

大規模学術フロンティア促進事業の「期末評価」（報告）

「超高性能プラズマの定常運転の実証」について

令和6年(2024年)3月14日

科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会
学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会

目次

はじめに	- 3 -
1. 期末評価の実施方法	- 4 -
2. プロジェクトの概要	- 5 -
①概要と主な内容	- 5 -
②実施体制	- 5 -
③年次計画及び予算規模	- 6 -
3. プロジェクトの達成状況	- 7 -
・ プロジェクトの達成状況	- 7 -
・ プロジェクトの実施体制	- 8 -
・ 学術的意義と波及効果	- 8 -
・ 社会的意義と波及効果	- 9 -
4. プロジェクトの進捗評価と今後の留意点	- 9 -
①プロジェクトの達成状況を踏まえた評価	- 9 -
②今後の留意点	- 10 -
科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会 委員名簿	- 11 -
別添：年次計画	- 12 -

はじめに

学術研究の大型プロジェクトは、最先端の技術や知識を結集して人類未踏の研究課題に挑み、当該分野の飛躍的な発展をもたらすとともに、世界の学術研究を先導するものであり、社会や国民の幅広い支持を得ながら、長期的な展望を持って、これを推進していく必要がある。

文部科学省では、平成 24 年度(2012 年度)に「大規模学術フロンティア促進事業」(以下「フロンティア事業」という。)を創設し、科学技術・学術審議会学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会(以下「本作業部会」という。)が策定する「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ーロードマップー」等に基づき、社会や国民からの支持を得つつ、国際的な競争・協調に迅速かつ適切に対応できるよう、学術研究の大型プロジェクトを支援し、戦略的・計画的な推進を図っている。

各プロジェクトの推進に当たっては、本作業部会として原則 10 年以内の年次計画を作成し、これに基づく進捗管理等を「大規模学術フロンティア促進事業のマネジメントについて」(令和 5 年(2023 年)4 月 20 日本作業部会決定)(以下「マネジメント」という。)に基づき実施している。フロンティア事業として実施したプロジェクトについては、フロンティア事業として定める「年次計画」が終了した後に、当初の目的、目標が達成されたか否かを評価、公表し、その意義、成果、波及効果等について、社会や国民への説明責任を果たすべく、本作業部会として「期末評価」を行うこととしている。

「超高性能プラズマの定常運転の実証」について

フロンティア事業の一つである、「超高性能プラズマの定常運転の実証」(以下「本計画」という。)は、令和 4 年度(2022 年度)に年次計画が終了したため、フロンティア事業としての 10 年間の総括を行うために「期末評価」を実施し、本報告においてその結果を取りまとめた。

なお、評価に当たっては、本作業部会の委員に加え、当該分野における専門家にアドバイザーとして協力いただいた。

1. 期末評価の実施方法

「マネジメント」に定める評価の流れに基づき、期末評価を以下のとおり実施した。

【本作業部会における期末評価の経過】

- ・ 実施主体からのヒアリング
若手含む実施研究者との意見交換
(令和6年(2024年)2月8日(木))
- ・ とりまとめ書面審議
(令和6年(2024年)3月7日(木)～3月14日(木))

2. プロジェクトの概要

①概要と主な内容

- ・ 実施主体
自然科学研究機構核融合科学研究所
- ・ 計画概要
核融合エネルギーの早期実現のためには高温高密度のプラズマの定常保持の実証が不可欠であり、核燃焼実験炉計画 ITER と相補的に、我が国独自のヘリカル方式によるプラズマ閉じ込め装置である大型ヘリカル装置（LHD：Large Helical Device）の最高性能化計画を推進する。
- ・ 計画期間
平成 25 年度（2013 年度）～令和 4 年度（2022 年度）10 年計画
[参考]
LHD 建設：平成 2 年度（1990 年度）～平成 9 年度（1997 年度）
運転開始：平成 10 年度（1998 年度）～
- ・ 所要経費
施設費 約 16 億円（重水素実験に伴う高度化）
年間運用経費 約 40 億円
[参考]
LHD の建設費総額 約 507 億円
- ・ 研究目標（研究テーマ）
 - 1) 炉心プラズマ実現に必要な学理（物理的、工学的）の体系化
 - 2) 将来の原型炉設計・製作のために必要な学術基盤の形成
- ・ 評価等の経緯
事前評価：平成 25 年度（2013 年度）
進捗評価：平成 28 年度（2016 年度）、平成 30 年度（2018 年度）

②実施体制

本計画は、自然科学研究機構核融合科学研究所を実施責任機関として、国内の大学や海外の学術協定締結機関との連携のもとで推進。所内外の共同研究者で構成される LHD 実験会議を設置し、LHD の実験計画、運転計画、整備計画等の策定等、LHD プロジェクトの運営についての総合的な企画・調整を実施。LHD 実験会議のもと、LHD 装置運転の整備を担う技術部や 4 つのトピカルグループから構成される実験グループが連携する体制を構築。

なお、2017 年度には、国際共同研究をより活性化させるため、ヨーロッパ、アメリカ、アジアにおける主要な研究機関の代表者を委員とした LHD 国際プログラム委員会を設置。

③年次計画及び予算規模

別添のとおり

3. プロジェクトの達成状況

・ プロジェクトの達成状況

本計画は、世界最大級の超伝導プラズマ閉じ込め装置である LHD を運用し、世界最高の時空間分解能をもつ計測装置群によって、将来の核融合炉を見通すことができる超高温プラズマの実現及びその安定性と閉じ込め性能を支配する物理機構の解明を目標としたものである。

超高温プラズマの生成については、核燃焼条件に必要な 1 億度を超えるイオン温度と、定常的に核燃焼状態を維持するために必要な 1,000 秒を超えるプラズマ保持時間を実現することを必要な性能目標値として設定した。これらの数値目標については、平成 29 年度(2017 年度)に開始した重水素実験によりイオン温度 1 億 2,000 万度を実現したほか、2,300 万度の高温プラズマを 3,000 秒間にわたって閉じ込めることに成功した。

さらに、高時空間分解能計測を用いて高温のプラズマを構成する粒子の運動が支配するミクロ階層を可視化することで、超高温プラズマの安定性を左右する複雑な物理現象を世界に先駆けて解明した。また、同位体効果の複雑性と多様性の解明、プラズマ乱流による効率的な同位体混合の実証、突発現象のメカニズム解析、乱流伝播と非局所輸送の相互作用による閉じ込め性能の改善、無衝突エネルギー移送の機構解明、そして先進燃料を用いた水素-ホウ素核融合の実証等の優れた成果を生み出しており、将来のフュージョンエネルギー実現に貢献する重要な成果と評価できる。

これらの成果は、核融合技術開発に不可欠な物理の解明のみならず、核融合炉開発に必要な基幹技術の発展にも貢献している。具体的には、本計画期間を含め、LHD の大型超伝導・低温システムを 24 年間以上、通算稼働率が 99%に達する長期安定運用を通じて、運転にかかる詳細データの取得とともに、メンテナンスや自動化に係る重要な知見が得られている。また、負イオン源を用いた中性粒子ビーム入射加熱装置 (N-NBI)、高時空間分解能計測システムの開発等のイノベーションが生み出され、その一部については既に ITER 計画への導入が計画されている。

加えて、特に令和 3 年度(2021 年度)以降の計画では LHD を活用して核融合分野を超えたプラズマ物理の応用に取り組み、学際的な連携強化を進めてきた。本計画では、LHD 実験データの完全オープン化を進めており、データの公開により様々な分野の研究者が多角的視点からそれを分析し、新たな学術的展開・研究成果の創出に貢献している。例えば、天文分野における太陽コロナの密度計測や中性子星合体時の重原子合成メカニズムの解明、生物分野における生体用顕微鏡のための EUV 光源の開発など、核融合以外の分野で学際的な波及が見られるなど、全体として目標以上の成果が得られているものと認められる。

・ プロジェクトの実施体制

自然科学研究機構核融合科学研究所が主体となって、明確な責任体制と役割分担のもとで推進されている。

具体的には、所内外の共同研究者で構成される「LHD 実験会議」において研究者コミュニティからの提案を受けながら、実験計画の立案、装置運転のマネジメントに責任をもつ体制となっている。また、実験計画の策定や実施については「実験グループ」が担い、LHD の装置運転と整備については「技術部」が担うなど、役割を明確にした運営体制を構築している。4つのトピカルグループから構成された「実験グループ」においては、研究の進展に伴いトピックスの見直しを行うなど柔軟な運営を実現するとともに、国内外の大学や研究機関から国際アドバイザーを配置することで、広く研究者コミュニティの意見を取り入れると同時に、トピカルグループリーダーに若手研究者を起用するなど人材育成にも配慮している。

さらに、「LHD 国際プログラム委員会」を通じて、実験グループに国際アドバイザーを導入したことにより、外国人共同研究者の割合が、平成 25 年度(2013 年度)から令和 4 年度(2022 年度)にかけて、約 5%から 38%程度に増加し、海外 48 の大学や研究機関から合計 872 名の共同研究者が参加した。海外の研究機関の代表者である委員が情報発信・集約のハブとなり国際共同研究の拡充が図られたほか、英語版マニュアルの整備や英文ホームページの充実、遠隔実験参加のための環境整備も進められている。

なお、重水素実験を実施するに当たっては、24 時間体制で装置と放射線に関する監視を行っているほか、核融合科学研究所が主催する第三者委員会「核融合科学研究所重水素実験安全評価委員会」にて重水素実験計画の安全性を評価するとともに、協定書に基づき岐阜県・土岐市・多治見市・瑞浪市が合同で設置する第三者委員会「安全監視委員会」の承認も得ながら遂行するなど施設・設備の厳格な運用に努めており、平成 30 年(2018 年)8 月 30 日の進捗評価にて指摘した留意点のうち「安全管理体制の維持」にも適切に対応していると認められる。

・ 学術的意義と波及効果

世界でも例のない超高温プラズマの高時空間分解能計測により、これまで明らかにされていなかったプラズマの複雑性の根源となっているミクロ階層の物理を可視化することができるようになった。これにより、同位体効果の解明をはじめ、プラズマの崩壊現象や乱流現象をより精密に評価できるようになるなどの学術的意義の高い成果をあげている。

さらに、令和 3 年度(2021 年度)からは、核融合科学の学際的研究に積極的に取り組んでおり、他分野からの所外アドバイザーを迎えた結果、学際的テーマに基づく異分野融合研究に関する実験提案が増加した。例えば、

LHD を光源とした重元素の分光データが天体の観測データを解釈するために応用され、天文や地球磁気圏の分野にも通じる成果を生み出した結果、核融合専門誌以外の雑誌からの論文引用数の増加につながるなど、オープンサイエンスの推進と相まってコミュニティの拡大に大きく貢献している。

また、国際化の取組として「LHD 国際プログラム委員会」を設置したことにより、人的交流による国際的な頭脳循環が図られた。加えて、実験計画の策定と実施を担うトピカルグループのリーダーやサブリーダーとして若手人材を積極的に登用した結果、トピカルグループリーダーを務めた 39 歳未満の若手研究者が全体の 44% を占めるなど、若手がリーダーシップを発揮できる機会を創出した。

・ 社会的意義と波及効果

エネルギー問題の解決に向けて、フュージョンエネルギーへの期待が急速に高まる中、LHD による超高性能プラズマの研究成果は、核融合工学の基盤を支える学術研究の推進という観点から大きく貢献しており、高い社会的意義が認められる。

また、本計画を通じて開発されたセラミック焼結技術や異種金属の接合技術、レーザー加工技術などは、他の分野にも応用されており、計画期間中における 40 件の特許取得や 3 社のスタートアップ企業創出に結実するなど、学術振興から社会への還元を実現している。

さらに、メディア向けの成果発信に加えて、市民向け講演会や施設公開などのアウトリーチ活動など、社会や国民からの支持を得るために積極的に取り組んでいると判断できる。特に重水素実験に関しては、放射線に関するモニタリングデータを公開するとともに、平成 18 年度(2006 年度)から重水素実験が終了した令和 4 年(2022 年)まで毎年市民説明会を実施し、重水素実験の安全性と安全管理計画について説明することで地域とのコミュニケーションを深めるなど、近隣住民や地域関係者との信頼関係構築に取り組んでいる。

4. プロジェクトの進捗評価と今後の留意点

①プロジェクトの達成状況を踏まえた評価

本計画では、フュージョンエネルギーの実現にとって特に重要な課題である「超高温プラズマの定常保持」を可能にするための物理的基礎を築くことを中心的な課題として設定し、プラズマ保持性能に優れた LHD の特徴を活かしつつ、プラズマ内部で起こる複雑現象の精密な分析に取り組んだ。その結果、当初予定していた科学目標の達成に加えて、大型プラズマ装置や高度な計測機器を使用して、プラズマの複雑な現象を解明するなど数々の成果をあげ、新しいプラズマ科学の分野を切り拓いた。また、多くの特

許取得やスタートアップ企業創出など、産業への応用も積極的に展開されている点も評価できる。

さらに、令和3年度(2021年度)からは、国際的な研究動向と本計画の進捗状況を踏まえ、これまでの科学目標に加えて核融合科学の学際的展開にも注力した。例えば、装置方式によらない核融合プラズマの一般的な理解を目指し、天文や磁気圏プラズマ等の他分野からのアドバイザーに参画を求めた結果、学際的な実験提案が増加し、重元素の原子過程データの構築研究や分光計測技術の天体観測への応用など、核融合科学の学際的展開及びそれに伴うコミュニティの拡大に大きく貢献した。

これらの成果には、実施主体である核融合科学研究所のリーダーシップのもと、役割分担を明確にした研究推進システムを構築してきたことが寄与しており、さらに、若手を含む国内外の人材に幅広く参画を求めることで、国際頭脳循環の促進と将来を担う人材の育成につながっている点も特筆できる。

②今後の留意点

1) 核融合科学研究所の機能強化

本計画の中核的实施機関である核融合科学研究所は、本計画期間を含め、LHDを用いた研究を通じてフュージョンエネルギー実現に貢献する学術研究を幅広く展開してきた。また、令和3年度(2021年度)以降の本計画では、LHDの特性を生かしてプラズマ科学の学際的展開を進め、プラズマ科学の新たな可能性を切り拓いてきた。今後も、質の高い論文の創出等を通じて国際競争力の強化に努めるとともに、構想中の新たな装置を中心とした研究においても、革新的な成果創出及び幅広いコミュニティへの貢献を通じた一層の研究の活性化に取り組むことを期待する。

2) フュージョンエネルギー実現への貢献

フュージョンエネルギーの実現については、令和5年(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(統合イノベーション戦略推進会議)』が策定され、2050年のカーボンニュートラル実現に貢献する基幹的な技術として、技術開発の加速を図ることとされている。従来の「ITER計画」や「幅広いアプローチ(Broader Approach: BA)活動」に加えて、令和6年度(2024年度)から原型炉実現に向けた基盤整備やムーンショット型研究開発制度による研究開発が行われるところであり、核融合科学研究所には学術的なアプローチからの貢献がより一層求められている。本計画において得られた知見をもとに、今後も積極的なITER計画、BA活動等との連携を図りつつ、当該分野の将来を担う人材育成も含めて学術研究を強力に推進することを期待する。

科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会
学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会 委員名簿

【学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会委員】

(委員)

原 田 尚 美 東京大学大気海洋研究所教授、
海洋研究開発機構地球環境部門招聘上席研究員

(臨時委員)

石 原 安 野 千葉大学国際高等研究基幹教授
上 田 良 夫 大阪大学大学院工学研究科教授
大 橋 隆 哉 東京都立大学学長
桑 田 薫 東京工業大学理事・副学長（ダイバーシティ推進担当）
中 野 貴 志 大阪大学核物理研究センター長
○松 岡 彩 子 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター教授
山 本 智 総合研究大学院大学理事・副学長
◎渡 辺 美代子 日本大学常務理事、特定非営利活動法人ウッドデッキ代表理事

(専門委員)

岩 井 紀 子 大阪商業大学総合経営学部商学科教授
岡 田 真 人 東京大学大学院新領域創成科学研究科教
嘉 糠 洋 陸 東京慈恵会医科大学医学部教授
鈴 木 裕 子 鈴木裕子公認会計士事務所長、理化学研究所監事、公認会計士
関 野 徹 大阪大学産業科学研究所長
三 原 智 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所教授
吉 武 博 通 東京家政学院理事長、筑波大学名誉教授

(アドバイザー)

近 藤 正 聡 東京工業大学科学技術創成研究院ゼロカーボンエネルギー研究所准教授
白 井 治 量子科学技術研究開発機構量子エネルギー部門原型炉推進戦略室長

◎：主査 ○：主査代理（敬称略、50音順）

別添：年次計画

大規模学術フロンティア促進事業の年次計画											
計画名称	超高性能プラズマの定常運転の実証										
実施主体	【中心機関】自然科学研究機構核融合科学研究所 【連携機関】筑波大学、東北大学、富山大学、京都大学、大阪大学、九州大学										
所要経費	建設費総額 約 507億円 重水素実験に伴う高度化 約 16億円 年間運用経費 約 40億円 ※このうち、重水素実験に伴った放射線発生装置としての安全管理経費や、プラズマの高性能化に伴った機器の増備に係る保守経費など、施設・設備の維持・運用経費について約8億円の増額となる可能性があるところ、これらについては、実施機関に対し、本事業予算に限らない、多様な財源の確保と更なる増減の検討を求める。	計画期間	建設期間 平成2年度(1990)～9年度(1997) 運転期間 平成10年度(1998)以降 評価実績: 事前評価 昭和60年度(1985)、平成25年度(2013) 中間評価 平成12年度(2000)、平成15年度(2003)、平成19年度(2007)、平成20年度(2008)、平成25年度(2013) 進捗評価 平成28年度(2016)、平成30年度(2018)								
計画概要	核融合エネルギーの早期実現のためには高温高密度のプラズマの定常保持の実証が不可欠であり、核燃焼実験炉計画ITERとの相補的に我が国独自のヘリカル方式によるLHDの超高性能化計画を推進する。										
研究目標(研究テーマ)	1. 炉心プラズマ実現に必要な学理(物理的、工学的)の体系化 2. 将来の原型炉設計・製作のために必要な学術基盤の形成										
年次計画	2013(H25)	2014(H26)	2015(H27)	2016(H28)	2017(H29)	2018(H30)	2019(R元)	2020(R2)	2021(R3)	2022(R4)	2023(R5)
1 炉心プラズマ実現に必要な学理(物理的、工学的)の体系化	炉心プラズマの実現とプラズマ物理の理工学上の追求(重水素を用いた実験は平成28年度(2016年度)末から令和7年度(2025年度)までの9サイクル)										
重水素を用いることにより、LHDプラズマのさらなる高温・高密度化を図り、下記の研究を実施	イオン温度1億2,000万度の実現▲										
○温度がイオン・電子ともに高温の核融合炉心のプラズマを対象とした環状プラズマ物理の体系化	重水素実験に向けた設備等の整備										
○熱・粒子制御法の確立と定常プラズマと対向壁材料との相互作用の解明	放射線管理区域等の整備										
2 将来の原型炉設計・製作のために必要な学術基盤の形成	核融合原型炉に必要な学術基盤の形成										
原型炉の設計等に必要な学術的要件を求めため、下記の研究を実施	核融合原型炉に必要な学術基盤の形成										
・プラズマの閉じ込め特性などの実験解析(環状磁場閉じ込め装置としてのデータベース構築)											
・原型炉を想定した理論シミュレーション研究の実施											
・原型炉に必要なプラズマ加熱等の工学研究の実施											
評価の実施時期	中間評価 事前評価	-	-	進捗評価	-	進捗評価	-	-	-	-	-
【参考】 計画推進に当たっての留意事項等	【進捗評価報告書における留意点(H30.8)】										
	①核融合研究全体におけるLHDの役割の明確化について 残りのLHD実験期間を利用して、将来の開発研究への展開をも念頭に置き、ヘリカル研究の物理・工学課題の設定と解決を図るべきである。また、ヘリカルの定常性等を活用し、同位体効果をはじめとするプラズマ学理の一層の深化を図ることが期待される。 原型炉の実現に向けては、「アクションプラン」等において、トカマク・ヘリカル方式の違いに依らず、解決すべき共通課題が多岐明らかになっている。そのことを踏まえ、両方式における相補性の確保と学理の調和に向け、ITERやJT-60SAとの連携も密にし、トカマク方式では解決しにくい物理・工学課題に対し、LHDが担うべき役割を果たすことが求められる。環状プラズマの理解を深めるためにも、学術的な観点を抽出し、LHD研究からトカマク研究への寄与も果たすべきである。										
	②プロジェクトの推進に対する多様な財源の確保について 厳しい財政環境の中、実験の安全性と計画的な確保、並びに達成すべきサイエンスに対して必要な実験時間の確保に向け、国からの予算措置のみによらない柔軟な財政の確立が求められる。特に本プロジェクトにおいては、重水素実験に伴う装置の放射化、放射化汚染物質の発生、装置の実験上及び経年上の損耗、不測の故障への修理・メンテナンスなど、新たな経費の発生に備える必要がある。例えば、従来の費用分担方針によらない新たな方針を設けた上、更なる国際連携機関の参画を得ることや、国内外連携機関とのクロスポイントメント制度を活用した柔軟な人材の受入れと多様な人材の確保とともに人件費の分担を図るなど、従来にない多様な財源の確保も必要である。										
	③安全管理体制の維持と国民・社会の支持について 放射線管理区域における不測の事態への対応が着実に進められているが、運転停止後の真空容器内保守作業に係る安全管理など、新たに留意すべき観点もあることから、今後も引き続き地元自治体・消防等と連携した安全管理体制の維持・充実に努め、核融合研究に対して地元住民はもとより国民・社会からの支持・信頼につなげていくことが求められる。また、放射線や放射化物の取り扱いや安全管理の実験を活かした若手研究者・職員の人材育成も望まれる。										
	【「大規模学術フロンティア促進事業」の進捗管理の徹底について】(平成30年4月事務連絡)に基づき年次計画の変更における留意点(H30.8)実施機関による財政環境への適切な対応を求める観点から、「所要経費」欄の「※」のとおり、留意点を付している。										
【その他】将来の原型炉設計・製作のために必要な学術基盤が形成される平成34年度において、大規模学術フロンティア促進事業における位置付けを検討することが必要。											