

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18312

研究課題名(和文) 超高熱流環境下における非接触ダイバータプラズマ特性の解明とその制御に関する研究

研究課題名(英文) Study of the Detached Divertor Plasma under Huge Heat Flux Condition

研究代表者

星野 一生 (Kazuo, Hoshino)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部・主幹研究員(定常)

研究者番号：50513222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：非接触ダイバータプラズマの制御とそれによるダイバータ熱負荷の低減は、核融合原型炉設計において最重要課題の一つである。本研究では、統合ダイバータシミュレーションコードSONICを用いて、実験解析により非接触ダイバータプラズマの理解を深めると共に、原型炉ダイバータの予測解析に向けたコード改良を行った。そして、原型炉における不純物を用いた非接触ダイバータ及びダイバータ熱負荷の制御について解析を行い、今後の原型炉設計研究に資する指針を得た。

研究成果の概要(英文)：Control of the detached divertor plasma and the resultant reduction of the divertor heat load are one of the most critical issues on the fusion DEMO design study. In this study, understanding of the detached divertor plasma has progressed by analysis of the experimental data and development of the divertor simulation code has progressed. Control of the detached divertor plasma and reduction of the divertor heat load by using impurity seeding has been also investigated.

研究分野：核融合学

キーワード：核融合プラズマ トカマク 核融合原型炉 ダイバータ 非接触ダイバータプラズマ 統合ダイバータシミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

磁気閉じ込め核融合装置において、ダイバータは、炉心プラズマから流出する熱・粒子の制御、不純物の発生及び炉心への混入の制御、核融合反応の結果生じるヘリウム灰の排気など重要な役割を担っている。しかし、核融合原型炉では、炉心から周辺・ダイバータ領域に流入する熱は国際熱核融合実験炉 ITER の3～5倍程度にも及ぶ一方、ダイバータでの除熱性能は中性子照射環境における材料的制約から ITER の除熱性能を大きく下回ると考えられている。従って、原型炉ダイバータにかかる熱負荷の低減は、原型炉設計における重要課題の一つとなっている。

ダイバータにかかる熱・粒子負荷の低減には非接触ダイバータプラズマの形成が必要不可欠である。非接触ダイバータプラズマは、上流(炉心)密度の上昇に伴うダイバータにおける中性粒子圧力の増加や不純物ガス注入によるプラズマの運動量及びエネルギーの損失の促進と共に、空間中における再結合反応による荷電粒子の損失により形成され、固体壁まで高温プラズマが到達しない状態を指す。これにより熱・粒子負荷を大幅に低減させることができるが、その一方で、非接触ダイバータプラズマが進行しすぎると、ダイバータプラズマによる不純物遮蔽効果が劣化し、炉心プラズマ性能の低下を引き起こす。したがって、ITER、JT-60SA、原型炉のような将来装置では、非接触ダイバータプラズマの制御手法の確立とそれに基づく高性能炉心プラズマとダイバータとの両立が必須の課題となる。

非接触ダイバータプラズマについては、国内外の様々な実験装置で研究が進められてきた。しかし、非接触ダイバータプラズマは、燃料プラズマ、中性粒子、不純物、固体壁間の非線形な相互作用が非常に強く、その物理的理解は未だ不十分である。数値シミュレーションにおいても、実験で観測される非接触ダイバータプラズマ特性の再現は十分にはできていない。さらに、超高熱流がダイバータへ集中する原型炉では、これまでの理解とは違った非接触ダイバータプラズマ特性となる可能性がある。したがって、非接触ダイバータプラズマの理解及びモデリング精度向上、それらに基づく原型炉における非接触ダイバータプラズマ特性の予測とその制御手法開発が必要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、ダイバータにおけるプラズマ、中性粒子、不純物のそれぞれに適した輸送モデルを結合した、統合ダイバータシミュレーションコード SONIC を用いて、モデル開発や実験データとの比較を通して、非接触ダイバータの理解とモデリング精度向上を目指す。また、改良した SONIC コードを用いて、原型炉における非接触ダイバータプラズマ特性の予測評価とその制御手法について検討する。

## 3. 研究の方法

(1) 非接触ダイバータプラズマのモデリング  
ダイバータコードを用いて実験データのモデリングを行い、非接触ダイバータプラズマの物理的理解を深める。

(2) 原型炉へ向けた SONIC コードの改良

原型炉におけるダイバータプラズマ制御手法を検討するために、SONIC コードの改良を行う。具体的には、外部から入射する不純物ガスや壁から生じる不純物を同時に考慮できるように不純物モデルの多様化を行う。また、動的な応答特性を調べられるようにコードの非定常化を進める。

(3) 原型炉における非接触ダイバータプラズマ特性の評価と制御手法の開発

原型炉を対象とした幅広いパラメータ範囲で解析を行い、超高熱流に対する非接触ダイバータプラズマ特性を評価する。ダイバータ形状、不純物種、ガス注入量等を変化させた場合の比較を行い、原型炉における非接触ダイバータプラズマの制御手法について検討する。

## 4. 研究成果

(1) 非接触ダイバータプラズマのモデリング  
イギリス・カラム研究所のトカマク装置 JET を対象として、SONIC コードを用いて、赤道面におけるイオン密度を変化させた解析を行った。赤道面密度の増加に対して、ダイバータへ到達するイオン粒子束は増加したままであり、実験で観測されている非接触ダイバータの特徴であるイオン粒子束の減少は観測できなかった。同様の結果は、欧州の EDGE2D-EIRENE コードを用いて行われた結果とよく一致する。EDGE2D-EIRENE では、中性粒子モデルの改良により、イオン粒子束の赤道面密度依存性が改善したとの報告もあり、原子分子過程の断面積データの高度化等、中性粒子モデルの改善を進める必要があることがわかった。

(2) 原型炉へ向けた SONIC コードの改良

### ① 局所輻射輸送モデルの開発

JET の解析結果に加え、原型炉の非接触ダイバータプラズマでは、ダイバータ近傍の燃料中性粒子密度がこれまでのトカマク実験に比べて高く、光学的に厚くなるため、輻射再吸収の効果が重要になると考えられる。そこで、信州大学で開発された衝突輻射モデルを用いて、原型炉ダイバータにおける輻射輸送解析を行った。背景となるダイバータプラズマ分布、中性粒子分布については、SONIC コードによる解析結果(主半径～5.5m、核融合出力 3GW)を用いた。輻射輸送を考慮しない場合、ダイバータ近傍やプライベート領域では再結合反応が支配的であるのに対し、輻射輸送を考慮すると、輻射再吸収により電離が促進され、ほとんどの領

域で電離領域となることがわかった。

この予備解析結果に基づき半径 2mm の空間内の輻射輸送のみを考慮する局所輻射輸送モデルを開発した。このモデルにより予め輻射輸送を含む電離のデータベースが作成可能となり、従来の電離データベースと置き換える事で、計算時間の増加なしに SONIC コードへの輻射輸送効果の実装を可能とした。輻射輸送効果を取り入れた SONIC コードを用いて、主半径 5.5m、核融合出力 1.5GW の原型炉を対象としたダイバータ解析を行った。輻射吸収により電離が促進された結果、ダイバータ近傍で電子密度の増加と電子温度の低下、中性粒子密度の減少が見られた。しかし、内側ダイバータ壁の極近傍のみは、逆に電子密度が若干減少した。これは、電離ソース（中性粒子）の減少と再結合ソース（イオン・電子密度）の増加のバランスによるものと考えられる。ダイバータ熱負荷については、外側ダイバータで 10%、内側ダイバータで 20%の減少が見られた。

## ②多種不純物シミュレーションへの拡張

ダイバータでは、プラズマによるスパッタリングにより発生した壁材料不純物に加え、周辺プラズマの冷却のために外部から入射した不純物ガスが混在し、ダイバータプラズマの輸送に大きな影響を与える。したがって、ダイバータプラズマの性能評価には複数種不純物の輸送を同時に考慮する事が重要である。

多種不純物化に先立ち、まず別途開発を進めてきた MPMD (Multiple Program Multiple Data) を用いた統合モデリング用フレームワーク上に SONIC コードを再構築した。基本的に一本のプログラムであった SONIC コードを、プラズマ/中性粒子/不純物の各輸送モジュールが独立したプログラムとしてお互いに連携しながら計算を進められるようにし、今後のコード開発・統合化を進める基盤を構築した。これにより、必要な不純物種の数だけ独立した IMPMC を複数用意し同時に実行するが可能になり、SONIC 全体を大幅に修正することなく多種不純物化に成功した。

多種不純物化した SONIC コードを用いて、以前解析を行った JT-60SA 高 $\beta$ 定常運転シナリオのダイバータ熱負荷を再評価した。外部から入射する Ar の輸送には従来から IMPMC を用いており、入射量は  $0.17 \text{ Pa m}^3/\text{s}$  とした。炭素については、以前の解析では改良コロナモデルを用いて放射損失を評価していた。このモデルでは、炭素密度を背景プラズマ密度に対する割合で与える。この結果、プラズマ密度が高いセパトリクス沿いや内側ダイバータのストライク点近傍で高い放射損失が見られていた。一方、炭素の輸送にも IMPMC を用いた今回の解析では、ストライク点から離れた位置でもスパッタリングにより炭素不純物が多く発生し、ダイ

バータ領域の広範囲で放射損失が起こるようになった。この結果、ダイバータのピーク熱負荷は、以前の解析の  $10 \text{ MW}/\text{m}^2$  から  $6.4 \text{ MW}/\text{m}^2$  に低下し、複数年純物の各輸送過程を考慮する重要性が示唆された。

## ③不純物輸送モデルの非定常化

プラズマ応答の時間遅れも考慮した動的制御手法の検討を行うためには、非定常解析を行う必要がある。SONIC の非定常化として、ダイバータにおける不純物制御の重要性から、まずは IMPMC コードの非定常化を進めた。

従来の IMPMC コードでは、少ない粒子数でもモンテカルロノイズが低減できるように、発生から消滅までの定常の粒子軌道の時間積分をとって密度等の物理量の評価を行っていた。これに対し非定常版では、短い時間ステップごとの物理量評価と粒子ソース（テスト粒子）の連続投入により非定常化を実現した。

不純物の非定常テスト粒子計算で問題となるのは、多くのテスト粒子が特定の領域に滞在してしまうことである。図 1 はアルゴン不純物を全領域で解いた場合の領域ごとのテスト粒子数の時間変化である。精度を上げるために多くのテスト粒子が必要な SOL・ダイバータ領域に比べて、滞在時間が長いほどそれほど多くのテスト粒子は必要ないコア領域に多くのテスト粒子が滞在しており、計算コストを増大させている。この問題を解決するために、新たにテスト粒子削減アルゴリズムを開発した。これにより、解析結果にはほとんど影響を与えずにテスト粒子を大幅に削減することに成功し、非定常 IMPMC が完成した。

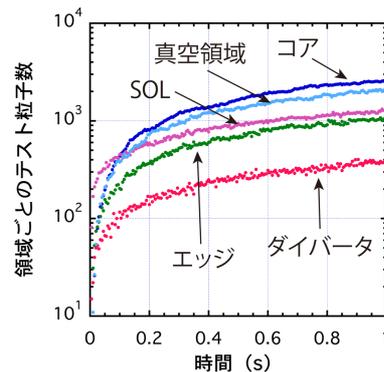


図 1 領域ごとのテスト粒子数の時間変化

## (3)原型炉ダイバータプラズマ特性の評価

### ①赤道面密度によるダイバータ制御

プラズマ主半径 8m 級で核融合出力 1.5GW 程度の原型炉概念に対して、SONIC コードを用いてダイバータ性能を評価した。解析では、炉心プラズマから排出される熱を 250MW とし、その 80%にあたる 200MW を周辺・ダイバータ領域で放射させるように Ar 不純物ガスの入

射を行った。また、赤道面 SOL 密度 ( $n_{mid}$ ) とダイバータ熱負荷や不純物濃度への影響について調べるため、燃料ガスパンプを 20~100 Pa  $m^3/s$  の範囲で変化させた。この結果、赤道面 SOL 密度として  $n_{mid} = 1.8 \sim 2.3 \times 10^{19} m^{-3}$  という結果が得られた。これは、想定している原型炉概念における体積平均密度 ( $\langle n_e \rangle \sim 6.6 \times 10^{19} m^{-3}$ ) の 1/3 程度であり、炉心プラズマ設計とも整合しうる結果である。 $n_{mid}$  に対する外側赤道面における Ar 不純物濃度、ダイバータにおけるピークイオン温度及びピーク熱負荷を図 2 に示す。SOL 密度増加により、同じ不純物放射パワーに必要な不純物量が減少するため、不純物濃度は 1.1% から 0.5% 程度へ減少する。ダイバータにおけるイオン温度は、内側ダイバータでは数 eV 以下となっており、完全非接触ダイバータが形成されている。一方、外側ダイバータでは、部分非接触ダイバータが形成されているが、ピークイオン温度

は高い。 $n_{mid}$  の増加に伴いイオン温度は 100 eV 以下にまで低下するが、長時間の定常運転に向け損耗を抑制するには、さらに低温化が必要と考えられる。熱負荷については、 $n_{mid} > 2.1 \times 10^{19} m^{-3}$  で 10 MW/m<sup>2</sup> 以下となり、ITER のダイバータ技術 (銅合金配管を用いた水冷却タングステンモノブロックターゲット) により除熱可能なレベルに減少する。しかし、内側ダイバータは完全非接触ダイバータにも関わらず密度が高く、その結果、表面再結合に起因して高い熱負荷となっている。このような現象は従来の実験やシミュレーションでは観測されていない。今後、その原因について詳細な検討を進める必要がある。原型炉パラメータ下での非接触ダイバータモデリングの課題であった場合には、関連する原子分子モデルやプラズマ輸送モデルを原型炉パラメータに相当できるように改良を進めていく必要がある。

また、ここで得られた不純物濃度は、炉心プラズマ設計から要求される不純物濃度のほぼ制限値程度に達するため、ダイバータで炉心プラズマへの不純物の流れをさらに遮蔽する不純物制御シナリオの検討を進める必要がある。

## ② 不純物の種類によるプラズマ制御

上記の解析は、外部から入射する不純物ガスとして Ar を想定していた。この場合、不純物放射はセパトリクスやダイバータ板近傍に集中しており、その結果、非接触ダイバータ領域も比較的狭いものだった。入射する不純物の原子番号が大きいほど、高温域で放射が強くなる傾向がある。そのため、原子番号が大きな Kr や Xe を用いることで、より広い高温領域で放射が促進され、非接触ダイバータ領域の拡張及びダイバータ熱負荷の低減が期待できる。

そこで、不純物放射分布とその結果得られる非接触ダイバータの制御を目的に、入射する不純物ガスを Ne、Kr、Xe に変化させた解析を行った。解析の結果、Ne や Ar の場合は、炉心から排出されるエネルギーの 75~90% がダイバータで放射するのに対し、Kr や Xe の場合は 30~40% にとどまることがわかった。これは、Kr や Xe はより温度の高い SOL やエッジ領域 (炉心プラズマ領域のうち  $0.95 < r/a < 1$  の領域) で放射が大きくなるためである。上流で強い不純物放射が起こる結果、Ne や Ar に比べて Kr や Xe では、ダイバータ板に沿って径方向に広い範囲で低温下が進み、非接触ダイバータも径方向に広がる。しかし、セパトリクス近傍に集中して起こっていた不純物放射が広範囲に分散するので、ポロイダル方向には非接触ダイバータ領域はやや狭くなることもわかった。このように非接触ダイバータの構造が変わることで、ダイバータにおけるピーク熱負荷としては、Ne や Ar では 7 MW/m<sup>2</sup> 程度であったものが、4 MW/m<sup>2</sup> 程度まで減少する結果を得た。

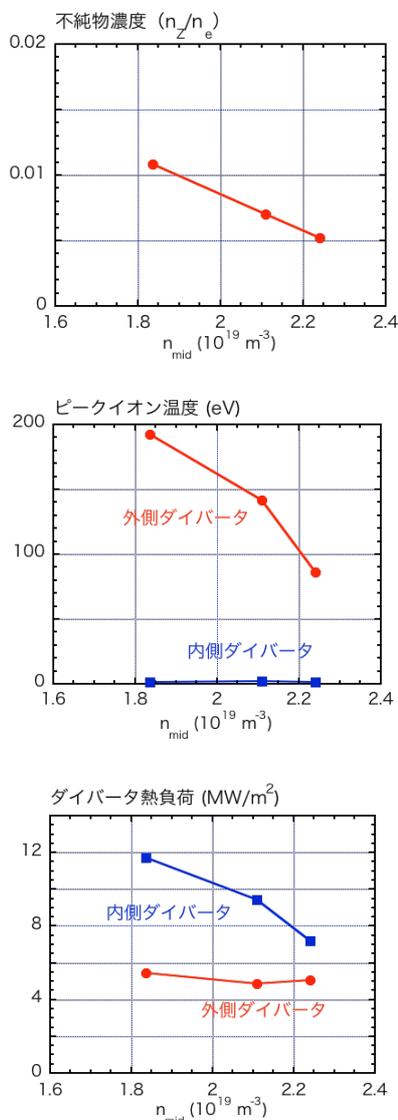


図 2 赤道面 SOL 密度  $n_{mid}$  に対する外側赤道面 SOL における Ar 不純物濃度、ダイバータにおけるピークイオン温度及びダイバータ熱負荷

### ③原型炉における非接触ダイバータ制御手法の検討

以上の解析から、原型炉ダイバータにおける非接触ダイバータ及び熱負荷の不純物による制御に関する基本的な知見が得られた。特に、単に不純物放射を促進するだけでなく、SOL 密度を増加させることで、不純物濃度の希釈、非接触ダイバータ領域の拡張が進むことがわかった。今後は、ダイバータにおけるより効率的な熱負荷低減手法、不純物輸送制御手法の検討をさらに進めると共に、SOL 密度の上限は炉心プラズマ設計で決まるため、高密度炉心プラズマ運転の設計領域開発も必要と考えられる。

また、不純物種の選択により非接触ダイバータとダイバータ熱負荷を制御できる可能性が示唆された。ダイバータ熱負荷の観点からは大きな熱負荷低減ができる高原子番号不純物が好ましいが、その一方で上流での強い放射は炉心プラズマの性能劣化を引き起こすおそれがある。そのため、不純物種の選択には、ダイバータ熱負荷だけでなく、炉心プラズマ設計との整合性が重要であり、炉心プラズマまで含む自己無撞着な統合シミュレーション解析が必要である。

今回は1種類の不純物のみ入射したが、複数種、例えばArとKrを同時入射することで、SOL・エッジ領域は主にKrによる放射、ダイバータは主にArによる放射といった制御も可能と考えられる。炉心プラズマとの整合する非接触ダイバータ制御手法を検討するためには、そういった複数種不純物ガス入射の検討も必要であると考えられる。

### 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)

- [1] K. Hoshino, Y. Homma, 他 2 名, "Multi-impurity divertor simulation using a Monte-Carlo kinetic impurity transport model", Contributions to Plasma Physics, 査読あり, 掲載決定, DOI: 10.1002/ctpp.201700166
- [2] K. Hoshino, N. Asakura, 他 7 名, "Progress of divertor study on DEMO design", Plasma Fusion Research, 査読あり, 12 (2017) 1405023 (6 pp), DOI: 10.1585/pfr.12.1405023
- [3] K. Hoshino, N. Asakura, 他 5 名, "Physics design study of the divertor power handling in 8m class DEMO reactor", Fusion Engineering and Design, 査読あり, 124 (2017) 352-355, DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.03.068
- [4] K. Hoshino, K. Sawada, 他 5 名, "Photon Trapping Effects in DEMO

Divertor Plasma", Contributions to Plasma Physics, 査読あり, 56(2016) 657-662, DOI:10.1002/ctpp.201610039

[学会発表] (計 19 件)

- [1] 星野一生、本間裕貴、徳永晋介、「SONIC コードによる多種不純物ダイバータシミュレーション」、Plasma Conference 2017、2017 年
- [2] 星野一生、清水勝宏、「統合ダイバータコード SONIC の MPMD 化」、プラズマ・核融合学会第 33 回年会、2016 年
- [3] 本間裕貴、星野一生、他 5 名、「原型炉ダイバータにおける放射冷却用希ガス不純物種の選択」プラズマ・核融合学会第 33 回年会、2016 年

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

星野 一生 (HOSHINO, Kazuo)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部・主幹研究員 (定常)

研究者番号：50513222