

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 20 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14904

研究課題名(和文)大量不純物入射による逃走電子緩和の統合数値実験

研究課題名(英文) Integrated numerical experiment of runaway electron mitigation by massive impurity injection

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・主幹研究員(定常)

研究者番号：90581075

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではITERにおける大電流逃走電子発生による装置損傷の問題の解決に向け、物理機構を解明するためのシミュレーション研究とITERでの逃走電子発生を回避するための制御手法の研究を行った。逃走電子を流体的に表現するモデルを実装した3次元電磁流体コードによりプラズマの放射崩壊からMHD不安定性の発生、電流遮断、それに引き続く逃走電子発生までを一貫して扱う長時間シミュレーションを初めて実現するとともに、ITERで採用されるペレット粉碎入射の粒子デポジションを解析するための統合モデルを開発し、入射速度やペレット組成、入射タイミング等の装置パラメータの最適化に関する物理的指針を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合エネルギーの科学・技術的な実現可能性を実証するITERにおいて、炉心プラズマの崩壊現象(ディスラプション)直後に発生する高エネルギー電子(逃走電子)発生の緩和方策の開発が最重要のR&D課題の一つと認識されている。本研究では、崩壊現象に伴ってどのように高エネルギー電子が発生するかを解明するシミュレーションを行うとともに、ITERでディスラプションや逃走電子の制御装置として採用が決まっている固体入射装置について、従来考えられていたネオンと水素の混合固体ではなく、水素単体の固体を用いることが逃走電子の発生回避に効果的であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, we carried out computer simulation to clarify the physical mechanisms of runaway electron generation and investigated the plasma control scheme for runaway electron avoidance and mitigation in ITER. For the first time, a three-dimensional magnetohydrodynamic code that implements a "runaway fluid model" to express the amplification of tiny seed currents has realized a simulation that self-consistently traces radiation collapse, MHD growth, current quench, and subsequent runaway beam formation. For analyzing the particle deposition associated with shattered pellet injection used in ITER, an integrated simulation of pellet ablation and assimilation has been developed. According to their numerical analysis, we proposed to use pure hydrogen pellet injection as an effective scheme to obtain the electron density rise up to the level required for runaway electron avoidance in ITER.

研究分野：核融合理論・シミュレーション

キーワード：逃走電子 トカマク ディスラプション ITER MHD 溶発 粉碎 輻射

### 1. 研究開始当初の背景

核融合エネルギーの科学・技術的な実現可能性を実証する ITER において、炉心プラズマのディスラプション直後に発生する MeV オーダーの逃走電子の緩和方策の開発が最重要の R&D 課題の一つと認識されている。ITER ではディスラプションによる熱や電磁力による負荷を抑えるため、制御が難しくなった放電に希ガス不純物のペレットを入射し、プラズマを低エネルギーの線輻射に変換して強制的に消滅させる「ディスラプション緩和」を行うが、この制御に逃走電子回避の機能を持たせるために、より高い電子密度を達成できると予想された重水素と希ガスの混合ペレット入射が検討されている。

逃走電子発生時、熱電子は放射冷却によって 10eV 以下に低温化する一方、逃走電子は最大 10-100MeV まで加速され、電子は 6-7 桁にわたるエネルギースペクトルを持つ。加えて、ITER では 2 次電子生成機構による雪崩的増倍が重要となる。簡単な評価では増幅ゲインは  $\exp(2.5I_p[\text{MA}])$  と書け、プラズマ電流  $I_p=15\text{MA}$  の運転では  $4 \times 10^{10}$  の微小な種電子の存在で 7.5MA の逃走電子が存在するという見積もりになる。 $I_p=2\text{MA}$  程度の既存トカマクでは増幅ゲインは高々 150 である。このような既存装置と ITER の間の膨大なギャップが逃走電子の問題の実験データからの補外を困難なものにしており、理論・シミュレーションによる物理解明が重要な課題となっている。

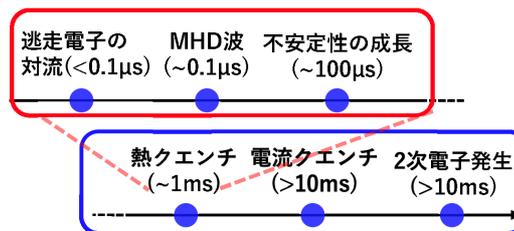


図 1 ITER の逃走電子発生の時定数

ITER の間の膨大なギャップが逃走電子の問題の実験データからの補外を困難なものにしており、理論・シミュレーションによる物理解明が重要な課題となっている。

### 2. 研究の目的

#### (1) マルチスケール・マルチフィジックス現象の解明

図 1 に ITER の逃走電子発生を支配する時定数を示す。ディスラプションは 1ms 前後のプラズマの熱クエンチののち、10ms 以上の時定数での電流クエンチが起こり、この際にプラズマの磁気エネルギーは 2 次電子生成を介して逃走電子ビームに受け渡される。熱クエンチ中には 1 $\mu\text{s}$  前後の時定数での時定数での逃走電子の対流や MHD 波の伝搬、それに伴う不安定性の成長が起こっている。逃走電子発生の問題を扱う上で注意すべきは、2 次電子生成のトリガーとなる初期の種電子生成は熱クエンチ中に起こるという点である。このため、ITER における逃走電子発生量を定量的に予測するためには MHD 不安定性や逃走電子の対流といった短い時定数の現象を扱うと同時に 2 次電子発生までの長時間を扱えるようなシミュレーションを考える必要がある。同時に、シミュレーションは微小な種電子電流を扱える程度に高精度でなければならない。本研究では ITER の逃走電子発生の物理機構の解明を目的とし、この問題をさまざまな分野における学術的課題であるマルチスケール・マルチフィジックスの物理現象としてとらえ、物理モデルの検討とシミュレーション研究に取り組んだ。

#### (2) 研究の着想

本研究では研究開始当初、逃走電子の挙動を第一原理的に取り扱うため、高エネルギー電子の軌道を直接追跡するモンテカルロ・シミュレーションコードの開発に取り組んだ。この方向においては高エネルギー電子の軌道を高精度に解析するため、相体積を保存し、長時間積分においても誤差の蓄積のない構造保存型アルゴリズムを開発し[1]、これをシンクロトロン放射減衰の解析に拡張するなど一定の成果を得たが、ディスラプション時には背景プラズマが急速な変動を生じているため、モンテカルロ法で取り扱うためには膨大な計算量が必要であることがわかってきた。一方、これと並行して開発した逃走電子ビームを光速で運動する流体として捉えた「逃走電子流体モデル」[2]は少ない計算コストで逃走電子の輸送を扱うことができるため、現段階において ITER の全現象を定量的に捉える上で最良の方法であったため、この方向の研究が想定以上に発展した。さらに研究期間の後半には逃走電子挙動の物理的理解に基づき、ITER で逃走電子回避の主要制御装置として用いられるペレット粉砕入射に関する研究を進めた。

### 3. 研究の方法

本研究では図 2 に示す異なる近似レベルに基づくコードを開発し、逃走電子の発生、輸送、制御に関する知見を段階的に発展させてきた。まず実空間 0 次元速度空間 2 次元の Fokker-Planck コード FP2V を用いたディスラプションモデルを考え、低 Z 及び希ガス不純物が一次電子及び二次電子の発生率に与える影響を系統的に調べた[3]。次に 3 次元電磁流体シミュレーションコード EXTREMe に逃走電子流体モデルを実装し、ITER のシミュレーションに適用した。このとき、EXTREMe コードには FP2V コードによる逃走電子生成量を定量的に再現できることを確認した簡易モデルを採用している点に本研究の工夫がある。逃走電子流体モデルは本研究により有効性

が認識され、欧米の3次元電磁流体シミュレーションコード JOREK [4]や M3D-C1[5]にも採用されている。期間後半に行った ITER における逃走電子緩和方策の検討では、QST が開発を行っている統合シミュレーションコード INDEX にペレット粉碎入射のモデルを世界に先駆けて実装した。INDEX コードは

コード名	実空間	速度空間	目的
FP2V	0次元	2次元	逃走電子発生 (1次電子・2次電子)
EXTREMe	3次元	流体モーメント	逃走電子発生(簡約モデル) 逃走電子輸送 MHD不安定性
INDEX	3次元(ペレット) 2次元(磁場配位) 1次元(プラズマ)	流体モーメント	ペレット入射 現実的な磁場形状 ITERシナリオデータ

図2 本研究で開発したコード

トカマク全系のシミュレーションを可能とするため、磁場配位は2次元、プラズマ分布は1次元で扱う統合モデルを採用している。開発したペレットモデルではペレットによる粒子のデポジションを解析するため、ペレットの粉碎で生じる固体小片のサイズ分布を統計モデルで表現し、溶発によるサイズ変化を記述する微分方程式を考えて炉心プラズマへの吸収量を定量化した。

#### 4. 研究成果

##### (1) EXTREMe コードによる ITER の逃走電子発生マルチスケールシミュレーション

図3は本研究で初めて実現された ITER の逃走電子発生のマルチスケールシミュレーションの一例である[6]。計算にはディスラプション緩和のために入射されるアルゴン不純物の原子分子過程、アルゴンと逃走電子の衝突効果、逃走電子の二次電子増幅に加え、不純物入射後に強い磁場揺らぎが発生し、これが閉じ込め磁場の崩壊と中心電子温度のコラプスを引き起こす効果を取り込まれている。中心電子温度コラプスが起こる際、熱化しなかった電子は電流減衰に伴う電場に加速され、逃走電子となる。

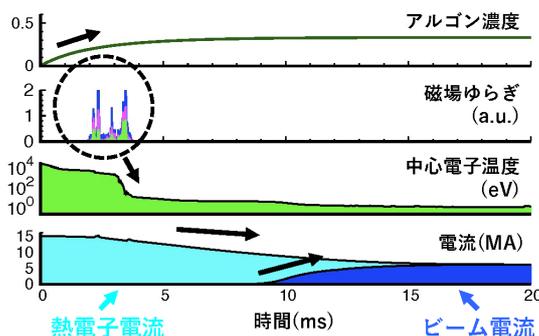


図3 EXTREMe コードによる逃走電子発生のマルチスケールシミュレーション

図4は熱クエンチ中の磁場構造の変化をポアンカレ写像の方法で可視化したものである。初期条件では層状の閉じ込め磁気面が形成されているが熱クエンチ中にはこれが乱れ、中心と周辺を繋ぐ磁力線が生じる。このフェーズでは逃走電子が発生しても磁気面内に閉じ込められることはない。一方、プラズマが低温化し、MHD 不安定な磁場構造(電流分布)が緩和すると層状の磁場構造が再形成される。このとき、磁気面再形成によって種電子がプラズマ中心に蓄積することで2次電子生成による十分な増幅がトリガーされる結果、図3の電流プロットの青で示すように全電流が逃走電子によって担われるビーム放電を形成することを明らかにした。本研究の成果は IAEA 核融合エネルギー会議の口頭発表に選出されるなど国内外で高い評価を得た[6]。

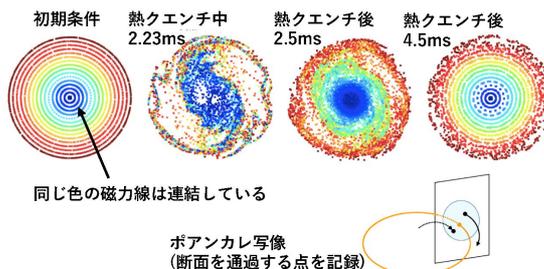


図4 熱クエンチ中の磁場構造の変化

##### (2) INDEX コードによる ITER のペレット粉碎入射シミュレーション

ITER ではディスラプション及び逃走電子による装置負荷を回避若しくは軽減するための方策としてペレット粉碎入射装置を設置する。ペレット粉碎入射では図5のように空気銃の原理で数100m/sまで加速した固体水素や固体ネオンを先端を曲げた管を使って粉碎し、スプレー状にして入射する。入射された固体小片は炉心からの熱流によってプラズマ化するがこの際にターゲットプラズマの熱や磁場のエネルギーの大半を低エネルギーの線輻射に変換してできるだけ一様、等方にエネルギーを受容することでディスラプション時の装置の負荷を最小化する。ペレット粉碎入射に逃走電子回避の機能を持たせるにはペレット入射後にプラズマの電子密度を10の22乗オー

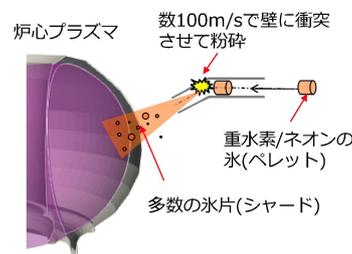
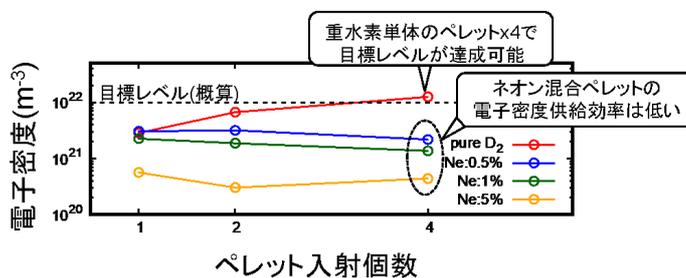


図5 ペレット粉碎入射の原理

ダーまで高めて電子間の衝突頻度を増やすことが有効である。

本研究では INDEX コードによるシミュレーションによって逃走電子の抑制に適したペレット粉碎入射の条件を検討した。図 6 は入射するペレットの組成に着目した解析で、混合物として重水素とネオンを入射した場合にはネオンの放射冷却がペレット



※ITERのペレット1個の直径は28.5mm 長さは57mm(設計値)

図 6 ペレット粉碎入射による電子密度上昇の評価

の溶発及び水素の電離を抑制し、入射量を増やしても十分な電子密度上昇が得られないのに対し、水素単体のペレットを用いることで複数個のペレット入射で電子密度上昇の目標値が達成できることを明らかにした。他方、水素単体のペレットは線輻射への変換効率が悪いので、熱負荷や電磁力負荷の緩和とは整合しない。そこで本研究の結論から、ITER ではディスラプション検知後、水素単体のペレットを先行して入射し、一定の時間遅れをもってネオンペレットを入射する Staggered Injection が有効である可能性を提示した[7]。今回、イータ機構の共同研究者とともに検討した Staggered Injection は 2020 年頃から JET や DIII-D、KSTAR など各国のトカマク装置で実際の検証実験が開始されるなど研究分野への波及効果をもたらした。また、ITER の予測として、フルスペックの DT H-mode 放電に加え、軽水素やヘリウムを用いた Pre-Fusion Power Operation (PFPO) 期の放電でのディスラプション緩和を検討した。この結果、PFPO 期の放電ではターゲットプラズマの蓄積エネルギーが低く、ネオン混合ペレットでは十分な密度上昇が得られないため、水素単体ペレット入射及び Staggered Injection の利用が特に有効であることを明らかにした。

### (3) 研究成果の公開と活用

本研究で得られた知見をもとに、ITER における逃走電子回避のための研究の現状に関する解説記事をプラズマ・核融合学会誌に執筆した[8]。本研究で開発したディスラプションに関連するコードはマニュアルやドキュメントを整備し、大学や高専の共同研究者に公開するとともに JT-60SA 実験や ITER のディスラプション緩和装置の設計に応用が進んでいる。

### <引用文献>

- [1] A. Matsuyama and M. Furukawa, Comput. Phys. Commun., **220**, 285 (2017).
- [2] A. Matsuyama, N. Aiba, and M. Yagi, Nucl. Fusion **57**, 066038 (2017).
- [3] A. Matsuyama and M. Yagi, Plasma Fusion Res. **12**, 1403032 (2017).
- [4] V. Bandaru, et al., Phys. Rev. E **99**, 063317 (2019).
- [5] C. Zhao, et al., Nucl. Fusion **60**, 126017 (2021).
- [6] A. Matsuyama, et al., 27<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference (FEC2018) 22-27 October 2018, Ahmedabad, India (2018).
- [7] A. Matsuyama, et al., 28<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020) 10-15 May 2021 Virtual Event (2021).
- [8] 松山顕之「トカマクディスラプションにおける逃走電子回避に向けた理論モデリング研究の現状」プラズマ・核融合学会誌 **95**, 589 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 松山顕之	4. 巻 95
2. 論文標題 トカマクディスラプションにおける逃走電子回避に向けた理論モデリング研究の現状	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 プラズマ・核融合学会誌	6. 最初と最後の頁 589-595
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 A. Matsuyama and M. Yagi	4. 巻 12
2. 論文標題 Analysis of Avalanche Runaway Generation after Disruptions with Low-Z and Noble Gas Species	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1403032 1-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.12.1403032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 A. Matsuyama and M. Furukawa	4. 巻 220
2. 論文標題 High-order integration scheme for relativistic charged particle motion in magnetized plasmas with volume preserving properties	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 285-296
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cpc.2017.08.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 3件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 A. Matsuyama, E. Nardon, M. Honda, T. Shiroto, M. Lehnen
2. 発表標題 Requirements for Runaway Electron Avoidance in ITER Disruption Mitigation Scenario by Shattered Pellet Injection
3. 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020) 10-15 May 2021 Virtual Event
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 E. Nardon, A. Matsuyama, M. Lehnen, et al.
2. 発表標題 Theory and Modelling activities in support of the ITER Disruption Mitigation System
3. 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2020) 10-15 May 2021 Virtual Event
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松山 顕之
2. 発表標題 トカマクプラズマの生成・消滅時の高速電子発生の運動論
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Matsuyama, E. Nardon, M. Honda, M. Lehnen
2. 発表標題 ITER SPI Modelling for Runaway Electron Avoidance
3. 学会等名 The 8th Runaway Electron Modeling (REM) meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Matsuyama, M. Yagi
2. 発表標題 Recent developments in runaway electron simulations for tokamak disruptions - fluid and kinetic modeling to overcome the scale gap issue
3. 学会等名 19th International Congress on Plasma Physics, 4-8 June 2018, Vancouver, Canada. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Matsuyama, N. Aiba, A. Isayama, M. Yagi
2. 発表標題 Self-consistent runaway beam formation in 3D magnetic fields during radiation-driven disruptions
3. 学会等名 27th IAEA Fusion Energy Conference, 22-27 October 2018, Ahmedabad, India (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松山 顕之
2. 発表標題 トカマク放電のメジャーディスラプションにおける相対論的逃走電子ビーム形成
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会、九州大学伊都キャンパス、2019年3月14日 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Matsuyama
2. 発表標題 Runaway beam formation in tokamaks with resistive MHD instabilities
3. 学会等名 Joint meeting of the 26th international Toki conference and the 11th Asia Plasma Fusion Association Conference, December 5-8, Toki, Gifu, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Matsuyama and M. Furukawa
2. 発表標題 Splitting method for relativistic charged particle orbit tracing in magnetized plasmas
3. 学会等名 Plasma Conference 2017 (PLASMA2017), November 21-24, 2017, Himeji, Hyogo, Japan (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松山顕之、古川勝
2. 発表標題 トカマク磁場中の逃走電子のシンクロトン放射減衰のシミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
フランス	CEA IRFM	ITER Organization	