

「超高性能プラズマの定常運転の実証（LHD）計画」について

1. 概要	1
1-1. 事業の目的と経緯	1
1-2. LHD の性能と特徴	2
1-3. 主要な研究成果	6
2. 実施体制	9
2-1. 国際的な共同研究体制	9
2-2. LHD の装置運用体制	10
3. プロジェクト計画	12
4. プロジェクト計画の達成状況	14
4-1. 研究の達成状況	14
4-2. 施設等の整備状況	32
4-3. 情勢の変化があった場合の対応状況	33
4-4. 社会や国民からの支持を得るための取り組み、情報発信の状況	34
4-5. 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 ...	37
4-6. 共同利用・共同研究を行うための実施体制について	39
4-7. 幅広い研究者が参画できる運用体制の状況について	42
4-8. フロンティア事業での支援終了後の運営	46

「超高性能プラズマの定常運転の実証（LHD）計画」について

1. 概要（研究計画、施設整備に関する概要）

1-1. 事業の目的と経緯

世界の 120 以上の国と地域が目標として掲げる「2050 年カーボンニュートラル」を達成するために、残された約 30 年で核融合エネルギー（フュージョンエネルギー）を実用化することが期待されている（国は 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』をまとめ、フュージョンエネルギー実現に向けた積極的な取り組みと、イノベーションを生み出す学術研究基盤の重要性を示している）。開発研究は、まだ多くの科学的不確実性を残す中で、デファクトスタンダードに研究資源を集中する必要がある。未経験の事象に直面したときには、困難を根本的な課題に還元し、その解決法を与える科学知が必要となる。学術研究の役割は、超高温プラズマの中で生起する様々な複雑現象に関する正確な理解を構築することである。

本研究は、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）の支援を受け、自然科学研究機構核融合科学研究所（以下、「NIFS」という）が中心となって、世界最大級の超伝導マグネットを用いたプラズマ閉じ込め装置である大型ヘリカル装置（Large Helical Device：以下、「LHD」という）を運用し、

- ① 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
- ② 超高温プラズマの安定性と閉じ込め性能を支配する物理機構の解明

を目指した 10 年間のプロジェクトとして実施したものである。

LHD（図 1.1 に LHD の内部を示す）は、1998 年 3 月にプラズマの生成に成功して以来、毎年 3～4 か月間の実験キャンペーンを実施し、四半世紀余にわたって世界の核融合科学研究をリードする成果をあげてきた。2013 年度から始まったフロンティア事業では、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

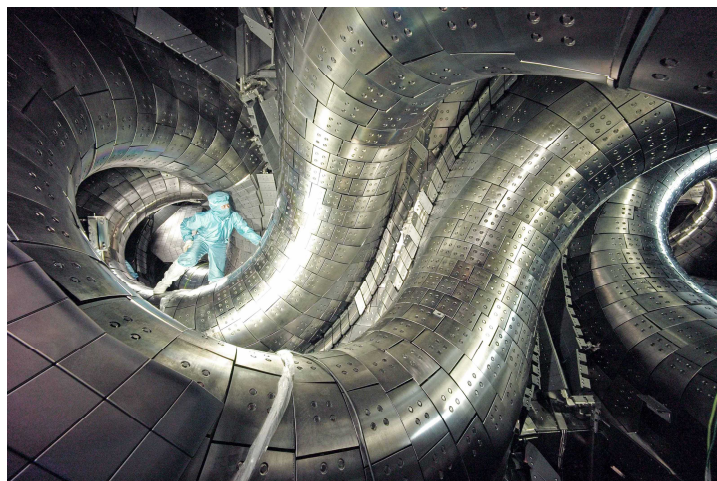


図 1.1 LHD のプラズマ真空容器内部

理的基礎を築くことを中心的な課題として、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。2017 年 3 月からは、重水素^{*}ガスを用いたプラズマ実験（以下、「重水素実験」という）を実施し、イオン温度 1 億 2 千万度の超高温プラズマを実現するとともに、同位体効果（軽水素のプラズマと重水素のプラズマではプラズマの閉じ込め特性が変化すること）を詳細に研究した。こうした実験研究のために、独自の技術開発を進め、世界最高性能をもつ中性粒子ビーム入射装置（プラズマの加熱装置）や高時空間分解能の計測器群が開発された。これらの高性能機器を活用し（第 1.2 項参照）、2021 年度からは、装置方式によらない核融合プラズマの一般的な特性の理解、さらに宇宙・天体の現象にも通底する基礎物理の解明を目指した実験研究を実施し、核融合科学の学際的展開に力を入れた。フロンティア事業支援期間（2013 年度～2022 年度）における LHD の主な成果を年表として表 1.1 にまとめた。

表 1.1 フロンティア事業期間における LHD の主な成果（赤星：数値目標、青星：科学的発見、桃四角：学際的波及、緑四角：技術イノベーション）

2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023-2025
大規模学術フロンティア促進事業										学術研究基盤事業
重水素実験期間										
プラズマのパラメータ領域拡大				重水素実験によるプラズマの高性能化研究				高性能プラズマを用いた学際研究		
★ 2300万度プラズマの3000秒維持				★ イオン温度1億2000万度				★ 無衝突エネルギー移送		
★ 突発現象				★ 同位体効果				★ 乱流伝播		
❖ 超伝導・低温システム改造				❖ NBI増強				❖ 高速燃料核融合		
❖ 排気システム				❖ 同位体混合				❖ 高速荷電交換分光計測		
❖ 重元素スペクトル				❖ 高速トムソン散乱計測				❖ LHDデータの完全オープン化		
				❖ 炉設計				❖ 2次元分光計測		

1-2. LHD の性能と特徴

LHD は、建設後四半世紀余を経た現在も世界最大の超伝導プラズマ実験装置であり、特にフロンティア事業が実施された 2013 年度～2022 年度において、世界最先端の核融合科学研究を行うことができる我が国唯一の本格的実験施設として、様々な国際共同研究の拠点としての役割を果たした。2022 年の時点において稼働していた世界の磁場閉じ込めプラズマ実験装置を、プラズマ体積が大きい順に表 1.2 に示す。図 1.2 に LHD 本体と計測器、中性粒子ビームや電磁波の入射装置が設置されている実験室を示す。

表 1.2 世界の磁場閉じ込めプラズマ実験装置（2022 年時点）

装置名	組織（国）	運転開始年	閉じ込め形式	導体	磁場強度 [T]	大半径 [m]	小半径 [m]
JET	CCFE（欧州）	1984（2023終了）	トカマク	常伝導	3.45	2.96	1.25
LHD	核融合科学研究所（日本）	1998	ヘリカル	超伝導	3.00	3.90	0.63
Wendelstein 7-X	Max Planck IPP（ドイツ）	2015	ヘリカル	超伝導	3.00	5.50	0.53
DIII-D	GA（アメリカ）	1986	トカマク	常伝導	2.20	1.67	0.67
HL-2M	SWIP（中国）	2020	トカマク	常伝導	2.2	1.78	0.65
ASDEX-Upgrade	Max Planck IPP（ドイツ）	1991	トカマク	常伝導	3.10	1.65	0.65
WEST (Tore Supra)	CEA IRFM（フランス）	2016※（1988）	トカマク	超伝導	3.65	2.50	0.50
KSTAR	KFE（韓国）	2008	トカマク	超伝導	3.50	1.80	0.50
EAST	ASIPP（中国）	2006	トカマク	超伝導	3.50	1.85	0.45

※ 改造後運転再開

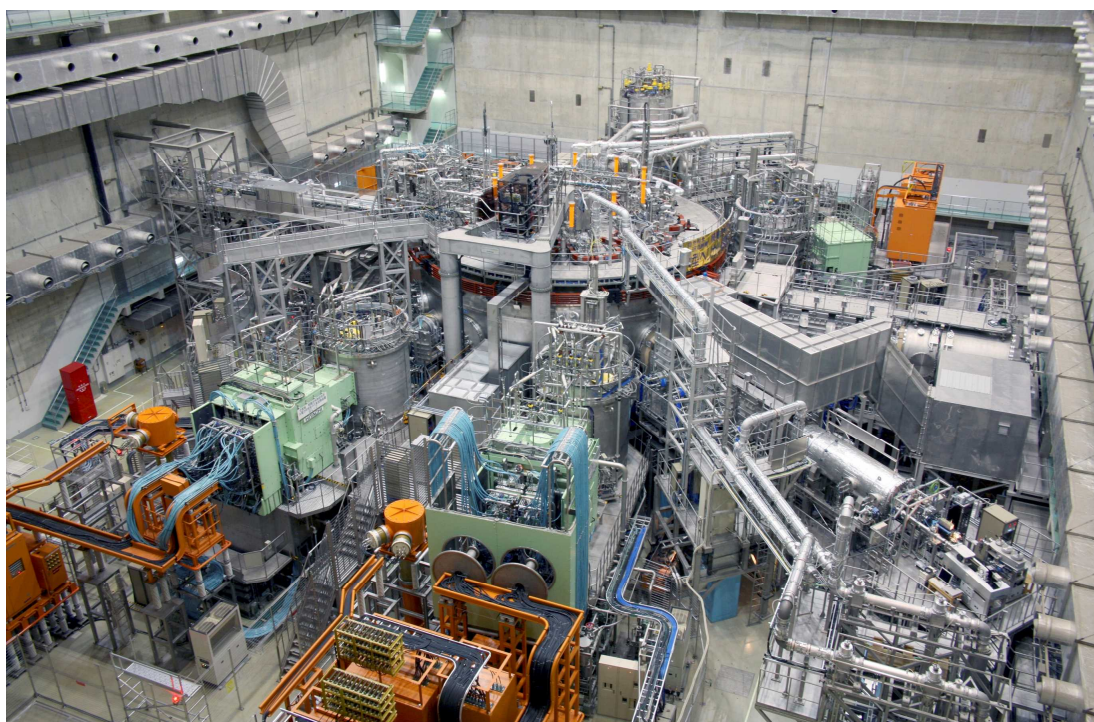
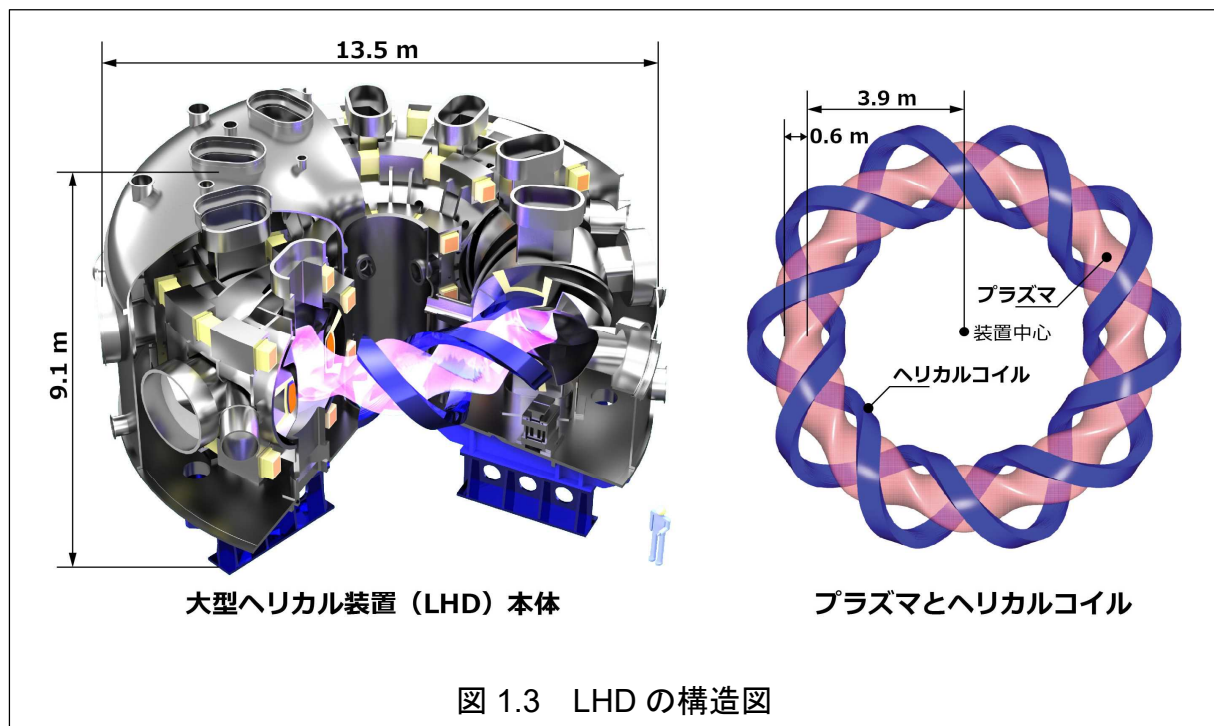


図 1.2 LHD 本体とその周辺設備

LHD が採用しているヘリカル方式は、閉じ込め磁場を構成するためにプラズマ中の電流を必要としないことが特長である。LHD は超伝導マグネットを採用することで、完全に定常なプラズマ閉じ込め磁場を実現でき、極めて精密で高い再現性をもつ実験ができる。さらに LHD は、一日で最大 170 ショットを超えるプラズマ生成が可能であり（例えば、世界最大のトカマクである JET の一日 20 ショット未満をはるかに凌駕する）、高い統計的精度のデータを得ることができる。このような優れた特性を活かして、世界から多くのテーマの提案を受け付けながら、高精度なプラズマ実験が実施された。LHD の主なパラメタと構造図を表 1.3 および図 1.3 に示す。

表 1.3 LHD の主要パラメタ

大半径	3.9 m
コイル小半径	0.975 m
プラズマ半径	0.5 - 0.65 m
プラズマ体積	20 - 30 m ³
ヘリカルコイル数／周期数	2 / 10
磁場強度（プラズマ中心／最大）	3.0 T / 6.6 T
超伝導コイル冷却温度	4.4 K（3.5 K 過冷却運転）
プラズマ加熱パワー	
中性粒子ビーム加熱	30 MW（5 台）
電子サイクロトロン共鳴加熱	5 MW（5 ビーム）
イオンサイクロトロン共鳴加熱	2 MW（4 アンテナ）



1998 年の LHD 実験開始以来、四半世紀余にわたって世界をリードする研究を支えてきたのは、独自に開発してきた多種多様なプラズマ計測器群である（荷電交換分光計測、トムソン散乱計測等、図 1.4 参照）。LHD は、超高温プラズマの内部で起こる様々な複雑現象を透視し分析する能力において、世界一の時空間分解性能をもつ。また、大きなエネルギー量をもつプラズマを能動的に変化させ、その応答を研究するための強力な中性粒子ビームや電磁波の入射装置を備えている。

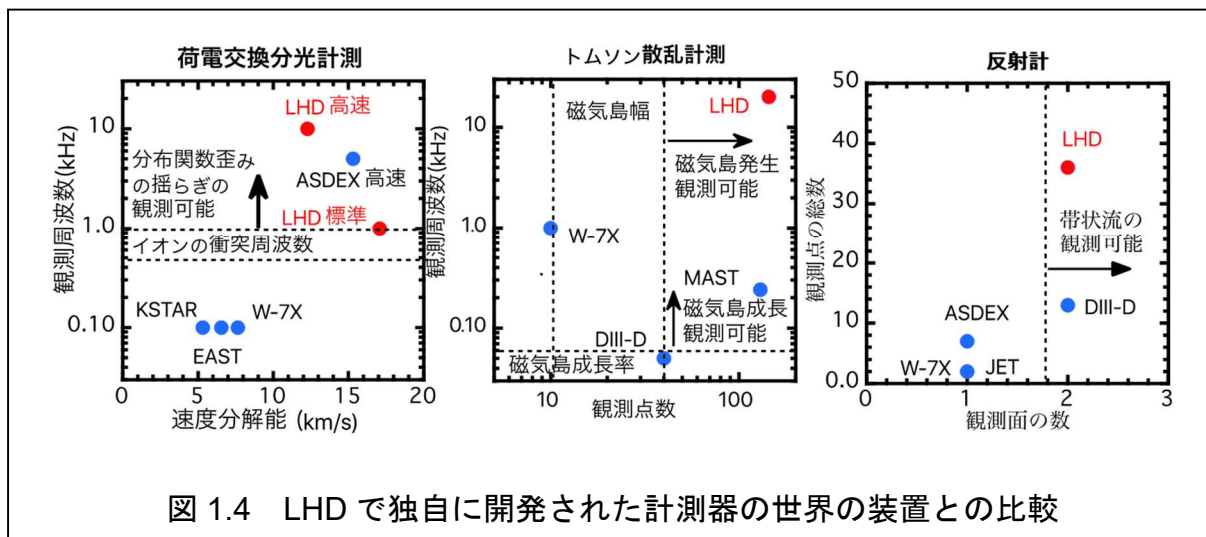


図 1.4 LHD で独自に開発された計測器の世界の装置との比較

1-3. 主要な研究成果

数値目標の達成

最先端の核融合プラズマ実験を行うための前提となる高性能プラズマの生成に成功した。

(1-1) 高温プラズマの生成

フロンティア事業で 2017 年度に重水素実験が開始されると、同位体効果（下記第（2-1）項）によってイオン温度が上昇し、核融合条件の 1 つである 1 億 2 千万度を達成した。また、電子加熱を行うマイクロ波の入射方法を最適化することにより電子温度も向上し、イオン温度と電子温度が同時に 1 億度のプラズマを生成することに成功した。

(1-2) 高温プラズマの定常保持

炉心システムにおけるエネルギー・物質循環の解明と定常運転に必要な技術の開発、加熱機器を大電力で長時間運転するための技術開発を進め、2300 万度の高温プラズマを約 3000 秒間にわたって閉じ込めることに成功した。これは、現在も高温プラズマの長時間保持に関する世界記録である。

科学の新しい発見

定常性・再現性が高いプラズマの高時空間分解能計測によって、プラズマ中の粒子運動の効果が支配する（同位体効果がその典型）ミクロ階層の物理現象が可視化され、これまで未解明であった超高温プラズマの複雑性を支配するメカニズムが解明された。この新たな発見は、核融合炉高性能化のための強力な科学的指導原理となる。

(2-1) 同位体効果の解明

将来の核融合炉では、重水素と三重水素を混合したプラズマで核融合反応を起こす必要があるが、イオンの質量の違いによってプラズマの閉じ込め特性が複雑に変化することが指摘されている。これを「同位体効果」という。本研究では、イオンの質量の違いによって生じる、複数の物理原理が協働してプラズマのマクロな特性を変化させ、同位体効果に多様性が生まれることを明らかにした。この成果は、多成分の同位体で構成される将来の核融合プラズマの閉じ込め特性を正確に評価する科学的基礎を与える。

(2-2) 乱流による同位体混合

プラズマ中の乱流は、閉じ込め特性を劣化させる負の効果をもたらすものと考えられているが、核融合炉の燃料である重水素と三重水素を「混合」させるために活用できる可能性もある。この効果を軽水素と重水素のプラズマで模擬する実験を行い、プラズマ乱流の発生メカニズムの違いで、混合の効果に違いが現れることを明らかにした。この成果は、将来の核融合炉の効率的燃焼のための科学的指針を与える。

(2-3) 「磁場のトポロジー遷移」と「磁場の乱れによるプラズマ流の減衰」（突発現象）

トカマク方式の最大の難点である突発的崩壊現象（ディスラプション）のダイナミクス

を詳細に可視化し、その「要因」（崩壊という大域的な運動を引き起こす自由エネルギー）と「誘因」（突発的な運動を励起する引き金）を分離してメカニズムの原理を明らかにした。この成果は、将来の核融合炉の安定的な定常化の科学的指針を与える。

（2-4）「乱流の干渉」「乱流伝播」とそれによってもたらされる「非局所輸送」

乱流は、小さな渦から大きな渦まで、スケールが違う渦が干渉し合う多階層現象であり、そのために乱流によって運ばれるエネルギーや物質の振る舞いは極めて複雑である。小さな渦による輸送はブラウン運動のモデルで近似できるが、大きな渦が存在すると、局所的な物理量の分布だけでなく大域的な構造が影響する「非局所輸送」が起こることを明らかにした。この成果は、核融合炉の閉じ込め改善に関する科学的指針を与える。

（2-5）無衝突エネルギー移送

核燃焼状態は、核融合反応で生まれる高エネルギーの He イオンがプラズマを加熱することで自律的に持続する。この加熱プロセスが実際にどのように起こるかが、ITER※をはじめとする核燃焼実験の中心的テーマである。これに先駆けて本研究では、高エネルギーの粒子ビームを LHD プラズマに打ち込み、高時間分解能でイオンのエネルギーを計測することで、高エネルギー粒子が電磁波を媒介としながらプラズマを加熱することを明らかにした。この成果は、核融合炉の燃焼条件を正確に評価する科学的指針を与える。

（2-6）先進燃料を使った核融合反応の実証

重水素-三重水素による核融合は中性子を発生するが、水素-ホウ素の核融合は 3 個の He を発生するのみで、究極的に安全な核融合炉になる可能性をもっている。米国のスタートアップ企業 TAE 社との共同実験により、磁場閉じ込めプラズマ中で初めて水素-ホウ素核融合を実証した。この実験を可能にしたのは、LHD が有する高性能のビーム装置と、ホウ素の入射装置、プラズマ条件を精密に評価できる高精度の計測器群である。この成果は、フュージョンエネルギーの破壊的イノベーションにつながる可能性をもつ。

技術のイノベーション

フロンティア事業を通じて、核融合プラズマの高性能化に必要な物理の解明が進むと同時に、核融合炉に必要な基幹技術の革新的な進歩が達成された。

（3-1）大型の超伝導・低温システムの長期間安定運用の実証

LHD は、世界的に例の少ない大型の超伝導・低温システムを有し、これを 24 年にわたり安定的に運用し、通算稼働率は 99 % を達成している。この長期運転に関する詳細な時系列が記録されており、将来の大型超伝導・低温システム（水素を冷媒とする高温超伝導システムや水素貯蔵システムを含む）のメンテナンスおよび自動化（AI 化）にとって比類ない基礎データが得られた。

（3-2）負イオン源を用いた中性粒子ビーム加熱装置の開発

プラズマの主加熱装置として、先進的な水素負イオン源を用いた高エネルギーの中性粒子ビーム入射装置（N-NBI）を開発し、世界に先駆けて実用化に成功した。世界最高の負イオン電流密度（340 A/m²）、ビーム発散角（5 mrad）および随伴電子電流比（0.25）を同時に実現した。ITER のプラズマ加熱は、LHD によって開発されたこの技術によって計画されている。

（3-3）高時空間分解能計測システムの開発

超高温プラズマの内部で起こる様々な複雑現象を透視し分析するために、世界トップの時空間分解性能をもつ計測装置群（荷電交換分光計測、トムソン散乱計測、 μ 波反射計では世界一の時空間分解能を達成）を開発した。これによって、超高温プラズマの内部で発生する乱流の物理機構の解明で世界をリードする成果がもたらされた。

学際的な波及

学際的な連携に力を入れ、核融合分野を超えたプラズマ物理の応用でも成果があがった。

（4-1）重元素の原子過程データの構築研究

重元素の原子過程の理解は、高エネルギー天体の観測データを解釈するために必須であるが、極めて複雑な量子プロセスであるために、実験データベースを構築して現象論的モデルと比較する必要がある。LHD は高温プラズマを安定的に長時間閉じ込める能力があり、これを用いて重元素の多価イオンを生成し、多くの新データを得てデータベースの拡充とモデルの改善に寄与した。

（4-2）オーロラ観測への展開

LHD で開発した超多チャンネル分光カメラをオーロラの観測に応用し、オーロラのスペクトルの時空間計測から磁気圏で生起する粒子加速のダイナミクスに迫る共同研究が始まった。この研究を通じて、核融合プラズマと磁気圏プラズマに共通の物理過程が明らかになることが期待される。

（4-3）オープンサイエンス

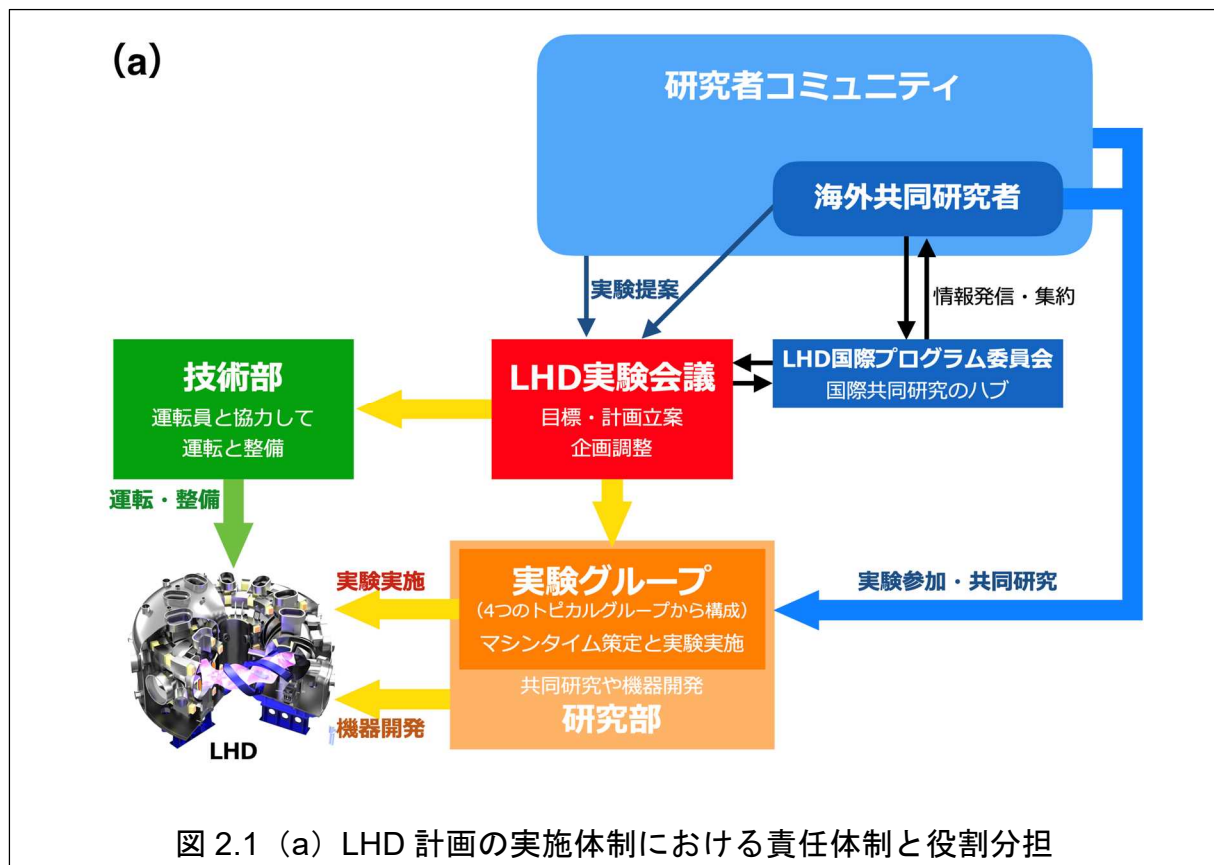
核融合プラズマの実験は「ビッグデータ」を生産し、その中には予期しない物理法則が潜んでいる可能性がある。データを公開することで、他分野の研究者も含む、多くの研究者の多角的な視点からの分析が可能となり、大きな発見につながることを期待される。また、シミュレーション研究との連携で、データ同化や生成 AI に活用することもできる。LHD プロジェクトは、世界に先駆けてデータの完全オープン化を進め、オープンサイエンスの先導的役割を果たしている。

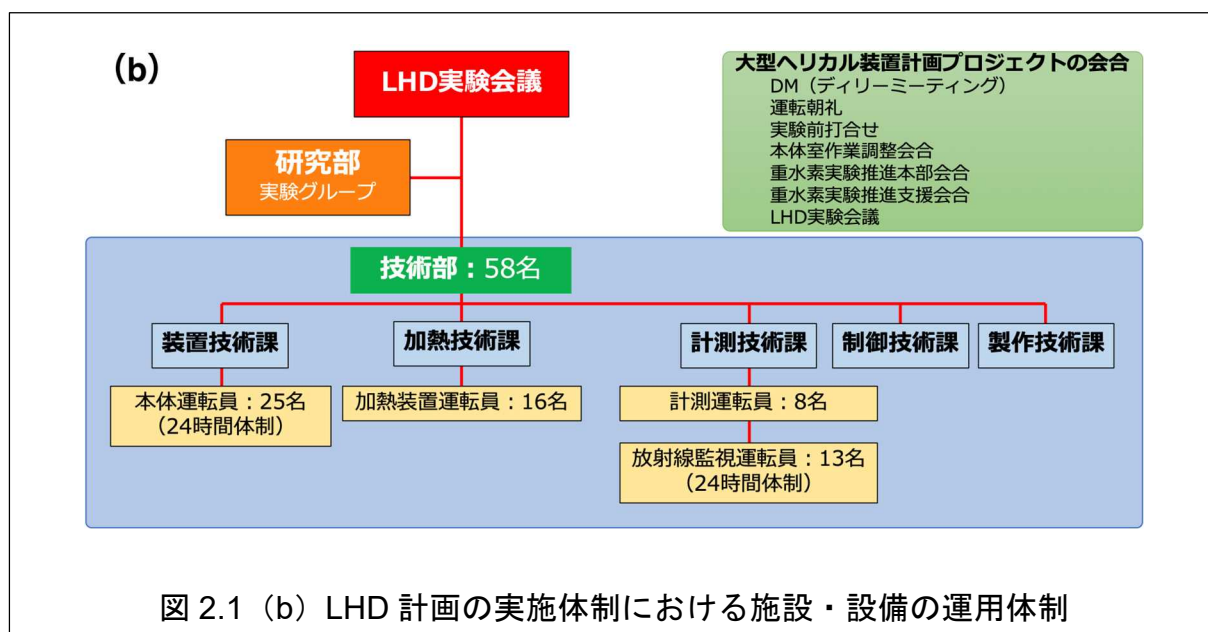
2. 実施体制（国内外の連携体制等）

2-1. 国際的な共同研究体制

本研究計画は、大学共同利用機関である NIFS が実施責任機関として、全国の大学・NIFS、海外の学術協定締結機関（6 つの二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）と幅広く連携して推進された。本研究計画の実施体制を図 2.1（a）に示す。

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」において総合的な企画・調整が行われる。具体的な実験計画策定や実験に実施は、研究部の職員と国内外の共同研究者から構成される実験グループが担った。実験グループは 4 つのトピックスで領域を分けており、研究の進展に伴って、トピックスの見直しを行った。各トピカルグループのリーダーもしくはアドバイザーとして、広く国内外の研究者が参画する体制をとり、共同研究者の希望を実験計画に迅速に反映できる環境を整えてプロジェクトを推進した。2017 年度には、国際共同研究をより活性化させるために「LHD 国際プログラム委員会」を設置した。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・集約するシステムを構築した。英語の Web ページによる実験提案を可能とし、特に海外の研究者が年度途中からでも実験提案をできるようにした。covid-19 の感染拡大による共同研究実施への悪影響を克服するために、2020 年から遠隔実験体制の整備と実験データのオー

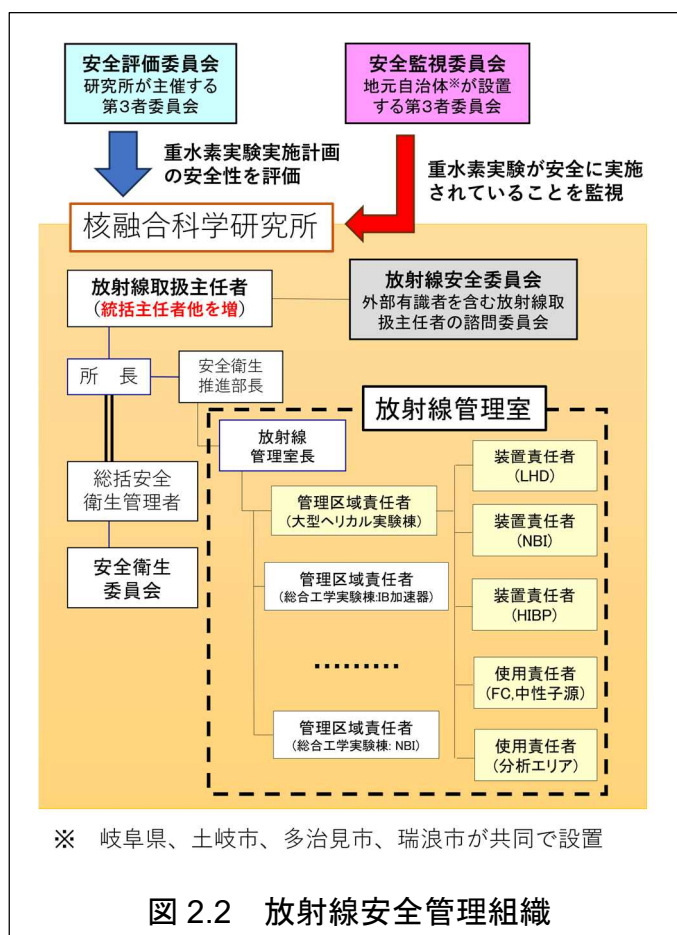




ブンサイエンス化に取り組んだ。これらは国際共同研究の機会拡大に大きな効果をもたらし、本計画開始当初は 5 % 程度だった外国人共同研究者割合が大幅に増加し、最終年度には 38 % にまで増加した。(『4-6-2. 共同利用の状況』 参照)

2-2. LHD の装置運用体制

LHD の運転と整備は、LHD 実験会議の責任の下、技術部が運転員と協力して実施した(図 2.1 (b) 参照)。重水素実験は、中性子およびトリチウム^{*}の発生を伴うため、厳格な安全管理体制を構築して実施した(図 2.2)。NIFS の放射線安全管理を強化するために、新たに放射線障害防止法^{*}(現「放射性同元素等規制法」)に基づいて設置される管理区域(以下、「放射線管理区域」という)に対して、それぞれに責任者を配置した。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、装置の安全な運転および放射線の安全管理を行った。さらに、NIFS 全体の総合的な放射線安全管理を強化するために、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



放射線管理業務に対する指導を行う体制を敷いた。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 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える体制を敷いた。さらに、不測の事態に備えるために、NIFS の職員による通年の宿日直体制を敷き、2017 年 3 月から、本プロジェクトの「年次計画」が終了した 2023 年 3 月末まで継続した。LHD 重水素実験に係る放射線の管理状況は年報としてまとめ、ホームページ (https://www.nifs.ac.jp/j_plan/j_003.html) にて公表している。

以上のような安全管理に対する取り組みにより、地域社会から核融合研究に対する信頼と支持を得ることができ、本計画を順調に遂行することができた。さらに、核融合研究の意義を全国的に幅広く発信する取り組みによって、核融合技術の社会実装に向けた国民の信頼醸成に貢献した（図 2.3）。また、放射線や放射化物の取扱いや安全管理の実践は、若手研究者および技術職員の人材育成の場となった。

- 毎年夏に市民説明会を開催（2006年度から）
 - ・重水素実験の安全性と安全管理計画について説明（延べ 5,900名の参加者）
- 市民学術講演会の開催（年 2 回）
 - ・科学技術一般に関する講演と核融合研究の意義・研究の進展などの講演
- 研究所一般公開（毎年開催，コロナ禍中はオンライン開催）
 - ・重水素実験質問コーナーを設けて、重水素実験に対しても丁寧に説明（1998年以降，延べ 53,800名が来所）
- Fusion フェスタ in Tokyo
 - ・核融合研究について広く社会・国民に知ってもらうために東京で開催
 - ・講演会と科学・工作教室等で構成し、平成22年より毎年開催（コロナ禍により2020年度より休止）
- 随時の見学受付（2022年度 2,177名）
 - ・研究所スタッフがLHDに関連する施設を案内
- X（旧ツイッター）、フェイスブックを活用した情報発信など
 - <https://twitter.com/NIFSplasma>
 - <https://www.facebook.com/NIFSplasma>



市民説明会の様子
（2022年度）



市民学術講演会
ポスター



Fusionフェスタの様子

図 2.3 核融合研究の意義を幅広く発信する取り組み

3. プロジェクト計画（研究、施設整備に関する当初計画、財務状況報告）

大規模学術フロンティア事業の年次計画は、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、および、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を目的として掲げ、プラズマ性能（イオン温度や保持時間）の向上とともに、超高温プラズマの高分解能計測によるプラズマの特性解明を総合的に実施するものとして策定された。特に、LHD にとって新しいテーマとして同位体効果の研究を行うため、重水素ガスを実験に使用した超高性能プラズマを計画した。これを国際共同研究として実施するために、国内外の共同研究・連携体制を強化するとともに、安全管理体制の強化も含めた組織と施設の整備がなされた。

(1) 建設および運用計画

準備期間：1989 年度から 1990 年度まで（装置試作）

建設期間：1990 年度から 1997 年度まで（8 年計画）

運用期間：1998 年 3 月のファーストプラズマ以降 2022 年度まで

(2) 資金計画

建設費：621 億円

（内訳）

準備期（1989 年度から 1990 年度）	21 億円	} ※初期建設費：507 億円
建設期（1990 年度から 1997 年度）	486 億円	
運用期（1998 年度から 2012 年度）	98 億円	
運用期（2013 年度から 2022 年度）	16 億円	

運転経費・実験経費：1,370 億円

（内訳）

建設期（1990 年度から 1997 年度）	111 億円
運用期（1998 年度から 2012 年度）	848 億円
運用期（2013 年度から 2022 年度）	411 億円

※ 財務状況の詳細については別添の様式 C-1 を参照。

(3) 科学目標の達成に向けた計画

フロンティア事業の年次計画では、(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、および (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、を掲げた。特に(1)に関連して、LHD にとって新しいテーマとして同位体効果の研究を行うため、重水素ガスを用いたプラズマ実験を計画し、これによって核融合炉に匹敵す

る超高性能プラズマを実現し、国内外の共同研究や連携体制を強化して、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、核融合に係る学理の探究とその体系化を図ることを目指した。

2021 年度からは、国際的な研究動向と本研究プロジェクトの進捗状況を考慮して、科学目標の見直しを行い、装置方式によらない核融合プラズマの一般的な理解、さらに宇宙・天体の現象にも通底する基礎物理の解明を目指した実験研究に重点を置いた研究によって、核融合科学の学際的展開に力を入れた。

これらの研究成果の詳細については、「4-1. 研究の達成状況」で説明する。

(4) 計画の進捗評価

- 第 1 回

2013 年(平成 25 年)9 月 6 日

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」
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

https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1341203.htm

- 「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」という評価を得た。

- 第 2 回

2016 年(平成 28 年)8 月 23 日

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」
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

https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1378314.htm

- 「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」という評価を得た。

- 第 3 回

2018 年(平成 30 年)8 月 30 日

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」
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

https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1409197.htm

- 「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」という評価を得た。

(指摘された留意事項に対する対応については、4-5 節を参照)

4. プロジェクト計画の達成状況

4-1. 研究の達成状況

(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)

本プロジェクトでは、先ず将来の核融合炉を見通せるパラメタ領域（すなわち、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できる超高温プラズマの物理特性を研究できる 1000 秒を超えるプラズマ保持時間）を実現することが必須の条件であり（4-1-1 項）、そのパラメタ目標を達成した後に、核融合炉の性能を支配するプラズマ乱流や突発現象の物理的機構を明らかにすること（4-1-2 項）、核融合炉に必要な要素技術を開発すること（4-1-3 項）、さらにこれらの成果を学際的な視点から捉えて一般化すること（4-1-4 項）に取り組み、所期の計画以上の成果をあげた。

4-1-1. 数値目標の達成

(1) 高温プラズマの生成

核融合反応によるプラズマの燃焼維持のためには、1 億度以上のプラズマを生成する必要がある。LHD では、従来の実験で使用されてきた 3 本の接線入射する高エネルギー（ビームエネルギー：180 keV）の NBI（中性粒子ビーム入射装置）に加えて、2005 年に、磁力線に対して垂直方向に入射される低エネルギー NBI（140 keV）を増設、さらに 2010 年には同様の垂直入射 NBI が増設された。これらの低エネルギー垂直 NBI は主にイオンを加熱することができるため、垂直 NBI の導入以降、オペレーションの最適化とあわせて、年々、到達イオン温度が上昇してきた。2011 年には、ICRF（イオンサイクロトロン共鳴周波数帯の電磁波）を用いた真空容器壁のコンディショニング法の導入で、NBI でプラズマ中心領域を効率良く加熱することが可能となり、到達イオン温度領域がさらに拡大した。その後の実験で、ECH（電子サイクロトロン加熱）を用いた真空容器壁のコンディショニングでも、同様な効果が得られることがわかった。図 4.1 に LHD の到達温度領域が年毎に拡大してきた履歴を示す。

2017 年に開始された重水素実験では、垂直 NBI の加熱電力が 6 MW か

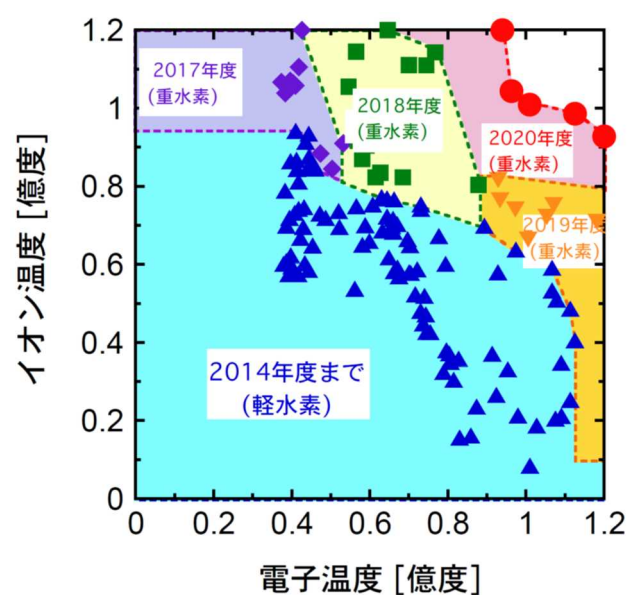


図 4.1 本プロジェクト期間中に達成された電子温度－イオン温度領域

ら 9 MW に増強され、合計で約 33 MW の NBI による加熱が可能となった。2017 年の重水素実験では、この大電力 NBI によるプラズマ加熱と、「同位体効果」と呼ばれるイオン質量の違いによる閉じ込めの改善によって、イオン温度 1 億 2 千万度を達成した（図 4.2）。

このような高いイオン温度が得られる放電では、しばしば高速イオンが引き起こす不安定性が発生し、プラズマ中の高エネルギー粒子が吐き出しとともにイオン温度が低下する現象が観測された。この現象は、定常性を阻害する突発現象として興味深い研究対象となり、位相空間の歪みによる無衝突エネルギー移送の研究につながった。（4-1-2.（5）参照）

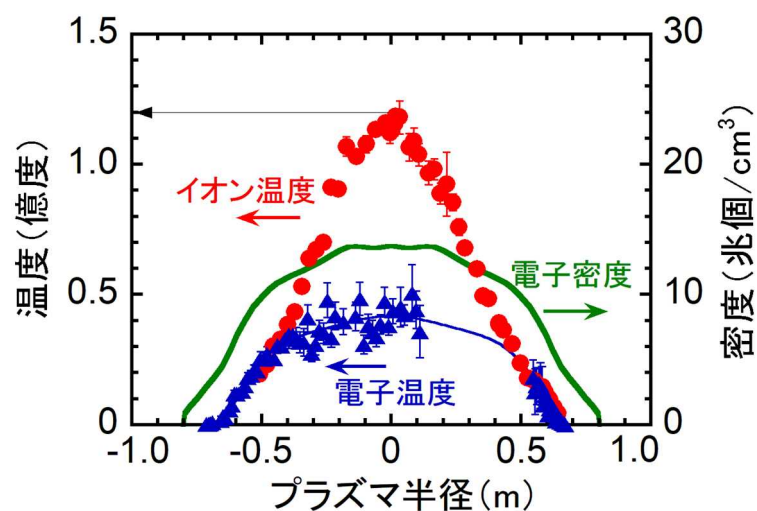


図 4.2 LHD においてイオン温度 1 億 2 千万度を達成したプラズマの温度分布と密度分布

(2) 高温プラズマの定常保持

核融合炉の実現のためには、高温プラズマを安定的に定常保持することが必要となる。定常実験の重要性は認識されているが、定常実験は実験装置に課せられる要求が非常に高度なため、世界の主な核融合プラズマ実験は、主に 10 秒程度の短パルスのプラズマ放電を用いて高温プラズマを閉じ込める研究が進められている。短い放電時間の実験においても、真空容器の内壁の状態が高性能プラズマを達成するのに非常に重要な役割を果たすことがわかっているが、真空容器の内壁の状態の変化の時間スケールは数 100 秒から数 1000 秒と長いために、1000 秒を超える長時間放電を用いた研究が重要となる。超伝導による定常外部磁場コイルのみでプラズマ閉じ込め磁場を生成することができ、本質的に安定な定常放電が可能な LHD は、長い時間スケールを持つプラズマ物理の解

明に貢献する高いポテンシャルを有している。

加熱機器を大電力で長時間運転するための改造および増強、プラズマ運転時の熱と粒子制御等、定常運転に欠かせない様々な研究を進め、2013 年度の実験において、2300 万度の高温プラズマを約 48 分（約 3000 秒）保持することに成功した。図 4.3（左）はプラズマ加熱電力と保持時間で見た定常運転達成領域を示す。プラズマへの総注入エネルギー（電力×時間）が 3.4 ギガジュールに達しており、他の実験装置では到達し得ない領域での実験を可能としている。図 4.3（右）に放電波形を示す。熱と粒子の制御によってプラズマの温度や密度は 48 分にわたってほぼ一定の値を示している。一方で、プラズマに出入りする粒子束（ Γ ）は変化し続けており、プラズマと真空容器の内壁との相互作用は常に変化し続けていることが明らかになり、定常放電におけるプラズマと材料の相互作用に関する研究を推進することの重要性も示唆されている。

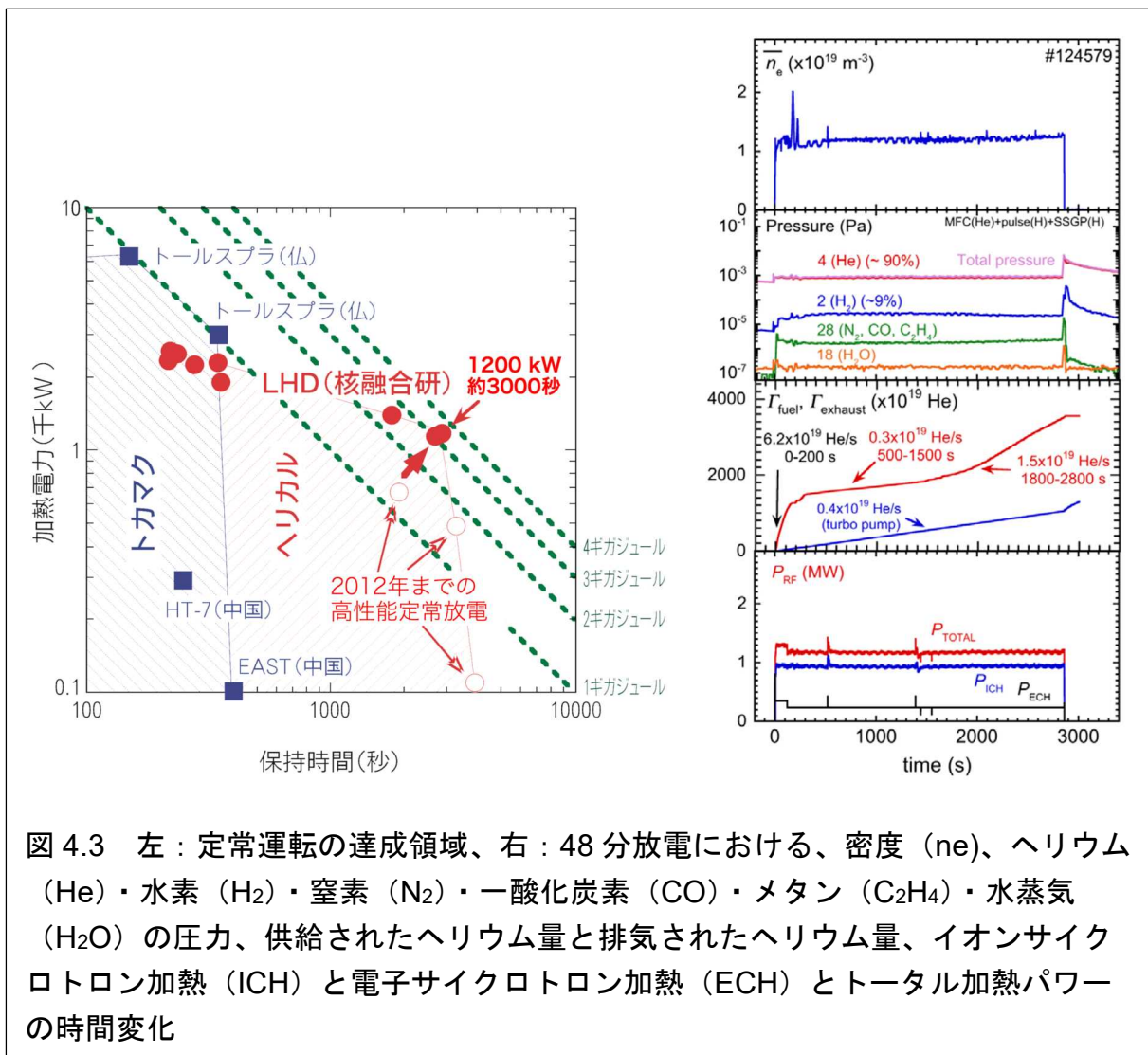
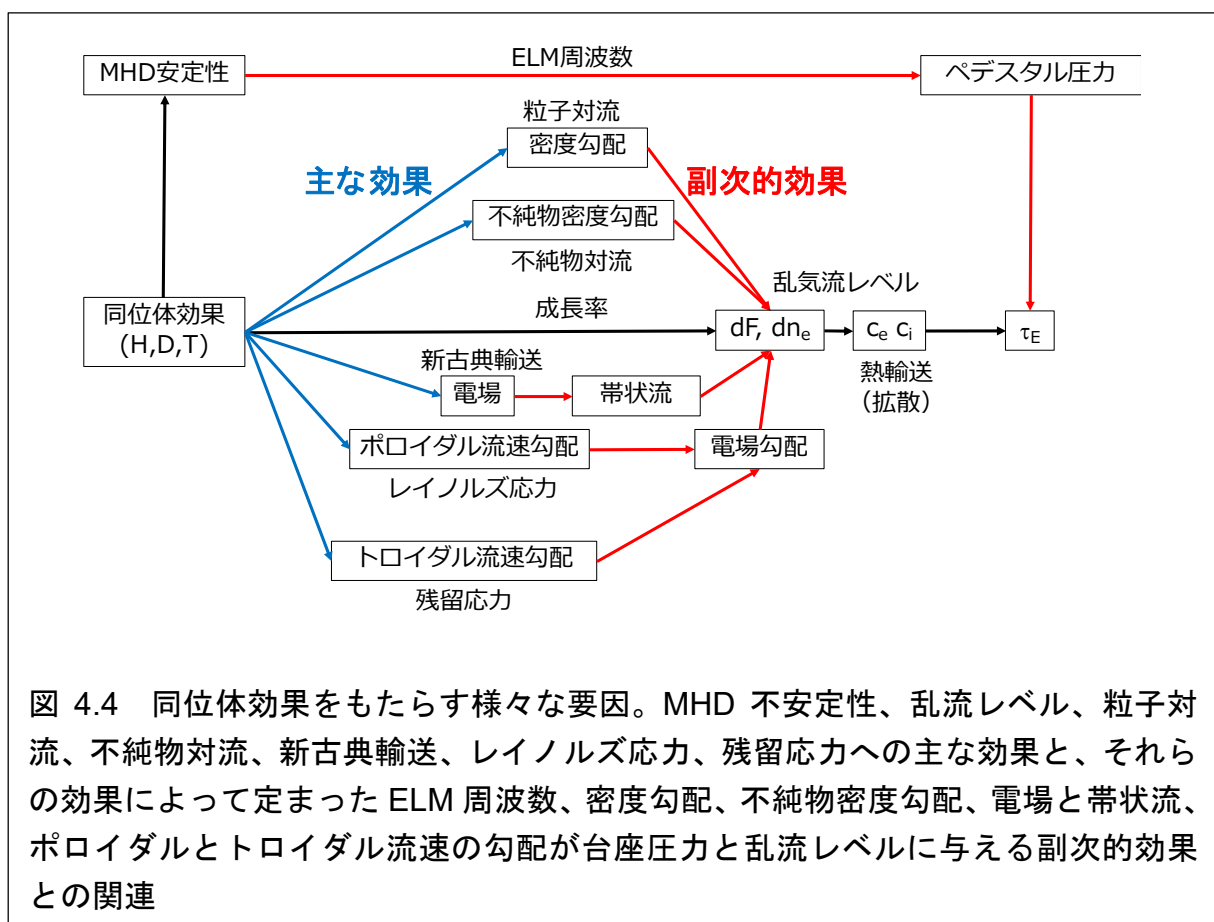


図 4.3 左：定常運転の達成領域、右：48 分放電における、密度（ n_e ）、ヘリウム（He）・水素（H₂）・窒素（N₂）・一酸化炭素（CO）・メタン（C₂H₄）・水蒸気（H₂O）の圧力、供給されたヘリウム量と排気されたヘリウム量、イオンサイクロトロン加熱（ICH）と電子サイクロトロン加熱（ECH）とトータル加熱パワーの時間変化

4-1-2. 科学の新しい発見

(1) 同位体効果の解明

同位体効果の研究においては、単に質量が異なる水素同位体のプラズマ性能を比較するのではなく、同位体によるプラズマ閉じ込め性能の違いを生み出す素過程を解明した。その結果、質量の違いが熱輸送、粒子輸送、運動量輸送、ペデスタルの安定性に与える直接の影響（1次効果）と粒子輸送や運動量輸送を通じて決定された密度分布や速度分布の変化が熱輸送に与えた影響（2次効果）が複雑に絡み合っていることを明らかにした。この素過程の組み合わせ（図 4.4）により、同位体効果に複雑性と多様性が生まれることを突き止めた。【Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 185001 & Rev. Mod. Plasma Phys. 7 (2023) 23.】



(2) 乱流による同位体混合

核融合反応を効率良く起こすためには燃料である水素同位体を 1:1 に混ぜる必要がある。同位体の混合とプラズマの中に発生した乱流のサイズとの関連を明らかにし、同位体が混ざり合う物理機構を明らかにした。

本研究では、軽水素と重水素の混合プラズマにおける 2 つの密度比を得るために、高

速の粒子ビームをプラズマに入射して、プラズマから発せられる光の波長分布を分析する方法（バルク荷電交換分光法※）を用いた。これまで困難とされていた、波長の差が極めて小さい軽水素と重水素から発せられる光を分離する手法を開発し、水素同位体の密度比を求めることに成功した。図 4.5 に示すようにイオン温度勾配に起因する乱流 (ITG) が支配的な場合は、乱流のサイズが大きいため同位体混合が生じやすく、捕捉電子に起因する乱流 (TEM) が支配的な場合は乱流のサイズが小さいため同位体混合が生じにくいことを明らかにした。この研究成果は、いかに核融合反応の効率を上げるかという課題に対して、将来の核融合炉の運転に大きな指針を与えた。【Phys. Rev. Lett. 124 (2020) 025002.】

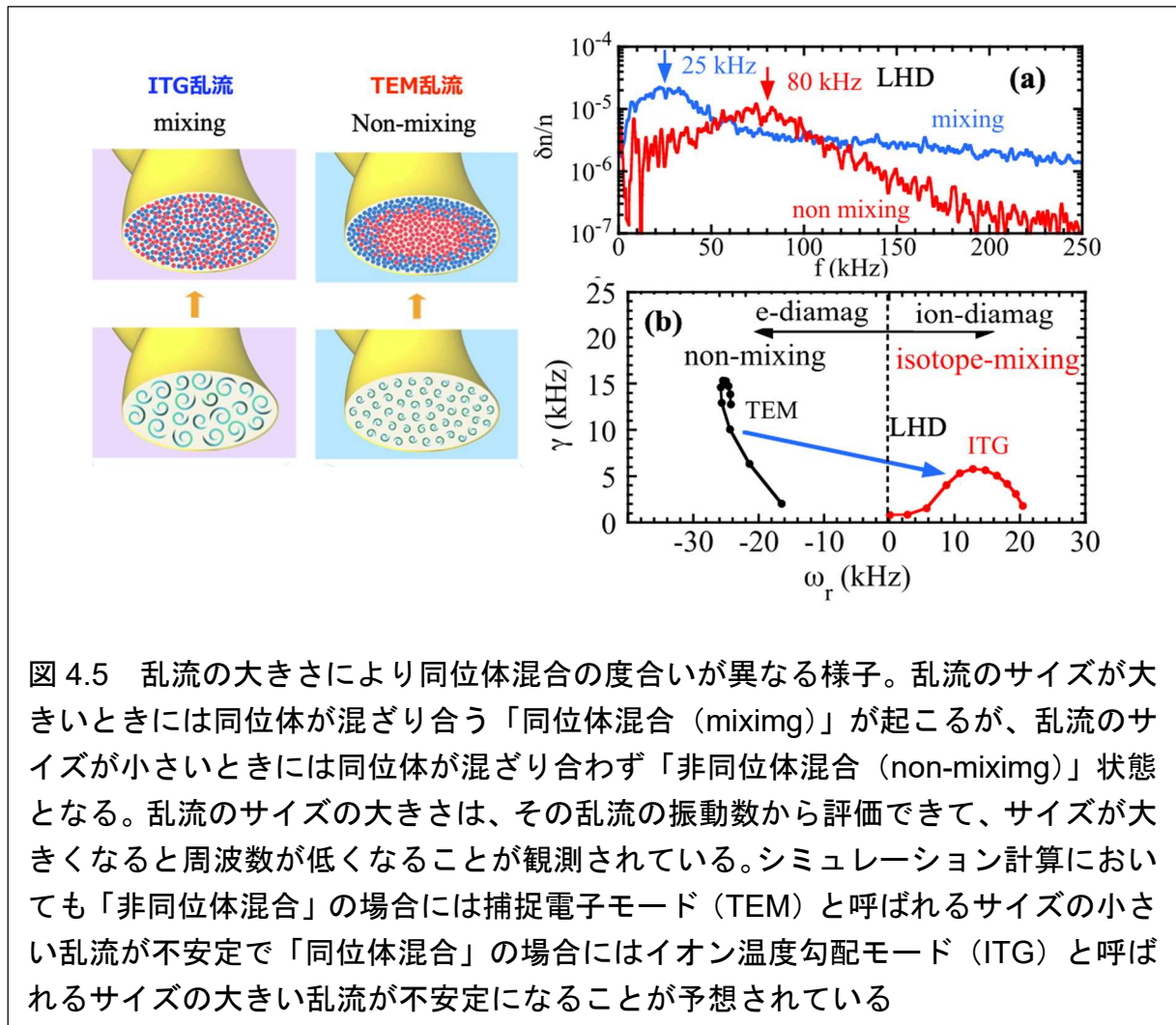


図 4.5 乱流の大きさにより同位体混合の度合いが異なる様子。乱流のサイズが大きときには同位体が混ざり合う「同位体混合 (mixing)」が起こるが、乱流のサイズが小さいときには同位体が混ざり合わず「非同位体混合 (non-mixing)」状態となる。乱流のサイズの大きさは、その乱流の振動数から評価できて、サイズが大きくなると周波数が低くなることが観測されている。シミュレーション計算においても「非同位体混合」の場合には捕捉電子モード (TEM) と呼ばれるサイズの小さい乱流が不安定で「同位体混合」の場合にはイオン温度勾配モード (ITG) と呼ばれるサイズの大きい乱流が不安定になることが予想されている

(3) 「磁場のトポロジー遷移」と「磁場の乱れによるプラズマ流の減衰」(突発現象)

この研究成果は、磁場閉じ込めプラズマの内部磁場の乱れが原因となり、入れ子状の磁場構造が崩壊し、突発的にプラズマの流れが止まってしまうことを見出したものであ

る。これは、トカマクプラズマで見られる電流崩壊現象（ディスラプション）の基礎過程を明らかにしたという点において大きな意義がある。電流崩壊現象を防ぐには、入れ子状の磁場構造の崩壊を早期に検知することが重要であることを示した。

このような突発現象には現象が起こる可能性を高める危険因子（すなわち「要因」）と、突発現象を引き起こす引き金となる「誘因」がある。この突発現象の有無（起こるか起こらないか）はその「要因」が解明されれば、ある程度の確実性をもって予想できるが、時期（いつ起こるか）についての予測はその「誘因」の解明が必要である。要因の研究は多くの装置で行われているが、誘因の研究がまだ手付かずの状態である。LHD ではこの突発現象の誘因を明らかにする研究を行い、定常維持の実現に必要な「要因」と「誘因」からなる物理モデルを構築した。

この研究は学際的視点から見ると、突発現象の物理機構の解明につながるものであり、日本物理学会主催の「突発現象の科学」シンポジウム（2018 年 3 月）の開催につながる等、学際化が進んでいる。【New Journal of Physics 15 (2013) 013061 & Nature Communications 6 (2015) 5816.】

(4) 「乱流の干渉」「乱流伝播」とそれによってもたらされる「非局所輸送」

この研究成果は、プラズマ中で発生した大きなサイズの乱流が小さなサイズの乱流と相互作用をすることで、プラズマ中の離れた場所の乱流が干渉し合うという現象「乱流の干渉」と、プラズマ中で発生した乱流がその場所に留まらずに他の場所に伝播するという現象「乱流伝播」を見出したものである。これはプラズマの閉じ込め性能が、狭い領域の温度勾配と熱流束の関係で決定されるという従来の概念の「局所輸送」から、プラズマ全体の温度勾配と熱流束の関係で決定されるという「非局所輸送」へのパラダイムシフトをもたらした。これにより、今まで「局所輸送」では説明できなかった様々な現象の物理機構が明らかになり、核融合の制御に関する基本的指針が得られた。核融合に関わる一つの応用例としては、図 4.6 に示すように、プラズマを閉じ込めている磁場に揺らぎを発生させると、プラズマ中の乱流が伝播するとともに、装置内壁の熱負荷が大幅に減ることを LHD において発見した。学際的観点からは、磁場中の乱流物理を明らかにしたという点から、太陽プラズマ・天体プラズマにおける乱流の重要性を指摘した。

【PhysRevLett_107 (2011) 115001, Nucl Fusion 55 (2015) 013022, Phys. Rev. Lett. 128 (2022) 125001 & Rev. Mod. Plasma Phys. 6 (2022) 2.】

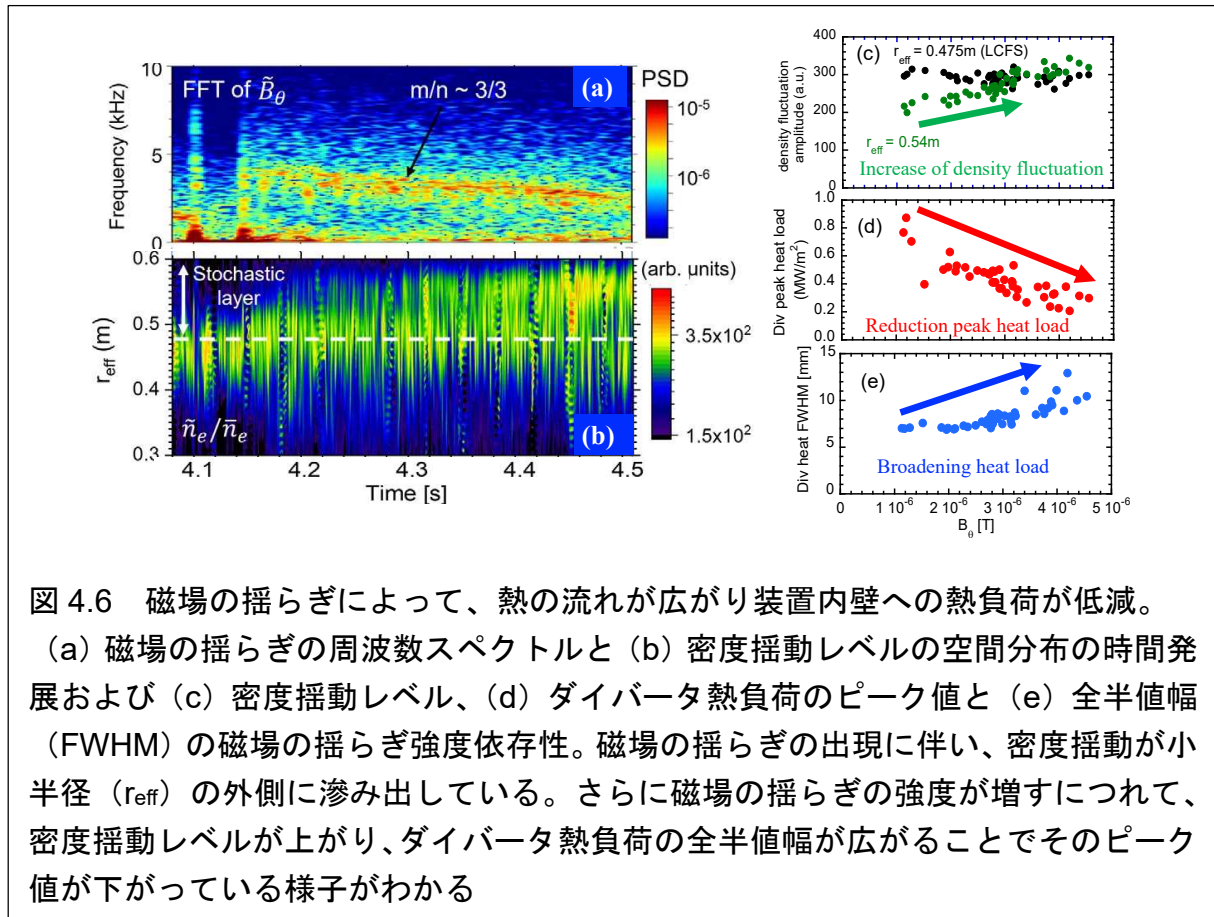


図 4.6 磁場の揺らぎによって、熱の流れが広がり装置内壁への熱負荷が低減。

(a) 磁場の揺らぎの周波数スペクトルと (b) 密度揺動レベルの空間分布の時間発展および (c) 密度揺動レベル、(d) ダイバータ熱負荷のピーク値と (e) 全半値幅 (FWHM) の磁場の揺らぎ強度依存性。磁場の揺らぎの出現に伴い、密度揺動が小半径 (r_{eff}) の外側にしみ出している。さらに磁場の揺らぎの強度が増すにつれて、密度揺動レベルが上がり、ダイバータ熱負荷の全半値幅が広がることでそのピーク値が下がっている様子がわかる

(5) 無衝突エネルギー移送

この研究成果は、プラズマ中に存在する高エネルギー粒子のエネルギーがバルクプラズマに、電磁波を介して移送されるという現象の発見である。電磁波によるプラズマの加熱プロセスを捉えるために、高速の粒子ビームをプラズマに入射して、プラズマから発せられる光の波長分布からプラズマ粒子の速度分布※を、10 キロヘルツ（1 秒間に 1 万回）の時間分解能で計測する方法（高速荷電交換分光法）開発した。図 4.7 に示すように、電磁波の発生に伴い、プラズマ中の粒子が加速されることによって速度分布の歪みが生じ、緩和してゆく過程を直接観測した。従来の粒子同士の衝突によって熱が運ばれる「衝突エネルギー移送」の概念と一線を画するものである。これは、核燃焼プラズマで発生した高エネルギー粒子が「衝突エネルギー移送」だけでなく、「無衝突エネルギー移送」というプロセスを加えることにより定常維持で容易になることを示唆した。学際的には、磁気圏で起こっている粒子加速を実験室で再現したものとなっており、本研究の学際的意義は大きい。【Commun. Phys. 5 (2022) 228.】

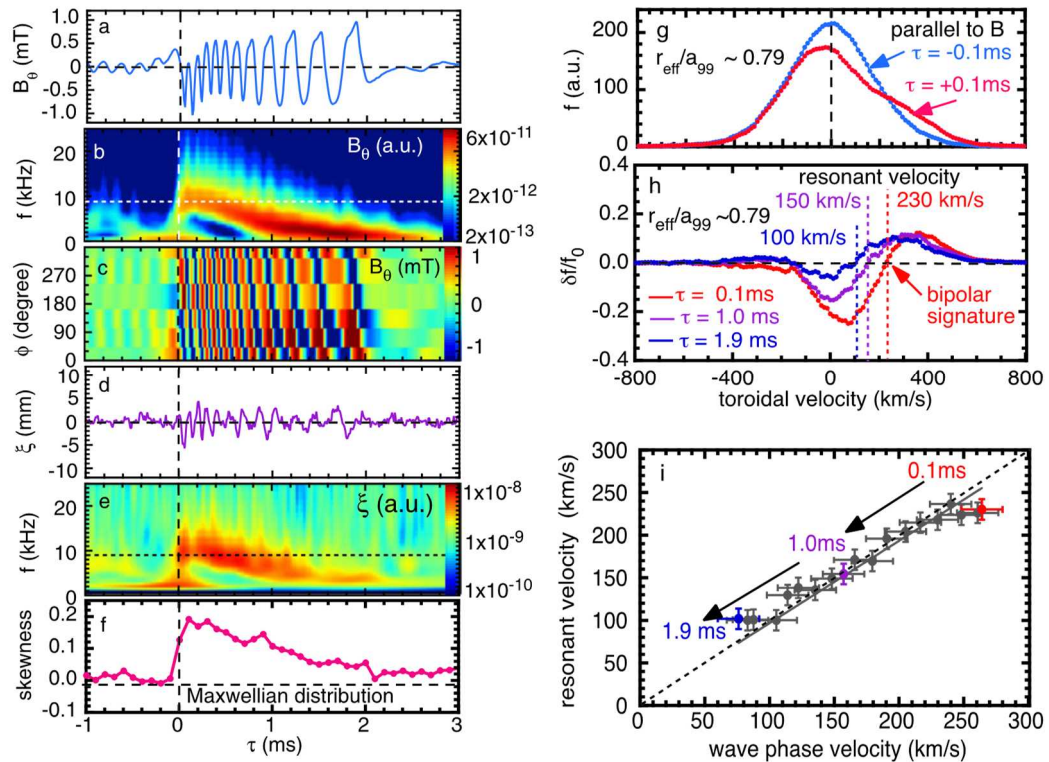


図 4.7 電磁波の発生に伴い生じた速度分布の歪みとその緩和。(a) 電磁波の発生に伴う磁場振動と (b) その周波数スペクトル、(c) モード構造、(d) プラズマの等温度面の揺らぎとその (e) 周波数スペクトルの時間変化、(f) 速度分布の歪度。(g) 電磁波の発生の直前と直後のイオンの速度分布関数の変化と (h) その差分の時間発展。(i) 差分のゼロ点の共鳴速度と電磁波の周波数とモード数から評価した波の位相速度との関係。速度分布関数の差分のゼロ点から得られた共鳴速度と波の位相速度がよく一致していることから、ランダウ減衰と呼ばれる波と粒子の相互作用が起こっていることがわかる

(6) 先進燃料を使った核融合反応の実証

この研究は軽水素とホウ素 11 ($p\text{-}^{11}\text{B}$) を燃料とした核融合反応の実現を磁場閉じ込め装置内において、世界で初めて実証したもので、米国の核融合スタートアップ企業である TAE テクノロジーズ社との共同研究として実施した。 $p\text{-}^{11}\text{B}$ 核融合反応は、8.68 MeV (メガ電子ボルト) の反応の余剰エネルギー (Q 値) をもち、核融合反応生成物として 3 個のアルファ粒子を生成する。アルファ粒子は真空容器内の構造物において吸収されるため、この反応を主反応とした核融合炉を実現した場合には、炉外に放射線が殆ど発生しない夢のような核融合炉を実現することが可能である。このような炉外放射線の少ない核融合炉は先進核融合炉と呼ばれ、そこで使う燃料を先進燃料と呼ぶ。図 4.8 に示されるように $p\text{-}^{11}\text{B}$ 核融合反応は参照する核反応断面積によって構造や形状が異なるた

め、実際の磁場閉じ込め核融合装置において反応のエネルギー依存性を調べることは将来の先進核融合炉における運転立ち上げシナリオを策定する上で重要となる。LHD は、現在世界で唯一高エネルギーの N-NBI(最大入射エネルギー190 keV)を有するとともにプラズマ中にホウ素を導入する装置を具備するため、 $p\text{-}^{11}\text{B}$ 核融合反応断面積に見られる 150 keV 近傍の共鳴ピークの効果調べることが可能な唯一の装置となっている。

そこで、LHD の N-NBI を用いて実際にプラズマ閉じ込め実験装置の中で $p\text{-}^{11}\text{B}$ 核融合反応を起こし、その反応生成物であるアルファ粒子を計測する実験を世界で初めて実施した。図 4.9 に、その実験の結果を示す。(c) に示されるように $p\text{-}^{11}\text{B}$ 核融合反応で生成されたアルファ粒子の時間変化は、シミュレーションによる予測と実験観測の間に良い一致が見られた。この成果は世界的に高い注目を浴びており、論文発表後 2 週間程度で 1 万 4 千件を超えるアクセスが論文発表サイトにあった。現在は、N-NBI の入射エネルギーを共鳴ピーク近傍で変化させた実験の解析を進め

ており、断面積のエネルギー依存性を詳細に調べた論文の作成を進めている。この共鳴ピークのエネルギー位置は論文によって異なるため、LHD の実験を通して断面積評価に対するインパクトを与えることが可能なため学際的にも非常に重要な成果につながる。

【Nature Comm.14 (2023) 955, Fusion Sci. Technol 78 (2022) 175】

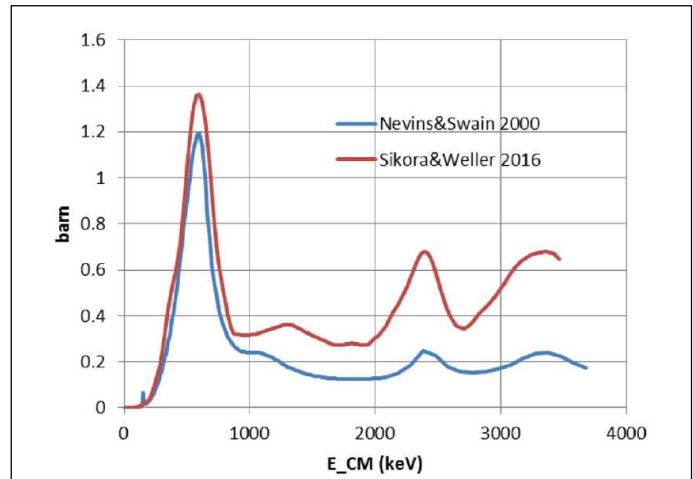


図 4.8 $p\text{-}^{11}\text{B}$ 核融合反応断面積の違い
【Nucl. Fusion 59 (2019) 076018】

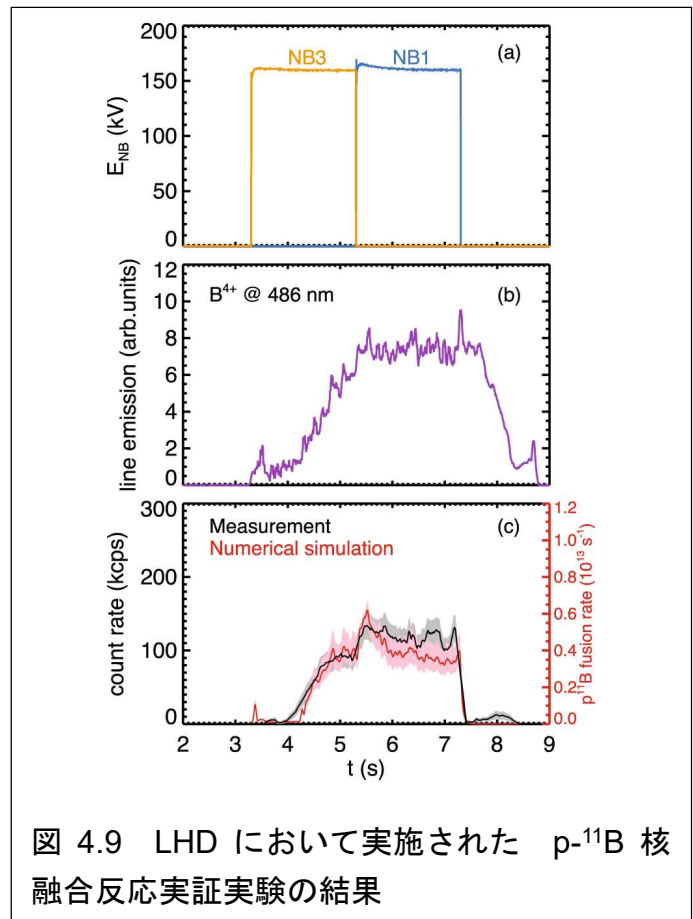


図 4.9 LHD において実施された $p\text{-}^{11}\text{B}$ 核融合反応実証実験の結果

4-1-3. 技術のイノベーション

(1) 大型の超伝導・低温システムの長期間安定運用の実証

表 1.2 でも示したとおり、LHD は世界最大級の超伝導・低温システムである。これまでにない、大型の超伝導・低温システム（図 4.10）を構築し、24 年以上にわたり、合計 10 万時間を超える稼働時間を安定に運用した。この間の通算稼働率は 99 %であった。

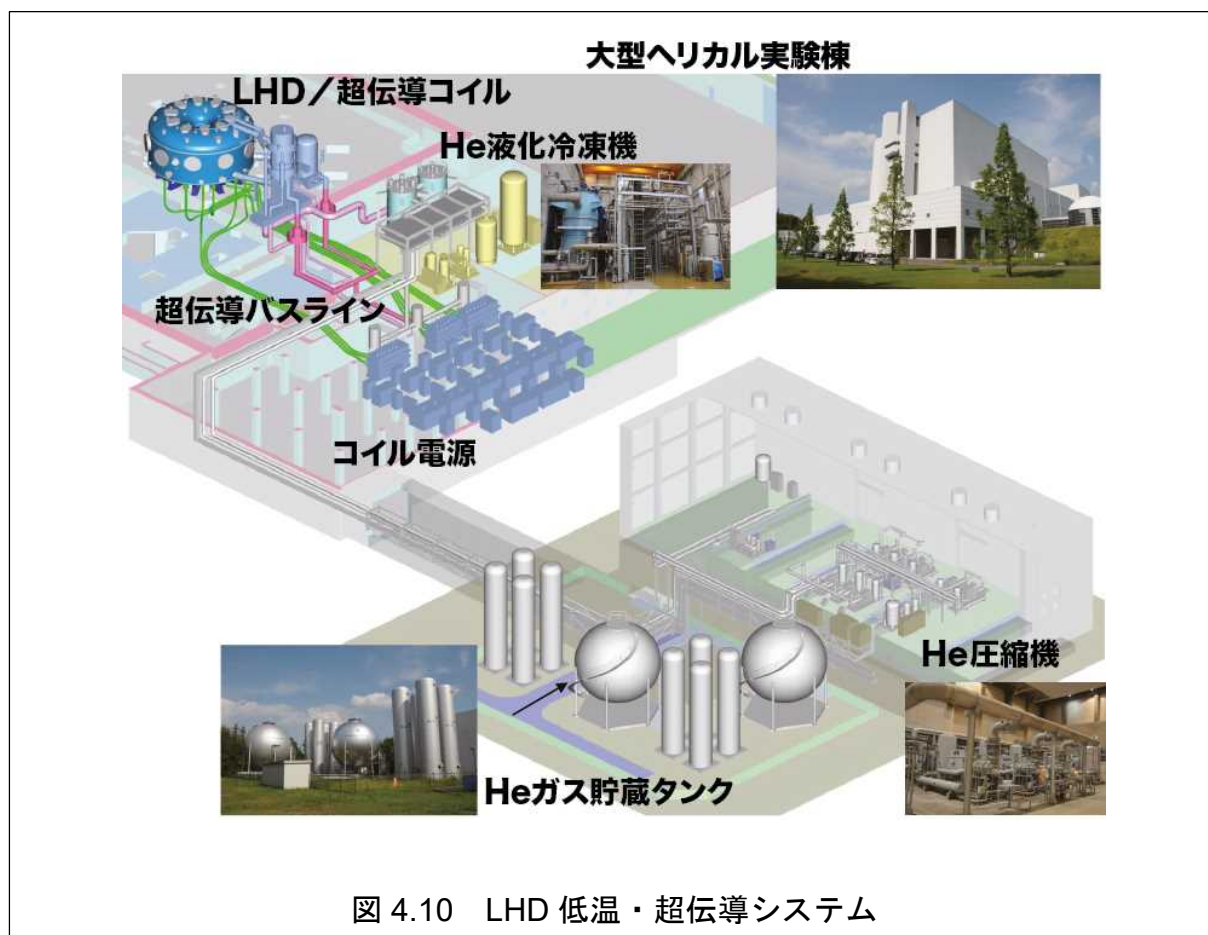
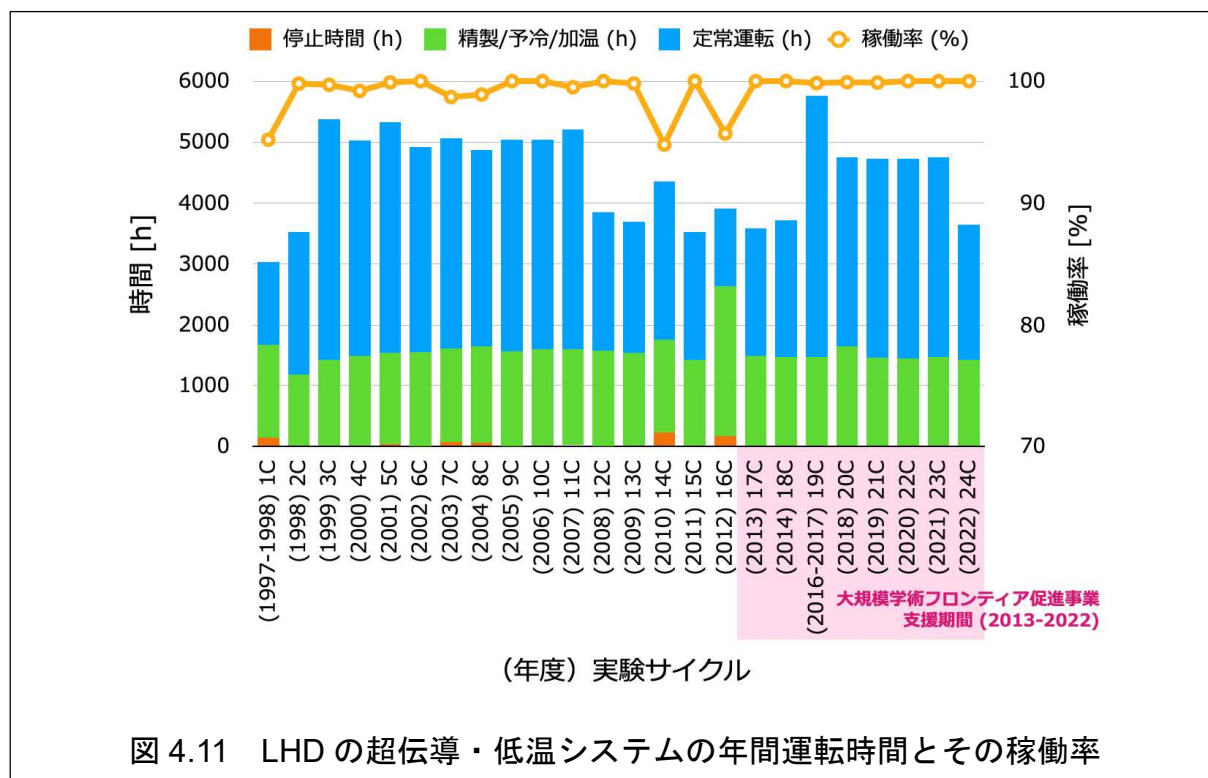


図 4.11 に LHD の超伝導・低温システムの年間運転時間とその稼働率を示す。運転開始後 14-16 年目には老朽化による圧縮機の故障および絶縁部からのヘリウムリークのため、稼働率が 95 %に低下したことから、フロンティア事業の開始にあたり、高信頼化改造を実施した。実施内容は、まず、主圧縮機の冗長化であり、8 台の圧縮機のどの 1 台が故障した場合でもバックアップ可能な冗長化圧縮機を 2 台追加した。次に、低温制御システムの更新であり、システムの簡略化と高信頼化を目的として、旧来の VME コントローラを、コンパクト PCI コントローラ主体のシステムに更新した。これらの高信頼化改造により、フロンティア事業期間中の稼働率は 100 %を維持し、適切なメンテナンス、更新、改造により、長期間にわたり安定な運転を実証した。【Physics Procedia 67 (2015) 77 & IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 28 (2018) 4206004.】



低温システムでは、システムへの熱侵入が重要な課題であるにも関わらず、設置後の熱侵入測定は困難で、大型の低温システムにおいては共通の課題となっていた。LHD においては、システム稼働後に既設の計測器類（圧力計、温度計）のみを用いて、システムへの熱侵入を測定する手法を考案し、その有効性を検証した。また、この手法を用いて LHD 低温システムへの侵入熱を評価し、経年劣化は観測されていないことを示した。

世界に類を見ない大型超伝導・低温システムの安定的な長期運用の実績が高く評価され、ITER 機構からの依頼に基づき ITER クライオプラントの実時間シミュレーションを業務外部委託事業として実施した（2010 年 11 月～2020 年 9 月）。

(2) 負イオン源を用いた中性粒子ビーム加熱装置の開発

LHD では、プラズマの主加熱装置として水素の負イオン源を用いた高エネルギー（最大入射エネルギー190 キロ電子ボルト(keV)）の中性粒子ビーム入射装置（Negative-ion based Neutral Beam Injector: N-NBI）が 3 台、正イオン源を用いた低エネルギー（最大入射エネルギー80 キロ電子ボルト(keV)）の NBI（Positive-ion based NBI: P-NBI）が 2 台稼働しており、高エネルギー粒子の速度分布を様々な形状に制御した実験を行うことができるようになっている。特筆すべきは、先進的な NBI である N-NBI が複数台稼働する世界で唯一の磁場閉じ込め装置であるということである。表 4.1 に示される ITER 用 N-NBI の 3 つの仕様を LHD の N-NBI が同時に実現したこと、ならびに図 4.12 に示され

るように 1998 年からの長期にわたって N-NBI の安定的な運用を実証してきたことが、ITER において N-NBI を採用することに対して大きく貢献した。さらに、負イオンビーム中の随伴電子ビーム割合を下げる研究の過程で、負イオン源プラズマ内に正イオンと負イオンから形成されるイオン性プラズマという、学術的にも極めて興味深いプラズマが実現されていることを世界で初めて見出した。このような LHD における N-NBI の長年にわたる安定的な運用の実証、ITER の仕様を凌駕する性能の実現、および負イオン源プラズマ内におけるイオン性プラズマの発見等の成果は国際的にも高く評価されており、2016 年 9 月に負イオン源研究で最も権威のある国際会議（NIBS）において、LHD の負イオン源 NBI 研究チームに対して 2016 NIBS award が授与された。また、ITER 機構の依頼に基づき、ITER 用負イオン源で懸案事項となっているビーム発散角劣化の原因調査と性能向上に関する受託研究を 2021 年 7 月より実施している。さらに、JA-DEMO の検討を主として進める量子科学技術研究開発機構（QST）との N-NBI の性能向上に関する共同研究を 2022 年度より実施している。

表 4.1 N-NBI に対する ITER の仕様と LHD での達成値

	ITER	LHD
電流密度 (J_H) [A/m^2]	> 260	340
ビーム発散角($\theta_{div.}$) [mrad.]	3-7	5
随伴電子電流割合(I_e/I_H)	1	0.25

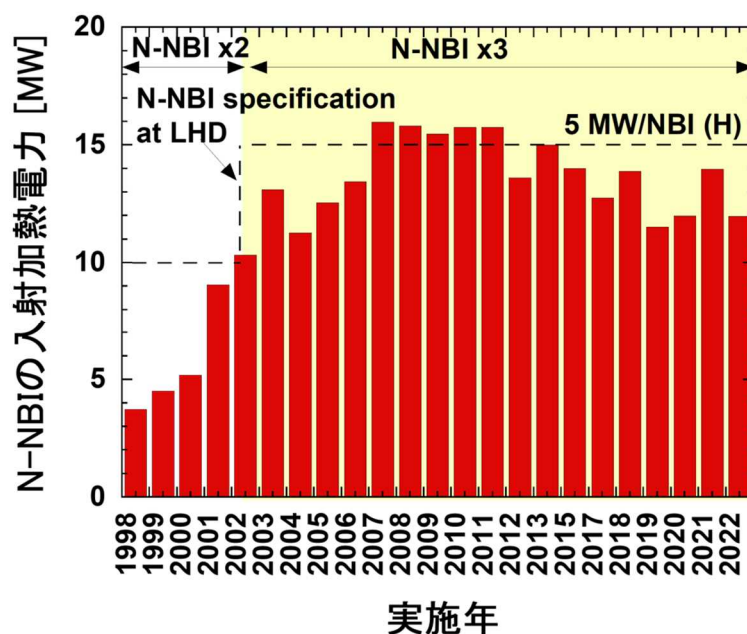


図 4.12 LHD における N-NBI による最大入射電力の変遷

P-NBI については、重水実験開始にあわせてビーム入射エネルギーを増加させ、その加熱電力を 6 MW から 9 MW に増加させる改造を実施した。その結果、仕様を上回る 10 MW 以上の加熱電力を実現した（図 4.13）。

【Rev. Sci. Instrum. 87 (2016) 02B936, New Journal of Physics 15 (2013) 103026, Journal of Instrum. 11 (2016) C03018, Rev. Sci. Instrum. 87 (2016) 02B103, Nucl. Fusion 62 (2022) 042019, Nucl. Fusion 62 (2022) 056016, IEEE Trans. Plasma Sci. 46 (2018) 2324 】

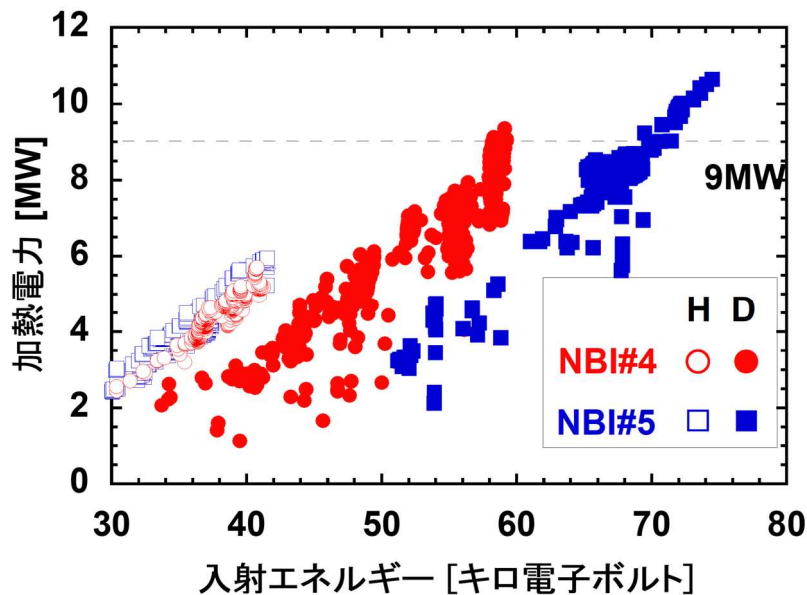


図 4.13 重水素実験に伴って行った P-NBI (NBI#4, #5) の入射エネルギー増強改造に伴うによる最大入射電力の増加

(3) 高時間分解能計測システムの開発

- 高速荷電交換分光計測の開発

荷電交換分光はイオンの速度空間分布からイオン温度やプラズマの流速を算出する計測器として広く使われている。核融合プラズマでは粒子の衝突頻度が大きいので、イオンの速度空間分布は緩和してマックスウェル分布と呼ばれる分布となっている。近年、緩和する前の分布（マックスウェル分布からのずれ）がプラズマの閉じ込めを決める上で、重要であることが指摘された。緩和する前に、イオンの速度空間分布を計測するためには、衝突時間よりも短い高時間分解能（10 kHz）の計測が必要となる。この高時間分解能を達成するために、レンズを使った分光器、映像増強管、高速カメラからなる高

速荷電交換分光計測の開発を行った。この超高速の分光システムは世界に類のないものであり、今後、プラズマの閉じ込めを決める物理機構を研究する際には不可欠な計測器と考えられる。

- 高速トムソン散乱計測の開発

トムソン散乱計測は、強力なレーザー光をプラズマに入射し、その光が電子に衝突するときに発生する「散乱光」からプラズマの電子温度や密度等を計測する手法であり、プラズマ実験では広く利用されている。LHD では、数年間の基礎的な検討を経て、2017 年からウィスコンシン大学マディソン校との国際共同研究プロジェクトとして、最大 20 kHz で計測可能なトムソン散乱計測装置を開発した。

新計測システムの鍵となる技術は、強力な光を高速で何度も繰り返し発生することのできるレーザー装置の開発であり、従来、レーザーの高繰り返し化では、レーザー光を発生させるときに生じる固体媒質における発熱による熱光学効果^{*}が問題となっていたが、媒質内に温度差が発生する前の 5 ms という極めて短い時間に、媒質にエネルギーを与えてレーザーパルスを媒質から取り出す動作を複数回行うことで、熱光学効果の問題を回避し、20 kHz という高速繰り返しが可能なレーザーの開発に成功した。そして、この高性能レーザーと、新開発の高速データ収集系、これまで培ってきた高度な解析手法によって、従来 30 Hz 程度であった時間分解能を、667 倍である 20 kHz の世界最高の速さで計測可能なトムソン散乱計測装置を実現した。このトムソン散乱計測の高速化により、プラズマ中に生じる突発現象等の詳細な計測を可能とし、プラズマに生じる複雑な現象の理解に向けた強力な手法となった。

4-1-4. 学際的な波及

- (1) 重元素の原子過程データの構築研究

LHD の高温プラズマを安定に長時間閉じ込めることができる特性と、プラズマの温度や密度などを正確に測定できる特長を使って、高温プラズマ中に入射した重元素（高原子番号の元素）を電離させて多価イオンを生成させ、多価イオンが発する光を調べる研究が、様々な分野への応用研究に利用された。

元素周期表で第 5 周期および第 6 周期に位置する、スズ、ガドリニウム、タングステン、金、ビスマスなどの重い元素を用いて極端紫外領域（波長 1~15 ナノメートル程度）の発光スペクトルを精査した研究では、新たなスペクトル線を、世界で初めて実験的に発見し、理論的に予測される波長によく一致しているスペクトル線と、系統的にややずれているスペクトル線があることを示した。このことは、理論予測の実験的検証に有用

なデータとなった。

例えば、スズ等からの発光は、次世代の半導体加工技術として期待されている EUV リソグラフィ[※]用のプラズマ光源材料として研究が進められている。また、金やビスマスからの発光は、水の窓[※]領域を用いた高コントラスト生体顕微鏡の光源材料の候補となっている。タングステンは、ITER における壁材料として、プラズマ中に混入したイオンの発光メカニズムの理解が求められている。本研究で得られた一連の実験データベースは、これらの研究開発において、シミュレーションの精度向上等に役立つ基礎データを提供するものである。

また、中性子星合体における元素合成の定量的理解のために必要となる r 過程[※]元素の遷移データを実験的に検証するために、重イオンからの可視光の放射を観測する試みもなされている。

(2) オーロラ観測への展開

LHD の実験では、F 値が小さいレンズ分光器を開発しスリット方向に多数のファイバーを並べてプラズマからの発光スペクトルの空間分布を計測している。この技術をオーロラからの発光の分布（2 次元像）の計測に応用し、スウェーデンのキルナにオーロラ観測用のハイパースペクトルカメラ[※]を設置して観測を開始し、初期データが得られている（図 4.14）。

オーロラの観測では、今までになかった観測装置であり、今まで干渉フィルターで行っていたオーロラの分光を、スペクトル計測へと大きく発展させることができ、現在磁気圏の研究者からも注目されている。この観測データについても、オープンサイエンスの推進のため 13 TB/年のデータ公開を予定している。

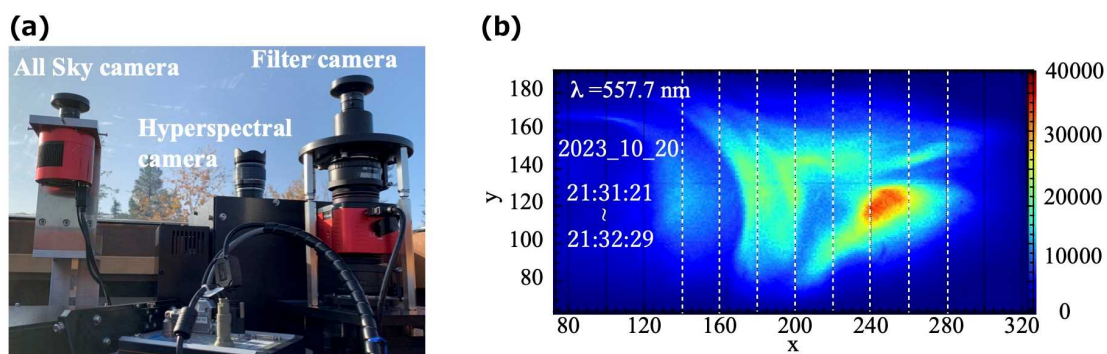
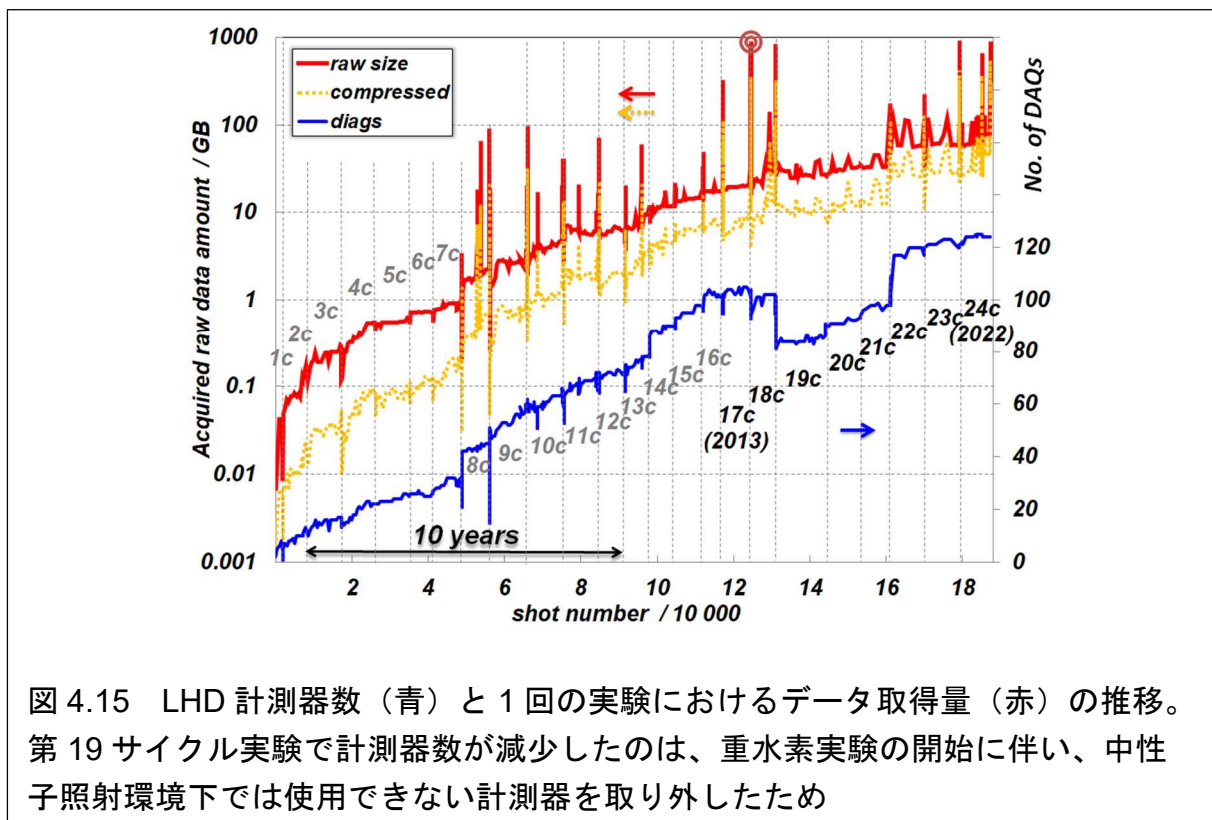


図 4.14 (a) スウェーデンのキルナに設置された、オーロラ観測カメラ群と (b) ハイパースペクトルカメラで観測された酸素のライン O I (557.7nm) の 2 次元画像

(3) オープンサイエンス

LHD では、プラズマ内部で起こる複雑現象の精密な分析を行うために、多くの計測器を設置している。実験の進展に伴い、その計測器数を増加させたとともに、その時間分解能と空間分解能を向上させ、プラズマ物理の理解に供してきた。図 4.15 は LHD に設置された計測器数（青）と 1 回の実験におけるデータ収集量（赤）を示す。2022 年度には計測器数は 120 を超え、1 回の実験あたりのデータ収集量は最大で 0.9 TB に達しており、このデータ収集量は核融合プラズマ実験装置として、世界最多となっている。現在、国際協力で建設されている ITER の実験初期におけるデータ収集量が、1 回の実験あたり 1.0 TB と見積もられており、現時点では LHD が唯一、ITER のデータ収集量を模擬できる装置となっている。

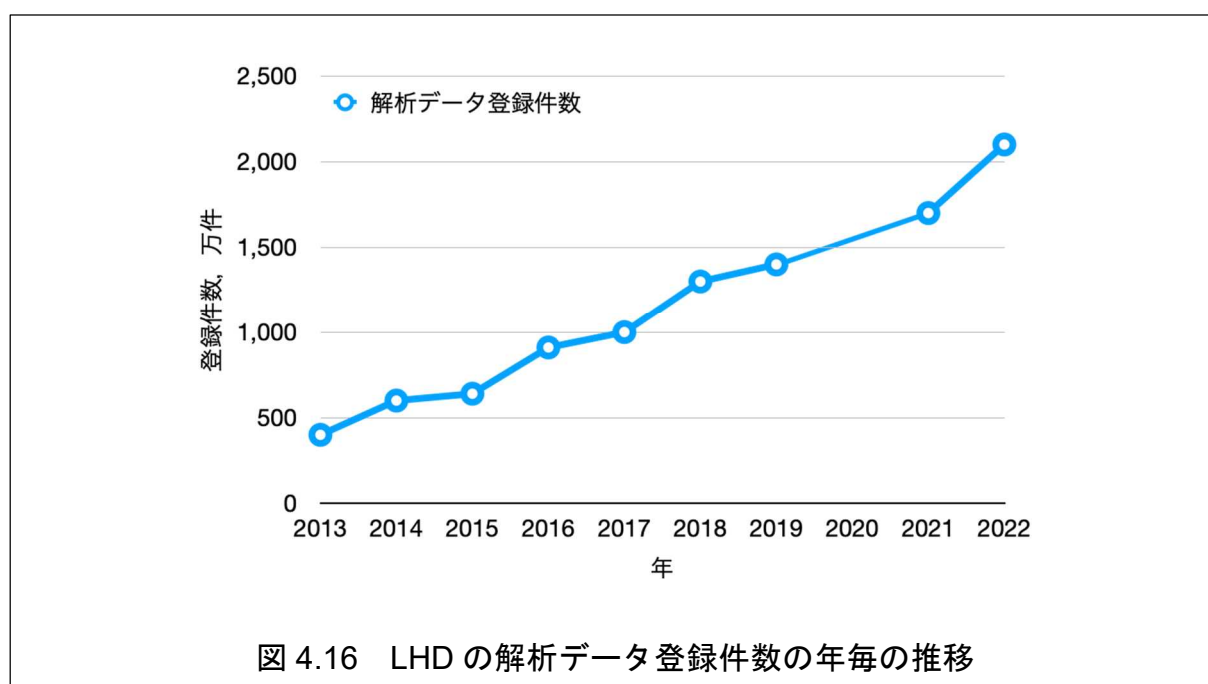
ITER は国際協力の装置であり、全世界の研究者が ITER のデータを共同で利用するため、遠隔地からの実験参加に必要な膨大な量のデータ（ビッグデータ）の高速転送が課題となっており、ビッグデータを世界最速で遠隔地まで転送して、遠く離れた地球の裏側からでも共同実験を可能にしようという共同研究を、量子科学技術研究開発機構、ITER 機構、国立情報学研究所とともに実施し、フランスの ITER から日本の六ヶ所村にある ITER 遠隔実験センターへ、平均で毎秒 7.2 Gb の安定したデータ転送速度を得ることに成功した。さらに、LHD で得られる全ての実験データを遠隔地の共同研究先まで速



やかに転送する試みとして、ITER 遠隔実験センターに向けて、LHD 実験で収集した全ての実験データを実時間で転送し、3 分に 1 回の LHD のプラズマ実験周期に対して、2 分以内に十分転送が完了できることを実証した。

LHD では、2021 年度以降、オープンサイエンスの方針を掲げ、核融合・プラズマ分野では、世界に先駆けて計測・解析データを完全オープン化し、Web ベースで世界中の人々が LHD データ (<https://doi.org/10.57451/lhd.analyzed-data>) にアクセスできるようにした。解析データ（計測データを処理して物理データに変換したデータ）の登録計測数は 1156 種類におよび、その総データ件数は図 4.16 に示すとおり 2000 万件を超えている。また、これらの解析データへのアクセス回数は年間 570 万回以上に達しており、多くの研究に活用されている。さらに、生データも含め、全ての研究データの DOI[※]登録を開始し、既に 122 万件余りのデータの登録が済んでおり、順次登録を進めている。

また、学術論文誌に出版した LHD の研究成果は、NIFS 機関リポジトリによってインターネット上で無償公開しており、国内外から自由な閲覧を保証し学術・研究活動の展開に寄与するとともに、広く社会に貢献している。このように、LHD は世界のオープンサイエンスの潮流の中で、先導・先駆的役割を果たしている。



4-1-5. 研究論文の出版状況

1990 年の LHD の建設開始から 1998 年のプラズマ実験開始を経て 2022 年度末までに発表された LHD に関わる学術論文の総数は 2118 編である。図 4.17 に、LHD における年間論文発表数を、LHD と同規模の超伝導ヘリカル装置であるマックスプランクプラズマ物理研究所

（ドイツ）のヴェンデルシュタイン 7-X 装置（W7-X）の年間論文発表数と比較した。W7-X は建設が遅れ 2015 年からプラズマ実験を開始しているが、プラズマ実験期の LHD 論文数は W7-X と同程度以上である。図 4.18 に示すように、フロンティア事業期間中の累積論文数は 803 編であり、国際共著論文の割合はフロンティア事業開始時（2013 年）の 20 %から、およそ 40 %まで増加しており、LHD 国際プログラム委員会などを設置した国際化に向けた試みの成果が現れている。

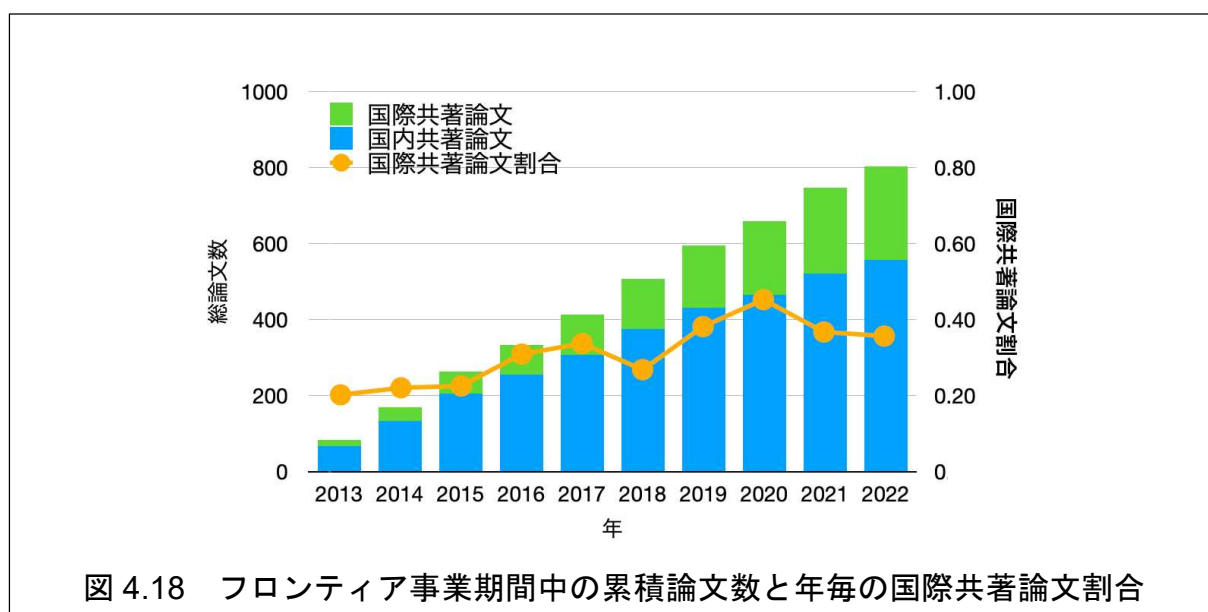
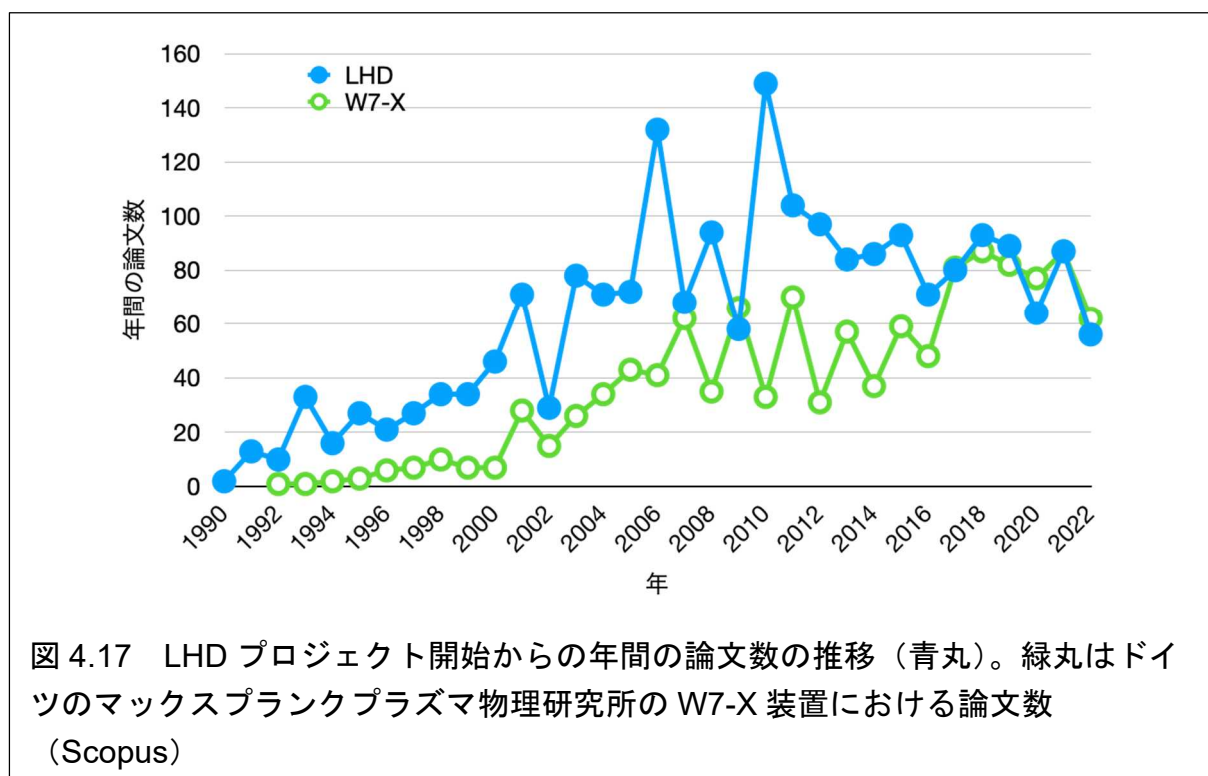


表 4.2 はプラズマ・核融合分野の学会等において、LHD に関わる研究成果が学術表彰された件数と、総表彰件数に対する割合を示す。どの表彰においても、LHD に関する研究が高く

評価され、特にプラズマ・核融合学会の論文賞は7割以上がLHD関連の研究が表彰されており、LHDにおける研究が、国内のプラズマ・核融合研究を牽引していることがわかる。

表 4.2 LHD 関連の研究表彰（2013 – 2022 年度）

表彰名	総表彰数 [件]	LHD 表彰数 [件]	LHD 表彰数 の割合
プラズマ・核融合学会			
論文賞	7	5	71 %
技術進歩賞	18	8	44 %
学術奨励賞	13	2	15 %
日本物理学会若手奨励賞（領域 2）	24	7	29 %
吉川允二奨励賞	28	7	25 %

4-2. 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）

本フロンティア事業は、1998 年から運用されてきた超伝導ヘリカル方式の高性能プラズマ実験装置 LHD を用いて実施した。重水素を用いた実験を実施するために、放射線管理区域等の整備を含めた施設整備を 2013 年度から開始し、2017 年度から重水素実験を実施した。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を行う排気ガス処理システム（図 4.19）、高精度中



図 4.19 トリチウムを含む全ての水素同位体ガスを酸化して、水の形態で回収する『排気ガス処理システム』

性子計測システム等の安全管理機器の整備、およ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・整備を計画どおり実施した。これら万全な安全管理体制と、モニタリングデータの公開、市民説明会などによる地域との信頼構築のもとで、予定どおり実験が実施された（4-4-2 項）。

フロンティア事業によって、LHD において「重水素実験」を実施して所期の超高温プラズマ（核融合条件が必要とするイオン温度 1 億度以上）を実現し（4-1-1 項）、その内部を高時空間分解能で可視化することで多くの新しい発見がもたらされた（4-1-2 項）。こうした研究を支えたのは、独自に開発したプラズマの加熱装置や計測装置である（4-1-3 項）。これらの装置開発と運用は NIFS の責任のもとで行われ、予定どおりに進み、コロナ禍においても多くの国際的共同研究が実施された（4-6-2 項）。

4-3. 情勢の変化があった場合の対応状況

フロンティア事業の実施期間において、研究推進の障害となる情勢の変化（社会情勢や世論の変化による研究実施の困難、経済情勢の変化による予算上の困難、物品調達の困難、あるいは装置の重大な故障など）はなく、所期の目標を達成できた。

一方、最近 5 年ほどの間に、核融合研究分野は大きな転換期を迎えている。フュージョンエネルギー開発の国際的競争激化の中で、学術研究と開発研究がそれぞれ果たすべき役割について、より明確な整理が必要となってきた。実は、この整理の根本にある理念は、既に核融合研究の黎明期において議論され、原子力委員会核融合専門部会（湯川秀樹部会長）の答申（1959 年）の中で「今後の研究方針」として「基礎重視の研究（A 計画）と、諸外国とのパラメタ競争を重んじる研究（B 計画）」の両者が協働する体制が提案されている。その卓見は今まさに世界をリードできる研究体制の在るべき姿を示しており、LHD プロジェクトは、A 計画の役割を果たすことが期待される。しかし、これまでの（我が国に限らず世界の大型プラズマ実験プロジェクトに共通の）実情として、装置方式（トカマク、ヘリカル、レーザーなど）の間のパラメタ競争に重点がおかれ、装置方式を超越した普遍的な原理の解明という「A 計画」の理想を追求する研究が手薄になっている。このことは、「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」において指摘された点でもある（4-5-1 項参照）。

こうした指摘を、核融合科分野にとって「学問的進化」の機会と捉えて、2021 年から、分野に閉じない学際的な議論の場を設けて、未来に向けた研究戦略について検討した。具体的には

- 1) 日本学術会議に「プラズマサイエンス小委員会」を設置し（2021 年～2023 年）、核融合プラズマの研究を含む幅広いプラズマサイエンスの発展の方向を議論し、見解『プ

ラズマサイエンス ―その学際的发展と豊かな未来社会のために―』（日本学術会議、2023 年）として発表した。また、日本学術会議がまとめた「未来の学術振興構想」には、『プラズマ物理の学際的展開 ―集団現象の理解に向けて』を掲載した。これらの中長期的なビジョンの中で、核融合プラズマに限らず、宇宙・天体プラズマにも共通する物理的原理の解明を「学際的」な取り組みによって進める必要性が示されている。

- 2) NIFS では、核融合科学の未来を切り開く研究テーマを学際的な観点から定式化し、旧来の「核融合コミュニティー」を超えた広い分野からの研究参画を促すべく、2021 年度から広く学术界に呼びかけ、「ユニットテーマ」の構築に取り組んだ。その結果策定された研究テーマに基づき、10 個のユニットが編成された。

このような学問論に基づき、核融合科学の「パラダイム転換」を先導する役割を担うために、2021 年度～2022 年度の実験では、パラメタの追求よりも原理の解明に重点を置いた。すなわち、定常維持時間を単に伸展させるのではなく、定常を伸展させるために必要な物理機構、あるいは定常性を阻害する物理機構を明確にし、定常プラズマを実証するための科学的指導原理の構築を目指すことに重きを置いた研究を実施した。その結果として、突発現象や無衝突エネルギー移送など、実験的に位相空間まで踏み込む研究まで到達し、当初の研究計画にはなかった予想を上回る成果を得た。このことは、上記のように「プロジェクト推進に当たっての留意事項等」における指導に合致するものであり、さらに post-LHD 計画の方向性を決定づけるものである（第 4-8 項参照）。

4-4. 社会や国民からの支持を得るための取り組み、情報発信の状況

4-4-1. 学術成果の発信

フュージョンエネルギーに対する社会の期待と信頼の拠り所となるため、「科学知」を極め、理解しやすい形で発信することに、NIFS は核融合科学分野の共同利用機関として取り組んでいる。本プロジェクトにおいても、研究の成果を幅広く発信することに努めた。

論文発表された研究成果を一般向けの記事としてわかりやすく要約して Web ページにて公開（<https://www-lhd.nifs.ac.jp/pub/Science.html>）するとともに、特筆すべき成果はプレス発表を行い、また EurekAlert!などを活用した英語での発信も行い、LHD の研究成果を広く社会に公開する取り組みを進めている。その成果として、2022 年度は 12 件の論文が、学術論文の注目度を示す指標である Altmetric Score の Top 5%論文となった。

その他にも、フロンティア事業をはじめとする NIFS が推進している研究活動に対して、社会や国民の理解を得るために、オープンキャンパスと題した一般公開（図 4.20）、随時の施設見学、科学教室、ふるさと訪問授業・出前授業等の取り組みを行っている。

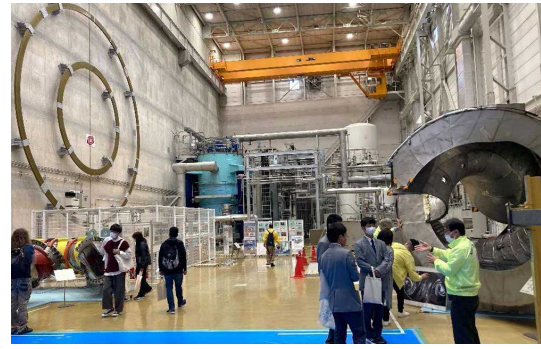


図 4.20 2023 年度に、4 年ぶりに現地での対面開催されたオープンキャンパスの様子。約 500 名の方に来所いただいた。左：制御室、右：ヘリウム液化冷凍機室

4-4-2. 安全面の取り組み

LHD は、装置の運用が始まった 1998 年以来、安全かつ安定的に運用され、重水素実験を開始した 2017 年以降の稼働率は 92 %を達成している。その運用実績および地域理解の醸成については、これまで実施してきた外部評価 (<https://www.nifs.ac.jp/about/org/hyokarep.html>) において高い評価を得てきた。

実験の実施にあたっては、安全の確保が必要不可欠であり、NIFS が主催する第三者委員会である「核融合科学研究所重水素実験安全評価委員会（以下、「安全評価委員会※」という）」により、放射線等の管理状況や各年度の実験計画を安全性の観点から問題ないことの承認を得た上で実験を実施してきた。また、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である「安全監視委員会※」に対して実験の実施状況と計画を報告し、安全性について承認を得つつ重水素実験を遂行してきた。特に、年 2 回、NIFS は監視委員会事務局と合同で環境放射線計測と環境水採取を実施し、双方が独立の計測方式でデータの評価を行った後、結果を突き合わせ、評価が合致していることを確認して実験が実施された。

LHD 実験の情報公開をするために、実験スケジュールや実験後の日報などを、ホームページ (<https://www-lhd.nifs.ac.jp/pub/>) にて公開している。重水素実験によって発生するトリチウムや中性子が環境への影響がないことを示すために、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（三月平均値）の速報値を公開するホームページ (<http://sewhite.nifs.ac.jp/quick/>) を整備した。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、「安全評価委員会」による確認を経て、同委員会のホームページ (https://www.nifs.ac.jp/j_plan/j_003.html) にて

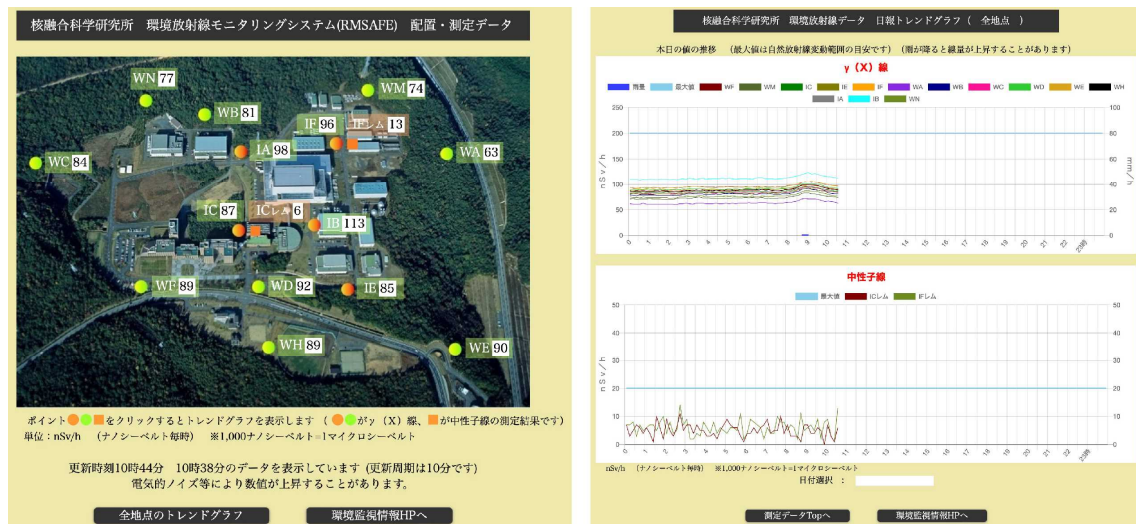


図 4.21 環境放射線モニタリングポストにおけるリアルタイム観測値を表示している Web ページ (<https://sewebserv.nifs.ac.jp/map.php>) の画像。左：環境放射線モニタリングシステム (RMSAFE) の配置・測定データ値の表示画面、右：全データのトレンドグラフ表示画面

公開している。また、NIFS の敷地内に設置した環境放射線モニタリングポストにおけるリアルタイム観測値 (<https://sewebserv.nifs.ac.jp/map.php>) をホームページにて公開している (図 4.21)。また、重水素実験を開始した 2017 年以降は「LHD 重水素実験放射線管理年報」を発行して LHD における放射線の管理状況を「安全評価委員会」によって確認いただいた上で、同委員会のホームページ (https://www.nifs.ac.jp/j_plan/j_003.html) にて公開し、重水素実験における放射線の管理状況の公表に努めた。

重水素実験に対する地域社会の理解を得るために、2006 年度より市民説明会を毎年実施し、重水素実験が終了した 2022 年までの 17 年間継続してきた。市民説明会は、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、毎年 300 人以上の方々に参加を得た (図 4.22)。

核融合科学に関する啓発のための活動にも取り組んでいる。地域のイベントなどにも積極的に参加し、地域社会との信頼関係の維持に努めている。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



図 4.22 多治見市で開催した市民説明会 (2022 年)

問題等に対する理解を深める勉強会を NIFS の職員と共同で実施している。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平成 12 年より継続して行っている。

これらの取り組みにより、本プロジェクトの安全性に関する市民の信頼を獲得することができ、2017 年から 6 年間の重水素実験期間を含む 10 年間のプロジェクトを順調に実施することができた。同時に本プロジェクトの安全な推進は、フュージョンエネルギーの社会実装に向けた社会の理解を醸成することに貢献したと言える。

4-5. 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

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」について（2018 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）における「今後の事業の推進に当たっての留意点」は以下のとおりである。

4-5-1. 核融合研究全体における LHD の役割の明確化について

留意事項内容：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・ヘリカルの方式の違いによらず、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。

閉じ込め方式によらない「共通課題」を解決するためには、プラズマの閉じ込めを決定している物理機構を原理のレベルで明らかにする必要がある。フロンティア事業では、LHD において 1 億 2 千万度のイオン温度および世界記録である約 48 分（約 3000 秒）の保持時間という「数値目標」を達成した後は、物理機構の解明を中心に研究を行った。具体的には、同位体効果の原理解明、突発現象の原理解明、閉じ込め限界を支配している乱流の伝播と非局所輸送のメカニズム解明、高エネルギー粒子の無衝突エネルギー移送現象の解明がなされた。これらの研究成果は、将来の核融合炉の高効率定常維持に必須の物理的知見である。特に突発現象（4-1-2.（3）項）は、トカマクにおいてはプラズマの全面的な崩壊（ディスラプション）を引き起こす最大の難題とされながら、閉じ込め磁場が全体的に破壊されるために、その詳細なメカニズムが全く未解明であった。LHD では、ヘリカル方式の特長である磁場の定常性と、世界最高の時空間分解能をもつ計測によって、突発現象の前後のプラズマ内部状態の変化が可視化され、崩壊の要因と誘因が分離されて解明されたことで、今後トカマクにおいてもディスラプション予防の指針が得られたと言える。また、核融合システムに共通の要素技

術に関する工学研究の成果も、方式を超えた知見を与えるものである。特に、LHD の長時間放電で明らかになった熱や粒子の循環に関わる工学的課題や、超伝導マグネットの低温技術に関する成果は、LHD プロジェクトの重要な貢献として特筆すべき事項である。

さらに、学術研究機関が果たすべき役割の重要性は、2023 年 4 月に示された国の『フュージョンエネルギー・イノベーション戦略』にも明示されており、その具体的な方向性を与える実績があげられた。

4-5-2. 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

留意事項内容： 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。

プロジェクトの計画時点から国際協力が契約された ITER と JT-60SA を除き、核融合科学分野のほとんど全ての実験計画は、装置を建設・運用する機関が、装置運転の経費を負担して実施される。そうした中で、研究テーマに応じた特別の機器（主として計測器）に関しては、それを提案する研究チームが自らの予算で開発・制作したり、共同で開発することで、予算面でも貢献を受けることがある。フロンティア事業においても、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にし、高度な研究を進めるのに必要な計測機器等の LHD への持込みによる、等価的な研究資金の捻出を図った。

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・密度の計測装置である高速トムソン散乱計測システムを開発し、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を図った。

さらに、競争的外部資金として、科研費 特別推進研究 2021-2026（21H04973）による計測器開発を実施した。

今後は、産学連携、特に核融合スタートアップ企業との共同研究（4-1-2 (6) 項参照）をより一層活発にし、民間からの研究資金調達を増やす計画である。

4-5-3. 安全管理体制の維持と国民・社会の支持について

留意事項内容： 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。

4-4 節で記述したように、安全管理および社会的理解の醸成に取り組んだ。

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、地元消防（土岐南消防署）との打合せに基づく消防計画を策定した。また、この消防計画に基づいた NIFS 全体の防災訓練を地元消防の立ち合いのもとに実施した。さらに、他機関における放射線管理区域を訪問し、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た。このようにして、地域とのコミュニケーションを深め、地元の支援を得て、事故なく計画を完了した。

重水素実験終了後も、実験排気ガス中のトリチウム測定や、NIFS 内の放射線モニタリングポストの運用を継続し、放射線測定データ等の情報をホームページ上で公開している。このことによって、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・信頼につながっている。

LHD における放射線管理に携わった若手技術職員を、核融合科学領域、環境科学領域、生命科学領域との異分野連携、協働による同位体挙動・影響解明を目指す研究計画に参画させることにより、より高度な専門性を有する技術職員の育成を行っている。

4-6. 共同利用・共同研究を行うための実施体制について

4-6-1. LHD における共同研究実施体制

NIFS は全ての共同研究を公募し、所内外の委員で構成する共同研究委員会において審議して計画を策定してきた。今後も、この共同研究公募の仕組みを活用し、広い分野からの研究テーマ提案を受け付ける方針である（2023 年度に行った NIFS の大幅な改組によって、「ユニット」という所内外メンバーからなる学際的研究チームを組織し、加えて「学際連携センター」を設置し、その支援によって、従来の公募による研究提案の受付だけでなく、さらに積極的に他分野へ働きかけて、高度な目的に戦略的に取り組む共同研究プランを構築している）。共同研究の成果は、毎年開催する「成果報告会」において報告を義務付け、ピアレビューの形で評価を実施している。評価結果は、次年度以降の共同研究採択のための審査に反映される。

LHD による実験研究の実施にあたっては、実験計画の策定を、所内外の研究者で構成される LHD 実験会議が行った上で、具体的な実験計画策定は、4 つのトピックスで領域を分けた実験グループ体制を構築して実施した。各実験グループのリーダーは若手を含む 2 名以上の研究者で担われ、若手研究者が LHD 実験をリードする仕組みとした。実験グループのトピックスは研究の進展に伴い、年度毎に見直しを行った。また、各実験グループのリーダーもしくはアドバイザーとして、広く国内外の研究者にも加わってもらうことによって、共同研究者の意向を迅速に反映できる環境を整えてプロジェクトを推進した。2021 年度からは、提案された全ての実験提案者が集い、実験提案の紹介をするオンラインの LHD Research Forum を

開催し、国内外全ての共同研究者を一堂に会して実験提案について討議する場を設け、共同研究の更なる活性化のための体制を整えた。LHDの実験提案は、比較的小さな研究グループで実験提案ができるように工夫されており、若手の研究者がPIとして多くの実験を提案し、LHDにおける実験を主導している。LHDのマシントイムは、LHD Research Forumにおける実験提案の説明と議論をもとに、各実験グループのリーダーの合議で策定するとともに、装置の状態等を鑑みて随時議論を行い、効率の良い実験実施に努めた。

LHD実験を実施する上で必要な情報の取得と実験条件の入力等は、アカウント管理された共同研究者専用のWebページを通して可能なシステムとしており、遠隔会議システムによるコミュニケーションと、リアルタイムで公開されるオープンデータリポジトリと合わせることで、海外の共同研究者も遠隔で実験参加できる体制を整えた。LHDの装置情報や実験スケジュールおよび実験速報等の実験に関する詳細情報は、共同研究者専用のWebページで共有するとともに、実験スケジュールや実験速報は広く一般向けのWebページでも公開した(図4.23)。

LHD実験会議は、実験計画の策定のみならず、成果の公開にも力を入れており、査読論文に掲載された成果をわかりやすい表現でまとめ、一般向けのWebページ(<https://www-lhd.nifs.ac.jp/pub/Science.html>)にて広く発信することを進めた。

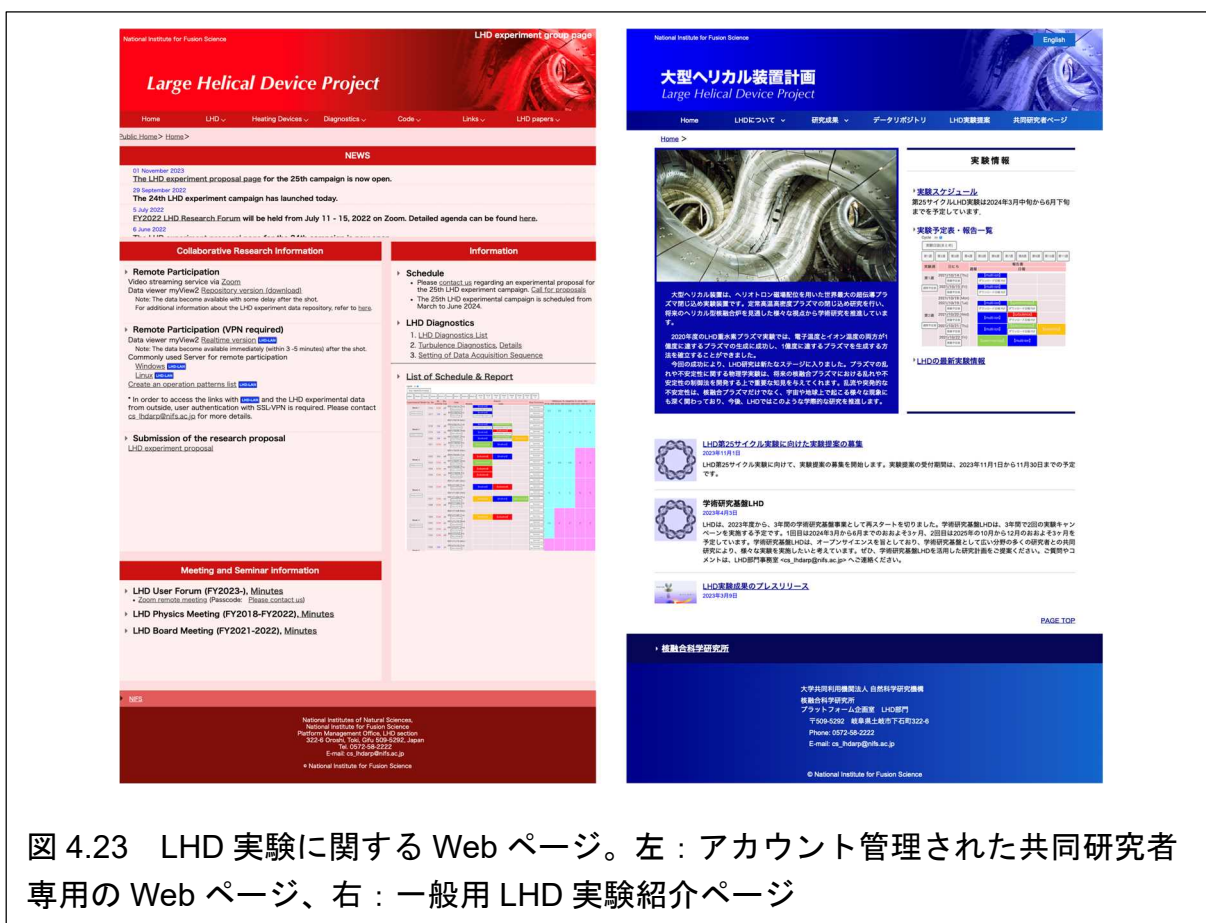


図 4.23 LHD 実験に関する Web ページ。左：アカウント管理された共同研究者専用の Web ページ、右：一般用 LHD 実験紹介ページ

4-6-2. 共同利用の状況

LHD は 1998 年からほぼ毎年 3 ～ 4 か月間の実験期間を確保し、年間おおよそ 60 日間の実験日を共同研究に提供してきた。この間、高い稼働率を達成したことは、世界の共同研究者から極めて高い評価を得ている。

フロンティア事業期間において、LHD に実験提案した実験提案者（PI）の年毎の人数を図 4.24 (a) に示す。2020 年以降は特に海外からの実験提案者が増加しており、2021 年度と 2022 年度は 33 %以上が海外の研究者であった。また、これらの研究者から、図 2.24 (b) に示すとおり、毎年、実験日数を大きく超える実験提案がなされている。多くの優れた実験提案を実施するために、提案された全ての実験課題について、その提案者が集い、提案内容の紹介をするオンラインの LHD Research Forum を実施し、マシンタイムの配分を決定した。

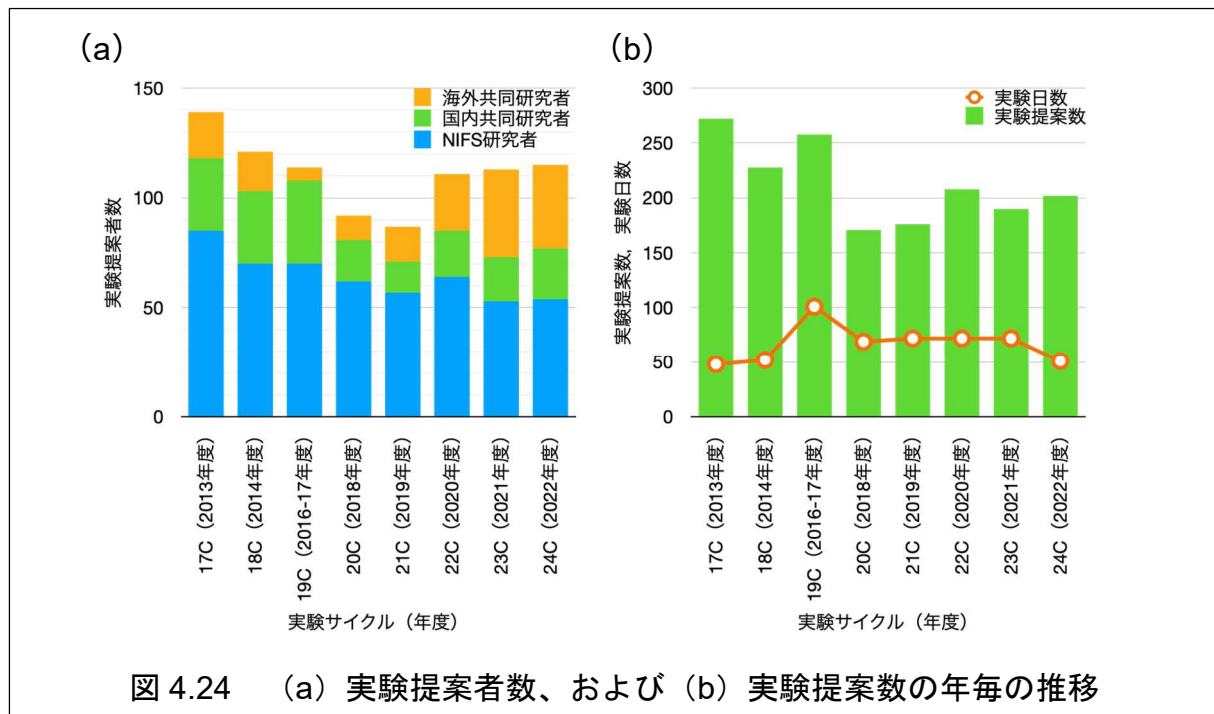


図 4.24 (a) 実験提案者数、および (b) 実験提案数の年毎の推移

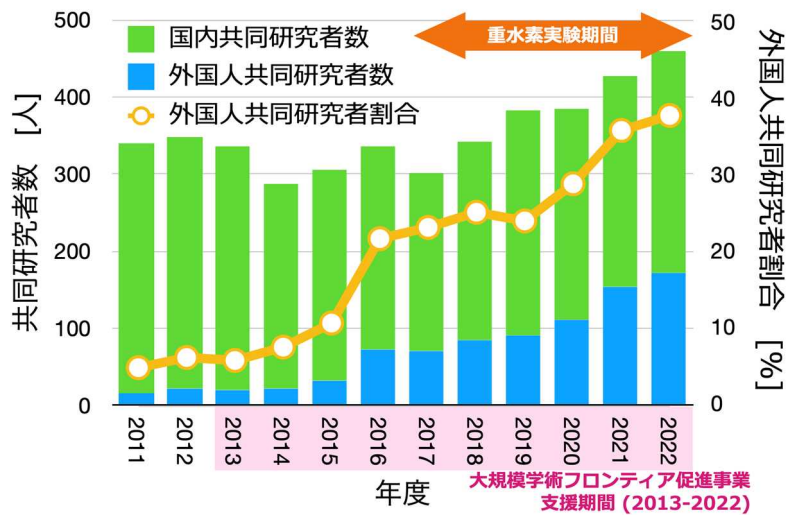


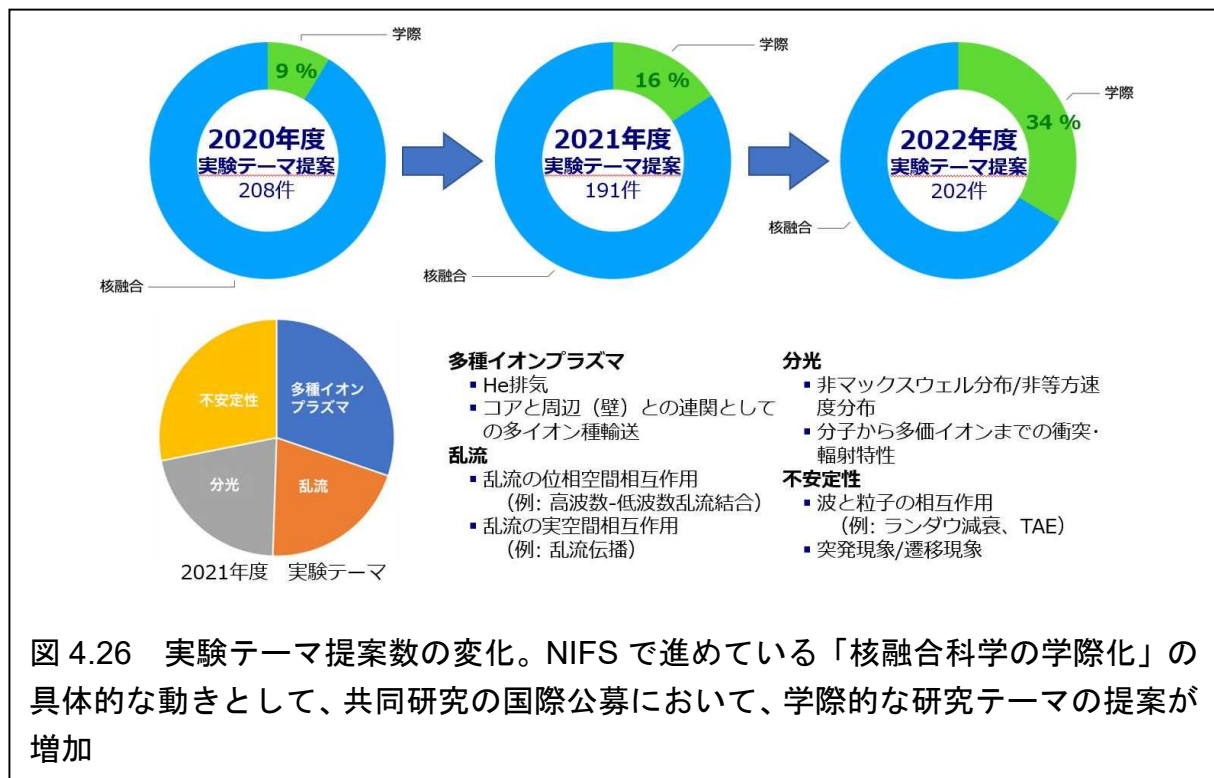
図 4.25 共同研究者数の推移

実験協力者やLHDの取得済みデータを用いた研究を実施する研究者も含めた共同研究者の総数を図 4.25 に示す。フロンティア事業の実施期間を通じ、国内 44 と海外 48 の大学や研究機関から、延べ 3565 人の共同研究者が LHD 実験に参加した。海外からの共同研究者の割合は、フロンティア事業開始当初（2013 年）は 5 %程度であったが、LHD 国際プログラム委員会の設置（2016 年）や実験グループへの国際アドバイザーの導入（2020 年）などの国際化への取り組みによって大幅に増加し、最終年度には 38 %にまで増加した。

4-7. 幅広い研究者が参画できる運用体制の状況について

4-7-1. 核融合科学の学際化

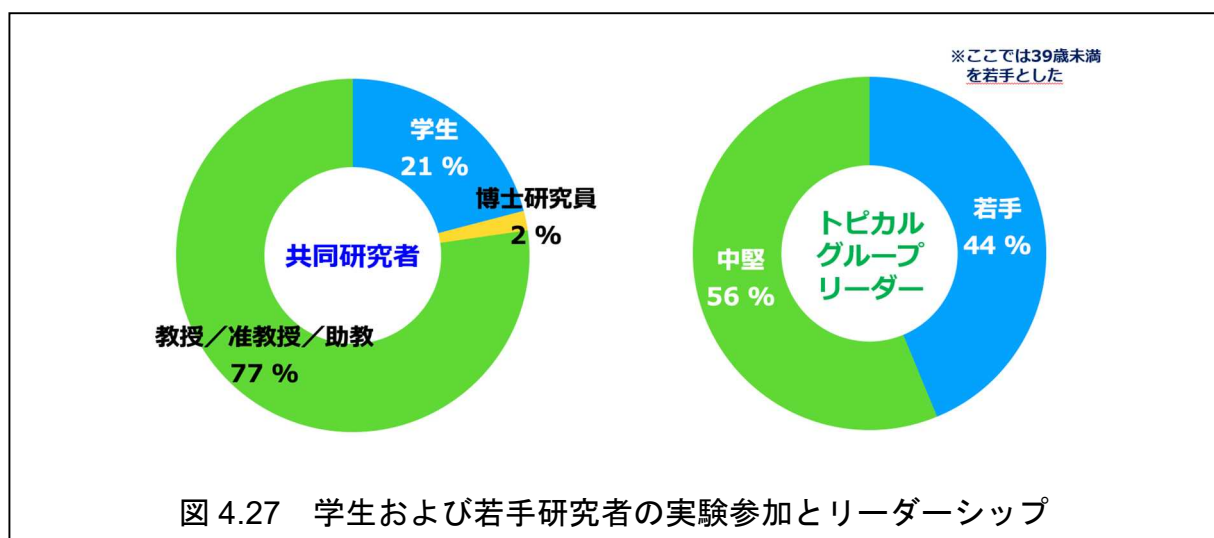
2021 年度からは、学際的展開を中心的な目標に掲げ、固有の閉じ込め方式の性能評価という観点に限らない環状プラズマに一般的な物理の解明、さらには核融合分野を超えて宇宙・天体现象にも通底する課題の研究に取り組んだ。共同研究課題の募集においても、国内外の広い分野の研究者を勧誘し、学際的な実験が数多く実施された。図 4.26 に 2020 年以降の LHD に提案された実験テーマにおける、学際的研究の割合を示す。「核融合科学の学際化」の具体的な動きとして、共同研究の国際公募において、学際的な研究テーマの提案が着実に増加しており、多くの学際的な研究成果が創出されている。



4-7-2. 若手研究者が活躍するプロジェクト運営

LHD プロジェクトは、人材育成において大きな効果があった。フロンティア事業の間に LHD での共同研究に参加した大学院生および PD は、延べ 1150 名であり、全体の 20%を超える (図 4.27 の左図を参照)。

さらに、実験計画の策定と実施で責任をもつ「トピカルグループ」(2.1 項参照) のリーダー／サブリーダーに若手研究者を積極的に登用した。リーダーを務めた若手研究者 (39 歳未満) は、全体の 44%を占めた。他のリーダーも中堅研究者であった (図 4.27 の右図を参照)。



4-7-3. 産業界との連携

『フュージョンエネルギー・イノベーション戦略』においても強調されているように、核融合技術の社会実装にむけて、産業構造の構築が喫緊の課題である。NIFS は「核融合科学の学際化」を通じて、核融合研究の先端技術をネットワーク化する産学官連携に取り組んでいる。具体例として、本プロジェクトの一環として構築された、LHD の超高温プラズマを用いた高電荷イオンの分光データベースは、原子物理理論の検証と相まって、様々な物質科学、光科学の技術シーズとなった。

プラズマ・物質相互作用の研究も、新たな材料技術のシーズの豊富な潜在的可能性をもつ。また、プラズマ加熱技術の 1 つである大電力マイクロ波（ μ 波）がセラミックスの生産に応用されている。マイクロ波による加熱は、セラミックス内部にまで均一な昇温を可能とするために熱歪みを低減でき、大型のセラミックス機器を高精度で焼成することを可能とした。さらに、ガスなどの燃料を用いる焼成法と比べて約 1/5 の時間で生産でき、大きな省エネルギー、低炭素化効果がある。この技術は、NIFS が立地する東濃地域の中心的産業である窯業に大きく貢献するものであり、地域産業振興という意味でも大きな成果と言える。もう 1 つの実例として、超高温プラズマが金属と接触する部分の高熱負荷を除去するために企業と共同開発した異種金属の接合技術（粉末固相接合（PSB）法）が、超硬ビット切削機に応用され、量産化が検討されている。

高速トムソン散乱装置の実現に向けて開発した高繰り返し大出力レーザーは、レーザー出力エネルギーが 1 J を 20 kHz で駆動可能である。現在市販されている同種のレーザーと比較して 2 桁高いレベルである。プラズマ計測用として開発したレーザーは、広範な分野に応用が可能であり、レーザー加工やレーザー物質相互作用のドライバーとしても利用できる。これらの応用では、今まで繰り返し率が低いために産業応用に課題があった、電子・イオン・中性子源等のレーザー粒子加速応用技術、レーザー表面改質などの高付加価値レーザー加工技術などで大きな進展が考えられる。さらに、これまで開発してきたレーザー技術に含まれるコンポーネントについては、既に産業応用が開始されている。今回の大出力レーザー開発で得られた技術の 1 つである光アイソレータ（レーザーの安定動作と故障防止のための光デバイス）技術について、半導体製造装置メーカーとの共同研究で実用化プロジェクトが進行中である。既に複数の共同特許を出願済みで、近い将来の市場投入を目指している。

LHD のプラズマ加熱に用いられる大出力の電磁波源を大規模な工作に利用するための応用研究も、産学連携の共同研究によって進められており、核融合技術の波及は極めて多様な分野に及んでいる（表 4.3）。

表 4.3 LHD から産業への波及効果

• セラミック焼成技術	プラズマ加熱技術を大型のセラミックス機器の高精度焼成に応用
• 異種金属の接合技術	プラズマ対向材料の接合技術を超硬ビット切削機などの接合に応用
• EUV 光源開発	プラズマ中における多価イオンの発光データベースが半導体加工用 EUV リソグラフィのプラズマ光源開発に貢献
• レーザー加工技術	プラズマ計測用高繰り返し大出力レーザーを材料加工に応用
• 衛生環境技術	クライオ真空ポンプ用高性能活性炭をウイルス不活化装置の社会実装に応用
• 大規模工作技術	プラズマ加熱技術を大規模な工作技術に応用
• ビーム中性子源	プラズマ加熱技術を医療・産業用の加速器型中性子源開発に応用

フロンティア事業の遂行を通して、核融合スタートアップ企業 3 社（Helical Fusion 社、Applied FUSION Technology 社、ビームフォーフュージョン社）が起業されたことは特筆に値する。Helical Fusion 社（<https://www.helicalfusion.com/>）は、LHD の実験データをもとにヘリカル型の核融合炉の基本設計を行い、その実現を目指す企業である。Helical Fusion 社は、核融合分野の SBIR（Small Business Innovation Research）制度において選定され、事業が支援されている。Applied FUSION Technology 社は、核融合実現を目指す研究の過程で生まれた技術をスピンアウトすることを目指す企業である。LHD で使用するクライオソーブションポンプ（超高真空用排気装置の一種）の開発を通じて得た活性炭の取扱い技術に関する特許をもとに、空気中のウイルスを不活性化する装置を開発し、その製品化を行っている。ビームフォーフュージョン社は、LHD の N-NBI によって培われた負イオン源技術を将来の核融合炉に向けて高性能化する開発とともに、大阪大学で開発された液体リチウム技術を用いて医療・産業用の加速器型中性子源の開発を目指す企業である。このように、LHD プロジェクトの一環として独自に開発された技術は、核融合分野のみならず、環境分野や医療分野でのイノベーションを引起し、スタートアップ企業の挑戦を通じて、幅広くネットワーク化されたフュージョンインダストリーの育成に貢献している。

4-8. フロンティア事業での支援終了後の運営

フロンティア事業での支援終了後、LHD は文部科学省の学術研究基盤事業の支援を受け、3 年間の「超高温プラズマ学術研究基盤（LHD）計画」として、プラズマ実験を実施している。

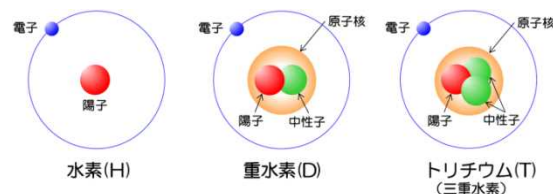
この学術研究基盤事業では、LHD が有する唯一無二のプラズマ計測能力と超高温プラズマを安定的に生成できる性能を活かすことで、（１）核融合分野への貢献としては、プラズマ閉じ込めの高効率化、長寿命化、安全性の向上に資する科学知を構築すること、同時に（２）核融合プラズマに限らず、宇宙・天体プラズマをはじめとする自然界の様々な複雑系に通底する集団現象の原理に迫ることを目標とし、学際的かつ国際的な共同研究を実施している。

2025 年度までの学術研究基盤事業は、核融合科学を学際的な学術分野として再構築する「パラダイム転換」の期間として位置付けられ、その後の発展の礎となる。核融合科学研究所は、核融合科学を学際的に発展させることで、核融合研究にコミットする研究者の専門分野を拡大し、活発な知の循環を通じてイノベーションの盤石な学術基盤を築く役割を担っている。その中長期的なビジョンを策定するために、日本学術会議においては学際的な委員で構成された「プラズマサイエンス小委員会」をおいて議論し、その成果を見解『プラズマサイエンス ―その学際的发展と豊かな未来社会のために―』（日本学術会議、2023 年）として発表した（<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-25-k230926-14.pdf>）。また、日本学術会議がまとめた「未来の学術振興構想」には、『プラズマ物理の学際的展開 ―集団現象の理解に向けて』を掲載している（<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-25-t353-3-116.pdf>）。これらの中長期的なビジョンに基づき、現学術研究基盤事業に続く 2025 年度から実施すべき具体的な研究計画として、ロードマップ 2023 に『超高温プラズマの「ミクロ集団現象」と核融合科学』を提案し、採択された。この post-LHD 計画では、超高温プラズマを高精度で制御・操作し、世界最高の分解能で計測する実験システムを構築することで、核融合炉のみならず宇宙・天体にも共通するプラズマに独特な揺らぎの発生原因とその影響を解明し、計測と理論・シミュレーションを連携し、核融合イノベーションを駆動する科学的指導原理の構築を目指す。この post-LHD 計画で建設・運用する CHD および CHD-U は、LHD の「プラズマ閉じ込め部」をコンパクトに改造し、計測器等を増力改造することで最新鋭化する実験システムである。LHD プロジェクトで開発された高性能のプラズマ計測装置、プラズマ加熱装置、その他の補機（冷却水や真空排気装置など）と実験棟・インフラストラクチャーを有効に活用し、本計画で得られた研究成果を大きく発展させる。

【用語解説】

○ 重水素、トリチウム

重水素は元素記号 ^2H （略号：D）で表される水素の同位体で、水素の約2倍の質量をもっており、海水中に豊富に含まれる。同じく ^3H （略号：T）で表されるトリチウム（三重水素）は、水素の約3倍の質量をも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）



○ ITER

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（1000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。

○ 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およ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。

○ バルク荷電交換分光法

プラズマに入射した高速の中性粒子（原子）とプラズマ中のイオンが衝突して出す光を利用して、プラズマ内部の同位体密度比（軽水素と重水素との密度比）を計測する方法。

○ 速度分布

気体など多数の粒子から構成される集団における、粒子の速度分布のこと、高温プラズマでは、速度分布が正規分布から歪んで複雑なミクロ集団現象が生じる。

○ 熱光学効果

物質の屈折率が温度によって変化する現象。均一な物質でも、物質内に温度分布が生じること屈折率分布が生じる。そのような物質を透過する光は、その屈折率分布によって歪み直進できない。

○ EUV リソグラフィ

極めて短波長の極端紫外（EUV）光を用いて、シリコンウエハ上に微細な回路パターンを転写する半導体加工技術。波長が短いほどより微細なパターンを転写することが可能となる。

○ 水の窓

波長が2.3から4.4 ナノメートルの間の光（軟X線）のこと、この波長の光は、水を構成する酸素には吸収されない一方で生体を構成する炭素に強く吸収されるため、生きた細胞組織の内部構造を高いコントラストで観察できる。

○ r 過程

中性子星の合体など、大量の中性子が存在する条件下で、鉄より重い元素が作られる過程のこと。

○ ハイパースペクトルカメラ

分光器内に高精度で制御できる鏡（ガルバノミラー）を設置し、1次元の分光データをスキャンして2次元の分光データを取得する分光器のこと。

○ DOI

デジタルオブジェクト識別子（Digital Object Identifier）、インターネット上のデジタルコンテンツに付与される国際的な識別子のこと。

○ 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、およびプラズマを専門とする外部有識者、なら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、岐阜県および地元三市（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および地元関係者で構成され、重水素実験の監視、およ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。