

平成 21 年 4 月 17 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2006 年度～2008 年度
 課題番号：18760638
 研究課題名（和文）磁場構造の差異を超えたヘリカルプラズマ内部輸送障壁形成物理の系統的理論研究
 研究課題名（英文）Systematic theoretical study on physics of internal transport barrier formation in helical plasmas beyond the difference of magnetic configuration properties
 研究代表者
 横山 雅之 (YOKOYAMA MASAYUKI)
 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・准教授
 研究者番号：60290920

研究成果の概要：種々の概念に基づいた各種ヘリカル系プラズマ閉じ込め実験において、共通に観測されている、中心部電子熱輸送閉じ込めの改善モードに対して、低衝突ヘリカルプラズマに特有な電場分岐性によって、その発現閾値が規定されていることを系統的な理論解析によって示し、中心部電子ルート閉じ込め(Core Electron-Root Confinement : CERC)として、学術的な体系的理解をもたらした。また、近年の大型ヘリカル実験装置(LHD：核融合科学研究所)における高イオン温度プラズマで、径電場による低衝突周波数での輸送増大が避けられていることを示した。さらに、その予測された径電場の実験検証を通じて、CERC とともに、ヘリカルプラズマにおける新古典両極性径電場解析が、広いパラメータ空間において高い妥当性を有していることを示し、核融合炉心級ヘリカルプラズマに向けてのさらなる改善閉じ込めシナリオの提示、その実現に向けた理論検討を行う上での確固たる根拠となることを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	270,000	3,270,000

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：磁場核融合、ヘリカルプラズマ、閉じ込め磁場構造、閉じ込め改善、内部輸送障壁、中心部電子ルート閉じ込め、高イオン温度プラズマ、両極性径電場

1. 研究開始当初の背景

世界各地でのヘリカル装置における電子系内部輸送障壁に関する実験結果の蓄積、また、コンパクトヘリカルシステム(CHS：核

融合科学研究所)における十分なイオン加熱下でのイオン系内部輸送障壁形成は、径電場遷移による構造形成・閉じ込め改善の例として広く認識されている。LHD・CHS における内部輸送障壁形成における閾値の存在は、

申請者による「低衝突周波数領域ヘリカルプラズマにおける新古典的径電場分岐」という視点の提唱によってその理解が格段に進展してきているところである。この業績に基づき、申請者が、ドイツ(Max-Planck)の W7-AS、スペイン(CIEMAT)の TJ-II での電子系輸送障壁も含めた形での「ヘリカルプラズマにおける内部輸送障壁の物理」についてのレビュー講演をするに至っている(平成 17 年 10 月の第 15 回国際ステラレータワークショップ)。

各種ヘリカル系での輸送障壁に関する実験結果の蓄積・さらに、国際協力(申請者は日本における担当者の一人)によって進展してきている新古典輸送解析コードのベンチマーク作業という背景は、互いに異なった特色を持った磁場構造における統一的かつ定量性の高い理論解析を展開できる状況をもたらしている。

そこで、ヘリカル系内部輸送障壁に関して幅広い磁場配位空間で系統的理論研究を展開する。

本研究により、

- ・磁場配位の非軸対称性と内部輸送障壁形成閾値との関連についての系統的・定量的理論解析
 - ・LHD におけるイオン系内部輸送障壁形成可能性の検討・その実験検証
- などの進展を図る。

2. 研究の目的

ヘリカル系内部輸送障壁は、新古典的径電場分岐をその背景物理として理解が進展しているが、装置の違いを超えた定量的理解は、ヘリカル系における統一的知見の創出、炉心級プラズマへの外挿性を考える上で不可欠である。本研究はこれらの目的に対して、ヘリカル系特有の「磁場構造の非軸対称性」に着目して理論解析を展開する。本研究によって、磁場構造の非軸対称性と内部輸送障壁形成閾値との関連についての系統的・定量的理解が得られることが期待される。また、ヘリカル系プラズマ中心部における閉じ込め高性能化に向けて、磁場構造の差異を超えたヘリカル系を俯瞰する系統的理解が進展するものと期待される。

世界のヘリカル系研究において、「国際ステラレータ/ヘリオトロン分布データベース」(International Stellarator/Heliotron Profile DataBase)を構築して、装置の違いを超えた統一的な物理研究を展開しようとする動きがあり、その中で内部輸送障壁はその分布の特徴、実験結果の蓄積状況からすでに着手され、申請者による上記のレビュー講演で、初めての共同作業論文として紹介されたところである。これにより、LHD・CHS のみならず、

W7-AS や TJ-II での実験結果も含めた形での系統的な理論解析が可能となりつつある。

申請者は、研究開始当初まで、主に LHD・CHS での理論解析を進展させてきていたが、この装置の中心部(輸送障壁形成領域)における磁場構造の非軸対称性は磁場配位を変えても大きく変化せず(磁場のヘリシティが中心部に向かって減少するため)、磁場配位の違いによる閾値への影響を明確に示すことが困難であった。W7-AS、TJ-II をも解析対象に含めることにより、この困難が大幅に除去される。特に、TJ-II は中心部で際立って大きな非軸対称性を有しているため、系統的な研究を遂行する上で重要な位置を占めている装置である。

新古典輸送解析コードのベンチマークにより、非軸対称性の閾値への影響に関して定量性の高い解析が可能となっている。本課題は、装置の違いを超えた「磁場構造の非軸対称性」が、「ヘリカル系特有の内部輸送障壁物理(閾値の存在)」に与える影響についての定量的明確化を目指した独創的な研究である。

LHD での高密度プラズマ、また、建設中の種々の磁場構造概念に基づいたヘリカル系装置、NCSX(準軸対称)・QPS(準ポロイダル対称)・W7-X(準等磁場配位)における輸送障壁形成に必要な ECH パワーの定量的予測が可能となり、世界のヘリカル系研究にも大きなインパクトを与えることが期待される。

3. 研究の方法

LHD・CHS における電子系内部輸送障壁に関しては、申請者のそれまでの理論・実験解析により、プラズマ中心部での径電場の電子ルートへの遷移(磁場構造の非軸対称性に強く依存)に基づいた、ECH パワー(⇒電子温度)閾値の理解(密度依存性も含めて)が進展してきている。しかし、ヘリオトロン系配位では、磁場配位を変えても中心部での磁場構造非軸対称性が大きくは変化せず、ECH パワー閾値の磁場構造依存性を系統的に探ることは困難であった。平成 17 年 10 月のステラレータワークショップでのレビュー講演に際して、W7-AS、TJ-II 装置における内部輸送障壁プラズマの密度・温度分布、加熱状況に関する情報などが集積した。その結果、磁場強度 0.88-2.5T、電子密度 $0.3-8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、ECH パワー 0.1-1.2 MW、NBI パワー 0-4.4 MW という広いパラメータ空間における内部輸送障壁プラズマのショットデータがそろっている。

また、内部輸送障壁形成領域における磁場構造非軸対称性を表す実効ヘリシティ(ヘリ

カル系における低衝突周波数領域での新古典リップル輸送レベルの指標)としては、LHD・CHSにおける値を1とした場合、W7-ASでは1-2、TJ-IIではその5倍という広がり確保できている。W7-ASでのECHパワー入射位置での磁場構造(磁場リップル)制御実験は、ECHによって加熱される捕捉電子割合を大きく変えることにつながり、対流電子フラックスと新古典電子フラックスとの比の変化を通して、磁場配位の効果を考える新たな視点を提供している。このような現状は、研究目的の具体的課題に取り組む十分な基礎データが揃っている状況を示している。

CHSにおける十分なイオン加熱下におけるイオン系内部輸送障壁形成は、ヘリカルプラズマの高イオン温度化を目指す上でも重要な実験事実である。LHDにおいても、平成17年度の第9サイクル実験より、従来よりも低エネルギーのNBIが導入され、イオンの直接加熱が可能となっている状況である。CHSでのイオン系内部輸送障壁プラズマに対する径電場解析、熱輸送解析を詳細に行うことにより、LHDにおけるイオン系内部輸送障壁形成が期待されるプラズマパラメータの理論予測、その実験検証を行う。これにより、電子系・イオン系双方の内部輸送障壁を統一的に扱う基盤が形成されることが期待できる。このことは、電子系とイオン系との熱交換が非常に弱い状況(decouple)での電子系内部輸送障壁のみの形成に関する知見からの質的な進展を意味し、炉心級プラズマにおける高密度状況下での内部輸送障壁形成に関する知見の創出につながるものである。

磁場配位の非軸対称性と輸送障壁形成閾値との関連についての系統的・定量的理論解析を進め、ヘリカル系における内部輸送障壁物理の系統的理解の進展について、学界および世界に発信することも重要目標の一つである。

4. 研究成果

LHD、CHS、TJ-II、W7-ASといった種々のヘリカル系プラズマ閉じ込め実験装置において共通に観測されている「プラズマ中心部の急峻な電子温度勾配」に関する系統的理論研究を展開した。これらの実験観測の背景として、低衝突周波数領域におけるヘリカル系特有の径電場分岐性(大きな正の径電場:電子ルート)が共通の物理機構であることを、高精度の新古典輸送計算に基づく両極性径電場解析と実験での径電場計測との対照から高い定量性を持った形で明確にした。電子ルートへの遷移がこの電子のエネルギー閉じ

込め改善にとって本質的であることが明確になったので、この共通現象の総称として、その物理機構を反映した「中心部電子ルート閉じ込め(Core Electron-Root Confinement, CERC)」という名称を先導的に提唱し、国際的にも認知されるに至った。

また、異なった磁場構造特性を低衝突周波数領域における新古典輸送特性という観点から統一的に評価するために、実効ヘリシティの概念を活用し、これら4配位での実効ヘリシティ評価に基づいて、CERC発現領域が、実効ヘリシティが大きな配位では高衝突周波数側にシフトする(より低い電子温度あるいは高いプラズマ密度で可能となる)ことを、理論的にも、また、蓄積された実験データからも明確にした。この新知見に基づいて、建設中のW7-X装置(ドイツ)、NCSX装置(米国)でのCERC発現可能性、その衝突周波数領域の相違に関する予測を行った。

平成18年10月のIAEA核融合エネルギー会議(中国・成都)において、この研究内容は国内・国際選考を経て、口頭発表に採択され、さらに、磁場閉じ込め核融合のサマリーにおいても取り上げられるなど、国際的評価も高い。

LHDにおいて進展した高イオン温度プラズマ生成実験では、温度分布に屈曲が現れ、イオン熱輸送の閉じ込め改善が実現していることが示唆されている。新古典両極性径電場は負(イオンルート)となることが新古典輸送計算から明らかとなり、これは、電子温度がイオン温度より高い状況の「中心部電子ルート閉じ込め」と対照的な性質である。負の径電場による低衝突周波数領域でのリップル輸送の抑制が示され、ヘリカル系プラズマにおける、径電場を活用した閉じ込め改善に関して、従来の知見を拡大することができた。これらについて、平成19年11月のアメリカ物理学会プラズマ分科会年会での招待講演を始めとして、各種の国内・国際学会において発表を行い、実際のプラズマショットを対象としたベンチマーク活動を開始する端緒を形成した。

LHDの高イオン温度プラズマでは、特徴的な、不純物の吐き出し現象(後述)により、荷電交換分光を用いた中心部の径電場計測が困難な状況であったが、平成20年度、重イオンビームプローブ(HIBP)計測により、中心部では、(大きさも含めて)ほぼ理論予測通りの負電場が形成されていることが検証された。このことは、本課題での理論予測の実験適用性を担保するもので、種々のヘリカル系でのCERCにおける電子ルートの理論予測の実験検証と併せて、ヘリカル系における改善閉じ込めモードに対応した径電場理論解析の広範な妥当性を確認することができ

た。本課題で展開してきた径電場解析に基づいて、核融合炉心級プラズマに向けてのさらなる高イオン温度プラズマの実現性、その高密度化、そこでの径電場分岐性を活用した閉じ込め改善シナリオを提示していく上での確固たる根拠となるものである。

イオン熱輸送の改善に伴い、中心部に存在していた不純物の吐き出しが観測され、特徴的な強い凹型不純物分布(不純物ホール)が形成される。新古典理論の描像からは、負電場では不純物の蓄積が予測されるが、この現象はその予測からは説明することができないため、何らかの異常輸送の存在を示唆しているものという認識に至っている。この不純物ホールの形成機構解明に向けて、炭素不純物や、さらに電荷数の高い不純物からの発光強度について、イオン温度勾配への依存性を系統的に調べるデータ整理をすることで、不純物ホール形成機構の解明を目指すという着眼での研究を進めている段階である。

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 M. Yokoyama et al., “Common Features of Core Electron-Root Confinement in Helical Devices,” Fusion Science and Technology, Vol. 50, p. 327-342 (2006) 査読有
- ② M. Yokoyama et al., “Core electron-root confinement (CERC) in helical plasmas,” Nuclear Fusion, Vol. 47, p. 1213-1219 (2007) 査読有
- ③ M. Yokoyama et al., “Extension of High-Ion-Temperature Regime in the Large Helical Device (LHD),” Physics of Plasmas, Vol. 15, p. 056111_1-056111_8 (2008) 査読有
- ④ K. Ida, M. Yoshinuma, M. Osakabe, K. Nagaoka, M. Yokoyama et al., “Observation of an Impurity Hole in a Plasma with an Ion Internal Transport Barrier in the Large Helical Device,” Physics of Plasmas, Vol. 16, p. 056111_1-9 (2009) 査読有

[学会発表] (計5件)

- ① M. Yokoyama et al., “The neoclassical plasma viscosity analyses relevant to high-ion-temperature plasmas in the Large Helical Device (LHD),” 17th

International Toki Conference/16th International Stellarator/Heliotron Workshop, 2007年10月16日(土岐市)

- ② M. Yokoayama et al., “Extension of High-Ion-Temperature Regime in the Large Helical Device (LHD),” Invited Talk of 49th Annual Meeting, Division of Plasma Physics, American Physical Society, 2007年11月13日 (Orlando, USA)
- ③ 横山 雅之 他 ” LHD における高イオン温度プラズマの新古典粘性・フロー解析,” 第24回プラズマ・核融合学会年会, 2007年11月27日(姫路市)
- ④ 横山 雅之 他 “LHD における高イオン温度水素プラズマの輸送特性,” 日本物理学会 第63回年次大会, 2008年3月23日(東大阪市)
- ⑤ 横山 雅之 他 “LHD における高イオン温度プラズマの輸送特性,” 第7回核融合エネルギー連合講演会, 2008年6月19日(青森市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 雅之 (YOKOYAMA MASAYUKI)
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・准教授
研究者番号：60290920

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号：