

J-Fusion

フュージョンエネルギー白書

2025年6月3日版

はじめに

一般社団法人フュージョンエネルギー産業協議会(J-Fusion)は、「フュージョンエネルギー産業の創出により、我が国と世界のエネルギーシステムに革新をもたらし、将来の安定でクリーンなエネルギーによる人類の発展に寄与する」ことを目的として2024年3月に設立され、フュージョンエネルギーの産業化に向けた取組を行っています。

日本はこれまで、世界のフュージョンエネルギー研究開発において主要な役割を担ってきました。今後も日本が国際社会で主導的な役割を担い続けるためには、国内でフュージョンエネルギー産業を創出し、その基盤を強化することが重要です。加えて、長年にわたる堅調な研究開発の成果と、持続可能な社会への期待の高まりにより、フュージョンエネルギーの産業化への機運がこれまで以上に高まっています。今後は、関係事業者の増加や産業構造について議論を深め、関係者が一丸となって産業基盤を形成することが求められます。

本白書は、フュージョンエネルギーの普及を目的に、これまでのフュージョンエネルギーの原理を含む基本事項、我が国における研究および開発や安全確保に関する取り組みのあらましとともに、参考となりうる米英仏などにおける先行事例をまとめつつ、商用炉に向けたフュージョンエネルギーの開発ならびに普及促進に向けた産業界の取り組みの指針を示すことを目的としています。

本白書が、フュージョンエネルギーの産業への参入を検討する企業や団体の皆様にとって、理解と共感を深め、国内での開発・実装・普及を進める議論が活発になることを期待します。

一般社団法人フュージョンエネルギー産業協議会
安全規格部会

目次

1. フュージョンエネルギーとは	3
1.1 フュージョンエネルギーとは	3
1.2 エネルギー源としてのフュージョンの可能性	4
2. フュージョンエネルギーと原子力の比較	5
2.1 フュージョンエネルギーと原子力の原理的な違い	5
2.2 フュージョンエネルギープラントの特徴	6
2.2.1 フュージョンエネルギープラントの代表的な種類と特徴	6
2.2.2 フュージョンエネルギープラントの発電の仕組み	11
2.2.3 核融合施設に係る安全の特徴	13
2.2.4 核融合炉から発生する放射性廃棄物の取扱い	13
3. 我が国におけるフュージョンエネルギー開発の経緯	15
3.1 我が国におけるフュージョンエネルギー研究の位置づけ	15
3.2 日本を中心としたフュージョンエネルギー開発の歴史	15
3.2.1 第1段階基本計画(1958-1974)	15
3.2.2 第2段階基本計画(1975-1991)	16
3.2.3 第3段階基本計画(1992-現在)	16
3.2.4 フュージョンエネルギー・イノベーション戦略(2023年4月-現在)	18
4. 我が国におけるフュージョンエネルギー開発の安全確保に係る検討状況	27
4.1 フュージョンエネルギー開発とルールの必要性	27
4.2 原子力・放射線に関する現行の規制枠組み	28
4.2.1 原子力基本法とフュージョンエネルギーの位置づけ	28
4.2.2 現行の規制体系	29
4.3 フュージョンエネルギー開発に関する安全確保の検討の経緯	30
4.3.1 これまでの国内におけるフュージョンエネルギー規制に関する議論の流れ	30
4.3.2 国際的なフュージョンエネルギー規制について(IAEA Fusion Key Elements より)	31
4.3.3 現行のフュージョンエネルギーにおける規制検討の進捗	35
5. フュージョンエネルギー関連技術の安全保障貿易管理の総論	37
5.1 フュージョンエネルギー関連技術の安全保障貿易管理の現状	37

5.1.1	日本の安全保障貿易管理	37
5.1.2	適切な安全保障貿易管理のために.....	38
5.2	フュージョンエネルギー関連技術の輸出における企業の取組	38
5.2.1	企業 A の安全保障貿易管理(企業ヒアリング結果より)	38
5.2.2	企業 B の安全保障貿易管理(企業ヒアリング結果より)	39
6.	世界主要国のフュージョンエネルギー開発・規制の状況と国際協力	41
6.1	米国のフュージョンエネルギー規制動向	41
6.1.1	米国のこれまでのフュージョンエネルギー規制	41
6.1.2	米国のフュージョンエネルギー規制策定方針	43
6.1.3	米国のフュージョン装置の法的定義	44
6.2	英国のフュージョンエネルギー規制動向	48
6.2.1	英国のこれまでのフュージョンエネルギー規制	48
6.2.2	英国のフュージョンエネルギー規制策定方針	48
6.2.3	英国の核融合施設の法的定義.....	49
6.3	ITER に対する規制状況(仏国)	49
6.4	海外民間企業による開発動向.....	50
6.4.1	Commonwealth Fusion Systems 社(CFS 社)の開発動向	50
6.4.2	TAE Technologies 社(TAE 社)の開発動向	51
6.4.3	その他民間スタートアップ企業の開発動向	51
6.5	フュージョンエネルギー開発における国際協力.....	53
7.	産業化に向けた取組.....	55
7.1	国立研究所の開発動向	55
7.1.1	JT-60SA(Japan Torus-60 Super Advanced)プロジェクト	55
7.1.2	LHD(Large Helical Device)プロジェクト.....	57
7.2	民間企業の開発動向 ²⁵	58
7.2.1	京都フュージョン・アライニング/Starlight Engine:FAST(Fusion by Advanced Superconducting Tokamak)プロジェクト	58
7.2.2	Helical Fusion:ヘリカル式核融合炉	60
7.2.3	EX-Fusion:レーザー核融合炉.....	61
7.2.4	LINEA イノベーション:FRC ミラーハイブリッド核融合炉.....	62
7.2.5	Blue Laser Fusion 合同会社: レーザー核融合	63
8.	フュージョンエネルギーの産業化に向けて	64
9.	参考文献	65

1. フュージョンエネルギーとは

1.1 フュージョンエネルギーとは

「核融合」(フュージョン)は、太陽や他の恒星が光を生成する過程であり、軽い原子同士を衝突させ、より大きな原子核を生成することによってエネルギーを生成する現象を指します¹。これによって発生するエネルギーをフュージョンエネルギーと呼びます。軽い原子が適切な条件下で衝突すると、アインシュタインの有名な方程式 $E=mc^2$ に従い^a、少量の質量が膨大な量のエネルギーに変換されます。例えば、石炭の炭素原子1個を燃焼すると4eV(エレクトロンボルト, $1\text{ eV}=1.6\times 10^{-19}\text{ J}=3.8\times 10^{-20}\text{ cal}$)相当のエネルギーが生成されますが、重水素と三重水素による1回の核融合反応では、 $1.76\times 10^7\text{ eV}$ を超えるエネルギーが生成されます²(図 1-1)。これは、1回の核融合反応で発生するエネルギーが従来の化石燃料の1回の燃焼反応で発生するエネルギーの約400万倍にのぼることを意味します。

宇宙空間とは条件が大きく異なる地球上において核融合反応を起こすことは容易ではありませんが、重水素と三重水素と呼ばれる水素の2つの同位体の組み合わせが最も核融合反応を起こしやすいとされています。水素原子核はすべての原子核の中で最も軽く、通常は1つの陽子で構成されていますが、重水素の原子核には陽子1つと中性子1つからなり、三重水素には陽子1つと更に中性子2つからなります。以下に示す重水素-三重水素反応では、重水素と三重水素の原子核が結合してヘリウム4の原子核、中性子、および $1.76\times 10^7\text{ eV}$ 相当のエネルギーが生成されます。他にも、重水素-重水素や重水素-ヘリウム3、陽子(軽水素または水素)-ホウ素11等の核融合反応も研究・開発されています。

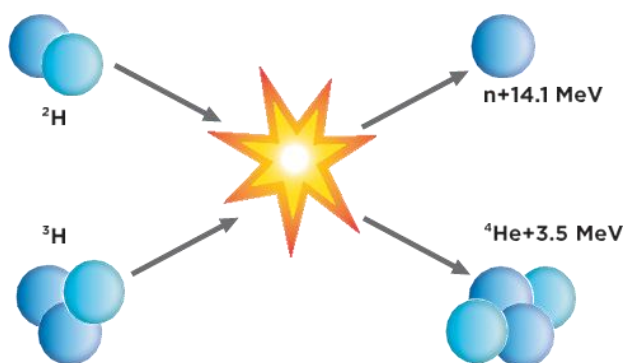


図 1-1 核融合によるフュージョンエネルギー生成³

^a 質量とエネルギーの等価性を表す式。E:エネルギー、m:質量、c:光速を表す。

核融合反応を起こすためには、正電荷を帯びた2つの原子核を静電的反発力に逆らって、ある程度の近距離まで近づけ、近距離にのみ強く働く引力である核力が一定確率で優勢になる状況を作る必要があります。

この条件は、高圧力(圧力＝密度×温度)の環境で達成されます。ある程度高い温度にすると、原子を構成する電子が原子の束縛から離れ、原子が電離という状態になります。さらに十分に高い温度にすると全ての電子が原子から離れて、原子核がむき出しとなり、原子核と電子が完全にバラバラの状態、すなわち完全電離プラズマと呼ばれる状態になります。このプラズマの温度と密度を一定以上に高めると、原子核同士が近づいて、ある確率で核融合反応が起こります⁴。

太陽は、その強大な重力により、軽い原子核同士の密度が高まり、温度もある程度高く、圧力は2600億気圧に上るため、高い確率で核融合反応が起こっています⁵。一方、地球上で核融合反応を起こす場合には、太陽ほどの高圧力状態は実現できないため、太陽と同じ水素同士の反応ではなく、より核融合反応が起こりやすい重水素と三重水素の核融合反応が選ばれました。フュージョンエネルギー実現のアプローチとしては、前述のプラズマを磁場中に閉じ込めることで、密度は太陽に比べかなり薄く、代わりに温度を太陽よりずっと高くするという方法について、先行して研究が開始されました。またほぼ並行して燃料を爆縮して密度をより高める方法も研究開発が開始されました。太陽のように自然の重力で反応が起こる状況は地上では実現が不可能であるため、解決しなければならない最大の技術課題は、反応で得られるエネルギーより、いかに少ないエネルギーで核融合反応を効率よく実現できるかにあります。

1.2 エネルギー源としてのフュージョンの可能性

既に社会には様々なエネルギー源や発電所が存在する中で、フュージョンエネルギーは、気象に影響を受けず、運転時にCO₂を排出しないベースロード電源になることが期待されています。さらに、フュージョンエネルギーは、その過程において扱う高温熱をバイオマス水素製造・炭素固定、合成液体燃料生成、バイオマスCCS(Carbon dioxide Capture and Storage)等に応用できる可能性があります。

これらの理由から、フュージョンエネルギーの実現は、ネットゼロの実現と持続可能な社会に大きく貢献できると考えられています。

2. フュージョンエネルギーと原子力の比較

2.1 フュージョンエネルギーと原子力の原理的な違い

核融合反応と核分裂反応(従来の原子力発電で用いられる反応)の比較について考えると、エネルギー生産に使用することを想定している核融合反応は比較的軽い原子核を融合させてヘリウム4の原子核等を生成する反応である一方で、核分裂反応はウランやプルトニウム等の重い原子核を分裂させて複数のより軽い原子核に変化させる反応です。両反応とも、大量のエネルギーが発生することから、大規模電力を供給する潜在能力を持っていますが、それぞれの反応条件、生成物、燃料資源の利用、エネルギー効率の観点で大きな違いがあります。

核融合反応を用いた発電は、1億℃以上という極めて高温の環境下で行われ、核融合反応の維持が技術的課題となっています。反応は連鎖的ではないため、燃料供給を止めれば即座に反応を停止できます。一方で核分裂反応を用いた発電は、通常数百℃に達する炉内温度の下で連鎖的に起こる反応を制御します。核分裂反応では連鎖反応が意図せず起こらないように、原子炉の停止後も監視・制御し続け、何重にも安全対策を用意する必要があります。

生成物の違いに関しては、核融合反応では、主にヘリウムや三重水素の原子核、中性子や陽子といった粒子が生まれます。ヘリウムは無害な元素ですが、三重水素は透過力の小さな電子を放出する放射性同位元素の一種であり、安全に取扱う必要があります。また、フュージョンエネルギー施設では中性子による壁材の放射化が起こり、その放射化物も安全に取扱う必要があります。一方、核分裂反応では生成物の一部に高い放射能を有する核分裂生成物が含まれます。これらは長期間にわたって放射性廃棄物として管理する必要があります。加えて、核分裂施設でも中性子により周辺の構造物が放射化されるため、生じる放射化物について慎重な管理が必要です。

反応前の燃料の違いに関しては、核融合反応の燃料とする重水素は安定しており取り扱いが比較的容易ですが、三重水素は放射性であるため取り扱いに注意を払う必要があります。一方、核分裂反応で燃料として使用されるウランやプルトニウムは、放射性物質であるため取り扱いには特別な安全措置が求められますが、外部から取り扱う限り、放射線による危険性は極めて低いです。どちらの場合も、燃料の取り扱いと管理には専門的な知識と技術が要求されます。

燃料資源の観点から見ると、核融合反応の燃料となる重水素は海水中に豊富に存在し、比較的安定して資源を確保することができます。また三重水素の原料となるリチウムも海水中に豊富に含まれており、潜在的な供給源があります。一方、核分裂反応で使用されるウランは、現在は陸上鉱物資源に依存していますが、海水中から抽出する技術も研究されており、持続可能な資源活用のための取り組みが進められています。

燃料1グラム当たりの反応生成エネルギーについて比較すると、核分裂反応ではウラン1g から石油約1.6トン分相当のエネルギーが生成される一方で、核融合反応では1g の重水素・三重水素から石油約8トン分相当のエネルギーを取り出すことができます。

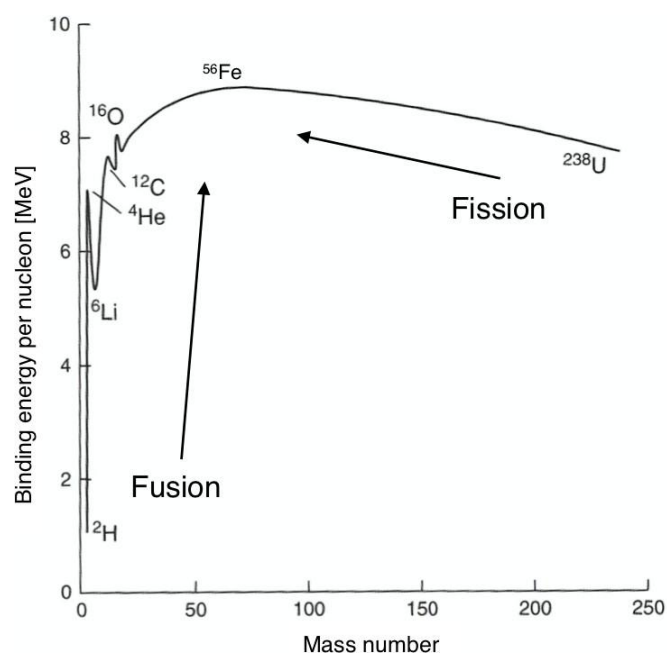


図 2-1 核融合反応と核分裂反応のエネルギー放出プロセス⁶

図 2-1 における縦軸は原子核の核子1個当たりの結合エネルギー、横軸は原子番号を表します。結合エネルギーとは、一つの核子(陽子と中性子を合わせた名称)を原子核から引き離す際に必要なエネルギーのことです。核分裂反応は、質量数大きな元素の原子核が質量数の小さな複数の原子核へ分裂する反応であり、核融合反応は質量数小さい複数の元素の原子核同士が融合する反応です。両反応共に、反応前後の複数の全原子核の合計でエネルギー利得がある場合、エネルギー生産に利用することができます。

2.2 フュージョンエネルギープラントの特徴

2.2.1 フュージョンエネルギープラントの代表的な種類と特徴

核融合炉には主に磁場閉じ込め方式、慣性閉じ込め方式の2つの方式があり、またそれぞれの方式について、いくつかの炉型があります(図 2-2)。

(1) 磁場閉じ込め方式

磁場を用いてプラズマを閉じ込める方式で、主に以下の型があります。

1) トカマク型

● プラズマ閉じ込め方法:

プラズマ中にプラズマ電流を流して作るポロイダル方向の磁場と、トロイダル磁場コイルで作ったトロイダル方向の磁場の組み合わせでらせん形状の磁場(磁力線のひねり)を作り、ドーナツ型のプラズマを閉じ込めます⁷。

- **運転の特徴:**

プラズマ内に定常的に電流を流すために、圧力分布の制御や、外部加熱による電流駆動等の高度なプラズマ制御技術が求められます。

- **エネルギーの取出し方法:**

核融合反応により放出されるエネルギーは、主にプラズマの周囲に配置したブランケット(2.2.2 節を参照)で受け取られます。ブランケットは反応により生成された高エネルギーの中性子を吸収し、その運動エネルギーを熱として回収します。この過程で中性子はブランケット内の材料に衝突してそのエネルギーを伝えることによって熱中性子化が行われます。また、ブランケットにはリチウムを含む素材が使用されており、中性子との反応によって三重水素が生成されます。回収された熱エネルギーは、冷却材を介してブランケットから移動し、その熱で発生させた水蒸気などでタービンを回転させることで発電機を動かし電気に変換します。

- **技術的進捗:**

ITER プロジェクト(3.2.3 節を参照)と呼ばれる国際プロジェクトが進行中です。文部科学省発表の「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」(2017 年)において、最も開発段階の進んだ炉型であり国内における最初の原型炉はトカマク型とされています。実装の為には、ディスラプション^bと呼ばれるプラズマが突然崩壊する現象を克服する必要がありますが、トカマク型以外のプラズマを用いた型式でもプラズマに起因する不安定性は一定の条件の下で発生しており、その不安定性の克服は、炉型共通の課題です。

2) ヘリカル型 (ステラレータ型)

- **プラズマ閉じ込め方法:**

トカマク型と同様にドーナツ型のプラズマを形成しますが、トカマク型とは違って磁力線のひねりを、プラズマ電流は使わずにコイル自身を捻ることによって作ります。

- **運転の特徴:**

プラズマ内に電流を流す必要がないためプラズマの定常性が向上し、トカマク型と比べて容易に長時間のプラズマ生成が可能です。

- **エネルギーの取出し方法:**

トカマク型と同様に、核融合反応により放出されるエネルギーはプラズマの周囲に配置したブランケットで受け取られ、その熱で発生させた水蒸気などでタービンを回転させることで発電機を動かし電気に変換します。

^bプラズマを閉じ込める磁気面が壊れ、プラズマ電流が急激に減衰・消滅崩壊する現象。プラズマ密度の過大、圧力の過大などによって引き起こされる。

- **技術的進捗:**

大型ヘリカル装置 LHD(7.1.2 で詳述)やドイツの W7-X 等、大型装置での研究が行われています。トカマク型に比べるとコイル構造が複雑でエンジニアリング上の課題があるものの、昨今の機械加工技術やシミュレーション技術の進展により、日本・ドイツ・米国を中心に課題克服に向けた開発が加速しています。

3) ミラー型

- **プラズマ閉じ込め方法:**

トカマク型やヘリカル型のようなドーナツ型ではなく直線状の磁場構造であり、両端のミラー磁場でプラズマを反射して閉じ込めます。

- **運転の特徴:**

トカマクやヘリカルに比べて比較的シンプルな装置構成によってプラズマ閉じ込めが可能です。一方で、両端の磁場端部にてエネルギー・粒子損失が大きいため、核融合反応を実現するためには密度や閉じ込め性能を含めたより一層のプラズマ性能の向上が必要です。

- **エネルギーの取出し方法:**

直線型の装置で端部が開放されているという特徴から、端部で漏出する帯電したプラズマ粒子による電磁誘導で直接発電する方法(直接発電)が検討されています。

- **技術的進捗:**

筑波大学や米国のウィスコンシン大学とスタートアップ企業を中心に研究開発が進められています。

4) 磁場反転配位型 (Field-reversed configuration:FRC 型)

- **プラズマ閉じ込め方法:**

対向する 2 つのプラズモイド(プラズマの塊)を円筒状の容器の中心部で衝突させ、プラズマ電流によるポロイダル磁場のみによってプラズマを閉じ込めます。イオンなどを高速に打ち込んでプラズマを維持する方法と、連射によってプラズマを生成し続ける方法などが研究されています。

- **運転の特徴:**

小さな外部磁場で高温・高密度のプラズマを閉じ込められる(β 値が高い)のが最大の特徴です。トカマクやヘリカルに比べて比較的シンプルな装置構成によって実現可能でもあります。一方で、技術的蓄積が少なく、核融合反応を実現するためには一層のプラズマ性能の向上とプラズマ維持や連続照射技術の向上が必要です。

- **エネルギーの取出し方法:**

D-T 核融合反応の他に、高温環境でホウ素11と陽子の核融合反応によって中性子が発生せず、構造物の放射化を抑制できる核融合発電の利用が検討されています。核融合反応で放出される運動エネルギーをタービンを介さずに直接電気エネルギーに変換して発電する方法が考えられています。

- **技術的進捗:**

米国のスタートアップ企業や、国内では日本大学が装置を有しており、研究開発を進めています。

(2) 慣性閉じ込め方式

レーザー等を燃料ペレットに照射して外殻を外に吹き飛ばす反作用により燃料を圧縮し、短時間で核融合反応を起こす方式で、主な型には以下があります。

1) レーザー核融合

- **反応方法:**

多数の高出力レーザー光を小球状の燃料ペレットに同時に照射し、燃料ペレットを均一に爆縮させ核融合反応を発生させます。

- **運転の特徴:**

発電システムとしての社会実装を実現するには、毎秒10回以上の爆縮運転を行うシステムが必要となります。短時間で高密度の反応を実現できますが、安定した連続運転を行うには燃料ペレットを均一に爆縮させる必要があり、より高度なレーザー制御技術の開発が求められます。

- **エネルギーの取出し方法:**

核融合反応で発生した熱エネルギーは爆縮チェンバーの周囲に配置したブランケットで受け取られ、その熱で発生させた水蒸気などでタービンを回転させることで発電機を動かし電気に変換します。

- **技術的進捗:**

米国の国立点火施設(National Ignition Facility:NIF)や大阪大学の激光 XII 号といった代表的な研究施設に加え、スタートアップ企業で実験が進められています。

2) 量子ビーム核融合

- 反応方法:

重イオンビーム等の高エネルギービームを使い、ターゲットを加熱・圧縮して核融合反応を発生させます。

- 運転の特徴:

量子ビームにより連続的かつ効率的なエネルギー投入が可能とされています。

- エネルギーの取出し方法:

他の方式と同様に核融合反応で発生する熱エネルギーをブランケットで回収し、水蒸気などを発生させてタービン、発電機を動かし電気への変換を目指しますが、具体的な技術詳細はまだ確立されていません。

- 技術的進捗:

初期研究段階にあり、基礎技術の確立が望まれています。



図 2-2 主な核融合炉の方式・炉型⁸

2.2.2 フュージョンエネルギープラントの発電の仕組み(トカマク型・ヘリカル型核融合炉)

核融合発電は、重水素と三重水素の原子核を1億℃以上の超高温プラズマ状態で融合させ、生み出される膨大なエネルギーを電気に変換します。この反応で発生したエネルギーのうち、80%は中性子によって運ばれます。中性子は、磁場による影響を受けずにプラズマの外部へと放出され、真空容器の内壁に配置されたブランケットと呼ばれる機器で吸収され、熱エネルギーに変換されます。その後、ブランケットで発生した熱を利用して原子力発電所や火力発電所の発電の仕組みと同様にタービンを回転させることで発電機を動かし電気に変換します(図 2-3)。一方、核融合反応で発生するエネルギーのうち残りの20%はヘリウム4原子核が担います。ヘリウム原子核は磁場による閉じ込めの中で他の粒子と衝突を繰り返すことでプラズマを加熱し、最終的にダイバータから排気されます。このようにヘリウム原子核が発するエネルギーは核融合反応に必要な高温の維持に寄与していますが、ヘリウム原子核による加熱のみではプラズマ温度を維持することができません。そのため、外部から高周波加熱装置(RF:Radio Frequency Heating System)や中性粒子入射装置(NBI:Neutral Beam Injection Heating System)によって継続的にプラズマを加熱しています。

燃料となる物質のうち、重水素は海水から採取でき、三重水素については、核融合反応で発生した中性子とリチウムを反応させて生成することができます。リチウムも重水素と同じく海水から採取できるほか、塩湖や鉱床から採掘することができます。理論上は、核融合反応の結果発生した1個の中性子で、1個の三重水素を生成することができますが、実際には、炉内構造物への衝突や加熱ポートからの漏洩等により、1個の中性子から生成可能な三重水素の数は実質的には1個以下です。そのため、リチウムに衝突させる中性子数は、ベリリウムなどを用いて中性子を増倍することが不可欠です。このため、現在研究開発が進められているブランケットには、中性子増倍材としてベリリウムや鉛、燃料増殖材としてリチウムを含めることが検討されています(図 2-4)。なお、より効率的な三重水素生成のためには、ブランケットに含めるリチウムとしてリチウム6化合物を用いることが検討されており、天然リチウムからリチウム6を分離濃縮する量産技術の確立が望まれています。

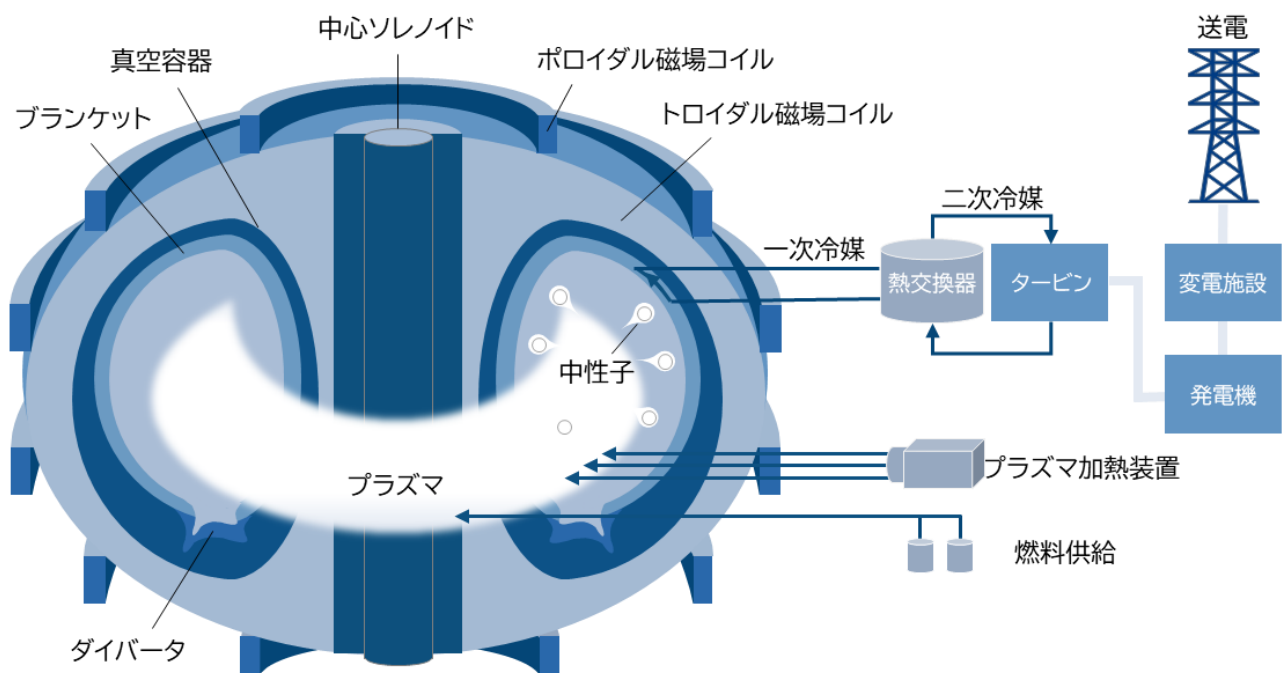


図 2-3 トカマク型核融合発電の仕組み

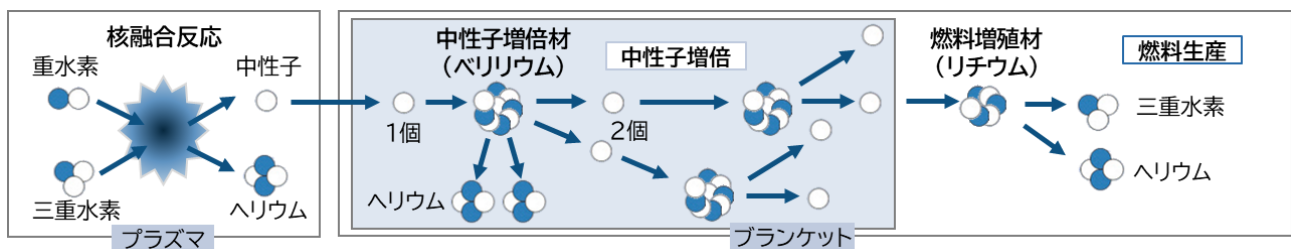


図 2-4 核融合反応と三重水素の生産

2.2.3 核融合施設に係る安全の特徴

フュージョンエネルギー施設は、運転時に二酸化炭素を排出しないエネルギー源であることに加え、例えば D-T 反応の場合は、発生した中性子によりステンレス等の金属構造物中に比較的半減期の短い放射性物質を生成するという特徴を有しています。フュージョンエネルギー施設から排出される廃棄物で管理を要するものは、中性子により放射化した構造物等の材料物質、及びそれら放射化物質や燃料の三重水素が付着した機器類等です。また、核融合反応は、必要な燃料が供給され、かつ温度・圧力等の条件が整ったときに起こるものであり、連鎖反応は発生しません。そのため、例えば電力網に影響を与えるような災害によってフュージョンエネルギー施設への電力が喪失する事象や、燃料の供給が停止する事象、メインの真空容器が故障する等の事象が発生した場合でも、核融合反応は速やかに停止するという安全上の特徴を有しています⁹。

加えてフュージョンエネルギー施設では、核分裂施設を構成している「崩壊熱除去システム」を必要とする照射済み燃料は生成されません。その上、フュージョン装置の機器は中性子の放射化による残留熱密度が運転中の熱密度に比べて十分に小さいため、反応停止後には外部からの強制的な冷却がなくなった場合、構造物金属の融点を超えない範囲で自然に温度が低下するようにブランケット等を構成する機器が設計できるかの検討が進んでいます。

2.2.4 核融合炉から発生する放射性廃棄物の取扱い

核分裂施設(原子力発電所)は、使用済核燃料を処理した結果、高レベル放射性廃棄物^cが発生し¹⁰、長期隔離保管が必要となります。人体への影響上留意すべき放射性同位体であるヨウ素131やセシウム137、ストロンチウム90 等の一部の核分裂生成物は拡散性が高く、生態系に容易に吸収されてしまいます¹¹。一方で核融合反応が最も起こりやすい重水素-三重水素反応の反応生成物は、ヘリウム4と中性子です。重水素-重水素反応、重水素-ヘリウム3反応や陽子(軽水素または水素の原子核)-ホウ素11反応等の他の核融合反応ではヘリウム4に加えてヘリウム3^d、三重水素、陽子等も生成されますが(表 2-1)、ヘリウムは放射性物質ではありません。

表 2-1 フュージョンエネルギーに用いられる代表的な核融合反応^e

$D + T \rightarrow {}^4\text{He}(3.52\text{MeV}) + n(14.06\text{MeV})$
$D + D \rightarrow {}^3\text{He}(0.82\text{MeV}) + n(2.45\text{MeV})$
$D + D \rightarrow T(1.01\text{MeV}) + p(3.03\text{MeV})$
$D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He}(3.67\text{MeV}) + p(14.67\text{MeV})$
$p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He}(\text{計 } 8.7\text{MeV})$

^c 使用済燃料を再処理した際に発生する放射能レベルの高い廃棄物

^d ヘリウム3は存在比 0.0001%のきわめて希少なヘリウム同位体である。

^e D:重水素、T:三重水素、p:陽子、n:中性子を表す。

また三重水素は比較的低エネルギーのベータ線を放出する放射性同位体であり、半減期は12.3年です。民間および公的機関が研究している主なフュージョンエネルギープラントの設計においては、核融合反応を維持するために必要な三重水素はリチウム6を含有するブランケット部分で生成される予定です。核融合反応から放出されベリリウムで増倍した後、速度が減衰した中性子はリチウムブランケットで吸収され、ヘリウム4と三重水素を生成します。したがって、核融合燃料において適切な監視と取り扱いを必要とする主たる放射性同位体は三重水素であり、三重水素を安全に取り扱うためのシステム設計と運用の開発が、半世紀以上前から現在まで進められています。

加えて核融合反応によって生成された一部の中性子は真空容器の内壁を放射化させる¹²ため、定期保守のたびにブランケットやダイバータ等の機器交換分の廃棄物が発生します。現在使用中または検討中の核融合炉心近傍を構成する材料には、炭化ケイ素、炭化ホウ素、グラファイト、炭素繊維複合材、ベリリウム、タングステン、リチウム、低放射化フェライト鋼、チタン合金、バナジウム合金、高マンガン鋼等があり、非常に放射化されにくい、100年未満と比較的短期間で十分に放射能が低下する性質があります。これらの材料は、保管方法や処理方針にもよりますがブランケット交換後100年でリサイクルが可能となるよう、照射後100年で手に触れることができる程度の放射線量(表面線量率が25 $\mu\text{Sv/h}$)に収まるよう研究開発されています¹³。

3. 我が国におけるフュージョンエネルギー開発の経緯

3.1 我が国におけるフュージョンエネルギー研究の位置づけ

フュージョンエネルギーは、将来のクリーンで持続可能なエネルギー源として、エネルギー安全保障の強化、先端技術の開発促進、関連産業の創出といった観点から国家戦略上重要な位置づけを有しています。その研究開発は1950年代より各国で本格的に開始され、1970年代には石油危機を背景に日本を含む主要国で国家プロジェクト化が進みました。1985年のジュネーブ・サミットを契機に、日米欧露の四極による国際協力体制が構築され、1988年にはITER計画が発足しました。以降、ITERは国際協力の象徴的なプロジェクトとして推進されてきています。

一方近年では、米国や英国、中国をはじめとする各国で民間主導によるフュージョンエネルギー開発が急速に進展しつつあり、技術開発の主導権を巡る国際的競争が本格化しています。こうした動向を踏まえ、フュージョンエネルギーは「協調から競争へ」とフェーズを移行しつつある技術領域と位置づけられています。

3.2 日本を中心としたフュージョンエネルギー開発の歴史^{14,15}

日本においてフュージョンエネルギーの開発は基礎研究から始まり、現在では実用化に向けた研究開発が行われています。日本のフュージョンエネルギー実現に向けた研究開発段階の時期の分類は、内閣府の策定計画に基づき、第1-3段階基本計画(1969-1974、1975-1991、1992-現在)、フュージョンエネルギー・イノベーション戦略(2023年4月-現在)の4期に分けることが出来ます。

3.2.1 第1段階基本計画(1958-1974)^{14,15}

日本のフュージョンエネルギー研究は1950年代に理論と実験の両面で本格的に始まり、当時の科学技術庁、文部省傘下の各機関、各大学において開始されました。原子力委員会には核融合専門部会が、日本学術会議には原子力問題委員会、核融合特別委員会が設置されました。また、フュージョンエネルギーの研究者たちは、1949年にノーベル物理学賞を受賞した湯川秀樹氏を会長として核融合懇談会を1958年に設立しました。1958年の第2回ジュネーブ会議では、世界中で秘密裏に進められていたフュージョンエネルギー研究が公開され、国際的な研究の加速につながりました。1959年には原子力委員長に研究開発の進め方について答申しています。そこでは、「新しい着想の育成と装置試作」を行うA計画と「中型装置の建設」を行うB計画を進めることが提案されました。それらを踏まえた研究方針の議論の結果、A計画が採用され、両計画の実施主体として、旧文部省下の名古屋大学にプラズマ研究所が、旧科学技術省下の日本原子力研究所に核融合の研究グループがそれぞれ発足しました。

1968年、原子力委員会によって核融合が「原子力特定総合計画」として位置づけられた¹⁶こ

とは日本の核融合研究にとって極めて大きい出来事でした。1968-69年、改良を経たロシアのトカマク T-3が、1,000万℃、プラズマのエネルギー閉じ込め時間としては当時の限界とされた値の数十倍を達成していることが確認され、世界に衝撃を与えたことで、これ以降、トカマクの研究が一気に活発になりました。日本原子力研究所(原研)では、トーラス型の核融合実験装置として JFT-1(ヘキサポール)の後、旧ソ連のトカマク型装置 T-3の当時の予想の約50倍ものエネルギー閉じ込め時間の成果を踏まえトカマク型の JFT-2、JFT-2a 等の装置が建設されました。プラズマ研究所でも JIPP-1ステラレータが建設されました。ソ連のトカマク型装置の高い達成温度は当時英国の研究者が冷戦中のモスクワに持ち込んだ計測器を用いて確認され、世界的にトカマク型核融合装置が主流となりました。

1971年にはレーザー核融合で中性子の発生に成功しました。1974年には東京で第5回 IAEA (国際原子力機関)会議が開催され、日本の研究レベルが世界水準に並んだと認められました。

3.2.2 第2段階基本計画(1975-1991)^{14,15}

1975年に原子力委員会は第二段階核融合研究開発基本計画を策定し、原研では JT-60の建設とりました。さらに1978年には、IAEA の主導で日米欧ソの4極で共同核融合実験炉の共同プロジェクト(INTOR)が開始され、1987年まで続けました。

1980年代は、冷戦終結の象徴的な出来事として、1985年レーガン・ゴルバチョフによるジュネーブでの 共同声明において、戦略核兵器の削減と共に核融合開発協力が合意されました。これを踏まえ、国際熱核融合炉実験炉 ITER の概念設計活動が1988年から1990年に日米欧露の4極体制で行われました。

3.2.3 第3段階基本計画(1992-現在)^{14,15}

ソ連からロシアへの移行を経て、1992年から9年間にわたり工学設計活動(Engineering Design Activities:EDA)が実施されました。また、EDA によって日本は、ITER の重要な構成要素である超伝導コイル、真空容器、ブランケット、ダイバータは実物大モデルまたは部分モデルを開発しました^{17,18}。

1990年代後半には、JT-60U による臨界プラズマ等価の達成(DD 燃料を用いて、実際に三重水素と重水素(DT)燃料を用いた場合と同等の臨界プラズマに相当する状態を再現することに成功)し、JT-60U によるブレークイーブン(DT 核融合反応によって発生するエネルギーが、プラズマを維持するために投入したエネルギーと等しくなる状態)等価換算 DT 核融合臨界プラズマ相当条件の DD 放電による達成等^f、トカマクプラズマの高性能化が進展しました。一方、原子力委員会は、1992年に第三段階核融合研究開発基本計画を策定しており、その中核装置として核融合実験炉を定義しました。1996年、すでに工学設計活動を進めていた国際熱核融合

^f JT-60 では重水素-三重水素の核融合反応は行われておらず、重水素のみを用いた実験によって得られたデータをもとにした推定である。

実験炉 ITER の状況を踏まえ、ITER を第三段階計画で定義した中で ITER を実験炉として位置づけて開発することが適切であるとの見解が原子力委員会より示されました。同時期に、核融合科学研究所(NIFS)では超電導を活用した大型ヘリカル装置(LHD)が完成し、超伝導ヘリカルコイルや負イオン中性粒子ビーム(負イオン型 NBI、負 NBI)の運転が成功する等、フュージョンエネルギー研究の技術的進展が続きました。

2000年代に入り、中央省庁の再編により2001年に文部科学省が発足しました。その後、2003年1月、文部科学省科学技術・学術審議会は「今後の我が国の核融合研究の在り方について」を策定し、日本のフュージョンエネルギー研究の重点化方針として、トカマク(JT-60U)、ヘリカル(LHD)、レーザー(GEKKO-XII 等)、炉工学(材料照射)を4本柱に掲げました。

トカマク型の研究では世界的に ITER 計画に軸足が移り、ITER 計画では、2005年に建設サイトがフランス・カダラッシュに決定し、2007年には ITER 協定および幅広いアプローチ(Broader Approach: BA)協定が発効するなど、国際協力が本格化しました。ヘリカル型の研究では、LHD(大型ヘリカル装置)が世界的なヘリカル型研究をリードし、2000年代を通じて高ベータ値化や長時間放電などの実験成果を挙げ、2017年には重水素プラズマ実験でイオン温度1億2,000万度の達成など、プラズマの理解と制御技術の向上に大きく貢献しました。

また、国際協力のもと、IFMIF/EVEDA(国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動)や JUPITER(Japan-USA Program of Irradiation/Integration Test for Fusion Research:JUPITER, 日米核融合照射／統合計画)などの炉工学研究が進展し、総合科学技術会議等の評価を受けながら、核融合炉実現に向けた技術開発が推進されました。2008年には JT-60U の運転が終了し、超伝導化した JT-60SA への改修が本格的に開始されました。さらに、青森県六ヶ所村に設置された国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)では、原型炉設計・R&D 調整センター、ITER 遠隔実験センター、計算機シミュレーションセンターが整備され、核融合原型炉の設計や研究開発、ITER の遠隔実験、シミュレーション技術の開発などが進められています¹⁹。

2010年代に入ると、ITER 建設は当初計画から遅れながらも、着実に初プラズマに向かってモノ作りが進んで行きました。ITER および JT-60SA を含む BA 活動では、炉心プラズマ物理や材料科学などの基礎研究のみならず、ものづくりプロジェクトを完遂するためのエンジニアリングの研究開発も国際協力の下で展開してきました。JT-60SA は、2023年10月に初プラズマを着火させ実験運転が開始されました。また、ITER は、高難度機器が実際に製作されサイトに搬入されて行き、トロイダル磁場コイル全数が搬入を終えました。一方、一部の機器で製作上の課題が表面化し工程の見直しが進んでいます。

3.2.4 フュージョンエネルギー・イノベーション戦略(2023年4月-現在)²⁰

フュージョンエネルギーは将来のエネルギー安全保障にも資するクリーンエネルギーとして期待されていることから、政策的重要性が高まり、主要国はフュージョンエネルギー開発への取り組みを一斉に加速させています。内閣府は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」を策定・公表しました。同戦略では、「フュージョンエネルギーを新たな産業創出の中核として捉え、構築されつつある世界のサプライチェーン競争に我が国も時機を逸せずに参加」、「ITER 計画/BA 活動、原型炉開発と続くアプローチに加え、産業化等の多面的なアプローチによりフュージョンエネルギーの実用化を加速」、「産業協議会の設立、スタートアップ等の研究開発、安全規制に関する議論、新興技術の支援強化、教育プログラム等を展開」することを指針として掲げました。時期を同じくして、フュージョンエネルギーベンチャーへの投資も拡大し、ITER 計画の「国際協調」から「国際競争」の時代に突入しています²¹。

この背景には、「エネルギーの覇権が資源から技術を保有する者へのパラダイムシフト」(フュージョンエネルギー・イノベーション戦略)という構造的な変化があります。各国は技術開発競争を制することで次世代のエネルギー覇権を握ることを目指し、積極的な投資と政策支援を推進しています²⁰。

(1) ITER プロジェクト²²

ITER プロジェクトは、フュージョンエネルギーの実現に向けた国際協力プロジェクトであり、フランス・カダラッシュに建設されている世界最大のフュージョン実験装置です。日本・欧州連合(EU)・米国・ロシア・中国・韓国・インドの7極(33ヶ国)が協力して進めています。

ITER の目的は、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、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・技術的実現性を確立することであり、主な目標として「エネルギー増倍率(Q 値)10以上のプラズマ燃焼を達成すること」が設定されています。これは外部から投入するエネルギー(50MW)の10倍以上のエネルギー(500MW 以上)を核融合反応によって得ることを意味しています(表 3-1)。また、「超伝導コイル(磁場生成装置)や加熱装置等の核融合工学技術を実証すること」に関しても技術目標が設定されており、核融合実験炉 ITER の建設・運転を通じて、フュージョンエネルギーの科学的・技術的実証が重要視されています。

ITER 計画は2007年に ITER 協定が発効され ITER 機構が設立し、正式な建設が開始されました。初期の計画時は2018年の運転開始が予定されていましたが、調達機器の複雑な物納分担形態による取り扱い条件が明確でなかった事、追加部品の発生、技術的な課題や設計の見直し、さらに新型コロナウイルス感染症等の影響により、2025年のファーストプラズマ予定は2034年に遅延し、2035年に重水素-重水素(D-D)燃料による核融合燃焼運転、2039年に重水素-三重水素(D-T)燃料での燃焼運転の開始に変更しています。

ITER はトカマク型の磁場閉じ込め方式を採用しており、以下のような技術的特徴を持っています。

表 3-1 ITER フュージョン実験装置における技術的特徴²³

核融合熱出力	500 MW(700 MW)
Q 値(核融合熱出力／外部加熱入力)	≥ 10
平均14MeV 中性子壁負荷	0.57 MW/m ² (0.8 MW/m ²)
誘導電流駆動による燃焼時間	≥ 400 秒
主半径(R)	6.2 m
小半径(a)	2.0 m
プラズマ電流(I _p)	15 MA(17 MA ¹)
縦長比(κ_{95})@95%磁束面／セパトリクス	1.70 / 1.85
三角度(δ_{95})@95%磁束面／セパトリクス	0.33 / 0.49
安全係数(q ₉₅)@95%磁束面	3.0
トロイダル磁場(BT)@半径6.2 m	5.3 T
プラズマ体積	837 m ³
プラズマ表面積	678 m ²
外部加熱／電流駆動装置による投入電力	73 MW ²

ITER プロジェクト参加国は各国が分担して機器を製造・調達し、ITER 機構が全体の組み立てを行います。日本は「準ホスト国」として、主要な ITER の先端機器調達を担当するほか、EU と共同で進める「幅広いアプローチ(BA)計画」を進めています。これは、日本の茨城県那珂市に設置された JT-60SA(トカマク型超電導プラズマ実験装置)を用いた ITER 計画の支援研究、原型炉への先進補完研究および人材育成を主要目的とし、ITER 計画と並行して進められています。

日本は ITER 計画において、以下の主要な機器を調達しています²⁴。

- 中心ソレノイド用超電導導体
- 超電導トロイダル磁場コイル
- トリチウムプラント設備
- ブランケット遠隔保守機器
- ダイバータ
- 高周波加熱装置
- 中性粒子入射加熱装置
- 計測装置

ITER 計画は、最初に発電を行う核融合原型炉の実現に向けた直前段階となるため、日本の開発戦略上極めて重要な装置と位置付けられます。ITER 計画の進行状況を踏まえ、日本国内のフュージョンエネルギー研究機関、産業界、大学は、日本政府の政策的・制度的な支援に呼応し

て、原型炉に必要なイノベーションを伴う広範囲に亘る研究・技術開発等の推進が必要とされています。

(2) 国内における主要プロジェクト²⁵

JT-60SA 等、日本国内では複数のフュージョンエネルギー関連プロジェクトが進行しており、国際的な連携や民間企業の参入が進んでいます(表 3-2)。

ここでは、内閣府が発信しているプロジェクトおよび J-Fusion の加盟企業を中心に調査を実施した結果を踏まえたものです。そのため、すべてのプロジェクトを網羅しているわけではないことにご留意ください。

表 3-2 国内主要プロジェクト一覧 (1/2)

炉タイプ	プロジェクト・装置 /企業	概要
磁場閉じ込め方式 トカマク型	JT-60SA(QST:国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構)	QST が運用する超伝導トカマク型核融合実験装置。ITER 計画を補完し、プラズマの研究を進める。
	FAST プロジェクト (建設予定)	Starlight Engine が主導する核融合発電試験プラント建設プロジェクト。高温超伝導コイルを用いた低アスペクト比トカマク装置を採用し、発電技術の実証を目指す。
	QUEST(ST 形式、九州大学)	九州大学が開発する球状トカマク(ST: Spherical Tokamak)型核融合装置。長時間プラズマ保持を目指す。
ヘリカル型、ステラレータ型	LHD(NIFS)	核融合科学研究所(NIFS)が運用する世界最大級のヘリカル型装置。磁場閉じ込め方式の研究を推進(2025年度運転終了予定)。
	Helical Fusion (建設予定)	核融合科学研究所の研究成果を受け継いだスタートアップ。独自の高温超伝導技術とブランケット・ダイバーター技術を活用し、定常核融合の開発を目指す。
ミラー型	GAMMA10 (筑波大学)	筑波大学が運用するミラー型磁場閉じ込め装置。線形装置であり、プラズマ加熱や閉じ込め特性を研究。
FRC 型	FAT-CM(日本大学)	日本大学が運用する磁場反転配位(FRC: Field-Reversed Configuration)型磁場閉じ込め装置。プラズモイドの超音速合体を実現できる。
FRC・ミラー型	LINEA イノベーション (建設予定)	FRC とミラー型磁場を組み合わせた方式の実現を目指すスタートアップで、中性子が発生しない先進核融合炉開発を目指す。

表 3-2 国内主要プロジェクト一覧 (2/2)

炉タイプ	プロジェクト/企業	概要
慣性閉じ込め方式 (レーザー)	激光 XII (大阪大学)	大阪大学が運用するレーザー核融合装置。慣性閉じ込め方式を利用し、高出力レーザーで燃料を圧縮・加熱。
	EX-Fusion (建設予定)	レーザー核融合を民間で商用化することを目指すスタートアップ。高速点火方式を研究。
	Blue Laser Fusion (建設予定)	先駆的な高平均出力のパワーレーザーを開発すると同時に、レーザー核融合エネルギーの実現を目指す。

(3) 産業界の動向

国内産業界でもフュージョンエネルギー開発分野への参入が進んでおり、大手企業とスタートアップの双方が積極的に取り組んでいます。三菱重工業、日立製作所、東芝エネルギーシステムズといった大手企業は、核融合炉の部品製造、超伝導技術等の開発に注力しています。特に、ITER 計画や日本国内のフュージョンエネルギー関連プロジェクトにおいては、これらの企業が主要な役割を担い、高度な技術力を発揮しています。

フュージョンエネルギー関連スタートアップ企業の活躍もあり、現在ではフュージョンエネルギーの早期実証を目指した研究開発が加速しています。京都フュージョニアリングや EX-Fusion、Helical Fusion 等の国内スタートアップは、独自技術である核融合炉のシステム設計やレーザー核融合技術、炉心材料の開発等を進めています。こうした企業への投資も増加しており、国内外のベンチャーキャピタルや事業会社が資金提供を行いながら、新たな技術革新を促しています。このように、大手企業とスタートアップ企業がそれぞれの強みを活かしながら技術開発を推進し、政府の支援も相まって、国内のフュージョンエネルギー産業は加速度的に成長を遂げています。

核融合炉は、多岐にわたる高度な技術を必要とする個々の要素の集積によって成り立っています(図 3-1)。特に、日本国内では、超伝導コイル、ブランケット、ダイバータ、真空容器、プラズマ加熱装置といった重要な構成機器の開発・製造に、多くの企業が関与しています。

ここでは、J-Fusion が加盟企業を中心に核融合要素機器毎に、製作企業名を記載しました。そのため、国内で製作対応が可能なすべての企業を網羅しているわけではないことにご注意ください。

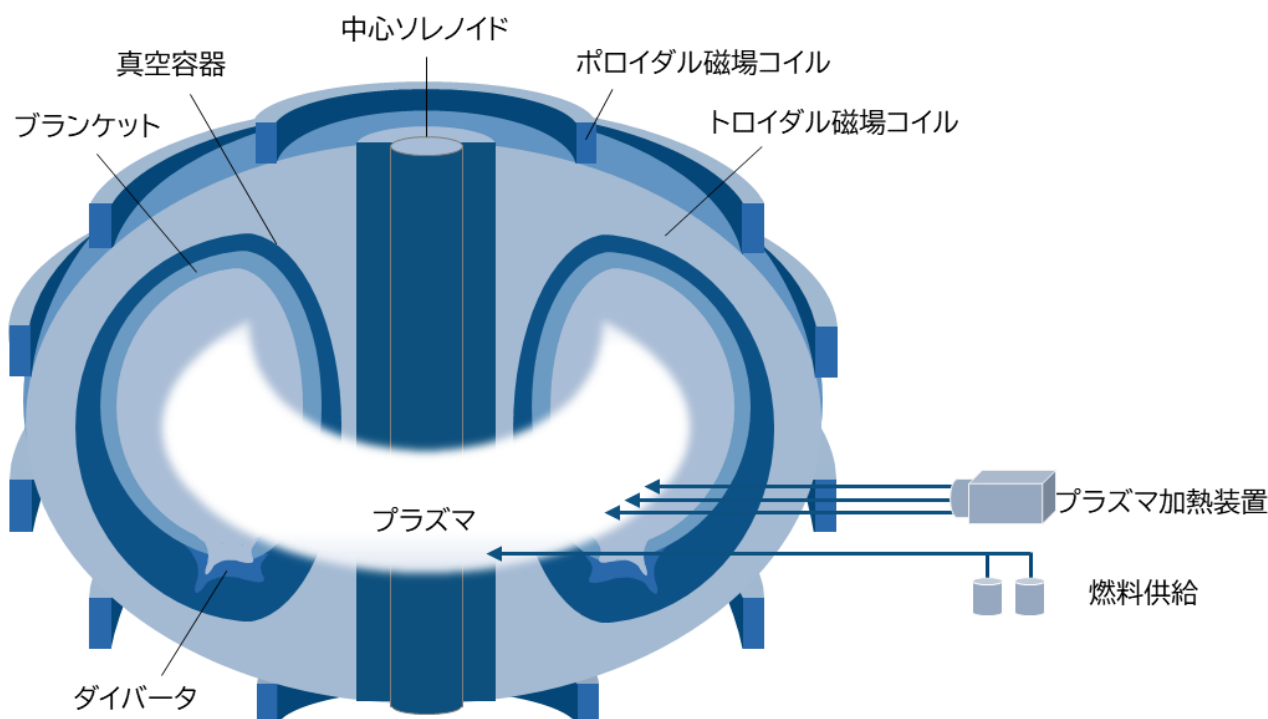


図 3-1 核融合炉(トカマク型)を構成する主要機器

1) コイルの製造と超伝導技術

磁場閉じ込め型核融合の心臓部ともいえる核融合炉では、超伝導コイルがプラズマを強力な磁場で閉じ込める役割を果たしています。これに関連する企業として、三菱重工業、日立製作所、三菱電機、東芝エネルギーシステムズ、日鉄エンジニアリング等があり、ITER の調達では、中心ソレノイド(CS)やトロイダル磁場(TF)コイルの製造を担いました。

最近では次世代型超伝導素材である高温超伝導(High Temperature Superconductor: HTS)を活用したコイル開発も活発になり、長年にわたる超伝導技術の開発実績を持つフジクラ、古河電機工業(米子会社 SuperPower)に加え、Faraday Factory Japan が HTS 素材供給を、Helical Fusion がコイル開発を推進しています。

2) ブランケットと燃料循環技術

ブランケットは、核融合反応で発生する高エネルギー中性子を受け、中性子増倍の過程等を通して熱に変換すると同時に、装荷したリチウムと中性子の反応により燃料である三重水素を生成する重要なコンポーネントです。日本ではスタートアップ企業である Helical Fusion や京都フュージョニアリングらが液体金属ブランケットへの取組方針を示しており、京都フュージョニアリングは、「UNITY-1」プロジェクトで液体金属ループ試験などを実施し、模擬プラントでの発電技術の実証を進めています²⁶。Helical Fusion は助川電気工業と協力して液体金属ブランケット装置「GALOP」を開発し²⁷、ブランケットやダイバータ用試験を開始しています。また QST は、ITER のテストブランケットモジュール(TBM)開発を主導し、東芝エネルギーシステムズと三菱重工業がその製造・試験に関与しています。

燃料循環技術については京都フュージョニアリングが、核融合炉で使用される三重水素や水素同位体ガスの回収・分離・再利用を行う「フュージョン燃料サイクルシステム」を開発しています。また、QST 発のフュージョンエネルギースタートアップ企業である LiSTie や MiRESSO 等も燃料関連のリチウム回収や中性子増殖材関連のベリリウム製造技術の開発を進めています。これにより、核融合燃料の持続的な供給と経済性の向上が期待されています。

3) ダイバータとプラズマ対向装置

核融合炉の炉内(真空容器内)に設置され、プラズマに直接面する機器を「プラズマ対向装置」と呼びます。「プラズマ対向装置」にはダイバータや第一壁、リミタと呼ばれる機器があり、このうち核融合炉の真空容器内で最も過酷な負荷にさらされる機器が「ダイバータ」です²⁸。ダイバータは、核融合炉内部でプラズマと接触する部分であり、極めて高温の環境下で耐久性を維持する必要があります。

ITER では、その中でも最も過酷な環境に置かれるのが垂直ターゲット(内側・外側)で、タングステン製のブロック(モノブロック)を冷却水管に接合したプラズマ対向装置で構成されます。この分野では、三菱重工業、日立製作所が ITER 計画において、外側垂直ターゲット(OVT)製造を担当しています。住友電工グループのアライドマテリアルは、熱衝撃に強い高純度タングステンモノブロックを開発し、ITER ダイバータ部材として供給しています。また、大和合金が ITER 計画におけるダイバータの製造に関与し、金属技研も JT-60SA 用ダイバータカセットの製造を担当しています。

また、Helical Fusion は液体金属を用いてダイバータ機能を兼ね備えた革新的なブランケットを核融合科学研究所と協力して開発しています。これらの企業の技術開発により、ダイバータの耐熱性や冷却機能の向上が図られ、核融合炉のプラズマ排熱管理の実現に貢献することを目指しています²⁹。

4) 真空容器

真空容器は、プラズマを封じ込めるための密閉環境を提供します。東芝エネルギーシステムズが JT-60SA の真空容器の製造を担っており、高精度な真空技術を活用した炉の構築が進められています³⁰。なお、ITER の真空容器とは設計仕様に差異があり、ITER では放射線遮蔽機能を兼ね備えたより厚みのある構造体や全周・完全溶け込み溶接が求められるなど、異なる技術的要件が課されています。また、ITER の工学設計活動において実施された工学 R & D (Research and Development)では、1997年に実機大真空容器セクターモデル(現在の ITER の仕様とは異なるモデル)を製作し、開発に貢献しました³¹。

5) プラズマ加熱装置

核融合反応を実現するためにはプラズマを加熱する必要があり、複数のプラズマ加熱装置が開発されています。その一つが高周波を活用したジャイロトロンと呼ばれる装置です。ITER 向けの加熱装置製作では、キャノン電子管デバイスが国立研究開発法人量子科学技術研究開発機

構(QST)と共同で高周波を活用したジャイロトロンの開発・製作を行い、東京電子や JASTEC が ITER のジャイロトロンを運転するための高電圧電源システムや超伝導磁石を製作して ITER へ納入しています。特に、ジャイロトロンの開発では、京都フュージョニアリングが高度化開発や産業転用を推進し、英国原子力公社(UKAEA)やトカマク・エナジー(英国)等への納品実績を有しています。

もう一つのプラズマ加熱装置は、中性粒子ビーム入射加熱装置(NBI: Neutral Beam Injection)と呼ばれる、核融合実験装置内のプラズマに中性粒子の高速ビームを入射することでプラズマを加熱する技術です³²。QST は、ITER 用の加速器・高電圧電源の調達のための開発を行っています。これらの装置は日立製作所と連携して開発・製作しています。日立製作所は、ITER 用の加熱電流駆動用中性粒子ビーム入射装置(NBI)の実機製作に先駆けてイタリアで建設が進められている1MV 超高压電源試験施設の主要機器を製作するなど、ITER 計画のプラズマ加熱装置開発に貢献しています。加えて、Heliotron-E、JT-60、LHD などの NBI を納入するなど、約30年以上にわたり開発、製作を継続しています。中性粒子ビームは、ITER や JT-60SA における主要な加熱・電流駆動手段の一つとされており、日本の研究機関および産業界がその中核技術の開発と供給に深く関与しています。

6) 付帯技術と制御システム

核融合炉の運用には、冷却システム、中性子遮蔽体、絶縁材料など、多様な技術が必要とされます。これに関連する企業には、IHI(超伝導コイル冷却用のヘリウム循環ポンプ)、旭金属工業(冷却システムにおける銅メッキ技術)、安藤ハザマ(中性子遮蔽材)、昌立工業(絶縁材料)が挙げられます。これらの企業は、それぞれの専門分野において核融合炉の安定稼働を支える基盤技術の開発・提供をしています。また、NTT(AI を用いたプラズマ制御システム)は QST と共同で、AI を活用したプラズマ制御技術の開発に取り組んでいます³³。

(4) プラントインテグレーション

核融合に関連する技術は多様ですが、そういった多様な技術を使って、核融合炉という工学的な「成果物」に仕上げなければなりません。核融合プラントにおいては多様な要素技術をスムーズに統合し、相互に連携させることが重要で、インテグレーターが存在が不可欠です³⁴。海外では、民間スタートアップや国営企業がインテグレーター役を担おうとしており、国内でも炉開発型スタートアップがその役割を担おうとする動きがみられます。インテグレーターが開発の中心となり、核融合炉の部品・材料メーカーがインテグレーターと協力してプラント開発を実現していくのが、国内外のフュージョンエネルギー業界で進展する可能性があります。

(5) 大学・研究機関の取組³⁵

日本国内の大学や研究機関では、フュージョンエネルギーの実現に向けた多様な研究が進められています。QST は、ITER 計画や幅広いアプローチ(BA)活動を推進する国内の中核機関として、茨城県那珂市の那珂フュージョン科学研究所でトカマク型超電導プラズマ実験装置 JT-6

OSA を運用し、プラズマの研究を進めています。また、青森県六ヶ所村では、ITER で試験が予定されているテストブランケットモジュールの安全試験も実施されています³⁶。IFMIF 原型加速器(LIPAc)の開発は、高周波四重極線形加速器(RFQ)による長パルスビーム加速試験を2024年6月に完了し、最終段階の超伝導加速器の試験に向けた準備作業を進めている段階です³⁷。

大学共同利用機関法人自然科学研究機構の基盤機構である核融合科学研究所(NIFS)は、世界最大級の大型ヘリカル装置(LHD)を運用し、プラズマ物理やフュージョンテクノロジーの研究を推進しています。NIFS では、超高温プラズマの閉じ込め性能の向上、プラズマと壁材の相互作用の研究、長時間運転に向けた技術開発等が進められています。

大学の取組としては、大阪大学レーザー科学研究所が、大型レーザー実験装置「激光 XII」を活用し、レーザー核融合技術の研究を進めています。レーザー核融合は、慣性閉じ込め方式を用いた技術の一つであり、極めて高いエネルギー密度環境を生成することで、短時間での燃焼を目指しています。

さらに、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、九州大学、総合研究大学院大学など、多くの大学がフュージョンエネルギー関連の研究に取り組んでいます。これらの大学では、プラズマ物理や核融合材料の研究だけでなく、シミュレーション技術を活用したプラズマ制御や核融合炉の設計、AI を用いたプラズマの予測モデリング等の研究が進められています。特に、東京大学は ITER 計画におけるシミュレーション研究や、核融合炉ブランケットの研究に貢献しており、京都大学や九州大学では、プラズマ理論や先端計測技術の開発が進められています。

このように日本国内では、QST や NIFS といった国立研究機関を中心に、大学や国際プロジェクトと連携しながらフュージョンエネルギー研究が推進されています。また政府の支援のもと、研究施設の高度化や次世代の研究者育成も積極的に進められており、技術の確立と実用化に向けた取り組みが加速しています。

4. 我が国におけるフュージョンエネルギー開発の安全確保に係る検討状況

4.1 フュージョンエネルギー開発とルールの必要性³⁸

フュージョンエネルギーの開発に必要な機器の性能や設計は、安全規制の枠組みによって大きく影響を受けます。そのため、イノベーションを促進させる民間企業の参入を促し、産業化・商用化を進めるためには、安全規制の整備をできる限り早い段階で取り組むことが重要です。内閣府では、フュージョンエネルギーの産業化に向けた国家戦略として「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」を策定し、その実現に向けた安全確保の基本的な考え方を検討するタスクフォースを設置しました。このタスクフォースは、技術者や規制の専門家、産業界を構成員とし、関係省庁の協力を得ながら、フュージョンエネルギーの実現に向けた安全確保の基本的な考え方をとりまとめ、パブリックコメントを経て、反映した後、諮問を受けたイノベーション政策強化推進のための有識者会議「核融合戦略」にて、2025年3月承認されました。

フュージョンエネルギーは、燃料供給を停止すれば核融合反応が停止することや、核分裂炉の高レベル放射性廃棄物のように長期に亘り放射能が高く、地層に処分を要するような放射性廃棄物を発生させない等、核分裂炉と比較して高い安全上の特徴を有しています。しかし、産業化・商用化の際に装置を建設するためには、安全確保の観点から適切な規制の整備が不可欠です。それらは、「フュージョンエネルギーの実現に向けた安全確保の基本的な考え方」より、主に以下の4点に基づくとして記載されています。

(1) 安全確保の原則

フュージョン装置は、放射線を発生し、または三重水素等の放射性物質を内蔵することから、国際放射線防護委員会(ICRP)の勧告に基づく「正当化」「防護の最適化」「線量限度の適用」といった放射線防護の基本原則を踏まえた安全対策が必要です。安全対策のアプローチとしては、将来の装置において、通常運転時および事故時における人と環境への影響評価を実施し、被ばく線量を可能な限り合理的に低減(ALARAの原則:As Low As Reasonably Achievable)することが有効であると考えられています。

(2) 科学的・合理的なアプローチ

装置の設計や実装される技術は多様であり、研究開発段階での知見の蓄積と共に、装置の形式やリスクに応じた規制(グレーデッドアプローチ)を適用することが適当とされています。また、規制当局も、事業者の研究開発等の検討状況に合わせてアジャイルに対応し、安全性に関する情報や実証データを共有しながら、透明性のある安全規制の構築を進める事が適当であるとされています。

(3) 安全確保の枠組みに係る早期の検討

パイロットプラントや原型炉の建設は2030年代を目標とされていることから、事業者が装置設計を具体化する初期段階から、規制当局とリスクの共有や安全対策に関する対話を開始することが重要です。米国等諸外国では、早期の制度設計が進められており、日本においても規制手続きの明確化と関係機関との連携強化が必要とされています。

(4) 国際協調の場の活用

G7やIAEA、Agile Nations ワーキンググループ(WG)⁸等の国際枠組みにおいて、各国間で安全確保の考え方や規制アプローチの共通化に向けた議論が進められています。2023年10月のAgile Nations Fusion Energy WGによる共同勧告や、G7プーリア・サミットでの首脳コミュニケにも「一貫した規制アプローチへの取り組み」が明記され、IAEAも国際的な規制当局の協力が有益であると指摘しているとされています。今後も、国際協調の枠組みを積極的に活用することで、知見共有と整合的な制度設計が求められます。

4.2 原子力・放射線に関する現行の規制枠組み

4.2.1 原子力基本法とフュージョンエネルギーの位置づけ

日本における原子力発電および放射線利用は、主に核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(以下「原子炉等規制法」という。)や「放射性同位元素等の規制に関する法律(以下「RI 法」という。)等の法規制によって管理されており、核分裂炉(原子力発電)と核融合炉ではその規制対象や適用範囲に違いがあります³⁹。

原子力基本法(昭和30年法律第186号)(以下「基本法」という。)は、日本の原子力政策の基本方針を定めた法律であり、原子力の研究、開発および利用を「原子力利用は、平和の目的に限り、安全の確保を旨として、民主的な運営の下に、自主的にこれを行うものとし、その成果を公開し、進んで国際協力に資するものとする。」ことを基本方針としています。同法第3条第1号において、「原子力」とは、「原子核変換の過程において原子核から放出されるすべての種類のエネルギー」と定義されており、核分裂反応だけでなく、核融合反応も含まれると解されます。

一方で、「核燃料物質」については、同法同条第2号及び同法に基づく核燃料物質、核原料物質、原子炉及び放射線の定義に関する政令(昭和 32 年政令第 325 号)第1条において、フュージョン装置に使用される三重水素は対象とされていないことから、基本法上の核燃料物質に三重水素は該当しません。加えて、基本法上の「原子炉」については同法第3条第4号において「核燃料物質を燃料として使用する装置」と定義されています。

トカマク型超伝導プラズマ実験装置 JT-60SA 等では、RI 法に基づく「放射線発生装置の一種の「プラズマ発生装置(使用する燃料は重水素)」として規制されています。

⁸ Agile Nations: 参加政府間の革新的な規制の実践に関する協力を促進することを目的とした政府間規制協力ネットワーク。

このように、フュージョン装置で使用される三重水素は「核燃料物質」の定義に該当しないため、基本法上の「原子炉」には含まれません。そのため、現行の原子炉等規制法は、基本法上の原子炉の運転や核原料物質及び核燃料物質の利用等を規制対象としているため、基本法上の原子炉や核原料物質及び核燃料物質の定義に該当しないフュージョン装置に関しては、規制の対象外となっています。なお、JT-60SAと同様に放射線発生装置の一種の「プラズマ発生装置」として、RI法の規制対象とする場合、現行のRI法では燃料として許可されていない三重水素をプラズマ発生装置でも燃料に出来るようにする必要が生じることとなります。

4.2.2 現行の規制体系

日本における原子力発電および放射線利用は、以下の法律によって規制されています。

(1) 原子炉等規制法(核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律)

原子炉の設置、運転、廃止措置等に関する規制は「原子炉等規制法」によって定められています。この法律は、主に核分裂を利用する原子炉を対象としており、核燃料物質(ウランやトリウムなど)を使用する施設に適用されます。一方で、フュージョン装置は三重水素を使用しますが、「核燃料物質」には該当しないため、原子炉等規制法の適用対象にはなりません。

(2) 放射性同位元素等の規制に関する法律(RI法)

RI法は放射性同位元素や放射線発生装置の製造、使用、廃棄等を規制する法律です。この法律は、放射性物質や放射線発生装置を取り扱う研究機関、医療機関、産業施設を対象としており、フュージョン装置もRI法の枠組みで規制される場合があります。例えば、JT-60SAは、重水素-重水素(D-D)反応を用いた実験を行っていますが、この過程では中性子、X線、三重水素(トリチウム)などが発生し、さらに構造物等の放射化によって二次的にさまざまな放射性同位元素(RI)が生成されます。これにより、同装置は「放射線発生装置」として、RI法の規制対象となっており、使用許可の取得が求められています^{h)}。科技庁告示においても、JT-60SAは「放射線発生装置」のうちの「プラズマ発生装置」に分類されています。ただし、この分類は「専ら重水素と重水素との核反応を行うものに限る」とされています⁴⁰⁾。一方で、核融合炉は重水素と三重水素との核反応を利用するものであるため、現在のRI法体系では「放射線発生装置」に分類されるかは明確に規定されていません。つまり現行のRI法では、DT反応を行うフュージョン装置が規制対象になっていません。そのため、DT反応を行うフュージョン装置を位置付ける規制の在り方の検討が必要となっています。

^{h)} LHDに関して、D-D試験中はRI法の対象であり、D-Dを使用しないプラズマ実験では電離則の適用対象となる。

(3) 電離放射線障害防止規則(電離則)

電離則は、労働安全衛生法に基づき、X 線発生装置や低エネルギー加速器等を規制しています。この規則は、主に労働者の放射線被ばくを防ぐための安全対策を定めており、フュージョン装置においても適用される場合があります。特に、フュージョン装置の運転に伴い発生する X 線の影響を考慮し、労働者の安全管理が求められます。

4.3 フュージョンエネルギー開発に関する安全確保の検討の経緯

4.3.1 これまでの国内におけるフュージョンエネルギー規制に関する議論の流れ

これまでのフュージョンエネルギー関連機器の規制のレビューに関しては、主に JT-60、JT-60U、トリチウムプロセス棟、フィッションチェンバー、および 1-MeV 負イオン源試験施設等のフュージョンエネルギー関連機器における法的議論が 1980 年代から現在に至るまで複数の段階を経て進められてきました。

具体的には以下のフュージョン装置に関して、安全規制に関する議論が行われました。

JT-60、JT-60U、JT-60SA:

トカマク型フュージョン実験装置として運用され、JT-60U では重水素を用いた実験を実施。JT-60 は労働安全衛生法、JT-60U 以降は RI 法の「放射線発生装置」として規制。

トリチウムプロセス棟(TPL):

大量の三重水素を取り扱う施設であり、RI 法に基づき規制されている。

フィッションチェンバー:

ウランを内蔵した中性子検出器であり、少量核燃料物質として「原子炉等規制法」の規制対象。

1-MeV 負イオン源試験施設:

水素負イオンを加速する装置で、X 線しか発生しないが、加速エネルギーが 1 MeV 以上であるため RI 法の規制対象。

特に ITER 誘致時(2000～2005年)には、国内サイト誘致の準備として、「ITER 施設の安全確保の考え方」(科学技術庁原子力安全局原子炉規制課)、「ITER の安全確保について」(原子力安全委員会)、「ITER の安全規制のあり方について」(原子力安全委員会)、「ITER の安全確保について」(文部科学省 ITER 安全規制検討会)の 4 書類が公的文章として制定されました(図 4-1)。

ITER のフランスでの安全規制は、フランスの Installation Nucléaire de Base (INB) 規制の適用を受け、原子炉と同等の安全規制が適用されました。

2023年には、規制に関する革新的な検討実施策に関する協力を促進するために設立された

政府間の規制ネットワーク「Agile Nations」に設置された国際的なWG(英国、日本、カナダ等)が共同でフュージョンエネルギーの規制枠組みに関する勧告を発表し、フュージョンエネルギー施設に関する規制枠組みをどのように構築するかについて、5つの勧告と、それを裏付ける2つのケーススタディがまとめられました。



エネルギーに関わる研究者やエンジニア、規制当局、起業家、ステークホルダー、政策立案者を対象としている。

Fusion Key Elements では、以下の6つのKey Elements から成り、そのうち「3. 安全、セキュリティと核不拡散」が規制に関係していることを以下に示す。

1. 研究・開発・実証(Research, Development and Demonstration)
2. 産業化(Industrialization)
3. 安全・セキュリティ・不拡散(Safety, Security and Non-Proliferation)
4. 国際協働(Global Collaboration)
5. 関係者の役割(Roles of Stakeholders)
6. 公衆関与、アウトリーチ、コミュニケーション(Public Engagement)

安全、セキュリティと核不拡散

フュージョンプラントの安全規制とセキュリティは、連鎖反応が起きず、即時に停止するといった固有の特徴を考慮し、そのリスクに見合うものであることが必要である。発展に伴い、設計や規制監督を通じて拡散のリスクの低減も重要である。

【放射線安全の基本原則】

フュージョンエネルギーの成功的な展開には、安全で確実な設計が不可欠である。フュージョンプラントの安全性アプローチは、IAEA の安全基準シリーズ No.SF-1「基本安全原則」に準拠する必要がある。これは医療分野、発電、産業応用を含む、放射線リスクが生じるすべての状況に適用される。この枠組みにおける基本的な目的は、電離放射線の有害な影響から人々と環境を保護することである。SF-1の基本安全原則は、平和目的で使用されるすべての施設及び活動に、そのライフサイクル全体を通じて適用され、既存の放射線リスクを低減するための保護措置にも適用される。これらの施設及び活動には、放射性物質が生産、処理、使用、取り扱い、保管、または処分される場所で、保護と安全性の考慮が必要とされる規模のものが含まれる。したがって、これらの原則は、安全性の考慮が必要な規模で放射性物質を使用及び生産するフュージョンプラントにも適用できる。

IAEA 一般安全要件パート1-7は、安全性評価や規制の枠組みなどのトピックを扱う。一般安全要件は、フュージョン装置を含むすべての放射線利用に適用される。放射線リスクの評価と管理を担当する組織は、通常運転時及び事故時における人々と環境への放射線リスクを評価し、管理する必要がある。これは、設計、運転、燃料・廃棄物管理、解体・廃止措置を含む施設のライフサイクル全体に適用される。安全性の実証を支援するためには、モデリングと診断が必要となる。関係するすべてのシステムについて、設計プロセスの最初から安全対策を考慮することが不可欠である。フュージョンプラントの新規性により、様々なシステムの性能における不確実性を安全性分析で慎重に検討

する必要がある。技術に応じて、異なる物質の相互作用（例：リチウム、水）、放射性同位体、粒子エネルギーが予想され、考慮すべき様々な危険が生じる。フュージョンプラント設計者は、これらの原則を考慮して、可能な限り危険を低減し、放射性廃棄物を最小限に抑える必要がある。

【フュージョンエネルギーの規制アプローチ】

フュージョンの実験は、一部の IAEA 加盟国ですでに研究開発(R&D)のためにライセンスを受け、運転されている。今後、数年間で、設計者は最初のパイロット・プロジェクトやデモンストレーション・プロジェクトを生み出すことが期待されている。これらのプロジェクトが成功すれば、フュージョンプラントの広範な商業的採用へとつながる可能性がある。広範な商業的採用を検討している設計について、加盟国は現在、そのリスクに見合ったフュージョンプラントの規制アプローチを評価している。これらの評価では、フュージョンの固有の特徴（例：連鎖反応がないこと、電力喪失時の即時停止）、関連する放射性物質の特性、現場での放射性物質の管理を考慮に入れている。このアプローチは、IAEA の段階的な規制アプローチを反映している。

フュージョンプラントと放射性廃棄物の安全管理に関する要件とガイダンスは、国内の枠組みと関連する危険性に応じて、すでに存在するか、加盟国で開発中である。これらの要件とガイダンスは、安全性とセキュリティの両方に対応している。

IAEA は、技術と危険性に適したフュージョンエネルギーの安全要件とセキュリティガイダンスの開発に関して、規制機関を支援し、他の規制体制で行われてきたように、設計の成熟に伴う教訓の取り入れを可能にすることができる。規制当局間の協力は有益である。実現可能な場合、加盟国間での共通のアプローチと一貫した意思決定により、設計者が管轄区域をまたいだ申請、技術的解決策、正当性の根拠を修正する必要性が減少し、申請プロセスが効率化される。異なる規制アプローチが適用される場合でも、共通の用語と技術的事項に関する共通の立場は、すべての規制当局に役立つ。サイバーセキュリティなどを含む新たな技術的課題に関する継続的な規制に関する協力により、知識と経験を共有し、フュージョンプラントの規制がこれらの分野に適切に対応できるようになる。

IAEA などの国際機関は、類似の規制の枠組みを開発している加盟国間の二国間及び多国間の討議を促進することができる。IAEA における取組の一貫性と整合性を確保するための調整は、すべての加盟国のフュージョン規制構造の進展を支援する。IAEA がフュージョンに関する安全基準を開発する必要があるかどうかの決定は、フュージョンプラントが成熟するまで必要ない可能性がある。

産業標準化機関は、規制審査の効率化に役立つ共通の設計アプローチの開発において、役割を果たす可能性がある。

【フュージョンプラントの広範な商業化への移行】

これまで、フュージョンエネルギーの経験は R&D プロジェクトに限られていたが、フュージョンエネルギーの生産と商業化が将来的に予測されている。これにはフュージョンプラント(プロトタイプ、実証及び/または商業プラント)の建設が含まれる。

フュージョン技術の発展に伴い、規制機関は開発段階に適したプロセスを採用する可能性がある。例えば、段階的アプローチを使用して、各段階で異なるライセンス要件と監督を指定することが考えられる。安全性に関する意思決定を左右する違いには、放射性物質インベントリの増加、燃料の輸送・保管・処理、廃棄物処分のカテゴリーと量、一部の部品の能動的冷却の必要性などが含まれる。規制当局は、同種のプラントに対する審査とプロセスがより効率的になることを認識する可能性が高い。特に大量生産と急速な規模での広範な展開には、新しいライセンスのパラダイムが必要になる可能性がある。

【その他の危険性に関する考慮事項】

IAEA 及びフュージョンエネルギープロジェクトを調整する多くの加盟国の規制当局は、放射線安全とセキュリティに重点を置いている。フュージョンプラントは、システム内の高エネルギーと潜在的な有毒物質により、産業的及び職業的性質の追加的な潜在的危険性を有する。これらの危険性に関する詳細な議論は、本文書の範囲外。ただし、公衆とのコミュニケーションにおいて、フュージョンエネルギーのコミュニティは、作業員と公衆を保護するためにこれらの危険性を特定し、軽減する方法について議論することができる。

【核不拡散に関する考慮事項】

設計者は、トリチウムやリチウム6などのフュージョンエネルギーに関連する物質、解析コードなどの特定の技術に関する現行の核輸出管理体制に注意を払うことが重要である。核物質を処理、使用、または生産しないフュージョン設計については、IAEA は現在、該当する場合、加盟国から提供された情報の正確性と完全性に関する質問を解決するために必要なもの以外の保障措置は適用していない。既存の国際保障措置協定は、核物質を処理、使用、または生産する設計に適用される。フュージョンプラント設計に関する情報がさらに入手可能になるにつれて、IAEA 保障措置の範囲をフュージョンプラントにより広く適用すべきかどうかを確認するための更なる検討が必要である。

4.3.3 現行のフュージョンエネルギーにおける規制検討の進捗

これまでは既存の法制度の枠組みの中で、既存のフュージョン装置に対する安全確保の検討が行われてきました。しかしながら、今後は商用炉の実現を見据えた新たな安全確保の枠組みを整備することが課題となっています。

以下は、「【参考資料】フュージョンエネルギーの実現に向けた安全確保の基本的な考え方」(令和7年3月25日、内閣府「核融合戦略」有識者会議決定)に係る資料に記載されたものを原文に基づき引用した文章です⁴³。フュージョン装置の安全規制の検討に向けて、その前提となる指針として、「安全確保の基本的な考え方」を策定し、今後検討すべき課題が検討されました。

今後検討すべき課題

※今後の技術開発動向や国際動向等も踏まえ、検討。 ※議論の情報共有・透明性を確保し、社会的に受容されるものである必要。

1) 法的な枠組み

- 研究開発を進める事業者においてフュージョン装置の概念や考慮すべき安全上のリスク等がある程度整理された段階で、フュージョン装置の特性を十分に考慮して、安全確保のために規制が必要となる項目を整理する必要。
- 規制の検討に際しては、現行の規制関連法における規制や手続の差異に加え、フュージョン装置の規制に必要となる項目を踏まえた適用すべき法体系を丁寧に整理する必要。
- 原型炉や商用スタートアップが対象となる「パイロットプラント」※に関しては、持続的な核融合反応を起こす能力を有すること等も想定されることから、将来的には規制の法体系の在り方も含めて検討する必要。
- しかしながら、これを待たずに新たなフュージョン装置が建設される段階においては、現存するフュージョン装置と同程度のリスクであれば、当面は、現行の RI 法の対象として、RI 法に基づく対象設備要件の範囲での規制を継続することが適当と考えられる。なお、その場合であっても、装置の形式や技術の多様性を考慮し、個々のフュージョン装置において想定されるリスクが一律ではないことに留意した適用を検討する必要。

2) 安全確保の枠組みを検討する体制

- 技術の進展や国際的な動向も踏まえつつ、フュージョン装置の科学的・合理的な規制を検討するに当たって、規制官庁も含めた政府の体制を強化することが不可欠。
- 推進と規制の分離を図りつつ、政府と事業主体等が継続的に情報共有・対話を行う場も必要。政府と事業主体等のステークホルダーの積極的な協働を促す仕組みを設けることが求められる。

- 関係者はもとより、広く国民に対しても情報共有を適切に行うことで、議論の透明性を確保し、社会的に受容されるようなものとするのが求められる。

3) 知見の蓄積

- フュージョン装置に研究開発段階であっても、将来のフュージョン装置の安全確保の検討に当たっては、ITER 誘致時の議論に加え、新たな知見の獲得の観点から、開発を進める事業者と規制当局の双方が安全性に関する知見の収集や研究を推進する必要。
- 三重水素、材料の放射化、放射性廃棄物等に係るリスク・ハザードについて、引き続き検討するとともに、安全性に関する研究を推進。
- 関連学会等の議論や国際動向を踏まえたリスク評価手法を早期に確立することが重要。

4) セキュリティと不拡散

- IAEA「Fusion Key Elements」によれば、フュージョン装置に係る安全規制やセキュリティは、連鎖反応が起きず、即時に停止することから固有の安全性を有し、そのリスクに見合うものとなる必要があることを指摘。
- 今後の検討の進展に伴い、設計や規制整備を通じて放射性物質の拡散リスクの低減を図ることの重要性も指摘。
- フュージョン装置に係るセキュリティや不拡散に係る取組についても、今後適時の対応等も踏まえた検討を行う必要。

5. フュージョンエネルギー関連技術の安全保障貿易管理の総論

5.1 フュージョンエネルギー関連技術の安全保障貿易管理の現状

5.1.1 日本の安全保障貿易管理

安全保障貿易管理制度は、日本における安全保障上の懸念主体への武器や軍事転用可能な貨物や技術(ソフトウェアも含む)の移転の防止のために、外国為替及び外国貿易法(外為法)に基づく規制対象の技術の提供や貨物の輸出を行う際の経済産業大臣の事前許可の取得が必要な制度です。外為法は日本において国際合意に基づき実施されており、リスト規制およびキャッチオール規制により具体的な貨物および技術の取扱いが厳しく管理されています(図 5-1)。輸出を行う企業には、これらの規定を遵守し、該当項目の判定および輸出管理を適切に実施することが求められています。

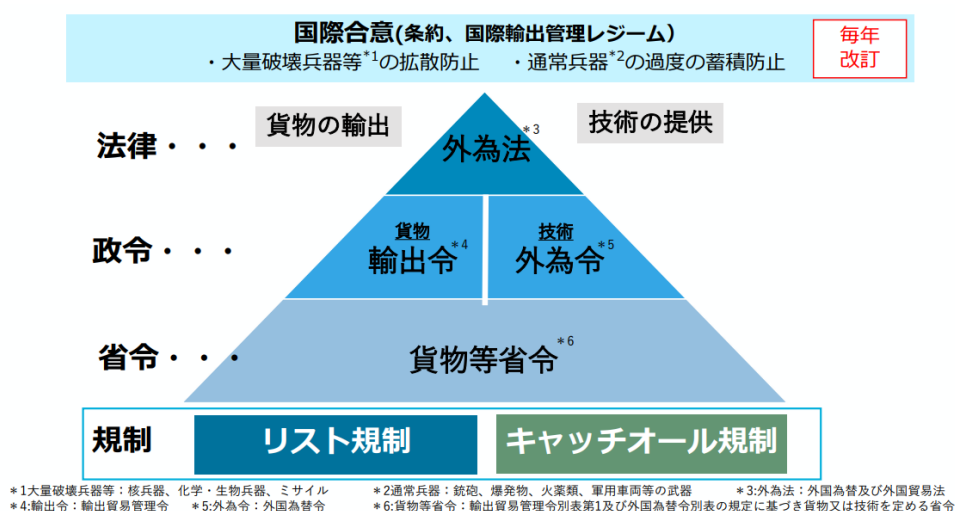


図 5-1 日本における安全保障貿易管理制度の全体像⁴⁴

リスト規制：

国際的な合意を踏まえ、武器並びに大量破壊兵器等及び通常兵器の開発等に用いられるおそれの高いものを法令等でリスト化して、そのリストに該当する貨物や技術を輸出や提供する場合には、経済産業大臣の許可が必要になる制度⁴⁵

キャッチオール規制：

リスト規制に該当しない貨物や技術であっても、大量破壊兵器等や通常兵器の開発等に用いられるおそれがある場合には、経済産業大臣の許可が必要になる制度

5.1.2 適切な安全保障貿易管理のために

経済産業省の「安全保障貿易管理ガイダンス[入門編]」においては、一般に企業における業態や企業規模、従業員数等の各社の実情に応じて、輸出管理に係る各部門(又は担当者)の役割等を定める⁴⁵こととされています。したがって、フュージョンエネルギー関連企業等は、その規模や取り扱う製品・技術に合わせて適切な体制を各社で構築することが必要です。さらに、最も重要なことは、輸出に関わる法務・技術・営業担当等一人一人が当事者として、安全保障貿易管理を理解し対応することです。

フュージョンエネルギー関連の貨物や技術が現行のリスト規制に該当するかどうかの判断(該非判定)においては、経済産業省が公開しているマトリクス表⁴⁶の最新版を参照して規制対象となる可能性のある貨物や技術を抽出し、必要に応じて安全保障貿易情報センター(CISTEC)が公開するガイドライン等を参考にしながら確認することが必要です。この際に、たとえフュージョンエネルギーの利用に向けて開発された貨物や技術であっても、大量破壊兵器、通常兵器に転用可能な貨物や技術は規制対象として当てはまる可能性があることを念頭に置く必要があります。

安全保障貿易管理は、高度な貨物や技術が大量破壊兵器、通常兵器に転用されることを回避し適切に運用されるための規制です。フュージョンエネルギーに関わる企業は安全保障貿易管理の意義を適切に把握し、各社の責任のもとで確実に安全保障貿易管理に取り組む必要があります。

5.2 フュージョンエネルギー関連技術の輸出における企業の取組

5.2.1 企業 A の安全保障貿易管理(企業ヒアリング結果より)

(1) 安全保障貿易管理の体制および取り組み

社内の安全保障貿易管理体制として、輸出管理部門の配置、各技術部門等の輸出管理に関連する部門から委員を選出した輸出管理委員会の設置、各部門での輸出管理キーパーソンの指名を実施しています。さらに社外活動としては、CISTEC の委員会へ参加しており、ガイドラインの改訂等に協力をしています。

安全保障貿易管理の取組としては、取引審査や該非判定を行う仕組みを整備しています。特に効果的な技術提供管理を実施するために、適切な該非判定の単位を検討しており、リスクが高い分野においては判定単位を細かくし、漏れがないように行い、リスクが低いと考えられる分野では「とある貨物の設計、製造又は使用に関する技術一式」に対して該非判定を行っています。他にも、社則類の制定や内部監査、経済産業省への許可申請・更新の手続き、定期的な教育訓練、ヒヤリハット事例の共有、STC 試験(CISTEC が実施する安全保障輸出管理実務能力認定試験)の受験・認定取得等を実施しています。

(2) 安全保障貿易管理を実施する上での留意点

海外に所在する企業と連携してビジネスを進める際には、当該企業の所在国における安全保障貿易管理規則も順守する必要があります。例えば、米国輸出管理規則(EAR)は、一定の品目について、米国から外国への輸出だけでなく、日本等第三国から外国への再輸出(Reexport)も規制しています⁴⁷。そのため、各国の要求事項を確認し、必要に応じて適切な輸出管理体制(人員配置、許可取得)を整備することが求められます。また、法令要求だけではなく、企業内自主管理の一環として、パートナーの要求事項を考慮したチーミングを行う必要が生じる場合があります。

海外案件の入札では、規制技術を含む ITT (Invitation To Tender)の技術図書を受領する際に最終用途証明書(End User Certificate)を提出し、顧客の所在国の規制当局から輸出許可を取得しなければならないため、ある程度の時間を要します。また逆に規制技術を含む技術提案書を海外所在企業(海外にある自社グループ会社を含む)に共有又は提出する際には、経済産業省への輸出許可申請及び許可取得を行うため、十分な時間を確保する必要があります。

リスト規制対象品目を輸出する際には、輸出許可を取得するために「個別許可申請」または「包括許可申請」のいずれかを行います。「個別許可申請」は、特定の契約ごとに許可を申請する方法です。「包括許可制度」は輸出者等自身が輸出管理体制を整備し、審査機能を自主管理の下で担える場合には、個々の契約ごとに個別許可を申請することなく、一定の範囲について包括的に許可を受けることができる制度です⁴⁵。特定の品目を特定の仕向地へ継続的に輸出する場合には包括許可を活用することで、効率化を図ることが可能です。ただし、包括許可は品目と仕向地の組み合わせによって適用範囲が限定されているため、事前に確認が必要です。

5.2.2 企業 B の安全保障貿易管理(企業ヒアリング結果より)

(1) 安全保障貿易管理体制および取り組み

企業 B では、法令に基づき「安全保障輸出管理プログラム」を作成し、社内部門で内規等を策定した上で運用しています。また、このプログラムは、経済産業省で確認された上で、経済産業省の定期的な査察を受けることとなっています。安全保障貿易管理体制として該非管理責任者、輸出管理責任者、輸出業務最終責任者が部門毎に設定されています。輸出業務最終責任者は部門に一人ずつ配置され、また輸出管理責任者は部ごとに1人、該否管理責任者は課ごとに1人指名されています。さらに法務部として輸出管理を担当する人員が配置され、システムの管理や許可等を担当しています。

安全保障貿易管理の取組としては、オンライン・対面を含めて年に2,3回の社内教育が実施されており、安全保障貿易管理に関する基本的な内容や、実務的な手続きの方法、米国を例とした事例等の教育が行われています。さらに、2～3年に1度、内部監査により輸出管理手続きについて見直す体制が構築されています。

(2) 安全保障貿易管理を実施する上での留意点

海外輸出の際には、輸出先毎に輸出規制、核拡散、兵器利用等の制限をクリアしなければなりません。国内法令のみならず輸出相手国の法令も網羅的に確認し、最終的に輸出許可を受けるために十分な時間や人員を確保する必要があります。

企業 B の現行事業は一定数量の重水素の製造輸出に留まるため、国内のリスト規制における「重水素・重水素化合物の製造装置等」の項目を参照することで国内規制の該非判定に複雑な対応は要していません。しかし今後フュージョンエネルギー関連事業の規模が増大する際には、特定の材料について輸出量が指定量を超える場合に経済産業省の許可が必要となる可能性があるため、輸出関連の大きな事業を企画する際には注意が必要です。

輸出関連事業の開発企画にあたっては、通常は重水素、三重水素、リチウム6等の材料の製造許認可をどの省庁が管轄しているのか、またどれほどの量の製造が認められるか等を調査した上で事業計画を立てますが、フュージョンエネルギー関連技術はまだ開発段階であるものが多く、輸出先の想定使用量の理論値と実際のプラントで必要となる量の差異について不明瞭な部分が大きいため、実態を十分に調査・算定した上で製造・輸出量の変動を考慮し、製造・許認可申請等の工程を調整する必要があります。

材料等の輸出においては案件ごとの輸出量、濃度等が異なるため、包括許可申請をすることができません。そのため個別許可申請手続きを前提とした工程管理が必要であることに注意が必要です。

加えてフュージョンエネルギーに関連する材料は今後世界的に不足することが考えられます。商業生産・輸出の際には、競争的確保による不均衡を避け、国家方針に配慮し慎重に輸出を検討する必要があると考えられます。

6. 世界主要国のフュージョンエネルギー開発・規制の状況と国際協力

6.1 米国のフュージョンエネルギー規制動向

6.1.1 米国のこれまでのフュージョンエネルギー規制

1954年米国原子力法において、米国原子力委員会(AEC, 現米国原子力規制委員会(NRC))が核分裂エネルギーの商用化のために以下の3つの放射性物質の取扱いについて規制することが定められました。

- 「特殊核物質」

プルトニウム、ウラン233、ウラン235が濃縮された物質を指します。濃縮されると核兵器の爆発物として使用される可能性があります⁴⁸。核融合施設においては、特殊核物質を製造または利用することはありません。

- 「原料物質」

天然存在比以上に濃縮されていないトリウム元素またはウラン元素を含む物質を指します⁴⁹。核分裂施設において特殊核物質の製造に不可欠なものです⁵⁰。

- 「副生成物材料」

特殊核物質の製造または使用の過程で生じた、または放射性となった放射性物質であり、ウランまたはトリウムを原料物質として処理する際に生じる物質を指します(特殊核物質を除く)。

特に上記の「副生成物材料」に対する規制は、2005年エネルギー政策法(EPAAct)によって粒子加速器で商業・医療・研究活動によって生成された放射性物質も適用対象となりました⁵¹。今後建設される一部の核融合施設では、核融合反応を開始するために副生成物材料に該当する外部から調達した三重水素が必要になる場合がありますが、施設稼働後は施設内で三重水素を生成できるため、副生成物材料の使用量は時間の経過とともに減少し、やがて完全になくなると考えられます。

米国ではこれまで、フュージョン装置を明示的に対象とする規制がなかったため、既存のフュージョン装置を上記の副生成物材料を生成する粒子加速器の一種として位置づけ、「副生成物の国内許認可に関する一般適用規則」(連邦規則集第10編第30項、10CFR Part30)に従い、規制を適用してきました。つまり、1954年原子力法による核燃料の使用や再処理過程で生成された「副生成物材料」に対する規制が、2005年エネルギー政策法(EPAAct)によって加速器に適用され、さらに核融合炉の放射性生成物に対しても拡大適用されていることを表します(副生成物アプローチ)。

実際、2005年エネルギー政策法や、10CFR Part30での粒子加速器の定義は、以下のよう
に核融合炉の特徴を含む形で記載されています。

- 2005年エネルギー政策法の粒子加速器の定義
「粒子加速器とは、電磁相互作用を通じて原子や核子等の粒子を加速させることにより、運動エネルギーを付与する装置のことである。」
- 連邦規則集第10編第30項の粒子加速器定義
「粒子加速器とは、電子、陽子、重陽子やその他荷電粒子を真空中で加速させ、かつ生成した粒子や放射線を通常1MeV 超のエネルギーで媒質へ発射する能力を持った装置のことである。」

米国は、上記の副生成物アプローチが放射線防護の観点からどこまでフュージョン装置を適切に規制できるかを検討し、その先の規制方法についても今後策定していく必要があることを認識しています。2019年に発行された「原子力技術革新・規制最新化法」(NEIMA)においては、商用先進炉施設を規制対象に含める形で技術包括的(technology-inclusive)な規制の枠組みを2027年末までに策定することを NRC に指示しています⁵²。

一方で2009年4月20日の NRC 委員向けスタッフ覚書(以下、「NRC スタッフ覚書」と言う)では、フュージョン装置を「使用施設」として扱うことによって、委員会がフュージョン装置に対する規制管轄権を行使できる可能性があると記載されています。使用施設に分類された施設は原子炉施設に対するいくつかの現行規制の適用対象となりますが、その規制については核分裂エネルギーを扱う原子炉に向けて厳しく設計されており、放射性物質の拡散や放射能汚染のリスクが比較的小さいフュージョン施設に対してそのまま適用するのは不相当とする意見もあります。

NRC スタッフ覚書においてフュージョン施設を使用施設として扱うためには、(1)フュージョンエネルギーが米国原子力エネルギー法(AEA)において「原子力エネルギー」に含まれること、または(2)核融合反応プロセスが国家の防衛・安全保障にとって重要である、もしくは公衆の健康と安全に大きな影響を与える可能性があることを確認しなければならない、と述べられています。(2)については、現在のところフュージョン装置は前述のとおり国家の防衛および安全保障にとって重要なものではなく、公衆の健康と安全への影響は、それぞれ放射性物質や副生成物材料を規制する現行規制の範囲に留まるため、その対象とならないと考えられます。

対して(1)について考えると、AEAにおいて原子力エネルギーは「核分裂または核変換の過程で放出されるすべてのエネルギー」と定義されており、「フュージョン」はAEAにおける「原子力」の定義に含まれると考えることができます。実際、米国議会はこれまで「核変換」には核融合反応を含むと捉えてきました⁵³。

さらに米国議会は、AEC(現 NRC)の「特殊核物質」の定義を、将来的にフュージョンエネルギーに関する物質を含められるほど広い定義にしています。ただし現在のところは、核融合発電に使用できる物質は特殊核物質には含まれません。

- NRC 自身の特殊核物質の定義(2019/2/19更新)

特殊核物質の定義には、委員会が特殊核物質であるとする物質を含みます。NRC はプルトニウムとウラン以外の物質を特殊核物質と宣言していません。

今ではホウ素、水素、三重水素、重水素等、多種多様な物質が核融合反応プロセスでの商業利用に向けて研究されているため、フュージョンエネルギーに使用する物質を今後「特殊核物質」とするには、NRC は広範な物質を網羅的に調査する必要があります。

したがって NRC は、今後のフュージョン装置が「国家の防衛・安全保障にとって重要である、もしくは公衆の健康と安全に大きな影響を与える可能性があるほどのエネルギーを使用・生産するようになった場合に限り、AEA に基づく「使用施設」として商業用フュージョン装置に対する管権を行使する可能性があります⁵⁴。

ただし、フュージョン施設に対して核分裂施設と同様の基準を課すと、フュージョン施設には存在しないリスクに対処するための、コストがかかる規制要件が制定される可能性があります。

6.1.2 米国のフュージョンエネルギー規制策定方針

米国では、フュージョン装置に対して適用可能性ある規制として、これまでに以下の3つの方針が検討されました⁵⁵。

1. 「使用施設アプローチ」

使用施設アプローチは、フュージョン装置・施設に対して原子炉関連施設に対する現行規制である「生産及び使用施設の国内許認可」(連邦規則集第10編第50項、10CFR Part 50)、「原子力発電所に関するライセンス、認証、および承認」(連邦規則集第10編第52項、10CFR Part52)に加え、策定中の「革新炉のためのリスク情報に基づく技術包括的な規制枠組み」(連邦規則集第10編第53項、10CFR Part53)を適用する方針を表します。放射性物質の拡散・汚染リスクや、長期的な廃棄物管理による財政リスクが原子炉よりも限定的なフュージョン装置に対しては、過大な規制となる可能性があります。

2. 「副生成物アプローチ」

副生成物アプローチは、フュージョン装置に対してその副生物材料を規制の対象とし、「副生成物の国内許認可に関する一般適用規則」(連邦規則集第10編第30項、10CFR Part30)を引き続き適用する方針を表します。現行の規制ではフュージョン装置が明示的に定義されていないため、副生成物アプローチを採用する場合はその法的定義を見直し、必要に応じて規則を改訂する必要があります。

3. 「ハイブリッドアプローチ」

ハイブリッドアプローチは、上記の使用施設アプローチと副生成物アプローチを組み合わせ、ある範囲までは副生成物アプローチを適用し、それ以上について使用施設アプローチを適用する方針を表します。十分な検討によって副生成物アプローチの適用可能範囲を

適切に設定する必要があります。

当初ハイブリッドアプローチを推奨する動きが原子炉安全諮問委員会(ACRS)や米国原子力規制委員会(NRC)に見られましたが、最終的には2023年4月に、副生成物アプローチが NRC 委員の全員一致で採択されました⁵⁶。

その後、副生成物アプローチに基づく核融合発電システム向けの規制枠組みの策定が NRC で進められ、2024年12月には、米国のフュージョン装置に関する規制フレームワークの骨子案が公表されました。

米国のフュージョン装置に関する規制フレームワークの骨子案では、フュージョン装置に関する規制フレームワークは可能な限り現行の 10 CFR Part 30 の要件(副生成物アプローチ)と一致させた上で、様々なフュージョン装置の設計を反映し、リスクを考慮して達成されるべき安全性や成果に基づいた規制フレームワークが提案されています。

具体的には、装置のライセンスを取得するための申請において、副生成物材料の管理検査、廃棄物処分、環境影響評価に関する定義と要件を見直し、フュージョン装置の規制に向けて規則を改正することが提案されています。

また「クリーンエネルギーの多用途かつ先進的な原子力展開の加速化法(ADVANCE 法: Accelerating Deployment of Versatile, Advanced Nuclear for Clean Energy)」の副産物材料の定義を反映するように、NRC の「副生成物材料」の定義を改正することも推奨されています。これは次節で述べる ADVANCE 法のフュージョン装置の定義を10 CFR Parts 20と30に追加し、対応して他の規制を改正することで、フュージョン装置と他の粒子加速器の規制上の処理を明確に区別する目的があります。加えて NRC スタッフは提案された規則のための規制ガイダンス案も策定しています。

フュージョン装置に関する規制フレームワークの骨子案は、90日の間パブリックコメントが募集され、2026年10月に最終規則発表、2027年末までに施行される予定です。

6.1.3 米国のフュージョン装置の法的定義

フュージョン装置を法的に定義するためのフュージョンエネルギー法(Fusion Energy Act)は、2024年2月29日に下院で「原子力推進法(Atomic Energy Advancement Act)」の一部として下院で可決されました。しかしその後、委員会の審議中に修正案として ADVANCE 法に包含され、ADVANCE 法は「火災補助金及び安全法(the Fire Grants and Safety Act)」の一部として2024年5月8日に下院で、2024年6月18日に上院で可決しています⁵⁷。これによって1954年原子力法が改正され、以下のような粒子加速器としての「フュージョン装置」の新しい定義が追加されました。

- 1954年原子力法に追記された核融合炉の定義

フュージョン装置は、核融合反応によって原子核を別の元素へと転換させ、かつ粒子、熱、電磁放射線を含む生成物を直接取り込んで利用する能力を有する粒子加速器のことである。

そのほかの米国内の動きとして、マサチューセッツ州では2022年にフュージョンエネルギーをクリーンエネルギーとクリーンエネルギー研究の定義に含める法律が可決されました⁵⁸。同州は、フュージョンエネルギーを州の再生可能エネルギーポートフォリオ基準に含めるための法案も2023年に可決しています⁵⁹。またカリフォルニア州政府は2023年10月にフュージョンエネルギーと核分裂を法律上で区別し⁶⁰、ノースカロライナ州では2023年10月に「フュージョンエネルギー」を含む原子力をクリーンエネルギーの定義に含む「クリーンエネルギー促進法」が成立しています⁶¹。さらにバージニア州では、2025年3月にフュージョンエネルギーをクリーンエネルギーとして定義に加えました⁶²。

【コラム】Commonwealth Fusion Systems 社の規制策定関与に関するヒアリング

米国で構築された規制の議論は、アメリカ合衆国エネルギー省(DOE)と米国原子力規制委員会(NRC)とが、新しい核融合技術をどのように規制すべきかについて話し合う必要があると指摘したことから始まりました。CFS 社は、業界団体として初期段階からこの議論に参加し、規制アプローチの検討を進めてきました。NRC の初会合において、NRC メンバーは核融合技術をどのように規制すべきか見当がついておらず、まずは規制方針を決定することが必要でした。この時、業界からの合理的な提案と、一貫した業界の立場を示したことが極めて重要でした。また、NRC からリスクプロファイルの低いフュージョンエネルギーに対して核分裂技術と同じ規制の枠組みを適用することは適切でないと理解を得ることで、その後のフュージョンエネルギー産業の拡大に大きく寄与したことも重要な事項の一つでした。

規制策定に向けた議論では、他の企業と協力して、世界で先行している既存の規制体制とフュージョン装置のリスク特性を分析し、ほぼ全ての規制方針の選択肢を検討することで、フュージョン装置に最も適した規制枠組みを決定しました。最終的には、必要に応じて変更や追加が可能な形で、粒子加速器の規制に基づいた枠組みを作ることが最適であると判断しています。また、装置の特性を考慮した規制の検討も重要であると考えています。例えば ITER では、核分裂炉の基準に基づき、民間のフュージョンセクターや建設中の設備の種類等が考慮されなかったため、法整備が長期化し、フュージョン装置に関する法整備では英国、米国が先行しました。

規格については、SPARC(CFS 社が開発を進めるトカマク型フュージョン装置)建設にあたって、ゼロからトカマク型フュージョン装置に適した規格を構築しています。フュージョン装置は電機システム、エネルギー貯蔵システム、機械システム、医療、宇宙産業の低温技術、有毒ガス管理技術、放射線管理技術など既存の産業技術を活用した装置であるため、これらの分野の専門家を招き、各業界から安全で信頼性の高いシステム設計を学びました。その知見を基に、安全性と信頼性を重視した規格体系を構築しようとしています。また、「code of record(和訳:記録コード)」と呼ばれる仕組みを構築し、過去の取り組みや基準を参考に適用可能な規則を見極め、規制当局と協力してトカマク型フュージョン装置向けの機器要件(構造基準・土木基準・圧力容器基準)、電気要件(一般電気基準・エネルギー蓄積基準)、制御要件(サイバーセキュリティ基準・産業制御基準)、環境要件(汚染基準・放射線労働安全基準)を定めた規則・基準を整備しました。以降のプロジェクトでは、この「記録コード」を参照することで、規則・基準への円滑な対応が可能になります。

ここで、フュージョン装置に関する規制策定において重要な考え方が二つあります。

一つは、上記でも示した通り原子力施設に関する規則や基準に基づいてフュージョン装置に関する規則を作成し、後から見直していくような運用は避けるべきということです。原子力施設に関する規則と基準に基づいてフュージョン装置向けの規則を構築していく過程は、米国において約40,000の適用可能な規則と基準を考慮する必要があるため、日本においても同様に非常に煩雑と考えられます。したがって、技術とリスクに見合った適切な規範と規格をゼロベースから始め、必要に応じて後から補完し発展させるべきです。

もう一つ重要なことは、作業に関する規則や基準がフュージョンエネルギーの開発を妨げないようにすることです。フュージョン装置の開発に取り組んでいる開発者の中には、設計や建設を始める前に

完全な規則や基準が必要であると考える人もいますが、実際はそうではありません。歴史を振り返ると、初期の原子力発電所は1950年代初めに稼働しましたが、米国機械学会(ASME)は1963年まで最初の基準を発行せず、原子力発電所の稼働開始と最初の基準の発行に約10年のギャップがあります。米国の産業界は完全に設計されたコードや基準がない中で、ASME の Section 8を改良し、新しいルールや基準を導入していくことで原子力施設を建設・運営してきました。したがって、技術がまだ構築されていない段階で開発を制限する規則や基準は必要ではないのです。

CFS 社が産業団体として業界側から規制当局に合理的な道筋を提示したことは、大変意義がありました。日本でも、国内の産業団体が規制に関する議論において一貫した立場を規制当局に示すこと、また、包括的な視点から規制について考察することが極めて重要だと考えています。

6.2 英国のフュージョンエネルギー規制動向

6.2.1 英国のこれまでのフュージョンエネルギー規制

英国は米国と同じく、これまで核融合炉を明示的に対象とする規制がなく、放射性物質や放射線発生装置を対象とする規制を既存のフュージョン装置に対して適用してきました。規制当局としては環境庁(EA : Environmental Agency)と健康安全庁(HSE : Health & Safety executive)の2つがあります。なお1971年原子力施設規則(1971 Nuclear Installations Regulations)において原子力施設の定義は「核分裂反応を基礎とする原子炉」としていることから、核分裂施設の規制を実施している原子力規制局(ONR : Office for Nuclear Regulation)の所管ではありません。現在のところ核融合施設は、環境庁 EA の環境許可規則(Environmental Permitting Regulation)や安全衛生庁 HSE の職場における保険安全法・人口放射光管理規則・電磁場管理規則、電離放射線規則、放射線緊急事態準備及び情報公開法等に従って規制されています。

6.2.2 英国のフュージョンエネルギー規制策定方針

英国は2040年代初頭のフュージョンエネルギーによるエネルギー供給を実現するため、「エネルギー生成のための球状トカマク」(STEP, Spherical Tokamak for Energy Production)という国家計画を掲げています。この計画に基づき、英国の規制改革に関する諮問機関である規制ホライゾンス評議会(RHC)は2021年6月に「フュージョンエネルギーに関する報告書」を公表しています。報告書ではフュージョンエネルギーを対象とした英国の規制の方向性として、以下の3つの選択肢が検討されました。

- 選択肢 A
従来方法のままフュージョン装置の規制は環境面に関して EA、安全面は HSE が管轄する。
- 選択肢 B
安全面について原子力規制局 ONR が新たに管轄し、環境面は従来通り EA が管轄する。
- 選択肢 C
新たな規制当局を設置し、フュージョン装置に特化した規制を実施する。

また報告書中で RHC は上記3つの選択肢のうち、特に選択肢 A を推奨しました。

6.2.3 英国の核融合施設の法的定義

2010年10月、英国のビジネス・エネルギー・産業戦略相(BEIS)によって「フュージョンエネルギーに向かって：フュージョンエネルギーに関する規制枠組みについての英国政府による提案」が公開され、2か月にわたってこれに対する意見が募集されました。特に意見を募集した論点として、①仕事上および公衆の健康と安全、②環境保護、計画同意(planning consent)、③第三者責任、④放射性物質のセキュリティおよび保証措置、があります。

その後2022年6月には、「フュージョンエネルギーに向けて：政府による対応」が発表され、官・民主導を問わず将来の核融合施設に対しての規制方針は基本的に選択肢A(規制当局はEAとHSE)とし、必要に応じて権限を委譲された他の機関が対応することと決定されました。また同時にエネルギー安全保障法案を用いてフュージョンエネルギー施設を原子力規制及び許認可要件(NIA65)から除外するよう法律を改正する方針も示されました。

さらに2023年10月には、「フュージョンエネルギーに向けて2023：英国フュージョンエネルギー戦略の次段階」の発表と2023年エネルギー法の発効が重なり、英国はフュージョンエネルギーを明示的に対象とした規定を策定した世界初の国となりました。⁵⁶

6.3 ITER に対する規制状況(仏国)

ITER が立地している仏国において、フュージョンエネルギー施設を明示的に規制の対象とする法規制はこれまで整備されていません。一方でフュージョンエネルギー施設は、EU 指令、仏国の国内法、政令(décret)と省令(arrêté)、技術規制の決定事項(technical regulatory decisions)、原子力安全機関(ASN)による個別決定事項(resolutions)に従う必要があります。特に国内法においては、労働法典(Labour Code)、公衆衛生法典(the Public Health Code)、環境法典(the Environmental Code)等に核融合施設が規制対象として含まれます。

環境法典の第 L.593-2条、「原子力基本施設(INB)についての規定概要」において、核分裂を利用する原子炉、燃料サイクル施設、貯蔵施設、加速器、及び大量の放射性核種を使用する施設は全て原子力基本施設として定義されています。したがって使用する物質が核分裂性物質かに関わらず、放射性核種の保有量と放射能の大きさによって原子力基本施設に含まれるかが規定されます。

三重水素の場合は27g を超える量を保有する認可がある施設については原子力基本施設として認可を受ける必要があり、最大4kg の三重水素を保有する認可を受けている ITER も、原子力基本施設として認可を受けました。これは核分裂施設と同じ規制をフュージョンエネルギー施設にも適用することを意味しており、米国における「使用施設アプローチ」や日本における原子炉等規制法への該当に相当します。原子力基本施設の認可を受けたことにより、ITER は2012年11月に建設を承認され、原子力安全機関(ASN)の規制管轄となりました⁵⁶。ただし「使用施設アプローチ」は核分裂施設に対して適用することを前提とした厳格な規制であり、核融合炉に対しては過分に保守的といえます。そのため、その後の建設における規制対応が ITER の建

設コストを増大させ、結果として建設スケジュールが延長される一因になったと考えられています。

上記の「使用施設アプローチ」に相当する規制方針を ITER に適用した背景には、ITER 建設計画時にフュージョンエネルギー施設と核分裂施設がもたらすリスクの違いの認識がまだ不十分であり、ITER 計画を評価・承認する際に保守的に核分裂施設に対する既存の規制を適用する必要があったということに留意する必要があります。現在ではフュージョンエネルギー施設と核分裂施設の潜在的なリスクの違いについて検討が進んでいるため、その違いを踏まえてフュージョンエネルギー施設の開発・実装を妨げない安全確保の考え方の枠組みを策定することが重要であり、望まれています。

6.4 海外民間企業による開発動向

6.4.1 Commonwealth Fusion Systems 社(CFS 社)の開発動向

CFS 社は、米国のマサチューセッツ州にある民間企業であり、2025年3月時点で最も外部資金を調達しているフュージョンエネルギー関連スタートアップ企業です。マサチューセッツ工科大学(MIT)やビルゲイツ氏、Google 社等が出資し、調達額は20億ドルを超えています。CFS 社は MIT スピンアウト企業であり、これまでのトカマク型強磁場フュージョン実験装置に関する数十年の研究実績と、高温超伝導(HTS)磁石に関する画期的な技術を活用し、ITER と比較してより低コストで実現できる実験装置の開発を進めています。加えて CFS 社はその全ての研究成果について専門学術雑誌の査読を受けることで、同社の開発に関する科学的妥当性を担保しようとしています。現在 CFS 社は実際のトカマク型のプラズマ実証プラント SPARC の建設に取り組み、2026年に最初のプラズマを生成し、2027年までに臨界プラズマ(プラズマ出力がプラズマに注入される加熱入力を上回ること)を実証することを目標としています。さらにその先の目標として、2030年代早期に400MW の発電炉 ARC を建設することを掲げ、ARC の第1号炉の建設に関してバージニア州の電力事業者であるドミニオン・エナジー社と技術知見やリース権等で協力関係を結んだことを発表しています。さらに CFS 社は2025年2月、同じくフュージョンエネルギー関連スタートアップ企業である Type One Energy に対して HTS ケーブル技術を使用するライセンスを付与する契約を交わしたことを発表しました。このように今後 CFS 社は核融合炉の開発者としてだけでなく、核融合炉で使用される HTS 磁石の設計・製造企業としても世界のフュージョンエネルギー産業をリードしていくと考えられます。

6.4.2 TAE Technologies 社(TAE 社)の開発動向

TAE 社は米国のカリフォルニア州にある民間企業であり、2025年3月時点において世界で2番目に外部資金を調達しているフュージョンエネルギー関連スタートアップ企業です。Google 社や Chevron 社、住友商事(米州)等が出資し、調達額は12億ドルを超えています。TAE 社は磁場反転配位型(FRC 型)のフュージョンエネルギー装置を開発しており、最終的には中性子が発生しない水素-ホウ素11核融合方式の実現を目指しています。2022年にはTAE 開発の第5世代炉である「Norman」が7,500万℃のプラズマ温度を達成し、現在は第6世代炉である「Copernicus」で2020年代半ばに D-T 核融合の実現可能性を実証することを目指しています。その後は2030年代早期に第7世代炉「Da Vinci」で水素-ホウ素11核融合を実現し、350～500MW の発電とグリッド供給を行うことを目標として掲げています。

6.4.3 その他民間スタートアップ企業の開発動向

カナダのスタートアップ企業である General Fusion 社は衝撃波磁化標的型(MTF)型の核融合炉を開発しており、カナダ政府の支援によって英国カルハムにて2021年から実証炉の建設に取り組んでいます。カナダ政府系ファンド、ジェフベゾス氏(Amazon 社)、トバイアス・ルーク氏(Spotify 社)等が出資し、調達額は4億ドルを超えています。今後は2026年に臨界プラズマを実証し、2030年代早期には230MW 発電を実現することを目標に掲げています。

米国のスタートアップ企業である Helion 社は磁場反転配位型(FRC 型)の核融合炉を開発しており、サムアルトマン氏(OpenAI 社)等が出資し、調達額は6億ドルを超えています。2023年9月には米国最大手鉄鋼メーカーの Nucor 社と共同で500MW のフュージョンエネルギープラントを開発することを発表しました。今後は2028年までに500MW 以上の発電能力を持つ核融合炉を稼働させることを目標としており、生産した電力について Microsoft 社に供給する契約を既に結んでいます。

英国のスタートアップ企業である Tokamak Energy 社は、球状トカマク型の核融合炉の開発を進める企業です。球状トカマク型核融合炉に関して保有する特許数が多く、英国政府や古河電工等が出資して2.5億ドル超の資金を獲得しています。現在は米国エネルギー省(DOE)と英国エネルギー安全保障・ネットゼロ省(DESNZ)と共同で球状トカマク型核融合炉 ST40のアップグレードに取り組んでいます。ST40は民間企業として世界で初めて1億℃のプラズマ温度を達成しました。今後は2030年代に500MW の発電を米国で実現することを目標に掲げています。

米国のスタートアップ企業である Pacific Fusion 社は、ローレンス・リバモア研究所が開発した核融合炉概念に基づき、慣性閉じ込め方式の一種であるパルス磁気核融合での小型核融合炉の経済性実証を目指しています。米国のベンチャーキャピタルである General Catalyst が主導するシリーズ A 投資ラウンドにて9億ドルの資金を調達しており、今後は2030年代に商用炉を実現することを目標としています。

【コラム】Commonwealth Fusion Systems 社のプロジェクト円滑化に関するヒアリング

CFS 社は、小型実証プラント SPARC の立地選定プロセスにおいて長い時間を費やし、非常に広範な選定基準のうち重要なもの全てを、48州を対象に調査・検討しました。まずマグネット工場、本社、トカマク建設サイトを一つにまとめる場所を探す必要があり、また高額で複雑な新しい送電線の設置を避けるため、グリッドに相互接続できるインフラが既に整備された場所を選ぶことが重要でした。協力する MIT チームへのアクセスも考慮しました。さらに良好な労働力を有する企業、地域を探し出すことも非常に重要な事項でした。

加えて立地選定の際の重要な判断要素として、歓迎してくれるコミュニティの存在があります。CFS 社は全ての地元環境団体と直接面会し、フュージョン装置と原子炉の安全性の違いや、新しいクリーンエネルギーを提供できるようになることを複数回にわたって丁寧に説明しました。このように対話を重ねた結果として、公聴会やパブリックコメントでは特に大きな問題が提起されることはなく、地元コミュニティから理解と協力を得ることができました。

円滑なプロジェクト進行のためには、プロジェクトの初期段階から地元コミュニティに積極的に関与し、立場と目的をしっかりと伝えることが重要だと確信しています。

6.5 フュージョンエネルギー開発における国際協力

ITER 計画の他にも、フュージョンエネルギー開発分野ではいくつかの国際連携活動が取組まれています。国際会議体としては、国際原子力機関(IAEA)や国際エネルギー機関(IEA)の枠組みのもと、以下のような活動を実施しています。

- 核融合評議会(IFRC, International Fusion Research Council)
核融合評議会は IAEA が1971年に設立した核融合プログラムに関する事務局長の諮問機関です。年1回の会合を開催するとともに、フュージョンエネルギー開発分野に関する研究協力の促進や国際カンファレンスの開催、技術会合の開催、技術援助等を行っています。
- フュージョンエネルギー会議(FEC, IAEA Fusion Energy Conference)
フュージョンエネルギー会議は IAEA が1961年から開催するフュージョンエネルギー研究分野における最大規模の学術会議です。2年に1回開催され、次回2025年10月に第30回会議が中国で行われます。
- 核融合調整委員会(FPCC, Fusion Power Coordinating Committee)
核融合調整委員会は IEA 理事会により1975年に設立された委員会です。年に1度会合が開催され、フュージョンエネルギー開発分野に関する IEA の活動を調整し、IEA エネルギー研究・技術委員会(CERT)やその他の IEA 機関に対して核融合政策や技術問題についての助言を行っています。

また日本は、フュージョンエネルギー開発に向けて関係国との核融合協力に関する実施取決めに基づき、以下の情報交換・研究者交流・共同研究等の活動を行っています⁶³。

- 日米協力
2013年に締結した「日米エネルギー協力に関する実施取決」に基づき、日米核融合調整委員会(CCFE, Coordinating Committee for Fusion Energy)の協力会議を年に1回、実施しています。主要なメンバーとして米国エネルギー省(DOE)、米国 General Atomics 社フェロー、文部科学省研究開発戦略官(核融合・原子力国際協力担当)が参加し、フュージョンエネルギー研究開発における連携協力についての審議や、前年度の共同研究の報告及び当該年度の共同研究の提案・承認を実施しています。
- 日中協力
2007年に締結した「日中核融合協力に関する実施取決め」に基づき、日中合同作業部会(JWG, Joint Working Group in the Area of Magnetic Fusion Energy Research and Development and Related Fields)の会議を年に1回、実施しています。主要なメンバーとして中国科学技術部(MOST) Deputy Director-General, Department of International Cooperation、中国科学院プラズマ

物理研究所(ASIPP)Director、中国西南物理研究所(SWIP)Director、文部科学省研究開発戦略官(核融合・原子力国際協力担当)が参加し、フュージョンエネルギー研究開発における連携協力についての審議や前年度の共同研究の報告及び当該年度の共同研究の提案・承認を実施しています。

- 日韓協力

2004年に締結した「日韓核融合協力に関する実施取決」に基づき、日韓核融合協力調整役会合(JCM: Joint Coordinators Meeting in Fusion Energy Research)を年に1回、実施しています。主要なメンバーとして韓国科学技術部(MSIT)Director, Nuclear and Fusion Energy Cooperation Division、韓国フュージョンエネルギー研究所(KFE)President、文部科学省研究開発戦略官(核融合・原子力国際協力担当)が参加し、フュージョンエネルギー研究開発における連携協力についての審議や、前年度の共同研究の報告及び当該年度の共同研究の提案・承認を実施しています。

- 日欧協力

1989年に締結した「制御核融合の分野における協力に関する日本国政府と欧州原子力共同体との間の協定」に基づき、日欧核融合協力調整委員会(CC: Coordinating Committee)の協力会議を年に1回、実施しています。主要なメンバーとして欧州委員会研究総局エネルギー局(EC DG-RTD)Director Energy Research、欧州 EURO fusion Head of ITER Physics Department Programme Management Unit、文部科学省研究開発戦略官(核融合・原子力国際協力担当)が参加し、フュージョンエネルギー研究開発における連携協力についての審議や、当該年度の協力活動のレビューを実施しています。

また、ITER プロジェクトにおける BA 活動も日欧協力の一環として取り組まれています。BA 活動は幅広いアプローチ(BA)協定に基づき ITER プロジェクトを補完・支援するとともに、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を実施することを目的としています。具体的な活動内容には、高度なフュージョン装置の建設、耐久性のある材料の開発、原型炉 DEMO の準備作業等があります。青森県六ヶ所村の国際核融合エネルギーセンター(IFERC)において原型炉設計・研究開発調整センター、ITER 遠隔実験研究センター、核融合計算機シミュレーションセンターが運営され、加えて国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動(IFMIF/EVEDA)が行われています。また茨城県那珂市では、サテライトトカマク計画の下で JT-60SA が建設されています。JT-60SA は、最大100秒間連続で核融合反応継続できる性能があり、実験を通じてプラズマを安定化する方法や、フュージョンエネルギーの取扱い方法についてのデータを収集し、ITER の効率的な運営とリスク軽減に寄与する役割があります。

7. 産業化に向けた取組

7.1 国立研究所の開発動向

7.1.1 JT-60SA(Japan Torus-60 Super Advanced)プロジェクト⁶⁴

JT-60SA は、日本と欧州が共同で進める国際的なフュージョン実験プロジェクトであり、茨城県那珂市に位置する量子科学技術研究開発機構(QST)の那珂研究所に設置されています(表 7-1)。この装置は、先代の JT-60U を改良し、超伝導コイルを備えた先進的なトカマク型核融合炉として設計されたものです(表 7-2)。

JT-60SA は世界最大級の超伝導トカマク装置であり、国際熱核融合実験炉(ITER)の運転開始前に必要な技術の開発とプラズマ物理の研究を目的としています。本プロジェクトは、日本の先行研究成果を活かしつつ欧州との協力により進められ、国際熱核融合実験炉(ITER)計画と並行して実施されることで、ITER と将来の核融合発電実証炉(DEMO)の技術的な橋渡しを行う重要な役割を担っています。

JT-60SA プロジェクトの主な目的は以下の3点です⁶⁴。

1. ITER の技術目標達成の支援研究：
ITER と同様のプラズマ形状で高性能な運転を行い、その成果を ITER にフィードバックします。
2. 原型炉に向けた ITER の補完研究：
高出力の核融合炉実現のため、高圧プラズマを長時間(約100秒)維持する運転手法の確立を目指します。
3. 人材育成：
ITER 計画等のフュージョンエネルギー研究開発を主導できる研究者・技術者の育成を行います。

JT-60SA は、超伝導磁石システムとして、18本の D 字型ニオブ・チタン製トロイダル磁場コイル、ニオブ・スズ製の中心ソレノイド、12本の平衡磁場コイルを備えています。

表 7-1 JT-60SA の装置仕様^{65,66}

核融合熱出力(最大 DD 核融合熱出力)	3. 6MJ(270kW)
Q 値(核融合熱出力／外部加熱入力)	< 1
誘導電流駆動による燃焼時間	約100 秒
主半径(R)	2.97 m
小半径(a)	1.18 m
プラズマ電流(I _p)	5.5 MA
縦長比(κ_{95})@95%磁束面／セパトリクス	1.93
三角度(δ_{95})@95%磁束面／セパトリクス	0.5
安全係数(q_{95})@95%磁束面	3.0
トロイダル磁場(BT)@半径2.97 m	2.25 T
プラズマ体積	133 m ³
外部加熱／電流駆動装置による投入電力	23. 5MW

表 7-2 JT-60SA の建設と運用経緯

年表	概要
2013年1月	組み立て開始
2020年3月	組み立て完了
2023年10月	ファーストプラズマ達成

7.1.2 LHD(Large Helical Device)プロジェクト⁶⁷

大型ヘリカル装置(LHD)は、NIFS が運用する世界最大級のヘリカル(ステラレータ)装置であり、ヘリオトロン配位と呼ばれる磁場配位を採用しています。この配位は、世界で最初に超伝導コイルを全コイルで活用した磁場閉じ込め装置で、プラズマを安定的に閉じ込めるために、一つの外部コイルのみでらせん型の磁場を形成することが可能で、定常運転能力に優れています(表 7-3)。

表 7-3 LHD の装置仕様

プラズマ主半径	33.9m
プラズマ小半径	0.6m
プラズマ体積	約30m ³
磁場強度	3T
装置外形	13.5m
装置重量	1,500トン
外部加熱／電流駆動装置による投入電力	36MW

1998年3月の初プラズマ生成以降、LHD は四半世紀にわたり実験研究を実施し、多くの成果を挙げてきました。特に、2017年3月から開始された重水素実験では、イオン温度1億2,000万度のプラズマを達成し、核融合実現に向けた高性能プラズマの研究に貢献しました。また、高温プラズマを3,000秒以上継続するなど定常運転能力を実証しています。

2022年12月に重水素実験が終了し、2023年度からは学術研究基盤 LHD 計画が立ち上げられ、これまでの研究資産を活用した新たな研究フェーズに移行しています。この計画では、国際共同研究として高精細計測装置で超高温プラズマの内部構造を観測し、核融合反応のみならず宇宙・天体プラズマにも共通する複雑現象の解明を目指しています。

LHD の重水素実験に際しては、安全確保の観点から三重水素の発生が懸念されました。これに対応するため、核融合科学研究所は地元自治体(岐阜県 土岐市、多治見市、瑞浪市)との協定書を締結し、以下の安全対策を講じました。

- 関係諸法令の遵守
- 敷地境界線量の制限:年間50 μ Sv 以下
- 三重水素を使用したフュージョン実験の禁止
- 環境放射線等の継続的な監視・測定、公害の防止
- 研究計画や内容の事前説明と地域住民への説明会開催

さらに、岐阜県と3市が共同で「安全監視委員会」を設置し、研究所の監視や測定結果の確認、環境中性子線量等や環境水中の三重水素濃度の測定を実施しました。このように安全性の評価と監視体制を構築することに加えて、ステークホルダーへのアウトリーチ活動等を通して安全対策を実施しています。

7.2 民間企業の開発動向²⁵

7.2.1 京都フュージョニアリング / Starlight Engine : FAST (Fusion by Advanced Superconducting Tokamak) プロジェクト

京都フュージョニアリング株式会社(Kyoto Fusioneering Ltd.)は、2019年10月に設立された京都大学発のスタートアップ企業です。フュージョンエネルギープラントのエンジニアリングを強みに、先進技術の開発を行っています。事業の主な柱として、プラズマ加熱(ジャイロトロロン)システム、燃料サイクルシステム、熱サイクルシステムなど、フュージョンプラントに必要な機器やシステムの研究開発・設計・製造およびそれらの統合技術を手掛けています。

2024年11月には、京都フュージョニアリングがプロジェクトリーダーとなり、国内外の研究者や産業パートナーと協力して推進する民間主導の産学連携プロジェクト「FAST プロジェクト」が発足しました。2030年代のフュージョンエネルギー発電実証を目指し、トカマク型のフュージョン装置を開発しています(表 7-4)。2025年4月には、プロジェクトを加速させるため、FAST プロジェクト全体の統括を担う新会社「Starlight Engine 株式会社」が設立されました。同社は FAST の技術開発やビジネス開発、資金調達、立地選定、サプライチェーン構築などを推進します。

表 7-4 FAST の装置仕様

核融合出力	50-100 MW
中性子壁負荷	300 - 1,000 kW/m ²
放電時間	約1,000秒
積算フルパワー運転時間	約1,000時間

FAST は、高温超伝導(HTS)コイルを用いた低アスペクト比トカマク装置として設計され、小型で経済的なプラントに必要な実証試験を行います。以下の技術的課題の解決を目指しています。

1. D-T 燃焼の実証 - 重水素(Deuterium)と三重水素(トリチウム:Tritium)による核融合反応(D-T)を用いた燃焼プラズマの生成・維持・制御
2. エネルギー取り出しと利用 - 核融合反応により発生するエネルギーの取り出し、変換(発電等)、利用
3. トリチウム生成と燃料サイクルの実証 - 核融合反応の燃料となるトリチウムを増殖し、抽出、利用する技術の実証

4. システムインテグレーション - フュージョンエネルギーシステムを統合し、安全で持続的に運転するプラント技術の開発と実証

プロジェクトの組織体制としては、設計、計画、運転を担う研究者主導のチームを組織し、プラズマ物理や核融合炉工学の専門家を中心とした国内外の協力研究者と共に推進しています。また、三井物産、三井不動産、三菱商事、丸紅、フジクラ、鹿島建設、古河電工等の J-Fusion 参加企業を中心とした産業パートナーと協力し、プラント設計や安全解析、サイト公募、立地準備を進めています。さらに、米国、英国、カナダ等の国際連携パートナーとも協力を推進しています。

FAST プロジェクトは、2030年代の発電実証※を目指し、フュージョンエネルギーの産業化に必要な工学試験を進め、技術的なギャップを解消することを目指しています(図 7-1)。

※フュージョン反応によりブランケットを熱し、そこから取り出した熱を用いて熱交換器を介してタービンを駆動し、継続的に発電する技術を確認する。2,500kWh(10 MW の電力(=家庭2万戸分)/15分間)を発生

FAST (Fusion by Advanced Superconducting Tokamak) 計画



- D-T 燃焼試験
- ブランケット、炉内機器の総合ニュークリア試験
- エネルギー変換システム、燃料循環系総合試験
- 炉心はJT60SA に近い大きさのトカマク型

図 7-1 FAST(Fusion by Advanced Superconducting Tokamak)計画

7.2.2 Helical Fusion:ヘリカル式核融合炉

株式会社 Helical Fusion は、フュージョンエネルギーの早期実現を目指す炉開発企業であり、2021年10月に設立されました。核融合科学研究所(NIFS)から立ち上がったスタートアップであり、世界最大級の実験装置 LHD のプラズマ研究と世界最長のフュージョン発電プラント研究 FFHR プロジェクトを引継ぎ、ヘリカル式核融合炉を開発しています。

核融合炉開発の主要課題であるコイル開発とブランケット開発に取組み、それらを統合実証する小型フュージョン装置の建設と同プラントによる超長時間運転実証を目指しています。さらにその先の目標として50-100MW 級発電初号機の2030年代半ばでの実現を目指しています(図 7-2)。

発電初号機では、グロスでの発電実証に留まらず、50-100MW の正味電力(投入電力以上の電力を供給)の定常運転実証し、科学的研究に留まらず、商用発電炉へのしっかりした道筋を示すことを目指しています。概念設計は査読済み論文で公表し⁶⁸、科学・工学的妥当性を担保しています。

本企業は、技術力と開発力が強みであり、複雑形状を実現しうる曲げやすい高温超伝導ケーブルやダイバータ機能も備えた液体金属ブランケット等、先進的でオリジナリティある技術開発を機器メーカーと協業しながら推進しています。単なる研究開発や科学実証実験ではなく、商用発電プラントを見据えた装置・経済性・安全等を最適化設計し、統合するアプローチが特徴的な企業です。モノづくり企業との共同開発をベースとするオープンイノベーション戦略も特徴の一つです。

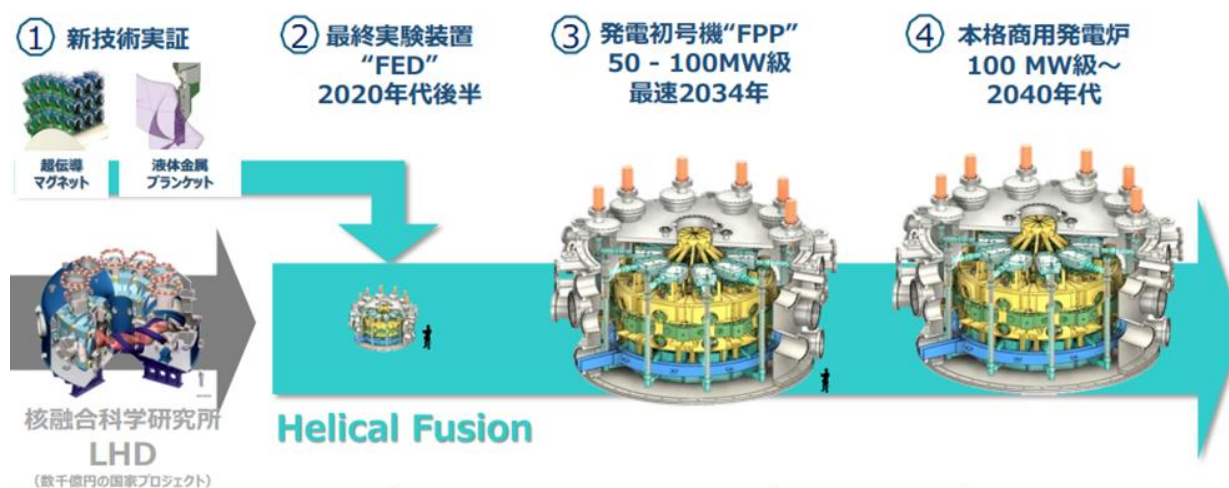


図 7-2 LHD および Helical Fusion 社の商用化へのアプローチ

7.2.3 EX-Fusion:レーザー核融合炉

株式会社 EX-Fusion は、レーザー核融合による商用発電の実現を目指す日本初の民間企業です。高出力レーザーを用いて重水素と三重水素を瞬時に圧縮・加熱することで、クリーンかつ持続可能なエネルギーを生み出す核融合反応を引き起こす革新的な技術開発に取り組んでいます。

静岡県浜松市には自社の研究施設を構え、商用炉の実現に不可欠な要素技術の開発を進めています。具体的には、ターゲットの連続供給技術、高精度なターゲット追尾技術、および繰り返し動作する高出力パルスレーザーの精密制御・照射技術など、レーザー核融合における中核技術の開発と統合実証を本格的に推進しています。

これらの研究開発を基盤として、2027年には連続的な中性子発生の実証を行い、さらに2030年までにはレーザー核融合によるエネルギー生成の定常運転を実証することを計画しています。その成果を活かし、2040年頃の商用炉稼働を目指し、技術開発を着実に進めています(図 7-3)。

また、京都にはレーザー加工施設を新たに開設し、レーザー核融合で培った最先端技術を広く産業分野へ応用展開することで、レーザー核融合技術の早期社会実装に積極的に取り組んでいます。EX-Fusion はレーザー核融合技術によるエネルギー革命を実現し、世界の持続可能な社会の構築に貢献していきます。

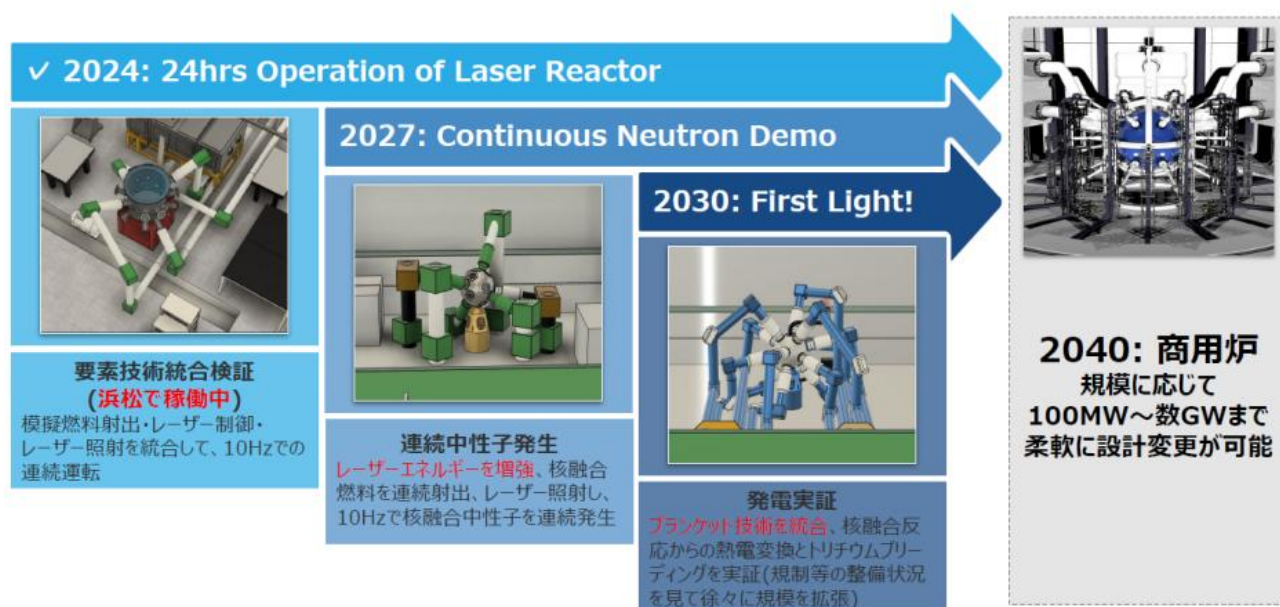


図 7-3 EX-Fusion の開発ロードマップ

7.2.4 LINEA イノベーション:FRC ミラーハイブリッド核融合炉

株式会社 LINEA イノベーションは、日本大学および筑波大学の研究成果を基に設立されたスタートアップ企業であり、陽子(軽水素 or 水素)とホウ素11の核融合($p\text{-}^{11}\text{B}$ 反応)による商用核融合炉を目指しています(図 7-4)。 $p\text{-}^{11}\text{B}$ 反応は中性子の発生がなく、重水素と三重水素による D-T 反応と違い放射性廃棄物の発生がないため、非常に安全性の高いエネルギー源として注目されています。

これまで、 $p\text{-}^{11}\text{B}$ 核融合の実現は非常に難しいとされてきました。それは、多くの核融合研究機関・企業が研究を進めてきた「熱的核融合」において、 $p\text{-}^{11}\text{B}$ 反応は D-T 反応よりもさらに高いプラズマ温度が必要であるためです。そこで LINEA イノベーションでは、この課題を克服するため、従来の熱的アプローチとは異なる「非熱的」な手法による核融合を目指しています。FRC(磁場反転配位)とミラー磁場のそれぞれの特徴を融合したハイブリッド方式を採用し、非熱的な $p\text{-}^{11}\text{B}$ 反応の発生を図ります。

同社は、2030年代初頭に $p\text{-}^{11}\text{B}$ 反応による発電実証を、2040年代半ばに商用発電の実現を目指しています。そのために、2024年2月、筑波大学プラズマ研究センターと共同研究契約を締結し、FRC ミラーハイブリッド配位形成に関する研究を開始しました。同年8月には、日本大学理工学部プラズマ理工学研究室とも共同研究契約を締結し、FRC とミラー方式のハイブリッド化に向けた研究を進めています。

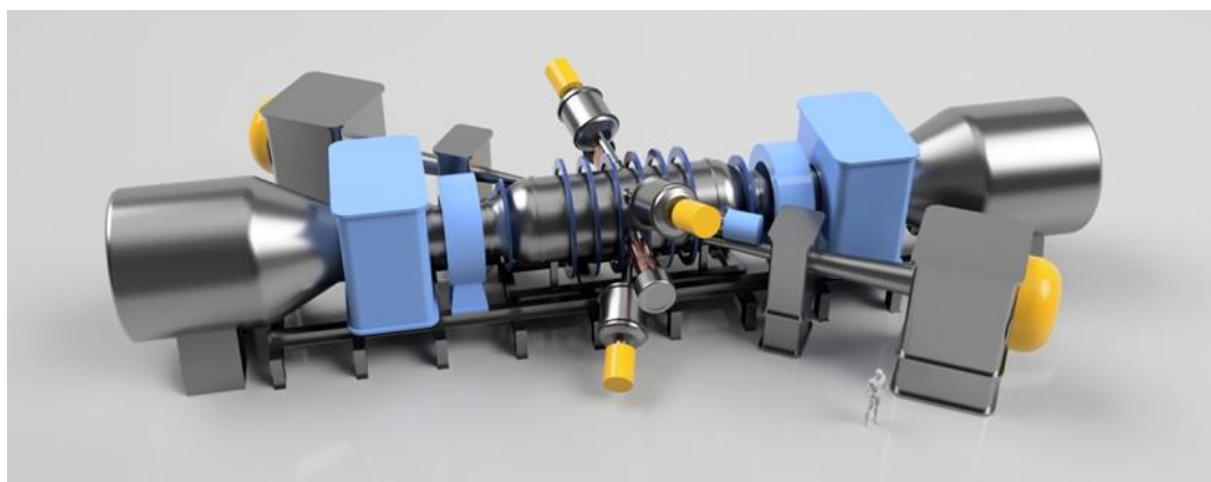


図 7-4 FRC ミラーハイブリッド核融合炉のイメージ

7.2.5 Blue Laser Fusion 合同会社: レーザー核融合

Blue Laser Fusion 合同会社(以下、BLF)は、独自開発した OEC (Optical Enhancement Cavity)方式を用い、レーザー核融合の早期実現を目指しています。日本国内では 2025 年 4 月に大阪大学と共に「大阪大学-Blue Laser Fusion エネルギー協働研究所」を設立し、最先端の光科学技術と大学の幅広い学術リソースを結集して研究開発を推進しています。

2025 年、米国ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)は、10 kJ 級ガラスレーザー192 本(総投入エネルギー約 2 MJ)を用いた実験で、出力 8 MJ(ゲイン 4)の歴史的成果を挙げました。これは高出力レーザーによる核融合エネルギーの実現可能性を示す快挙ではあるものの、ガラスレーザー媒質の熱蓄積により高繰り返し運転が困難で、発生エネルギーは 1 日数回に限られています。したがって、商用化に向けたスケーラビリティには課題が残っています。

この観点で、BLF が採用する OEC は、レーザー媒質(ガラス・結晶など)の熱負荷を回避できる点が最大の特長です。重力波望遠鏡 LIGO や KAGRA で実証された高反射ミラーと光蓄積技術の応用により、1 Hz 以上の連続照射 が実現可能と見込まれています。これにより従来のガラスレーザーが抱える冷却・繰り返し周波数の制約を抜本的に解決し、高効率・高繰り返し動作 が求められる実用レーザー核融合用ドライバーとして期待されています。

同社は今後、大阪大学との共同研究体制を通じて、OEC レーザー開発や大阪大学のレーザーを用いた核融合材料の点火実験などを段階的に進め、2030 年前後には実証炉級レーザーシステムの完成を目指すとしています(図 7-5)。

Coherent Beam Combining(CBC)Laser
高効率のレーザー

Optical enhancement cavity(OEC)
レーザーをミラーで閉じ込め貯める



OECレーザーをフュージョン燃料に反応させる

- ・ BLF社は世界で初めてOECを用いたレーザー増幅を採用(基本特許出願)
- ・ 熱の問題を回避し、高繰り返し、高効率、低コスト



図 7-5 OEC レーザーの原理(左)、大阪大学設置の 15 m OEC 装置(右)

8. フュージョンエネルギーの産業化に向けて

フュージョンエネルギーは、運転時に CO₂を排出することなく、燃料はほぼ無尽蔵に調達可能であり、意図的に核融合反応を維持しなければ自然停止する固有の安全性を有していることなどから、安定した脱炭素エネルギー源として期待されています。世界では民間主導の開発が加速し、すでに国際競争が始まっている状況を踏まえ、日本でも、「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」(2023)において、遠い将来ではなく、この先10年を見据えた戦略としてフュージョンエネルギーの産業化をビジョンに掲げております。中でも、「フュージョンインダストリーの育成戦略」の1つとして、『安全確保の基本的な考え方』が策定されました。産業界としても、安全確保を前提に、民間企業の技術開発・社会実装を推進する方針に賛同いたします。特に事業者からの発信だけでなく、政府からの「安全確保の基本的な考え方」の発信が、社会に受け入れられるフュージョンエネルギーの実現に向けて重要です。また、政府による合理的な法整備は、産業界の多くのプレイヤーにとって本産業への参画にあたっての事業環境の見通しを高めることができ、本産業への十分な投資を促進するための重要な指標となります。2030年代の技術実証(発電含む)までのタイムラインを意識し、これに続く商用炉の普及をスムーズに進めるべく、安全確保の分野においても産官学の一層の連携ができるよう、以下のポイントを中心に本協議会が尽力いたします。

- ✓ 法的枠組みの方針および意思決定プロセス・タイムラインの提示促進
- ✓ イノベーション機会の創出の促進
- ✓ 安全性に関する社会への発信・啓発
- ✓ 事業者と国が連携した拠点・立地確保の促進
- ✓ 規制整備及び適用段階における産官学との対話機会の継続確保

上記のポイントを達成、加速するうえで、合理的かつ柔軟な規制体系の構築が急務です。現在、フュージョン装置は原子炉等規制法の対象外であり、放射性同位元素等の規制に関する法律(RI 法)を基盤として、放射性廃棄物の処理、燃料の管理等に関する審査を進める方針を具体的に検討する必要があります。その際、法改正に頼らず、柔軟かつ迅速な対応のために、複数の方式、異なる材料の特性に応じた規制審査により、技術多様性を確保しながら進めることが求められます。特に高速中性子発生に伴う材料損傷、放射線管理、高出力レーザー・高圧システム等のリスクに関わる項目については、グレーデッドアプローチ(段階的アプローチ)によるリスクに応じた規制の設定が重要と考えられます。また、早期のフュージョンエネルギープラントの商業化を見据えて事故リスク、廃棄物管理等に関する補償制度の設計も重要な観点と考えています。

今後、2030年代の運転実証を見据えた法整備を早急に進める必要があると考えており、そのために当協議会は、事業主体・規制当局・産業界・一般社会等による対話を深める取り組みを進めていきます。

9. 参考文献

- ¹ Garry McCracken, Peter Stott. *Fusion: The Energy of the Universe*. Elsevier Academic Press, 2005, xvii ページ.
- ² World Nuclear Association. “Nuclear Fusion Power”. World Nuclear Association. 2019 年. <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-fusion-power.aspx>, (参照 2025-04-21).
- ³ Fusion Industry Association. *Regulatory-Policy-White Paper “Igniting the Fusion Revolution in America - Leveraging the Lessons of the Atomic Age to Build a Regulatory Framework that Supports the Safe and Efficient Development of Fusion Energy Systems -”*. 2020 年 6 月, p.4.
- ⁴ International Atomic Energy Agency. “What is Nuclear Fusion?”. International Atomic Energy Agency. 2023 年 8 月 3 日. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-fusion>, (参照 2025-04-21).
- ⁵ Garry McCracken, Peter Stott. *Fusion: The Energy of the Universe*. Elsevier Academic Press, 2005 年, p.19.
- ⁶ Fusion Industry Association. *Regulatory-Policy-White Paper “Igniting the Fusion Revolution in America - Leveraging the Lessons of the Atomic Age to Build a Regulatory Framework that Supports the Safe and Efficient Development of Fusion Energy Systems -”*. 2020 年 6 月, p.5.
- ⁷ 岡崎隆司. “核融合エネルギーの基礎”. 理工図書株式会社. 2024 年. 14 頁.
- ⁸ 文部科学省. “ムーンショット目標 10”. 2024 年. <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/concept10.pdf>, (参照 2025-04-21).
- ⁹ 内閣府 イノベーション政策強化推進のための有識者会議「核融合戦略」. フュージョンエネルギーの実現に向けた安全確保の基本的な考え方（素案）. 2025 年. <https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/9kai/siryo3-1.pdf>, (参照 2025-04-21).
- ¹⁰ Nuclear Regulatory Commission. “Backgrounder on Radioactive Waste”. Nuclear Regulatory Commission. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/radwaste.html>, (参照 2025-04-21).
- ¹¹ J.W. Ramsdell, Jr. et al. *RASCAL 4: Description of Models and Methods*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2012 年, pp. 1-36. <https://www.nrc.gov/docs/ML1303/ML13031A448.pdf>, (参照 2025-04-21).
- ¹² Jim Heirbaut. “How to Line a Thermonuclear Reactor”. *Science*. 2012 年 8 月 16 日. <https://www.sciencemag.org/news/2012/08/how-line-thermonuclear-reactor>, (参照 2025-04-21).
- ¹³ G.J. Butterworth and S.R. Keown. *The commercial production of high-purity low-activation steels for fusion reactor application*. Journal of Nuclear Materials 186. 1992 年, pp.283-287
- ¹⁴ 松岡啓介. “フローチャートにみる核融合の 50 年”. 2008 年. https://www.jspf.or.jp/Journal/PDF/JSPF/jspf2008_10b/jspf2008_10b-92.pdf, (参照 2025-04-21).
- ¹⁵ 文部科学省. 「核融合市場研究会 報告書：核融合産業イノベーションを目指して」. 2024 年 7 月 10 日. https://www.mext.go.jp/content/20240710-mxt_kaisen-000036986_06.pdf, (参照 2025-04-21).
- ¹⁶ 日本原子力産業会議 核融合開発検討会. “核融合開発における産業界の立場と役割 ― 第三次報告書

—”. 2006 年. https://www.jaif.or.jp/ja/news/2006/fusion_report2006.pdf, (参照 2025-03-05).

- 17 QST. “ITER の目標と経緯”. 核融合実験炉 ITER 日本国内機関. https://www.fusion.qst.go.jp/ITER/iter/page1_2.html, (参照 2025-02-21).
- 18 量子科学技術研究開発機構. “国際熱核融合実験炉(ITER)計画”. 核融合科学研究所ウェブサイト. https://www.fusion.qst.go.jp/ITER/iter/page1_8.html, (参照 2025-05-16).
- 19 QST. “幅広いアプローチ(BA)活動 国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)”. QST ホームページ. <https://www.qst.go.jp/site/ba/4663.html>, (参照 2025-03-21).
- 20 内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局. “フュージョンエネルギー・イノベーション戦略 ～国家戦略を踏まえた最近の取組～”. 核融合戦略有識者会議 資料1. <https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/6kai/siry01.pdf>, (参照 2025-03-20).
- 21 科学技術・イノベーション推進事務局. “核融合戦略の策定に向けて”. 内閣府 核融合戦略有識者会議 資料 2. 2022 年. <https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/1kai/siry02.pdf>, (参照 2025-02-21).
- 22 文部科学省. “資料 4:ITER 計画の進捗状況について”. 第 38 回核融合科学技術委員会/第 35 回原型炉開発総合戦略タスクフォース 資料 4. 2024 年 7 月 10 日. https://www.mext.go.jp/content/20240710-mxt_kaisen-000036986_05.pdf (参照 2025-05-01).
- 23 International Atomic Energy Agency. *Summary of the ITER Final Design Report*. ITER EDA Documentation Series No. 22. Vienna: IAEA, 2001, p.19. Available at: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/ITER-EDA-DS-22.pdf>, (参照 2025-04-21).
- 24 量子科学技術研究開発機構(QST). “ITER 計画説明会 Q&A”. 核融合原型炉開発ホームページ (ITER 特設ページ). 2025 年. https://www.fusion.qst.go.jp/ITER/iter/page1_20.html, (参照 2025-04-22).
- 25 フュージョンエネルギー産業協議会、京都フュージョニアリング(株) 小西哲之. “フュージョンエネルギーの早期実現、産業化に向けた世界の動きと我が国”. 内閣府 核融合戦略有識者会議 資料3. 2025 年. <https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/8kai/siry03.pdf>, (参照 2025-02-21).
- 26 京都フュージョニアリング株式会社. “【プレスリリース】京都フュージョニアリング、日立製作所と核融合炉の冷却設備の共同研究を開始”. 2022 年 7 月 6 日. <https://kyotofusioneering.com/news/2022/07/06/767> (参照 2025-04-21).
- 27 Helical Fusion. “独自の液体金属ブランケット試験装置「GALOP」を搬入”
- 28 ITER 日本国内機関. “ダイバータ”. ITER 日本国内機関. https://www.fusion.qst.go.jp/iter/jada/page2_6_5.html, (参照 2025-04-02).
- 29 Helical Fusion 株式会社. “商用核融合炉に必須となる独自の液体金属ブランケット試験装置『GALOP』を搬入しました.”(参照 2025-05-16)
- 30 東芝. “ファーストプラズマが未来を灯す！ 核融合発電「地上の太陽」の夢(後編)”. 東芝クリップ(HP). <https://www.toshiba-clip.com/detail/p=2056>, (参照 2025-03-20).
- 31 木戸修一、伊藤裕、仙波智行、山下泰郎. “核融合実験装置・研究用加速器への取り組み”. 日立評論, Vol.91, No.02, 2009 年 2 月, pp.238-243. https://www.hitachihyoron.com/jp/pdf/2009/02/2009_02_14.pdf, (参照 2025-04-22).
- 32 日立. “核融合の取り組み”. 日立製作所 HP. https://www.hitachi.co.jp/products/energy/nuclear/accelerator/nuclear_fusion/index.html, (参照 2025-04-21).
- 33 日本電信電話株式会社(NTT). “核融合への挑戦 - 次世代エネルギー実現に向けた NTT の技術開発-”. NTT R&D フォーラム 2023 リポート, 2023 年 11 月 13 日.

- <https://www.rd.ntt/se/media/article/0106.html> (参照 2025-04-21).
- 34 尾崎 弘之. “図解入門業界研究 最新核融合産業の動向と仕組みがよくわかる本”. 秀和システム. 2024 年. 100 頁.
- 35 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. “原型炉開発に向けたアクションプラン (令和5年7月改訂版)”. 2023 年. https://www.mext.go.jp/content/20231023_mxt-kaisen1000100091.pdf, (参照 2025-02-21).
- 36 QST. “六ヶ所フュージョンエネルギー研究所”. QST HP. <https://www.qst.go.jp/site/rokkasyo/4746.html>, (参照 2025-03-21).
- 37 QST. “第 10 回 IFMIF 研究会 ～ LIPAc 実証試験の最新結果と大電力 RF ～”. QST HP. <https://www.qst.go.jp/site/rokkasyo/ifmifkenkyuu2025.html>, (参照 2025-04-15).
- 38 内閣府 核融合戦略有識者会議. “「フュージョンエネルギーの実現に向けた安全確保の基本的な考え方 (素案)」”. イノベーション政策強化推進のための有識者会議「核融合戦略」. (参照 2025-03-21).
- 39 科学技術・イノベーション推進事務局. “フュージョンエネルギーの実現に向けた安全確保の基本的な考え方 (骨子案) について”. 内閣府 フュージョンエネルギーの実現に向けた安全確保の基本的な考え方検討タスクフォース(第8回) 資料2. 2025 年. <https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/taskforce/8kai/siryo02.pdf>, (参照 2025-02-21).
- 40 科学技術庁告示第三号. “○荷電粒子を加速することにより放射線を発生させる装置として指定する件”. 最終改正:平成元年四月十七日 科学技術庁告示第三号. <https://www.nra.go.jp/data/000474109.pdf>, (参照 2025-03-19).
- 41 安全確保検討タスクフォース. “フュージョンエネルギーの実現に向けた安全確保の基本的な考え方 (骨子案) について”. 内閣府 核融合戦略有識者会議 資料 4. 2025 年. <https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/8kai/siryo04.pdf>, (参照 2025-2-21).
- 42 IAEA, “Fusion Key Elements” 2024
- 43 内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局. “【参考資料】フュージョンエネルギーの実現に向けた安全確保の基本的な考え方” 令和 7 年 3 月 25 日、内閣府「核融合戦略」有識者会議決定. <https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/sanko.pdf>, (参照 2025-04-22).
- 44 経済産業省. “安全保障貿易管理制度の概要”. 令和 6 年度. <https://www.meti.go.jp/policy/anpo/daigaku/seminer/r6/meti.pdf>, (参照 2025-05-28).
- 45 経済産業省. “安全保障貿易管理 ガイダンス[入門編]” 令和 7 年1月. <https://www.meti.go.jp/policy/anpo/guidance/guidance.pdf>, (参照 2025-05-28).
- 46 経済産業省. “貨物・技術のマトリクス表”(注:最新法令に基づいたものの参照が必要). https://www.meti.go.jp/policy/anpo/matrix_intro.html, (参照 2025-05-28).
- 47 日本貿易振興機構(ジェトロ). “「安全保障貿易管理」早わかりガイド”. 2024 年 1 月. https://www.jetro.go.jp/ext_images/world/security_trade_control/pdf/guide/202401v2.pdf, (参照 2023 年 10 月).
- 48 S. Rep. No. 1699. “Special Nuclear Material”の定義についての解説. 1954 年, pp. 8-9.
- 49 42 U.S.C. § 2014(z); see also 10 C.F.R. § 40.4.
- 50 S. Rep. No. 1699 at 17 (1954).
- 51 42 U.S.C. § 2014(e).
- 52 Nuclear Energy Innovation and Modernization Act(原子力エネルギー革新・近代化法), Public Law No: 115-439, 2019 年 1 月 14 日成立.
- 53 S. Rep. No. 1699. 1954 年, p. 12.
- 54 42 U.S.C. § 2014(cc).
- 55 *Nuclear Regulatory Commission. SECY-23-0001: Options for Licensing and*

Regulating Fusion Energy Systems. 2023 年 1 月 3 日発行.

- ⁵⁶ 公益財団法人 原子力安全研究会. “世界各国における核融合規制の状況”. フュージョンエネルギーの実現に向けた安全確保の基本的な考え方検討タスクフォース 第 1 回会合 資料 2-2. 2024 年.
<https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/taskforce/1kai/siryo2-2.pdf>, (参照 2025-03-06).
- ⁵⁷ Fusion Industry Association. 「米国上院, ADVANCE 法案を可決 — 核融合規制を成文化するための立法を含む」2024 年 7 月 9 日. <https://www.fusionindustryassociation.org/us-senate-passes-advance-act-including-legislation-to-codify-us-fusion-regulations/>, (参照 2025-05-28).
- ⁵⁸ Massachusetts House Bill 5060 (Prior Session Legislation).
- ⁵⁹ Massachusetts House Bill H3214.
- ⁶⁰ California Energy Commission. *Integrated Energy Policy Report: Fusion Energy* (Assembly Bill 1172).
- ⁶¹ The Promote Clean Energy Bill, S.B. 678.
- ⁶² Virginia Senate Bill 1338.
- ⁶³ 文部科学省. “諸外国との連携”.
https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/1418740.htm#fpcc, (参照 2025 年 3 月 6 日).
- ⁶⁴ QST. “先進プラズマ研究開発 JT-60SA とは”. QST HP.
<https://www.qst.go.jp/site/jt60/5150.html>, (参照 2025-03-06).
- ⁶⁵ 量子科学技術研究開発機構. “JT-60SA の特徴.”
<https://www.qst.go.jp/site/jt60/5150.html>, (参照 2025-05-16).
- ⁶⁶ 原子力規制委員会. “国際熱核融合実験炉(ITER)に係る安全規制の考え方.”
<https://www2.nra.go.jp/data/000308133.pdf>, (参照 2025-05-16).
- ⁶⁷ NIFS 田中将裕. “大型ヘリカル装置(LHD)の 安全確保について”. フュージョンエネルギーの実現に向けた安全確保の基本的な考え方検討タスクフォース 第 3 回会合 資料 2-2. 2024 年.
<https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/taskforce/3kai/siryo2-2.pdf>, (参照 2025-03-05).
- ⁶⁸ J.Miyazawa, T.Goto. “Development of steady state fusion reactor by Helical Fusion”, *Physics of Plasmas*, 30, 050601 (2023).
<https://pubs.aip.org/aip/pop/article/30/5/050601/2891604/>, (参照 2025-05-16).