

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246163

研究課題名(和文) ITERプラズマにおけるディスラプション物理の総合的研究

研究課題名(英文) Integrated Research on Disruption Physics in ITER Plasmas

研究代表者

矢木 雅敏 (YAGI, MASATOSHI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 六ヶ所核融合研究所・研究主席

研究者番号：70274537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,800,000円

研究成果の概要(和文)：トカマクで観測されているディスラプション現象の総合的理解をめざし、熱クエンチ、電流クエンチ、逃走電子発生を解析するコード開発を行った。主要な成果として、5次元相対論的モンテカルロコードETC-Relを拡張し、逃走電子発生機構や衝突・放射による損失項を考慮しつつ、逃走電子の壁負荷までを取り扱うシミュレーションを可能にしたこと、フォッカープランクコードTASK/FPIに逃走電子発生時のループ電圧を決めるモデルを実装し、ディスラプション時の逃走電子発生率を自己無撞着に決定することのできるシミュレーションを構築したことが挙げられる。これによりITERにおける逃走電子生成量を定量的に評価可能となった。

研究成果の概要(英文)：For comprehensive understanding of disruption phenomena observed in Tokamaks, the analysis codes for the thermal quench, the current quench and the generation of runaway electron are developed. The main results are given as follows: 5 dimensional relativistic Monte Carlo code ETC-Rel is extended to handle with heat load on the wall due to runaway electrons, taking account of generation mechanism of runaway electrons, loss mechanism by collision and radiation and so on. The model which determines the loop voltage during the generation of runaway electrons is implemented into the Fokker Planck code TASK/FP. As the result, the simulation which evaluates the generation rate of runaway electrons self-consistently is realized. It enables us to predict the amount of runaway electron generation in ITER plasma, quantitatively.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：ディスラプション 逃走電子 ITER IFERC-CSC ミチゲーション

1. 研究開始当初の背景

核燃焼プラズマの達成と長時間燃焼の実現を目指す ITER では、既存装置と比較して 10 倍以上の蓄積エネルギーの炉心プラズマを維持する必要がある。このため、ITER においては核燃焼プラズマの制御手法の確立とともに、炉内に異常が発生した場合の緊急停止手法の確立が重要なミッションとなっている。特に、10MA を超える大電流プラズマについてはディスラプション時に発生する逃走電子がプラズマ対向壁の寿命を制限すると考えられており、逃走電子の発生機構の解明、対向壁に及ぼす影響、ミチゲーション(緩和)手法の開発は重要な研究課題と位置づけられている。

2. 研究の目的

ディスラプション実験時には、通常のプラズマ実験時と比較して、十分な計測データを得ることは困難であるため、モデリング・シミュレーションによる予測はディスラプション現象の解析に重要な役割を果たしている。また、ITER 規模の実験では、装置に損傷を与えるような高負荷のディスラプション実験を行うことは困難であるため、シミュレーションによる予測の需要が一層高まるものと期待される。このため、統合コードによる予測シミュレーション、ペレットやジェット入射によるアクチュエータのモデル化がディスラプション研究の急務の課題であるといえる。

従来の炉心プラズマ研究に用いられてきた統合炉心シミュレーションでは、抵抗壁への渦電流の浸み込み、炉心プラズマ中の電流拡散、温度・密度の径方向輸送といった、比較的緩やかな時定数で決まる現象のみが扱われてきた。これに対し、ディスラプションのような突発的な現象を扱うためには、アルフヴェン波の特徴時間、もしくは理想 MHD および抵抗性 MHD 不安定性の成長時間など、より短い時定数の物理を取り扱うことのできる統合シミュレーションが必要となる。このような統合シミュレーションは、従来からその必要性が認識されていたものの、モデル構築、コード開発、実験検証などの各側面について、未だ十分な研究基盤が確立されていない状況にある。そこで本研究では、ディスラプションの素過程、すなわち MHD 現象のプリカーサー、ディスラプションの発生、逃走電子の生成、逃走電子ビームプラズマの形成、さらには放電の終端に至るまでの一連のダイナミクスをつじつまとした統合シミュレーションとして連結するための総合的な研究開発を進めた。

3. 研究の方法

本研究では、研究のプラットフォームとして青森県六ヶ所村の BA CSC (Broader Approach Computer Simulation Centre) に設置されている 1PF (ペタフロップス) 級のス

ーパーコンピュータ Helios を用いた。ディスラプション時には前駆現象(プリカーサー)、炉心の冷却(熱クエンチ)、プラズマ電流の遮断(電流クエンチ)、炉心プラズマの垂直移動現象(VDE)、境界層電流(ハロー電流)の発生、高エネルギー電子(逃走電子)の発生、といった複数の事象が連鎖的に発生することが特徴であり、現時点ではすべての現象を第一原理的に網羅することは困難である。そこで本研究では、熱クエンチ、電流クエンチなどの主プラズマの崩壊については流体モデル、もしくは1次元輸送モデルをベースにした解析を適用する一方、ITER で問題とされている逃走電子発生現象の解析には速度空間の挙動も含めた第一原理的なモンテカルロシミュレーションを適用ことにした。特に後者は、核融合炉で必要となる逃走電子の壁負荷評価に適用できるシミュレーションコードの構築を念頭において開発を進めた。

4. 研究成果

本研究によって得られた主要な成果として(1)5次元相対論的モンテカルロコード ETC-ReI を拡張し、逃走電子発生機構や衝突・放射による損失項を考慮しつつ、逃走電子の壁負荷までを取り扱うシミュレーションに開発したこと、(2)フォッカープランクコード TASK/FP に逃走電子発生時のループ電圧を決めるモデルを実装し、ディスラプション時の逃走電子発生率を自己無撞着に決定することのできるシミュレーションを構築したこと、等が挙げられる。以下では個別の研究成果の概略を記述する。また、これらの成果に加え、本研究の最終目的であるディスラプション統合コード開発に向け、実形状トカマク平衡に基づくコード間インタフェースを開発し、電磁流体シミュレーションコードやジャイロ運動論シミュレーションコードの統合的な解析環境を整備するとともに、抵抗壁や外部コイル系といった外部導体系と炉心プラズマの電磁結合を考慮した1.5次元輸送コードの開発によってディスラプションシナリオを解析するためのコード群の整備も大きく進展した。

(1) ETC-ReI: 5次元相対論的モンテカルロシミュレーションコードを用いた成果

逃走電子の解析手法として相対論的電子の案内中心軌道追跡に基づく5次元モンテカルロシミュレーションコード ETC-ReI を開発した。このコードの特徴は、プラズマ中および真空領域における摂動磁場による逃走電子軌道の散乱をプラズマ対向壁の領域まで一貫して扱うことができる点にある。これに加え、本研究では逃走電子の発生項や衝突、シンクロトロン放射損失項などの必要な物理効果をモンテカルロ・シミュレーションに実装することで、逃走電子の発生から壁への損失までの寿命全体を取り扱うことのできる

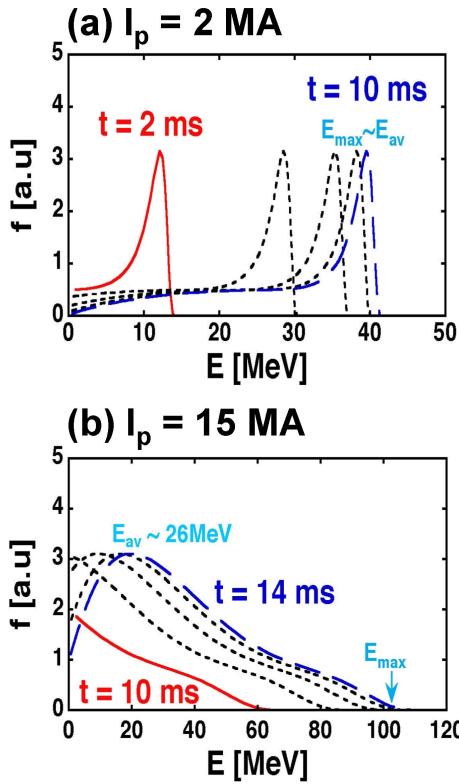


図1 異なるプラズマ電流に対する逃走電子エネルギー分布の比較: (a) 2 MA (JT-60U 規模), (b) 15 MA (ITER 規模)。逃走電子の雪崩的増倍の増幅率はプラズマ電流に比例しており、大電流では2次電子生成が顕著になることで低エネルギーの逃走電子が増大する。

シミュレーションコードに拡張した。JT-60U 実験ではプラズマ中の乱雑磁場によって逃走電子が損失し、それが雪崩的な増倍機構による逃走電子の発生の抑制につながる事が示唆されている。実験解析との対応づけには更なる解析が必要とされる段階ではあるが、ETC-Rel による解析によりディスラプション時の逃走電子挙動が明らかにされつつある。まず、逃走電子分布関数の時間発展をITER 規模および JT-60U 規模に対して比較することで近接衝突による増倍率の違いによって逃走電子のエネルギー分布が単一エネルギービーム型から指数関数型に変化することを明らかにした(図1)。発生した逃走電子は、乱雑磁場によるキックを受けてプラズマ外に損失することが予測されるが、ETC-Rel による解析により、小半径スケールの巨視的モードが存在する場合には、高エネルギーの逃走電子の有限軌道幅効果がドリフト共鳴を引き起こし、逃走電子閉じ込めのエネルギー依存性に影響することを明らかにした。これに関連した定性的に興味深い結果として、巨視的モード間のオーバーラップ条件にドリフト共鳴が干渉することで、逃走電子軌道特性(カオス化するか否か)が磁気島間の位相差に依存する状況が存在することが明らかになった(図2)。加えて、逃

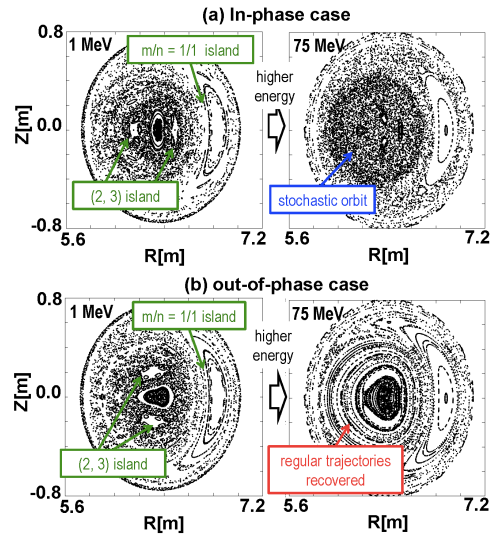


図2 ドリフト共鳴による逃走電子軌道のカオス化と回復。摂動磁場の位相を変化させると高エネルギー領域(~75MeV)において磁場の位相に依存して規則的軌道(右下)とカオス的軌道(右上)が出現する。低エネルギー(~1MeV)では磁場の位相の影響は観測されない。

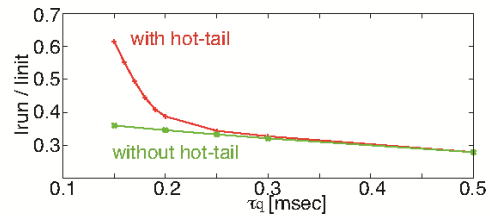


図3 TASK/FP による逃走電子発生量の計算(赤線)と Connor-Hastie の理論式(緑線)の比較結果: 縦軸はディスラプション前のプラズマ電流で規格化した逃走電子電流、横軸は熱クエンチ時間。熱クエンチ時間が電子テールの減速時間(~0.25ms)を下回ると電子テールの影響による逃走電子の増大が観測。

走電子ビームプラズマを終端させ、壁負荷をもたらすような巨視的摂動の候補として外部キック摂動磁場を考慮した軌道解析シミュレーションを行うことにより、壁負荷が摂動磁場のモード数に依存してトロイダル方向に局在化した構造を作り、熱負荷の集中をもたらすことを明らかにした。以上の結果のうち、ドリフト共鳴の影響に関する解析結果を、巨視的モードの存在下における逃走電子の軌道解析という立場で整理し、成果を Nuclear Fusion 誌で報告した。

(2) TASK/FP: フォッカー-プランクシミュレーションコードを用いた成果
ETC-Rel コードを用いた研究では逃走電子の発生量評価には Connor-Hastie の定常解モデルを用いたのに対し、ディスラプションのよ

うな過渡現象においてこのモデルが十分であることを検討する必要があることが研究過程で認識された。そこでディスラプション時の電子分布関数の変化を詳細に調べるため、京都大学で開発されてきたフォッカープランクコード TASK/FP にディスラプション時の誘導電場を実装するための拡張を行った。開発したモデルにより、主プラズマの熱クエンチ時間に対する逃走電子発生率の依存性を調べたところ、熱クエンチ時間が十分遅い場合には逃走電子発生率が Connor-Hastie の定常解モデルに漸近するのに対し、熱クエンチ時間が短くなると、熱クエンチ時の電子テール形成によって逃走電子発生率の顕著な増大が起こることを示した(図3)。結果のより詳しい解析によると、電子テールによる発生率の増大が観測される熱クエンチ時間の閾値はおおよそ電子テールの減速時間に一致する。ディスラプション時の逃走電子発生率に関しては現在、実験および理論の両面から定量的な検証が進められている研究段階にあり、本研究は従来の研究より近似の少ないシミュレーションモデルによる解析結果として、逃走電子発生量の定量的な予測に向け、意義のある成果を得た。

(3) RMHD4F_cyl: ソース項を考慮した電磁流体シミュレーションによる成果

ディスラプション現象、特に電磁流体不安定性による炉心プラズマの冷却(熱クエンチ)に関し、電磁流体不安定性シミュレーションコード RMHD4F_cyl による解析を行った。コードは簡約化 MHD モデルを採用することで、輸送の時間スケールにまたがるような比較的、長い時間スケールの解析が可能である点に特徴があり、これまで新古典テアリングモードと乱流の相互作用の研究などに用いられてきた。空間の離散化には擬スペクトル法をもちいているため、実空間のソース項をモデル化することが比較的容易である。後者の特徴を生かし、本研究では、熱クエンチ時の周辺プラズマからの不純物流入を時間的にプラズマ内部に侵入するシンク項によって模擬することで、炉心プラズマのコラプス現象の再現を試みた。シンク項の振幅および新入時間を変化させたシミュレーションを行った結果、熱クエンチ時にはまず放射損失による電子温度低下(抵抗増大)と電流分布への擾乱によってテアリング不安定性が励起されること、その後、磁場の浸み込みにより電流分布がピーキングし、中心の安全係数が 1 を下回った段階で内部キック型の不安定性が誘起され、中心の蓄積エネルギーがコラプスする現象が観測された。現象をより詳しく解明するための系統的なパラメータサーベイは本研究の範囲では実施できなかったが、計算科学的なコードの改造として 2次元領域分割によるコード性能向上を実施しており、今後は解析をより効率化できる見通しである。また、現在は円柱配位での解析に留まっ

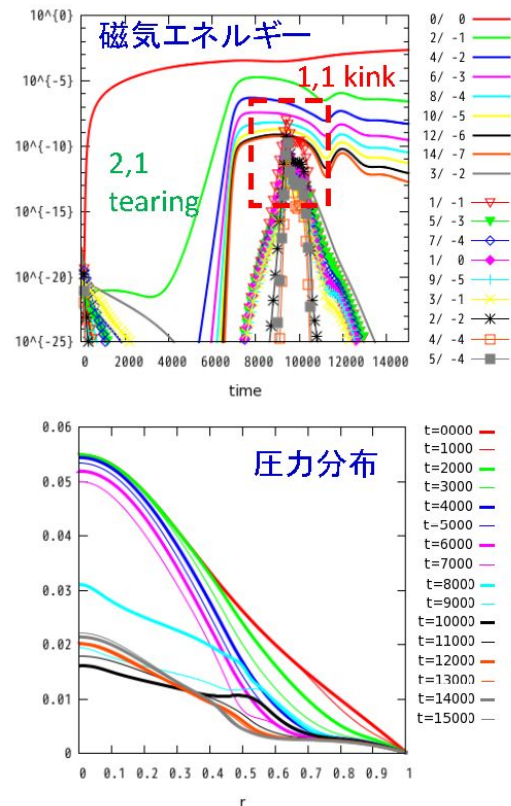


図4 放射損失によるテアリングモードとキックモード誘起のシミュレーション例: (上)磁気エネルギーの時間発展、(下)圧力分布の時間発展。放射損失の影響による電気抵抗の上昇・電流分布変形によりテアリングモードが励起。その後、磁場の浸み込みにより電流分布がピーキングし、(1,1)のキックモードが発生し、中心圧力がコラプスする。

ているがトカマク装置で重要となるトロイダル結合の効果を考慮するため、自由境界 MHD コードとのインターフェース開発など実験との比較に向けたコードの拡張に関しても成果を得ている

他方、上記のシミュレーションを開放系におけるプラズマ応答の研究という立場から俯瞰すると、外部から与えたソース(粒子補給、加熱等)がプラズマ乱流やメソスケールの構造に対しどのような影響を与えるか、という学術的に興味深い課題につながる。そこで本研究では、4場簡約化 MHD シミュレーションに密度ソースを加えたときの非局所応答の解析を行い、ポロイダル方向に非対称な構造を持つソースを導入することでコアと周辺をつなぐような渦巻き状の構造が形成されることを発見するなどの成果を得ている。

(4) 研究の総括と統合コード開発に向けた進展

本研究ではディスラプション時の逃走電子の発生および閉じ込めに関する研究を中心

として、ディスラプション時の過渡現象に関する総合的なシミュレーション研究を展開した。ここで記述した成果以外にも本研究の最終目的であるディスラプション統合コードの構築に向け、各フェイズのシミュレーションを統合するためのインタフェース開発などにも研究資源を投入しており、成果として、ディスラプション時に抵抗壁中に流れる渦電流と主プラズマの平衡変化を自己無撞着に決定する主プラズマの垂直移動現象(VDE)のシミュレーションコードを新たに整備した。VDEはディスラプション時に発生した逃走電子が壁に衝突する位置を決定する機構として重要であり、本研究で開発した逃走電子シミュレーションとVDEシミュレーションを結合することでITERにおける壁損傷予測という研究目的を達成するための目処を得ることができた。

また、本研究で得られた成果をコミュニティに発信するため、Plasma Conference 2014において、シンポジウム講演「原型炉制御に向けたディスラプション研究の展開」を企画し、本研究の成果を発信するとともに、今後、重要となる課題としてディスラプションと核融合原型炉の関わりに関する討論を行い、今後の研究の端緒とした。

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18件)

H. Nuga, A. Matsuyama, M. Yagi and A. Fukuyama, "Fokker-Planck Simulation of Runaway Electron Generation in Tokamak Disruptions", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.10, 2015, pp.1203006-(1-2), DOI:10.1585/pfr.10.1203006.

A. Matsuyama, "Chaos in Runaway Electron Motion", Journal of Plasma and Fusion Research, 査読無, Vol.91, 2015, pp.204-208, http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2015_03/jspf2015_03-204.pdf.

M. Yagi, N. Miyato, A. Matsuyama, and T. Takizuka, "Simulation study on nonlocal transport for peripheral density source", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.9, 2014, pp.3403030-(1-4), DOI:10.1585/pfr.9.3403030.

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, 査読有, Vol.54, 2014, pp.123007-(1-14), DOI:10.1088/0029-5515/54/12/123007.

A. Matsuyama and M. Yagi, "Relativistic Guiding-Center Equations Including Slow Equilibrium Changes in Magnetic Coordinates", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.8, 2013, pp.1403170-(1-6), DOI:10.1585/pfr.8.1403170.

H. Naitou, Y. Yamada, S. Tokuda, Y. Ishii, and M. Yagi, "HPC Parallel Programming Model for Gyrokinetic MHD Simulation", Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol.6, 2011, pp.2401084-(1-4), DOI:10.1585/pfr.6.2401084.

〔学会発表〕(計72件)

H. Naitou, "Acceleration of PIC code with Intel MIC/GPU", 20th Numerical Experiment of Tokamak (NEXT) Meeting, Jan. 14, 2015, Kyoto Teresa, Kyoto.

A. Matsuyama, "Simulation Study on Runaway Electrons in Tokamak Disruption Events", S11-4, Plasma Conference 2014, Nov. 20, 2014, Niigata, Japan.

A. Fukuyama, "Integrated Simulation for Disruption Control", S11-5, Plasma Conference 2014, Nov. 20, 2014, Niigata, Japan.

M. Yagi, A. Matsuyama, H. Nuga, A. Wakasa and A. Fukuyama, "Simulation of runaway electron confinement in presence of macroscopic MHD modes", Plasma Simulator Symposium 2014, Sep. 12, 2014, National Institute for Fusion Science, Toki, Japan.

M. Yagi, "Prospects for Fusion Simulation Research using BA IFCR-CSC", Plasma Simulator Symposium 2012, Sep. 12, 2012, National Institute for Fusion Science, Toki, Japan.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

<http://kaken-yagi.jaea.go.jp/web.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢木雅敏 (YAGI, Masatoshi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 六ヶ所核融合研究所・研究
主席

研究者番号：70274537

(2) 研究分担者

内藤裕志 (NAITOU, Hiroshi)

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：10126881

福山淳 (FUKUYAMA, Atsushi)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：60116499

石井康友 (ISHII, Yasutomo)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 六ヶ所核融合研究所・研究
主幹

研究者番号：70354579

中島徳嘉 (NAKAJIMA, Noriyoshi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：30172315

(3) 連携研究者

松山顕之 (MATSUYAMA, Akinobu)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 六ヶ所核融合研究所・研究
員

研究者番号：90581075

滝塚知典 (TAKIZUKA, Tomonori)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：40354576