいています。以下に挙げるものはその例です。

- ・米国ローレンス・リバモア国立研究所の国立点火施設(NIF)で2022年12月5日に実施された自己点火実証では、純エネルギー利得(Q値)が初めて1.5に到達し、核融合の大きな推進力となりました。Q値とは核融合反応によって生成されるエネルギーの量を示す指標です。例えば、Q値が1であるとは、核融合反応によって放出されたエネルギーが投入されたエネルギーと等しいことを表します(これを科学的損益分岐点といいます)。核融合分野では過去60年間に非常に大きな進歩がありました。

核融合研究により三重積が1万倍に増加し、現在では核融合発電に必要な性能まであと1桁となっています。² 科学的なリスクが軽減されたことにより、現在の焦点は、商用発電が可能な核融合発電所の実現に向けた実行段階に移っています。

・人工知能（AI）や高性能計算といった基盤技術が進歩し、プラズマの制御や原子炉設計の最適化、あるいはシミュレーションの高速化に貢献しています。高温超電導体（HTS）テープの開発といったコンポーネントレベルでの進歩も、商業化の進捗を基本的に加速させています。HTSにより従来より2倍強力な磁場が実現し、一層小型で経済的な原子炉による核融合反応が達成可能になります。核融合発電企業Commonwealth Fusion Systemsでは、この技術を活用して、実証機「SPARC」の開発を現在進めています。同機は2026年に初のプラズマ生成を実現し、2027年にはQ値が1を超えることを実証する見込みです。

・人工知能開発の競争が続いていることに加え、エネルギー安全保障とエネルギー自給の重要性が高まっていることを背景として、大規模な電力生産に対する需要がかつてないほど高まっています。世界の電力需要は、20年間の停滞を経て現在は急速に拡大しており、これまで年率2%未満であった増加率が年率2~4%へと上昇し、2050年までには現在の1.5倍から3倍の電力需要となることが予想されています。この急速な拡大により、AIインフラを支える持続可能かつ長期的な解決策としての核融合に一段と大きな関心が集まっています。

・政府は公共政策により複数の方法で核融合を支援しています。1) クリストファー・ライト現米国エネルギー長官は、就任後初の長官命令で同技術への強い支持を表明しました。

2) 議会は核融合研究への支援を拡大し、2025年における核融合事業に対する政府の資金供給は14億8000万ドルとなって過去最高を記録しました。³ 3) 「マイルストーンベース核融合開発プログラム」により、具体的かつ事前に合意された技術的および工学的なマイルストーンを達成した民間企業に金融支援が提供されることになりました。⁴

・核融合は、粒子加速器と同じく連邦規則集第10巻第30部（10 CFR Part 30）の規制対象となります。これは核分裂を規制する基準より大幅に緩やかな規制です。その主な理由は、核融合が自己持続的な連鎖反応に依存せず、放射性廃棄物が最小限に抑えられることによります。また、米国および英国に統いて、日本、カナダおよびドイツも、原子力規制において核分裂とは異なる規制を核融合に適用する方向に動いています。

・過去5年間に、さまざまな原子炉設計（トカマク型、ステラレーター型、レーザー点火型、Zピンチ型など）に対して巨額の投資が行われてきました。現在は合計53社が核融合に取り組んでいます。核融合分野に対する全世界の資金提供額は現在97億6,000万ドルを超えていました。⁵

・近年、民間の核融合発電企業2社がGoogle⁶およびMicrosoft⁷との間で合計250メガワットの電力購入に関する契約を締結しました。また、複数の公益電力会社が核融合企業と提携し、商業的規模での核融合

炉建設に関して立地選定と許認可取得を現在進めています。⁸ 公益電力会社はこれまで新技術の採用に慎重な姿勢を取っていました。これらの提携は、核融合が電力網にとって実用的な発電源となりうるという見方にに対する大きな信任の証と言えるでしょう。

今後数年間には注目すべき重要な節目が複数あります。1) 2026年10月に予定されている規制体系の最終決定、⁹ 2) 2027年に予定されているCommonwealth Fusion Systemの商用核融合発電所「ARC」実証、3) 2028年に予定されているHelion Energyのパイロットプラント完成。¹⁰

核融合が「破壊的」である理由

核融合エネルギーを自由自在に利用できるようになれば、かつての蒸気機関のように人類史上最も重要な技術の一つとなるでしょう。核融合には複数の重要なメリットがあり、そのためエネルギー生成のあり方に革命をもたらす可能性を秘めています。

その第一は、核融合反応を駆動するために必要な燃料が豊富かつ低成本であることです。重水素は海水中に豊富に含まれており、トリチウムは核融合反応中に核融合炉内のリチウムから生成することができます。国際原子力機関（IAEA）によれば、1リットルの水に含まれる重量の重水素を少量のリチウムを結合させることにより、理論上は300リットルの石油を燃焼させるに等しいエネルギーを発生させることができます。このことは、海洋中に存在する重水素の重量が、人類のエネルギー需要を数百万年にわたって充足させるのに十分であることを意味しています。

² ITER: 60 years of progress (核融合実験炉ITER: 進歩の60年)

³ Congress Increases U.S. Funding for Fusion Energy Sciences Research - Fusion Industry Association (米議会が核融合科学研究に対する資金助成を引き上げ - 核融合産業協会)

⁴ U.S. Department of Energy Announces Selectees for \$107 Million Fusion Innovation Research Engine Collaboratives, and Progress in Milestone Program Inspired by NASA | Department of Energy (米国エネルギー省、総額1億700万ドルの「核融合イノベーション研究エンジン」共同研究の採用企業を発表、NASAに着想を得たマイルストーン型プログラムの進展も公表 | 米国エネルギー庁)

⁵ Access to funding remains a major issue for fusion, says industry report - World Nuclear News (業界レポートによれば資金調達が引き続き核融合の大きな課題 - ワールド・ニュークリア・ニュース)

⁶ Google and Commonwealth Fusion Systems Sign Strategic Partnership | Commonwealth Fusion Systems (GoogleとCommonwealth Fusion Systemsが戦略的提携を締結 | Commonwealth Fusion Systems)

⁷ Announcing Helion's fusion power purchase agreement with Microsoft | Helion (HelionがMicrosoftとの電力購入契約締結を発表 | Helion)

⁸ Fusion energy: Opportunities for federal action to support energy innovation and commercialization – Clean Air Task Force (エネルギーのイノベーションと商業化を支援する連邦政府の取り組み – Clean Air Task Force (米国NPO))

⁹ Building the fusion energy rulebook - Nuclear Engineering International (核融合エネルギー・ルールブックの構築 - Nuclear Engineering International)

¹⁰ Helion Secures Land and Begins Building on the Site of World's First Fusion Power Plant | Helion (Helionが世界初の核融合発電所の実現に向けて土地を取得し原子炉を竣工 | Helion)

第二のメリットは、核融合反応の膨大なエネルギーを放出するにはごく少量の燃料しか必要としないことです。そのため核融合は桁違いに高密度なエネルギー形態となります。核融合は、核分裂と比較して1キログラムあたり4倍のエネルギーを生み出すことが可能であり、これは火力発電や石炭発電の約400万倍に相当します。¹¹ 商業化が成功すれば、核融合による発電コストは他のあらゆる電力源より低くなる可能性があります。

第三に、核融合炉は核分裂炉より安全であることが挙げられます。核融合炉の反応は本質的に自己制限的であるためです。核融合では、磁場、真空システム、燃料比率などプロセスのあらゆる側面を精密に制御する必要があります。条件が完璧でなければ反応は停止します。核融合反応は、自己維持的な反応である核分裂とは異なり、環境の変化が生じるとほぼ即座に停止します。核分裂における指数関数的な連鎖反応は、暴走臨界反応および原子炉メルtdownという二つの壊滅的な保安事象を発生させるリスクがあります。この違いは重要であり、それに基づいて米国原子力規制委員会(NRC)は、核融合を核分裂と同じ枠組みでは規制しないことを全会一致で2023年に決定し、その決定は米国において2024年アドバンス法として法制化されました。

核分裂と核融合の違いとしては廃棄物の問題も重要です。核分裂は使用済み燃料という形態の高レベル放射性廃棄物(HLW)を生成し、その取り扱いや保管には危険が伴います。一方、核融合は低レベル放射性廃棄物(LLW)だけを生成します。そのため、緩やかな管理办法および処分方法しか必要となりません。低レベル放射性廃棄物は、最小限の隔離を施した上で地表近くの施設に埋設することができる。高レベル放射性廃棄物(HLW)はそれよりはるかに放射性が高く、堅牢な封じ込めと深地層処分場における長期保管が必要となります。

リスクと課題

太陽の核で見られる条件を地球上で再現するには、極めて高い温度と圧力を達成して維持することが必要となります。核融合を実現する上で一つの重要な課題はプラズマの閉じ込めを継続することです。つまり、粒子の衝突や

核融合反応の発生に必要な期間にわたってプラズマをまとった状態に保つということです。これまでに達成された核融合反応の最長持続時間は、中国のEAST(実験的先進超伝導トカマク)によるもので、わずか22分17秒間でした。発電を目的とする場合、反応を長期間にわたり維持し、停止時間を最小限に抑える必要があります。

最初の課題は、「物理的リスク」と「技術的リスク」のトレードオフを慎重に考慮した原子炉の設計です。この違いを理解することは、特定の融合アプローチが科学的に実現可能であり、技術的に実行可能であるかどうかを評価する上で極めて重要です。物理的リスクとは、現実的な条件下において、基礎となる物理的原理がシステムに正味のエネルギー増益をもたらすかどうかに関する不確実性を指します。技術的リスクとは、機能的で信頼性が高く、かつ経済的な核融合システムを構築することの難しさを指しています。

一部のスタートアップ企業は、より迅速な進展と低コストな原子炉の実現を目指し、物理的なリスクを意図的に許容することにより技術的な複雑さを軽減しようと試みています。核融合実験炉(ITER)などの従来型手法は、物理学上のリスクを低減する一方で、膨大な技術的リスクとコストを伴います。各手法は、その技術を商業化するにあたり、それぞれ固有の課題に直面しています。

第二の課題は、核融合反応による強烈な中性子照射に耐えうる反応炉内部チャンバー用の材料を開発することです。現時点では、これは理論上の取り組みです。それらの材料は頻繁に損傷を受けるため、長時間の発電を中断せずにメンテナンスを行えるシステムが必要です。材料がどの程度の期間持続するか、あるいは技術者がどの材料を使用すべきかについては現時点では不明です。

第三の課題は、核融合反応からトリチウムを効果的に生成し、継続的な燃料源を確保することです。増殖プロセスは複雑であり、安定した温度条件、強い中性子線と熱負荷への耐性、およびトリチウムと熱の効率的な抽出が必要となります。トリチウムを効果的に生成できなければ核融合サイクル全体が停滞します。

第四に、核融合によるエネルギーを電力に変換するには、核融合反応によって発生する高熱と中性子束を効率的に処理することが必要になります。従来型の火力発電所(原子力、石炭、ガス)もこのプロセスを必要としますが、核融合は極限的な条件が関係しているために特有の困難さが生じます。商業用核融合炉には、過酷な放射線や温度負荷に耐えうる材料を使用した高効率の熱伝達経路が必要です。

最後に、第五の課題として、商業用核融合発電所を大規模化する上では、経済的な実現可能性が極めて重要となります。現在、世界初の原子炉建設に向けた研究開発には高額な費用を要していますが、核融合エネルギーを実用規模に到達させ、代替エネルギー源を核融合で置き換えるには、それらの研究開発費用を大幅に削減することが必要です。

結論

材料科学における近年の進展と増大するエネルギー需要に加え、有利な資金調達環境や規制環境により、核融合は次の十年で商業的に実現可能な電力源として位置づけられています。核融合が実現すれば、拡大する世界的な電力需要の充足に貢献し、天然ガスや石炭などの炭素集約型エネルギー源への依存度を低減する可能性があります。

¹¹ ITER: Making it work (ITER: 実現を目指して)

当資料の複製、公衆への提示・引用および販売用資料への利用はご遠慮ください。当資料はモルガン・スタンレー・インベストメント・マネジメントが海外で発行したレポートを邦訳したものです。邦訳に際してその解釈や表現に細心の注意を払っておりますが、邦訳による解釈や表現の違いが生じる場合は英文が優先し、我々は一切の責任を負いません。当資料に含まれる情報等の著作権その他のあらゆる知的財産権は我々に帰属します。我々からの事前の書面による承諾なしに、当該情報を商業目的に利用することを禁止します。

当資料の予想や見解は、必ずしもモルガン・スタンレー・インベストメント・マネジメントの会社としての予想や見解ではありません。また予想や見解が実際に実現するとは限らず、将来のパフォーマンスを示唆するものではないことにご留意ください。当資料の情報はモルガン・スタンレーの金融商品にかかわるものではなく、また商品を推奨するものではありません。当資料で表明された見解は原書執筆時点の筆者の見解であり、市場や経済、その他の状況による変化を免れません。これらの見解は推奨意見ではなく、広範な経済テーマの説明としてご理解ください。

当資料は情報提供のみを目的としたものであり、金融商品取引法、投資信託及び投資法人に関する法律に基づく開示資料ではありません。また、商品の売買の助言もしくは勧誘または我々が提供するサービスに関する勧説を意図するものではありません。当資料に含まれる情報は信頼できる公開情報に基づいて作成されたものですが、その情報の正確性あるいは完全性を保証するものではありません。当資料で表示している過去の実績は、必ずしも将来の

結果を保証するものではありません。当資料に掲載されている数値、図表等は、特に断りのない限り原書執筆時点現在のものです。また、当資料に示す意見は、特に断りのない限り原書執筆時点の見解を示すものです。当資料で表示した分析は、一定の仮定に基づくものであり、その結果の確実性を表明するものではありません。分析の際の仮定は変更されることもあり、それに伴い当初の分析の結果と重要な差異が生じる可能性があります。

我々およびモルガン・スタンレーは、当資料に含まれる情報を利用し、信頼または利用できなかったことに起因する一切の直接および間接の損害に対する責任を負いません。

お問い合わせ先

モルガン・スタンレー・インベストメント・マネジメント株式会社
〒100-8109
東京都千代田区大手町1-9-7
大手町フィナンシャルシティ サウスタワー
tel: 03-6836-5100

金融商品取引業者 関東財務局長（金商）第410号
加入協会：日本証券業協会、一般社団法人投資信託協会、
一般社団法人日本投資顧問業協会、一般社団法人第二種金融商品取引業協会

ウェブサイトでは様々なレポートを掲載しています
www.morganstanley.com/im/jp