

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 4 月 24 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820404

研究課題名(和文) 逃走電子の発生と増幅を考慮したトカマク閉じ込め磁場喪失現象の非線形過程の研究

研究課題名(英文) Study of nonlinear mechanism of tokamak disruptions during runaway electron generation and avalanche

研究代表者

松山 顕之 (Matsuyama, Akinobu)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所 核融合炉システム研究開発部・主任研究員(定常)

研究者番号：90581075

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：ITERで予測される大電流逃走電子の発生に関し、MHD不安定生による大域的な磁場構造変化と逃走電子の発生・増幅過程の相互作用を解析するシミュレーションを開発し、(1) MHD不安定生に伴う電圧スパイクがパースト的な逃走電子発生をもたらすこと、(2) MHD不安定生が電流分布平坦化を引き起こし、インダクタンス変化を通じて正味逃走電流発生量に影響を与えること、を明らかにした。加えてビーム平衡コード、VDEコード、不純物コード、荷電粒子軌道追跡コードなどの要素コードを整備し、大量不純物入射を用いたITERの緊急停止シナリオの統合シミュレーション研究を展開する基盤を構築した。

研究成果の概要(英文)：A novel simulation code that enables us to analyze the interaction of the runaway electron generation and avalanches with dynamic changes of the confining magnetic fields due to MHD instabilities has been developed. Using the developed simulation code, it has been shown that (1) the perturbed electric field associated with the MHD instability causes the burst generation of runaway electron generation because of the exponential sensitivity of the primary generation to the electric field; (2) the MHD instability causes the flattening of beam current profile, which results in the increase of the net runaway electron generation through the modification to internal inductance of beam plasmas. Additionally, the runaway beam equilibrium code, the VDE code, the impurity code, and the orbit following code have been developed. These individual codes build up a basis for performing the integrated simulation studies for rapid shutdown scenarios of ITER as the next step of the research.

研究分野：核融合理論・シミュレーション

キーワード：トカマク ITER MHD ディスラプション 逃走電子 不純物 VDE

## 1. 研究開始当初の背景

トカマク型核融合装置では、炉心の核融合反応を維持するため、10MA オーダーの電流を維持し、閉じ込め磁場を安定に保持する必要がある。巨視的不安定生の励起に伴い、ディスラプションが発生すると、閉じ込め磁場の喪失に伴い1ミリ秒以下の短い時定数で熱エネルギーの解放(熱クエンチ)が起こる。一方、プラズマ電流は Maxwell 方程式に従い、L/R 時間のオーダーでしか消失できず、磁気エネルギーは熱エネルギーに比べ、10 倍-100 倍長い時定数の間維持され、ジュール加熱によって熱に変換されるか、うず電流を通じ、真空容器の抵抗によって消失する。

ディスラプションに対する装置保護の観点では、電流減衰が壁の時定数で起こる場合、プラズマと外部導体系の電磁的結合による電磁力が問題になる。これを回避する有効な手段として、不純物入射により炉心の電気抵抗値を上げて電流減衰を加速し、ジュール損失を増加させる方法が実験的に実証されている。この手法は大量不純物入射と呼ばれ、ITER において熱クエンチによるプラズマ対向壁の負荷を低減しつつ、ハロー電流による電磁力を回避する有効な制御手法として実装が予定されている。その一方で、大量不純物入射によって電流減衰が早くなるとプラズマ内部に生じた誘導電場が電子を加速し、高エネルギーの逃走電子ビームを形成することがある。過去 10 年で ITER を想定した大量不純物入射によるディスラプション緩和の研究が進展する中で、逃走電子の発生が ITER 実験の装置健全性を担保する上で重大な障害と捉えられており、物理機構の解明が急務となっている。

## 2. 研究の目的

ITER の逃走電子発生機構に関し、まず着目すべき点は、ディスラプションの初期に発生した 1 次電子が冷たい熱電子との近接衝突により 2 次逃走電子を発生させる雪崩的増幅が生じることにある。既存の装置では逃走電子増幅率は 10 以下で 2 次電子生成の影響は副次的だが、ITER (10MA) では逃走電子電流の大半を 2 次電子が担う新しいパラメータ領域に入る。近年、ITER での逃走電子制御の重要性から、密度制御や摂動磁場印加の実験研究が精力的に行われているが、逃走電子増幅率の違いから、既存の実験で有効な制御手法が ITER クラスのディスラプションに補外できるかは明確でない。このため、逃走電子発生現象を定量的に扱う物理モデルとシミュレーションコードの開発が重要な研究課題である。しかしながら、ディスラプション現象は不安定性による閉じ込め磁場の喪失が本質的であり、そのような複雑・過渡現象の中での逃走電子発生をどのように扱うべきか、物理モデルやシミュレーションコード、いずれの知見も十分でないのが現状である。

このような研究背景から、われわれは本研

究の目的を、従来、ディスラプションや逃走電子の研究で用いられてきた物理モデルやシミュレーション手法の知見を進展させ、大域的な閉じ込め磁場構造の変化と逃走電子の発生・増幅過程の相互作用を取り扱うシミュレーションコードを開発し、両者の関係性を明らかにすることと設定した。

## 3. 研究の方法

逃走電子発生に関する従来の研究は磁場構造が静的で時間変化しないものと仮定した解析にとどまっている。一方、ディスラプション時の逃走電子発生現象では、逃走電子ビーム電流は平衡磁場そのものを担う程度に十分大きく、装置中のトカマク配位形成と逃走電子発生現象を自己無撞着に解くような新しいシミュレーション手法が必要である。また、実験的には磁場揺動の励起に伴う逃走電子の損失や硬 X 線のバースト的な挙動、磁気島と思われる空間構造に局在化した逃走電子ビーム(スネーク)などが観測されており、3 次元的な磁場構造の形成は逃走電子の振る舞いに顕著な影響を与えるであろうことは、逃走電子研究の早い段階から指摘されてきた。

そこで本研究では新たに簡約化流体シミュレーションに基づく逃走電子発生現象のシミュレーションモデルを考案した。本研究が特に着目したのは、逃走電子発生に伴う平衡磁場の形成は L/R 時間で起こり、高エネルギー電子の発生やディスラプションそれ自体に比べて 3 桁-4 桁遅い時間スケールで十分ゆるやかに進行するため、長時間シミュレーションを実現することが本質的に重要という点である。本研究では、長時間シミュレーションを可能とするため、逃走電子の対流速度を人為的に遅くする手法を適用することで、1 次逃走電子の発生からアバランチ増幅を完了するまでの数 10 ミリ秒の長時間シミュレーションを取り扱うことのできる電磁流体シミュレーションコードを初めて開発した。ここでは開発したコードの応用として、磁気軸での安全係数が 1 を切ったときに不安定化するモードである抵抗性キックモードを考え、逃走電子発生時に MHD 不安定生が励起されたとき、逃走電子が単にトレーサー的に運ばれるのか、もしくは不安定性の励起が逃走電子発生量に影響を与えるか、また、逃走電子の存在が不安定性の性質に影響をあたえるかという点に関して研究を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 逃走電子発生と MHD 不安定生の相互作用に関する研究

本研究で開発した非線形 MHD シミュレーションコード EXTREM は、抵抗性 MHD モデルを単一エネルギー近似した逃走電子ビームと結合して解くシミュレーションコードであり、ビーム流体にはドライサージ加速やアバラ

ンチ増幅を模擬した逃走電子生成ソース項を考慮している。一方、逃走電子の輸送メカニズムとして磁力線に垂直方向の拡散に加え、磁力線方向の対流を考慮することで、MHD不安定生に伴うリコネクションが起こると電流分布の平坦化などのグローバルな逃走電子輸送が記述できる。図1はEXTREMコードによる抵抗性キックモードが不安定となるディスラプションシナリオを計算した一例であり、このシミュレーションからMHD不安定性が1次電子生成、2次電子生成に異なる影響を与えることが明らかにされた。1次電子生成は電場に敏感であるため、MHD不安定性に伴う摂動電場が影響を与え、図2に示すようなバースト的な挙動が現れる。他方、2次電子生成はL/R時間と同程度の遅い時間スケールの現象であるため、抵抗性キックモードが引き起こす電流分布平坦化によるインダクタンス変化など、ビームの巨視的な特性の変化を通じて正味の逃走電子生成量に影響することが明らかにされた。また、種電子生成フェーズでは逃走電子による電流ピーキングが起こるため、不安定モードが断続的に維持されるが、2次電子生成フェーズにおいては1度の抵抗性キックモードによって不安定性の自由エネルギーが十分に減衰するため、モードの励起が散発的になるなど、逃走電子の存在が不安定モードの特性にも影響を与えることが明らかにされた。

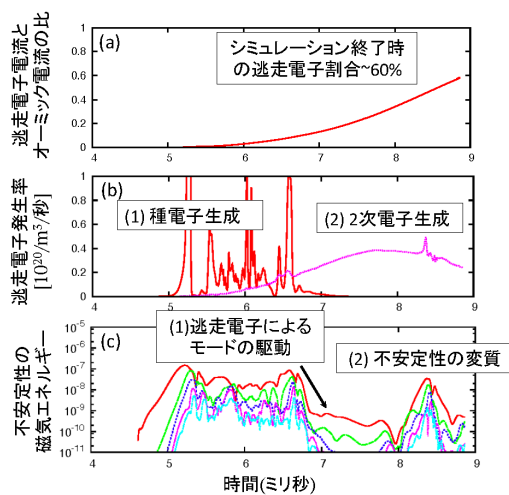


図1. 非線形MHDコードEXTREMを用いた逃走電子発生シミュレーション: (a) 逃走電子電流とオーミック電流の比、(b) 逃走電子発生率の時間変化: (1) バースト的な種電子生成から(2)緩やかな2次電子増幅に変化する、(c) 種電子生成中は不安定モードが断続的に駆動されるが2次電子生成フェーズでは不安定性の励起は散発的になる。

(2) 逃走電子統合シミュレーションコードの開発  
非線形MHDコードEXTREMの開発にあたり、逃走電子発生に関わる物理モデルやシミュレーション手法に関する成果が得られた。具

体的には、逃走電子ビーム平衡計算コード(学会発表、) VDEコード、不純物と逃走電子の相互作用を解析するコード(学会発表)、磁場中の荷電粒子軌道を高精度で解析する新しい数値計算手法(雑誌論文)などが開発された。図2は不純物と逃走電子の相互作用を考慮したシミュレーションコードINDEXODを用いた逃走電子発生量の不純物密度依存性の一例を示したものである。不純物ペレット入射時の逃走電子発生の実験観測に対応し、不純物密度が $10^{18}$ - $10^{19}/m^3$ のオーダーまでは不純物量の増加とともに逃走電子量が増加する。ここからさらに不純物を増加させると逃走電子電流は減少に転じる。これはTore Supraなどの中型トカマクで観測されている大量不純物入射による逃走電子の減少に対応するものと考えられ、中性不純物原子中の束縛電子による摩擦が重要な役割を果たしている。

これらのコード開発は研究の次段階として逃走電子発生に関連した様々な物理メカニズムをEXTREMコードに取り込んだ統合シミュレーションに展開する基盤となる成果である。

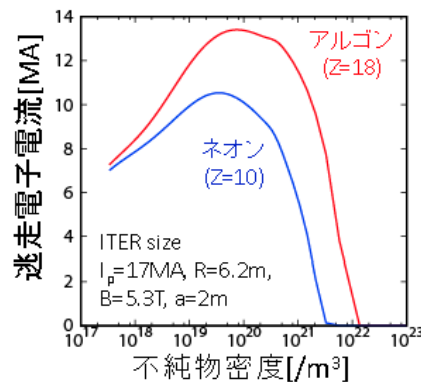


図2. ITERサイズに対する逃走電子電流の不純物密度依存性の計算例(赤: アルゴン、青: ネオン)。

(3) まとめ  
以上のように、本研究では、逃走電子とMHD不安定性の相互作用を考慮したシミュレーションコードが開発され、長時間シミュレーションを実施することにより、1次電子生成、2次電子生成とMHD不安定生の相互作用の性質と、これらが逃走電子発生量に与える影響が明らかにされた。開発したコードは、本研究で解析した抵抗性キックモードだけでなく、テアリングモードや外部キックモードなど、異なるタイプの不安定生に適用することができ、逃走電子とMHD不安定生の相互作用の研究を開拓するものである。

また、本研究の実施にあたり、ディスラプション時の逃走電子発生現象を取り扱うための、MHD平衡計算コード、不純物コード、荷電粒子追跡コードなどが開発された。これらの要素コードを統合化することで、今後、ディスラプション時の逃走電子発生現象を

総合的に扱う統合シミュレーションコードを構築する基盤が整備されたことは本研究の特筆すべき成果である。

#### 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7件)

A. Matsuyama, N. Aiba, M. Yagi, "Reduced fluid simulation of runaway electron generation in the presence of resistive kink modes," Nuclear Fusion 印刷中 (査読有)

A. Matsuyama, N. Aiba, M. Yagi "Simulation study of interaction between resistive MHD modes over avalanche time scale," Proceedings of 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, TH/P1-34 (2016) (査読無).

M. Furukawa, A. Matsuyama, Y. Ohkawa, "High-Accuracy Numerical Integration of Charged Particle Motion - with Application to Ponderomotive Force," Plasma Fusion Research 11, 1303003(1-4) (2016) (査読有).

松山顕之「逃走電子のカオス」プラズマ・核融合学会誌 91, 204-208 (2015). (査読無)

A. Matsuyama, M. Yagi, Y. Kagei, "Stochastic transport of runaway electrons due to low-order perturbations in tokamak disruptions," JPS Conference Proceedings 1, 015037(1-4) (2014) (査読有).

A. Matsuyama, M. Yagi, Y. Kagei, and N. Nakajima, "Drift resonance effect on stochastic runaway electron orbit in the presence of low-order magnetic perturbations," Nuclear Fusion 54, 123007(1-14) (2014) (査読有).

A. Matsuyama, M. Yagi, Y. Ishii, N. Aiba, Y. Kagei, "Simulation of energy-dependent stochastic transport induced by low-order MHD instabilities for runaway electron mitigation," Proceedings of 25th IAEA Fusion Energy Conference, St. Petersburg, Russia, TH/P5-13 (2014) (査読無).

[学会発表](計9件)

松山顕之「トカマクディスラプションにおける逃走電子発生物理モデリングの進展」第33回プラズマ核融合学会年会(招待講演)2016年11月29日-12月2日,東北大学青葉山キャンパス。

A. Matsuyama, N. Aiba, M. Yagi, "Kinetic-MHD hybrid simulation of runaway electron physics in tokamak

disruptions," Joint 13th Asia Pacific Physics Conference and 22nd Australian Institute of Physics Congress (招待講演), 2016年12月4日-8日, Brisbane Convention and Exhibition Centre, Australia.

A. Matsuyama, N. Aiba, M. Yagi, "Simulation study of interaction between resistive MHD modes over avalanche timescale," 26th IAEA Fusion Energy Conference, 2016年10月17日-22日 Kyoto, Japan (2016).

A. Matsuyama, N. Aiba, M. Yagi, "Reduced MHD modeling of runaway electron generation and avalanche by EXTREM," Joint Meeting of US-Japan MHD workshop and 27th ITPA MHD Disruption and Control Topical Group, 2016年3月7日-11日、核融合科学研究所。

松山顕之、相羽信行、矢木雅敏「逃走電子分布のモンテカルロ計算に基づく運動論的MHD平衡コードの開発」第32回プラズマ・核融合学会年会、2015年11月24日-27日、名古屋大学東山キャンパス。

A. Matsuyama, N. Aiba, M. Yagi, "Kinetic-MHD hybrid equilibrium model using a Monte-Carlo calculation of runaway electron distribution function," 57th APS annual meeting of the division of plasma physics, 2015年11月16日-20日、Savannah, USA.

松山顕之「ディスラプション時の逃走電子シミュレーション研究」Plasma Conference 2014, 2014年11月18日-21日、朱鷺メッセ、新潟市。

A. Matsuyama, M. Yagi, Y. Ishii, N. Aiba, Y. Kagei, "Simulation of energy-dependent stochastic transport induced by low-order MHD instabilities for runaway electron mitigation," 25th IAEA Fusion Energy Conference, 2014年10月13日-18日, St. Petersburg, Russia.

A. Matsuyama, M. Yagi, Y. Kagei, "Modeling of runaway electron flux during tokamak disruptions by 3D relativistic orbit calculation," 21st International Conference on Plasma Surface Interaction, 2014年5月26日-30日, Kanazawa, Japan.

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

松山 顕之 (MATSUYAMA Akinobu)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所・核融合炉システム研究開発部

主任研究員

研究者番号: 90581075