

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760668

研究課題名（和文） トロイダル磁場リップルの周辺プラズマ構造形成への影響に関する研究

研究課題名（英文） Study on the influence of toroidal magnetic field ripple on the formation of peripheral plasma structure

研究代表者

浦野 創（URANO HAJIME）

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・研究副主幹

研究者番号：70391258

研究成果の概要（和文）：

トカマク式核融合炉においてプラズマ周辺部に形成される輸送障壁によって閉じ込めが改善される高閉じ込めモード(Hモード)を対象として、トロイダル磁場リップル（コイルによって必然的に存在する磁場の非対称性）が周辺プラズマ構造と周辺部に局在する不安定性に及ぼす影響を解明した。特に高プラズマ電流放電ではトロイダル磁場リップルの増加に伴って周辺プラズマ圧力の低下が発生することが分かった。

研究成果の概要（英文）：

In the H-mode plasmas where the confinement is improved by the edge transport barrier in tokamak devices, the influence of toroidal field ripple on the edge plasma structure and edge localized mode instability has been investigated. In particular, the edge plasma pressure is reduced by the increase in the toroidal field ripple in high plasma current discharges.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：炉心プラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

次世代の核融合研究開発の世界的な中枢を担う国際熱核融合実験炉 ITER では、炉心プラズマの周辺部に形成される輸送障壁（周辺ペデスタル）によって閉じ込めが改善されるHモードを標準運転方式としている。特に、このHモードはプラズマ境界近傍に局在した

不安定性(ELM)を伴い、プラズマ周辺部の構造を決定している。ITERに代表されるトカマクというプラズマ閉じ込め方式では有限個のトロイダルコイルの存在によって、必然的にトロイダル磁場の非軸対称性（トロイダル方向に存在する磁場の強弱のことでトロイダル磁場リップルと呼ばれる）が発生する。近年の研究で、このトロイダル磁場リップル

の存在が周辺プラズマの閉じ込め性能を劣化させる可能性が指摘されている。従って、トロイダル磁場リップルの周辺プラズマ構造への影響を理解し、適切に制御することは、周辺構造を含めたプラズマ全体の性能を向上させるために極めて重要である。

しかし、トロイダル磁場リップル構造がプラズマ性能に影響を及ぼす実験結果が観測されたのは最近のことで、この研究は端緒にすぎたばかりである。特に、トロイダル磁場リップルの存在はプラズマ周辺部の高速イオンの損失を促し、その結果、プラズマの回転速度を変化させることが知られている。近年では、トカマクではこのプラズマ回転速度または回転速度の振れ（回転シア）がプラズマ閉じ込めに重要な役割を果たすと考えられている。従って、周辺プラズマ構造に対するトロイダル磁場リップルの影響を明らかにし、適切に制御することは、プラズマ周辺空間分布構造およびELM特性を相互に決定するプラズマ境界構造形成の物理を解明することにもなり、本研究は現在の国際的活動における最重要課題として位置付けられている。

## 2. 研究の目的

本研究ではトカマク式核融合炉においてプラズマ周辺部に形成される輸送障壁によって閉じ込めが改善される高閉じ込めモード(Hモード)を対象として、トロイダル磁場リップルが周辺プラズマ構造と周辺部に局在する不安定性に及ぼす影響を理解し、将来の核融合炉における周辺プラズマ性能を定量的に予測することを目的とする。

本研究はトカマク装置に本質的に存在するトロイダル磁場リップルの影響を理解した上で、高性能化へ向けた適切な指針を得るとい核融合炉実現に向けた革新的な研究である。また、本研究で得られる炉心プラズマの境界構造特性の総合的な理解は更なるプラズマの総合性能向上への指針を与え、能動的プラズマ制御の研究開発へと発展するという将来性がある。

## 3. 研究の方法

本研究では、核融合炉心プラズマという磁場で閉じ込められた電磁流体を異なる拡散過程が支配すると考えられる要素（粒子的要素及び空間的要素）に分離し、要素間の相関と結合の結果として系全体の燃焼プラズマ特性を評価する。これまで様々なトカマク装置で発見されている各種の高性能閉じ込めモードの輸送特性に対して、系統的な理解が進められてきたが、これらの多くはプラズマ電流等の巨視的なパラメータに対する零次

元的取り扱いに依った議論である。本研究では、これらの議論を拡大し、局所的なパラメータの効果、及び局所量と系全体との相関を取り扱う。すなわち、密度、温度、圧力及び電流等の各種パラメータの空間的な分布効果（空間的要素）に重点を置き、装置固有の特性を取り入れて解析する。従って、これらの着目点に基づき、電子系及びイオン系プラズマ（粒子的要素）の精度の高い分布データを用いて局所量と全体量の相関を扱った研究を遂行する。

本研究では、従来Hモード閉じ込め性能に關与するパラメータとして扱われていなかったトロイダル磁場リップルによる周辺構造への影響を定量的に解明することに着目している。周辺ペデスタル構造の性質をトロイダル方向に非一様に分布するトロイダル磁場リップル構造及びその変化に伴う周辺トロイダル回転速度の観点から理解する。十分な核融合出力を満たす高閉じ込め炉心を実現するために必要な境界プラズマのエネルギーを高く維持しつつ、電磁流体力学的なプラズマ崩壊のリスクを低減するために、定常的に存在するトロイダル磁場リップルの影響を正確に理解する。

## 4. 研究成果

ITERで許容できるトロイダル磁場リップル率を評価することは、フェライト鋼設置位置および厚みを定める上で重要であるため、トロイダル磁場リップルによる周辺プラズマ構造と周辺部に局在する不安定性に及ぼす影響の解析を行った。

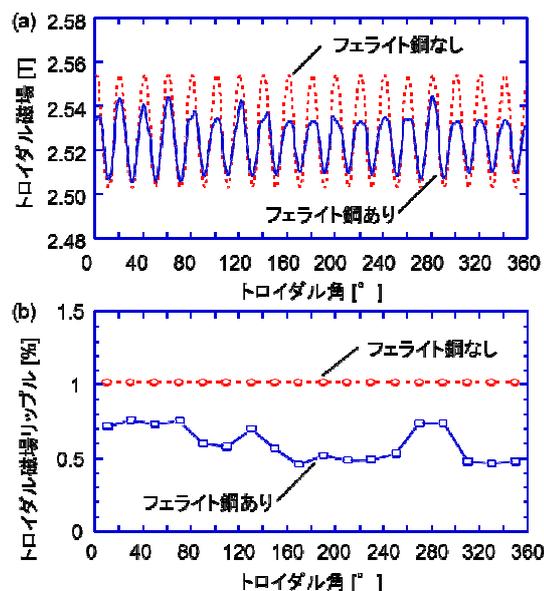


図1. トロイダル方向の磁場分布（大半径 4.28m、赤道面上側 0.2m）及びトロイダル磁場リップル分布。

日本原子力研究開発機構 JT-60 装置では 18 個のトロイダルコイルでフェライト鋼によるトロイダル磁場リップル低減実験を実施した。図 1 に示すようにフェライト鋼導入によってトロイダル方向に分布するトロイダル磁場の振動およびトロイダル磁場リップルが大きく低減した。

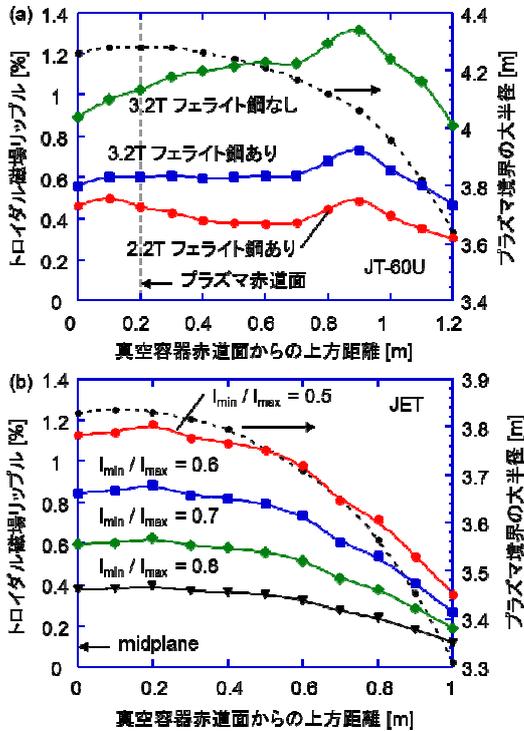


図 2. 日本原子力研究開発機構 JT-60 装置と英国カラム研究所 JET 装置におけるトロイダル磁場リップルの相違。

英国カラム研究所の JET 装置では、隣り合うトロイダル磁場コイルに流す電流比を変化させることでトロイダル磁場リップルを変化させる実験を実施した。図 2 に示すように、両装置でトロイダル磁場リップルの変化が大きい領域が異なる。JT-60 装置では、真空容器赤道面から上方にあるに従って、トロイダル磁場リップルは増大し、0.9m 付近で最大値となる。一方、JET 装置では、0.2m 付近で最大となる。

まず、低プラズマ電流 (1.1MA) での比較実験を実施した。図 3 に示すように JT-60 装置及び JET 装置の両方で、トロイダル磁場リップルによる周辺プラズマ電子密度及び電子温度の関係に顕著な変化は観測されなかった。唯一、プラズマ周辺部のトロイダル回転速度はトロイダル磁場リップルの増大に伴ってプラズマ電流と逆方向にシフトする様子が両装置で見られたが、プラズマ圧力分布及び閉じ込め性能には大きな差異が見られなかった。

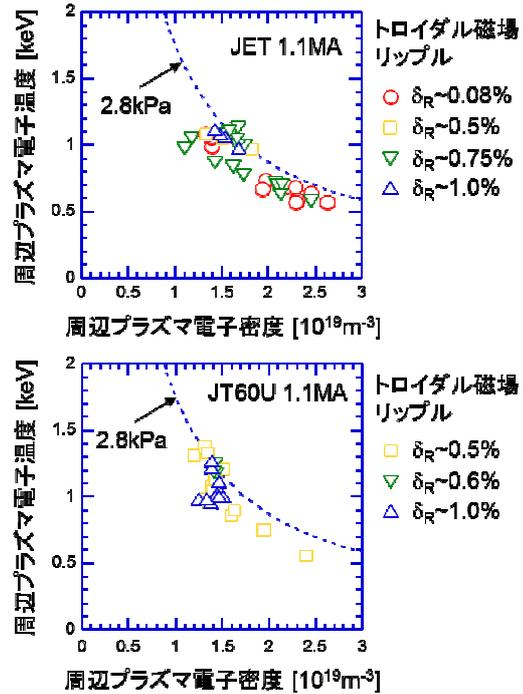


図 3. 日本原子力研究開発機構 JT-60 装置と英国カラム研究所 JET 装置における低プラズマ電流時の周辺プラズマ電子密度及び電子温度の関係。

次に、JET 装置において、高プラズマ電流 (2.6MA) でのトロイダル磁場リップルスキャン実験を実施した。1%以下のトロイダル磁場リップル率ではペDESTAL 圧力顕著な影響は見られなかったのに対し、図 4 に示すように、トロイダル磁場リップル率の増加に伴って、周辺プラズマ電子密度が低下した。周辺プラズマ電子温度の領域については大きな変化は見られなかった。その結果、トロイダル磁場リップルの増加に伴うペDESTAL 圧力の低下が観測された。

特に、プラズマ周辺部のトロイダル回転速度の変化は著しく、プラズマ境界近傍に局在する不安定性 (ELM) の周波数がトロイダル回転速度の減少とともに顕著に増大した。

今回比較実験を実施した JT-60 装置及び JET 装置の両装置において、トロイダル磁場リップルの増大に伴うトロイダル回転速度の減少と到達プラズマ密度の減少が確認できた。しかし、このような変化はプラズマ衝突周波数の低い高プラズマ電流での放電で見られ、プラズマ衝突周波数の高い放電では明瞭ではない。

今後、プラズマ衝突周波数などのプラズマ周辺領域で将来の装置で外挿可能な無次元パラメータでトロイダル磁場リップル率の影響が大きくなる領域をさらに詳しく調べていく予定である。

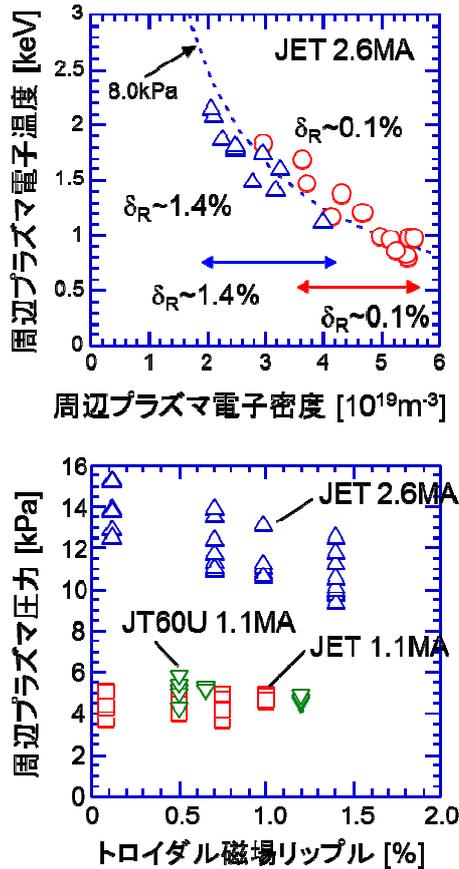


図4. 英国カラム研究所 JET 装置における高プラズマ電流時の周辺プラズマ電子密度及び電子温度の関係。トロイダル磁場リップルと周辺プラズマ圧力との関係。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 浦野創, G. Saibene, 大山直幸, V. Parail, P. de Vries, R. Sartori, 鎌田裕, 神谷健作, A. Loarte, J. Lönnroth, 坂本宜照, A. Salmi, 篠原孝司, 竹永秀信, 吉田麻衣子, JT-60 チーム, 欧州核融合開発協定 JET メンバー, Comparison of Pedestal Characteristics in JET & JT-60U Similarity Experiments under Variable Toroidal Field Ripple, Nuclear Fusion, 査読有, 51 巻, 2011, 113004
- ② 浦野創, 大山直幸, 神谷健作, 相羽信行, 鎌田裕, 藤田隆明, JT-60 チーム, The unified effect of counter-toroidal rotation and power across separatrix on type-I ELMs in JT-60U, Nuclear Fusion, 査読有, 52 巻, 2012, 103012
- ③ 浦野創, 滝塚知典, 藤田隆明, 鎌田裕,

仲野友英, 大山直幸, JT-60 チーム, Energy confinement of hydrogen and deuterium H-mode plasmas in JT-60U, Nuclear Fusion, 査読有, 52 巻, 2012, 114021

- ④ 浦野創, 滝塚知典, 菊池満, 仲野友英, 林伸彦, 大山直幸, 鎌田裕, Small Ion-Temperature-Gradient Scale Length and Reduced Heat Diffusivity at Large Hydrogen Isotope Mass in Conventional H-Mode Plasmas, Physical Review Letters, 査読有, 109 巻, 2012, 125001

[学会発表] (計4件)

- ① 浦野創, Comparison of Pedestal Characteristics in JET & JT-60U Similarity Experiments under Variable Toroidal Field Ripple, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, 大田・韓国, 2010年10月11-16日
- ② 浦野創, JET 及び JT-60 比較実験におけるトロイダル磁場リップルによる周辺ペデスタル特性への影響, 第27回プラズマ・核融合学会年会, 北海道 札幌市, 2010年11月30-12月3日
- ③ 浦野創, Dependence of heat transport on isotropic composition in conventional H-mode plasmas in JT-60U, 24th IAEA Fusion Energy Conference, サンディエゴ・米国, 2012年10月8-13日
- ④ 浦野創, Unified effects of counter toroidal rotation and power across the separatrix on type-I ELMs in JT-60U, 第29回プラズマ・核融合学会年会, 福岡県 春日市, 2012年11月27-30日

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

浦野 創 (URANO HAJIME)

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・研究副主幹

研究者番号: 70391258