

大型研究計画に関する進捗評価について（報告）

「超高性能プラズマの定常運転の実証」について

2018年（平成30年）8月30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
「超高性能プラズマの定常運転の実証」計画について	
1. 進捗評価の実施方法	4
2. 計画の概要	
(1) 概要	5
(2) 実施体制	5
(3) プロジェクト計画	6
3. プロジェクト計画の進捗状況	
(1) 研究の進捗状況	9
(2) 施設等の整備状況	10
(3) 情勢の変化があった場合の対応状況	10
(4) 社会や国民からの支持を得るための取組、情報発信の状況	11
(5) 年次計画における「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」への 対応状況	12
(6) 共同利用・共同研究を行うための実施体制の状況	14
(7) 幅広い研究者が参画できる運用体制の状況	15
(8) プロジェクト推進に当たっての課題	15
4. 計画の進捗評価と今後の留意点	
(1) 計画の進捗状況を踏まえた評価	17
(2) 今後の事業の推進に当たっての留意点	17
備考（用語解説等）	19
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 委員等名簿	22

はじめに

文部科学省においては、学術研究の大型プロジェクトへの安定的・継続的な支援を図るべく、2012年（平成24年）度に「大規模学術フロンティア促進事業」を創設した。

この事業は、世界が注目する学術研究の大型プロジェクトについて、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「作業部会」という。）が策定した「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ロードマップの策定ーロードマップー」※¹ 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に支援し、戦略的・計画的な推進を図ることを目的としている。

各プロジェクトの推進に当たっては、本作業部会が「大規模学術フロンティア促進事業の年次計画」（以下「年次計画」という。）を作成し、進捗管理を行っているところである。

「超高性能プラズマの定常運転の実証」の年次計画においては、10年計画の6年目に当たる2018年（平成30年）度に、進捗状況等の確認を行うことが記載されており、このたび、本作業部会において進捗評価を実施した。

進捗評価に当たっては、本作業部会において、実施機関である法人に対し、「学術研究の大型プロジェクトの推進方策の改善の方向性」（2017年（平成29年）3月本作業部会決定、以下「改善の方向性」という。）や現在の財政環境などに基づく課題を整理の上、これらの課題に主体的に対応するよう促していることに鑑み、従来の評価の観点に、

- ・ 実施機関による財政環境への対応が適切に行われたかどうか
- ・ 期末まで安定的・継続的にプロジェクトを推進することができるよう年次計画の内容の変更等が行われたかどうか

を加え、関係分野の専門家（以下「アドバイザー」という。）から助言を得つつ、委員が研究現場の状況を確認するためのヒアリング及びそれらを踏まえた審議を実施した。

※1 本作業部会においては、日本学術会議の「マスタープラン」が示す学術的意義の高い大型プロジェクトのうち、推進に当たっての優先度が高いと認められるものを選定し、「ロードマップ」として策定している。2017年（平成29年）7月には「ロードマップ2017」を取りまとめた。

(URL) http://www.mext.go.jp/a_menu/kyoten/1383666.htm

「超高性能プラズマの定常運転の実証」計画について

1. 進捗評価の実施方法

ヒアリング

今回の進捗評価は、次のとおり、本作業部会委員及びアドバイザーからなる評価者7名による実施機関からのヒアリングを通じて実施した。

- (1) 日 時： 2018年（平成30年）7月23日（金）13:30～17:00
- (2) 参加委員： ヒアリングに参加した評価者は、以下のとおり。（敬称略、○は主査）
（作業部会委員）栗原 和枝、○小林 良彰、鈴木 洋一郎、田村 裕和、原田 慶恵
（アドバイザー）牛草 健吉、小西 哲之

(3) 概 要：

・機関からのヒアリング（35分）

自然科学研究機構から、計画の概要、進捗状況等について説明を受けた後、質疑応答を行った。

（自然科学研究機構説明者）

竹入 康彦 自然科学研究機構核融合科学研究所長、
森崎 友宏 同所大型ヘリカル装置計画研究総主幹、
長壁 正樹 同所大型ヘリカル装置計画実験統括主幹、
西山 和徳 同所管理部長、
徳田 次男 自然科学研究機構理事・事務局長

・まとめ（25分）

機関からのヒアリングを踏まえ、研究の進捗状況に係る確認及び今後の推進方策や留意事項等に係る検討を実施した。

学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会における審議

- (1) 日 時： 2018年（平成30年）8月10日（金）13:30～16:30
 - (2) 審議事項： 進捗評価報告書（案）の審議
-
- (1) 日 時： 2018年（平成30年）8月30日（木）13:00～15:00
 - (2) 審議事項： 進捗評価報告書（案）の審議

2. 計画の概要

(1) 概要

1. 研究計画、施設整備に関する概要

核融合による発電の実現は、世界のエネルギー問題を一気に解決するとともに、CO₂による地球温暖化問題をも解決することになり、我が国の成長・発展に対して大きく貢献するものである。21世紀中葉の実用化を目指して、発電実証を行う原型炉段階に進む前提として、核融合で燃焼するプラズマの制御と、核融合炉級の性能を持った超高性能プラズマの定常保持の実証が不可欠である。本研究計画は、核融合による発電の早期実現を目的とした総合的戦略の中、前者を担う国際熱核融合実験炉（以下、「ITER」）計画に対して、後者の実現を目標としている。そこで、大型ヘリカル装置（以下、「LHD」）において、これまで実施してきた研究を飛躍的に発展させるため、重水素ガスを用いたプラズマ実験（以下、「重水素実験」）を実施して超高性能プラズマを実現し、国内外の共同研究・連携体制を強化して、核融合発電の早期実現に必要なとされる学理の探究とその体系化を図るものである。これにより、世界のトップランナーとしての現在の地位を揺るぎないものとし、本研究計画に ITER 計画による燃焼プラズマに関する実験成果を統合することによって、磁場閉じ込めによる制御性の良い核融合炉の実現に向けた研究を加速させることができる。重水素実験は、イオン温度1億2,000万度に代表される核融合炉を見通すことが可能な超高性能プラズマを実現して、環状プラズマの総合的理解のための学理の体系化を図る研究計画となっており、特に、理論的に解明できていない同位体効果をはじめとした学術的価値の高い課題に対する研究を推進している。

2013年（平成25年）3月28日に、重水素実験実施の前提となる地元自治体（岐阜県、土岐市、多治見市及び瑞浪市）との協定書・覚書（以下、「協定書」）を締結し、2013年（平成25年）8月の学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会（以下、「作業部会」）による「本研究計画について積極的に進めるべきであり、早急に着手すべきである」という事前評価に基づき（2013年（平成25年）9月6日付け報告）、2016年（平成28年）度の重水素実験開始に向け、重水素実験実施に必須の安全管理機器、並びにプラズマの超高性能化や学術研究を推進する上で重要な加熱機器、本体設備、及び計測装置の整備が行われている。その結果、2016年（平成28年）7月に実施された作業部会による進捗評価において、「重水素実験に向けた環境が整えられており、重水素を用いたプラズマ実験を推進することは適切である」と評価し（2016年（平成28年）8月23日付け報告）、その後は、真空容器内機器の整備、安全管理機器や計測器の調整・動作確認等を進め、2017年（平成29年）3月に重水素実験が開始された。

(2) 実施体制

1. 国内外の連携体制等

本研究計画は、大学共同利用機関である核融合科学研究所が実施責任機関として、全国の大学・研究所、海外の学術協定締結機関をはじめとする大学・研究所との共同研究として推進している。研究課題は広く国内外に公募し、本研究所の運営会議の下に置かれた、所内外の委員で構成される「共同研究委員会」で審査・採否決定が行われる。また、主に

大学の研究者で構成される「核融合ネットワーク」の組織を利用して、核融合研究者コミュニティの意見や要望が、研究計画に反映できる仕組みを整えている。

LHDの実験計画、運転計画、整備計画等の策定・遂行等、LHDプロジェクトの運営は、所内外の共同研究者で構成される「LHD実験会議」（以下、「実験会議」）で行われる。個々の研究課題に対応する実験は各実験グループが行っている。実験グループリーダーには所外の研究者が就いており、共同研究者の意向を迅速に反映できる環境を整えている。直接実験に参加できない研究者は、情報通信技術を活用した遠隔地からの実験参加や、高速データ転送を利用したデータ解析を行うことができている。実験情報は一般向け、研究者向けにそれぞれ個別のWEBページを開設しており、研究者向けのページは英語表記にして海外の共同研究者への便宜を図っている。研究成果の発信は、毎年度初めに所内で開催される「プロジェクト成果報告会」、「学会」、「国際会議」、「リポジトリ」等を通じて行っている。

重水素実験を開始するにあたり、国際共同研究をより活性化させ、核融合研究の国際的な学術拠点の形成を目的として、「LHD国際プログラム委員会」（以下、「国際プログラム委員会」）が設置された。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、各委員が当該地域におけるハブとして情報を発信・集約するシステムが構築された。

また、重水素実験に向けて安全管理体制が整備された。研究所の放射線安全管理組織の強化のために、新たに放射線障害防止法に基づいて設置される管理区域（以下、「放射線管理区域」）に対して、それぞれに責任者を配置し、さらに、各放射線管理区域内の関連する装置には装置責任者を置くことにより、装置の安全な運転及び放射線の安全管理を行うこととした。このほか、研究所全体の放射線安全管理体制を強化するために、複数の放射線取扱主任者を置き、その下に、外部有識者を委員長とする放射線安全委員会を新たに設置し、放射線管理業務に対する指導を行う体制とした。トリチウム除去装置、各種放射線モニター機器等の監視、廃棄物管理等は、通年にわたり24時間体制で人員を配置し、異常時には、関係者への緊急連絡を含めた対応が即座に行うことのできる体制とした。特に、重水素実験初期となる第一年次においては、機器の初期動作不良などの不測の事態に備えるために研究所の職員による宿日直体制を採ることとし、重水素実験開始のための放射線管理区域を設定した2017年（平成29年）3月から現在まで運用を継続している。トリチウムの環境への排出濃度、環境放射線量等は、安全管理計画に従って法令で定められた値以下の管理値を設定し、放射線総合監視システムにより、管理値を十分下回る値でインターロックをかけるシステムとしている。中性子発生量についても同様に、放射線総合管理システムによるインターロック管理を行っている。放射線モニター機器はバックアップ機器を用意するなど冗長性を持たせて設置するとともに、モニターシステム等に故障などの不具合が生じたときには実験を停止するインターロックも設けた。また、震度4以上の地震を検知すると実験を停止するインターロックが作動するシステムとなっている。

（3）プロジェクト計画

1. 研究、施設整備に関する当初計画、資金計画

核融合炉を見通せる超高性能プラズマを定常運転性能に優れるヘリカル方式によるLHDで実現して、その学理を体系化し、将来の核融合炉設計に必要な学術基盤の形成を本事業の目的としている。そのために、プラズマの格段の性能向上が見込まれる重水素実験を2016年（平成28年）度末に開始して、イオン温度1億2,000万度に代表される核融合炉を見通すことが可能な超高性能プラズマを実現し、同位体効果をはじめとするプラズマ物理や工学の学術的課題に取り組み、核融合炉級プラズマの実現に必要な学理の体系化を目指している。重水素実験は合計9年間の実験期間を予定し、大規模学術フロンティア促進事業の年次計画に掲載されている前半6年間はプラズマの高性能化に重点を置き、その後の後半3年間は定常実験を含めた総合性能試験を行う研究計画となっており、この計画に沿った形で安全管理計画も策定されている。

放射線管理区域等の整備を含めた重水素実験に必要な設備等の整備に2013年（平成25年）度に着手し、2016年（平成28年）度に重水素実験を開始する計画とした。設備整備等に関しては、放射線管理区域の設定に必要な施設・建物等の改修整備、実験研究を安全に遂行するために必要なトリチウム除去装置、高精度中性子計測システム等の安全管理機器の整備、及びプラズマの超高性能化を図るとともに、精緻な計測に基づく学術研究を行うために必要な本体装置関係、プラズマ加熱装置関係、プラズマ計測装置関係等の増強・整備が計画された。予算をより有効に使うために、重水素実験開始の2016年（平成28年）度までは安全管理機器の整備を最優先して重点的に行い、学術研究の展開に必要な高度な先進プラズマ計測機器の整備は実験の進捗に合わせて行う計画となっている。また、定常プラズマ実験を実施する上で重要な機器の整備は重水素実験後半3年間に向けて、加熱機器や定常プラズマ実験に適したプラズマ対向機器などの整備を行うとともに、実験装置全体に滞留するトリチウム量を評価するための設備の整備を実施する計画である。

なお、第一年次の重水素実験は本格的な重水素実験を開始する前の安全管理機器の動作確認や施設検査を行う予備の実験を実施し、プラズマからの中性子発生量を確認して重水素実験の基盤を固める試験調整運転期間として位置付けた計画となっている。予備の実験の一環として、第一年次の重水素実験では、開始に向けた準備も含めて、下記の項目を優先的に行う計画となっている。

- ・ 実験開始直前の大気開放期間中に、中性子検出器の値付けを行う絶対較正実験を実施する。
- ・ 放射線障害防止法に基づく放射線発生装置としての施設検査を実施・完了する。
- ・ 重水素実験を開始する前に、1ヶ月程度の軽水素実験期間を設け、重水素実験に向けて整備した安全管理機器や安全管理体制の確認を行う。

(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 40億円	計画期間					建設期間 平成2～9年度 運転期間 平成10年度以降 【事前評価】 昭和61年2月、平成25年9月 【中間評価】 平成12年11月、平成15年1月、平成19年6月、平成21年1月、平成25年9月 【進捗評価】 平成28年8月					
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LHDの最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(H31)	2020(H32)	2021(H33)	2022(H34)	2023(H35)	期末評価
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												
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	炉心プラズマの実現とプラズマ物理の理工学の追求(重水素を用いた実験は平成28年度末から平成37年度まで(9サイクル))											
・プラズマ中の電位差が閉じ込めに与える影響を解明 ・高磁場で圧力が高い安定したプラズマを実現 ・プラズマの定常運転を実現 ・プラズマ温度の1.2億度以上の実現 ・ITERを含む環状プラズマを総合的に理解 など	重水素実験に向けた設備等の整備 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												
原型炉の設計等に必要な学術的要件を求めるために、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を構築) ・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	-	-	-	-	-	

(これまでの予算措置の状況)

建設費 : 601.1億円(1990年(平成2年)度～2018年(平成30年)度までの経費)

運転経費・実験経費 : 1,208.9億円(1995年(平成7年)度～2018年(平成30年)度までの経費)

3. プロジェクト計画の進捗状況

(1) 研究の進捗状況（計画で予定していた研究成果が得られたか、数値目標等がある場合の達成状況はどうか、国際協力の状況 等）

LHDにおける第19回目の実験サイクルを2017年（平成29年）2月から軽水素ガスを用いて開始し、同年3月より重水素実験が開始された。LHDにおける第一年次の重水素実験は同年7月まで実施し、その後1ヶ月間の軽水素ガスを用いた実験を行って、同年8月に当該実験サイクルのプラズマ実験が終了された。

「3. プロジェクト計画」でも記載したように、第一年次の重水素実験は試験調整運転期間としての位置付けであるが、重水素実験開始1週間後には1億度を超えるイオン温度を実現し、約1ヶ月後には数値目標の一つであり、2021年度までに実現するとしていたイオン温度1億2,000万度を実現するなど、重水素実験によるプラズマの高性能化を実証し、これまでヘリカル型装置では行うことができなかった、より核融合炉プラズマ条件に近いパラメータ領域での研究が可能となったことが示された。実際に、新たな高いイオン温度領域に入ること、プラズマ中の高エネルギー粒子の持つエネルギーが駆動源となる不安定性が現れること、それを安定化するために、電子を高温化することが有効であることが第一年次の重水素実験で見出された。

さらに、電子サイクロトロン共鳴加熱（以下、「ECH」）によって維持されたプラズマを用いて、重水素と軽水素のプラズマの閉じ込め特性を比較する実験を行ったところ、重水素の方が電子の閉じ込め特性が向上することが明らかとなった。このことは、研究所の理論グループによる最近の研究結果と定性的に一致し、プラズマ物理における長年の謎とされる同位体効果の解明に向けた手掛かりを得るなど、今後の学術研究の展開に向けて大きく前進する成果を上げた。今後は、先進的なプラズマ計測機器を整備して、実験観測と理論計算との詳細な比較が必要である。また、電子だけではなくイオンの閉じ込め特性も向上し、プラズマ中の不純物の振る舞いが異なること等の同位体効果も観測されている。

重水素実験における重要な課題の1つである高エネルギー粒子閉じ込めに関する研究も大きな進展が見られた。重水素実験では、中性子の発生量がプラズマ中の高エネルギー粒子の閉じ込めを反映するため、軽水素実験では行うことができなかった高エネルギー粒子閉じ込めの定量評価が可能となる。様々な磁場閉じ込め装置における高エネルギー粒子の閉じ込め性能を示す共通の指標として「トリトン燃焼比」が用いられているが、LHDにおいて中性子計測によりトリトン燃焼比を評価したところ、その値が0.45%となり、KSTAR（韓国:0.45%）やTFTR（米国:~0.7%）といった同サイズのトカマク型装置に匹敵する値であることが明らかとなった。この結果は、ヘリカル型核融合炉実現に向けて明るい見通しを与えるものである。

将来の核融合燃焼プラズマでは、プラズマ中に重水素とトリチウム（三重水素）が混在し、それらを一対一の割合で分布を制御することが必要である。LHDの重水素実験では、軽水素と重水素からなる水素同位体混合プラズマにおいて、水素同位体比の空間分布計測に世界で初めて成功し、そのようなプラズマでの水素同位体の振る舞いを調べることが可能となった。今後、この研究成果をもとに、プラズマ中における水素同位体の燃料イオンの振る舞いに関する研究を展開する計画である。

このように第一年次の重水素実験では、試験調整運転期間という位置付けにもかかわらず、当初計画を大幅に上回る成果を上げ、まさに、核融合炉級のプラズマの学術研究を推進する装置としての環境が整っていることが示された。今後は、新たに見出された、これらの現象のメカニズムの解明を進めていくことが重要である。

LHDが重水素実験においてプラズマの高温化に成功していること及びドイツのW7-Xが稼働を開始し、高いプラズマ性能を示していることにより、ヘリカル型装置の研究は世界的に注目を浴びつつある。その結果、国際プログラム委員会を通じて国際共同研究参加者数が20%増加した。また、W7-Xからは、前述のトリトン燃焼比計測をはじめとするLHDが先行して研究を進めている分野に関して、共同研究の申し入れがあるなど、ハードウェアにおける協力を含めた国際共同研究が活性化している。

(2) 施設等の整備状況（計画で予定していた性能を得られたか、経費・スケジュールは計画どおりか、国際協力の状況 等）

重水素実験に向けた真空容器内機器の整備を完了した後に、同実験における重要な安全管理機器としても位置付けられている中性子検出器の絶対較正が2016年（平成28年）11月に実施された。2017年（平成29年）2月から開始した軽水素実験において、放射線総合監視システムやトリチウム除去装置等の安全管理機器の正常な動作と、安全管理体制が十分機能することを確認した上で、計画通りに2017年（平成29年）3月7日に重水素実験が開始された。放射線障害防止法に基づく放射線発生装置としての施設検査については、インターロックなどに係る施設検査を中性子検出器の較正実験時期に合わせて行い、重水素実験開始後に重水素プラズマから発生する中性子を用いて大型ヘリカル実験棟の遮蔽壁の性能を確認することで施設検査を完了し、施設検査合格証が2017年（平成29年）3月29日付で交付された。このように安全管理機器などの設備や安全管理体制の整備については、スケジュールに沿って着実に進められた。

国際プログラム委員会の欧州委員を通じて、欧州委員会に基づく欧州核融合研究推進コンソーシアムであるユーロフュージョンの基金を活用した国際共同研究の実施を可能とした。そして、高度な研究を進めるのに必要な計測機器等のLHDへの持ち込みによる、等価的な研究資金の捻出を図っている。

また、米国・ウィスコンシン大学との国際共同研究体制を確立させて、プラズマの解析に必要不可欠な電子温度・密度の計測装置の高性能化を進め、それに必要なレーザー用電源を同大学より提供してもらうことにより、日本円にして4,400万円相当分の財源の捻出が図られた。

(3) 情勢の変化があった場合の対応状況

現在の財政環境を考慮して、研究の進展による超高性能化への見通しから年次計画の変更の申出があった。変更の内容は、多岐にわたる研究課題を以下の2点に集約して重点化し、その研究成果の高度化と最大化を図り、研究目標の完遂に向けてより効果的な研究成果を追求することとしている。

- ① イオン温度と電子温度がともに1億度を超えるプラズマを実現して、核融合炉条件

下で重要な同位体効果や高エネルギー粒子挙動の解明等を通じた学理の体系化。

② 3メガワットで1時間の定常プラズマの実現による熱・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。

重水素実験に伴い放射線発生装置としての安全管理費用の増大、プラズマの高性能化に伴う機器の損傷に対する修理費の増大等により、運転経費は現状よりやや増加するものの、研究課題の重点化に伴う設備計画の全体的な見直しにより、今後の費用累計額を現状の計画より大幅に低減し、現在の大規模学術フロンティア促進事業に係る予算状況に鑑みても、達成可能な年次計画とする。年次計画の変更にあたり、現在のプロジェクトの成果に基づいて、継続してより発展的な研究成果を確実に得るために必要なものに設備の整備計画を絞り込み、また急速な技術革新による低コスト化が進んだ技術を取り込むことなどして、必要経費を当初計画から大幅に削減させた。例えば、イオン温度1億2,000万度の早期達成を受けて、中性粒子入射加熱装置の整備計画のうち、主にイオンを加熱する装置の整備については削減された。

(4) 社会や国民からの支持を得るための取組、情報発信の状況

本事業をはじめとする研究所が推進している研究活動に対して、社会や国民からの支持を得るために、オープンキャンパスと題した一般公開(毎年2,000人程度)、Fusion フェスタ in Tokyo(毎年2,000人程度)、市民学術講演会(年2回開催、各250人程度)、施設見学(毎年4,000人以上)、科学教室(毎年1,500人以上)、ふるさと訪問授業・出前授業(毎年10件程度)等の取組みが行われている。これら広報活動の効果と思われるが、高等教育レベルの教科書の表紙にLHD真空容器内写真が採用された。

重水素実験による環境への影響が無いことを示すために、研究所の敷地内に環境放射線モニタリングポストにおける観測値をリアルタイムで、ホームページにて公開している(<https://sewebserv.nifs.ac.jp/map.php>)。LHD実験の進捗状況もホームページ(<https://www-lhd.nifs.ac.jp/pub/>)で公開し、特に重水素実験を開始してからは、安全管理計画において公表事項として記載した実験サイクル中の中性子総発生量、トリチウム総発生量、実験に起因する敷地境界線量、排気中のトリチウム濃度(3か月平均値)の速報値を公開するホームページ(<http://sewhite.nifs.ac.jp/quick/>)が整備された。また、これらの確定値を含む重水素実験に関連した放射線の管理状況を年報としてとりまとめ、ホームページ(http://www.nifs.ac.jp/j_plan/180531.pdf)で公開されている。

重水素実験に対する地元住民の理解と支持を得るために、2006年(平成18年)度より市民説明会を毎年実施されている。今年で13年目となる市民説明会では、地域の小学校区を単位として、公民館などの23会場で、重水素実験の安全性と安全管理計画についての説明を行っており、核融合研究に対する理解が広がっている。そうしたことが地元自治体との協定締結に結びついている。2013年(平成25年)度以降は重水素実験開始に向けた整備状況についても説明しているが、毎年300人以上が参加している。さらに、地域のイベントなどにおいても積極的に参加し、地域社会との信頼関係の維持・構築を進めている。また、岐阜県東濃地域の小中学校・高校の教員によって構成される「土岐市プラズマ研究

委員会」が、土岐市教育委員会の支援により昭和 55 年に設置され、核融合、放射線、エネルギー問題等に対する理解を深める勉強会が研究所の職員と共同で実施されている。また、同委員会では、土岐市、多治見市、瑞浪市の学校の百葉箱等に線量計を設置して、環境放射線の計測を 2000 年（平成 12 年）より継続して行っている。

また、研究所が設置した安全評価委員会や、協定書に基づき地元自治体が設置した安全監視委員会に対して、重水素実験の進捗状況、放射線の管理状況、重水素実験による環境放射線に対する影響、及び次サイクルの実験に向けた準備状況について報告し、重水素実験の安全管理状況が確認されている。

（５）年次計画における「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」への対応状況

年次計画においては、「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」として、以下の内容を掲載している。

① 核融合研究における LHD の役割について

本計画は、巨額な予算を必要とし、かつ長期間にわたる計画であり、その推進に当たっては、社会や国民からの一層の支持が不可欠である。そのためには、トカマク方式とヘリカル方式に係る研究が相補的に進められている中で、核融合発電の実現に至るまでの道筋や原型炉開発に向けてヘリカル方式が果たすべき役割・貢献を一層明確にする必要がある。

また、原型炉方式が確定した後の研究の在り方について核融合研究者コミュニティでの真摯な議論を早期に進める必要がある。同時に、核融合発電の実現といった長期的な目標だけではなく、当面の目標とすべき学術上の成果や産業界等への応用が見込まれる波及効果、核融合研究に携わる人材育成への貢献などについても明確にする必要がある。

② 安全管理体制について

重水素実験では、これまでの軽水素ガスを用いた実験とは異なり、微量といえども放射線が発生する。放射線管理区域の設定、放射線総合監視システムの整備、トリチウム除去装置の整備など、重水素実験開始に向けて必要な体制は整えているが、放射線管理区域内での不測の事態に備え、放射線管理区域を持つ、国内の他施設の体制なども参考に、地元自治体・消防とも連携した安全管理体制をより充実させていくことが必要である。特に、放射線管理区域内での火災発生に備え、地元消防と連携・協力した消防計画をまとめておく必要がある。

③ 自治体との連携や社会や国民からの支持を得る取組について

研究所においては、これまでも社会や国民からの支持を得るための努力を行っているが、計画の推進にあたっては、地元住民・自治体からの支持とともに、信頼を得ることが重要である。地元住民との双方向の交流を重ね、研究所や研究者に対する信頼を高めつつ、重水素実験の役割、安全性、不測の事態が発生した場合の対応などについて、引き続き丁寧な説明を継続することが必要である。その際、様々な取組の効果の把握にも努めることが必要である。

これらへは以下のような対応が行われている。

① 核融合研究における LHD の役割について

核融合発電実現の鍵は、核融合燃焼と超高性能プラズマの定常運転の実証にある。前者は、国際協力による ITER で担うのに対し、後者は定常運転性能に優れた LHD で推進する必要がある。さらに、LHD で重水素実験を実施することにより、定常プラズマの超高性能化を図り、同位体効果や高エネルギー粒子の閉じ込め物理に関する新たな知見を提供することで、核融合原型炉実現に向けた開発研究を加速することが可能である。それとともに、現在、トカマクに匹敵するプラズマ性能の達成に見通しをつけつつあるヘリカル方式は、第 5 次エネルギー基本計画においては、技術の多様性を確保する観点から、トカマク方式の ITER 計画と並行して推進する革新的概念の研究として、レーザー方式とともに記載されている。特に、ヘリカル方式はトカマク方式と異なりプラズマ中に電流を流すことなく閉じ込め磁場の維持が可能であり、制御性の良い核融合炉の実現に大きな魅力を持っているため、学術研究としての推進が望まれる。こうした状況の下、重水素実験を 2025 年度まで実施して LHD プロジェクトを完遂させて、引き続き、後継計画により、ヘリカル原型炉実現に向けて残された課題に取り組むことが検討されている。具体的には、高温超伝導によるヘリカル装置製作及び、日単位の定常プラズマと壁との相互作用の解明といった工学的課題解決、並びに LHD 配位に基づいたヘリカル磁場配位最適化にかかる物理課題解決を、同時にかつ相補的に実施する内容である。これらは、トカマク、ヘリカル方式の違いに依らない原型炉実現までに解決すべき共通課題を数多く含んでおり、こうした課題に対する学術の体系化により、核融合炉実現へ向けた研究の推進に大きく貢献する。

重水素実験をはじめとする LHD 研究の成果と意義については、研究所で開催する成果報告会、学会における LHD 実験に関するシンポジウムなどを通して核融合研究者コミュニティと議論を行い、オープンキャンパスなどの研究所が行う広報イベントやプレス発表などを通して国民に向けて発信している。

LHD 研究は、現時点では学術研究の段階であり、その成果がすぐに産業に寄与できる段階にはまだないため、現状は大きな資金調達は見込み難い状況である。しかし、学術研究の段階で生み出される個々の技術のスピンオフにはいくつかの企業が関心を寄せしており、共同研究レベルの資金提供は現在でも得られている。例えば、高性能真空ポンプの開発や中赤外セラミックレーザーディスクの開発、半導体微細加工のための分子シミュレーション技術に関する共同研究が行われている。将来を見据えた産業界との連携協力の強化は重要であり、今後、研究のさらなる進展とともに、その関係を継続、発展されることが望まれる。

人材育成に関しては、継続的に例年 70 名を超える大学院生が LHD プロジェクトの共同研究に参加しており、LHD の共同研究が果たしている役割は非常に大きい。重水素実験では様々な学術的な課題が発出していることから、関連分野を拡げることにより大学からの共同研究を増加させて、それらを通じて大学院教育・人材育成へのさらなる貢献が図られる予定である。

② 安全管理体制について

放射線漏れは地元住民のみならず研究者、作業従事者にも大きな影響を与えるととも

に、計画の大幅な遅れをもたらすため、万が一にもそのような事態が生じないよう第三者による安全確認が必要である。また、放射線管理区域における不測の事態への対応の一環として、2016年度（平成28年度）の防災訓練における地元消防（土岐南消防署）との事前打ち合わせにおいて、放射線管理区域設定後の入域や消火活動の手順について確認された。入域の際には研究所の自衛消防隊現場対応班が随行して、入域や消火の際の注意点を伝達するとともに、放射線管理区域内におけるサーベイを実施することとし、この打ち合わせに基づく消防計画が策定された。また、この消防計画に基づいた研究所全体の防災訓練を2017年度（平成29年度）に、LHD実験グループによる消火訓練を2016年度（平成28年度）と2017年度（平成29年度）に、それぞれ地元消防の立ち合いのもとに実施している。さらに、名古屋大学・アイソトープ総合センター、高エネルギー加速器研究機構、量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所を訪問し、各施設における消防との連携体制についての意見交換を行い、放射線管理区域における安全管理体制の強化に努めている。このほか、緊急時における岐阜県及び地元三市（土岐市、多治見市、瑞浪市）との連絡体制を構築している。

③ 自治体との連携や社会や国民からの支持を得る取組について

「3.（4）社会や国民からの支持を得るための取組、情報発信の状況」において記載したが、重水素実験に対する地元住民からの支持を得るために、2006年度（平成18年度）より市民説明会を、地域の小学校区を単位として毎年実施し、核融合研究の必要性、LHDにおける実験の進捗や安全管理の状況について説明を行っている。毎年、会場での質問をQ&Aとして取り纏めて地元住民の意識の変化を把握しており、最近では、質問の内容が重水素実験の安全性から核融合発電の実現の見通しへと移りつつある。また、地域の夏祭りなどのイベントにも積極的に参加し、地域社会との信頼関係の維持・構築を進めている。オープンキャンパスでは、「重水素実験質問コーナー」を設け、重水素実験の意義や安全性について丁寧な説明を行い、重水素実験に対する理解を深めて頂くように努力している。なお、オープンキャンパスでは、地元住民を中心に毎年約2,000人が来場しており、来場者にアンケートを行うことで、研究所の広報活動に対する効果の把握に努めている。

また、地元自治体に対して、LHD実験のスケジュール、進捗状況などについて定期的に報告し、また、協定書に基づき地元自治体が設置した安全監視委員会が行う環境中性子線の測定や環境水中のトリチウム濃度測定に最大限の協力をするなど、地元自治体との信頼関係の構築に努めている。

（6）共同利用・共同研究を行うための実施体制の状況

「2.（2）実施体制」に述べた通り、重水素実験をはじめとするLHDの全ての研究課題は共同研究として実施されており、今後もこの実施体制により進めていく計画である。

トリチウムの計測や取り扱いについては、双方向型共同研究の枠組みを利用して、富山大学研究推進機構水素同位体科学研究センターとの緊密な共同研究体制により実施しており、トリチウムの取扱いに関する実地講習を毎年数回のペースで実施している。また、中

性子計測等の新たに必要とする機器に対しては、LHD 計画共同研究を通じて大学において開発が進められている。

なお、共同研究者に対する放射線管理や安全に関する教育は、実験会議が研究所の安全衛生推進部と協力して行っている。

(7) 幅広い研究者が参画できる運用体制の状況

研究所では研究者が柔軟に研究テーマを選択するプロジェクト制を採っており、大型ヘリカル装置計画プロジェクトは、他の2プロジェクト（数値実験炉プロジェクト、核融合工学プロジェクト）と連携をとりながら超高性能プラズマ研究を推進する体制を整えている。国内外の大学・研究機関で関連した研究を行っている研究者も共同研究体制を通じて参画し、幅広い視点でヘリカルプラズマの研究を推進している。共同研究申請を自然科学研究機構のホームページ (<https://www.nins.jp/nous/>) を通して行うことにしているため、核融合研究者コミュニティ以外の分野の研究者も、容易に共同研究に関する情報を取得できる体制を採っている。

(8) プロジェクト推進に当たっての課題(現状から改善や変更を求める事項の内容と期限を明確に示す等)

核融合研究は、ITER の建設が本格化し、LHD と類似の閉じ込め磁場を持つ同規模の超伝導ステラレータ装置 W7-X がドイツで運転を開始する等、新たな段階に入った。W7-X も数年後には重水素実験が計画されており、今後、研究の進展が加速するとともに、国際的な競争が激化することが予想される。このような状況下で LHD が核融合研究の COE として、今後もプラズマ・核融合に関する研究分野のフロンティアであり続けるために、核融合研究者コミュニティを挙げて本研究計画の推進に引き続き取り組む必要がある。

同位体効果の解明をはじめとする、重水素実験を開始することで広がるプラズマ物理・工学の新たな研究課題の推進が重要であるが、厳しい予算環境の中、これまで重水素実験開始へ向けた安全管理機器等の整備を優先したため、学術的な研究を推進するための先進的なプラズマ計測器等の整備が遅れている。このため、これらの早急な整備が重要な課題となっている。また、重水素実験に必要な放射線管理区域の設定等に伴う安全管理費用やプラズマの高性能化に伴う真空容器内機器の損耗等によるメンテナンスコストが増加した。真空容器外機器のメンテナンス周期を長期化するなど、コスト削減に対して最大限の努力が行われている。

「3. (3) 情勢の変化があった場合の対応状況」にあるように、LHD の研究成果の高度化と最大化を図り、研究目標の完遂に向けてより効果的な研究成果を追求するために、核融合炉条件下での学術研究を通じた学理の体系化に係る研究及び定常プラズマ（3メガワットの加熱入力で1時間）の実証に係る研究の2点に、研究課題を集約して重点化した。LHD プロジェクトを完遂するためには、これらに対する研究の準備と実験期間に今後約7年間が必要とされている。また、重水素実験は、安全管理計画に基づく地元自治体・地元住民との約束により、2025年度（9年間）までと期間が限られているが、この期間内であればこれらの研究に関する実験を実施することが可能となっている。さらに、例えば、核

融合炉級のプラズマ実験では実験1回当たりの中性子の発生量が増加し、1日当たりの実験回数が著しく制限され、また、定常実験では実験1回当たりの放電時間が長いため、同様に1日当たりの実験回数が著しく制限されるため、LHDプロジェクトの目標を完遂し、大きな研究成果を得るためには、2025年度までLHDプロジェクトの実施が必須とされている。一方で、大規模学術フロンティア促進事業による支援期間は2022年度までとしていることに留意が必要である。

4. 計画の進捗評価と今後の留意点

(1) 計画の進捗状況を踏まえた評価

年次計画に従い、2016年（平成28年）度内に重水素実験の開始に至っている。また、重水素実験の開始後1か月あまりのうちに、2021年度までの実現を目指していた数値目標の一つ「イオン温度1億2千万度」を達成したことは、地域住民との関係も含めた実施機関における一体的な運営と入念な準備によると考えられる。また、厳しい財政環境に対しては、年次計画上の最終年度までに達成する科学目標を絞り込み、設備整備計画を縮減するなどの尽力が図られている。

特に、重水素によるプラズマの高性能化を実証したことは、核融合炉プラズマの条件により近いパラメータ領域での実験・研究を可能にし、プラズマ物理において長年謎とされてきた同位体効果の解明に手がかりを与えるなど、分野の更なる発展に大きく寄与する成果を上げたと評価できる。また、実験に伴う装置の放射化、放射化汚染物質の発生についても十分な安全対策が講じられ、機能している。

重水素実験の開始に当たっては、7か国11名の海外委員と12名の国内委員からなるLHD国際プログラム委員会が設置され、国際的拠点形成に向けて国内外核融合コミュニティの意見が集約される体制となっている。また、新たに放射線管理区域の設定や放射線安全委員会が設置され、安全管理体制は着実に整備されている。

核融合研究開発における体制としては、従来のトカマク方式では得られなかった熱・粒子制御、プラズマ壁相互作用に関するデータを得ることができ、原型炉の設計に向けてLHDが重要な役割を果たしていると言える。今後は、プラズマ学理の体系化に向けて、「原型炉開発に向けたアクションプランの策定」（2016年（平成28年）2月 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 原型炉開発総合戦略タスクフォース、以下「アクションプラン」という。）を踏まえ、ITERをはじめとする他の実験や理論研究と組合せた基礎的かつ総合的な実験・研究が、国際的な協力によって展開されることが望まれる。

また、国民に向けた説明会や学術講演会、研究所の一般公開、SNSによる情報発信などに取り組み、積極的な広報に尽力している。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の計画によれば、核融合エネルギーの実現までには長期間にわたる研究開発が必要と考えられている。このような中、本プロジェクト期間（10年）に鑑みたLHDの位置付けや果たす役割をより一層明確にして、国民・社会の支持につなげていくことが重要である。

以上を総合的に勘案すると、本プロジェクトは概ね順調に進捗していると評価できる。

(2) 今後の事業の推進に当たっての留意点

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数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性の確保、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ア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経験を活かした若手研究者・職員の人材育成も望まれる。

なお、本プロジェクトの年次計画については、先般実施機関から申出のあった変更の内容を踏まえつつ、本評価の内容及び我が国の厳しい財政環境を勘案し、本作業部会において審議の上、決定した。

備考（用語解説等）

○ 核融合による発電

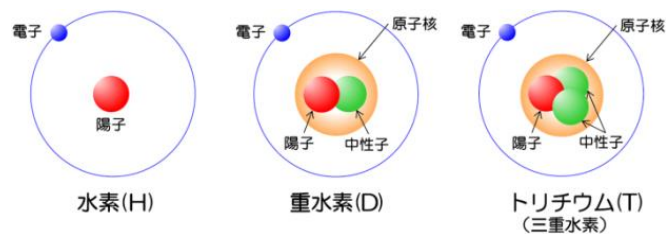
重水素とトリチウム（三重水素）の原子核が融合し、ヘリウムと中性子に変化する際、発生するエネルギーを利用する。燃料は事実上無尽蔵、原理的に暴走しない安全性、高レベル放射性廃棄物が生じない、などの特長を持つ。一方、その実現には燃料を1億度以上のプラズマ状態に保つ必要があり、このためにはプラズマの挙動の理解と制御技術の確立が急がれている。

○ 国際熱核融合実験炉（ITER）計画

ITERはInternational Thermonuclear Experimental Reactorの略。制御された核燃焼プラズマの維持と長時間燃焼（1,000秒程度）によって核融合の科学的・技術的実現性を実証することを目指したトカマク型の核融合実験炉計画。

○ 重水素、トリチウム

重水素は元素記号 ${}^2\text{H}$ （略号：D）で表わされる水素の同位体で、水素の約2倍の質量を持っており、海水中に豊富に含まれる。同じく ${}^3\text{H}$ （略号：T）で表わされるトリチウム（三重水素）は、水素の約3倍の質量を持つ放射性の元素である。自然界にも僅かに存在する。核融合炉は両者を燃料として利用する。（下図参照）



○ 放射線障害防止法

「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」の略称。放射線障害防止法は、放射性同位元素や放射線発生装置の使用及び放射性同位元素によって汚染されたものの廃棄などを規制することによって、放射線障害を防止し、公共の安全を確保することを目的に制定された法律。

○ 放射線安全委員会

核融合科学研究所の放射線取扱主任者の下に置く委員会。放射線障害防止及び放射線安全管理に係る基本方針、異常時及び事故時等に対する措置等関する事項について審議し、放射線管理室の業務に対して指導を行う。外部有識者が委員長を務める。

○ 安全管理計画

安全評価委員会の最終報告に基づいて策定された「大型ヘリカル装置における重水素実験の安全管理計画」の略称。LHD の重水素実験を実施する上で必要な安全対策と管理の事項が記されており、重水素実験は安全管理計画に則って行われる。

○ 同位体効果

同位体の質量の相違がプラズマの物理的な性質に与える影響のこと。LHD においては、水素のほぼ 2 倍の質量を持つ同位体である重水素を用いた実験を行っている。この重水素実験において、プラズマの磁場による閉じ込め特性に変化が出ることで等により、LHD の最終目標値達成が期待されている。

○ トリトン燃焼比

重水素プラズマ中では重水素 (D) どうしの核融合反応によって中性子 (DD 中性子) とトリチウム (T) が 1 対 1 の割合で発生する。ごく僅かではあるが、この T がプラズマ中の D と 2 次的な核融合反応を起こし中性子 (DT 中性子) が生成される。トリトン燃焼比とは、DD 中性子発生量に対する DT 中性子発生量の比を指す。プラズマ中の高エネルギー粒子の閉じ込め性能を表す指標の一つ。

○ W7-X

ドイツのマックスプランク・プラズマ物理研究所に設置されている大型の超伝導ステラレータ装置。Wendelstein 7-X を略して W7-X という。2015 年に実験開始。ヘリカル方式と類似の磁場構造を持ち、装置サイズ及びプラズマ体積において LHD とほぼ同じであり、LHD の強力なライバル。

○ 安全評価委員会

核融合科学研究所が設置した委員会。「核融合科学研究所重水素実験安全評価委員会」を略して「安全評価委員会」という。トリチウム、放射線、及びプラズマを専門とする外部有識者、並びに地元関係者等で構成される第三者委員会。所長の諮問に応じて、大型ヘリカル装置 (LHD) における重水素実験に係る安全性、実験環境等について審議・評価する。

○ 安全監視委員会

核融合科学研究所の周辺における環境保全等に関して、岐阜県及び地元三市 (土岐市、多治見市、瑞浪市) が共同で設置した委員会。「核融合科学研究所安全監視委員会」を略して「安全監視委員会」という。委員会は、土岐市長により選任された学識経験者及び地元関係者で構成され、重水素実験の監視、及び環境放射線の研究所測定結果の検証 (クロスチェック) を行う。

○ ヘリカル方式とトカマク方式

プラズマは電離した状態であることから磁場によって閉じ込めることができる。端のない磁力線によって磁場のカゴをつくるため、形状は環状になる。この環状の磁場のカゴを

作るために、外部のらせん（ヘリカル）状の電磁石のみを用いるものがヘリカル方式、外部の平面状の電磁石とプラズマ内部の電流を組み合わせるものがトカマク方式。

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 委員等名簿

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)

栗原和枝 東北大学未来科学技術共同研究センター教授

(臨時委員)

※伊藤早苗 九州大学名誉教授、九州大学極限プラズマ研究連携センター顧問
中部大学客員教授

※井本敬二 自然科学研究機構理事・副機構長、生理学研究所長
大島まり 東京大学大学院情報学環教授、東京大学生産技術研究所教授

川合知二 大阪大学産業科学研究所特任教授

小林良彰 慶應義塾大学法学部教授、慶應義塾大学社会科学データ・アーカイヴセンター (SU) センター長

鈴木洋一郎 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構特任教授

原田慶恵 大阪大学蛋白質研究所教授

横山広美 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構教授

(専門委員)

田村裕和 東北大学大学院理学研究科教授

新野宏 東京大学大気海洋研究所客員教授

松岡彩子 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所准教授

※観山正見 広島大学特任教授

安浦寛人 九州大学理事・副学長

アドバイザー

牛草健吉 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー研究開発部門長

小西哲之 京都大学エネルギー理工学研究所教授

(敬称略、五十音順)

※ 伊藤委員、井本委員、観山委員は、「超高性能プラズマの定常運転の実証」の利害関係者であるため、評価には参加していない。