

むつ小川原だより

Credit c ITER Organization

Pick up! 今号では、「第12回エネルギーに関する講演会」の講演要旨をお届けいたします。

2月3日にオンライン開催した当講演会には、230名にご参加いただきました。
今後もエネルギー関連プロジェクトの推進及び企業・研究機関の誘致へつなげて参ります。

核融合の産業化：産学官の現在地 神戸大学科学技術イノベーション研究科 教授 尾崎弘之 様

自己紹介

大学卒業後、野村證券ニューヨーク現地法人、モルガン・スタンレー証券、ゴールドマン・サックス投信執行役員を経て、複数ベンチャー企業の立ち上げに携わり、EXIT（株式売却による資金回収）を達成。2005年に東京工科大学教授に転身。2015年4月より現職。2025年4月から早稲田大学ピ

ジネス・ファイナンス研究センター研究院教授に就任予定。内閣府核融合戦略有識者会議委員、文部科学省核融合科学技術委員会委員、量子科学技術研究開発機構（QST）核融合エネルギー事業化アドバイザーを務める。また、複数の上場企業にて社外取締役を歴任。

核融合へのニーズと現状

日本のベースロード電源は、3.11以降化石燃料に依存している。エネルギー資源の大部分を輸入に頼る日本では、ロシアによるウクライナ侵攻などエネルギー安全保障に大きな影響が出ると非常に脆弱である。核融合発電は、原発に続くベースロード電源になりうるとして以下の点から注目されている。

- ・高いエネルギー効率
…燃料 1g で石油 8 トン分のエネルギー算出が可能
- ・理論上燃料が無尽蔵
…海水から抽出可能なリチウムが燃料
- ・原発よりも安全…高濃度放射性廃棄物をほぼ不排出
- ・国際協力…「ITER 計画」と国際競争が併存
- ・国家戦略により、原型炉（商業炉の前段階のデモ炉）建設の早期化、関連産業の育成も計画

◆ 発電実証のロードマップ - 各国比較 -

日本は 2050 年の商業発電を見据え、2025 年に概念設計、2035 年に工学設計の終了を予定している。近年米欧を中心にスタートアップが勃興し、商業化に向けてプロセスを加速させている。

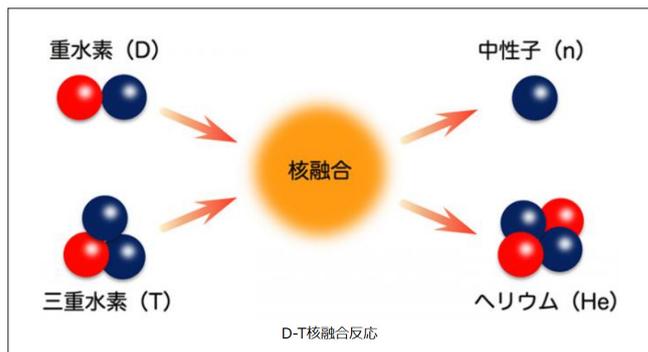
◆ 核融合ロードマップ - 日本 -

日本は ITER 計画と BA 活動の国際協力を活用して核融合研究開発を推進する戦略であり、2023 年 4 月にフュージョンエネルギー・イノベーション戦略が策定された。本戦略では、原型炉等の開発加速化、産業育成、オープンイノベーションと人材育成の 3 本柱が示されたが、ITER 計画の遅れが反映されていないスケジュールであったため、内閣府の核融合戦略有識者会議等でどのような修正が必要か議論されている。

核融合発電の仕組み

太陽が熱や光を放つ原理を地球上で再現する技術である。核融合は、水素のような軽い原子核同士が融合して、ヘリウムなどの水素より重い原子核に変わることである。水素同位体である重水素（D）と三重水素（T：トリチウム）の原子核を猛スピードで衝突させる DT 核融合反応では、ヘリウム

と中性子が生成される。反応の前後で若干質量が減り、その際放出される大量のエネルギーを熱として捕らえ、蒸気を発生させてタービンを動かし、電気に変換するのが核融合発電である。



出典：(国研) 量子科学技術研究開発機構

◆ 高いエネルギー効率とは

「燃料 1g で石油 8 トン分のエネルギー産出が可能」なのは、アインシュタインの特殊相対性理論*によるもの。つまり、エネルギーは質量と光速の 2 乗の積である。

核融合反応が起きる前の重水素 (D) と三重水素 (T) の質量よりも、核融合反応が起こった後のヘリウムと中性子の質量の方が軽い。反応の前後で全質量の和が Δm だけ減るならば、それに相当する Δmc^2 のエネルギーが運動、熱、あるいは位置エネルギーに転化される。それゆえ「燃料 1g で石油 8 トン分のエネルギー産出が可能」となる。

※特殊相対性理論

質量等価の法則のこと。エネルギー (E) が質量 (m) と等価であるという原理。(E = m c²)

◆ 理論上燃料が無尽蔵である

DT 核融合反応に使用する重水素 (D) は海水中に豊富に存在するが、もう一方の三重水素 (T) は自然界にほとんど存在しない。そこで、核融合反応で発生した中性子を中性子増倍材 (ベリリウム) に衝突させて中性子の量を増やし、その

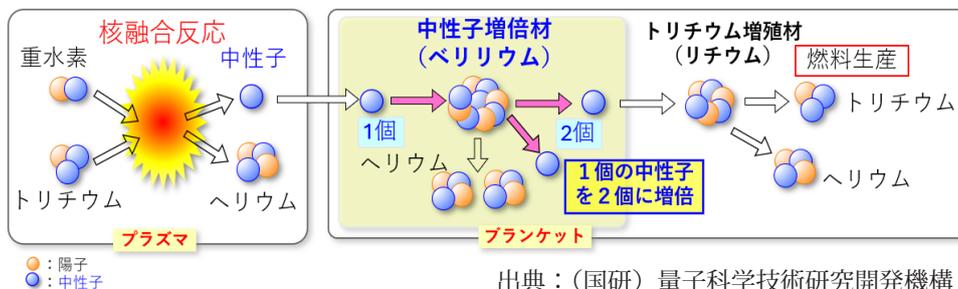
中性子とトリチウム増殖材 (リチウム) の反応により三重水素を再生産し燃料の循環を行う。このシステムが産業化において収支が成り立つために不可欠である。(下図参照)

◆ プラズマの安定化

重水素と三重水素を高速で衝突させるには、高温が必要である。エネルギー収支をプラスにするには、プラズマを 1 億℃以上に加熱する必要がある。プラズマは、固体→液体→気体の次に来る四番目の物質だと言われており、薄いガスのような状態である。核融合におけるプラズマ活動を活発化させるためには、3つの条件が必要である。

- 高温にする
…ITER などで経済的に成り立たせるためには 1 億 2 千万℃が必要
- プラズマ中心の密度を上げる
- 長い閉じ込め時間

現在、ITER のプラズマ継続時間は 400 秒を目標としている。これを定常的に維持して、発電用の運転につなげるには、さらなる技術的なハードルがある。



出典：(国研) 量子科学技術研究開発機構

核融合における 6 つの技術マップ

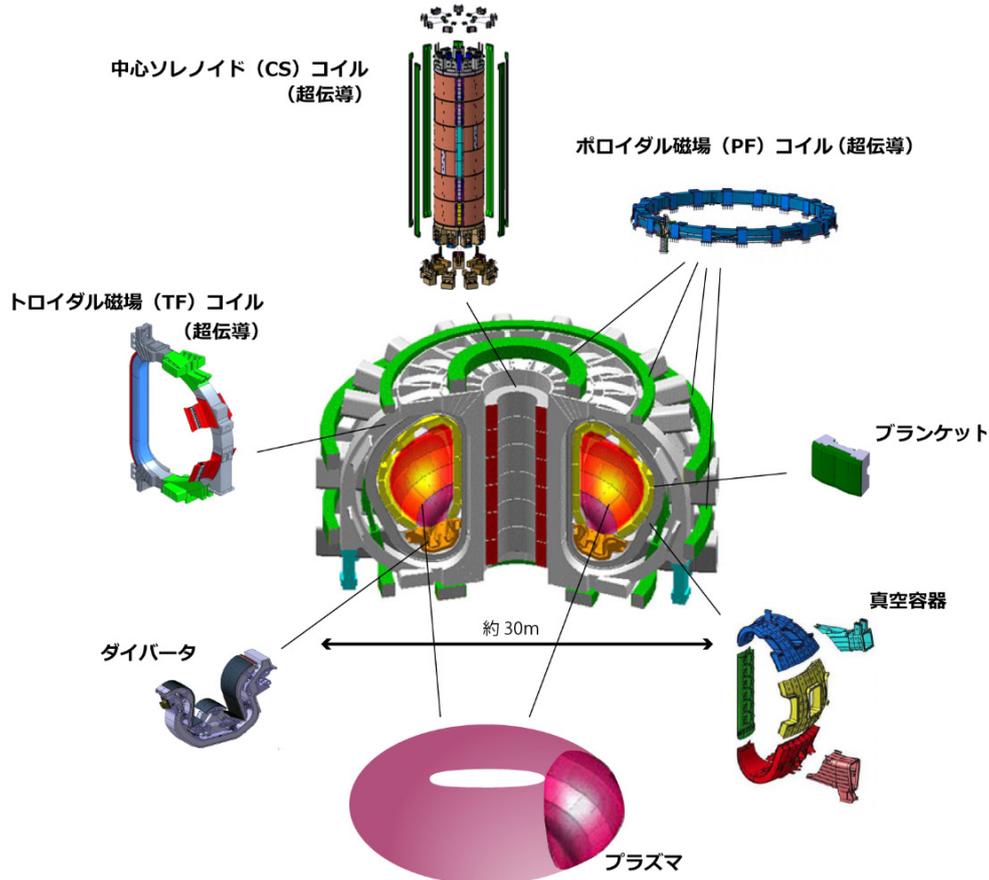
主な核融合エネルギー生成方式として、トカマク型、ヘリカル型、レーザー方式の 3 つが挙げられる。ITER および日本の原型炉開発はトカマク型を採用している。トカマク型の炉で核融合を起こすには下記 6 つの機能を組み合わせる。

◆ 1 プラズマ閉じ込め・制御

トカマク型装置は、真空容器内でプラズマを作る。発生したプラズマを制御・安定させるため、強力な磁場によってプラズマをドーナツ状 (トーラス状) に閉じ込める。そのために

三種類の超伝導コイルが使われる。トーラスと垂直に配置されるトロイダル磁場コイルと、水平に配置されるポロイダル磁場コイルが作る合成磁場でプラズマを閉じ込め、トーラスの中央に配置される中心ソレノイド磁場コイルは、プラズマの加熱と形状安定化の役割を持つ。これら超伝導コイルは大

きさ数十メートルの巨大構造物であるが、数ミリ単位の誤差での溶接が求められる。また、プラズマの密度や磁場、放射線量や温度を常時計測し、コイルを繊細に作動させてプラズマの安定化を図ることが商業化に必要なである。(下図参照)



出典：(国研) 量子科学技術研究開発機構

◆ 2 プラズマの加熱

重水素と三重水素の混合燃料に電流を流せば、発生したプラズマの温度を上げることができるが、1千万℃程度までが限界である。しかし、実用化には、それより遥かに高温が必要で、ITERの目標温度は1億2千万℃である。それを実現するために、以下2種類の加熱方法が用いられる。

・ NBI (中性子入射装置)

イオンを加速し、方向を安定化させるために中性化して、プラズマに照射・加熱する装置。お風呂の追い炊きをイメージするとわかりやすい。

・ ECRF (高周波加熱装置)

電子レンジと同じ原理。電子レンジでは、水と同じ振幅周波数のマイクロ波を当てて食材を加熱するが、核融合では、電子、イオンと同じ周波数のマイクロ波を照射して加熱する。ECRFの部材であるジャイロトロンは、日本が強い分野であり工学的にも最先端を走っている。

◆ 3 燃料再生産システム

トカマク型装置を構成しているブランケット部分では、ベリリウムとリチウムが内包されており、プラズマが発する中性子と衝突して、燃料である三重水素 (T) が生産される。核融合反応が続けば、燃料の三重水素の再生産を継続できる。

◆ 4 熱の電力への変換

ブランケットとダイバータが熱の電力への変換において重要な役割を果たしている。プラズマから発生する中性子がブランケット表面に衝突して発する熱と、真空容器内でダイバータが回収する熱の両方を使って蒸気が発生させ、タービンを動かし発電する。ブランケットとダイバータは真空容器内で最も高い熱負荷を受ける装置であり、素材開発が重要である。

◆ 5 遠隔監視・メンテナンス

核融合炉内はトリチウムが充満して作業員が近づけないため

炉の外側からロボットアームを入れてメンテナンスする必要がある。このロボット技術は、化学工場や鉱山など過酷な現場で利用されているロボットと技術的な共通課題がある。

◆ 6 データ解析・AI システム統合

プラズマの複雑な挙動を予測し安定化を図るためには、放射

線や高温環境において動作不良を起こさないセンサーが必要である。また、収集したプラズマ温度や密度、磁場状況などのデータをスーパーコンピューターで解析して、プラズマの動きを予測・安定化させなければならない。日本のセンサー産業にとって、ここにビジネスチャンスがある。

核融合戦略マップ

核融合に関係する企業は、各社がとる戦略によって6種類に分類することができる。

◆ I インテグレーター

技術マップで提示した6機能のまとめ役である。核融合は多様な部品、システムの集合体であり、要素技術の開発だけでは電力供給というゴールに到達できない。すり合わせによるもの作りなので、高度なイノベーションが求められる。ただ、既存事業の延長ではなく、次のような官民連携が必須である。

- ・日本…QSTと民間の提携が現実的と思われる。
- ・中国…政府主導で巨額の研究資金をつぎ込みスピードを上げて実証を目指している。
- ・米国…色々な炉型を開発しているベンチャー企業が、資本市場から資金調達して事業を進めている。これらの中から実証できた炉型が、政府が支援するパイロット・プラントに選ばれる予定。
- ・英国…官設民営型が基本で、実証炉の建設地も公募によって決定されている。

原子力の新型炉や新試験研究炉では、一社がインテグレーターを務め、JAEAと仕様や予算を決めてプロジェクトを進めている。しかし、原子力と比べて技術的に未成熟な核融合では、同様のフレームワークでの実施は困難である。

◆ II 核融合市場創造

主な核融合エネルギーの炉型には、トカマク型、ヘリカル型、レーザー型等、多様な形式がある。現在工学的に一番進んでいるのはトカマク型であり、ITERやBAはこの方式を採用している。一方、ベンチャーはトカマク型以外の方法で実証を目指している企業が多い。

- ・MIT発ベンチャー Commonwealth Fusion Systems
2024年12月に世界初の商用核融合発電所を米バージニア州に建設すると発表。2030年代初めまでの発電開始に向け、20億ドル超(約3,000億円)の資金調達を実現した。現在計画中の生産するエネルギーは実用化レベルには到達しないが、一企業単独で実証炉を作ろうと

している例は他になく、注目される。

- ・京都フュージョンリング株式会社
炉型の種類にかかわらず必要な熱交換器やジャイロトロン等に特化して技術開発をしている。どんな炉型でも必要な技術を開発している点は、インテグレーターを目指している他のベンチャー企業とは違う戦略である。
- ・QST発ベンチャー 株式会社 MiRESSO
核融合発電に必要なベリリウム生成コストを下げる技術に特化している。希少資源で産業ニーズが増えつつあるベリリウムの低コスト供給を目指している。

核融合における新規性の高い技術は、大企業・ベンチャー企業・大学が技術をすり合わせ、オープンイノベーションを起こしていくことが重要である。日本の技術力は世界トップクラスだが、商業化に向けてスピードアップする体制は出来上がっていないとは言えず、現状では、商業化の果実を米国や中国などに持って行かれることが懸念される。基礎研究の水準は高くても、商業化の果実は米国に独占されたITやバイオの轍は踏みたくないところだ。

◆ III 協力関係の拡張

ITERには20社弱の日本企業関わっているが、分業体制が確立しているわけではない。現在ITERやQSTと取引がない企業にも、自社技術やノウハウを活用すれば十分にチャンスがあると言える。

◆ IV 新規参入

これまで核融合と縁がなかった企業でも、自社技術を棚卸しすると、核融合と親和性が高い例が少なくない。これは、他産業から核融合に参入する余地が大きいことを意味する。核融合と共通の研究開発課題がある点で、次のような例がある。

- ・超伝導技術…医療、エネルギー、リニアモーター
- ・中性子…医療、物質の構造解析、素材開発等
- ・リチウム抽出
…リチウムイオン電池を使うEV、エネルギー産業。リチウムは、産業用途が急増中のため低コストで抽出する技術は不可欠である。

◆ V 取り込む

2023年5月、マイクロソフトは米スタートアップ企業ヘリオン・エナジーと2028年から核融合電力を購入する契約を締結した。ヘリオンは同年に核融合発電を開始し、その後1年で出力5万キロワットへ高める計画である。

官による呼び水効果と事業化

いくら有望な研究でも、核融合は「夢物語」や「儲からない」と言われることがある。この状況で、企業の継続的な投資や研究開発を促すためにどのような手立てをすればいいのか。

◆ 官のリスクテイクによる「呼び水効果」

産業的に未成熟だが、社会的な意義が大きい技術は、産業界が独力で開発することは難しい。未成熟な時期は「官」による投資によって「民」の投資を促進する「呼び水効果」が重要である。以下に、そのような産官学連携が奏功した例を紹介する。

• 国際ヒトゲノム計画

人の全DNA配列を読み取り、機能を明らかにする目的で始まったプロジェクト。1990年に米国政府が予算30億ドルの計画を開始し、後に6か国政府の国際共同プロジェクトに発展した。ただ、国際プロジェクトならではの意思決定の遅さと責任の所在の曖昧さによって進捗が遅れていた。2000年、プロジェクトのメンバーがスピンアウトして設立した、ベンチャー企業のセセラ・ジェノミクス社は本計画とは異なる方法を用いて、研究を加速させた。これにより本計画もスピードアップされ、当初の予定より早くヒトのゲノムの解読が完了した。これは、途中で官民競争も介在した呼び水効果の例である。

• NASAの産学連携、COTS

(Commercial Orbital Transportation Services)

「米国の商業宇宙部門を刺激するため政府資金を最も効率的に使う」発想に基づき、開発のマイルストーンを複数設定し、応募した企業が目標を達成すると資金を支払う方式を、NASAが採用した。官と民がリスクをシェアして、イノベーションを推進することを目的としており、SpaceX社が躍進

まとめ

私は、たまたま核融合に関して官・民・学の皆さんの声を聞ける立場にいるが、例えると、戦闘前にお互いに「睨み合っている」状態だと感じる。民は「官からの資金が乏しい現状では自分たちは投資できない」と感じ、官は「予算をつけるにも民が本気でリスクをとってくれるのか分からない」、QSTなどの国立研究組織は「特段どこからも指示がないの

◆ VI 資本市場をつなぐ

米国では、核融合に関する資金調達近年急激に増えている。スタートアップへの投資だけでなく、機関投資家が資本市場に参画していることが注目される。

する原動力となった。原型炉開発には、しっかりした仕様や予算を予め決めることが困難である。そうであれば、マイルストーンを設定して、段階的に開発を進めることは合理的である。

◆ ディープテック*事業化

核融合は、起業や開発段階前の技術シーズの創出時に、官の呼び水効果に加えて民間の投資促進が重要である。現在、世界のディープテック投資金額は、右肩上がり推移している。核融合はディープテックの典型例である。ディープテックの事業化に関する確立された研究やデータはまだないが、マサチューセッツ工科大学の科学技術雑誌 Breakthrough Technologies が毎年発表している「MITテクノロジーレビューが選んだ、世界を変える10大技術」がディープテックの類似概念として参考になる。過去には、ディープラーニングやゲノム編集、代替肉やmRNAワクチンが取り上げられており、2019年に核融合エネルギー、2022年に実用的な核融合炉がランクインしている。過去10年の推移を見ると、「本当に実用化できるか」と懐疑的にみられていた技術が今や巨額の資金調達をしている例が多い。AI、生成AI、量子コンピュータ、合成生物技術、ドローン、宇宙などがそうである。民間資本が特定のディープテック分野に投資されるタイミングを見ることが、今後のトレンドを考えるうえで有益である。

※ディープテック

科学的な発見や革新的な技術に基づいて、世界に大きな影響を与える問題を解決する取り組みのこと。

に自分たちが率先して組織改編をすることは難しい」というのが各々の本音であろう。米国で進んでいる核融合の産学連携は、企業グループが政府を突き上げて仕組み作りをした面がある。日本の産業界に今求められているのは、このような行動だろう。

質疑応答

Q マイクロソフトが核融合電力購入を契約したニュースについてだが、本当に発電可能か。

A 「2028年に本格的な電力供給」は非現実的だと思うが、短時間でも電力供給に成功すれば実績ができる。パブリックの注目を得る効果はある。

Q 核融合を成功させるための英断や、実行力を持ち合わせた企業や人材の必要性についてご見解を伺いたい。

A 宇宙関係のベンチャー企業が官の呼び水効果により百億円単位で調達する事案が出ている。核融合分野では、京都フュージョニアリングが数百億円単位で調達している。商業炉建設には数千億円単位の調達が必要だが、大きな前進だと思う。日本でもこれから大企業、ベンチャー

企業が活発に動き出す可能性がある。日本の原型炉は、おそらく公設民営になると思われるが、民間のイノベーションは重要である。

Q 今後核融合発電が実用化されるにあたって、核融合技術マップのうち注力が必要な分野等があれば伺いたい。

A マップの6項目中どれか一つが大きく欠けてしまうと、全体のインテグレーションが成り立たないため、技術の優先順位はつけにくい。しかし、分野によってレッドオーシャンかブルーオーシャンになる違いは出てくるから、その見極めが重要である。日本にとって、構造的に新規参加者が入りにくい分野や技術の競争力の見極めが大事だと思う。



神戸大学
科学技術イノベーション研究科
教授 尾崎弘之

PROFILE

- 1984年 東京大学法学部第II類卒業
- 1990年 New York University, Stern School of Business 修了 MBA
- 2005年 早稲田大学アジア太平洋研究科博士後期課程修了 博士(学術)
- 1984年 野村証券株式会社入社、ニューヨーク現地法人などに勤務
- 1993年 モルガン・スタンレー証券入社 バイス・プレジデント
- 1995年 ゴールドマン・サックス証券入社 バイス・プレジデント
- 1998年 ゴールドマン・サックス投信執行役員
- 2001年 SBI入社 バイオ投資ファンドを立ち上げる
- 2004年 ディナベック(遺伝子治療ベンチャー)立ち上げ、CFO
複数のベンチャー企業のIPO、M&Aに成功
- 2005年 東京工科大学教授
- 2015年 神戸大学経営学研究科教授(現任)
- 2016年 神戸大学科学技術イノベーション研究科教授(現任)
- 2025年 早稲田大学ビジネス・ファイナンス研究センター 研究院教授(4月就任予定)



新むつNEWS

弊社は、「青の煌めきあおもり国スポ・障スポ」のオフィシャルサポーターです！
両大会を全力で応援してまいります。

| | |
|------|------------------|
| 冬季大会 | 2026年1月31日～2月17日 |
| 本大会 | 2026年10月10日～20日 |
| 障スポ | 2026年10月23日～26日 |



公式マスコット
アップリート君