

令和元年6月20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：15K06660

研究課題名（和文）原型炉プラズマの運転裕度の定量的評価と燃焼制御シナリオ概念の構築

研究課題名（英文）Development of control scenario concept for DEMO burning plasma based on evaluation of plasma operation margin

研究代表者

坂本 宜照（Sakamoto, Yoshiteru）

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・グループリーダー（定常）

研究者番号：30354583

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000円

研究成果の概要（和文）：将来の核融合原型炉の燃焼プラズマは複数の物理量が連関する特徴を有する。本研究では、燃焼プラズマの制御シナリオの物理基盤を構築するために、輸送シミュレーションを用いて外部アクチュエーターに対する燃焼プラズマの応答特性を調べた。その結果、周辺部への電流駆動によって長い時間スケールで核融合出力を制御できることを明らかにするとともにその応答特性を定量的に評価した。また、中心部のプラズマ密度変動に対する核融合出力等の応答特性を明らかにし、制御シナリオの物理基盤を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

第21回気候変動枠組条約締約国会議で採択されたパリ協定の2 目標達成には核融合エネルギーの導入が極めて有効であり、核融合炉の実現に向けた燃焼制御手法の確立に向けた物理基盤の構築を国際熱核融合実験炉ITERでの実験開始前に着手したことの社会的意義は大きい。一方で、本研究を通して複雑なパラメータ連関（複合系）を持つ高自律性燃焼プラズマ自律・非線形系のダイナミクス（変化量、時定数）の解明に寄与するという学術的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：The burning plasma of future fusion DEMO reactor has the feature that multiple physical quantities are linked. In this study, in order to develop the physics basis of the control scenario for the burning plasma, plasma transport simulation was used to investigate the response of burning plasma to the external actuators. As a result, it was clarified that the fusion output could be controlled on a long time scale by current drive to the peripheral region, and its response were quantitatively evaluated. In addition, we clarified the response of the fusion output to the plasma density fluctuation was clarified, and the physical basis of the control scenario was developed.

研究分野：核融合原型炉設計、核融合プラズマ実験

キーワード：核融合原型炉 燃焼プラズマ制御 過渡応答 運転裕度

## 1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉 ITER の建設が国際協力の下、順調に進展しており、燃焼プラズマ実現への期待が高まっている。また、国内では核融合炉開発ロードマップの議論が進み、同様のロードマップが発表された欧州においては2014年から本格的な原型炉概念設計活動がEUROfusionにおいて開始された。国内外において原型炉に向けた研究開発が本格的な研究課題となりつつある。原型炉で想定される燃焼プラズマは、ITER よりも核融合エネルギー増倍率や自発電流(プラズマ圧力勾配に比例して流れる電流)の割合が高いため、高い自律性(自己形成)を有するため、複合的な燃焼制御シナリオの構築が極めて重要な研究課題である。

燃焼プラズマは ITER で初めて実証されるため、DT 反応で発生するアルファ粒子による加熱が主体となる高自律性燃焼プラズマの複合的な燃焼制御シナリオを構築するためには、これまでの実験研究だけでなく燃焼プラズマのシミュレーション研究が不可欠である。特に、燃焼制御シナリオを構築する際に必要となる運転限界に対する裕度の考え方が曖昧であり、運転裕度を定量的に評価する手法を確立する必要がある。そこで、本研究課題では図1に示すように燃焼プラズマの過渡応答特性と外部アクチュエータ(加熱・電流駆動、粒子供給)による制御応答特性をシミュレーションにより調べ、運転限界(ベータ限界や密度限界)に対する適切な運転裕度を定量的に評価する独自の手法を着想し、総合的な燃焼制御シナリオ構築の物理基盤を確立することを目的としている。

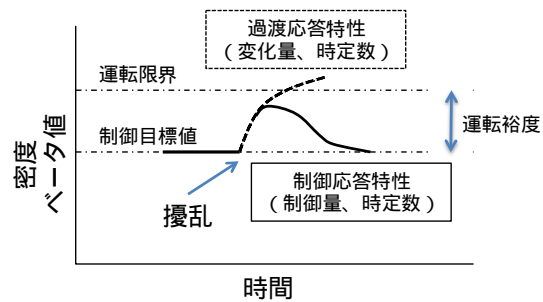


図1 運転限界に対する裕度の考え方

## 2. 研究の目的

本研究課題では、原型炉の燃焼プラズマ制御シナリオの物理基盤を構築することを目的に、燃焼プラズマの過渡応答特性と外部アクチュエータ(加熱・電流駆動、粒子供給)による制御応答特性を調べ、ベータ限界や密度限界等の運転限界に対する適切な運転裕度を定量的に評価する。そのため、(1)原型炉プラズマ物理設計パラメータセットのデータベース構築、(2)原型炉プラズマの基本運転シナリオの最適化、(3)プラズマ過渡応答特性・制御応答特性に基づく運転裕度の評価によって、総合的な燃焼制御シナリオ概念の物理基盤を構築することが目的である。

## 3. 研究の方法

高自律性燃焼プラズマではプラズマ温度、密度、電流の各分布が相互に関連するとともに外部アクチュエータも加熱と電流駆動パワーが連動するなど、原型炉全体として複雑なリンケージを形成するため、複合的な制御技術開発が要求される。本研究課題では、高自律性燃焼プラズマの核融合原型炉の複合的な燃焼シナリオ概念を構築する基盤となる研究を実施するため、以下の方法で研究を実施する。

### (1) 原型炉プラズマ物理設計パラメータセットのデータベース構築

原型炉で所要の核融合出力を得るためのプラズマ物理設計パラメータの組み合わせは、無数に存在する。例えば、高ベータプラズマを指向するのか、高密度プラズマを指向するのかによってプラズマ運転温度領域が異なり、その結果、電流駆動効率の違いにより必要な外部電力が異なることで、外部からの制御性やプラズマの過渡応答特性にも違いが生じる。そこで、数十万キロワットの電気出力を達成可能なプラズマ物理設計パラメータセットの範囲を明らかにし、これまでの実験データや ITER で想定されるプラズマ性能から外挿可能な範囲内でデータベースを構築する。

### (2) 原型炉プラズマの基本運転シナリオ

複数の輸送モデルを用いて、原型炉燃焼プラズマの立ち上げ、燃焼維持、立ち下げの各フェーズにおける基本運転シナリオを 1.5 次元非定常輸送解析シミュレーションにより分析する。特に、高自律性燃焼プラズマ特性下では、所要のプラズマ性能に到達するためにはプラズマ初期状態からの履歴が最終燃焼状態に大きく影響するが、これまでに系統的な研究は行われていない。そこで、(1)で構築したデータベースの代表的なパラメータセットに対して、プラズマ電流や圧力分布の立ち上げが最終燃焼状態に与える影響を明らかにする。

### (3) 過渡応答特性に基づく運転裕度の評価

原型炉の燃焼制御では、所要の核融合出力を運転限界の範囲内で安定に維持する必要がある。そのためには適切な運転裕度を見込む必要があるが、これまで定量的な評価は行われていない。そこで、2)で分析した基本運転シナリオシミュレーションにおいて、意図的な外部制御異常やプラズマ内部擾乱模擬を与え、図1に示すような燃焼プラズマの過渡応答特性(変化量、時定数)

や制御応答特性（制御量、時定数）を解析し、運転裕度範囲を定量的に明らかにする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 原型炉プラズマ物理設計パラメータセットのデータベース構築

トカマク型定常原型炉で数百メガワットの正味電気出力を達成可能なプラズマ物理パラメータセット（閉じ込め性能、プラズマ密度、プラズマ温度、プラズマベータ値、自発電流割合、不純物密度、放射損失割合、等）を炉工学パラメータと燃焼プラズマにおけるエネルギーバランスと電流バランスを満足する設計点について、炉設計システムコードを用いてデータベースを構築した。また、正味電気出力を正確に評価するために、発電に利用する冷却水系ポンプ動力等の所内循環電力を評価した。その結果、核融合出力 1.5 ギガワットの原型炉では 90 メガワット程度の冷却水系ポンプ動力が必要なことが分かった。加熱電流駆動装置に必要な電力等を踏まえると、数百メガワットの正味電気出力を達成するためには、核融合出力を 2 ギガワット程度まで増大させる必要があることが分かった。

炉設計システムコードを用いたデータベースを元にして、中性粒子ビームによる外部電流駆動と圧力勾配によって駆動される内部自発電流の和である駆動電流の空間分布とプラズマ平衡配位を無矛盾に解析、過渡応答解析に利用する原型炉プラズマ平衡配位のデータベースを構築した。本データベースでは、様々な密度分布や温度分布、プラズマベータ値、安全係数分布に加えて、中性粒子ビームの入射角度を変えて駆動電流分布の異なるデータ群で構成した。その際、周辺部輸送障壁によって形成されるペDESTAL構造によって安全係数値が大きく影響を受けることが判明した。そこで、データベースの精度を高めるため、専門家の協力を得ながら EPED1 モデルと MARG2D 安定性解析コードを用いて詳細なペDESTAL構造の分析を実施した。ペDESTAL密度をグリーンワルド密度限界程度に設定した場合に、ペDESTAL温度が 5keV 程度になることが分かった。

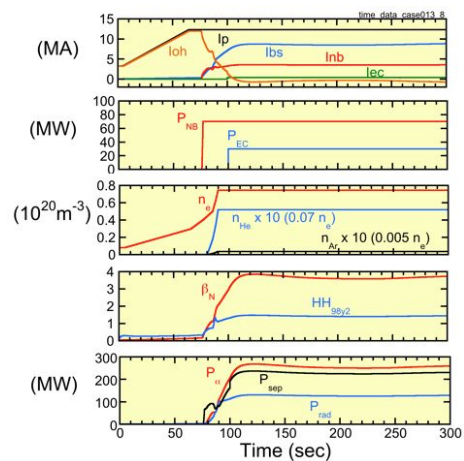


図2 原型炉プラズマの基本運転シナリオのシミュレーション

##### (2) 原型炉プラズマの基本運転シナリオ

原型炉の炉心プラズマ運転シナリオの構築を目指して、1.5次元非定常輸送解析コード(TOPICS)を用いた解析を実施した。基本的な原型炉パラメータは、プラズマ大半径 8.5m、トロイダル磁場 6T、プラズマ電流 12.3MA である。輸送モデルには、JT-60U や JET 実験データを用いて妥当性を検証した電流拡散バレーニングモード(CDBM)を適用し、密度分布は中心密度  $1 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$ 、ペDESTAL密度  $6.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$  を仮定した。また、フラットトップでの電子密度に対する不純物の割合として 0.5% の Ar と 7% の He を仮定した。シミュレーションの結果、70MW の NB 加熱で内部輸送障壁を形成し 20MW の EC パワーを周辺部 ( $r/a=0.6$ ) に追加注入することで所要のプラズマを安定に維持できることを明らかにした(図2)。

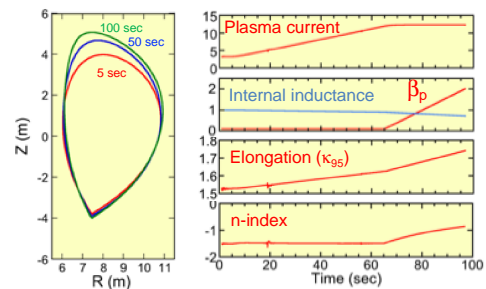


図3 高楕円度プラズマ立ち上げの基本運転シナリオのシミュレーション

さらに、垂直位置安定性を確保しつつ高楕円度プラズマを立ち上げるシナリオを構築するため、プラズマ平衡制御シミュレーターMECS に3次元導体壁構造を考慮できるようにするため、計算メッシュと3次元渦電流固有モードの時定数と相互インダクタンスを3次元渦電流解析により評価し、それをMECSに適用する改良を行った。そして、1.5次元非定常輸送解析コード(TOPICS)を用いて評価したプラズマパラメータの時間発展を参照して、高楕円度プラズマ配位を安定に立ち上げるシナリオを構築することに成功した(図3)。

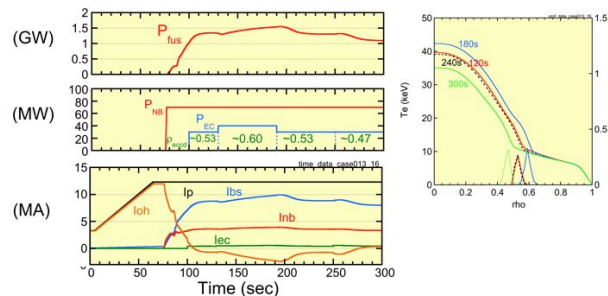


図4 周辺 ECCD による核融合出力制御

### (3) 過渡応答特性に基づく運転裕度の評価

構築した原型炉プラズマの基本運転シナリオにおいて、2つの方法で燃焼プラズマの過渡応答特性を評価した。まず、EC パワーを注入する位置を変えることで、内部輸送障壁の位置を制御することが可能で、その結果、核融合出力を制御できることを示した。その際、核融合出力を増大させる場合と減少させる場合において、時定数が10倍程度異なることを定量的に明らかにした(図4)。電流分布の時間変化に要するタイムスケールが密接に関連していると考えられる。さらに、中心密度変動(3%)に対するプラズマ過渡応答特性を調べ、核融合出力、温度、非誘導電流及び誘導電流におけるパラメータ連関を明らかにした(図5)。プラズマ密度の増加と減少によるプラズマ応答の時定数に大きな違いはないが、核融合出力は中心密度に極めて敏感であることが分かった。これらの知見から、時間的に裕度のある燃焼制御で対応できる場合にはECによる周辺電流駆動を用いた内部輸送障壁の制御が有効であるが、運転限界に近づくなどして短い時間スケールでの制御が必要な場合には密度制御が適していることを明らかにした。

ベータ限界に対する運転裕度を評価するため、線形理想MHD安定性解析コードMARG2Dを用いて導体壁の安定化効果を評価し、ベータ限界の導体壁位置に対する依存性を明らかにした。さらに、今年度を実施したベータ限界評価と昨年度に実施したプラズマ過渡応答特性を組み合わせることで運転裕度を評価した。

以上の研究成果は、複雑なパラメータ連関を持つ高自律性燃焼プラズマにおける運転裕度を定量的に評価する手法を初めて構築した意義があり、本成果はIAEA主催の核融合エネルギー会議で口頭発表を行うとともに、Nuclear Fusion誌に投稿予定である。

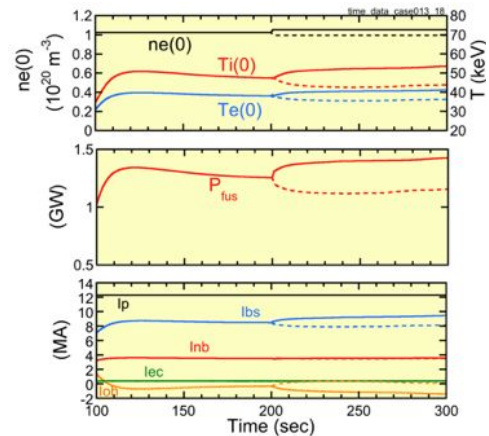


図5 中心密度変動に対するプラズマ過渡応答特性

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 0件)

[学会発表](計 15件)

- (1) Y. Sakamoto et al., "Progress of Plasma Scenario Modeling for JA DEMO", The 14th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (2019)
- (2) Y. Sakamoto et al., "Development of physics and engineering designs for Japan's DEMO concept", The 27th IAEA Fusion Energy Conference (2018)
- (3) Y. Sakamoto et al., "Operation scenario development and control issues on DEMO", The 5th DEMO Programme Workshop (2018)
- (4) 坂本宜照、「原型炉概念設計の進捗と展望」、第12回核融合エネルギー連合講演会(招待講演、2018年)
- (5) 坂本宜照、「原型炉に要求される加熱・電流駆動システム」、第12回核融合エネルギー連合講演会(招待講演、2018年)
- (6) 坂本宜照、他、「原型炉概念構築に向けた物理設計の進展」、第12回核融合エネルギー連合講演会(2018年)
- (7) 坂本宜照、他、「原型炉概念構築に向けた物理設計の進捗」、第35回プラズマ・核融合学会年会(2018年)
- (8) 坂本宜照、他、「原型炉概念における物理設計の進展」、Plasma Conference 2017
- (9) 坂本宜照、他、「原型炉概念設計におけるプラズマ運転シナリオの検討」、Plasma Conference 2017
- (10) 坂本宜照、「トカマク系の運転制御」、Plasma Conference 2017(招待講演)
- (11) Y. Sakamoto et al., "Progress of DEMO physics design study in Japan", 29th Symposium on Fusion Technology (2016)
- (12) Y. Sakamoto et al., "Physics approach to forecasting DEMO plasma", 4th IAEA DEMO Programme Workshop (2016)
- (13) 坂本宜照、他、「原型炉概念構築に向けた主要パラメータの検討」、第33回プラズマ核融合学会年会(2016年)
- (14) Y. Sakamoto et al., "Integrated design study for DEMO concept definition", 3rd IAEA DEMO Programme Workshop(招待講演、2015年)
- (15) 坂本宜照、他、「核融合原型炉における所内必要電力の評価」、第32回プラズマ・核融合学会年会(2015年)

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。