

定常高温核融合プラズマを実現する粒子・エネルギー循環の学理

① 計画の概要

核融合発電は温暖化とエネルギー枯渇の問題を解決するとともに、我が国の成長・発展に大きく貢献する。現行の「超高性能プラズマの定常運転の実証」は、原理的に定常運転が可能で大型ヘリカル装置 (LHD) を用いて核融合に必要なプラズマを“短時間”ではあるが実現・維持できることを示し、その学理を明らかにする計画である。実用化に向けて解決すべき残された課題は「燃焼プラズマの制御」と「核融合プラズマの定常制御」である。本計画は後者に取り組み、世界に先駆けて本課題を解決する。前者は国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画が担い、2030 年代に解決される予定である。

最近の定常運転の研究で、プラズマ性能は中心部の熱・粒子輸送、安定性だけでなく、周辺部のプラズマと真空容器壁の間に循環する粒子・エネルギーの影響を強く受けることが分かってきた。周辺プラズマではイオンが荷電交換を行い、中性粒子となって壁に衝突、吸蔵される。一方、吸蔵された粒子は後続の粒子の衝突により不純物となる壁の構成材料とともに叩き出され、プラズマ周辺部に達した時点で電離する。定常状態になると壁の吸蔵が飽和して、壁に向かう粒子とプラズマに向かう粒子の量が等しくなるが、そこには様々な不可逆変化を伴う非平衡過程が内在しており、吸蔵が続いている短時間放電時と比べ粒子制御が困難になる。このためプラズマ性能が大きく劣化することが危惧される。

これまでの研究では、1 時間程度の放電を行っても壁の吸蔵能力は飽和状態に至らず、定常プラズマは実現していない。本計画では定常運転性能に優れた LHD を改造して壁飽和の状態を実現し、真に定常の学理を解明することを目指す。このため真空容器壁を現行の炭素から金属に変えて壁飽和を実現し、定常維持状態で不純物も含めたプラズマと壁との間の粒子・エネルギー循環及びそのプラズマ性能との関係の学理を明らかにする。

② 学術的な意義

従来の定常プラズマ研究は、蓄積される熱の処理等、工学的な問題を解決し比較的性能の高いプラズマを長時間実現することを目指していた。しかし LHD で研究が進むにつれ定常の課題は、プラズマと真空容器壁間の粒子・エネルギー循環、及びそのプラズマ性能との関係の解明にあることが明らかになった。このようなプラズマ、気相、固相が共存する非平衡状態では、異なる時定数を有する現象間の相互作用が発現する。このため定常飽和状態を実現してそこで起こる現象を予測し、それを解明することが定常問題の本質である。本計画はこれに則った、これまでとは全く異なる定常問題解決のアプローチとなっており、学術的に一層重要なものとなる。

最も究極的な問題は、1 年にも及ぶ定常運転中に、核融合に必要な高性能プラズマを制御・維持できるかということである。高性能プラズマは多くの場合、輸送障壁で実現されているため、障壁が定常状態で安定に存在することが本計画で実証できれば、他の課題と合わせて定常核融合発電実現に向けたブレークスルーとなる。即ち、本計画終了後は、発電を実証する原型炉の設計が可能となり、核融合研究は次のステップに大きく踏み出すことができる。

また本計画は、定常プラズマを光源として利用する原子・分子過程の解析コード開発やデータベースの構築等、LHD の特徴を最大限に利用した応用研究の伸展にも貢献する。最近、LHD の長時間実験の成果を、中性子星合体時に発生する重力波に続く光の観測に適用し、金などの重金属の起源を解明する手がかりを、国立天文台と共同で初めて見出し発表した。このように、本計画で実施する定常プラズマ実験で得られる原子・分子過程における知見は、天文分野をはじめ、リソグラフィや光源開発など他の学術分野への波及効果も大きい。また、定常プラズマの高熱流束を利用した極限材料開発等への応用も期待される。

③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

核融合発電実現に向けて解決すべき 2 つの課題のうち、燃焼プラズマの制御は建設中の ITER が担う。ITER はプラズマ中に電流を流すことにより閉じ込め磁場を形成するトカマク方式であり、電流を流す必要から短時間の運転となるが、400~1000 秒の保持時間を予定している。

国内では、量子科学技術研究開発機構 (量研) がトカマク方式の定常化に向けて、高性能プラズマを数 10 秒間保持することを目指して、日欧協力の下 JT-60SA を建設し、2020 年の運転開始を予定している。このように、国内外で従来の高性能化研究から定常化研究に方向が変わってきており、定常化が核融合炉実現には非常に重要であることを具現している。

LHD は閉じ込め磁場形成にプラズマ電流を必要としない、原理的に定常運転が可能でヘリカル方式であり、本計画は最長のプラズマ保持能力を有する LHD だけがができるものである。数時間の長時間放電で到達する壁飽和状態において初めて実現可能となる定常プラズマに関する学理の解明を目指しており、世界に先駆けた研究計画である。本計画は ITER による燃焼プラズマ研究と並び、核融合発電の実現に大きく貢献する。

④ 実施機関と実施体制

本計画は、大学共同利用機関である核融合科学研究所 (核融合研) が実施主体となり、量研が連携研究機関となって推進す

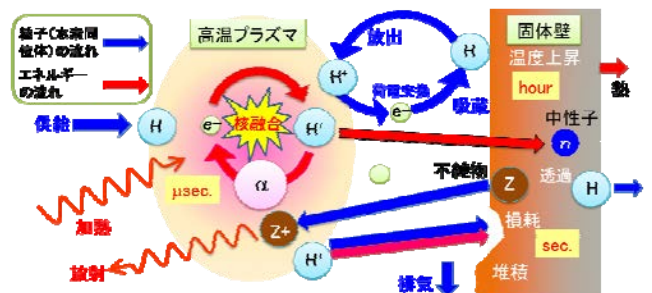


図1 定常状態における粒子・エネルギー循環

る。核融合研は、全国の大学・研究機関との共同研究により LHD プロジェクトを実施しており、その運営は核融合コミュニティからの推薦に基づいて構成された共同研究委員会により行われている。そして、LHD 実験は共同研究者を含む「LHD 実験会議」の責任の下で行われている。本計画も、引き続きこうした共同研究体制により実施される計画であり、大学等の研究機関から幅広く共同研究者が参画する全日本体制で推進する。核融合研は大学共同利用機関として、本計画の予算申請から LHD の改造、装置の運転、維持管理に責任を持ち、それにより LHD は全国の大学・研究機関の共同利用に供される。

一方、量研は連携研究機関として参画する。JT-60SA で計画されている、プラズマ中の電流維持等、トカマク方式特有の定常化研究を実施し、現状 LHD でしか行えない、壁が飽和した状態における定常研究と相互に関連させながら行う。

また、海外の協力研究機関として、マックスプランク協会プラズマ物理研究所、プリンストン大学プラズマ物理研究所等が参画し、プラズマ計測、理論解析等の課題に係る国際共同研究を実施する。

さらに、核融合コミュニティ全体の会議並びに学会シンポジウムにおいて複数回の議論が行われ、コミュニティ全体から合意が得られている。この経緯は 2019 年 2 月発刊のプラズマ・核融合学会誌に掲載されている。

⑤ 所要経費

本計画は、LHD の既存設備を最大限に活用した改造に係る経費と実験の遂行にかかる経費を主に必要とし、計画期間 6 年間で総額 352 億円となる。計画期間のうちの前半 3 年間は装置の改造及び試運転を含めた軽水素実験を行い、後半 3 年間はプラズマの高性能化が実証されている重水素を用いた実験を実施する。

建設費としては、既存の LHD 真空容器壁の金属化及びその定常冷却性能強化のための改造に 40 億円、加熱機器の定常高性能化改造に 13 億円、周辺プラズマ研究ステーションに 16 億円、計測機器の定常実験対応改造に 1 億円の合計 70 億円を計画している。運営費としては、実験実施のための運転経費及び LHD 本体・加熱装置のメンテナンス経費に 226 億円、光熱水経費に 56 億円の合計 282 億円を計画している。

⑥ 年次計画

本計画は 6 年間の研究期間で終了する。その遂行には長時間放電が生み出す広範な物理量を含む大規模データの解析が不可欠であり、博士研究員の雇用を計画している。また、核融合研は総合研究大学院大学物理科学研究科核融合科学専攻の基盤機関であり、同大学院生や連携大学院の院生、全国から受け入れている特別共同利用研究員（院生）の研究教育に供するとともに、国内外の若手共同研究者を積極的に受け入れ、人材育成に努める。これにより、ITER や世界の核融合分野で活躍できる人材を輩出する。

研究期間は、設備の改造と試運転及び軽水素を用いた実験を行う前半 3 年間で、重水素を用いる後半 3 年間に大別される。

【2023～2025 年度】2023 年度から 2024 年度前半は、真空容器壁の金属化及び同容器壁の定常冷却性能強化に向けた改造を行う。また周辺プラズマ研究ステーションの製作と設置、定常実験に対応した計測機器の改造も行う。2024 年度後半から 2025 年度前半は、放射線が発生しない軽水素プラズマを用いて、改造された機器の健全性を確認するための試運転を行う。更に後半 3 年間の重水素プラズマを用いた実験に向けた参照データを取得する。

【2026～2028 年度】2026 年度前半に加熱機器の定常高性能化に必要な改造を実施し、プラズマが高性能化する重水素を用いた定常実験を行う。真空容器壁が飽和した状態を実現し、定常プラズマ実験を実施する。このような、プラズマと真空容器壁間の粒子・エネルギー循環が促進された環境において、高性能定常プラズマ維持の実現を目指すとともに、粒子・エネルギー循環とプラズマ性能との関係を明らかにし、核融合炉実現に必要な不可欠なプラズマ定常維持・制御に係る学理を解明する。

本計画終了後は、LHD プロジェクトで得られた知見を基に、経済性を高めた定常核融合炉の実現に必要な理学・工学研究に移行する。

⑦ 社会的価値

核融合発電の実現は、CO₂ による温暖化問題とエネルギー枯渇問題を一気に解決することになり、我が国の成長・発展に大きく貢献する。即ち、燃料は海水中の重水素とリチウムであり、エネルギー資源の乏しい海洋国家である我が国にとって、核融合発電実現の経済的・産業的価値は図りしれない。我が国では現在、CO₂ を排出しない再生可能エネルギーの導入を積極的に推進しているが、経済性、安定供給などが課題として挙げられている。安定で発電量の調整できる核融合発電は、基幹発電として開発が急務である。

核融合発電は、国際連合が定めた持続可能な開発目標（SDGs）の 17 のグローバル目標のうち、7. エネルギーをみんなにそしてクリーンに、9. 産業と技術革新の基盤をつくろう、13. 気候変動に具体的な対策を、16. 平和と公正を全ての人に、の 4 つに直接的に貢献することができる。例えば 16 番目の目標では「持続可能な開発に向けて平和で包摂的な社会を推進…」とされている。核融合発電を実現すれば、枯渇する化石燃料を争わなくてすむことになり、平和に大きく貢献できる。このように、持続可能な社会には核融合発電の実現が必要不可欠である。

⑧ 本計画に関する連絡先

森崎 友宏（大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所）

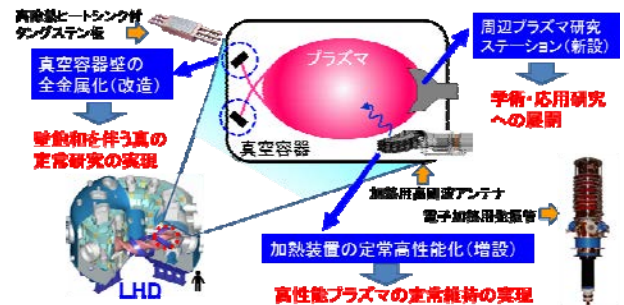


図2 本計画実施に向けたLHDの改造