

## 2021 年度外部評価報告書の概要

2021 年度の核融合科学研究所外部評価委員会（以下、「委員会」とする）は、第 3 期中期目標期間（2016 年度～2021 年度）における、大型ヘリカル装置計画プロジェクト（以下、「LHDP」とする）、数値実験炉研究プロジェクト（以下、「NSRP」とする）、核融合工学研究プロジェクト（以下、「FERP」とする）について評価するため、2021 年 10 月 12 日から 2022 年 2 月 4 日にかけて開催され、ヒアリングと審議を行った。委員会の下に三つの専門部会が設置され、各専門部会が担当する研究プロジェクトについて報告をまとめ、その後、委員会が各専門部会の報告を基に外部評価報告書を作成した。委員会は、三つの研究プロジェクトにおける広範な科学的成果と物理的発見があったことを銘記するものである。さらに、新型コロナウイルス（COVID-19）の感染拡大による特別な状況に鑑み、核融合科学研究所による共同研究への卓越した支援に対し、委員会は真価を認識する。また、委員会は、LHD 実験に係る予算措置が 2022 年度に終了するという状況を深刻に受け止め、この外部評価が、核融合科学研究所の今後の方向性を策定する際の一助となることを期待する。

この外部評価は、以下に示す評価の観点に対応している。

**評価項目 1** 設定した目標は核融合科学研究所の在り方から見て適切であったか、また、研究成果や研究動向に照らして適切な更新がなされ、それに対応する措置がとられてきたか。

- ・ 高性能プラズマを実現し、重水素実験を学術研究として実施するために、プラズマ制御、加熱、計測、安全管理設備の向上など、LHDP に関する具体的な計画が立てられていることは適切である。
- ・ NSRP は、LHDP との連携の下、数値シミュレーションを用いて炉設計研究を加速するために組織された。研究計画の基本的な設計は有意義であり、研究プロジェクト全体として妥当である。核融合科学研究所の理論・シミュレーション研究部門の研究活動の体系化を進め、NSRP の目標を達成するために組織化された研究計画を推進した。
- ・ FERP では、新たに追加された研究対象を含めて、炉設計の改良が行われ、大型高磁場超伝導マグネットと先進ブランケットシステムの実規模試作の工学設計に向けた取り組みが行われた。その後、ヘリカル炉に向けた学術研究ロードマップを確立する見通しがまとめられ、炉設計研究の成果として、炉設計と研究開発との連携を強化している。
- ・ 委員会は、核融合科学研究所に対し、LHDP に蓄積された研究結果を基礎物理の知見として体系化するよう提言する。これは、国際的な研究コミュニティに対し、核融合科学研究を次の段階に進めるための指標を提供するものである。また、核融合科学研

研究所に対し、LHDP において提起された未解明の重要な科学的問題を解決するための方策を探求するよう提言する。

- FERF の目標について、これまでの核融合科学研究所の優れた研究結果に基づき、様々な方式の核融合炉概念に適用可能な、より基礎的な核融合工学に移行するよう提言する。
- 核融合科学研究所の科学的な目標は、LHD 関連の科学に焦点を当てすぎてきたように思われる。これにより、例えば、ITER 計画や、天体物理学におけるプラズマ物理、素粒子-ハドロン物理、流体力学、数理科学を含むプラズマ・核融合科学コミュニティにおける広範な関心を、意図せず排除していた可能性がある。核融合科学研究所が次の段階に進むにあたって、この点について検討するよう提言する。

## 評価項目 2 学術分野の大学共同利用機関として十分な成果が生み出されたか。

- ここ数年の間に、LHDP において、多くの卓越した物理的な研究結果が得られた。これらの研究結果には、同位体効果、閉じ込めと輸送、制御、プラズマ壁相互作用など、核融合炉に関連するプラズマの物理と制御に係る重要な見方を網羅している。これらの研究結果は、世界中で進められている研究に対し、大きな影響を与えるものである。これらの結果は、包括的な計測群、LHD プラズマの制御性、優れた研究組織によって得られたものである。
- NSRP は、プラズマの中心部からプラズマ対向壁を含む周辺部にまたがる最先端の計算コード群を開発した。NSRP は、共同研究を通じて、多様な学際的研究を受け入れてきた。NSRP は、核融合科学研究所がプラズマ・核融合科学に係る先導的な研究機関として学際的研究を推進するため、多様な研究分野の進展に、より積極的な役割を果たすことができたものと考えられる。
- 核融合工学のための主要な研究設備の共同利用が積極的に推進され、それらの設備を利用した研究活動によって、多くの研究成果と論文が生み出されている。核融合科学研究所は、大学共同利用機関としての役割の観点から、核融合工学の学術分野における研究活動に顕著な貢献を果たした。
- 核融合科学研究所は、大学では実施が難しい世界レベルの実験研究を推進すべきであり、大学における探索的・独創的な研究との連携協力及び双方向性を強化するよう提言する。

- ・ よりオープンかつ柔軟な共同研究計画のために、共同研究の範囲を、LHDP を中心とした現在の枠組みから、プラズマ・核融合科学全体を範囲とした、より多様な研究分野にまで拡大する必要がある。

**評価項目 3 第3期中期計画における下記特記事項の観点から十分な成果が上げられたか。**

**LHDP の評価項目 3-1 ヘリカル方式の物理及び工学の体系化と環状プラズマの総合的理解に向けて、大型ヘリカル装置 (LHD) の更なる性能向上を目指し、プラズマ制御、加熱及び計測機器、並びに安全管理設備の整備を進めて、重水素実験を実施する。**

- ・ 超伝導コイルの運転計画が非常に良く実施されたことは高く称賛され、計画された放電の 92% を遂行した。核融合炉に相応するプラズマの物理と性能について鍵となる側面に関する LHDP の目覚ましい進歩は長年にわたって認識されており、様々な視点から環状プラズマの理解が進んだことは称賛に値する。
- ・ LHDP における重水素実験のために開発された加熱及び計測システムの知見は、次の核融合装置に貢献することが期待される。また、ヘリカル方式の物理や工学の体系化については、W7-X との更なる比較を行うよう強く提言する。環状プラズマの総合的な物理的理解に関する多くの成果があり、核融合科学研究所は、この方向性の中で未解決の問題を解決するための新しい枠組みを模索すべきである。

**LHDP の評価項目 3-2 第3期中期目標期間終了時まで、イオン温度 1 億 2,000 万度を達成し、核融合炉に外挿可能な超高性能プラズマを実現する。**

- ・ ヘリカル方式におけるイオン温度 1 億 2,000 万度の高温プラズマの実現と、イオンと電子の両方の温度が 1 億度に達する高温プラズマの生成は、高く評価される。
- ・ 核融合炉に外挿可能な超高性能プラズマの実現の観点から、LHD において現在実現されている高密度領域や高温領域から、核融合炉の条件を満たす領域に到達する方向性は、ローソン図において明確になっていない。ヘリカル方式において核融合炉に外挿可能な高性能プラズマへのアプローチを特定する実験的な研究は、LHD の最大限の活用と、W7-X との国際共同研究の加速によって推進するべきである。

**LHDP の評価項目 3-3 重水素放電におけるイオンの内部輸送障壁形成や粒子リサイクリング特性等に関する水素同位体効果を、共同研究を基盤とする学術研究により検証する。**

- ・ 閉じ込めと輸送に対する同位体効果に関して、良好な実験結果が得られた。核融合炉への外挿に重要となる、イオンに対する同位体効果及び内部輸送障壁を示す放電における電子輸送について、新たに優れた結果が得られた。
- ・ 理論との比較を通じて同位体効果の根本的な物理機構を明らかにするために、更なる研究を行うよう提言する。

**NSRP の評価項目 3-1 プラズマシミュレータ（スーパーコンピュータシステム）を有効活用して、数値実験炉の構築に向けたコアプラズマから周辺プラズマ・プラズマ対向壁までを含むシミュレーションコードの整備・拡張・高精度化及び統合化のための研究を進めるとともに、平成 31 年度中において、プラズマシミュレータの性能を現行機種と比べて 4 倍以上に向上させ、それに対応した各種 3 次元コードの最適化を行う。**

- ・ プラズマシミュレータ（核融合科学研究所のスーパーコンピュータシステム）は、目標としていた性能を達成するため、当初の予定から 1 年遅れとなる 2020 年 7 月に更新された。新たなシステムは、様々なシミュレーションの開発と実行に十分に活用され、当初の目的を達成している。
- ・ 核融合炉関連の研究のための様々なシミュレーションコードの開発・拡張・統合は、目標項目ほぼ全てで達成されている。特に、ハイブリッドコード MEGA や、ジャイロ運動論シミュレーションコード GKV、周辺プラズマ解析コード EMC3-EIRENE などのコード群、統合輸送解析コード TASK-3D において、顕著な成果が見られる。
- ・ NSRP のトップ 10% の論文の割合は 6.7% であり、国際的な平均値を下回っている。また、論文の国際共著率の平均値は 39.1% であり、国際的研究機関としては十分に高い割合ではない。委員会は、NSRP がより広い分野との協力を進め、国際共同研究をより活性化することによって、研究を拡張するよう提言する。

**NSRP の評価項目 3-2 平成 31 年度までに、コアプラズマにおける乱流輸送のモデル化と統合輸送コードへの組み込み、第 3 期中期目標期間終了時まで、各種輸送コードに複数イオン種効果を取り込む。さらに、第 3 期中期目標期間終了時まで、タングステンを中心とするプラズマ対向材の物性値評価に必要であるプログラミングの改善や新たなモデルの構築により分子動学的シミュレーション技法を開発する。**

- NSRP は、乱流輸送の研究において、いくつかの重要な成果を上げている。LHD のような 3 次元磁場構造を持つ非軸対称装置の輸送の定量的評価は、軸対称（トカマク型）装置と比較して質的に異なる困難を伴うことは、注目すべきである。これは、3 次元磁場構造が数値モデリングを複雑にするためである。これらの困難にも関わらず、NSRP はヘリカル方式の輸送研究において最先端の研究を成功裏に推進し、国際的に注目される研究成果を生み出した。
- 二体衝突、運動論的モンテカルロ、分子動力学に基づいて、マルチハイブリッドシミュレーション技術が開発された。その結果、ヘリウムプラズマ照射に起因するタングステンの「ファズ」ナノ構造体の形成過程が、シミュレーションによって解明された。また、分子動力学に基づいて、タングステン壁面における水素プラズマ壁相互作用のリサイクルモデルを構築し、LHD プラズマの解析についても目覚ましい進歩をもたらした。
- 乱流及び新古典輸送の分野における強みを維持すべきである。位相空間ダイナミクスの高解像度を備えたフラックスチューブコード(GKV)と、メゾスコピック構造の自己組織化と周辺乱流輸送を扱うグローバルコード(GT5D や FORTEC-3D など)との間の良好なバランスと相乗的な協力は、将来の研究エフォートの再編成を行う上で優先度の高い項目であるべきである。

**NSRP の評価項目 3-3** 上記目標を達成するための支援研究として、LHD プラズマを始めとする磁場閉じ込めプラズマの 3 次元平衡、輸送、不安定性、非線形発展についての実験結果との照合によりコードの完成度を高めるとともに、関連する基礎物理等に関するシミュレーション研究を行う。

- NSRP と LHDP の実りある協力につながるシミュレーション研究活動について、高く評価する。実験結果と比較することにより、平衡、MHD、新古典及び乱流輸送などに関する主要な物理過程を特定し、解釈した。
- 磁気リコネクション、ホール MHD 乱流、マルチスケール運動論的モデルによる磁気リコネクションといったシミュレーションや、ラージエディモデルに基づく高レイノルズ数の乱流シミュレーション等によって、基礎物理研究が推進されており、これらは優れた結果であると評価できる。
- 委員会は、核融合科学研究所に対し、学際的研究を促進し、核融合・プラズマ科学のより広い分野において核融合科学研究所の主導的な立場を維持するために、多様な

研究分野の開拓におけるこれまで以上に積極的役割を果たすべきことを提言する。次期中期目標期間に向けて、ITER を含む、より核融合に向けた世界的な喫緊の課題とのバランスを取りながら、どのように進むべきかを検討する時期である。

**FERP の評価項目 3-1 核融合炉の早期実現を目指し、平成 28 年度でヘリカル炉の概念設計をまとめ、各開発課題の数値目標を具体化する。**

- ・ 2016 年に、概念設計と研究開発活動について、各開発課題の数値目標をまとめた付属資料と合わせて約 450 ページの報告書（日本語）に詳細にまとめた。要約された報告書は、ヘリカル炉のロードマップ、設計方針、技術ギャップ、研究開発、シミュレーションを明確にし、各開発課題の数値目標を具現化した。
- ・ FERP で開発された可視化ツールは、目標とした学術ロードマップの作成や、より広い視野による核融合工学のシステム化の確立のために、効果的に活用されるべきである。

**FERP の評価項目 3-2 炉設計の精密化の推進、それと連動した基幹機器の高性能化と高信頼性、規格基準の確立に向けた開発研究を推進することにより、第 3 期中期目標期間終了時までには、大型高磁場超伝導マグネットと先進ブランケットシステムの実規模試作の工学設計をまとめるとともに、ヘリカル炉に向けた学術研究ロードマップを報告書にまとめる。**

- ・ 炉設計の改良を行い、極低温システム設計や真空容器内部品設計等を含め、大型高磁場超伝導マグネットや先進ブランケットシステムの実規模試作の工学設計に向けた取り組みを行った。その後、ヘリカル炉に向けた学術研究ロードマップを策定する見通しをまとめ、炉設計研究の成果として、炉設計と研究開発の相互関係を強化している。
- ・ 核融合科学研究所は、先進ブランケット設計の基礎研究を推進し、DEMO TBM（原型炉テスト・ブランケットモジュール）にその結果を取り入れるべきである。磁場閉じ込め核融合炉だけでなく、核融合炉研究以外の分野にも研究を拡大するためにも、HTS（高温超伝導マグネット）の設計及び製造技術の研究開発を推進すべきである。

**FERP の評価項目 3-3 第 2 期で立ち上げた大型設備である「熱・物質流動ループ」や「大口径強磁場導体試験装置」等の拡充と拠点化による国内外との共同研究の機能強化、及び規格・基準構築に向けての知見の集積化による核融合工学の体系化と学際研究への寄与を図るとともに、関**

### 連技術の産業界への展開・促進を図る。

- ・ 核融合科学研究所は、核融合工学に関連する特徴的な大型設備を多く保有しており、大学や他の機関の機能強化や、共同利用・共同研究を通じたコミュニティの発展に貢献している。共同利用・共同研究の活動は、超伝導マグネット、液体ブランケット、高熱負荷機器、トリチウム、先端材料の研究分野を対象としている。核融合科学研究所は、これらの分野において顕著な貢献を果たした。
- ・ 規格・基準構築に向けての知見の集積化については、対処すべき課題が多く残っている。核融合科学研究所に蓄積された知見に基づく学際的な研究と産業活動への展開・貢献も、BNCT（ホウ素中性子捕捉療法）や、KAGRA（神岡重力波検出器、大型低温重力波望遠鏡）に適用される極低温技術に見られる。
- ・ 学際的な研究や、産業界への応用に関連した技術を拡大・推進するため、BNCT や KAGRA への貢献に加えてさらに多くの取り組みを行うべきである。

### 評価項目 4 当該分野の国内及び国際的な中核的研究拠点として、大学等の機能強化及びコミュニティの発展に貢献したか。

- ・ 核融合科学研究所の称賛に値する貢献は、核融合科学分野における国内及び国際的な中核的研究拠点として認められるものである。三つの共同研究の枠組みである、LHD 計画共同研究・双方向型共同研究・一般共同研究を通じた、プラズマ・核融合科学コミュニティへの貢献は、明白なものである。これら三つの枠組みに加えて、2019 年から新たに「原型炉研究開発共同研究」が開始されたことは、特筆に値する。この新たな枠組みの構築は、核融合科学研究所が、核融合科学の新たな研究段階、すなわち、核融合炉の実現に向けた燃焼プラズマ研究の時代において、中核的研究拠点として大きな責任を負うことを示すものであり、高く評価される。
- ・ 核融合科学研究所は、共同利用・共同研究を通じて大学や他の機関の機能を強化する、特徴的な大型設備を数多く保有している。幅広く、活発な共同研究の成果は、核融合科学研究所が中核的な役割を果たし、大学の機能を強化していることを明確に示すものである。
- ・ 大学共同利用機関として、核融合科学研究所は、年間 500 以上の共同研究課題を実施し、優れた役割を果たしている。新型コロナウイルス（COVID-19）感染拡大下において、国内外の共同研究者が LHD 実験に遠隔参加できるシステムを提供していることは、傑出したものと高く評価される。

- ・ 委員会は、LHDP に対する現在の予算支援の終了が LHD 計画共同研究の終了につながるものであり、プラズマ・核融合科学コミュニティに重大な影響を与えるものであることに留意する。核融合科学研究所は、大学における活動を支援するために、現在の枠組みの代替となるものを見出す努力をすべきである。
- ・ 予算上の困難に直面しており、JSPS（日本学術振興会）の科学研究費助成事業のような外部資金の獲得を、今まで以上に追求する必要がある。委員会は、核融合科学研究所に対し、外部資金の限られた採択率の理由を体系的に分析し、必要な対策を講じるよう提言する。核融合科学研究所にとって、優れた研究計画のために十分な資金を調達する戦略を立てることは、最も重要な課題の一つである。
- ・ 燃焼プラズマを実現し、原型炉計画を具体化するという核融合研究の新たな段階に入る時期を迎えている。そのため、核融合科学研究所が、今後の核融合研究において大学を結び付け、大学における関連活動を促進するハブとなるよう提言する。

**評価項目 5 国際交流協定等に基づき、海外の研究拠点との研究者交流、共同研究により国際化を進めたか。**

- ・ 核融合科学研究所が 15 か国 33 機関との協定に基づき、研究プロジェクトを進めていることは称賛に値する。国際共同研究は、主に二国間または多国間の枠組みの下で促進された。
- ・ LHD データのオープンサイエンス化の進展とともに、新型コロナウイルス (COVID-19) 感染拡大下にも関わらず、LHDP における海外からの提案の数は大幅に増加している。これは優れた実績である。
- ・ NSRP においても、JIFT（日米科学技術協力事業）による研究者交流やワークショップなどにより、国際共同研究が積極的に推進されている。これらにより、核融合科学研究所は、世界のプラズマ・核融合科学分野において主導的な役割を果たしている。
- ・ マグネット研究、極低温、負イオン源、材料研究、プラズマ壁相互作用、核融合中性子源に至るまで、多くの核融合工学の研究テーマに取り組んできた。これらの共同研究は、日本の研究の国際化に極めて大きく貢献した。
- ・ 核融合科学研究所は、各協定の有効性を評価し、その評価に基づいて、実質的な研究者交流と共同研究を選択的に活性化すべきである。



評価項目 6 大学等とともに人材育成に組織的に取り組み成果を上げたか。

- ・ 核融合科学研究所では、プラズマ・核融合科学コミュニティにおける人材育成に貢献する教育システムを構成している。総合研究大学院大学核融合科学専攻に加え、名古屋大学、九州大学、東京大学との連携大学院協定に基づき、これらの大学の大学院生に対し、核融合科学研究所の優れた研究環境の下で学ぶ機会を提供している。
- ・ ポスドク制度である特別研究員制度は、核融合関連研究分野における次世代の研究者育成に大きく貢献することが期待されており、高い評価を得ている。
- ・ ポスドクの活動が、特筆に値するレベルに達していないことに留意すべきである。JSPS の特別研究員 (PD レベル) の数は、ここ数年で 0 名であった。これは、核融合科学研究所が、海外の良く知られた科学研究機関と比較して、若い科学者に対して魅力的なキャリアパスを提供することができなかったことを示している。プラズマ・核融合研究分野において高い水準と研究所の活力を維持するためには、新しい有能な研究者がこのコミュニティへ継続的に参画し続けることが不可欠である。核融合科学研究所は現状を改善するために必要な措置を講じるべきである。
- ・ 核融合科学研究所に対し、将来の核融合科学の研究活動に求められる教育と人材育成を実施するよう提言する。