

大型研究計画に関する評価について(報告)

「超高性能プラズマの定常運転の実証」

平成25年9月6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	1
------	---

「超高性能プラズマの定常運転の実証」について【中間評価】

- ・ 炉心プラズマ実現に必要な学理（物理的、工学的）の体系化
- ・ 将来の原型炉設計・製作のために必要な学術基盤の形成

1. 計画の概要	3
1. 概要	
2. 内容	
3. 実施体制	
4. 国内における検討経緯	
5. 国際的な動向	
2. 計画の評価	6
1. 実施体制	
2. 計画の達成状況	
3. 科学的・社会的意義	
3. まとめ	8
1. 総合評価	
2. 今後の事業推進に当たっての留意点	

「超高性能プラズマの定常運転の実証」について【事前評価】

- ・ 重水素を用いた実験の遂行

1. 計画の概要	9
1. 概要	
2. 内容	
3. 実施体制	
4. 国内における検討経緯	

5. 国際的な動向	
6. 年次計画（工程表）	
7. 予算規模	
2. 計画の評価	13
1. 研究者コミュニティの合意	
2. 計画の実施主体	
3. 共同利用体制	
4. 計画の妥当性	
5. 緊急性	
6. 戦略性	
7. 社会や国民の理解	
3. まとめ	17
1. 総合評価	
2. 計画推進に当たっての留意点	

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	20

はじめに

文部科学省においては、学術研究の大規模プロジェクトへの安定的・継続的な支援を図るべく、平成24年度、新たに「大規模学術フロンティア促進事業」¹を創設した。

この事業は、世界が注目する大規模プロジェクトについて、「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』²」等に基づき、社会や国民の幅広い理解・支持を得つつ、国際的な競争・協力を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、現在整備中又は推進中の大規模プロジェクトの着実な実施とともに、新規の大規模プロジェクトを推進することとしている。

本作業部会で平成24年11月に整理した「大規模学術フロンティア促進事業の年次計画について（以下、「年次計画」という。）」においては、「超高性能プラズマの定常運転の実証（以下、「本事業」という。）」のうち、「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」及び「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」については、平成25年度に中間評価を行うことになっている。加えて、本事業のうち、年次計画における「3. 重水素を用いた実験の遂行」がロードマップに位置づけられており、年次計画における留意事項において、「地元との協定締結後、その時点でロードマップの事業として高く評価されていることを前提に事前評価を実施する。その際、「年次計画の『1. 炉心プラズマの実現に必要な学理の体系化』、『2. 将来の原型

¹ 本作業部会が、平成24年5月28日にとりまとめた「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想 ロードマップの改訂—ロードマップ2012—」において、「・・・国は、ロードマップ等を基本に、長期的視点に立ち、大型プロジェクトの着実な推進に向けて、安定的・継続的な予算の確保に最大限の努力をすることが必要」、「平成24年度に『大規模学術フロンティア促進事業』が創設され、今後の大型プロジェクトの推進は、ロードマップ等に基づくとの方針が明確に打ち出されている。もとより、大型プロジェクトに関する予算は、当該事業だけに限定されるものではなく、例えば科学研究費補助金や独立行政法人運営費交付金等によることが期待されることであり、国として様々な手法を駆使しながら、戦略的・計画的に大型プロジェクトを推進していくことが求められる」としている。

² 本作業部会は、平成22年10月、日本学術会議が策定したマスタープランを踏まえ、学術研究の大型プロジェクト推進に当たっての優先度を明らかにする観点から、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」を策定し、公表した。その後、日本学術会議がマスタープランの小改訂を行ったことを受け、本作業部会は新たに盛り込まれた15計画を中心に検討を進め、本作業部会としての評価結果を盛り込むこと等により、平成24年5月、「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想 ロードマップの改訂—ロードマップ2012—」をとりまとめた。

URL http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1321812.htm

炉設計・製作のために必要な学術基盤の形成』については、重水素実験と密接に関わることから、あわせて事前評価の対象とすることが望ましい。」とされている。

このような中、平成25年3月に地元自治体（岐阜県、土岐市、多治見市、瑞浪市）との周辺環境の保全等に関する協定が締結され、重水素実験開始の同意が得られたことから、「1. 炉心プラズマの実現に必要な学理の体系化」及び「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」について中間評価を行うとともに、「3. 重水素を用いた実験の遂行」に係る事前評価をあわせて実施した。

評価に当たっては、関係分野の専門家にアドバイザーとして加わっていただき、ヒアリング及び審議を実施した。また、評価の観点として、中間評価においては、①実施体制、②計画の達成状況、③科学的・社会的意義、事前評価においては、①研究者コミュニティの合意、②計画の実施主体、③共同利用体制、④計画の妥当性、⑤緊急性、⑥戦略性、⑦社会や国民の理解を設定し、観点別の評価を踏まえて総合的な評価結果を取りまとめた。

「超高性能プラズマの定常運転の実証」の推進について

【中間評価】

- ・ 炉心プラズマ実現に必要な学理（物理的、工学的）の体系化
- ・ 将来の原型炉設計・製作のために必要な学術基盤の形成

1. 計画の概要

1. 概要

本計画は、自然科学研究機構核融合科学研究所が中心となって、我が国独自のアイデアによる大型ヘリカル装置 (Large Helical Device: LHD) において、高いイオン温度のプラズマや、他方式では難しい安定した定常プラズマなどの、核融合炉を見通すことができる超高性能プラズマの実現を目指して、「超高性能プラズマの定常運転の実証」研究を推進してきたものである。

2. 内容

LHD は平成 10 年度の実験開始以来、水素ガスを用いた核融合実験装置として世界最大の超伝導コイルシステムなどが順調に稼働しており、大学共同利用機関の共同利用装置として研究者コミュニティのニーズに応え、12 万回以上のプラズマ実験を国内外の共同利用・共同研究に供してきた。代表的なプラズマ物理の成果として、1,000 万度を超えるプラズマの 1 時間保持、核融合条件の 12 倍となる 1,200 兆個/cc の超高密度プラズマ状態の発見、8,500 万度のイオン温度の達成、2 億 3,000 万度を超える電子温度（密度 2 兆個）の達成、最終目標の磁場条件に近い 1 テスラで 3.4% のベータ値^{※3} 達成などがあげられる。また、代表的な装置工学上の成果として、マイクロ波の周波数を原型炉要求に近い 154 ギガヘルツまで高めたことによる高効率の加熱の実証があげられる。

さらに、核融合条件を 10 倍以上上回る超高密度プラズマ状態や不純物の排出など、実験開始前には予測されなかった、実験をさらに促進させる好ましい新現象も発見されている。加えて、LHD 実験の新しい発見を理論的に説明する試みなどにより、理論・シミュレーション研究も進展している。

赤字は平成 24 年度達成

プラズマ性能	大型ヘリカル装置 達成値	大型ヘリカル装置 最終目標値	核融合炉 設計条件の目安
イオン温度	8,500万度 (密度10兆個/cc)	1億2,000万度 (密度20兆個/cc)	1億2,000万度以上 100兆個/cc以上 閉じ込め時間1秒以上
電子温度	2億3,000万度 (密度2兆個/cc) 1億5,000万度 (密度10兆個/cc)	1億2,000万度 (密度20兆個/cc)	
密度	1,200兆個/cc ※ (温度300万度)	400兆個/cc ※ (1,500万度)	
ベータ値 (プラズマ圧力/ 磁場圧力)	5.1% (磁場0.425テスラ) 3.4% (磁場1テスラ)	5% (磁場1-2テスラ)	5%以上 (磁場5T以上)
定常運転	54分28秒(500kW) (1,000万度、4兆個/cc) 18分55秒(1,000kW) (3,000万度、9.4兆個/cc)	1時間(3,000kW)	定常(1年)

プラズマ実験には通常の水素(軽水素)を使用

※印の付いた値はプラズマ中心の密度、他は線平均密度

3. 実施体制

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中心となり、所外の共同研究者が加わった LHD 実験会議によって運営、遂行されてきた。LHD は、平成 10 年の実験開始以来、大学等の研究者コミュニティ、共同研究者等からの要望を実施計画に組み込んできている。核融合科学研究所では、全国の研究者からなる「核融合ネットワーク」の組織を作り、学術コミュニティの活動、意見の集約等に努めている。さらに、広く国内外から公募した実験研究提案を、本研究所の所内外の委員で構成される運営会議委員や、所外の共同研究者の代表者によって構成された共同研究委員会で審査、採択している。実験を遂行する実験テーマリーダーには所外の研究者も就いている。また、情報通信技術を活用した遠隔地からの実験参加を含めた利便性の向上、実験情報や実験データの徹底的な開示と英文化等、参画する共同研究者の個々の要望にあった支援を実施している。

また、国際共同研究者の数も年々増加しており、平成 19 年度に約 20 名であった国際共同研究者が、平成 24 年度には約 70 名に増加している。また、国際共同研究・連携事業においても、6 つの 2 国間協定下での活動、3 つの多国間協定下での活動、6 つの国際連携事業、18 機関との学術交流協定を締結し、国際的な活動を実施している。

4. 国内における検討経緯

LHD は学術審議会での建議・報告を経て建設され、平成 10 年度より実験を開

始した。その後、15年間にわたりプラズマの高性能化と精密な物理の理解を目指す研究を実験設備の整備とともに進めてきた。次段階として、重水素ガスを使った実験を目指す段階となった。

5. 国際的な動向

核融合炉にはヘリカル方式とトカマク方式^{*2}がある。ヘリカル方式は外部磁場コイルのみによってプラズマを閉じ込めることができることから、定常運転が原理的に可能であり、安定性に特長がある。そのため、ドイツ・グライフスバルトのマックスプランク・プラズマ物理研究所において、LHDと同規模のヘリカル方式のW7-X装置が2015年の運転開始を目指し建設中であり、2016年には重水素実験を予定している。

一方、核融合研究をこれまで先導してきたトカマク方式では、日本、EU、米国、韓国、中国、ロシア、インドの7極の国際協力によって、国際熱核融合実験炉（ITER）がフランス、カデラッシュにおいて建設中である。

2. 計画の評価

1. 実施体制

本計画は、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中心となり、所外の共同研究者が加わった LHD 実験会議によって運営、遂行されてきた。核融合科学研究所では、全国の研究者から構成される組織「核融合ネットワーク」を構築している。さらに、広く国内外から公募した実験研究提案を、本研究所の所内外の委員で構成される運営会議委員や、所外の共同研究者の代表者によって構成された共同研究委員会で審査、採択している。実験を遂行する実験テーマリーダーには所外の研究者も就いている。これらにより、研究者コミュニティや共同研究者と一体となって実施する体制が構築されてきたと評価する。

また、国際共同研究についても実施体制を整備し、国内の諸大学も含めた活動のハブ機能を担ってきており、平成 19 年度に約 20 名であった国際共同研究者が平成 24 年度には約 70 名に増加している。

このように、核融合科学研究所を中心として適切な実施体制により計画が遂行されてきたと評価する。

2. 計画の達成状況

LHD は、平成 10 年度の実験開始以来、水素ガスを用いた核融合実験装置としての超伝導コイルシステムなどの機器が順調に稼働し、共同利用体制の構築による実験機会の国内外の研究者への提供や、性能の向上、新現象の発見等、着実に計画が進展してきた。8,500 万度のイオン温度の達成、2 億 3,000 万度を超える電子温度(密度 2 兆個)の達成、最終目標の磁場条件に近い 1 テスラで 3.4% のベータ値達成などの成果をあげている。加えて、ペレット入射による内部拡散障壁の形成に伴う粒子閉じ込めの改善や、イオン温度の上昇に伴う不純物の排出など、実験開始前には予測されなかった新現象が発見されたことも大きな成果である。

また、プラズマ中の電位差の分布を精密に測定し、プラズマ中の電位差が閉じ込めに与える影響を解明するなど、炉心プラズマ実現に必要な学理(物理的、工学的)の体系化を図ってきている。さらに、プラズマの閉じ込め特性などの実験解析を行うとともに、理論シミュレーション研究や、プラズマ加熱等の関連工学・技術の高度化を図るなど、将来の原型炉設計・製作のために必要な学術基盤の形成に寄与してきている。

以上のことから、本研究計画は十分な達成状況であると評価する。

3. 科学的・社会的意義

高温高密度プラズマの定常保持の実証に係るこれまでの成果により、本計画がプラズマの基礎科学の理解と体系化に果たしてきた役割は大きく、その学術的な意義は高い。LHDは現時点で世界唯一の定常運転が可能な超高温プラズマ実験装置であることから、プラズマ研究活動において重要な役割を果たしており、共同利用・共同研究による幅広い人材育成の場として機能してきたことも評価する。

さらに、国際共同研究者の数が年々増加しており、国際共同研究・連携事業において多くの学術交流協定に基づき外国人を招聘するなど、国際共同研究の実施体制を整備し、国際貢献や国際的な頭脳循環を図っている。

なお、ロードマップにおいて、主な課題・留意点として、「さらなる基礎的研究の重要性を社会や国民の理解を得る工夫が必要である」とされている。これについては、核融合科学研究所において、地元自治体の小学校区毎の説明会、市民向けの広報や公開イベントなどの実施に努めるなど、幅広い情報発信と対話のための活動が行われており、これらの活動が地域社会の理解の増進につながっている。

これらのことから、本計画の科学的・社会的意義は高いと評価する。

3. まとめ

1. 総合評価

本研究計画は、核融合炉を見通すことができる超高性能プラズマの実現を目指して、「超高性能プラズマの定常運転の実証」研究を推進してきたものであり、自然科学研究機構核融合科学研究所が実施責任機関として中心となり、所外の共同研究者が加わった LHD 実験会議が運営、遂行してきた。

「2. 計画の評価」では、以下の点を確認した。

- (1) 核融合科学研究所が中心となり、研究者コミュニティや共同研究者と一体となって実施する体制が構築されるとともに、国際共同研究についても実施体制を整備し、国内の諸大学も含めた活動のハブ機能を担っており、適切な実施体制により計画が遂行されてきたと評価する。
- (2) LHD は、平成 10 年度の実験開始以来、安全で確実な運転が遂行されており、共同利用体制の構築による実験機会の国内外の研究者への提供や、性能の向上、新現象の発見等、着実に計画が進展してきている。高温高密度プラズマの定常保持の実証とともに、高精度のプラズマ観測を実現し、プラズマ中の電位差が閉じ込めに与える影響を解明するなど、炉心プラズマ実現に必要な学理の体系化を図っている点が高く評価できる。さらに、将来の原型炉設計・製作のために必要な学術基盤の形成に寄与してきている点も高く評価される。以上のことから、本計画は十分な達成状況であると評価する。
- (3) LHD は現時点で世界唯一の定常運転が可能な超高温プラズマ実験装置であることから、プラズマ研究活動において重要な役割を果たしており、共同利用・共同研究による幅広い人材育成の場としても評価できる。さらに多くの学術交流協定に基づき外国人を招聘するなど、国際共同研究の実施体制を整備し、国際貢献や国際的な頭脳循環を図っている。また、核融合科学研究所において、幅広い情報発信と対話のための活動が行われており、重水素実験に対する地元への説明の努力が、地元の理解につながった点も高く評価できる。以上のことから、本計画の科学的・社会的意義は高いと評価する。

以上を総合的に勘案し、本計画は順調に進展してきたと評価する。

2. 今後の事業推進に当たっての留意点

(【事前評価】における「2. 計画推進に当たっての留意点」を参照。)

【事前評価】

- ・重水素を用いた実験の遂行

1. 計画の概要

1. 概要

核融合による発電^{※1}の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。本計画は、これまで実施してきた研究を発展させるため、重水素ガスを実験に使用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、核融合に係る学理の探究とその体系化を図るものである。

なお、重水素ガスを使った実験の前提となる、地元自治体（岐阜県、土岐市、多治見市、瑞浪市）との周辺環境の保全等に関する協定が平成25年3月に締結され、実験開始の同意が得られたところである。

2. 内容

核融合研究は、太陽中心核の10倍という超高温の世界で起こる様々な未知の現象を実験的・理論的に解明する学術研究を基盤として進展してきた。重水素ガスを用いた本計画によって、核融合炉を見通せる世界最高の性能を持つ定常プラズマが初めて実現し、プラズマの閉じ込め、不安定性などの研究が実施される。これらの学術研究によって、核融合炉に必要な、プラズマ物理を始めとする学理の体系化と関連工学・技術の高度化を図り、発電実証を行う原型炉設計のための、学術基盤に立った予測科学を構築する。

重水素ガスを用いる実験を実施するには、発生する放射性物質であるトリチウムを除去するための装置等の必要な機器を整備する必要がある。また、核融合条件となる1億2,000万度以上のイオン温度等を可能とする、プラズマを加熱するための装置では、中性粒子ビーム入射加熱装置の重水素化のための改造等が必要である。さらに、1億度を越えるプラズマ中で起こる物理現象を精密に診断するための計測装置を充実させることが不可欠である。重水素実験の開始には3年程度の準備期間が必要であり、平成28年度の開始を目指す。重水素実験開始後、9年間において核融合炉に必要なプラズマを見通せる核融合条件のイオン・電子温度1億2,000万度（密度20兆個/cc）、密度400兆個/cc（1,500万

度)、核融合炉の経済的な指標であるベータ値 5% (磁場 1-2 テスラ)、定常運転 1 時間 (3 メガワット) の最終目標を達成する。

3. 実施体制

核融合科学研究所においては、重水素実験についても、これまでの実施体制を持続させるとともに、さらに必要となる体制を整えた上で、全国の研究者とともに計画を検討してきた。今後、一般共同研究に加えて、筑波大学プラズマ研究センター、京都大学エネルギー理工学研究所、大阪大学レーザーエネルギー学センター、九州大学応用力学研究所、富山大学水素同位体科学研究センター、東北大学金属材料研究所の国立大学附置研究所・センター等との組織的な協力による双方向型共同研究、LHD 計画への適用を見込んで大学等で計測装置等を研究開発する LHD 計画共同研究を組み合わせ、本計画を実施する。さらに、6 カ国 (極) との 2 国間協定、国際エネルギー機関実施協定、18 の海外機関との学術交流協定等に基づき、国際共同研究を展開する。特に重水素ガスを用いる実験ではトリチウムが発生するため、富山大学水素同位体科学研究センターと共同研究体制をとり、実験を実施する計画となっている。

4. 国内における検討経緯

重水素ガスを用いる本計画について、「プラズマ・核融合学会」や「核融合ネットワーク」を中心とした議論の積み上げがなされてきた。また、重水素ガスを用いる本計画とトカマク方式の JT-60SA 計画とを合わせた「高性能核融合プラズマの定常実証研究」は、日本学術会議のマスタープラン 2010 及び 2011 に取り上げられている。さらに日本学術会議においても、シンポジウムや分科会において重水素ガスを用いる本計画が報告・議論されている。

また、本作業部会におけるロードマップにおいて、重水素ガスを用いる本計画とトカマク方式の JT-60SA 計画とを合わせた「高性能核融合プラズマの定常実証研究」の計画は、「基本的な要件が満たされており、一定の優先度が認められる計画」の一つとされた。

5. 国際的な動向

核融合研究においては、トカマク方式と相補的なヘリカル方式に取り組むことが世界的な流れとなっている。日本、EU、米国、韓国、中国、ロシア、インドの 7 極の国際協力によって、核融合で燃えるプラズマを制御して 50 万キロ

ワットの熱を発生させることを目的としたトカマク方式の ITER がフランス、カデラッシュにおいて建設中である。また、LHD と同規模のヘリカル方式の W7-X 装置が、ドイツ・グライフスバルトのマックスプランク・プラズマ物理研究所において、2015 年の運転開始を目指し建設中であり、2016 年には重水素実験を予定している。また、米国においては大型のヘリカル方式計画は保留になっているが、長時間、3次元磁場の科学において米国の存在感を示すことが強調されており、W7-X への調整コイルの調達や LHD への実験参加による国際協力を推進している。中国、韓国においてはトカマク方式であるが、定常運転を目指した超伝導コイルを有する中型装置を数年前から稼働させている。インドにおいても最近、超伝導トカマク装置を稼働させた。

6. 年次計画（工程表）

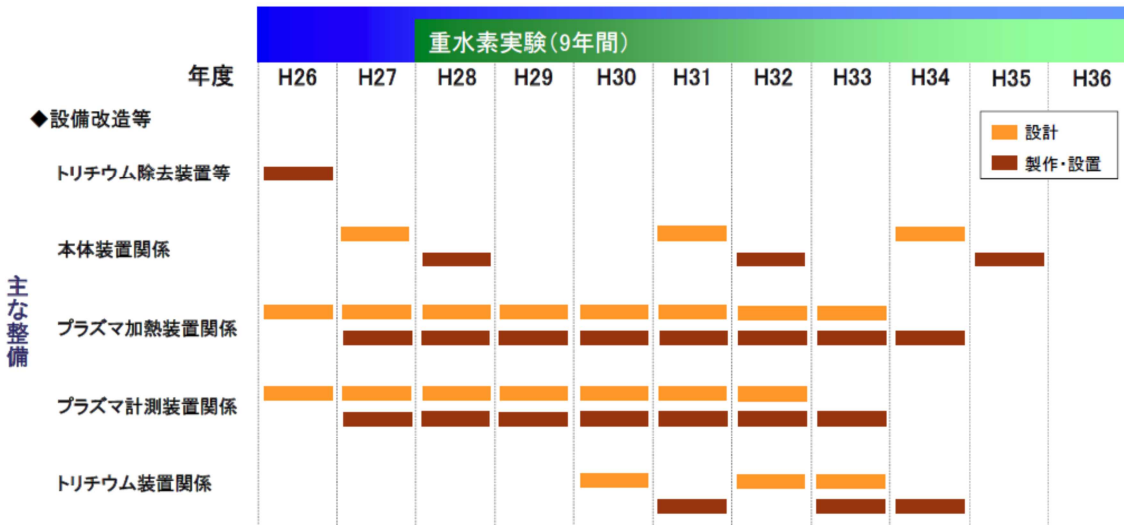
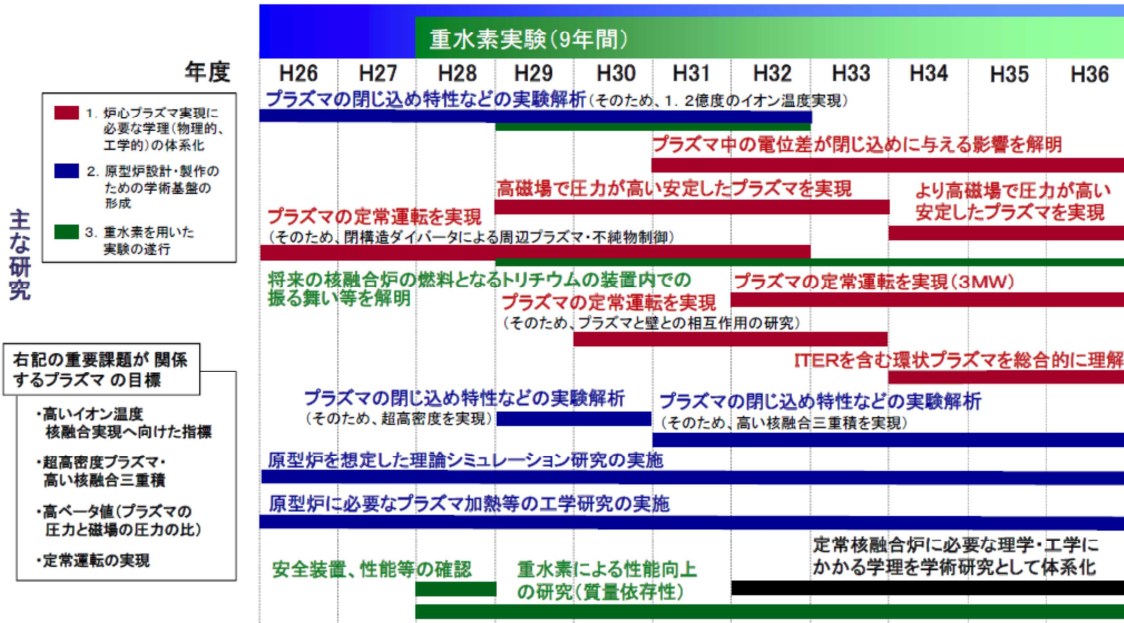
平成 26～33 年度：

重水素ガスを用いるプラズマ実験についての準備を平成 26 年度と 27 年度に進め、28 年度から実験を開始する。重水素ガスを用いる実験を効率的に行うため、実験期間中に調整と比較のための水素ガスを用いる実験に挟まれた形で、構成する必要がある、計 17 週間程度とする。また、トリチウム除去装置等、本体装置関係、プラズマ加熱装置関係の増強、プラズマ計測装置関係、トリチウム装置関係、等の整備によってプラズマの最高性能化を図るとともに、精緻な計測を行い、実験研究を安全に促進する必要がある。なお、このための準備は主に安全設備と加熱装置の増強である。これらの整備と並行して、高性能定常プラズマ実証と環状プラズマの総合的理解のために国内外の大学等と共同して研究を進める。

平成 34～36 年度：

ヘリカル方式による核融合点火を見通せるイオン温度 1 億 2 千万度の高性能定常プラズマを主に用いて、プラズマ物理学、関連理工学の体系化を図る。また、環状プラズマの総合的理解等のため、実験期間を伸長し、23 週間とする。

超高性能プラズマの定常実証研究 年次計画表



7. 予算規模

整備経費	113.4億円 (H26~H35)
運転経費	年間 49.6億円 (H26)
	〃 51.8億円 (H27)
	〃 57.5億円 (H28~32、H36)
	〃 60.2億円 (H33~35)

2. 計画の評価

1. 研究者コミュニティの合意

重水素ガスを用いる本計画の方向性を決める上で、「プラズマ・核融合学会」や「核融合ネットワーク」を中心とした議論の積み上げが重要な役割を果たしてきており、本計画は研究者コミュニティから、学術研究としての必要性が支持されている。

また、本計画は日本学術会議のマスタープラン 2010 及び 2011 に取り上げられている。さらに、日本学術会議においても、シンポジウムや分科会で重水素ガスを用いた本研究計画が報告・議論される等、合意と周知が図られてきている。

このような状況を踏まえ、本計画の着手に当たって、研究者コミュニティの合意は十分に得られており、実施に向けて推進することが適切であると評価する。

今後は、2022 年と予想されている原型炉の形式の選択を視野に置き、形式選択後の LHD の役割について、研究者コミュニティにおいて合意を形成していくことが求められる。

2. 計画の実施主体

本計画は、これまでと同様に、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中心となり、所外の共同研究者が加わった LHD 実験会議によって運営し、遂行される。核融合科学研究所では、全国の研究者からなる「核融合ネットワーク」の組織を作り、学術コミュニティの活動、意見の集約等に努めている。さらに、広く国内外から公募した実験研究提案を、研究所内外の委員で構成される運営会議委員（所内 10 人、所外 11 人（平成 24 年 4 月 1 日現在）、所外の共同研究者の代表者によって構成された共同研究委員会で審査、採択している。これらにより、採択プロセスの透明性と公平性の確保、外部の意見の反映等に努め、研究者コミュニティや共同研究者と一体となって実施する体制が構築されていることを高く評価する。

このように、核融合科学研究所は、大学共同利用機関としての特性を活かして、着実な運営によりこれまでの研究を進めてきた実績を有することから、本計画についても、核融合科学研究所を中核とした実施主体・体制は適切であると評価する。

3. 共同利用体制

本計画は、核融合科学研究所と国内の多くの大学等との組織的な協力による双方向型共同研究や、LHD 計画への適用を見込んで大学等で計測装置等を研究開発する LHD 計画共同研究を組み合わせ実施される。さらに、核融合科学研究所では、6 カ国等との 2 国間協定、国際エネルギー機関実施協定、18 の海外機関等との学術交流協定等に基づき、国際共同研究が展開され、国際共同研究者の数が年々増加している。

ロードマップにおいては、主な課題・留意点として、「核融合科学研究所と日本原子力研究開発機構との協力体制を強化するとともに、ITER も含めた長期的な見通しと総合的な戦略を明確にする必要」との点が挙げられている。これについて、核融合科学研究所は、日本原子力研究開発機構と包括的な連携協力協定を、また、ITER 機構と学術交流協定を締結し、組織的連携を強化することによって、研究協力を進めている。また、核融合科学研究所が窓口となって、これらの活動へ大学等の研究者が参画できる体制を整えている。

このように、核融合科学研究所では、国内の多くの大学等と共同研究、双方向共同研究、LHD 計画共同研究を実施するとともに、国際共同研究についても実施体制を整備し、国内外の諸大学の活動のハブ機能を果たしてきていることから、本計画の実施に当たっても、幅広い研究者が参画し、国内外を通じた共同利用体制が確立されると評価する。

4. 計画の妥当性

重水素ガスを使った実験の前提となる、地元自治体との協定書・覚書の締結が平成 25 年 3 月 28 日になされ、実験開始の同意が得られたことから、実施に向けた手続きが進められている。トリチウムを除去するための装置、中性粒子ビーム入射加熱装置の重水素化のための改造など、実験に必要な設備を整えるため、3 年程度の準備期間を経て、平成 28 年度の開始を目指す計画となっている。

LHD は、平成 10 年度の実験開始以来、超伝導コイルシステムなどが順調に稼働し、安全で確実な実験を実施して国内外の共同利用・共同研究に供してきており、研究者、技術者などの人的資源も蓄積されてきた。これらの実績を踏まえると、3 年程度の準備期間を経て平成 28 年度からの実験開始を目指す計画の内容は、実施可能であると評価する。

一方、多額の国費が投入される本計画の性質に鑑み、実施に当たっては、LHD 実験でのこれまでの経験を適切に反映しながら、経費の効率化に向けた取組が

期待される。

5. 緊急性

重水素実験はすでに世界的に大きな流れであり、重水素化でプラズマ閉じ込め性能が大きく向上することが、既に日米独等の実験によって確かめられている。

また、核融合研究の世界的な流れにおいて、定常運転に本質的に優れたヘリカル方式の研究開発がトカマク方式と並行して進められており、国際競争が熾烈なものとなってきている。ドイツのヘリカル型の W7-X 装置は平成 27 年（2015 年）に実験を開始し、平成 28 年（2016 年）には重水素実験を開始する予定である。そのため、LHD においても、平成 28 年（2016 年）までには重水素実験を開始しなければ、ヘリカル方式による日本の優位性を保つことができなくなり、世界の核融合研究の流れに対して遅れを取る事となる。

また、ヘリカル方式の LHD とトカマク方式の JT-60SA の 2 方式の研究を国内で並行して進めることは、プラズマ物理研究の進展の上で有用であり、研究者の流出を防ぎ、国際競争力を保つ上で重要である。

以上のことから、本計画の緊急性は高いと評価する。

6. 戦略性

核融合科学研究所はプラズマ実験の実績を既に十分蓄積しており、本計画により、LHD の性能を最大限に発揮させて、核融合燃焼条件に近い領域の超高性能定常プラズマを生成し、ヘリカル方式及びトカマク方式に共通する環状プラズマの総合的理解をさらに進めることが期待される。本計画における定常運転下で可能となる熱粒子制御等の研究は、両方式の核融合炉設計に共通して重要な価値を持つ。本計画により、我が国は核融合研究における我が国の強みをさらに伸ばし、国際的なイニシアティブを取ることが期待され、国際貢献にもつながるといえる。

また、重水素を用いた実験によって、何十年も未解明である磁化閉じ込めプラズマのアイソトープ効果^{*4}という重要課題に挑戦することによって、海外からの優れた研究者や若手人材を呼び込む効果を期待でき、国際的な頭脳循環や、将来的な我が国の成長・発展につながるものといえる。

以上のことから、本研究計画の戦略性は高いと評価する。

7. 社会や国民の理解

本計画において、より高性能のプラズマを得るとともに、広い学理を追求することで核融合研究を加速しようとする方向は、社会や国民の理解を得られるといえる。

ロードマップにおいて、主な課題・留意点として、「さらなる基礎的研究の重要性を社会や国民の理解を得る工夫が必要である」とされている。これについては、核融合科学研究所において、地元自治体の小学校区毎の説明会、市民向けの広報や公開イベントなどの実施に努めてきた。このような、核融合科学研究所を中心とする長年の努力により地元自治体との間で合意が形成され、重水素ガスを使った実験の前提となる、地元自治体（岐阜県、土岐市、多治見市、瑞浪市）との周辺環境の保全等に関する協定が締結され、重水素実験開始の同意が得られた。このことから、社会や国民の理解を得られており、実施に向けて推進することが適切であると評価する。

今後も、難解な内容の一般への理解が必要であり、正しい理解を得る努力を、他の機関や大学等と連携して行うことが期待される。

なお、安全管理については、トリチウム処理、放射線管理、廃棄物管理などについて様々な安全対策の実施が予定されている。これらの安全対策に関しては、地元住民に丁寧な説明をすることにより、地元住民との信頼関係のさらなる向上に努めることに留意が必要である。

3. まとめ

1. 総合評価

本計画は、自然科学研究機構核融合科学研究所が実施責任機関として中心となって実施されるものであり、重水素ガスを使った実験により、核融合燃焼条件に近い領域の超高性能定常プラズマを生成し、定常性と運転制御性に優れた原型炉を可能とする理工学の総合的体系化という目標の達成を目指すものである。

「2. 計画の評価」では、以下の点を確認した。

- (1) 本計画は、「プラズマ・核融合学会」や「核融合ネットワーク」を中心として議論が積み重ねられてきており、本計画の着手に当たって、研究者コミュニティの合意は十分に得られていると評価する。
- (2) 核融合科学研究所は、大学共同利用機関としての特性を活かして、着実な運営によりこれまでの研究を進めてきた実績を有することから、本計画についても、核融合科学研究所を中核とした実施主体・体制は適切であると評価する。
- (3) 核融合科学研究所では、一般共同研究、双方向共同研究、LHD 計画共同研究を実施するとともに、国際共同研究についても実施体制を整備し、国内外の諸大学の活動のハブ機能を果たしてきていることから、本計画の実施に当たっても、幅広い研究者が参画し、国内外を通じた共同研究体制が確立されると評価する。
- (4) 実験に必要な設備を整えるため、3年程度の準備期間を経て、平成28年度の開始を目指す計画は、LHDの実験開始以来の実績を踏まえると、実施可能であると評価する。
- (5) 世界の核融合研究の流れにおいて、定常運転に本質的に優れたヘリカル方式の研究開発がトカマク方式と並行して進められており、ヘリカル方式における国際的な優位性を保つために、重水素化によりプラズマ閉じ込め性能の向上につながる本計画の緊急性は高いと評価する。
- (6) 重水素実験は、従来の水素実験と比べてさらに高精度のプラズマ観測を実現するものであり、環状プラズマの総合的理解をさらに進め、核融合研究における国際的なイニシアティブを取ることが期待できる点が高く評価できる。また、理論的に解明できていないアイソトープ効果等の現象について本計画の推進によって知見を増やし、物理理解の新たな展開を促す可能性がある学術的な価値は大きいといえる。以上のことから、本計画の戦略性は高いと評価する。

(7) 重水素ガスを使った実験の前提となる、地元自治体との協定書の締結が平成25年3月28日になされ、実験開始の同意が得られたことから、社会や国民の理解を得られており、実施に向けて推進することが適切であると評価する。

以上を総合的に勘案し、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評価する。

2. 計画推進に当たっての留意点

本計画の推進に当たっては、以下の取り組みが必要である。

2022年と予想されている原型炉の形式の選択を視野に置き、仮にトカマク方式に確定した場合のLHDの役割について、巨額化する経費、核融合実現への寄与とその有効性、期待される科学的成果の重要性などに鑑みて、研究者コミュニティにおいて現時点からの真摯な検討が望まれる。

本計画については、環状プラズマの総合的理解の推進を重視すべきであり、それが我が国の学術的地位を向上させることにつながる。特に、本計画によって、理論的に解明できていないアイソトープ効果等の研究を推進し、物理解の新たな展開を促し、学術的な価値を高めることが必要である。

安全管理については、核融合科学研究所において、トリチウムを除去するための装置をはじめとして、トリチウム処理、放射線管理、廃棄物管理などについて、安全性を担保するための体制の構築が必要である。また、これらの管理体制を監視するための計測機器や、異常・災害時の停止システムなど、二重、三重の安全対策が必要である。さらに、実験前の会合で安全教育を十分に実施するなどの安全文化の醸成が必要である。

最後に、本計画の実施に当たって、核融合科学研究所においては、社会・国民の理解を得るためのコミュニケーション活動を強化するとともに、特に重水素実験の開始に伴って、安全性について理解を得るよう、運転状況の公開や、丁寧な説明会の定期的開催等の活動をさらに進め、地元住民との信頼関係の継続的な向上を図ることに留意が必要である。

用語解説

※ 1 核融合による発電

重水素と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。

※ 2 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。

※ 3 ベータ値

プラズマの性能を表す指標の一つで、プラズマ圧力の磁場圧力に対する比として与えられる。ベータ値が高いほど、低い磁場で効率よくプラズマを生成したことになる。核融合炉では5%以上のベータ値が必要とされている。

$$\text{ベータ値} = \frac{\text{プラズマの圧力}}{\text{磁場の圧力}}$$

※ 4 アイソトープ効果（同位体効果）

同位体の質量の相違が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る実験が計画されている。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等により、LHDのイオン温度等の最終目標値を達成することが期待されている。

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
委員等名簿

(◎：主査、○：主査代理)

(委員)

西尾章治郎 大阪大学大学院情報科学研究科特別教授、
大阪大学サイバーメディアセンター長

(臨時委員)

伊藤早苗 九州大学応用力学研究所教授
◎海部宣男 国立天文台名誉教授、国際天文学会会長
○川合知二 大阪大学産業科学研究所特任教授
角南篤 政策研究大学院大学准教授
瀧澤美奈子 科学ジャーナリスト
横山広美 東京大学大学院理学系研究科准教授

(専門委員)

井本敬二 自然科学研究機構生理学研究所所長
小林良彰 慶應義塾大学法学部教授
高柳英明 東京理科大学教授
長田重一 京都大学大学院医学研究科教授
永宮正治 理化学研究所研究顧問、
高エネルギー加速器研究機構特定教授
新野宏 東京大学大気海洋研究所所長
吉田哲也 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
学際科学研究系教授

※評価にご協力いただいた専門家

牛草健吉 独立行政法人日本原子力研究開発機構
核融合研究開発部門副部門長
長崎百伸 京都大学エネルギー理工学研究所教授
百島則幸 九州大学アイソトープ総合センター教授

(敬称略、五十音順)