

令和元年5月31日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06659

研究課題名(和文) 周辺磁気流体不安定性の先進的制御と物理に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental research of advanced control and physics for edge localized mode

研究代表者

松永 剛 (Matsunaga, Go)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 トカマクシステム技術開発部・グループリーダー(定常)

研究者番号：10391260

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：ダイバータへの過大な熱負荷を危惧されている周辺局在化モード(ELM)について、先進的制御手法としてトロイダル磁場変調(TFM)法を提案し、原型炉への適用性について、磁場解析、高速イオン解析、構造解析などで評価を行った。その結果、TFM法により、ELM制御に必要な周辺磁場構造のストキャステイック化を、高速イオン閉じ込めを劣化させることなく可能であること、TFM法が工学的にも成立することを明らかにした。また、動的に摂動磁場を回転可能であり、誤差磁場補正コイルとしても使用可能な摂動コイルについて提案し、その成立性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合研究の大きな目標である原型炉の実現に向けて、成立性のある原型炉設計が求められているが、ELM制御、ダイバータ熱負荷制御として有効な手法を本研究にて発案しその成立性を確認した意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：We have developed an advanced control method as “Toroidal field modulation” for edge localized mode (ELM) that could induce unacceptable heat load to divertor target. To validate applicability of this method to DEMO design, magnetic field line tracing, fast ion analysis and mechanical analysis were conducted. These analysis results show that the TFM can produce enough stochasticization of edge region for ELM control without a degradation of the fast ion confinement, and the electromagnetic force analysis shows the TFM does not have any serious issues from the engineering points of view. Furthermore, the perturbation coil that can induce dynamic heat load control using rotating field and has applicability to error field correction as well, is proposed and confirmed to be available in DEMO.

研究分野：核融合プラズマ物理

キーワード：核融合炉 ダイバータ熱負荷 周辺プラズマ 三次元磁場 ストキャステイック磁場領域

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

核融合炉の標準的な運転とされている高閉じ込めモードでは、プラズマの周辺領域の圧力勾配が急峻となり、その勾配で駆動される周辺局在化モード(ELM)と呼ばれる不安定性が発生し、ITERや原型炉では工学的に許容できない熱負荷を間欠的にダイバータへ与える。そこで、ELMによる熱負荷を抑制または緩和する手法の確立が急務となっており、その一つが外部コイルにて共鳴磁場摂動(RMP)を印加する手法である。しかしながら、原型炉で想定される高い中性子環境下で使用可能なコイルの設計が工学的に困難であるため、原型炉におけるELM制御手法は確立していない。

2. 研究の目的

本研究では、ELMによる熱負荷を抑制または緩和する手法として、原型炉において実現可能と思われる高速イオン及びトロイダル磁場コイルを用いた先進的ELM制御手法を提案し、それらの適用可能性をプラズマ物理と核融合工学の両面から検証する。

3. 研究の方法

本目的を達成するため、既存データの解析と各種コードを用いた定量的評価を実施する。高速イオンを用いた手法については、外国実験装置において各種加熱装置を用いた実験を提案し、高速イオンを周辺プラズマに供給することで、高速イオンのELMへの影響を明らかにする。トロイダル磁場コイルを用いた手法については、原型炉のパラメータをもとに磁場構造解析、構造解析などを実施するとともに、高速イオン輸送への影響を評価し、原型炉シナリオとの成立性を確認する。

4. 研究成果

ELMの制御手法として成果を上げているRMP印加法[1]に着目しつつ、プラズマ近傍に配置した三次元磁場用コイルではなく、プラズマ閉じ込めのためのトロイダル磁場コイル(TFC)を用いた共鳴磁場生成法を提案した。通常、TFCはトーラス周回上に均等に配置され、同一のコイル電流を印加しトロイダル磁場を生成している。そこで、トロイダル磁場に周辺磁場と共鳴可能な低周期数の成分を有するように、コイル電流の配分を空間的に変調させる手法、すな

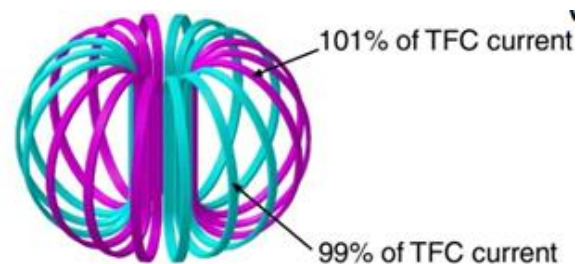


図1 トロイダル磁場変調法(TFM)の概念図(コイル数18で周期3)

わち「トロイダル磁場変調(TFM: Toroidal Field Modulation)法」を考案した。図1にTFCが18個、周期数3の場合の概念図を示す。プラズマ平衡を維持するためのTFC電流値に対し、数%のわずかな割合の電流の増減、すなわち変調を与えることで三次元磁場成分を生成し、周辺領域の磁場構造をストキャスティック化する手法である。磁場構造を検証するために、三次元磁場、三次元平衡を用いた詳細な磁力線追跡コードの開発・改良を行い、まずは現在建設中のJT-60SAのパラメータを用いて解析を実施した。TFM法により三次元磁場を生成すると周辺磁場の磁力線のピッチと共鳴する成分により、対応する有理面で磁気島が発生する。変調度を増加していくと、磁気島の径方向幅も増加し次第に隣り合う磁気島との距離が短くなる。磁気島同士が接触すると磁場構造がストキャスティックになり、径方向に横切る磁力線が発生する。本解析では、磁気島同士が接触する以前に、隣り合う磁気島のモード数の結合と考えられるサイドバンドの小さな磁気島が発生し、磁気島の接触以前に、磁力線がストキャスティックになることを観測している。TFM変調度±3%で、ELMの発生する圧力勾配の急峻な周辺全領域がストキャスティックになることが分かった。さらに、特に三次元磁場に影響されやすい周辺プラズマ領域を詳細に調査し、熱負荷を受けるダイバータターゲットへの磁力線入射角、入射位置、磁力線連結長などを統計的に解析した。図2にダイバータ領域の磁力線の連結長を示す。TFM変

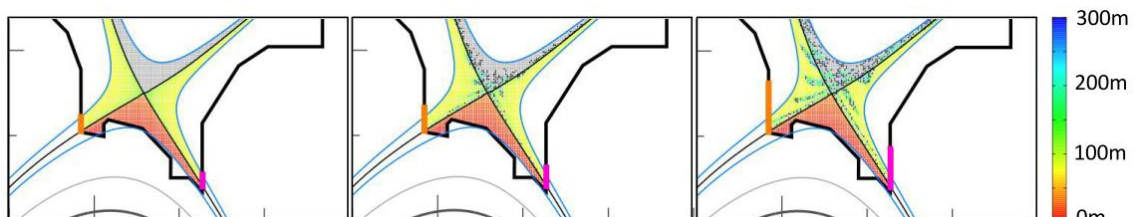


図2 トロイダル磁場変調(TFM)法によるダイバータ領域の磁場構造。色調は磁力線の連結長。(左:TFMなし、中央:TFM変調度±1%、右:TFM変調度±3%)

調度を上げるとダイバータ領域に、連結長の長い領域が発現しローブ構造を形成する。周辺領域の熱流速は磁力線に沿ってダイバータへ到達するが径方向輸送により拡がるため、長い磁力線の連結長は、熱流速の径方向の輸送を促し、ダイバータ熱負荷を平坦化する。したがって、ELM 制御として提案した TFM 法は、ELM 制御に必要とされる周辺磁場のストキャスティシティを確保しつつ、ダイバータターゲット上での磁力線入射位置を分散することが期待される手法である。これは、原型炉において共鳴磁場コイルを用いず、TFC のみでダイバータ熱負荷を緩和できることを示唆する。

この TFM 法を適用するには、TFC に変調した電流を印加可能かが重要である。通常、TFC に同一電流を印加するが、これは電磁力として発生する向心力を均等にする目的がある。TFM 法では変調に応じて TFC 電流に強弱がつくため、向心力が非一様になることが予想される。そこで、TFC 通電時の電磁力解析を有限要素法を用いて実施した。TFC の構造の詳細は、JT-60SA の設計データを用いている。図 3 に電磁力解析の結果を示す。本解析では、極端な例として TFM 変調度 $\pm 10\%$ を適用している。本解析の結果、各コイルに働く向心力は、TFM として印加した周期数と変調度に応じて発生していることが分かる。向心力に対応して、TFC 同士の接触面に発生するウェッジ負荷も変調される。本評価では、TFM によって発生する向心力の変調による応力で許容範囲を超えることはなかった。詳細な評価は引き続き必要であるが、TFM 法として TFC 構造上の本質的な影響はなく、TFM 法が工学的にも成立すると結論できる。

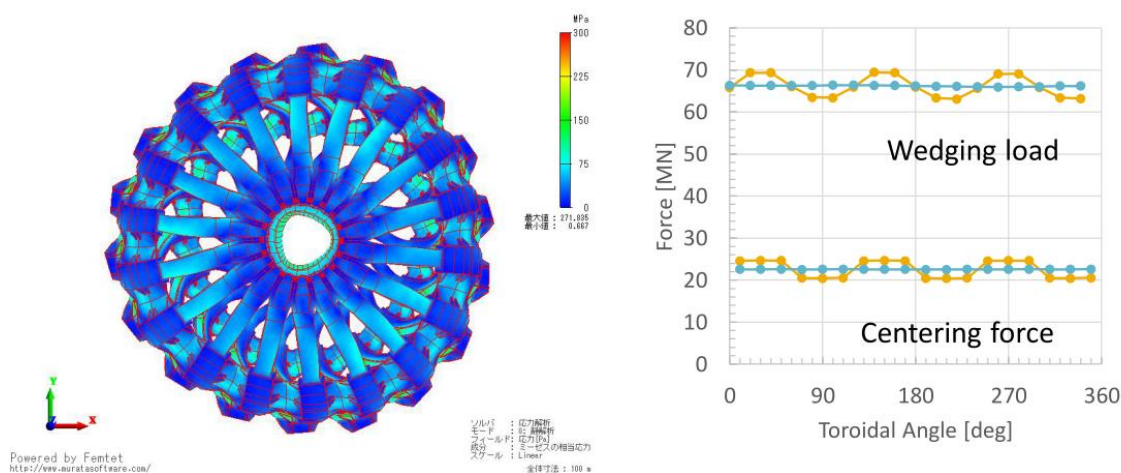


図 3 TFM 法を適用した場合の TFC に作用する電磁力 (TFM 変調度 $\pm 10\%$)。本解析では JT-60SA の TFC 構造を使用

これらの三次元磁場解析は、プラズマ平衡磁場と TFM 法によって印加した三次元磁場を合成して評価しておりプラズマの応答を考慮していない。そこで、プラズマ応答を計算できる HINT コード [2] にて、TFM 法印加時の磁場構造を原型炉のプラズマパラメータを用いて解析した。図 4 にプラズマ応答を考慮しない真空磁場、及びプラズマ応答を考慮した解析結果を示す。また、磁場強度の分布と併せて、磁力線のポアンカレ図を示す。プラズマ応答を考慮すると印加した三次元磁場に対応して、プラズマ中で共鳴磁場成分が 5 倍程度増幅することが観測され、周辺領域で磁場のストキャスティシティが増すことが分かった。この結果は、周辺領域をストキャスティック化するために印加する三次元磁場強度を効率化できる可能性を示している。ただし、今回のプラズマ応答計算には、プラズマ回転が含まれておらず、プラズマ回転に起因する遮蔽効果は今後評価する必要がある。また、TFM 印加時の高速イオンの閉じ込め、特に原型炉にお

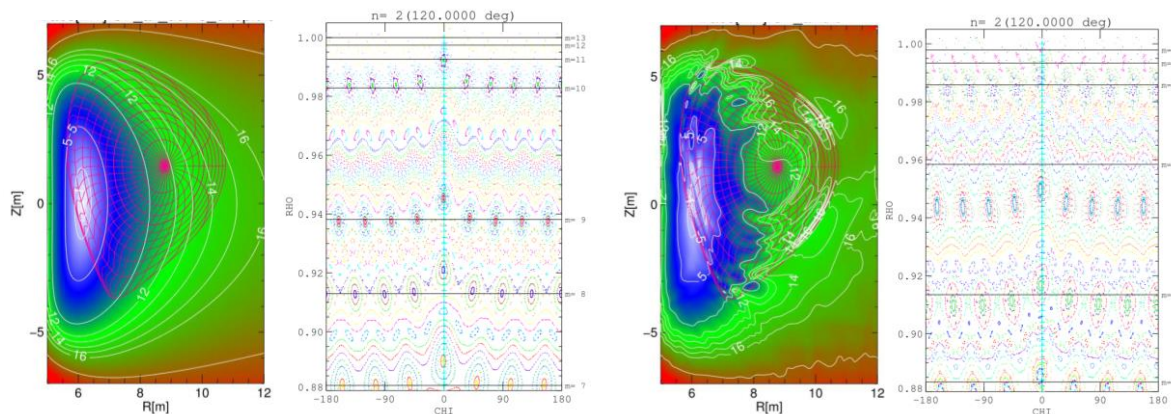


図 4 原型炉パラメータを用いた解析 (磁場強度とポアンカレ図)。(変調度 $\pm 1\%$ 。左:真空磁場、右:プラズマ応答)

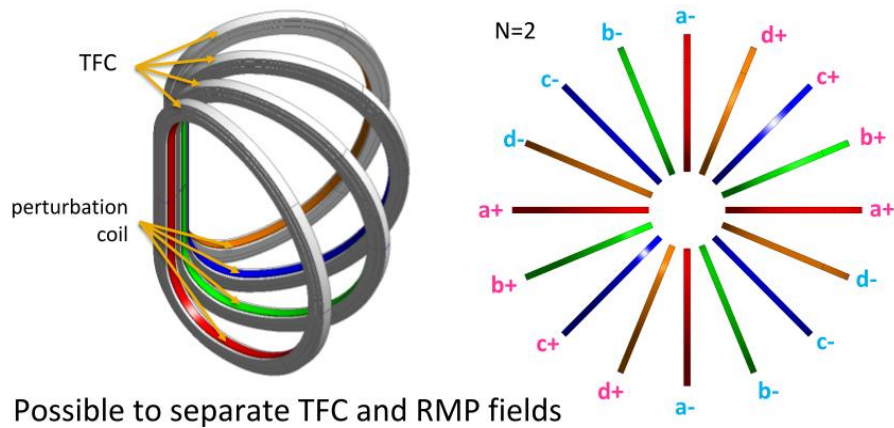


図5 新しく提案したTFM磁場摂動コイルとコイル結線。

いて重要な核融合生成アルファ粒子の閉じ込めへの影響について、OFMCコードで評価を行った。TFM変調なしでは0.1%程度であったアルファ粒子損失が、TFM変調度を±1%とすると0.5%程度まで損失が増加するが、この影響はかなり小さく、TFM法を原型炉に採用しても、核融合反応への影響は少ないと考えられる。

TFM法によって変化した周辺磁場構造を分析すると、トロイダル方向に磁場構造の局在化が観測されており、熱負荷も同様に局在化することが推測される。そのため、三次元磁場を動的に回転させることで局在化した熱負荷を時間的に移動する新たな手法をとして、磁場変調のために、TFCの内側に数ターンの摂動コイルを設置することを提案した。摂動コイルは、トロイダル方向に対して非軸対称の結線を行うため、自己誘導の大きなトロイダル磁場コイルと電気的に結合しない。そのため、時間的にコイル電流を変化させることが容易である。本手法について、原型炉設計のパラメータを用いて、FEM磁場解析にて動的な変調磁場の解析を進め、摂動コイルの動的特性を求めることで工学的成立性について評価を行い、実現に見通しがあることを確認した。また、誤差磁場補正としても利用可能であることを磁場解析から評価した。

ダイバータへの過大な熱負荷を危惧されているELMについて、先進的ELM制御手法としてトロイダル磁場変調(TFM)法が、原型炉においても適用可能であることを原型炉のプラズマパラメータをもとに、本手法で有意な周辺磁場構造のストキャスティック化が可能であることを磁場構造解析で、その周辺磁場構造が高速イオン閉じ込めに大きく影響しないことを高速イオン輸送解析で明らかにした。また、変調磁場を印加した時のトロイダル磁場コイルに掛かる電磁力について、FEMによる構造解析で評価し、構造上の問題がないことを確認した。さらに熱負荷を時間的に分散でき、かつ誤差磁場補正としても利用可能なコイルの提案に至るなど発展的な展開を得た。一方で、当初計画していた高速イオンを用いた手法については、外国装置での実験実施が研究代表者の役職の変更により困難となり、十分に実施できなかった。本研究課題で得られた成果は、1件の国際会議及び3件の国内学会において発表した。

- [1] T. Evans et al., Nuclear Fusion 45, 595 (2005).
- [2] Y. Suzuki et al., Nuclear Fusion 46, L19 (2006).

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計4件)

- ① G. Matsunaga, 他3名, New concept of edge stochastization by toroidal field modulation, 43th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2016年7月4日, Leuven, Belgium.
- ② 松永 剛, 他5名, トロイダル磁場変調による周辺のストキャスティック化, プラズマ・核融合学会 第33回年会, 2016年11月30日, 宮城県仙台市.
- ③ G. Matsunaga, 他4名, MHD Control by External Magnetic Field for DEMO, Plasma Conference 2017 (国際学会), 2017年11月22日, 兵庫県姫路市.
- ④ 松永 剛, 他5名, JT-60SAにおける超伝導コイル製作/組立後の誤差磁場の評価, プラズマ・核融合学会 第35回年会, 2018年12月3日, 大阪府吹田市.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：相羽 信行

ローマ字氏名：Nobuyuki Aiba

所属研究機関名：国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

部局名：那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部

職名：上席研究員

研究者番号 (8桁)：20414584

研究分担者氏名：篠原 孝司

ローマ字氏名：Koji Shinohara

所属研究機関名：国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

部局名：那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部

職名：上席研究員

研究者番号 (8桁)：50354600

研究分担者氏名：浦野 創

ローマ字氏名：Hajime Urano

所属研究機関名：国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

部局名：那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部

職名：上席研究員

研究者番号 (8桁)：70391258

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：鈴木 康弘

ローマ字氏名：Yasuhiro Suzuki

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。