

氏 名 坂東 隆宏

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1986 号

学位授与の日付 平成 30 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 LHD における重水素プラズマの MHD 不安定性に関する実験
研究

論文審査委員 主 査 教授 榊原 悟
准教授 大舘 暁
教授 藤堂 泰
教授 稲垣 滋 九州大学 応用力学研究所
主幹研究員 武智 学 量子科学技術研究開
発機構
那珂核融合研究所

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

磁場閉じ込め核融合炉を実現するためには、 β 値と呼ばれる磁場の圧力で規格化されたプラズマの圧力を高くすることが極めて重要となる。 β 値の高いプラズマ中では圧力勾配が増大するため磁気流体力学(MHD)不安定性と呼ばれる不安定性が励起される。このときプラズマの閉じ込め特性は劣化し、極端な場合にはプラズマは崩壊する。このように危険な MHD 不安定性が成長する条件を調べ、可能な運転領域を調べることは核融合炉を構想するうえで極めて重要である。また、核融合プラズマ中には、核融合反応で生成される α 粒子が存在している。DT 核融合反応によって生じた α 粒子は 3.53MeV という高いエネルギーを持つ。これは背景プラズマ(バルクプラズマ)の平均エネルギーよりはるかに高い。高いエネルギーを持つ α 粒子はプラズマの加熱源となる一方、 α 粒子などの高エネルギー粒子(Energetic Particle: EP)は MHD 不安定性の励起条件に大きな影響を与える。例えば、トカマク装置で観測される fishbone 不安定性は、マージナルに安定な内部 kink 不安定性が EP 粒子の圧力によって不安定化するものである。高エネルギー粒子駆動 MHD 不安定性の励起はプラズマの加熱源である α 粒子の損失を招くために特に危険であると考えられていて、その挙動を詳しく調べる必要がある。

ヘリカル型の磁場閉じ込め装置である大型ヘリカル装置(LHD)においては、プラズマの加熱用に使用される中性粒子ビーム入射装置(NBI)によって高エネルギー粒子(EP)がプラズマ中に入射される。垂直 NBI によって入射された EP は磁場に垂直方向の速度成分が大きく磁場の弱いヘリカルリップルと呼ばれる領域に閉じ込められて低速の歳差運動を行う。ヘリカルリップルに捕捉された EP の圧力が高まると、高エネルギー粒子駆動抵抗性交換型不安定性(EIC)と呼ばれる MHD 不安定性が励起されることがこれまでの軽水素プラズマ実験で報告されてきた。EIC は、プラズマ周辺部に位置する $i=1$ の有理面に局在する抵抗性交換型不安定性と、EP の歳差運動とが共鳴することにより励起される。EIC 励起時には、EP 粒子の損失によるものと考えられる大きな負電位の形成が観測されている。

LHD では重水素プラズマを使った実験が 2017 年 3 月から開始された。重水素プラズマ実験の開始に際して、垂直 NBI は重水素ビームを入射するよう改造され、加速エネルギー・入射パワーが共に増大した。その結果、プラズマ中のヘリカルリップルに捕捉された EP の圧力が増大した。本論文は LHD における圧力駆動型の MHD 不安定性の振舞い、特に、重水素プラズマ実験時の EIC の振る舞いについて詳しく調べた結果を報告する。

重水素実験において垂直 NBI の入射エネルギーが増大したため、EIC の初期周波数の入射エネルギー依存性を調べることができた。入射エネルギーの増大に対応して初期周波数が高くなることが観測された。その周波数は高エネルギー粒子軌道を計算することで得られた歳差運動周波数と概ね一致していた。EIC が確かに EP 駆動の MHD 不安定性であることをこの結果より示した。

EIC はバルクプラズマの圧力勾配に加えて有理面における高エネルギー粒子の圧力勾配によって駆動されていると考えられている。高エネルギー粒子の β 値は磁気計測とプラズマの温度・密度計測から評価でき、ここでは $\beta_{h\perp}$ と表記する。重水素実験時には EIC 励起時の $\beta_{h\perp}$ の値が、軽水素実験時のそれより明確に高いことが分かった。励起時のバルクプ

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

ラズマの圧力勾配は大きく変化していないため、EIC を駆動するために必要な EP 圧力の勾配が増大していると考えられる。すなわち、EP の影響は軽水素ビームと重水素ビームとは異なり、重水素実験時には高い EP 圧力勾配が励起に必要であると考えられる。より高い EP 圧力が駆動する EIC はいったん励起されると、より大規模な EIC イベントに成長する。それは、励起時の $\beta_{h\perp}$ が高いほど、(1)EIC 励起時に観測される磁場揺動の振幅が大きくなること、(2)中性子計測によって推定された EP 圧力の低下がより大きくなることから裏付けられる。さらに(3)プラズマ中に生成される負の電位が軽水素実験時より大きいことから、より多くの EP 粒子が EIC によってプラズマ外側に輸送されていると考えられる。この形成される電位の大きさは軽水素プラズマ実験時の少なくとも 2 倍程度の大きさである。

大きな電位形成に伴う電場シアの形成によると考えられるプラズマの輸送の変化から、一時的な電子密度・温度の上昇も観測されている。これらの研究から、重水素実験期では EIC が安定化した一方で、EP・バルクプラズマへの影響はより大きくなったことが明らかになった。

核融合反応による中性子発生を伴うような LHD における重水素実験や、ITER や JT-60SA のような次世代閉じ込め装置での実験のような高い放射線環境下であっても、MHD 不安定性の研究を継続して行うためには、放射線耐性の良好な揺動計測器の開発が不可欠である。MHD 不安定性などのプラズマ中の揺動現象の空間構造の変化を、多様なプラズマパラメータで安定して計測するために、高中性子環境下で使用可能なシンチレータ式軟 X 線検出器の開発を行った。プラズマからの軟 X 線放射計測は、磁気面の変形による軟 X 線放射強度の変化を高感度でとらえることができるため MHD 不安定性研究に有用であり広く使われている。この目的で従来用いられてきた半導体検出器は、高中性子束環境下では放射線による半導体の損傷によりその使用は困難となる。そこで、半導体検出器よりもより中性子・ γ 線に対して高い耐性を有するシンチレータを使用した軟 X 線計測システムを開発した。シンチレータ式の軟 X 線計測器はプラズマの近傍に設置したシンチレータによって軟 X 線を可視光に変換し、可視光を光ファイバーによって放射線の影響の小さい領域に導いてそこで電気信号に変換するものである。検出器には厚み 50 μm 程度の薄膜の無機シンチレータを用いる。薄膜シンチレータは、軟 X 線を十分に吸収する一方、高エネルギーである γ 線をほとんど吸収しないと考えられる。また、このような条件ではシンチレータの体積が十分小さくなるため、中性子の影響も無視できるレベルに低減可能となる。このことを確認するために、計測装置の設置予定位置における中性子・ γ 線フラックスからシンチレータに与える影響を放射線輸送コード MCNP・PHITS を用いて見積もった。見積もり値を、中性子線源、 γ 線源を使った検証を行ったうえで、計測に必要な放射線シールドの厚みを決定し LHD に実装した。プラズマ実験時に軟 X 線計測器として良好に動作することを確認した。大規模な MHD 現象による揺動信号が計測可能であり、MHD 揺動の空間構造の推定も可能であった。また、LHD での重水素実験の前後で感度に変化はなく、高中性子束環境下で継続的に使用可能な計測器であることの原理実証実験に成功した。LHD 用の計測器の開発に用いた手法を使って、次世代装置の一つである JT-60SA 装置においても、十分に機能する計測器の設計が可能であることを示した。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

磁場閉じ込め型核融合炉を成立させるためには、炉の経済性の観点からプラズマの圧力を磁場の圧力で規格化した「ベータ値」を高くすることが必要となる。ベータ値の上限は、磁気流体力学(MHD)的不安定性の発現によって制限されており、その物理機構の解明および制御は、経済性の高い核融合炉の実現のために必要不可欠である。MHD不安定性は、プラズマ圧力やプラズマ電流を自由エネルギー源として成長するもののほかに、プラズマ中に存在する高エネルギー粒子が駆動源となり不安定性を励起することが実験、理論において明らかになりつつある。特に重水素・三重水素の核融合反応を用いる発電炉においては、反応の結果として高いエネルギーを持つ α 粒子が発生することから、高エネルギー粒子によって励起されるMHD不安定性に対する物理機構の解明およびプラズマの閉じ込め性能への影響評価は炉を設計する上で急務の課題である。また、実験を通じてこれらの物理特性を理解し、抑制制御するためには、放射線環境下でも十分適用可能であり、かつ空間分解能の高い計測機器の開発が重要となる。

大型ヘリカル装置(LHD)における研究では、プラズマ圧力を自由エネルギー源として成長する交換型不安定性については、より高温領域では安定化するが、高エネルギー粒子の圧力が大きい場合には不安定性の成長を促し、ヘリカルリップル捕提高エネルギーイオン励起抵抗性交換型モード(EIC)としてプラズマの閉じ込め性能に影響を与えることが実験において明らかになっている。そこで出願者は、軽水素・重水素実験において、EICの物理的性質、およびプラズマ粒子の輸送現象に影響を与える「スネーク」と呼ばれるMHD振動の空間構造を詳細に観測した。併せて、高放射線環境下での実験時におけるMHD揺動の計測手段として運用可能な軟X線検出器の開発を行い、その性能向上について検討を進めた。

論文の第1・2章では、本研究の背景が述べられるとともに、MHD不安定性に関する先行研究のレビューが行われた。第3章から第5章においては、実験装置や解析に必要な揺動解析手法の説明等がなされた。第6章では重水素ビームを使用した実験におけるEICの特性について、以下の新しい成果が報告された。磁場の弱い領域に捕捉された粒子は、磁場の極小点を中心に振動しつつ歳差運動と呼ばれるドリフト運動を行うが、1) EICの初期周波数と捕捉粒子の歳差運動の周波数が、重水素ビームを使用した実験においても一致することが観測され、歳差運動とMHD揺動との共鳴がEICの励起に必要であることを明確に示した、2) 大規模なEICによるバーストのモード構造は径方向に広がっており、磁場揺動強度とEICの径方向幅に相関がある事が示された。捕捉粒子のエネルギーが高いほど、EICは高エネルギー粒子やバルクプラズマの閉じ込め特性に大きな影響を与えることを明らかにした。第7章では水素ペレット入射直後のMHD振動の空間構造について述べ、3) 抵抗性交換型不安定性と、スネークと呼ばれる振動現象を引き起こすヘリカル形状の不純物局在化が、有理面近傍で径方向に隣接して共存する、という新たな発見を報告した。第8章では、高放射線環境下でもMHD揺動分布計測を可能とする新型の軟X線計測装置の開発に関し、4) $50\mu\text{m}$ 程度の薄膜シンチレータにより軟X線を可視光に変換し、光ファイバーで放射線の影響の少ない領域に導いて電気信号に変換する方式が適応可能であり、5) 当該方

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

式はLHDの重水素実験で試験され、放射線による損傷が検出されず、次世代核融合実験装置における揺動計測機器として必要な特性を有する、ことが報告された。第9章では全体の総括が行われた。

以上のように、本研究は重水素プラズマにおけるMHD揺動の空間構造を観測することにより、高エネルギー粒子駆動MHD不安定性の特性を明らかにし、高エネルギー粒子が駆動する不安定性が重要視される核反応環境下においても適用可能な空間分解能の高い計測機器の開発を進め、計測機器開発の指針を示した。よって、本審査委員会は本論文が博士学位論文(工学)に値すると認め、合格と判定した。