

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：82110

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889068

研究課題名(和文)核燃焼炉コア-ダイバータ領域グローバル分布の定常運転領域と動的応答特性の研究

研究課題名(英文)Compatibility study between density conditions for core and divertor in fusion reactor

研究代表者

徳永 晋介(Tokunaga, Shinsuke)

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・任期付職員

研究者番号：90704990

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)：トカマク型核融合炉の炉心プラズマ設計において、大きな核融合出力と装置への負荷抑制が折り合う運転点の設定と、その運転点での出力定常制御は、発電装置としてのエネルギー規模を規定する本質的で重要な課題である。

本研究では、燃料である重水素とトリチウムの比率を制御する事によってコアとダイバータの出力と熱負荷を、幅広いパラメータレンジに対して統合的に制御する手法を提案し、統合輸送シミュレーションによって非常に有効かつロバストな制御が可能である事を確かめた。これにより燃料供給による核融合出力制御が、粒子ピンチ特性に依存せず、SOLダイバータ密度制御と両立し得る事を示した。

研究成果の概要(英文)：Compatibility between fusion-power-output in core plasma domain and power-handling capability in divertor gives a critical outline of economically rational fusion reactor design. The fusion output is proportional to the square of fuel density in core region, while the sufficient plasma density in divertor region is crucial condition for sustainment of detached-divertor plasma. The global density profile consistent to the both conditions to be achieved and maintained throughout operation is the target of this study.

By the use of a lightweight and reactor design oriented 1.5D integrated transport code ATLAS, hundreds of parameter scan calculations had been carried out. It was found that it is possible to robustly control the fusion output, against to considerable range of uncertainty of particle pinch velocity, with the constraint of SOL-edge density consequenced from the divertor condition, by controlling tritium ratio via pellet fueling.

研究分野：核融合

キーワード：核融合

## 1. 研究開始当初の背景

プラント規模での経済合理性が求められる原型炉以降の核融合炉においては、高い核融合出力が望ましい一方、熱を受け止めるダイバータ板の健全性を長期に渡って保つ運転領域設定が求められる。二つはそれぞれ核融合炉が扱うエネルギー規模の下限と上限を与える、システムデザインの大柱と言える。この双方にとって重要なのが、プラズマ/不純物の密度制御である。

核融合出力は燃料であるプラズマ密度の二乗に比例する。一方ダイバータ負荷低減には高いプラズマ密度・不純物密度による放射損失の増大が望ましい。しかしながら高い不純物密度は放射損失増大により温度を低下させるのみならず放射崩壊を引き起こすためコアにとっては有害と言える。燃焼炉においてダイバータ熱負荷を許容レベルまで低減するには非接触ダイバータと呼ばれる自律構造形成を利用することが必須と考えられており、そのためには SOL ダイバータ領域での高いプラズマ密度が必要となる。しかしコアにとっての密度境界条件である SOL ダイバータの密度を上げればコアの密度も上昇し、ダイバータ負荷低減効果以上に核融合出力が増大してしまうことになる。

高い定常核融合出力とダイバータ負荷抑制を同時に満足するグローバルな燃料・不純物密度分布とその動的な制御は、タイトな経済性条件が課される核融合炉の設計・開発において、極めて本質的な課題である。

これまで、原型炉以降を見据えて核融合炉のコアとダイバータ双方に関して統合的な粒子制御の動的応答を扱う研究は前例に乏しく、運転シナリオや制御ロジック構築に向けた喫緊の課題となっている。本研究で用いる統合コード ATLAS は、コア、ダイバータ、計測・制御機器など独立にも動作するモジュール群から構成され、グローバルかつ動的な分布を扱いながら大規模パラメータサーベイに堪える実行速度とのバランスを保ち、包括的な核融合炉炉心プラズマ制御研究に好適な特性を有する。

## 2. 研究の目的

トカマク型核融合炉の炉心プラズマ設計において、大きな核融合出力と装置への負荷抑制が折り合う運転点の設定と、その運転点での出力定常維持制御は本質的で重要な課題である。

本研究では、大規模パラメータサーベイにより、ダイバータ板負荷許容条件を満たす核融合出力とグローバルなプラズマ密度・不純物密度の組み合わせを集合として得て、核融合炉の定常運転領域設定に良好な見通しをもたらすマップを提供する事を目標として行う。

また動的なコア-SOL ダイバータ結合輸送

シミュレーションにより、高自律性プラズマにおいて一層重要となる SOL ダイバータ領域の密度制御に対するコアプラズマの動的な分布応答特性を整理し、その知見を用いた挙動予測に基づく能動的制御ロジックの開発を行う。

## 3. 研究の方法

核融合プラズマの応答、特に粒子輸送については、現時点では定量的予測が困難な物理研究課題を多く含んでおり、特定のパラメータ点やモデルに依存した制御設計にはリスクが伴う。特に、コアにおける粒子ピンチやダイバータにおけるデタッチ（非接触ダイバータ）排気特性などは、核融合炉にとって非常に本質的なファクターでありながら、定量的な見通しが困難である。本研究では、使用する統合コードの軽快な計算速度を生かし、これらのファクターを振ったパラメータサーベイを行って、各パラメータの相乗的な影響の傾向についての理解と、解決の方向性を示す事を目標に行った。

### (1) 実効粒子閉じ込め時間に対する粒子制御の影響

高速な 1.5D 輸送コードを用いた広範なパラメータサーベイにより、燃料供給ペレットのデポジション深さ、粒子ピンチ速度、拡散係数、燃料供給量、粒子還流率が、実効粒子閉じ込め時間に対して複合的にどのような影響を与えるか調査し、コアの要請を満たす粒子供給・排気のあり方を定性的に明らかにする。

### (2) コア密度を介した核融合出力への SOL-エッジ密度制御の影響

SOL ミッドプレーン～エッジ密度をガスバフで制御する事を想定した際の、コアへの燃料ペレットによる出力制御余地に関して輸送コードを用いたパラメータサーベイを行う。現時点での定量予測が困難な粒子ピンチ特性の変動に対して、ペレットデポジション深さ、ペレット供給量の変化で対応できるレンジについて考察する。すなわち、ダイバータ保護の観点からエッジ密度が拘束される際の、コアが整合性を保ち得るパラメータ領域、制御の自由度について調査する。

### (3) エッジ密度維持と統合的なコア出力制御

燃料の重水素とトリチウムの比率を制御対象として、コアの出力制御を行う。ダイバータが要求する SOL～エッジ密度や、粒子ピンチ強度の幅に対して、コアにのみ効果を持つ D/T 比率を制御する事で、ダイバータと統合的なコアの出力制御の可能性について検討を行う。

### (4) コアへの影響を抑制するダイバータ熱負荷制御コンセプトの検討

本研究がこの段階に至る間に、BA 原型炉ダイバータ設計研究の一環として進められているダイバータ専門コード SONIC を用いたシミュレーション研究の進捗から、1.5GW 核融合出力に対してダイバータ板熱負荷を  $6\text{MW}/\text{m}^2$  以下に抑える不純物ガスパフが、コアにとって許容不可能な SOL ミッドプレーンでの不純物密度をもたらす見通しが示されており、当初計画通りにコアと整合的なダイバータ側の密度分布を研究するためのパラメータ領域を設定する事が困難である事が判明した。またダイバータの中性粒子計算が動的な応答を扱うには追加コード開発が必要である事も判明した。そのため、中性粒子輸送モデルの開発設計・実装を行いながら、先に不純物パフとは異なる方法で、コアへの悪影響を避けてダイバータ板熱負荷を低減するダイバータコンセプトについて検討を開始した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 実効粒子閉じ込め時間に対する、粒子輸送特性と粒子制御の影響

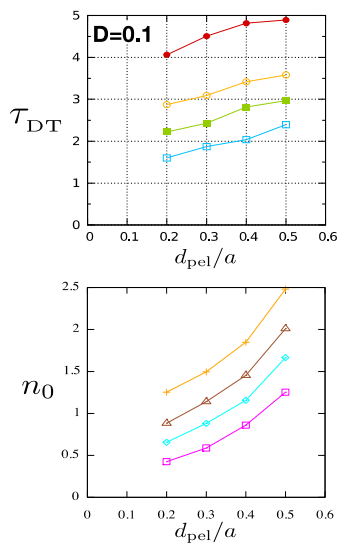


図1 異なる粒子ピンチ速度に対する、ペレット燃料供給デポジション深さが燃料粒子閉じ込め時間と中心電子密度に与える影響。各線の色の違いは仮定された粒子ピンチ強度の違いを表す。

粒子輸送特性（粒子拡散係数、粒子ピンチ速度）および粒子制御（ペレットデポジション深さ、粒子供給量、ヘリウム灰排気効率など）について広範なパラメータサーベイを行い、輸送特性や燃料供給・排気アクチュエータ性能自体が燃料供給効率に与える影響や、出力に対するインパクトについて調査した。図1はペレットデポジション深さが粒子閉じ込め時間と中心密度に与える影響を、異なるピンチ強度に対してスキャンした結果である。デポジション深さが大きいほど（ペレットがプラズマ中心近くまで入るほど）粒子閉じ込め時間はほぼリニアに伸びている。一

方、中心密度は非線形に上がってゆく。粒子ピンチの効果は単純に線形なオフセットとして現れおり、制御との相乗効果は見られない。燃料供給量や排気効率についてもスキャンを行い、放電時間 180sec の輸送計算のパラメータサーベイ計 86 ケースから、ダイバータと整合的なコアの密度分布を得て維持するために支配的な影響を与えるファクターについて検討を行った。制御ファクターとしてはペレット入射深さが比較的效果が大きい事が示されたが、原型炉プラズマにおいてペレットが  $r/a=0.6$  付近まで侵入するために必要な入射速度を評価したところ、数十  $\text{km}/\text{s}$  という非現実的な値となる。プラズマが自律的に決定する異常粒子拡散、粒子ピンチの効果に抗して粒子制御を行うだけの工学性能をアクチュエータに要求する事は非常に困難である事が示された。すなわち、コアにとっての境界条件である SOL-ダイバータの密度がダイバータ保護の観点から決定された時に、コアの密度分布はその境界条件と自律的輸送特性でほぼ決まってしまう、核融合出力制御とダイバータ負荷低減を両立する密度分布を、コアへの直接粒子供給により調整・制御する見通しは厳しく、都合よく想定（仮定）された粒子輸送特性に設計が強く依存してしまう可能性がある。

##### (2) エッジ密度とコア密度の個別制御

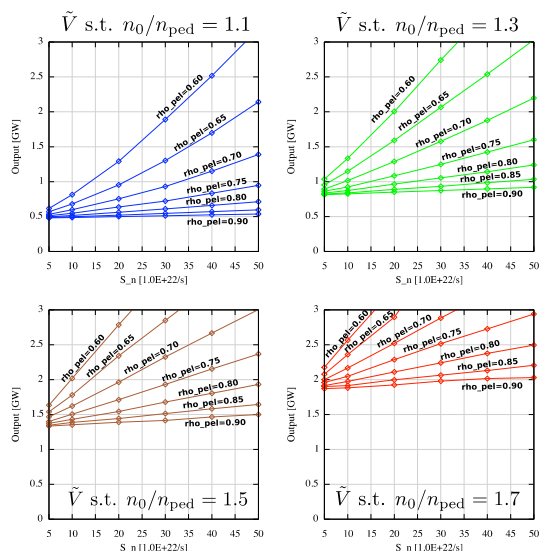


図2 エッジ密度をグリーンヴァルド密度限界の70%に維持した場合の、異なる粒子ピンチ速度とペレットデポジション深さに対する、粒子供給量が核融合出力に及ぼす影響

ダイバータ負荷抑制の観点から、エッジ-SOLダイバータ密度は、熱流束に対して非接触ダイバータを維持できるだけの水準を維持する必要がある。その結果、現時点で定量予測困難な粒子ピンチの効果によりコア密度が上昇し、核融合出力は勝手に増大してしまう事になる。図2は、燃料供給量を制御した場合に、核融合出力をどのレンジで調整する事

が出来るかを、粒子ピンチとペレットデポジション深さを振った 140 点のパラメータスキャンで調べた結果である。粒子ピンチ強度は、実験で示されている実効衝突周波数依存性に鑑みて有り得べき範囲でサーベイを行った。粒子ピンチの効果はやはりオフセットとして表れており、ピンチ効果の見通しのずれが簡単に 1GW 以上の出力の差異を生む事が示されている。ダイバータ保護のため SOL エッジ密度をガスパフで維持しているため、ペレットでそれ以下に出力を下げる事は出来ない。またピンチが弱く、ペレットが浅くしか侵入できない場合には、ほとんどペレット供給量増減で出力を変える事が出来ない。現実的な入射速度に多少な伸び代を勘案し、プラズモイドドリフトを考慮したとしても  $r/a < 0.8$  へのデポジションの見通しは非常に厳しい。SOL ダイバータとコアとの整合性を取るために、コアへの直接供給制御によって輸送特性に逆らって調整出来るレンジは非常に限られている。

### (3) トリチウム比率制御によるコアとダイバータの整合的な密度制御

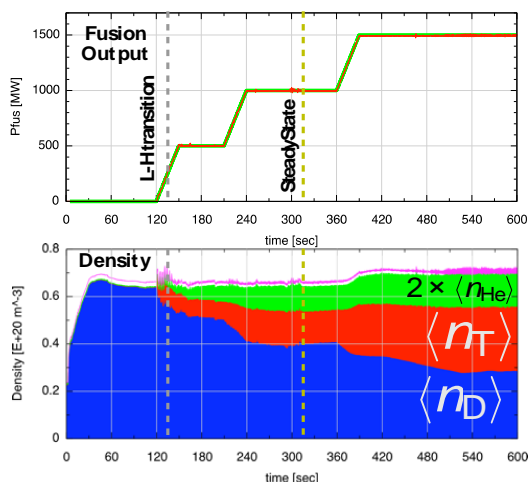


図3 1.5D 輸送計算による（上図）核融合出力（緑：制御目標値、赤：実際の値）と、電子密度とイオン種比率の時間発展

ダイバータ板熱負荷抑制の観点からのエッジ密度境界条件制約と、コアの核融合出力制御のための密度条件を、D/T 比率を 50%:50% に固定したまま実現する見通しは厳しいことが(2)までの成果により示された。重水素 D とトリチウム T の比率が影響するのは、核融合出力のみであり、ダイバータのデタッチ条件には影響しない。この新たな自由度により、コアとダイバータがそれぞれ満たすべき密度条件を整合させることを、現実的な制御条件のもとで検討した。

SOL ダイバータ領域へのガスパフと、NBI 入射粒子は D のみとし、ペレットを D と T の混合と設定し、トリチウム供給源をペレットに限定することで、SOL ダイバータ密度維持条件とそのため制御がコア出力に影響しないようにシステムを再設計した。

図3は、核融合出力制御結果と、その時の密度制御の結果を示している。核融合出力は 0 から 1.5GW 出力の間でほぼ完璧に制御できている一方、トータルのコア-エッジ密度はそれと無関係に維持できている。トリチウム比率を実際に測っているわけではなく、出力が目標に達するまでペレット入射で D/T 比率を上昇させており、その際にペレットによる密度供給が増えた分だけ、線密度計測に基づき、ガスパフが密度供給を減らすフィードバック制御を行っている。

重要なことは、SOL エッジ密度条件とコアの密度条件を明確にデカップルする事で、本研究の主眼であった、コアとダイバータ双方に整合的な密度制御の見通しが得られたという点である。このケースだけでなく粒子ピンチに関するパラメータスキャンを行い、幅広いパラメータレンジで核融合出力 1.5GW と指定したエッジ密度をロバストに維持する事が可能となった。

ただし、図2左上のように粒子ピンチが弱く、ペレット供給周波数を最大にしても出力目標に届かない場合には、エッジ境界密度を増やしてやる必要がある。その場合、密度を増やすことはダイバータにとっての問題は無いが、グリーンヴァルド密度限界との抵触が懸念材料となる。これは出力制御の要請とは異なる条件であり、現時点で密度限界の物理メカニズムが不明であり輸送計算で扱う事も困難である事もあって、本プロジェクトのスコープには含めていない。

### (4) コアへの影響を抑えたダイバータ板熱負荷制御手法のコンセプト検討

ここまで、ダイバータが要請する密度拘束条件に対してコアの出力制御が要請する密度を実現するグローバルな分布、また制御のあり方を解明すべくコアの輸送シミュレーションを行い、これまでの成果によって幅広いパラメータレンジで可能である事が既に示された。当初計画によれば、次いでダイバータ計算によるダイバータ板熱負荷低減制御が要請する、プラズマ密度・不純物密度に関する研究を開始する予定であった。しかしダイバータ専門コード SONIC を用いた計算の結果から、コアにとって許容可能な不純物密度が全く得られておらず、目標とするグローバルに整合的な不純物密度分布の見通しが全く立たないという問題に直面した。

そこでまず、コアへの影響を抑えてダイバータ板熱負荷だけを下げるとする制御方を研究する事にした。

不純物パフによる放射損失促進以外に、熱負荷を低減する方向性として、磁場平衡を制御して受熱面積を拡大する、磁力線接続長を延長するなどの、電磁的な幾何形状の制御手法が存在する。不純物入射に比べてコアへの悪影響は小さいものの、コアのポロイダル断面形状への影響などが生じる可能性がある。

そこで、ダイバータ板近傍のみに影響を限定した磁束管拡張をもたらし、受熱面積や磁力線接続長を大きくする Flux Tube Expansion (FTE)コイルコンセプトを提案した。

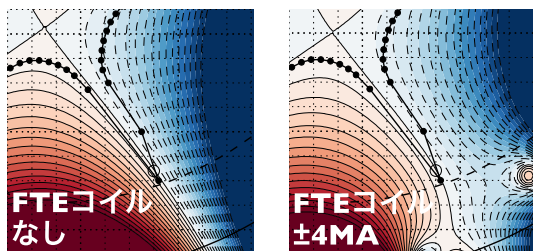


図4 FTE コイルによる磁束管拡張効果

2D 平衡計算により、図4に示す通り±4MAのカスプコイル電流により、2.5倍の磁束管拡張が得られた。ラフな評価では面積が増えた分、熱負荷が60%低減される計算となる。磁力線のダイバータ板入射角も制御可能であるため、熱負荷低減と排気効率のトレードオフ調整も期待される。この熱負荷低減効果、および必要とする不純物パフ量低減効果を確認するダイバータ計算に着手している。しかし年度中に完了することは出来なかった。

#### (5)まとめ

当初見通しとは異なる事情が生じたものの、本プロジェクトの主眼であった、核融合燃焼炉コアの出力制御とダイバータ板熱負荷低減の密度制約条件を整合的に両立させる条件を明らかにするという目標は、トリチウム比率制御によってコアとダイバータそれぞれの密度条件を独立制御して双方を満足できることを示したことで、見込みと違う形ながら懸案を解決することができた。これは核融合出力制御とダイバータの成立を保証する研究として重要な成果であり現在論文を執筆中である。今後は、密度限界とダイバータデタッチ条件との折り合いが焦点となる。軽快な統合コードを用いた広範なパラメータスキャンによる、点ではなく線や面で運転成立性を検討する手法の有効性も示された。一方で、原型炉成立条件の想像以上の厳しさ、タイトさに関する見込み違いの影響もあり、ダイバータ計算には十分に手が回らず、当初計画通りの内容で実施することは出来なかった。動的な応答を扱うための軽量SOLダイバータ2D中性粒子輸送を扱うモデル・コード開発も完了したため、今後引き続き、本研究プロジェクト予算により購入したワークステーションで、研究を続ける予定である。

#### 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1件)

T. Takizuka, S. Tokunaga 他3名、Combination of helical ferritic-steel inserts and flux-tube-expansion divertor for the heat control in tokamak DEMO reactor, J. Nucl. Mater., Article in Press, 査読あり

〔学会発表〕(計6件)

S. Tokunaga 他7名、トカマク炉燃焼シミュレーションにおける定常性、第2回原型炉の運転制御に関するシンポジウム、2015年3月12日、土岐、日本

S. Tokunaga, 他7名、Simulation Study of Fusion Output Control in DEMO, 2014年11月18日、Niigata, Japan

S. Tokunaga, 他7名, Integrated Simulation study of fusion output control in DEMO, 核融合エネルギー連合講演会, 2014年6月20日、Tsukuba, Japan

T. Takizuka, S. Tokunaga 他3名、Combination of helical ferritic-steel inserts and flux-tube-expansion divertor for the heat control in tokamak DEMO reactor, 21st Int. Conf. on Plasma Surface Interaction (PSI2014), 2014年5月26-30日、Kanazawa, Japan

S. Tokunaga, 他7名, Simulation study of fusion output control in DEMO, 2nd IAEA DEMO Programme Workshop, 2013年12月17-20日、Vienna, Austria

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

徳永 晋介 (TOKUNAGA Shinsuke) 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・任期付職員

研究者番号：90704990