

エネルギー多様性研究分科会 活動報告

エネルギー多様性研究分科会

井上数夫

1. はじめに

エネルギー多様性分科会では令和7年度の取り組みとして、愛知県土岐市に所在する自然科学研究機構（NINS）核融合科学研究所（NIFS）を視察した。視察の目的は核融合研究の現状を把握し、わが国のエネルギー政策の今後のあり方について議論するためである。

近年、エネルギー政策は転換期を迎えており、脱炭素への潮流が加速し、再生可能エネルギーの普及が進む一方で、安定供給やエネルギーの安全保障の観点から見直しも求められている。そのような中、次世代エネルギーとして核融合技術への期待が高まっている。核融合技術は太陽を地上で再現する技術であり、燃料の豊富さ、CO₂を排出しないこと、暴走反応を起こさないことなど、多くの利点がある。

2. 世界の核融合研究

世界の核融合研究は1950年ころから各国で進められてきたが、2000年代より実用化への取り組みが加速している。我が国は国際熱核融合実験炉（ITER）計画の主要参加国である。ITERは世界35か国が参加する国際科学プロジェクトである。

ITERはフランス・カダラッシュで建設中である。旧計画では2025年に「水素プラズマ着火」で運転開始とされていたが、2024年に発表された新計画では、ITERの組み立て完了が2033年に延長された。コロナ禍による製造や物流への影響、超伝導コイルや真空容器の製造遅延などが理由とされている。

ITERは核融合反応によって「発電に必要なレベルのエネルギー増倍率（Q≥10）」を目標としており、実験炉としての役割を担う。

3. 核融合技術について

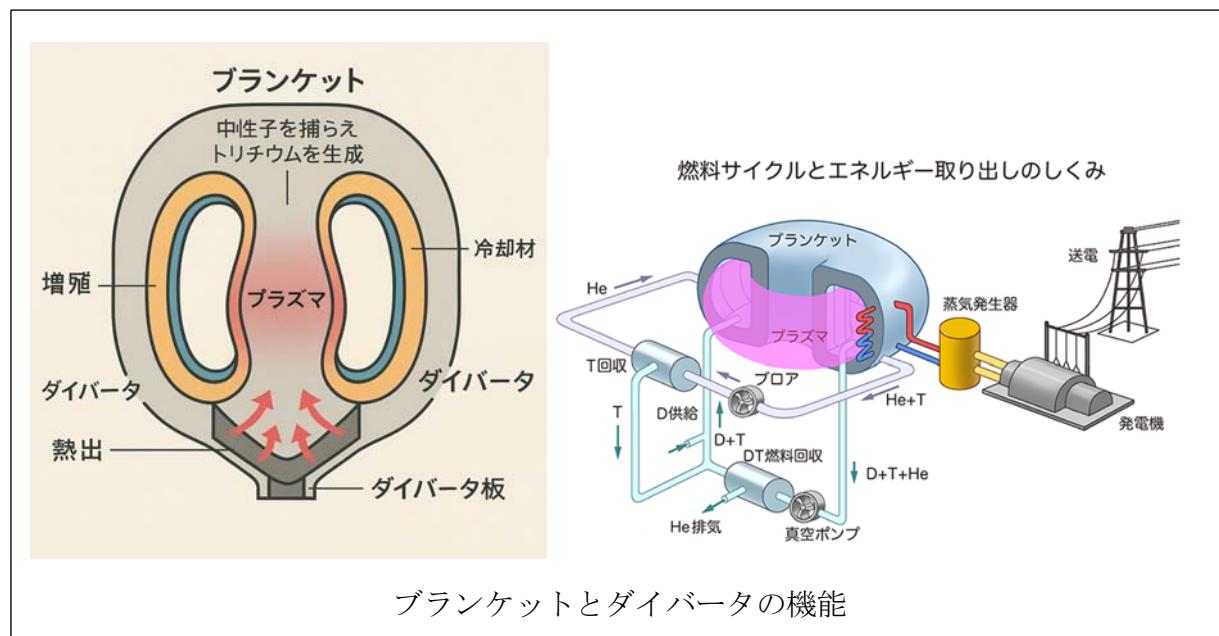
燃料は海水内の重水素（D）と三重水素（T）であり、水素原子の化学反応ではなく、水素の原子核同士が合体する核融合反応（以下、DT反応）である。DT反応は、燃料を高温（プラズマ状態）かつ高圧にすることで生じる。

地上では高温プラズマを引き留めておくことが難しいので、丸く閉じた磁力線によりプラズマを封じ込める。磁場の生成方法にはトカマク方式とヘリカル方式がある。プラズマを封じ込める磁石は、銅コイルではなく超伝導コイルを使用する。

プラズマを核融合に必要な温度（1億度）に加熱し、DT反応によって中性子とアルファ粒子（ヘリウム）が生成され、中性子は磁力線に巻き付かないでプラズマから離脱し周囲のブランケットに飛び込む。中性子のエネルギーをブランケットで吸収し、熱を発生させ外に取り出す。

一方のアルファ粒子は、電荷を有しているので磁場にとらわれエネルギーをプラズマへ移す。プラズマは熱線としてブランケットへ吸収され、熱源として外部に取り出されることになる。

自然界に余り存在しない三重水素は核融合炉内で燃料として消費しながら、新たに三重水素を自己生産する。核融合で生じた中性子とブランケット内のリチウムが反応して、三重水素を生成する。



4. NIFSについて

4. 1. NIFSの概要（組織の位置づけと役割）

今回視察した NIFS は、世界最大級の「ヘリカル装置（以下 LHD）」を用いた実験を推進している。NIFS は NINS を構成する研究所の一部であり、わが国の核融合の基礎研究を実施する中枢機関である。

1989 年の設立以降、ヘリカル方式による核融合研究を推進し、世界最大級の LHD を中心に、プラズマ物理、核融合炉工学、材料科学、数値シミュレーションなどの研究を開拓してきた。



4. 2. 研究の全体像

(1) ヘリカル方式による核融合プラズマ研究の深化

ヘリカル方式は、外部コイルのみで磁場を形成するため、電流駆動が不要であり、プラズマの安定性に優れる。特に長時間運転に適しており、将来の定常運転型核融合炉の有力候補とされる。

NIFS では、LHD を用いて、高温プラズマの生成と閉じ込め性能の向上、プラズマ乱流の抑制と輸送現象の解明、高性能プラズマの長時間維持、不純物制御と壁相互作用の研究等を行っている。

(2) 核融合炉工学研究の推進

核融合炉の実現には、プラズマ物理だけでなく、材料、燃料サイクル、熱工学など、多様な工学的課題の解決が必要である。NIFSでは、低放射化材料の開発、高熱負荷に耐えるダイバータ材料の研究、トリチウム燃料の供給・回収技術、エネルギー取り出しぷシステムの設計等の研究を実施している。

(3) スーパーコンピューターを活用した数値シミュレーション

NIFSは、プラズマ物理の理論研究と数値シミュレーションにも力を入れている。プラズマ乱流の大規模シミュレーション、磁場構造の最適化、核融合炉の統合モデリング、富岳などのスーパーコンピューターを活用した高精度計算などが行われている。

4. 3. 地域社会との関係

NIFSは、地元土岐市を中心とした地域社会との連携にも積極的である。一般公開や講演会、教育プログラムを通じて、核融合研究の意義を広く伝える活動を行っている。核融合は一般市民にとって理解が難しい分野であるため、こうした広報活動は社会的受容性の向上に寄与している。今回の視察の受け入れについても、地域社会への広報活動の一環と捉えることもできる。

4. 4. 大型ヘリカル装置（LHD）の技術的特徴

NIFSではLHDによる研究が進められるが、ITERではトカマク方式採用される。我が国ではトカマク式の研究もおこなわれているが、核融合戦略としてトカマク式もヘリカル式も最終的には商用炉の実現に向かっていると思われる。以下にはトカマク式のJT-60SAとヘリカル式のLHDを対比する。

■核融合方式対比表

| 項目 | JT-60SA | LHD |
|-------|---|---|
| 装置方式 | トカマク式（超伝導） | ヘリカル式（ステラレータ） |
| 目的 | ITERの支援研究 原型炉に向けた補完研究 人材育成 | ヘリカル炉心プラズマの長時間維持 現型炉概念の確立 |
| 加熱方式 | NBI (Neutral Beam Injection : ニュートラルビーム注入) 「中性粒子ビーム入射加熱」 ECRH (Electron Cyclotron Resonance Heating : 電子サイクロトロン共鳴加熱) | NBI ECRH ICRF (Ion Cyclotron Range of Frequency : イオンサイクロトロン加熱) |
| 長時間運転 | 100秒程度の高性能維持を目標 | 30分以上の長時間プラズマ維持実績 |
| 磁場生成 | 外部コイル+プラズマ電流 | 外部コイル |

| 項目 | JT-60SA | LHD |
|----------|-----------------------------|-----------------------------------|
| 安定性 | ディスラプションのリスク | 高い（電流が安定） |
| 設計 | 比較的シンプル | 複雑 |
| ITERとの関係 | ITERと同じトカマク方式で直接的に支援することが目的 | ITERとは方式が異なるが、定常研究運転で補完的な役割を担っている |
| 研究の位置づけ | ITERの技術目標達成支援と原型炉の研究 | ヘリカル炉の実証研究でわが国独自の強みになりうる |
| 運転開始 | 2020年に装置完成 | 1998年運転開始 |

5. 観察 (NIFS)

観察施設 : 自然科学研究機構 (NINS) 核融合科学研究所(NIFS)

参加者 : 井上数夫、井上祥一郎、角谷篤志、徳岡広昭、永田良和、水引朋之、盛田直樹（五十音順、計7名）

対応者 : 東京大学院（修）士 ナガイ氏（研究者）ほか3名

日 時 : 令和7年10月3日（金）13：30～14：50

観察は午後から行われ、施設担当者と大学院生（修士）ナガイ氏ほか、計4名に案内いただいた。ナガイ氏は普段、核融合炉内のプラズマをスーパーコンピューターで理論シミュレーションしている。施設内の研究者は約110名で、そのうち学生が約50名程度関わっているとの説明を受けた。

5. 1. 真空実験（真空状態について）

核融合炉内の真空状態はプラズマを成立させるための絶対条件である。核融合炉の中心には1億度のプラズマが存在するが、微量の空気が入ると一瞬で冷却される。残留気体の分子がプラズマと衝突すると温度が低下し、核融合反応の停止につながるためである。

このような真空状態について、模擬的な真空実験を通じて説明がなされた。模擬的に真空状態を作り、その性質がどのようなものかが示された。



真空実験の様子

マッシュマロの減圧膨張実験により、真空中では気圧が低下することが可視化された。

沸点が低下することによる水の気化と気化による熱の消失を経て、固体になる過程を実験した。容器内の水が気化から固化することが確認できた。

5. 2. プラズマ実験

プラズマを発生させる実験を遠隔で実施するコントロールルームに案内された。パ

ソコン 400 台程度 モニター 450 台がある広いフロアであり、視察当日は幸運にもプラズマ実験を実施していた。プラズマ実験は年間 3 カ月のみ行われる。案内者自身も実験状況を見る機会は数回しかないとのことであった。モニターに映し出されるプラズマは高温になると無色になるようで、成分の良いプラズマが生成されているとの説明を受けた。

この実験では年間で 3,500 万キロワット時 (kWh) の電気を使うので、電気代にすると約 5 億円になる。当該場所は、特殊なロケーションであり、テレビドラマのロケ地として使用されたこともある。



真空実験の様子



プラズマ実験 コントロールルーム (上階層より)



コントロールルーム入口



LHD 模型による説明

5. 3. ドームでの展示物 (LHD 模型)

ドームと呼ばれる展示スペースに案内され、LHD 本体の模型や、過去に稼働させていた実験機・関連設備を見学した。研究者の案内のものと、以下の設備を順に見学した。

(1) ヘリオトロンD ヘリオトロンE

京都大学が開発したヘリカル・ヘリオトロン磁場を用いた中型核融合実験装置である。両者は日本独自の「ヘリオトロン方式（ヘリカル方式）」の発展を支えたものである。

■ヘリオトロンの比較

| 項目 | ヘリオトロンD | ヘリオトロンE |
|-------|---|--|
| | ヘリオトロンDは、後の大型装置（ヘリオトロンE、LHD）につながる基礎物理・閉じ込め研究の土台となった装置 | ヘリオトロンEは、ヘリオトロンDの成果を踏まえて建設された大型ヘリカル装置で、当時としては世界最大級のヘリカル核融合装置 |
| 時期 | 1970 年 | 1980 年代 |
| 規模 | 中型 | 大型 |
| 主目的 | プラズマ閉じ込め・ジュール加熱の基礎研究 | 高温無電流プラズマの実証 |
| 成果 | 新古典拡散の検証、磁気リミター実証 | 1000 万度級プラズマ、巨大ヘリカルコイル技術 |
| 技術的特徴 | シンプルなヘリカル磁場 | 高精度ヘリカルコイル、巨大電源設備 |
| 後継 | ヘリオトロンEへ発展 | LHD へ発展 |



ヘリオトロンD
1970 年～1982 年 (京都大学)



ドームと呼ばれる展示室全景



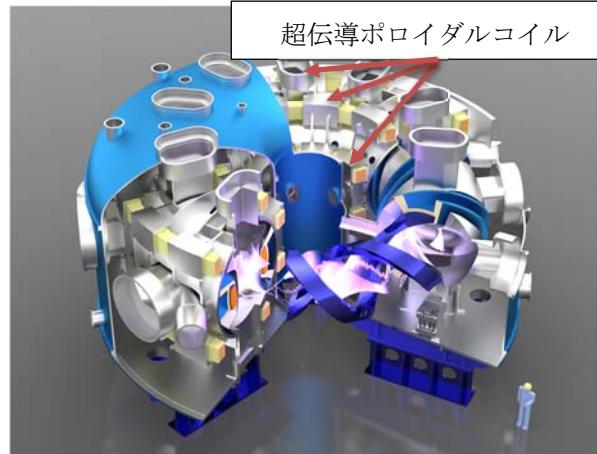
ヘリオトロン E
1980 年～1997 年 (京都大学)

(2) 超伝導ポロイダルコイル

LHDにはプラズマを閉じ込めるため、ヘリカルコイルとポロイダルコイルが使用される。ポロイダルコイルとは、プラズマの位置・形状を制御し、ヘリカルコイルの磁場を補正するための超伝導補助コイルである。直径が実コイルと同じ大きさのものが壁に掲示され、その大きさが実感できた。

内側形状抑制コイル模型 内径 5.3m 外径 6.0m

外側垂直磁場コイル模型 内径 10.8m 外径 11.4m



超伝導ポロイダルコイル

(3) 大型ヘリカル装置（実寸）モデル LHD 真空容器実物大模型 1/5 セクタ

LHD本体の実物大スケールで構造を再現したモデルである。1/5セクタとは装置の円周方向の1/5だけを切り出した実物大の部分模型である。ヘリカルコイルは5回ねじられて1周するため、このような分割展示になっていると推察される。



大型ヘリカル装置（実寸）モデル

(4) ヘリウム液化冷凍装置

ヘリウム液化冷凍装置は、ヘリウムガスを極低温まで冷却して液化し、超伝導磁石に供給するための基盤設備である。圧縮・乾燥・冷却・膨張・貯蔵・回収の一連のシステムで構成され、核融合施設で不可欠なインフラとなっている。当該装置は年間の2/3におよぶ安定的な連続運転を実現している。



ヘリウム液化冷凍装置

6. 課題

核融合炉商用化実現への課題は、技術的課題と制度的課題に大別される。以下には主要と思われる課題を挙げる。

6. 1. 技術的な課題

(1) 高性能プラズマの長時間維持

核融合炉の実現には、1億度級の高温プラズマを長時間安定して維持する必要がある。LHDは長時間運転に適したヘリカル方式であるものの、プラズマ乱流によるエネルギー損失や不純物混入による放射損失、磁場構造の最適化の限界等の課題がある。これらは、実験と理論の両面からのアプローチが必要である。

(2) 材料の耐久性

核融合炉では、中性子が材料に照射されるため、材料の劣化が深刻な問題となる。特にダイバータ部は極めて高い熱負荷を受けるため、タンゲステンなどの高融点材料の研究が進められているが、格子欠陥の蓄積や材料の脆化、熱疲労、廃棄時にも問題が生じる。

(3) 三重水素（トリチウム）燃料サイクルの確立

核融合炉では、トリチウムを炉内で生成・回収し、再利用する必要がある。ブランケット材によるトリチウム生成効率の向上や回収システムの信頼性確立、トリチウムの漏洩管理等が課題となる。トリチウムは放射性物質であり、社会的受容性にも影響するため、安全管理体制の確立が不可欠である。

6. 2. 制度的な課題

(1) 研究開発の長期性と予算制度の不整合

核融合研究は数十年単位の長期プロジェクトである。しかし、予算制度は年度単位であり、長期的な研究計画との整合性が課題となっている。

装置更新の長期計画が立てにくく、若手研究者の雇用が不安定となる。また、国際共同研究の継続性が維持しにくい等があげられる。

(2) 研究予算額の問題

令和6年度概算要求では、ITER および BA (Broader Approach) 活動などに 292 億円が要求されている。そのうち NIFS への予算は約 70 億円である。諸外国と比べると規模に差がある。

(3) 産業界との連携不足

核融合炉の実現には、材料、機械、電機、化学など、多様な産業分野の技術が必要である。しかし、現状では産業界の参入インセンティブが弱いことや 技術仕様が確定しておらず、投資判断が難しいとの指摘がある。

(4) 社会受容性の確保

核融合技術は「安全」とされるが、国民全般への理解は十分とは言えない。原子力発電所と混同されることも少なくない。

商用化後の1基当たりの総低出力は、100万kWを目標としている。これは、一般家庭の30~50万世帯分を賄う量で、既存の原子力発電所1基分と同程度である。これを複数機建設して300~500万kWのサイトを構成する方向性と伺った。

■核融合炉と原子力発電所の比較

| 項目 | 核融合炉（商用想定） | 原子力発電（PWR/BWR） |
|--------------------|------------------------------------|-------------------------|
| 建設コスト (100万kW級) | 約0.7~1.3兆円 | 約0.8~1.5兆円 |
| 運用コスト | 現時点では核分裂よりも高価 | 比較的安価 |
| 燃料コスト | Dは安価、Tは非常に高価 | ウラン燃料は安価であるが濃縮・廃棄物管理が必要 |
| 廃棄物処理 | 放射化する構造材が主であり、高レベル放射性廃棄物は基本的に発生しない | 高レベル放射性廃棄物の長期的管理が必要 |
| 電気料金 | 初期は高いが、成熟後に低減され原発より安価となる可能性はある | 10~15円/kWh程度 |
| 安全性 | 暴走反応が生じない（◎） | 炉心溶融などの重大事故リスクを内包（○） |
| 環境負荷 | CO2排出ゼロ（◎） | CO2排出ゼロ（◎） |
| | 高レベル放射性廃棄物はほぼ出ない（◎） | 高レベル放射性廃棄物の長期管理が必要（△） |
| 技術的成熟度 | プランケットの材料寿命など技術的な課題がのこっている。（途上）（△） | 技術が成熟している（◎） |

6. 3. 民間の投資環境

世界の民間核融合企業を俯瞰すると、累計資金調達は 5,000 億円を超えており、特に 2021 年単年で約 3,000 億円が投資されるなど、近年資金流入が顕著である。企業数は過去 6 年で新たに 21 社が設立され、累計 33 社に達した。これらの企業はベンチャーキャピタル (VC) から数千億円規模の投資が行われている。多くが 2030 年代の商用発電実用化を目指し、脱炭素やエネルギー安全保障といった社会的背景に資金を呼び込んでいる。

米国では「Fusion Energy Strategy 2024」（米国エネルギー省の商用化実現に向けた 10 年戦略）を策定し、商業化に向けた規制整備（NRC：米国原子力規制委員会による新安全基準方針）や 1 社当たり最大約 4,500 億円規模の支援検討など、官民での大型支援が進められている。LLNL（ローレンス・リバモア国立研究所）での点火に関する成功報告以降、CFS（世界最大級の民間核融合企業）などが数千億円規模の資金を集め、民間主導の商業化目標が前倒しで提示されている。

欧州では ITER の補完として、ベンチャーによる低コスト・早期実現の潮流が形成され、ここ数年で累計数千億円のベンチャーキャピタル (VC) 投資が集中している。

一方わが国では「フュージョンエネルギー・イノベーション戦略」や FAST 構想などで方針を示す一方、民間の大型 R&D 参入は限定的で、投資は海外に比べて低調との指摘がある。それでも京都フュージョニアリング、Helical Fusion などの民間プレイヤーが台頭し、サプライチェーン構築や許認可検討が進み始めている。

米国・欧州が先行して民間投資が盛んであるが、2023 年以降は中国が一気にトップクラスに台頭している。我が国の技術的優位は高いものの、民間投資は脆弱であり、今後投資環境の整備が課題となる。

7. まとめ

核融合科学研究所 (NIFS) の視察を通じて、わが国の核融合技術が世界的にも高水準であり、有用さを再認識した一方で、技術的・制度的な課題が多く、実現には長期間を要する。研究予算額や民間投資の部分では、諸外国に比べて脆弱であることは懸念材料である。核融合技術のニーズは大きいと確信するが、広報活動などマーケティング活動が不十分であり、研究の進捗に支障が生じることが懸念される。

今後、AI のさらなる普及で、電力需要が増大することが明らかである中、環境負荷の低減も求められている。核融合技術の確立により、安価で安定的な電力供給がもたらされ、我が国のエネルギー安全保障の向上につながることを期待したい。

本報告が核融合研究の理解促進および今後の普及促進につながることを願う。