

核融合研究の概要

— 核融合の意義・ITER計画等の現況 —

新妻 健一

(第三特別調査室)

1. はじめに
2. 核融合研究の概要
3. ITER計画の概要
4. 日本の核融合研究の基本的な文書等及びITER計画等に係る予算の概要
5. QST核融合エネルギー研究開発部門の概要
6. おわりに

1. はじめに

2018年7月、エネルギー政策基本法（平成14年法律第71号）に基づいて「エネルギー基本計画」が策定された。エネルギー基本計画は、これまで概ね3～4年ごとに改定されており、今般で第5次の計画となる。この計画は、2030年のエネルギーミックスの確実な実現へ向けた取組の更なる強化を行うとともに、新たなエネルギー選択として2050年のエネルギー転換・脱炭素化に向けた挑戦を掲げる等、内容は多岐にわたるが、本稿では、同計画の「第2章 2030年に向けた基本的な方針と政策対応」の「第3節 技術開発の推進」に位置付けられた「核融合エネルギーの実現」について、2019年1月18日に開催されたシンポジウム¹の理解の一助となることも期して、その概要を取りまとめたものである。

なお、核融合研究開発をめぐる筆者の所属する参議院第三特別調査室の動きの一端を紹介すると、2017年9月、原子力及び再生可能エネルギーの開発並びに鉱物資源政策等の調査のため参議院より議員団が派遣され²、国際事業であるITER計画³による核融合実験

¹ 第三特別調査室主催「核融合をめぐる最新状況」シンポジウム。なおシンポジウムの講演録等も合わせて参照願う。

² 第196回国会参議院資源エネルギーに関する調査会会議録第2号19頁（平30.2.14）

³ エネルギー問題と環境問題を根本的に解決するものと期待される核融合エネルギーの実現に向け、国際約束に基づき、核融合実験炉ITERの建設・運転を通じて、核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性を実証する計画。ITERとは、当初、国際熱核融合実験炉（International Thermonuclear Experimental

炉建設サイトをフランスで視察するとともにビゴITER機構⁴長を訪問し、当室の山内室長が同行した。また、当室調査員が、2017年12月、大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所(岐阜県)を訪問し、大型ヘリカル装置のLHDを視察、さらに2018年10月には、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構(QST⁵)核融合エネルギー研究開発部門(青森県及び茨城県)を訪問し、青森県に所在する六ヶ所核融合研究所でITER-BA(Broader Approach、幅広いアプローチ)活動⁶等の取組を聴取し、また茨城県に所在する那珂核融合研究所で核融合実験装置のJT-60SA建設現場等を視察する等の取組を行っている。

2. 核融合研究の概要

(1) 核融合研究とは

核融合による膨大なエネルギーの利用に向けて、これまで様々な原子核の融合パターンが研究され⁷、現在、ITERをはじめとする核融合研究の場では、軽くて最も反応が起こりやすい水素の同位体を用いた核融合が研究されている。具体的には、水素の同位体である「重水素(²H)(ドューテリウム、D)」と「三重水素(³H)(トリチウム、T)」との核融合(D-T反応といわれる)によって、 α 粒子(ヘリウム(He))と中性子が生成され、その結果、反応前の重水素と三重水素の重さの合計よりも、反応後のヘリウムと中性子の重さの合計の方が軽くなる、すなわち質量が減少するが、その際に生じる膨大なエネルギーを利用しようというものである⁸。

(2) 核融合研究の意義

核融合エネルギーの利点として、①核融合の燃料となる重水素と三重水素の原料となる「リチウム(Li)」は、海中に豊富にあり地域的な偏在も資源枯渇のおそれもなく、少量の燃料から膨大なエネルギーを取り出せること、②核融合反応は暴走しないため核分裂に比べると安全対策が容易なこと、③地球温暖化の原因となる二酸化炭素が発生しないこと、④原子炉と異なり高レベル放射性廃棄物の発生がないこと等が挙げられる⁹。つまり、核融合エネルギーは、資源量が豊富という供給安定性、連鎖反応が無いという安全性、温室効果ガスを排出しないという環境適合性等、優れた社会受容性を有していることから、人類の恒久的なエネルギー源の有力な候補として、早期の実用化に向けた研究の促進が求められている。

Reactor)の略語だったが、いまは略語ではなく固有名詞として扱われている。

(備考)本稿で記したURLの最終アクセス日はいずれも2019年5月7日。また年号は基本的に西暦を用いた。

⁴「イーター事業の共同による実施のためのイーター国際核融合エネルギー機構の設立に関する協定」により、国際法上の法人格を有する国際機関であるITER機構が設立され、同機構がITER計画を実施している。

⁵組織概要は後述5.に記した。

⁶ITER計画の補完・支援とともに、原型炉に必要な技術基盤を確立するための先進的研究開発の実施活動。

⁷関昌弘編『核融合炉工学概論』12~13頁(日刊工業新聞社、2001)

⁸この質量欠損のエネルギーへの転化は $E=mc^2$ で表される。

⁹文部科学省「核融合について」<http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/019.htm>

(3) 核融合炉開発の主要論点

核融合反応を起こすためには原子核同士を毎秒1,000km以上で衝突させる必要があり¹⁰、そのためには加熱装置を用いて1億度以上の高温プラズマ状態にし、原子核同士がぶつかりやすい環境を作り出す必要がある。また、核融合炉の実用化のためには核融合反応を維持する必要があり、そのためには1億度以上のプラズマ状態を保持し得る環境も必要である。さらに、核融合反応によって核融合炉内部は熱中性子で放射化し脆くなるため、核融合炉の効率的運用が阻害されないようにする必要がある¹¹。なお、生産されるエネルギーは、投入するエネルギーを上回る必要があるが、1億度を超える温度を維持するには大容量の電力を要することに留意する必要がある（Q値¹²の重要性）。

(4) 核融合炉開発に向けた3つの方法

核融合炉開発では、定常プラズマ状態の維持が最も重要かつ困難な課題で、これを解決するために様々な方法が検討されてきた。これは、重水素と三重水素の原子核を一定の高熱かつ高密度のプラズマ空間に長時間閉じ込める方式に係る研究で、主に、磁場閉じ込め方式のトカマク型¹³とヘリカル型、慣性閉じ込め方式のレーザー方式の3方式が研究されてきた。このうちトカマク型は最も研究開発が進展しており、既に科学的実現性の実証研究が終了し、後述するITERやJT-60SAが同型で建設されている。これ以外については、第5次計画で、「技術の多様性を確保する観点から、ヘリカル方式¹⁴・レーザー方式や革新的概念の研究を並行して推進する。」と位置付けられている。ここではヘリカル型とレーザー方式を紹介した後、これら3つの閉じ込め方式の概要を図表3に掲げ、トカマク型の紹介はシンポジウムに譲ることとする。

ア ヘリカル型

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置である「LHD (Large Helical Device)」は、日本独自のアイデアである「ヘリオトロン配位による閉じ込め磁場」を採用したものである。強い磁場の定常的な発生を可能とする「超伝導コイル」を用いたものとしては世界最大の超伝導プラズマ閉じ込め実験装置である（図表1）。磁場の容器（磁力線の籠）でプラズマを安定して閉じ込めるためには、粒子が逃げないように終端がなく無限に周回する磁力線を必要とする。この磁力線でドーナツ型の籠を作るためには、磁力線に「捻り」を加える必要があり、磁場コイル自身を捻ることで実現するものである。この方式は、プラズマ閉じ込めに必要となる磁場配位を、一対のらせん型の外部コイルのみで形成可能なことから定常運転能力が優れている。

¹⁰ プラスの電荷を帯びている原子核同士は、速度が遅いと反発力に打ち勝って接近することが困難なため。

¹¹ 頻繁な部品交換が必要になるとコストもかかる。

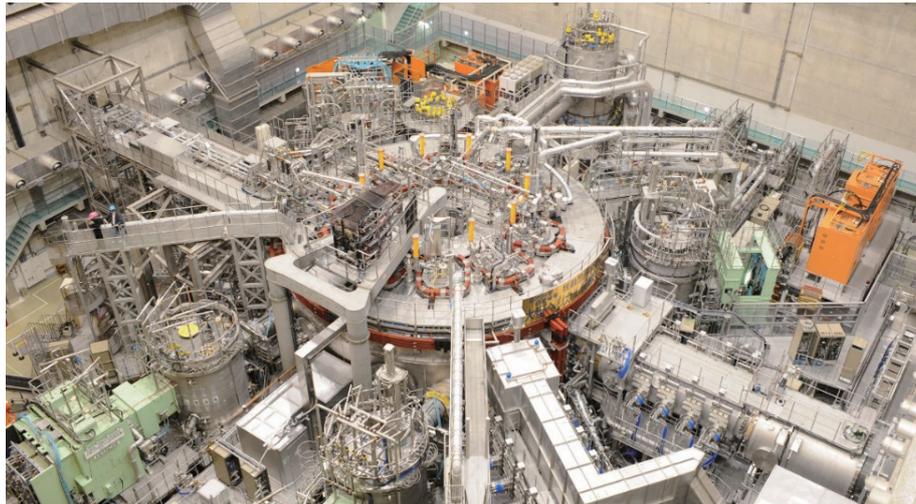
¹² プラズマに外部から注入した加熱入力エネルギーと核融合反応でプラズマから放出される出力エネルギーの比をいい、 $Q=1$ のときを臨界プラズマ条件と呼ぶ。なお、経済性の観点から実用炉においては $Q>30$ が必要と考えられている。（プラズマ・核融合学会広報委員会作成プラズマ・核融合に関する用語解説〈<http://www.jspf.or.jp/yogo2008/>〉）

¹³ トカマク (Tokamak) は、ток (電流)、камера (容器)、магнитный (磁気)、катушка (コイル) の頭字語。

¹⁴ ステラレータ方式ともいわれる。

このLHDは、プラズマ中を流れる電流を必要としない「ヘリカル・プラズマ」を用いることで、プラズマの性能向上とトカマク型も含めたトーラス（環状）プラズマに共通する物理の理解を目指した学術研究を推進することを目的としているため、LHD本体には、プラズマの温度や密度等、種々の物理量を測定するための各種計測器等が備え付けられている。

図表 1 核融合科学研究所のLHD



(出所) 核融合科学研究所

イ レーザー方式

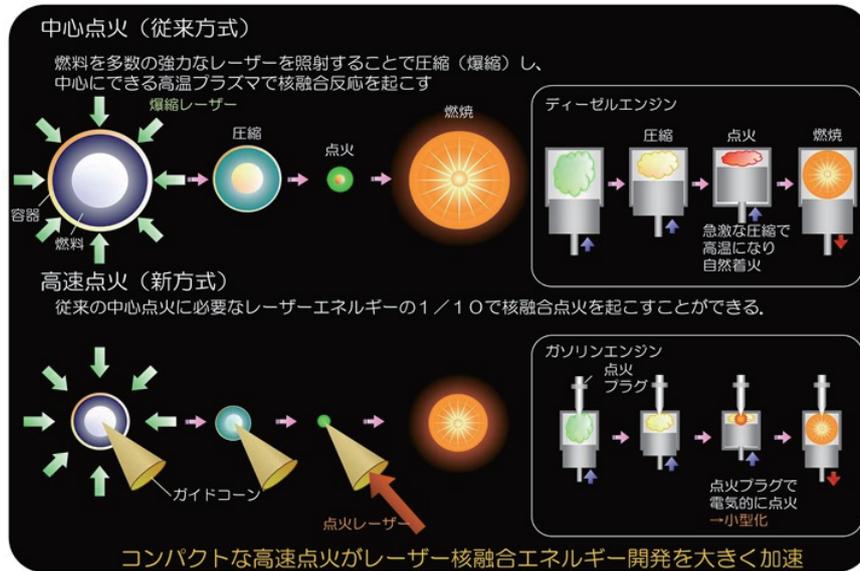
大阪大学¹⁵のレーザー核融合は、図表2のように、レーザーを用いて燃料を爆縮して中心にできる高温プラズマで核融合を実現しようとするものであり、燃料が最大に圧縮された瞬間に、別のレーザーで外部から燃料を追加加熱する「高速点火」方式による核融合が研究されている。

このレーザー方式による核融合実験装置は「激光XII号」と言われ、燃料を爆縮する激光XII号本体と外部からのレーザー装置である「LFEX (Laser for Fast Ignition Experiments)」から構成される。この「LFEX」は高速点火方式によるレーザー核融合研究 (FIREX: Fast Ignition Realization Experiment) を行うための、1ピコ (10^{-12}) 秒のパルス幅で3kJ以上の出力が可能な、世界最大級のペタワット (10^{15} W) レーザー装置である。

激光XII号は国内唯一かつ世界でも有数の大型レーザー実験装置であって、今日までに、1億度を超える高温プラズマの生成、レーザー爆縮による固体密度の600倍を超える高密度圧縮の達成などの成果を挙げている。

¹⁵ 大阪大学レーザー科学研究所

図表2 レーザー方式概念図



(出所) 大阪大学レーザー科学研究所

図表3 閉じ込め方式の概要



(出所) 文部科学省「核融合について」〈http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/019.htm〉

3. ITER計画の概要

(1) ITER協定及びBA活動協定

ITER計画とは、エネルギー問題と環境問題を根本的に解決するものと期待される核融合エネルギーの実現に向けて、国際熱核融合実験炉ITERの建設・運転を通じて、核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性を実証するための、7極（日本、欧州、米国、

ロシア、インド、中国、韓国)による国際事業である。

2001年11月にITER機構の設立等に関する政府間協議が開始された。ITERの建設サイトには日本とフランスが立候補し、2005年6月にITER機構の設立、ITERサイトのフランス・カダラッシュ(現在の呼称はサン・ポール・レ・デュランス)での整備、そして、日欧間協力の枠組みによるBA活動の日本での実施が決まり、2006年5月に協定案文が原則合意に至った(ブリュッセル共同宣言)。同年11月21日に「イーター事業の共同による実施のためのイーター国際核融合エネルギー機構の設立に関する協定」がパリで署名され、翌年10月24日に発効した。ITER計画が長期的かつ大規模な国際的な協力事業であることから、同事業の実施には国際機関の設立が必要であることに加え、国際機関及びその職員等が確実にその任務を遂行するための特権及び免除の付与が不可欠であるとして、「イーター事業の共同による実施のためのイーター国際核融合エネルギー機構の特権及び免除に関する協定」も同時に署名されている。

また、核融合エネルギーの早期実現に向けて行う活動として、ITER-BA活動(幅広いアプローチ活動(BA(Broader Approach)活動))が日欧間協力の枠組みで日本を拠点として実施されることとなり、2007年2月に「核融合エネルギーの研究分野におけるより広範な取組を通じた活動の共同による実施に関する日本国政府と欧州原子力共同体との間の協定」が署名され、同年6月1日に発効した。ITER-BA活動に要すると見積もられた総額約920億円(2005年5月時点換算)に上る費用は、日本と欧州原子力共同体(ユーラトム)とで半額ずつ分担する。

(2) ITERの目的及び進捗状況

ITERの目的は、プラズマの自己点火条件¹⁶への到達であり、現在建設中のITERは2025年に運転開始、2035年に核融合実験(出力50万kW。但し発電実証試験はしない)の予定である。図表4「核融合実験炉の目標」は、縦軸はプラズマの粒子密度と閉じ込め特性時間の積、横軸はプラズマ温度であり、図中右上のカーブが核融合炉に必要な値であって、現在、JT-60、JET(欧州)、TFTR(米国)のいわゆる三大トカマクが最終目標より1歩手前のレベルに到達し、ITERで自己点火条件に到達させようとしている。

ITERの7極がITERのパーツを分担して製作し(図表5)、それらをITERサイトに持ち込み組み立てられている。なお、日本のITER建設活動については、超伝導中心ソレノイドコイル用の導体が2017年度に製作されて組立てを担当する米国に輸送され、超伝導トロイダル磁場コイル、ダイバータ、遠隔保守機器、加熱装置、計測装置、トリチウムプラントといった諸パーツの製作が進められている。

(3) ITER建設期の事業コスト及び各極の資金分担割合、ITER機構職員の現況

ITER計画の事業コストは、2006年のブリュッセル共同宣言で3,577.7kIUA¹⁷と合意

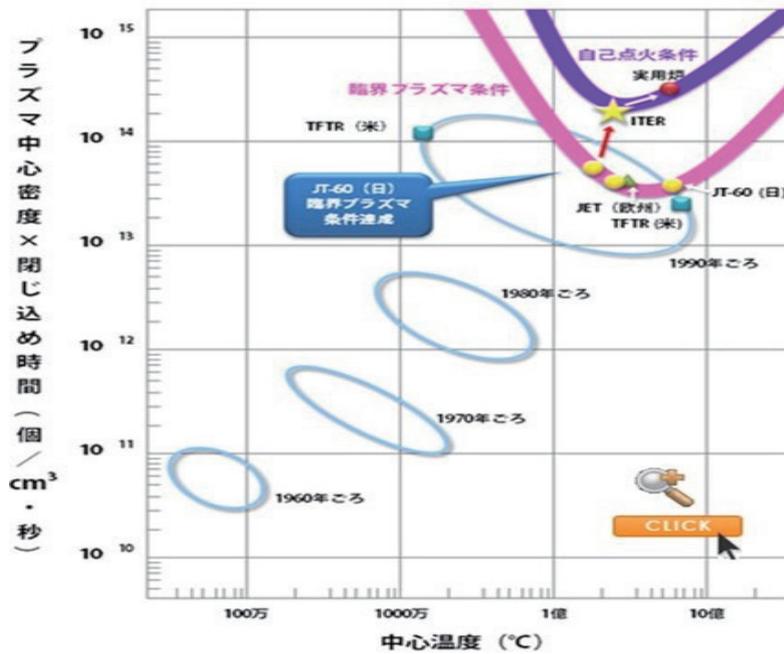
¹⁶ 高周波加熱や中性粒子加熱(高エネルギーのビームをプラズマに入射することによる加熱)などの外部からの加熱をせずに、核融合反応により発生する熱でプラズマが加熱されてプラズマ温度を維持できる条件。

¹⁷ ITER会計単位。なお、2017年6月の建設費上限7,746.2kIUAとするOPC更新案は、約16,253億円に

された。その後、設計や全体スケジュールの見直しを受け、2010年7月のITER臨時理事会で上限値を4,700kIUAとする全体事業コスト（OPC）を承認した。その後もコストは見直しを迫られ、2016年11月には7,813.1kIUA、2017年6月には7,746.2kIUAとするOPCの更新案が暫定承認された（図表6）。OPC上昇の主な要因には、建設費や管理運営費の上昇が挙げられよう。このコストは、参加7極があらかじめ決められた分担割合（図表7）に基づいて負担する。

ITER機構の専門職員数は2019年1月末時点で594人、支援職員数276人、合計870人（核融合の専門家に加え、一般機械、電気、プラント工学等の専門技術者や事務職を採用）となっている（図表8）。このうち日本からの人材は、専門職26人と支援職員2人の計28人と7極中で最低との現状にある。

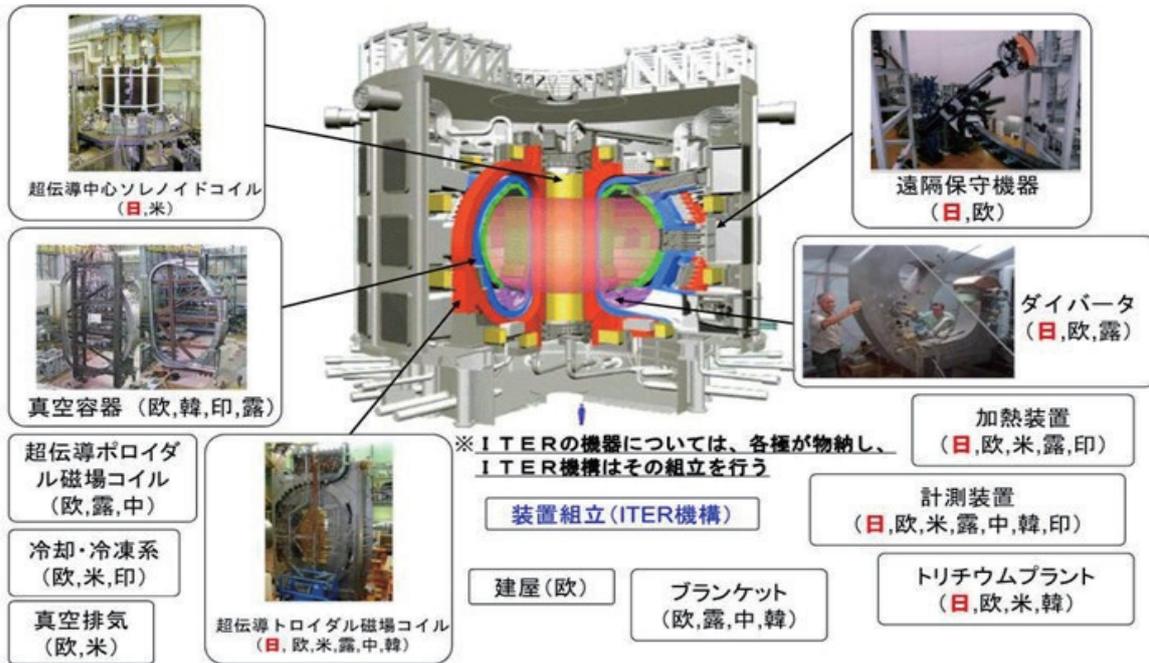
図表4 核融合実験炉の目標



(出所) QSTホームページ「ITERの位置付けとは？」〈http://www.fusion.qst.go.jp/ITER/iter/page1_3.html〉

相当（1kIUA=1,000IUA、2017年のIUAとユーロの交換率は1,693.50ユーロ（IUAはITER Unit of Account、ユーロの交換率は「ITER ORGANIZATION 2017 FINANCIAL REPORT」に拠る）、1ユーロ=123.9円（2019.5.7））。

図表5 参加各極のパーツ製造分担概要



(出所) Q S T六ヶ所核融合研究所資料

図表6 事業コスト

	2006年ブリュッセル共同宣言	2017年O P C暫定承認
建設段階 (合計)	3,577.7kIUA	7,746.2kIUA
1. 直接投資	3,020.7kIUA	4,853.8kIUA
2. ITER機構の職員、基盤施設等の管理運営費	477.0kIUA	2,291.2kIUA
3. 建設中の研究開発	80.0kIUA	77.1kIUA
4. 予備基金	(357.7kIUA (印加盟分))	524.1kIUA

(出所) Q S T六ヶ所核融合研究所資料

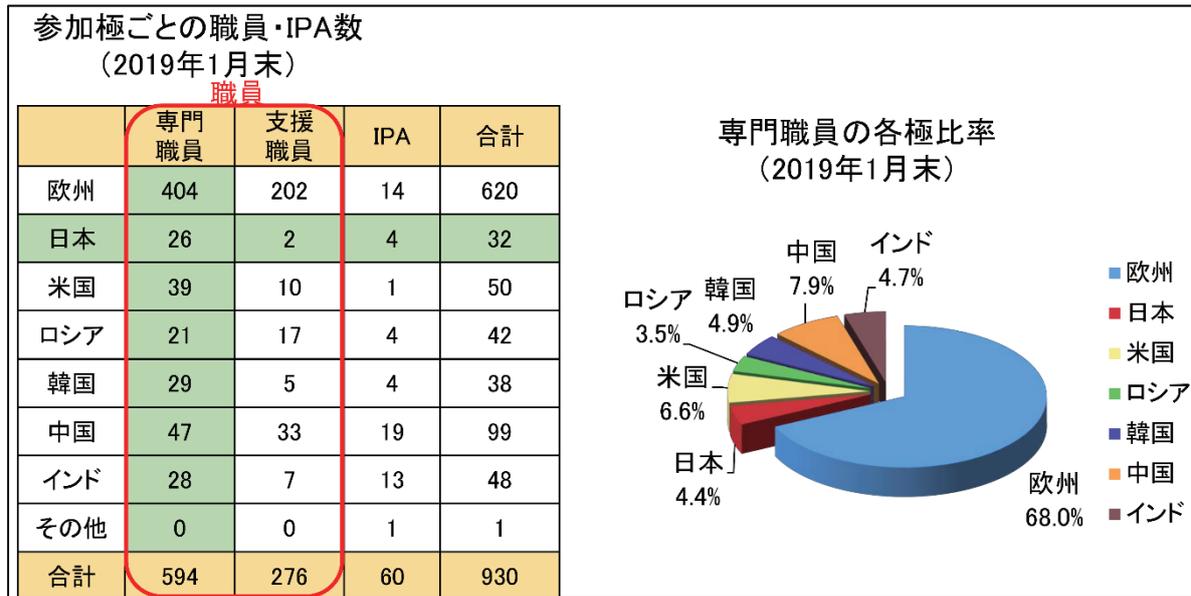
図表7 各極の資金分担割合

	欧州	日本	米国	ロシア	中国	韓国	インド
建設期	45.46%	9.09%	9.09%	9.09%	9.09%	9.09%	9.09%
運転期	34%	13%	13%	10%	10%	10%	10%

(a) 建設期は建設費上限 7,746.2kIUA、(b) 運転期は運転費 188.0kIUA、除染費 281 百万ユーロ (総額)、(c) 廃止期は廃止費が 530 百万ユーロ (総額) なお、運転期に廃止措置基金を積み上げている。

(出所) Q S T六ヶ所核融合研究所資料より筆者作成

図表8 ITER機構の職員数



(出所) 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構資料

(4) ITER-BA活動

ア ITER-BA活動の目的

ITER-BA活動は、核融合エネルギーの早期実現のために、ITER計画の効率的・効果的な研究開発を支援・補完するとともに、将来の核融合原型炉実現のために必要となる炉工学研究やプラズマ物理研究等の先進的核融合研究開発を行うものである。

イ ITER-BA活動の概要

日本は、BA活動の拠点として、2020年の現行BA完遂に向けて、主に下記①～③の事業を実施しており、現在、日欧は、これまでの成果をベースに、2020年からの「BAフェーズ2(5年間の予定)」を協議している。なお、①及び②は六ヶ所核融合研究所で、③は那珂核融合研究所で実施されている。

①国際核融合エネルギー研究センター(IFERC¹⁸)

IFERCは、ITER事業への貢献及び将来の動力用原型炉(DEMO、DEMONstration Power Station)の早期実現の促進を目的として、六ヶ所核融合研究所に設置されている。IFERCでは、原型炉の基本設計に向けた研究が行われ、構造材料や機能材料等の研究開発が進められている。また、スーパーコンピュータに係る情報交換や遠隔実験センターの機能実証試験が実施されており、2018年11月28日には欧州のトカマク装置WESTとのプラズマ遠隔実験が実施され成功を収めた。

②IFMIF/EVEDA¹⁹活動(材料照射施設の工学実証・工学設計活動)

IFMIF/EVEDA活動は、IFMIFの十分に統合された工学設計並びにIF

¹⁸ International Fusion Energy Research Center

¹⁹ International Fusion Materials Irradiation Facility/Engineering Validation and Engineering Design Activities

M I F の建設、運転、利用及び廃止に係る将来の決定に必要な全ての資料を作成し、I F M I F を構成する各設備の継続的かつ安定的な運転を実証するための E V E D A 活動を実施するものである。

現在、I F M I F 工学設計、リチウムターゲット、試験施設の実証活動、原型加速器の実証試験が行われ、2020 年 3 月には 9 MeV (メガ電子ボルト) という大規模の重陽子加速に係る実証実験を行う予定である。なお 2018 年 6 月 13 日には、世界最長の 9.8 m 高周波四重極線形加速器による初ビーム加速に成功し²⁰、この様子はインターネット配信で 1 万 2 千人以上が視聴した。

③ J T - 6 0 S A 計画 (サテライト・トカマク計画及びリサーチプラン) の概要

J T - 6 0 S A 計画は、B A 活動として日欧共同で実施されている「サテライト・トカマク計画²¹」と、日本の「トカマク国内重点化装置計画²²」との合同計画である。本計画は I T E R 運転シナリオの最適化等の I T E R 支援研究だけでなく、高圧力定常プラズマの運転・制御手法の開発等の I T E R で行うことの困難な研究の実施、また、D E M O の設計の主導、核融合エネルギーの早期実現を図るための研究、さらに、核融合を主導する人材の育成等、様々な活用が期待されている。これまで日本では、臨界プラズマ試験装置 J T - 6 0 を活用して、1985 年から 2008 年の間に、臨界プラズマ条件の達成、エネルギー増倍率 (Q 値) 1.25 の達成、さらに世界最高のイオン温度 (5 億 2 千度)、世界最高の電子温度 (3 億度) といった成果を挙げた。

J T - 6 0 S A は、2012 年 10 月に解体を完遂した試験装置 J T - 6 0 の既存施設 (建屋、中性粒子ビーム入射加熱装置、電源制御装置等) の多くを再活用するとともに、既存の真空容器及び磁場コイルを新たに製造した真空容器及び超伝導コイルに置き換える等、那珂核融合研究所の敷地内での整備が進んでおり、2020 年 3 月の完成、そして 2020 年 9 月の運転開始を目指した取組が続いている (図表 9)。

なお、日欧の研究者は J T - 6 0 S A の完成後の研究内容や方法等について幅広く議論し、2018 年 9 月に「J T - 6 0 S A リサーチプラン²³」を策定した。これには日本の 18 機関 174 名と欧州 14 か国の 33 研究機関 261 名の合計 435 名の若手研究者を中心に、「運転領域開発、MHD 安定性と制御、輸送と閉じ込め、高エネルギー粒子挙動、ペダスタル及び周辺プラズマ、ダイバータ・プラズマ壁相互作用、核融合炉工学そして理論モデル・シミュレーションコード」という 8 つの研究領域ごとに取りまとめられている。

同プランは、J T - 6 0 S A を「I T E R を先導し原型炉へ向かう先駆輪」として、I T E R 及び原型炉のための研究課題を綿密に分析し、その全ての解決に十分な貢献ができるよう、装置設計を確定するとともに研究計画を策定したものである。原型炉目標を「領域」として捉えて、運転バウンダリの拡張・高い総合性能の獲得・プラズマ制御

²⁰ 世界初の 8 系統高周波を用いた R F Q (Radio Frequency Quadrupole) ビーム加速。これにより核融合原型炉に向けた材料検証に必要な大強度中性子源用加速器の開発が着実に進展するとみられている。

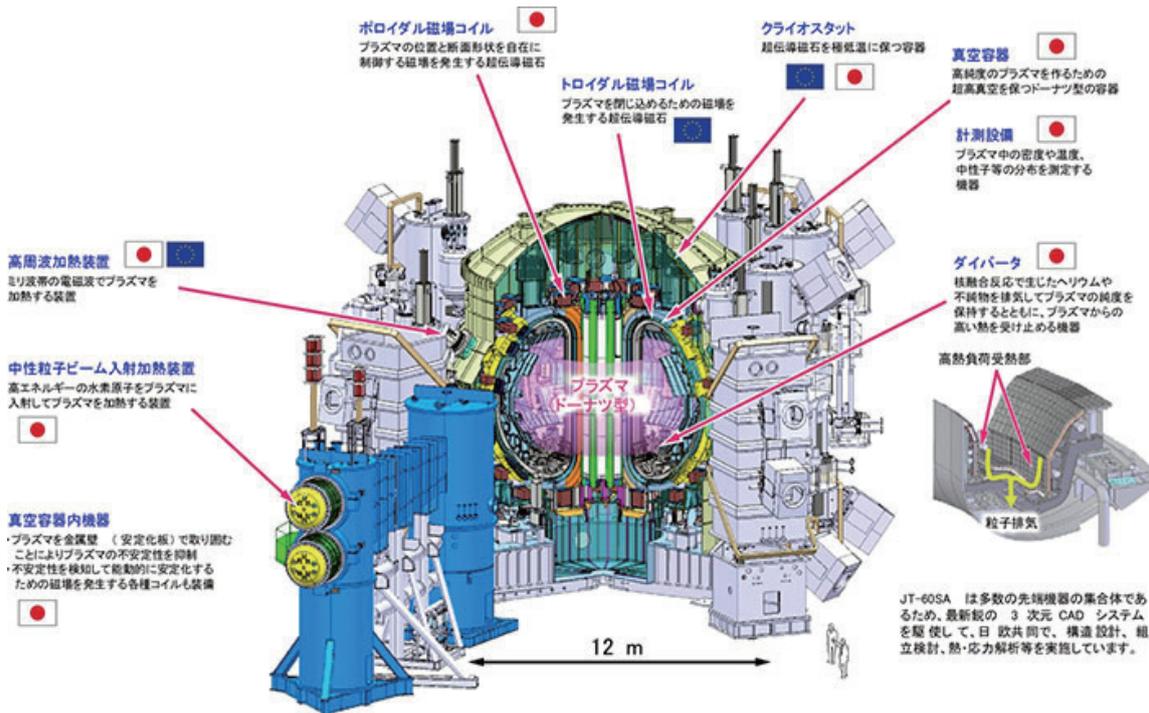
²¹ I T E R を中核として諸外国で I T E R 実施に資するトカマク型装置による研究をいう。

²² 文部科学省科学技術・学術審議会学術分科会・基本問題特別委員会核融合研究ワーキンググループ報告「今後の我が国の核融合研究の在り方について (2003 年 1 月 8 日答申)」

²³ J T - 6 0 S A リサーチプラン<http://www-jt60.naka.qst.go.jp/jt60/html/res_plan_jt60sa.html>参照

性の実証を進めることで、原型炉に求められる現実的な回答を得る計画としている。今後は、ITERの研究内容の変化に対応したJT-60SAの有効活用が重要との認識の下、ITERの運転信頼性を高めるとともに、Q=10の早期達成や達成確度の向上に向けたITER支援研究に注力するとともに、ITERでは比重が下がる「原型炉に向けた定常化研究」への貢献増大等を考慮していくこととしている。

図表9 JT-60SA（建設中）の概要



(出所) Q S T ホームページ「JT-60SA計画とは」<http://www-jt60.naka.qst.go.jp/jt60/html/souti_jt60sa.html>

4. 日本の核融合研究の基本的な文書等及びITER計画等に係る予算の概要

(1) 核融合研究に係る基本的な文書

日本の核融合研究は、現在、「第三段階核融合研究開発基本計画（平成4年6月9日原子力委員会決定）」を大きな方針として進められ、その後、この計画策定以降の核融合研究をめぐる状況変化を踏まえて「今後の核融合研究開発の推進方策について（平成17年10月26日原子力委員会核融合専門部会報告書）」が策定された。さらに、2017年には、核融合の実用化に向けた文書として「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」（平成29年12月18日文科省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会核融合科学技術委員会）が、その翌年には「原型炉研究開発ロードマップ（一次まとめ）」（平成30年7月24日文科省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会核融合科学技術委員会）が策定され、これまでの研究開発段階から、実用化を視野に入れた方向性が示されている。なお、これらの基本的な文書の概要についてはシンポジウムに譲る。

また、核融合研究は、これまでの「エネルギー基本計画」に常に明記されており、第5

次計画では「2030年に向けた基本的な方針と政策対応」に位置付けられている(図表10)。

このように、日本における核融合研究は、これらの基本的な文書に依拠して、QST核融合エネルギー研究開発部門を中心に、国内研究機関と連携して取り組まれている。

図表10 エネルギー基本計画における核融合研究の位置付け

基本計画 (策定年)	核融合研究に係る基本計画中の記載位置	核融合研究を含む記述
第1次 2003年	第3章 エネルギーの需給に関する施策を長期的、総合的かつ計画的に推進するために重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及びその施策 第2節 重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及びその施策	ITER計画を始めとする核融合、(中略)等、実用化に至るまでに長期的な開発努力と技術の段階的実証を要するものの、将来のエネルギー供給源の選択肢となる可能性を有している研究開発課題については、技術の成熟度やエネルギー技術上の重要政策との関係等を総合的に考慮しつつ、長期的視野に立ち必要な取組や検討を進める。
第2次 2007年	第2章 エネルギーの需給に関し、長期的、総合的かつ計画的に講ずべき施策 第3節 多様なエネルギーの開発、導入及び利用 第3章 エネルギーの需給に関する施策を長期的、総合的かつ計画的に推進するために重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及びその施策 第2節 重点的に研究開発のための施策を講ずべきエネルギーに関する技術及びその施策	ITER計画やこれに連携した幅広いアプローチを始めとする核融合エネルギー技術、(中略)など先進的エネルギーに関する研究開発についても、長期的視点から着実に推進する。 ITER計画やこれに連携した幅広いアプローチを始めとする核融合について着実に推進するほか、(中略)など、実用化に至るまでに長期的な開発努力と技術の段階的実証を要するものの、将来のエネルギー供給源の選択肢となる可能性を有している研究開発課題については、技術の成熟度やエネルギー技術上の重要政策との関係等を総合的に考慮しつつ、長期的視野に立ち必要な取組や検討を進める
第3次 2010年	第3章 目標実現のための取組 第5節 革新的なエネルギー技術の開発・普及拡大	長期的視野にたつて、ITER計画やこれに連携した幅広いアプローチ活動を始めとする核融合について着実に推進する。
第4次 2014年	第4章 戦略的な技術開発の推進 2. 取り組むべき技術課題	国際協力で進められているITER計画や幅広いアプローチ活動を始めとする核融合を長期的視野にたつて着実に推進するとともに、(中略)などの将来の革新的なエネルギーに関する中長期的な技術開発については、これらのエネルギー供給源としての位置付けや経済合理性等を総合的かつ不断に評価しつつ、技術開発を含めて必要な取組を行う。
第5次 2018年	第2章 2030年に向けた基本的な方針と政策対応 第3節 技術開発の推進	核融合エネルギーの実現に向け、国際協力で進められているトカマク方式のITER計画や幅広いアプローチ活動については、サイトでの建設や機器の製作が進展しており、引き続き、長期的視野に立って着実に推進するとともに、技術の多様性を確保する観点から、ヘリカル方式・レーザー方式や革新的概念の研究を並行して推進する。

(出所) エネルギー基本計画各版

(2) ITER計画等の実施に係る令和元年度予算

令和元年度予算では、ITER計画等の実施について、「社会とともに創り進める科学技術イノベーション政策の推進」による「クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現」と位置付け、ITER計画に145億円、BA活動等に73億円、合計218億円を措置している(図表11)。なお、ITER計画等の実施に係る執行額等を参考までに掲げる(図表12)。

図表11 ITER計画等の実施に係る予算概要(令和元年度)

ITER(国際熱核融合実験炉)計画等の実施	21,839百万円
(a) ITER計画	
・ITER機構の活動(分担金)	4,783百万円
・QSTにおけるITER機器の製作や試験、人員派遣等(補助金)	9,764百万円
(b) BA活動等	
・QSTにおけるITER計画の補完・支援及び核融合原型炉に必要な技術基盤の確立に向けた先進的研究開発等(補助金)	
・先進超伝導トカマク装置(JT-60SA)の建設と利用	4,238百万円
・核融合中性子源用原型加速器の建設と実証	536百万円
・国際核融合エネルギー研究センター事業等	2,518百万円

(出所)「2019年度科学技術関係予算案の概要(2018年12月、文部科学省科学技術・学術政策局研究振興局研究開発局)」より筆者作成

図表12 ITER計画等の実施に係る執行額等の推移(参考)

(単位:百万円)

年度	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26
執行額	1,401	5,382	9,972	11,758	12,924	11,282	23,100	34,141	27,070

年度	H27	H28	H29	H30	R1
執行額	22,474	23,263	22,529	21,939	21,839

(出所) H18からH27は「ITER計画(建設段階)等の推進」の中間評価結果(以下「中間評価結果」という。)(文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会(平成29年4月策定))より、H28以降は当初予算額を掲げた。

5. QST²⁴核融合エネルギー研究開発部門の概要

(1) QST概要

QSTは、量子に関する科学技術の水準の向上を図るため、国立研究開発法人放射線医学総合研究所法の一部を改正する法律(平成27年法律第51号)に基づき、国立研究開発法人放射線医学総合研究所と国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の量子ビーム部門の一部及び核融合研究部門が統合され2016年4月1日に発足した。そして、ITER計画及びBA活動を中心とした核融合研究を行う核融合エネルギー研究開発部門のほか、重粒

²⁴ 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構(再掲)

子線等によるがんの治療や放射線の人体への影響や医学利用、放射線防護や被ばく医療などの研究、量子ビームによる物質・材料科学研究、生命科学等の先端研究、高強度レーザーなどを利用した光量子科学研究等を行う諸部門により構成されている。

(2) 核融合エネルギー研究開発部門の概要

核融合エネルギー研究開発部門は、茨城県に所在する那珂核融合研究所と、青森県に所在する六ヶ所核融合研究所を拠点に、核融合によるエネルギー利用の実現に向けた研究開発を行っている。QSTは、ITER計画に係る国内実施機関であって、各加盟極が分担して製作する機器のうち、日本が担当する機器等の開発・製作を進めている。また、ITER機構への職員派遣、ITER計画の補完・支援とともに、ITER計画後の「核融合原型炉」に必要な技術基盤を確立するための先進的研究開発のためのITER-BA活動を行っている。このうち、ITERと同じ型の核融合実験装置である「JT-60SA」を建設して実験を行う「サテライト・トカマク計画」は主に那珂核融合研究所で取り生まれ、「国際核融合エネルギー研究センター事業（IFERC）」及び「材料照射施設の工学実証・工学設計活動（IFMIF/EVEDA）」は主に六ヶ所核融合研究所で取りまわっている。両研究所は、JT-60SAを活用した研究開発やBA活動の成果を活用・拡充して進める研究開発への展開、そして「核融合原型炉」への道を拓く核融合研究の国際的中核拠点となっている。

(3) 核融合研究開発部門の他の研究機関との連携、民間企業の参画

核融合研究は、QSTだけでなくオールジャパン体制で取り組まれている。例えば、核融合実験施設を有する自然科学研究機構核融合科学研究所（NIFS）とは、環状型磁場閉じ込め（ヘリカル型）の総合的理解を中心に、大阪大学とは、慣性閉じ込め方式（レーザー方式）の総合的理解等を中心に、共同研究・実験・施設利用等に取り組んでいる。また、原子力研究開発機構（JAEA）とは、2016年の組織改編で別組織となる以前と同様、連携してトリチウム、中性子利用、放射性廃棄物管理・処理、ホットラボそして加速器等、放射能をめぐる諸研究が行われている。また、高エネルギー加速器研究機構（KEK）とは加速器や中性子利用を、宇宙航空研究開発機構（JAXA）とは放射線影響や効果的な広報活動の在り方について共同研究等を、地球環境産業技術研究機構（RITE）とは温暖化抑制シナリオにおける核融合の可能性に係る研究を、石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）とはベリリウム資源に関する情報交換を、そして物質・材料研究機構（NIMS）とは超伝導技術等、様々な連携例がある。

核融合研究には、多くの民間企業が参画していることも重要である。QSTのITER計画に関するホームページの「ITER調達機器の設計・製作～連携企業の紹介～」とのコンテンツには10の日本企業の取組が紹介されており²⁵、当室が主催したシンポジウムにおいてもITERやJT-60SAの主要構成部品を製造する多くの企業名が紹介された。

²⁵ QSTホームページ<http://www.fusion.qst.go.jp/ITER/iter/page1_40.html>参照

核融合研究は、必要な諸設備が巨大であり、また求められる品質水準も非常に高く、さらに、様々な課題を解決して対応する必要があることから、民間企業の優れた研究開発力、技術力なくして成り立たない。

(4) 最近の主な核融合関連研究

ア リチウム、ベリリウム確保技術に係る研究

核融合の燃料に用いられるトリチウムは、宇宙から降り注ぐ放射線で自然界につくられるものの多くは存在しないため、海水中に豊富に賦存するリチウムで生成することとしている。そのため、海水からリチウムを効率的に取り出すための研究開発が行われており、リチウムを海水からセラミックス製の膜を用いて回収する方法や使用済みリチウムイオン電池から回収する方法等を研究している。

核融合炉におけるトリチウムの生成は、核融合炉内のプラズマを取り囲むように設置されるブランケット装置で行われる。これは、核融合炉で発生した中性子をベリリウムに充填された中性子増材(ベリリウム(Be))に当てて中性子の量を増やし、増量された中性子を同じくブランケットに充填されたリチウムと反応させることでトリチウムを生産する。そのため、ベリリウムの確保に係る研究開発についても進めている。

イ ブランケット研究

ブランケットは、①燃料となるトリチウムの生成回収(増殖機能)、②中性子の運動エネルギーを熱エネルギーとして回収(発電に適する高温除熱機能)、③放射線に対する周辺機器・生体の保護(遮蔽機能)という3つの重要な機能を果たしている。特に、核融合発電炉の実現に向けて中核的な役割を果たすものであり、重点的な研究開発が進められている。また、核融合研究開発は、ITER建設等、そのほとんどが国際的な協働の取組として行われるが、ブランケットは、中性子の運動エネルギーを熱エネルギーとして回収する機器であり、発電に直結する技術であるため、ITER参加各極の競争分野とされており、日本が世界一の性能を発揮できるよう研究開発が進められている。

ウ 材料工学研究

プラズマに直接対向する壁(ブランケットやプラズマ中の不純物を取り除くダイバータ等から構成される壁。First Wallと呼ばれる。)は、磁場によるプラズマ閉じ込めから漏れた高温プラズマや、核融合反応により生成された中性子によって、厳しい熱・粒子負荷を受けて放射化する。こうした環境においてもプラズマ自体に悪影響を及ぼさずに炉構造の健全性を維持する必要があり、そのための材料工学研究に取り組んでいる。

さらに、材料工学研究の研究資産を最大限に活用することで、核融合炉の材料・機器試験のためだけでなく、基礎研究、産業医療そしてエネルギー応用までを網羅する、汎用性の高い照射場の提供を実現することによって新たな中性子研究・産業への展開を図ろうとするA-FNS²⁶の実現に向けた研究開発に取り組んでいる。

²⁶ Advanced Fusion Neutron Source の略で核融合用中性子源の国内計画

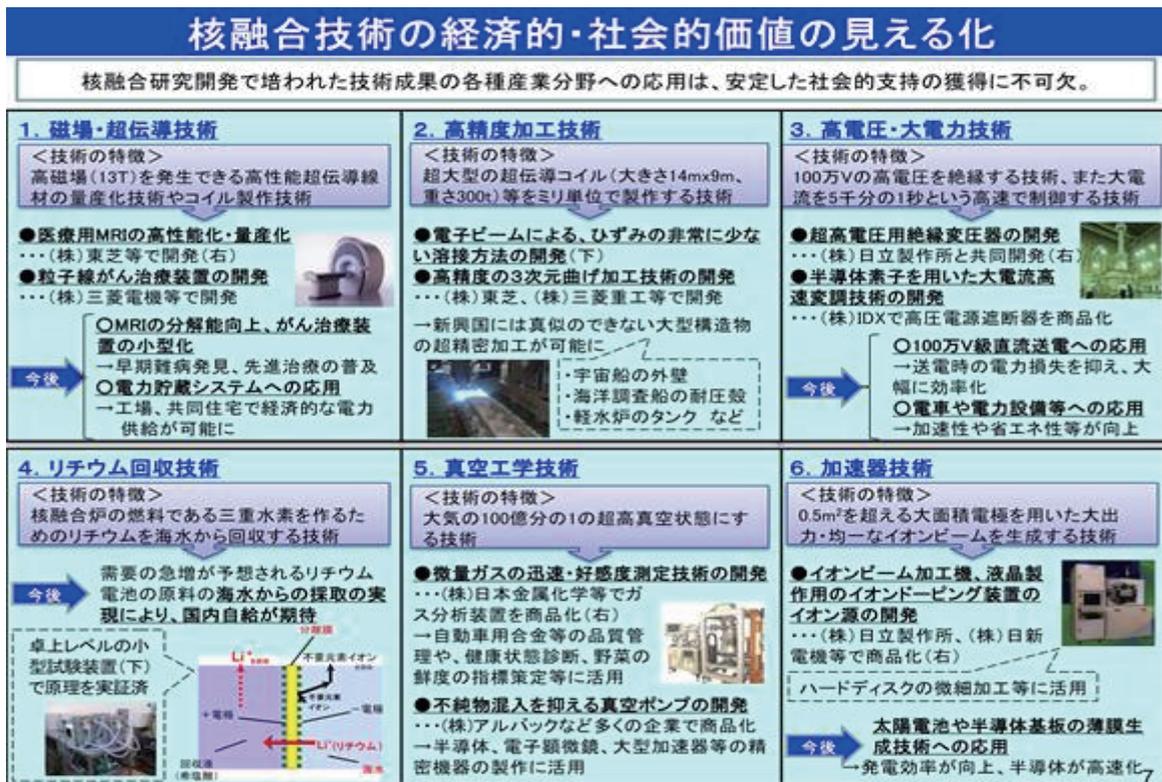
(5) 核融合研究の有用性、波及効果

核融合研究は、物理学、電磁力学、熱力学、機械工学、電気・電子工学、材料工学、伝熱流動・熱工学、核工学、低温工学、化学工学、制御工学、計測工学、真空工学など、極めて広い学問分野に基礎をおき、核融合装置はこうした先端技術の集積によって構成されている。そして、その成果がもたらす波及効果は、磁場・超伝導技術、高精度加工技術、高電圧・大電流技術、リチウム回収技術、真空工学技術、加速器技術など、様々な分野で社会に還元されるとともに、物理、宇宙、材料、医学、通信、環境など、他の分野における先端技術開発や基礎科学研究の発展にも多大なる貢献を果たしている。

核融合技術の社会還元の例を図表 13 に示すが、この他にも、例えば、核融合の超伝導コイルに係る研究開発はリニアモーターカーの実用化に、電源に係る研究開発は東西で異なる日本の電気の周波数（基幹系統 50Hz・60Hz）変換設備や北海道と本州との連系設備等に活かされている²⁷。また、A-FNS による核融合中性子の実現に向けた研究は、医療用ラジオアイソトープ（医療用 R I）²⁸の製造やシリコンからリンに変える半導体製造、中性子を用いた内部構造調査といった多くの分野への活用が期待されている。

核融合研究の有用性を示す例として、周波数変換設備及び医療用 R I を取り上げる。

図表 13 核融合技術の経済的・社会的価値の見える化



(出所)「原型炉開発に向けた行政からの問題提起(平成26年4月28日 文部科学省研究開発局研究開発戦略官(核融合・原子力国際協力担当))」

²⁷ 日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門「平成26年度研究開発・評価報告書評価課題「核融合研究開発」(事後評価)」

²⁸ 放射線を放出する放射性同位体の医薬品

ア 周波数変換設備

日本の電気の周波数は、歴史的経緯から、静岡県富士川近辺を境として東日本が50Hz、西日本が60Hzと異なっており、東西間で電気を融通するには周波数を変換する必要がある。これを行うため、静岡県に2か所(佐久間周波数変換所30万kW(電源開発)、東清水変電所30万kW(中部電力))、長野県に1か所(新信濃変電所60万kW、東京電力)の周波数変換設備が設けられており、核融合研究で培われた技術が活用されている。

イ 医療用R I

腫瘍、梗塞等、骨や脳・心筋の血流状況等の核医学診断に用いられる医療用R Iとして、モリブデン99 (^{99}Mo)²⁹の娘核であるテクネチウム-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)が世界で最も多用され³⁰、日本では核医学診断が年間約90万件行われている³¹。現在、医療用R Iは全量が輸入されているが、 ^{99}Mo は短半減期であるため備蓄ができないことから安定供給体制の確立が極めて重要となっている。加速器を用いて荷電粒子を利用した他のR Iの生産が行われているものの、中性子を利用した ^{99}Mo 等は、現在も海外の原子炉での生産に委ねざるを得ない実情にある。一方、がん治療に用いられる医療用R Iは半減期が数日程度のもものが望まれる。日本で利用中の治療用R Iは ^{89}Sr 、 ^{90}Y 、 ^{131}I 、 ^{223}Ra ³²に過ぎないことから一層の開発が急務となっており³³、核融合中性子源を用いたR I製造が実用化すれば、医療用R Iの安定供給に資するものと期待されている。

6. おわりに

核融合研究は、ニュートリノ研究で有名な東京大学のスーパーカミオカンデやJAXAのはやぶさ2プロジェクトのような他の大型研究に比べると、人口に膾炙しているとはいえない難い実情にあると言えよう。ITERもJT-60SAも建設の最終段階に入りつつあり、核融合研究は実用化に向けた重要な局面を迎えつつあるが、例えば、新聞等で取り上げられることもほとんどない。これは、おそらく核融合発電が未実現なことも一因だろう。この点、2017年4月に公表された「中間評価結果」では、「大きな予算を必要とし、長期間にわたる事業であることから、核融合研究開発の意義や重要性、エネルギー政策の中での位置づけ等について国民との対話を図り、核融合エネルギーのメリット、デメリットを早期の段階から国民と共有する必要がある。」と指摘している。

核融合研究は、その実現が期待されてから既に久しく、今後もしばらくの間は実用化を待たなければならない状況が続く。そのため、国民の支持を得て核融合研究を進めて行くためには、実用化への道のり等、核融合研究の進捗状況の周知を図る取組が重要であって、核融合の有用性や安全性、原子炉との相違等、核融合に係るメリット・デメリットを分か

²⁹ モリブデン(元素記号Mo、原子番号42)の放射性同位体で半減期は66時間で、核医学診断で用いられるテクネチウム-99m(元素記号Tc、原子番号43)となる(半減期6時間)。このように半減期が短いことにより放射線の人体への影響も短期間で済むといった利点がある。

³⁰ 原子力委員会(第47回)「世界のMo-99の供給 現状と課題」(平成20年11月18日)

³¹ 「医療用アイソトープ製造と非侵襲個別化医療」(核データニュース、No.121(2018))

³² これらの元素の半減期は次のとおり。 ^{89}Sr (ストロンチウム89)は50.5日、 ^{90}Y (イットリウム90)は64.1時間、 ^{131}I (ヨウ素131)は8日、 ^{223}Ra (ラジウム223)は11.4日。なお ^{235}U (ウラン235)は7.04億年。

³³ 「医療用アイソトープ製造と非侵襲個別化医療」(核データニュース、No.121(2018))

りやすい言葉で伝える等、国民理解の醸成に向けた一層の取組が求められる。その際には、核融合という呼称から想起される懸念を払しょくする取組も欠かせないだろう。

核融合研究は、人類をエネルギー問題から解放する高いポテンシャルを有するものであることから、徹底した安全管理の下、一日も早い実用化を期待するものである。

(参考1) ITER計画の経緯

年(月)	事項
1985年	米ソ首脳会談における核融合研究開発推進の共同声明
1988年	概念設計活動開始(日本、欧州、ソ連、米国)
1992年	工学設計活動開始(日本、欧州、ロシア、米国)
1999年	米国がITER計画から撤退
2001年7月	ITER最終設計報告書(FDR)取りまとめ
2001年11月	政府間協議開始(日本、欧州、ロシア、カナダ)
2002年5月	日本が青森県六ヶ所村をITER建設地として誘致開始(閣議了解)
2003年	米国、中国、韓国がITER計画に参加、カナダがITER計画から撤退
2005年6月	第2回閣僚級会合で、ITER建設地が仏カダラッシュに決定。核融合実現に向けた「幅広いアプローチ活動」の日本における実施が決定
2005年12月	インドがITER計画に参加
2006年11月	ITER協定署名、ITER建設開始(当初の完成目標は2016年だった)
2007年2月	ITER-BA協定署名
2007年5月	ITER協定、ITER-BA協定の国会承認
2007年6月	ITER-BA協定発効、同協定の実施機関に日本原子力研究開発機構が指定 第1回ITER-BA運営委員会開催(東京)
2007年10月	ITER協定発効、同協定に基づく国内機関として日本原子力研究開発機構を指定
2007年11月	第1回ITER理事会で、初代ITER機構長に池田要氏が就任
2010年7月	ITER臨時理事会で、技術仕様やスケジュール等に係る基本文書(ベースライン文書)合意、本島修ITER機構長就任
2015年3月	ITER臨時理事会、ITER機構長にベルナル・ビゴ氏が就任
2015年5月	ITER副機構長に多田栄介氏が就任
2016年4月	ITER協定に基づく国内機関として量子科学技術研究開発機構(QST)を指定
2025年12月	運転開始(予定)
2035年12月	核融合運転(予定、発電実証試験なし)

(出所) 公表資料等より筆者作成

(参考2) 日本の取組を軸とした核融合研究の経緯

年	事項
1955年	第1回原子力平和利用国際会議でHomi J. Bhabha議長が熱核融合の平和利用との課題の指摘
1956年	日本の国連加盟、日本原子力研究所(原研)設立
1958年	第2回原子力平和利用国際会議で米英ソの核融合極秘研究の解除・一斉公開
1961年	原研で核融合研究開始、名古屋大学プラズマ研究所設立(ヘリカル)
1962年	第1回IAEAプラズマ物理と制御核融合国際会議で多くの不安定性等の困難な問題に係る認識を共有
1965年	第2回IAEAプラズマ物理と制御核融合国際会議でトカマク装置の成果 第一段階研究開発計画策定
1968年	第3回IAEAプラズマ物理と制御核融合国際会議でのトカマク装置T-3の成果

1970年代	(70年代初頭には核融合研究開発の基盤となる理論が出そろったと言われる。)
1972年	JFT-2 (中間ベータ値トラス装置) 運転開始、1973年3月、JFT-2でプラズマ長時間閉じ込め (電子温度700万度、閉じ込め時間0.02秒) 成功 大阪大学工学部附属レーザー工学研究施設発足 (レーザー)
1974年	JFT-2a (世界初のダイバータ付トカマク) 運転開始
1975年	第二段階研究開発計画策定、JT-60設計開始
1978年	福田首相とカーター米国大統領との間で核融合協力に関する共同声明
1979年	タブレットIII (米国) との共同実験開始
1983年	JFT-2M運転開始、大阪大学レーザー式「激光XII号」慣性 (レーザー)
1985年	那珂研究所設立、JT-60 (臨界プラズマ試験装置) ファーストプラズマ
1988年	ITER概念設計活動開始
1989年	名古屋大学プラズマ研究所が文部省核融合科学研究所へ再編 (ヘリカル)
1991年	JT-60大電流化運転開始
1992年	第三段階研究開発計画策定、ITER工学設計活動開始 JT-60世界最高イオン温度4.4億度達成
1993年	JT-60高周波により世界最大の非誘導電流360万Aの駆動に成功
1994年	JT-60世界最高のプラズマ閉じ込め性能達成
1996年	JT-60世界最高イオン温度5.2億度達成、臨界プラズマ条件達成
1998年	JT-60世界最高エネルギー増倍率1.25達成、LHDファーストプラズマ (ヘリカル)
2004年	自然科学研究機構核融合科学研究所発足 (ヘリカル)
2005年	日本原子力研究開発機構発足、那珂核融合研究所設置
2006年	六ヶ所村での用地選定準備作業着手
2007年	ITER協定、BA協定発効、青森研究開発センター発足
2008年	JT-60実験運転完遂
2009年	六ヶ所村での本格的活動開始
2015年	六ヶ所核融合研究所設置、ドイツ・ヴェンデルシュタイン7x実験開始 (ヘリカル)
2016年	量子科学技術研究開発機構 (QST) 発足
2017年	大阪大学レーザー科学研究所へ改組 (レーザー)
2020年	JT-60SA運転開始 (予定)
2025年	ITER運転開始 (予定)

(注) トカマク形式は明示せず、レーザー型、ヘリカル型はそれぞれ (レーザー)、(ヘリカル) と記した。

(出所) 公表資料等より筆者作成

【参考文献】

- 近藤育朗・栗原研一・宮健三『核融合エネルギーのはなし』(日刊工業新聞社、1996年)
 関昌弘編『核融合炉工学概論』(日刊工業新聞社、2001年)
 狐崎晶雄・吉川庄一『新・核融合への挑戦』(講談社、2003年)
 柴田徳思編『放射線概論 (第11版)』(通商産業研究社、2018年)

(にいづま けんいち)