

脚光を浴びる核融合エネルギー ～脱炭素への切り札に向けた国際競争～

2022年5月16日、海外投融資情報財団（JOI）は、表題のウェブセミナーを開催しました。以下にその概要をご紹介します。（文責：JOI）

講演：FUSION for the FUTURE

武田 秀太郎

京都フュージオニアリング株式会社 共同創業者 兼 Chief Strategist
九州大学都市研究センター准教授



はじめに～注目度の高まる核融合～

核融合は、CO₂の排出をしない、資源がほぼ無尽蔵に存在する、原理的に事故のリスクがない、高レベルの核のゴミを出さない、という4つの観点から大きなメリットを有し、新しいエネルギー社会を拓く切り札となり得る技術であると考えられる。これまでは「常に30年先に実現する」と揶揄されもした技術だが、この1年で世界での動きが急速に進み、注目度も高まっている。

公的な動きとして、英米政府は、ともに2040年までの実用化（発電利用）を目指した計画を具体化させている。民間でも、2030年までの発電を目指している企業（Commonwealth Fusion Systems, CFS）や、同時期の原型炉完成を目指す企業（TAE Technologies）などが続々と出ている。さらに、2021年11月に開かれたCOP26会合では、サイドイベントのテーマとして核融合が初めて取り上げられた。

日本でも、自由民主党の2021年政権公約や、同年11月の政府の「新しい資本主義実現会議」緊急提言内に、核融合の開発推進が盛り込まれた。

テクノロジーからみた核融合

核融合は、核という名前がついているために誤解されやすいが、原子力とは全く別物の反応である。水素がひとつに融合してヘリウムを生成する反応を、人工的に発生させるプロセスである。太陽を含む宇宙のすべての星は、この仕組みから得るエネルギーで存在している。地球上のエネルギーも、もとをたどればほと

んどは核融合に由来するといえる。

燃料となる重水素やリチウムは海水中に豊富に存在し、人類すべての電力需要を核融合発電のみで賄うとしてもリチウムは7万年分、重水素は1400万年分の資源量がある。原理的にはリチウム無しでの核融合発電も可能であるため、ほぼ無尽蔵の資源量があるといえる。そして、反応生成物がヘリウムのみで、高レベルな放射性廃棄物が出ない（炉心で生成される低レベル放射性廃棄物はオンサイト保管の予定）点も、核融合の利点といえる。

また、核というと、どうしても安全性に対する懸念をもたれるが、「融合」は原子力発電で用いる「分裂」と異なり、自然に起きる反応ではない。そのため、意図せざる連鎖反応による核的暴走の心配がない。

一方、核融合反応を起こさせるには、太陽のような高温と巨大な重力エネルギーに相当する条件を地球上で作り出す必要がある。圧力を巨大な電磁石で閉じ込め、そのなかで1億度まで加熱、熱核融合反応を起こすというのが核融合炉の基本である。このように地球上で太陽を作り出すために、世界の科学者が1920年代から研究を続けてきた。

技術的には、まず、産出エネルギーが投入エネルギーを上回る「臨界プラズマ条件」は、日本や欧州のプロジェクトにより1990年代に達成されている。現在はさらに外部からのエネルギー補填なしに反応を持続できる「自己点火条件」の達成が目指されており、核融合の国際プロジェクトITERが2025年に実験を開始し、2035年に発電に十分な「自己点火条件」を達成する予定である。

日本政府の核融合ロードマップ

日本における核融合研究開発は、文部科学省の核融合科学技術委員会が作業部会を通じてアクションプランを策定し、研究開発の方向を示してきた。こうしたコーディネーションのもと、量子科学技術研究開発機構（QST）、核融合科学研究所（NIFS）、大学、産業界が研究を進めている。

日本政府が描く核融合実用化までのロードマップによると、これから2030年代に日本も参加するITERで実燃料による核融合実験を行い、50万kWの核融合出力を得る予定。これを受けて、2040年ごろからは青森県六ヶ所村の原型炉で発電実証を行い、出力150～200万kW、数十万kW級の発電を実現する。そして、今世紀中葉に第一世代の実用炉を市場に導入することとなっている。

ITERは、1985年の米ソ間の合意に基づく冷戦後の雪溶けの象徴となる位置付けで、以降40年にわたり、多様な機器を世界中から調達しつつフランスに核融合炉を建設してきている超国家的な事業である。

わが国では、このITERで本格的な実験が2035年ごろに始まるころ、この実験の開始を待って、核融合発電所の建設に移行するかを、判断することとしている。

六ヶ所村に建設予定の原型炉は、ITERおよび日欧共同プロジェクトであるJT-60SAの技術を基盤としつつ、日本の産業界の発電プラント技術や運転経験などを取り込んだ設計となっている。今年1月に核融合原型炉研究開発に関する第1回中間チェックアンドレビュー報告書が発表され、これまでのところ進捗はおおむね順調で、目標が達成されていると判断された。

他方でこの報告書では、諸外国で2040年頃の発電を目指す動きがとられていることを受け、今後の開発や実用化時期の前倒しが可能か検討することとしている。さらに、社会的な理解の促進や産業界の連携の促進など、文部科学省内での検討事項を超える課題の存在を指摘している。こうしたなか、核融合について、内閣府や経済産業省などでも政策議論が始まっている。

核融合の新たなプレイヤーたち

これまで核融合の研究は、主に第二次世界大戦以降、政府主導で進められてきた大規模な科学プロジェクト（ビッグサイエンス）のひとつとして行われてき

た。しかし最近では、ベンチャー企業によるビッグサイエンス領域（宇宙開発など）への進出が目立つようになっており、核融合分野でも同様の動きが見られる。

米マサチューセッツ工科大学や、英国原子力公社からのスピニアウト企業、ビル・ゲイツ氏や、ジェフ・ベズス氏といった著名な投資家からの出資を得ている企業など、技術、ビジネスの両面でしっかりしたベンチャー企業が多数存在している。

その結果、国際原子力機関（IAEA）によると、現在運用中の核融合装置の9割は公的機関によるものである一方、建設中・計画中の核融合装置の半数は民間企業によるものとなっている。

資金面からも、核融合分野の勢いはうかがえる。米英加の核融合13社の2020年までの累計資金調達額は2000億円であったが、2021年には単年で3000億円を記録した。資金の出し手につき米国の例をみると、2020年までは国家予算が民間資金を上回っていたが、2021年には民間資金が国家予算を大きく上回った。ESG投資の一環として、炭化水素資源からのダイベストメントの資金振り向け先などとして、多様な投資家が核融合を選択するようになってきている。そして、ブルームバーグは、核融合関連企業の時価総額は、将来的には5000兆円規模に達する可能性があるとの見通しを示している。

核融合ベンチャーは、より革新的な炉形式を開拓する傾向にある。従来、プラズマ状態の水素同位体を閉じ込める技術としては、磁場方式（トカマク型やヘリカル型）とレーザー方式が基本だったが、核融合ベンチャーからは、TAE Technologiesの逆転磁場配位型やプロトン-ボロン、General Fusionの物理圧縮といった新しい方式が登場している。IAEAによれば、公的プログラムでは磁場閉じ込め方式を採用する核融合装置の数が全体の76%を占めるのに対し、ベンチャーでは代替炉・革新炉形式によるものが71%と好対照である。ベンチャー企業は、リスクが大きくても小型化が見込める技術に集中しているということだろう。

一方、高温超電導線材や球状トカマクなどの実現技術（Enabling technologies）の導入で、大型であった伝統的な磁場閉じ込め方式のトカマク炉にも小型化への道筋が見えてきており、CFSは、こちらの道を追求している。

また、脱炭素化やグリーンニューディール政策などを背景とした政治的な意向に基づき、自国の核融合産業創出に向けた公的プログラムが再加速している。た

たとえば英政府は、2040年までに商用利用可能な核融合発電炉の建設を目指し、2021年6月にその立地候補を公式に発表した。米国では、政府が2022年3月に「核融合エネルギーの商用化に向けた10年ビジョン」を発表し、全米科学アカデミーが2028年までの実施判断、2035～40年の発電開始を謳っている。

つまり、ベンチャー企業のビッグサイエンス領域への進出、新たな実現技術、カーボンニュートラルの観点、これらによって、自国核融合産業を作り出す動きが加速しているといえる。

また、宇宙開発分野と同様に官民パートナーシップにて取り進める動きも広がっている。たとえば、英国政府のもと、英国原子力公社は、General Fusionとの官民パートナーシップにて、実験炉を建設することとなった。

ビジネスとして離陸する核融合

世界では、核融合実験装置はすでに数千億円規模の市場である。96装置が稼働しており、10装置が建設中、28装置が計画中である。そして日本は、核融合の中核装置で世界トップレベルの技術力を有する。

京都フュージョニアリング株式会社は、エンジニアの専門家集団として、世界中の核融合ベンチャー企業に対して設計の難しい中核装置の開発・試験・製造を

代行している。要素機器に特化して初期投資を低減し、単一技術に集中するリスクを回避するアプローチで、現在ある実験炉市場の段階での収益化を可能にした。

核融合炉には定期的な交換が必要な装置があり、継続的な需要も見込める。日本の持つ多様な技術的な優位性を世界に売り込んでいくことを通じて、核融合をいかにビジネスとして成立させるかが、ものづくり大国日本が、核融合に食い込み、産業にしていくうえでの鍵になると考えている。

世界中の企業が核融合反応の実現へ向けた競争を繰り広げているなか、京都フュージョニアリング株式会社はそうした競争に参加する意図はない。当社は、競争に参加する全ての会社をサポートしつつ、核融合エネルギーの実用化を目指していく。これが日本の核融合産業のあるべき姿であろうと考えている。

核融合に取り組む民間企業の多くが商用化の実現を想定する2030年代は、もう10年後に迫っている。日本の優れたものづくり力で世界に核融合装置を実現して、核融合をビジネスにし、産業に育てていくことが、日本として投資をしていくべき分野ではないか。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、永続的なエネルギー循環システムを構築し、人類の新たなエネルギー社会の夜明けを実現してまいりたい。

質疑応答

A：武田 秀太郎

Q：核融合の社会実装の実現時期をどうみるか。

A：世界の核融合企業の多くが2030年を想定し、英米政府が2040年までを目標にしていることに鑑み、2030年代に最初の核融合発電が行われる公算は高いのではない。ただし、最初に発電が行われることと社会的な実装とはフェーズが違う。最初の発電は技術実証であり、経済合理性は度外視している。そのようなレベルでの発電であれば、現在の技術的な進展をみていくと、2030年代の実現が十分に可能だろう。そして、発電炉の実験結果を用いて2040年代には実用化段階

に移ることも十分可能と考える。

Q：商用化までの間、ベンチャー企業が核融合技術を資金化できるビジネスモデルとは。

A：多くのスタートアップ企業は、革新的アイデアの実証、製品化、顧客獲得まですべてを手がけるMoonshotモデルと呼ばれるスタイルをとる。この事業モデルのもとでは、黒字化に最低10～15年を要する。

他方で、最近では、実証の過程で出てきた有望な要素

技術をスピナウトさせ、そうしたスピナウトした技術から収益を得るスピナウトモデルの企業もある。たとえば、TAE Technologiesはライフサイエンスの会社をスピナウトさせ、そこから収入をあげている。Moonshotモデルの企業も、製品化までの過程でM&Aやライセンス販売などを視野に入れているかもしれない。いずれにしても、欧米では、Moonshotモデルのもとで10年、15年単位で自社で一貫してやっている企業が多く、そうした事業を対象に息の長い投資を行う投資家が現れている。

一方、日本では、当社のビジネスモデルはすでにご説明したとおりで、売上をあげ始めている。また、昨年、大阪大学などからのスピナウトで誕生した核融合スタートアップEX-Fusionは、レーザー核融合に特化しているが、産業応用の裾野の広いレーザー技術を活かし、発電に至る過程でさまざまな産業への応用で収益を得られるものと考えられる。さらに、昨年には、核融合科学研究所からのスピナウトでHelical Fusionというスタートアップも誕生した。

Q：核融合のEUタクソミーにおける位置付けは。

A：タクソミーの中に入るといふ話は承知していないが、議論していこうという動きはある。EUタクソミーに関する文書の中には、「展望」というセクションがあり、核融合を例示したうえで、技術的成熟度が低いものが、いかにマーケットに入っていくのか、その際にどのようにタクソミーに含めるべきかについて、議論を深めるべきと記述されており、今後議論がなされていくであろう。EUは、ITERの実験炉がフランスにあることもあって核融合技術には好意的である。個人的には、核融合は近いうちにEUタクソミーにおいて「サステナブル」な技術に含まれていくとの感触もっている。

Q：核融合の安全性のリスクをどうとらえるべきか。

A：安全性に関しては、核融合は自然には起きないという点が最も重要である。核分裂は自然界で自然に起こり、連鎖反応を起こすので、制御がつかないと反応が広がる危険がある。一方の核融合は、人類が科学技術を結集・努力して初めて起こるもので、外から人工的な制御を加えなければ生じない。そして、何かひと

つでも狂えば即座に停止し、持続させるのが非常に難しい反応である。このように、何かあった場合には反応が止まることが原理的に保証されているところが、核融合反応の重要な点である。

また、核融合の燃料サイクルにはウランやプルトニウムといったものは用いられず、生成されるヘリウムは無害であり、環境放出されても問題ない。万一、核融合炉が破壊され、中身が露出されても環境に放出される放射性物質は炉心にある数グラムの燃料のみで、その燃料も最も問題のあるトリチウムであっても、ごく少量であり、人体への健康被害がないことが科学的に証明されている。ちなみに、この放射性レベルは、現在の原子力の規制基準のもとでは、避難計画などを策定する必要のない値である。社会的受容性の問題はあるが、科学的な面での事故時のリスクは、放射性物質に関しては、原子力発電所とは比較にならないほど低い。

ただし、炉内機器は中性子により放射化するため、使用済の機器などについては、一時保管施設で10年、オンサイトの他の場所で20～50年の保管が必要になる（その後は深さ1～2mの地中に埋める）。

Q：ブランケットなどの炉内機器のリサイクルについて。

A：ブランケット内には、ベリリウムやリチウムなどの希少物質が増倍材、増殖材として存在している。これらはすべてトリチウム増殖後に取り出し、トリチウムを除いたものを戻してリサイクルする方向で議論が進んでいる。QSTは、これらの回収技術の開発にきわめて積極的に取り組んでおり、最近では、リチウムを溶解して取り出す技術をリチウムイオン電池に応用している。こうした部材の再利用については、日本がリードして技術開発を進めている状況である。

Q：日本のエネルギー政策の中で京都フェュージョニアリングに期待される役割は。

A：日ごろ、行政とは積極的にコミュニケーションをとっているが、最も期待されているのは、世界に対する窓口としての役割と産業化のハブとしての役割の2点とを感じる。前者については、核融合スタートアップとの接点をもつ国内組織が少ないなかで、ほぼすべてのスタートアップとの接点をもつ当社は、海外進出の際の情報収集（海外営業の斬り込み隊長）において大

きな役割を担えると考えている。後者については、将来の核融合のトレンドを予測し、業界を俯瞰できる強みを生かし、企業間のコラボレーションを通じて研究開発を進めようとしている最中である。岸田政権の政策であるスタートアップ振興の取り組みの一環として、新しい産業領域にエコシステム（ともに成長する企業群）を築く尖兵として黒子的、ファシリテーター的な役割を担えると考えている。

Q：ITERにロシアが参加していることが今後の事業進捗に与える影響は。

A：ITERプロジェクトでは、ロシアからダイバータ、磁場コイル、電源設備などを調達することになっている。プロジェクト実施主体のITER機構は国際機関であり、ロシアを拒否することはなく、ロシア側からの部品供給に遅れが生じない限りはプロジェクトの進捗にも大きな影響は考えにくい。ITER以外のプロジェクトにおいては、たとえば英国原子力公社のように一国が主導するプロジェクトでは、進捗に影響が出る可能性がある。

Q：重水素やリチウムを海水から事業化可能な形で取り出す技術はあるのか。

A：海水からの資源取り出し技術そのものはすでに存在するが、現在はまだコストが高い。したがって、短期的には海水からリチウムを取り出すようなことは考えにくく、生産コストが低い鉱山や塩湖からの取り出しが主になるだろう。一方、核融合はより長い時間、千年、二千年というスパンで必要となった場合に、それを賄うだけの埋蔵量が地球に存在することが確定していることが重要である。将来的にリサイクル、さらにその先には海水からの取り出しという具合に、コストが上がっていくに従い、実用可能な範囲が増えていくことが見込まれる。そのうえで、最終的にはどれだけ発電をしてもそれを満たせるだけの埋蔵量があるということが、サステナビリティの観点で重要と考えている。

Q：核融合技術の国際管理の必要について。

A：核融合に用いられる技術のうち、磁場閉じ込めは軍事転用が不可能だが、レーザー閉じ込めは軍事転用が一部可能である。ただし、転用可能であっても、重

水素やトリチウムは単体で原子爆弾を作れるわけではなく、あくまで従来のウランなどの中心にこれらを入れることで威力を増大させるものである。そのため、積極的な物質管理は不要と国際的に考えられている。一方、一部の濃縮リチウム（リチウム-6）は原子爆弾の製造にも用いられ、厳格な物質管理を必要とする。以上から核融合発電所においては、現在の原子力発電所で行われているような、査察を含めた厳重な管理は必要とならないだろうが、一部の物質を対象とした物質管理は必要となるだろうと考える。

Q：ITERや核融合ベンチャー企業は発電実証を事業のスコープに含めているか。発電実証までの時間軸をどのように考えているか。

A：多くのベンチャー企業が発電実証を目指す一方、発電システム開発を念頭においている企業はきわめて少数で、ほぼないといってよい。核融合ベンチャーやITERは、まずは科学的に最大の課題である核融合炉の実用化に注力している。そして、その先の発電はエンジニアリングであり、産業界に任せるとの役割分担が暗黙のうちにできている。

その欠けた部分を補うのが当社と、日本の産業界、エンジニアリングであり、さまざまな企業・組織の間でパートナーシップを組み、核融合ベンチャーに発電の部分を提供すべく、発電実証のプロジェクトを進めている。2030年代前半の発電に向けて、まだどの会社も発電システムやエンジニアリングを検討していない段階から、日本として、そこをしっかりと取りに行き、日本製の製品で世界の核融合発電所の炉心以外の分野でシェアが取れるよう、研究開発に勤しんでいる。

