

令和元年6月3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：15K06655

研究課題名(和文) 3次元擾乱磁場が高速イオン閉じ込めに与える影響の研究

研究課題名(英文) Effect of three dimensional magnetic perturbation on fast ion confinement

研究代表者

篠原 孝司 (Shinohara, Kouji)

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 先進プラズマ研究部・上席研究員(定常)

研究者番号：50354600

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：燃焼プラズマにおいて、3次元擾乱磁場の高速イオン輸送に与える影響の評価が重要である。第一原理による輸送評価は計算資源を要し、応用に限られる。輸送の評価には空間スケールを評価する必要があるが、擾乱磁場による高速イオン輸送の空間スケールは高速イオンの軌道の島構造の大きさと考えることができる。そこで高速イオンの軌道の平均的傾きと擾乱の周期性で決まる整数比とが一致するとき、すなわち共鳴するときに島構造ができることに着目して、共鳴関係を利用した軌道島の大きさの見積もり法を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合炉において、高速イオンは主加熱源として重要な役割を担う。一方、核融合炉にはプラズマ周辺部不安定性の緩和を目的とした擾乱磁場や強磁性体等による3次元擾乱磁場の存在が想定される。この擾乱磁場が高速イオンの閉じ込めを悪くする可能性があるため、核融合炉の運転シナリオ作成には高速イオンの輸送に与える影響の評価が重要である。運転シナリオ作成にはパラメータスキャンや時間発展を扱う必要があり、計算資源を要する第一原理による計算ではなく、簡略化した計算手法が望まれる。本研究では、高速イオンの軌道と擾乱の共鳴条件による計算モデルを考案した。

研究成果の概要(英文)：The effect of three dimensional magnetic perturbation on the fast ion transport should be evaluated in a burning plasma design. The calculation based on the first principle requires large computing resource and its application is limited. It is important to know the spatial scale to evaluate the transport. The spatial scale can be an island width of fast-ion orbits in the magnetic perturbation. Based on the idea that the island can be formed when a pitch of a fast-ion orbit match or resonate with a pitch determined by the period of the perturbation, we proposed a method to estimate the island width of fast-ion orbits.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：高速イオン 擾乱磁場 共鳴 粒子軌道

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマの研究では、多くの場合、磁場は軸対称で近似できるとして研究されてきたが、ITERではELMというプラズマ周辺部不安定性の緩和を目的とした擾乱磁場や強磁性体等による3次元擾乱磁場が顕著化する見通しとなり、軸対称ではない擾乱磁場に関わる研究が重要となってきた。そのため、擾乱磁場の高速イオン閉じ込めに与える影響の評価が重要となった。

2. 研究の目的

燃焼プラズマにおいて、高速イオンは主加熱源として重要な役割を担う。一方、ITERではELMの緩和を目的とした擾乱磁場や強磁性体等による3次元擾乱磁場が存在する。そのため、擾乱磁場の高速イオン閉じ込めに与える影響の評価が重要視されている。本研究では、プラズマ周辺部の高速イオンの振る舞いに着目して、3次元擾乱磁場下の高速イオンの振る舞いの理解とモデル化に努める。そこで、ELM緩和用の3次元擾乱磁場を発生でき、また、周辺部高速イオンの情報を計測できる損失高速イオン計測(FILD)を持つ韓国のトカマク型実験装置KSTARにて実験を行い、計測結果を数値計算と比較して解析し、高速イオンの振る舞いの理解とモデルの検討を行う。

3. 研究の方法

ELM緩和用の3次元擾乱磁場を発生でき、また、周辺部高速イオンの情報を計測できるFILDを持つ韓国のトカマク型実験装置KSTARでの実験結果を高速イオン粒子軌道追跡モンテカルロコード(OFMC)と比較することで、高速イオンの振る舞いの理解とモデルの検討を行う。

4. 研究成果

- 1) KSTARでの実験結果の解析を、OFMCを用いて行った。実施にあたり、擾乱磁場の準備、高速イオンの損失を計測するFILDの適切な模擬や高速イオンのプラズマ壁への熱負荷の正確な評価のためにFILDやプラズマ壁の正確なモデルの準備を行った。ELM緩和用の擾乱磁場無し、プラズマ応答を考えない真空磁場近似、プラズマ応答をHINT2コードにて評価した磁場にて、高速イオンの振る舞いを調べた。結果、KSTARは比較的プラズマ電流が低いいため、高速イオンの軌道幅が大きく、プラズマ中心部に生成された高速イオンであっても外側の磁場擾乱の影響を受けやすいことがわかった。そして、磁場擾乱と共鳴的に相互作用し、短時間でプラズマ外に吐き出されることがわかった(図1)。吐き出される粒子の分布は磁場構造に依存していることもわかった。これは赤外カメラの温度上昇と定性的に一致する。これらの成果を2つの国際会議にて発表し、1つの論文としてまとめた。

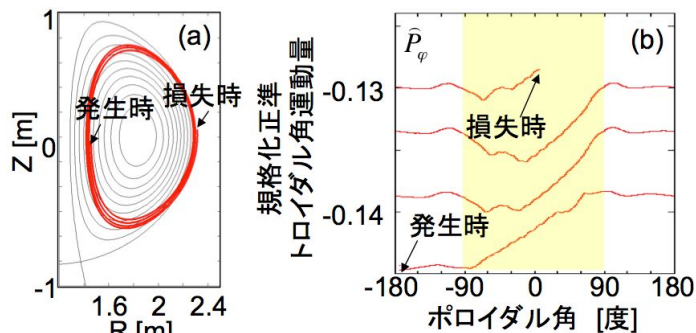


図1: プラズマの内部で生成され、短時間で損失した高速イオンの位相空間での軌道の一例。(a)プラズマ断面への射影。(b)規格化正準トロイダル角運動量とポロイダル角((a)内の角度)上へ射影。規格化正準トロイダル角運動量が小さい方向が、プラズマの内部方向に相当。

- 2) FILDは、プラズマ外にある計測位置で高速イオンのピッチ角とラーマ半径(エネルギー)という速度空間の位相情報を取得できる計測器である。しかしながら、その計測可能な位相領域は設置環境に左右され、自明でない。そこで、実際のプラズマ対向壁と3次元磁場条件を考慮し、計測可能な速度空間領域を評価する手法を構築した。具体的な適用例として、KSTARトカマクを用いた。図2に示すように3次元磁場条件が変わると計測可能な速度空間領域(感度)が大きく変わっており、計測可能な速度空間領域の評価が重要であることを示した。また、この結果、KSTARにお

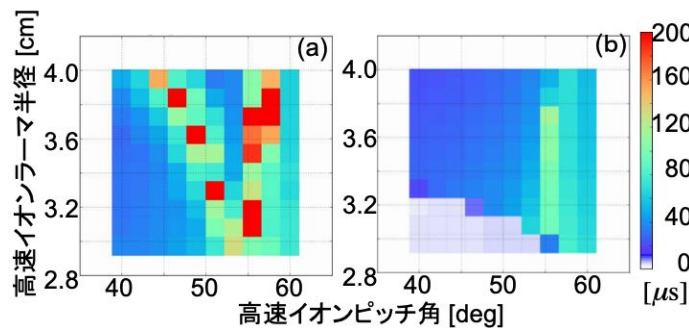


図2: FILDの感度(計測可能な速度空間領域)分布。横軸縦軸はFILDの計測量であるピッチ角とラーマ半径。擾乱磁場無し(a)と有り(b)

示すように3次元磁場条件が変わると計測可能な速度空間領域(感度)が大きく変わっており、計測可能な速度空間領域の評価が重要であることを示した。また、この結果、KSTARにお

いてこの計測器を用いて3次元擾乱磁場が高速イオンに与える影響をOFMCで解析する際には、SOLと呼ばれるプラズマの外側で発生した高速イオンを数値的に模擬する必要があったこともわかった。これらの成果を2つの国際会議にて発表するとともに、論文にまとめた。

- 3) ELM制御などで擾乱磁場を用いる運転シナリオ設計には、擾乱磁場による輸送を考慮した計算コードが必要である。熱化イオンでは空間座標として磁気座標を用いて、磁気島の幅の範囲で物理量が平坦化されるという輸送モデルが利用される。磁気島の評価は、磁力線の追跡を一回実施すればよい。一方、高速イオンの空間座標に相当するのは正準トロイダル角運動量であるので、正準トロイダル角運動量で表現した高速イオンの描く島(以下軌道島)の幅がわかれば、熱化イオンと同様のモデルで輸送を評価できる。しかし、磁気座標と正準トロイダル角運動量はずれており、さらに、正準トロイダル角運動量はエネルギーと磁力線に対する速度の傾きに依存するため、軌道島幅評価は、これらパラメータ毎に軌道追跡計算が必要であり、計算資源を要する。計算資源を要する手法は、パラメータスキャンや平衡磁場の時間発展を扱うシナリオ設計のコードには不向きであり、軌道島幅の簡易評価手法が求められる。擾乱磁場中での高速イオンの振舞いの理解を目的として、韓

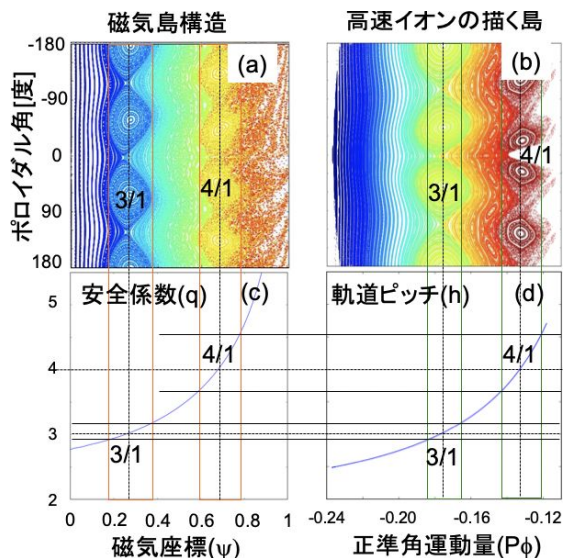


図3: (a)磁気島構造、(b)軌道追跡によって求めた高速イオンの描く島(軌道島)構造、(c)安全係数、(d)軌道ピッチ。磁気島の幅をオレンジ色の線のように読み取る。これを安全係数上にマッピングし、交点を求める。交点の安全係数と同じ軌道ピッチとなる正準トロイダル角運動量を読み取る(緑色の線)ことで、軌道島の大きさを見積もる。

国のKSTARでの実験の解析を進めてきたが、解析の結果、島構造の本質は共鳴条件であり、磁気島が磁場の平均的傾き(安全係数と呼ばれる)と擾乱磁場の周期性で決まる整数比とが一致するとき形成されると同様に、軌道島構造が軌道の平均的傾き(軌道ピッチ)と擾乱に起因する軌道の擾乱の周期性で決まる整数比とが一致するときできるという知見を得た。この知見をもとに、図3に示すように幾何学的に磁気島の幅から高速イオンの軌道島の幅を簡便に求める手法を新たに提案した。これを国際会議で発表すると共に、論文にまとめた。さらに、現在解析的に高速イオンの軌道島の幅を求める手法を検討している。

- 4) KSTARのFIELDに導入した高速カメラにて、摂動磁場印加実験時に損失高速イオンの短時間での挙動の変化を捉えることに成功した。本結果を、国際会議で報告した。その物理機構について、今後解析を進める予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3件)

- 1) [Kouji Shinohara](#), Yasuhiro Suzuki, Junghee Kim, Jun Young Kim, Young Mu Jeon, Andreas Bierwage, and Tongnyeol Rhee, "Investigation of fast ion behavior using orbit following Monte-Carlo code in magnetic perturbed field in KSTAR", Nuclear Fusion, 査読有,56巻,2016, 112018-1 --15
DOI:10.1088/0029-5515/56/11/112018
- 2) [Kouji Shinohara](#), Junghee Kim, Jun Young Kim, and Tongnyeol Rhee, "Evaluation of observable phase space by fast ion loss detector by calculating particle orbits in consideration of plasma facing components and three dimensional magnetic field", Review of Scientific Instruments, 査読有,87巻,2016, 11D804-1 --4
DOI: 10.1063/1.4959877
- 3) [Kouji Shinohara](#), Andreas Bierwage, Yasuhiro Suzuki, Junghee Kim, Go Matsunaga, Mitsuru Honda, and Tongnyeol Rhee, "Estimation of orbit island width from static magnetic island width, using safety factor and orbit pitch", Nuclear Fusion, 査読有,58巻,2018, 082026-1 --

〔学会発表〕(計 6件)

- 1) Kouji Shinohara, Junghee Kim, Jun Young Kim, Young Mu Jeon, Tongnyeol Rhee, and Yasuhiro Suzuki, “Investigation of fast ion behavior using orbit following Monte-Carlo code in magnetic perturbed field in KSTAR ”, 14th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems(国際学会), 2015年9月, IAEA Headquarters, Vienna
- 2) Kouji Shinohara, Yasuhiro Suzuki Junghee Kim, Jun Young Kim, YoungMu Jeon and Tongnyeol Rhee, “Investigation of fast ion behavior using orbit following Monte-Carlo code in magnetic perturbed field in KSTAR ”, KSTAR Conference 2016(招待講演)(国際学会), 2016年2月, Daejeon Convention Center (韓国)
- 3) Kouji Shinohara, Junghee Kim, Jun Young Kim, and Tongnyeol Rhee, “Evaluation of observable phase space by fast ion loss detector by calculating particle orbits in consideration of plasma facing components and three dimensional magnetic field ”, 21st Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics(国際学会) 2016年6月, Monona Terrace Community and Convention Center, Madison (米国)
- 4) Kouji Shinohara, Junghee Kim, Jun Young Kim, Tongnyeol Rhee, and Mitsutaka Isobe, “Evaluation of observable phase space with fast ion loss detector by calculating guiding center orbits in consideration of plasma facing components and three-dimensional magnetic field ”, KSTAR Conference 2017(国際学会), 2017年1月, Muju Deogyusan Resort (韓国)
- 5) Kouji Shinohara, Andreas Bierwage, Yasuhiro Suzuki, Junghee Kim, Go Matsunaga, Mitsuru Honda, and Tongnyeol Rhee, “Estimation of orbit island width from static magnetic island width, using safety factor and orbit pitch”, 15th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems(国際学会), 2017年9月, Princeton Plasma Physics Laboratory (米国)
- 6) Junghee Kim, T. Rhee, S. Lee, K. Kim, Y. In, A. Loarte, M.J. Choi, J.-Y. Kim, K. Shinohara, D.C. Seo, J.-W. Ahn, H. Jhang and the KSTAR team, “Fast-ion losses associated with the RMP applications on KSTAR”, 15th IAEA Technical Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems(国際学会), 2017年9月, Princeton Plasma Physics Laboratory (米国)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等:該当なし

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号(8桁):

(2)研究協力者

研究協力者氏名:

ローマ字氏名:

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。