

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760817

研究課題名(和文) 統合ダイバータモデルによる非接触ダイバータプラズマの制御研究

研究課題名(英文) Investigation of the detachment control by using the integrated divertor model

研究代表者

星野 一生 (Hoshino, Kazuo)

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：50513222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円、(間接経費) 600,000円

研究成果の概要(和文)：核融合装置のダイバータにおける熱・粒子制御に対して重要な非接触ダイバータプラズマについて、ダイバータコードを用いた実験解析により、その形成機構の物理的理解を深め、数値シミュレーションにより非接触ダイバータを再現することができた。また、原型炉条件において、不純物ガスパフ、ダイバータ形状、装置仕様を変化させた解析を行い、今後の原型炉ダイバータ設計における非接触ダイバータ制御に向けた指針を得た。

研究成果の概要(英文)：The detached divertor plasma, which is important for the heat and particle control in the divertor, has been analyzed by using the integrated divertor code in order to understand the physics mechanism of the divertor detachment. Based on the analysis, the characteristics of the divertor detachment in the simulation have been improved. Control of the detachment under the DEMO condition by the impurity gas puff, the divertor geometry and the machine specifications, has been also investigated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：核融合プラズマ 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 核融合原型炉

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。一方で、構造上、ダイバータには炉心から流出する熱・粒子負荷が集中するが、工学的要請からダイバータへかかる熱負荷は 10MW/m^2 以下にしなければならない。このような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や不純物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ともに、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 や JT-60SA をはじめ、原型炉のような熱制御の困難な将来装置では、非接触ダイバータプラズマの制御手法の確立とそれにもと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。

ダイバータプラズマでは、燃料プラズマ、中性粒子、不純物間の相互作用が重要であり非線形性が非常に強い。そのため、将来装置における非接触ダイバータプラズマ特性、ダイバータ熱負荷等の評価には、ダイバータコードによる予測シミュレーションが非常に重要な役割を担う。したがって、ダイバータコードの信頼性向上とそれによる非接触ダイバータプラズマの再現は世界的な課題となっている。しかし、既存のダイバータコードには、実験データに比べて非接触ダイバータプラズマが形成される上流密度が高い、実験で観測されるほどダイバータへの粒子束が低減しないなど、多くの課題が残されており、非接触ダイバータプラズマの理解とそれに基づくダイバータコードの改良が急務である。

2. 研究の目的

本研究では、統合ダイバータコード SONIC を用いて、非接触ダイバータプラズマの形成機構の理解及びダイバータコードによる再現を目的とする。また、得られた知見に基づきコードを用いた非接触ダイバータプラズマの制御手法の検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 実験データとの比較

SONIC コードによる計算結果と JT-60U

実験データとの詳細な比較を行い、モデルの妥当性検討、改良を行う。同時に、実験データとの相違の原因となりうる物理機構を明確化することで、非接触ダイバータプラズマ形成に対し重要な物理機構を明らかにしていく。

ただし、非接触状態では、プラズマ・中性粒子・不純物が複雑に相互影響を及ぼすため、問題点の特定には困難が予想される。そこで、比較は幅広いパラメータ範囲で行い、低リサイクリング状態から非接触ダイバータプラズマ状態まで系統的に比較する。

(2) コード間ベンチマーク

物理モデル・仮定の違いによる非接触ダイバータプラズマ特性への影響を解明し、より適切なモデルに改良するために、ITER のダイバータ設計にも用いられた SOLPS コードとベンチマークを行う。(1) で検討した実験データをもとに、SONIC コードと SOLPS コードで同条件の解析を行う。両コードで得られたダイバータプラズマ特性(密度・温度分布、不純物放射等)と実験データとの比較から、個々の物理モデルの妥当性・精度を検討する。

(3) 非接触ダイバータモデリング改善に向けたコード改良

上記(1)(2)と平行して、非接触ダイバータモデリングに必要と考えられるコード改良を行う。多種不純物への対応、中性粒子および不純物モデルの改善、等を考えている。

(4) 非接触ダイバータの制御手法の検討

以上の成果にもとづき、核融合原型炉条件で非接触ダイバータ解析を実施するとともに、その際のダイバータ熱負荷について評価する。また、不純物ガスパフやダイバータ形状等による非接触ダイバータの制御手法について検討する。

4. 研究成果

(1) 実験データとの比較

統合ダイバータコード SONIC を用いて、JT-60U における非接触ダイバータプラズマの解析を行った。赤道面密度の上昇に従ってダイバータの電子温度は数 eV 以下にまで低下しており、熱に関する非接触状態を再現できた。一方でイオン粒子束については、上流密度の増加とともに増加し、その後飽和傾向にある。この時、実験では粒子束の低減が始まり、非接触ダイバータが形成されている。つまり、標準的な設定を用いた SONIC シミュレーションでは、実験で観測されている非接触ダイバータの特徴である大幅な粒子束の低減を再現することができなかった。

SONIC コードの結果を改善するために境界条件や各種仮定について検討を行った。

通常、ダイバータ板側の境界条件として、シース入り口でボーム条件を仮定し、イオン音速を境界条件として課している。しかし、理論モデルや粒子シミュレーションでは、イオン音速を超えて超音速となる可能性が示唆されている。このような超音速流が発生するとプラズマの空間構造が大きく変わり、径方向輸送が促進され、ダイバータ粒子束が低減する可能性がある。そこで、SONIC コードにおいてシース入り口の流速を固定せず、外挿により境界条件を与えるようにした。しかし、ここでの解析条件では、シース入り口において超音速の解は得られたが、超音速領域はダイバータの極近傍に限られており、プラズマの空間構造を大きく変えるほどではなく、粒子束の低減にはつながらなかった。

次に、プライベート領域端の境界条件について検討した。プライベート領域端の境界条件である密度の減衰長を短くすることは、プライベート領域からの径方向粒子損失を増大させることに相当し、直接的に粒子束を低減させることができる可能性がある。径方向粒子損失を約 10 倍増加させた場合、プライベート領域端から損失したプラズマ粒子は、ドームにおけるリサイクリングにより中性粒子としてプラズマ中へと戻るため、その効果がマスクされてしまうことがわかった。この結果、プライベート領域の密度及びボストライク点の粒子束の減少は約 15%であった。径方向への粒子損失効果を促進させるために、ドームにおける壁排気効果を同時に仮定した。この結果、ダイバータ粒子束は、上流密度上昇に伴い増加した後、減少し、“roll-over” が現れた。しかし、粒子束の減少は実験データに比べて小さかった。また、roll-over が起こる際には電子温度は 1eV 程度にまで低下している。一方、実験では 10eV 程度から粒子束の低減が始まっており、体積再結合が支配的な領域ではない。さらに、シミュレーションではイオン化ソースの位置は移動するものの、フラックスチューブ内での粒子ソース量はそれほど変化しておらず、径方向に粒子を損失させる 2 次元効果が重要であることが示唆される。

上記の検討から、径方向の輸送がダイバータプラズマ分布に与える影響が非接触ダイバータ形成に対して非常に重要であることがわかった。しかし、径方向輸送を強めるために輸送係数を大きくすると、径方向分布が平坦になりすぎ、赤道面で実験データと比較した際に、実験データと矛盾してしまう。そこで、プライベート領域のみで輸送係数を大きくすることで、スクレイプオフ領域のプラズマ分布は実験データを再現しつつ、図 1 に見られるように非接触ダイバータプラズマ特性を改善することができた。このことから、プライベート領域の輸送が非接触ダイバータプラズマ形成に対して非常に重要である

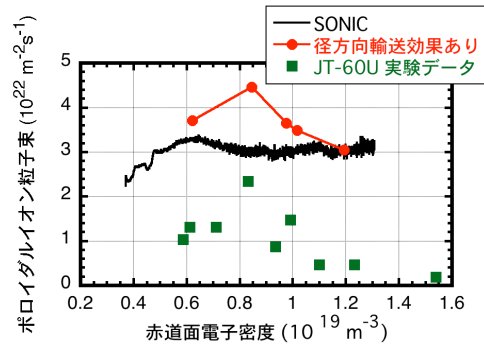


図 1 赤道面密度に対する外側ストライク点におけるダイバータ粒子束。予備解析に比べて径方向輸送を増加させることで、実験と同様の粒子束の低減が起こっている。

ことがわかった。

(2) コード間ベンチマーク

物理モデル・仮定の違いによる非接触ダイバータプラズマ特性への影響をより詳細に理解するために、欧州で開発された SOLPS コードを用いて同様の解析を行った。SOLPS コードの標準的な設定パラメータを用いた解析を行ったところ、図 2 に示すように roll-over 後のダイバータ粒子束減少を再現することができた。また、粒子束の減少は電子温度 10eV 程度から始まっており、実験と一致する傾向である。したがって、定性的には非接触ダイバータプラズマ形成機構は実験に近いと考えられるが、定量的には 5 倍以上粒子束が大きく、また粒子束減少が始まる電子密度も実験に比べて高い。

非接触ダイバータ形成には、先に述べたような径方向輸送や SOL 流が重要になると考えられる。SOLPS コードではこれらの評価に重要な、ドリフトを考慮することができる。図 2 に示すように、ドリフト効果により roll-over する電子密度はより高密度側へシフトするが、ピークからの粒子束低減はそれほど変化していない。しかし、内外ダイバータの非対称性の面では、相対的に内側ダイバータが先に非接触化するため、一般的な実験と定性的には一致する傾向である。

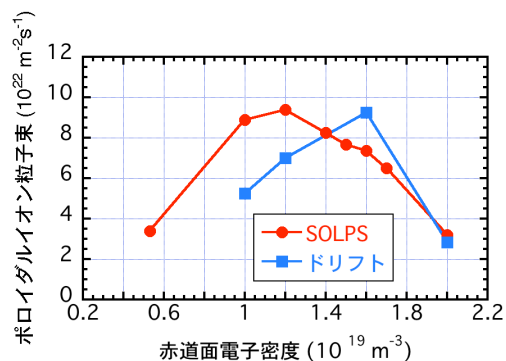


図 2 SOLPS コードによる解析結果。

(3) 非接触ダイバータモデリング改善に向けたコード改良

上記(1)(2)の解析と平行して、SONICコードの改良を進めた。主な改良点としては、不純物の電離により生成された電子の考慮、不純物輸送モデルの改良、多種不純物の考慮、ダイバータ近傍の中性粒子分布のスムージングによるMCノイズの低減、等である。改良したSONICコードを用いて、再度(1)の解析を行った。その結果、図3に示すとおり、非接触ダイバータ特性は大幅に改善され、標準的な入力パラメータでも粒子束の低減が再現できた。これは、特に不純物に起因する電子密度の増加の効果が大きく、同じ赤道面密度に対してイオン密度が低下すること、同じ不純物密度でも電子密度の増加する分、放射パワーが増加すること、等によるものと考えられる。より高い赤道面密度では粒子束の減少は減りつつある傾向が見られたが、径方向輸送の増加(ここではSOL外側)により傾向がやや改善されることが明らかになった。

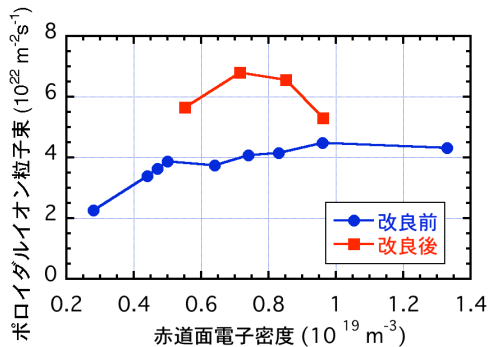


図3 SONIC コード改良前後の比較

(3) 核融合原型炉条件における非接触ダイバータとダイバータ熱負荷の解析

核融合炉における非接触ダイバータ特性の理解とその制御手法検討のために、原型炉条件を用いた解析を行った。ここでは、原型炉概念 SlimCS (大半径 5.5m、小半径 2.1m、プラズマ電流 16.7MA、トロイダル磁場 6T、) を想定して解析を行った。核融合出力 3GW の場合、炉心から排出される熱(500MW)の 92% を Ar 不純物により放射させることで、図3のようにストライク点近傍で電子温度が 2eV 以下となり、部分非接触ダイバータプラズマが得られた。不純物放射割合を 92% に高めたにも関わらず、不純物放射領域はポロイダル方向にもダイバータ近傍に局所化している。これは、原型炉特有である上流からの膨大な熱流束が、非接触フロントを安定化させているためと考えられるが、今後より詳細な解析が必要である。

ストライク点近傍で非接触ダイバータが得られたことで、プラズマのエネルギー輸送によるダイバータ熱負荷は 8MW/m² 程度にまで低減できている。しかし、ダイバータ近傍で不純物放射が大きく、放射パワーの一部が

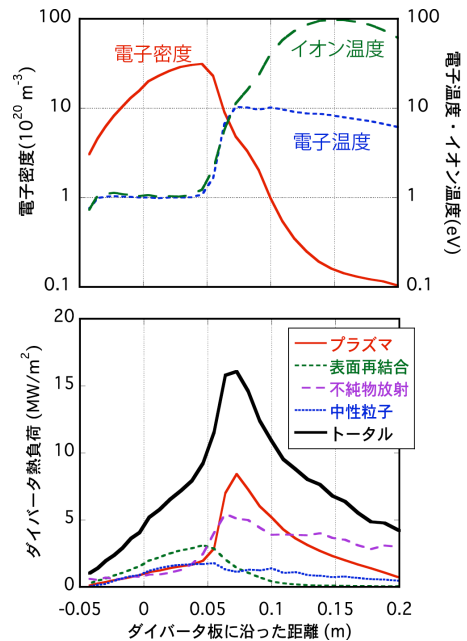


図4 原型炉ダイバータにおける外側ダイバータの(a)プラズマ分布と(b)熱負荷分布

ダイバータ熱負荷となる。さらに、イオン粒子束の表面再結合に伴う熱負荷、中性粒子による熱負荷も考慮すると、ダイバータ総熱負荷はダイバータ除熱性能を上回る 16MW/m² となることがわかった。非接触ダイバータの領域を広げ、ダイバータ熱負荷を低減させるために、伸長ダイバータや低核融合出力の効果についても解析を行い、それぞれダイバータ板全域で電子温度が 2eV 以下になる完全非接触ダイバータプラズマの解が得られた。しかし、前者については、プラズマ及び不純物放射による熱負荷は大幅に低減できたものの、イオン粒子束及び中性粒子による熱負荷が大きく、総熱負荷は 11.5MW/m² までの低減に留まった。これはダイバータの伸長に伴い、受熱面積が減少しことが原因の一つである。一方、後者の場合、総熱負荷を 6MW/m² にまで低減することができ、ダイバータ成立の方向性を示すことができた。

この他、ガスパフする不純物種によっても非接触ダイバータ特性を制御できることもわかり、今後の原型炉ダイバータにおける非接触ダイバータ制御に向けた指針を得ることができた。

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 7 件)

- ① K.Hoshino、他 9 名、Divertor study on Demo reactor, Plasma Fus. Res.、9(2014)3403070、査読有り
- ② N.Asakura、K.Shimizu、K.Hoshino、他 3 名、A simulation study of large power

handling in the divertor for a Demo reactor, Nucl. Fusion, 53 (2013) 123013、査読有り

- ③ K.Hoshino、他 5 名、Simulation Study of an Extended Divertor Leg for Heat Control in SlimCS DEMO Reactor、Contrib. Plasma Phys.、52 (2012) 550、査読有り
- ④ K.Hoshino、他 4 名、Improvement of the detachment modelling in the SONIC simulation、J. Nucl. Mater.、415 (2011) S549、査読有り
- ⑤ H.Kawashima、K.Hoshino、他 5 名、Evaluation of heat and particle controllability on the JT-60SA divertor、J. Nucl. Mater.、415 (2011) S948、査読有り

[学会発表] (計 23 件)

- ① K.Hoshino、他 4 名、Influence of the particle transport in the private region on the divertor plasma detachment、21st International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices、2014 年 5 月 26-30 日、Kanazawa, Japan
- ② K.Hoshino、他 9 名、Divertor Study on Demo Reactor、23rd International Toki Conference、2013 年 11 月 18-21 日、Toki, Japan (招待講演)
- ③ K.Hoshino、他 5 名、Development of the backflow model for impurity exhaust in Monte-Carlo calculation、14th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices、2013 年 9 月 23-25 日、Cracow, Poland
- ④ 星野一生、他 3 名、SONIC と SOLPS による JT-60U 非接触ダイバータプラズマモデリング、プラズマ・核融合学会 第 29 回年会、2012 年 11 月 27-30 日、福岡
- ⑤ N.Asakura、K.Shimizu、K.Hoshino、他 5 名、Divertor design and physics issues of huge power handling for SlimCS Demo reactor、24th IAEA Fusion Energy Conference、2012 年 10 月 8-13 日、SanDiego、USA
- ⑥ 星野一生、他 4 名、SONIC シミュレーションにおける非接触ダイバータモデルの検討、Plasma Conference 2011、2011 年 11 月 22-25 日、金沢
- ⑦ 朝倉伸幸、清水勝宏、星野一生、飛田健次、滝塚知典、ダイバータシミュレーションコード SONIC による原型炉 SlimCS における不純物輸送と放射損失特性の検討、Plasma Conference 2011、2011 年 11 月 22-25 日、金沢
- ⑧ K.Hoshino、他 5 名、Simulation Study of an Extended Divertor Leg for Heat Control in SlimCS DEMO Reactor、13th

International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices、2011 年 9 月、South Lake Tahoe, California USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

星野 一生 (HOSHINO, Kazuo)

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：50513222