

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03794

研究課題名(和文) 運動論的統合モデリングによる非接触ダイバータプラズマの動的応答特性の解明

研究課題名(英文) Investigation of dynamic characteristics of the detached divertor plasma by kinetic modeling

研究代表者

星野 一生 (Hoshino, Kazuo)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授

研究者番号：50513222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉における非接触ダイバータプラズマの動的応答特性の理解を目指し、空間平均した原子、分子の密度の時間発展を解く0次元モデルと、プラズマの輸送を解くPIC(Particle-in-Cell)モデルを開発・結合し、統合モデルを開発した。この統合モデルを用いた解析において、非接触ダイバータプラズマを再現できた。また、熱パルス入射後のダイバータプラズマの時間変化や、バルク、熱パルスに加え、中性粒子との相互作用でエネルギー損失がおり、速度分布関数が3温度成分の持つ結果が得られる。このように、非接触ダイバータプラズマの動的応答特性を明らかにするためのシミュレーションモデルの基盤が構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合炉の実現に向けて、炉心から排出されダイバータに集中する膨大なエネルギー負荷の低減は重要課題の一つである。非接触ダイバータプラズマはこのようなエネルギー負荷の低減に最も有望と考えられている。本研究では、このような非接触ダイバータプラズマを解析するためのシミュレーション基盤として意義がある。また、非平衡状態におけるプラズマと中性粒子の相互作用の解明にもつながるとい点では、学術的な意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：To understand the dynamic characteristics of the detached divertor plasmas in fusion reactors, an integrated model has been developed by coupling a particle-in-cell (PIC) model solving for the plasma transport with a 0-dimensional model solving for the time evolution of the space-averaged atomic and molecular density. The integrated model tentatively reproduced the detached divertor plasma. The time evolution of the divertor plasma after the high energy pulse injection and the energy loss due to the interaction with neutral particles were analysed. The basis of a simulation model was established to clarify the dynamic characteristics of the detached divertor plasma.

研究分野：核融合学

キーワード：核融合 非接触ダイバータプラズマ 運動論的モデル PIC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、核融合原型炉においては、ダイバータには数百 MW もの熱が集中するため、ダイバータにおける熱制御は、原型炉に向けた最重要課題として研究が進められている。

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、ダイバータにおけるプラズマ、中性粒子、不純物間の相互作用により形成されると考えられている。プラズマのエネルギーや運度量が中性粒子との衝突により広範囲へ散逸するとともに、中性粒子のイオン化や不純物放射によるプラズマの低温下により、イオン粒子の体積再結合が促進され、ダイバータにかかる熱・粒子負荷を大幅に低減させることができる。

非接触ダイバータプラズマの研究は、これまで実験的にも理論的にも精力的に進められてきており、上記のような生成条件やその特性について基本的な理解が進み、熱・粒子負荷の低減に対する有効性も実証されている。しかし、数値シミュレーションにおいては、非接触ダイバータの定量的な再現には至っていない。その原因のひとつとして、ダイバータプラズマの非平衡性が考えられる。また、将来の核融合炉において、非接触ダイバータプラズマを制御し、安定的に維持するためには、静的特性の理解に加えて、動的応答特性の理解が必須である。

### 2. 研究の目的

以上のような背景を踏まえ、本研究の目的は、詳細な原子分子過程を取り扱う中性粒子モデルと、中性粒子との相互作用とプラズマの非平衡性を取り扱うことができる運動論的モデルを開発し、それらの統合モデルにより非接触ダイバータプラズマの動的応答特性を明らかにするための基盤を構築することである。

### 3. 研究の方法

中性粒子モデルでは、水素原子および水素分子に加え、単独でも非接触ダイバータの解析を行えるように水素プラズマ ( $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ ,  $H$ ,  $e$ ) も対象とする。原子の励起状態、分子の振動励起状態を考慮し、各粒子種および励起状態ごとの密度について、各種衝突反応を考慮したレート方程式を連立して解く。反応レートについては、プラズマの非平衡状態を扱うように Maxwell 分布を仮定せず、任意の速度分布関数にもとづき評価可能とする。計算コスト削減のため、ダイバータ近傍で空間平均した物理量を取り扱い、以降、0次元モデルと呼ぶ。

プラズマについては、 $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $e$  を対象とし、荷電粒子の運動と荷電粒子の作る電場を自己無撞着に解くことができる Particle-in-Cell (PIC) 法を用いた粒子モデルを採用する。Fig.1 のように、磁気閉じ込め核融合装置の周辺プラズマを模擬した 1次元空間において、両端をダイバータとし、中央部分にコアからの拡散を想定した粒子ソースをおく。非接触ダイバータプラズマの形成に重要となる中性粒子との反応については、水素原子および分子を背景粒子として与え、励起原子や振動励起分子を含め、各種衝突反応を考慮する。背景粒子となる原子・分子については、ダイバータ近傍で一様と仮定し、密度をパラメータとして与える。

これら二つのモデルにおいて、PIC モデルで得られるプラズマの速度分布関数を 0次元モデルへ、0次元モデルで得られる原子・分子の密度を PIC モデルへと、相互に情報交換することで、詳細な原子分子過程を考慮する統合モデルを開発し、非接触ダイバータの解析を行う。

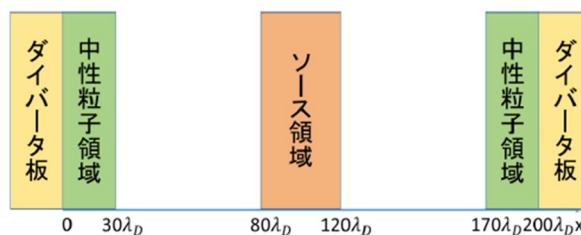


Fig.1 PIC モデル大系

### 4. 研究成果

#### (1) 中性粒子モデル (0次元モデル) の開発

原子の励起状態及び分子の振動励起状態、詳細な原子分子過程を考慮した 0次元モデルを開発した。分子の振動励起準位としては、 $v = 0 \sim 14$ 、原子の主量子数は  $p = 1 \sim 35$  を考慮している。このモデルでは、基本的な電離・再結合反応に加え、各種励起・脱励起反応、負イオン生成及び相互中性化、分子の解離や解離性電離などを考慮している。空間分布を考慮しない 0次元モデルとはいえ、非常に多くの反応過程、特に時間スケールが非常に早い原子の励起過程まで追跡しているため、計算コストが問題となる。また、高密度になると反応レートが大きくなり、計算が不安定になりやすい。そこで、連立方程式の解法に Gear 法を採用することで、計算時間短縮と安定的な数値計算を実現した。

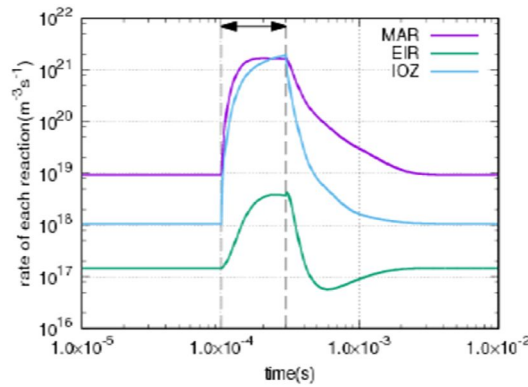


Fig.2 電離 (IOZ)、電子衝突電離 (EIR)、MAR の各反応レートの時間発展

予備的な解析として、プラズマ密度が低い場合の非接触ダイバータプラズマの解析を行った。プラズマ損失過程として電子衝突による再結合過程より分子活性化再結合 (MAR) が支配的となる結果が得られた。直線型プラズマ装置等で得られている観測と矛盾しない結果であり、コードの妥当性を定性的に確認した。しかし、トカマク装置を想定した入力パラメータを与えると、極端に低い電子密度となり、その結果、実験と異なり MAR が支配的となってしまった。この原因としては、電子温度の空間分布の影響が考えられる。非接触ダイバータの形成には、電子温度が重要なパラメータとなる。しかし、空間平均された 0 次元モデルでは、非接触ダイバータ、特に、再結合過程を支配的にするために電子温度の設定を下げると、上流でのイオン化が減少してしまい、実験に比べて極端に低い密度になる。逆に、適切な密度になるような電子温度を設定すると、再結合過程が起こらず、非接触ダイバータを再現できない。そこで、電子温度については、空間的な温度分布を模擬するために、2 温度の Maxwell 分布を与えた。これにより、上流でのイオン化と壁近傍の再結合過程を両立させた解析が可能となった。

開発した 0 次元モデルを用いて、コアプラズマからの熱パルスを簡易模擬した非定常解析を行った。背景プラズマの電子温度を 1 eV とした場合、イオン化反応よりも再結合反応が大きく、非接触ダイバータが形成されている。ここへ、 $1.0\sim 2.0 \times 10^{-4}$  s の間、100 eV の熱パルスと投入すると、Fig.2 のように電離反応が大幅に増加する。しかし、同時に振動励起分子が増加し、振動励起分子との反応による MAR が促進されることで、電離によるプラズマ密度増加が抑制され、熱パルス時にも MAR により概ね非接触ダイバータプラズマが維持される可能性を示唆する結果を得た。

## (2) 統合モデルの開発と非接触ダイバータの解析

0 次元モデルでは、プラズマモデルが非常に簡易的であるため、速度分布関数を入力として与える必要があり、プラズマのエネルギー緩和過程を正しく模擬できない。そこで、プラズマ輸送を解く PIC モデルを開発した。デバイ長オーダーとなるセル内の荷電粒子間のクーロン衝突には 2 体衝突モデルを用いる。中性粒子との相互作用は、0 次元モデルと同様に数多くの反応を考慮するために、ヌル衝突法を採用している。この時、荷電粒子から見て背景粒子となる原子、分子については、ダイバータ近傍で同様とし、密度をパラメータとして与える。この原子・分子密度は、結合した 0 次元モデル (中性粒子部分のみ) により計算することで、プラズマの時間発展と同時に、原子・分子の時間発展を追跡・考慮することが可能となっている。

初期解析において、理論値と同程度のシース電位が形成されること、(1) の 0 次元解析と同様に、MAR により非接触ダイバータプラズマが形成される結果が得られたことから、開発したモデルが概ね妥当であると考えられる。また、原子分子との相互作用を考慮しないモデルで ELM パルスを模擬した予備解析を行った。10 eV のプラズマを入射し定常状態を作り、そこへ 100 eV のパルスを入射したところ、高エネルギー成分は緩和しないままダイバータへ到達し、2 温度プラズマとなる解が得られた。高エネルギー成分が存在すると、振動励起分子の生成が促進されると考えられるため、振動励起分子を起点とする分子活性化再結合反応および非接触ダイバータが促進される可能性がある。

次に、原子、分子との相互作用を考慮して熱パルス入射を模擬した解析を行った。ただし、ここでは計算コスト削減のため、中性粒子密度は固定している。Fig.3 に、電子、水素イオン、水素分子イオンの密度分布とその時間発展を示す。規格化位置 0~30 および 170~200 が中性粒子領域であり、80~120 へ粒子供給を行っている。 $t = 0$  で熱パルスを入射する前の定常状態 (Fig.3(a)) では、中央から供給された  $H^+$  は壁へと広がり、中性粒子領域に入ったところで急激に減少している。これは再結合反応によるものであり、非接触ダイバータプラズマの形成が確認できる。分子イオン  $H_2^+$  は、中性粒子領域に入った直後にイオン化により発生し、壁および上流へと広がっている。この結果、電子密度としては、中央部では概ね一様で、中性粒子領域に入ると急激に密度が減少する。熱パルス入射後は、中性粒子領域でイオン化が進み、 $H_2^+$  が急激に増加



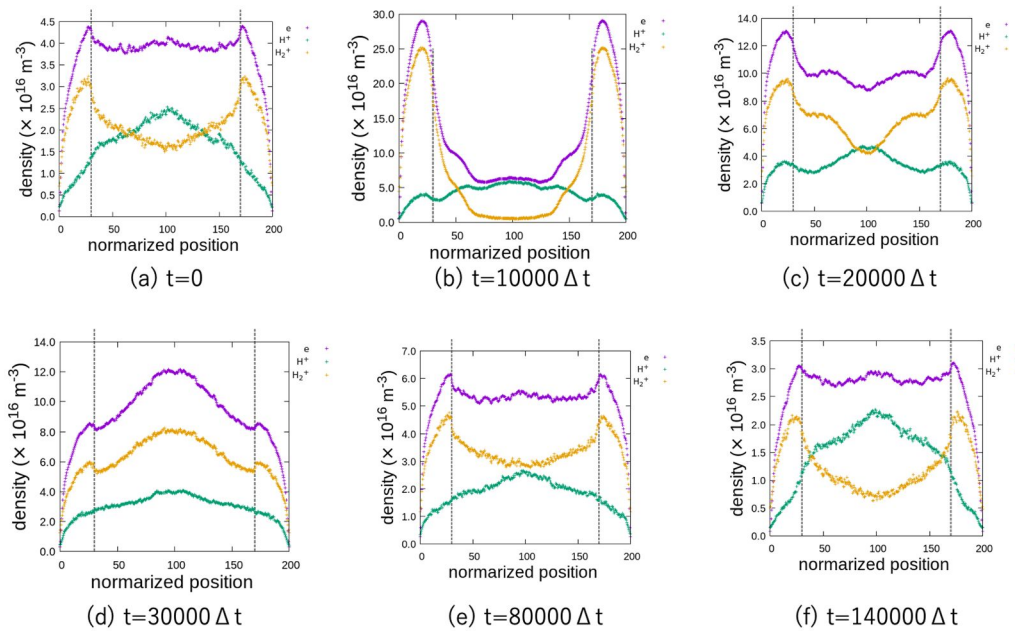


Fig.3 プラズマ密度分布の熱パルス入射による時間変化。  $t$  はシミュレーションのタイムステップ。

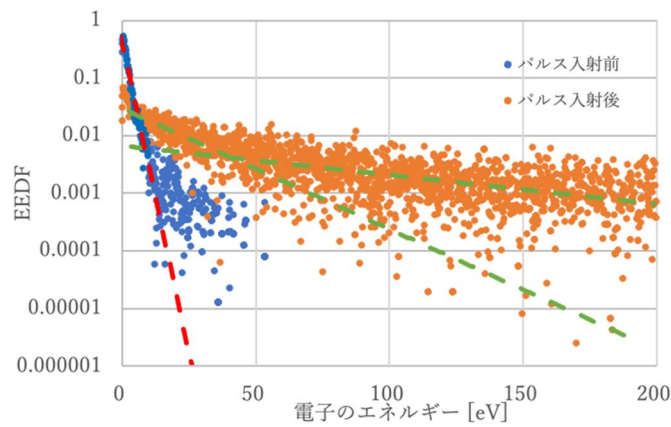


Fig.4 熱パルス入射前後の電子エネルギー分布関数

している (b)。その後、一旦上流へと広がり (c) 徐々に壁に排出され (d~e) 最終的には、概ね初期状態に回復した (f)。また、Fig.4に見られるように、パルス入射後には、中性粒子を考慮しない場合にはバルク成分、熱パルスによる高エネルギー成分の2温度成分が形成されるが、今回の解析ではさらに中間の温度成分が存在し、熱パルスの一部が中性粒子との反応によりエネルギーを失っている様子が確認できた。

以上述べたとおり、本研究では、中性粒子との相互作用を含む運動論的統合シミュレーションモデルを開発し、熱パルス時の非接触ダイバータプラズマの特性について基礎的知見が得られ、非接触ダイバータプラズマの動的応答特性を明らかにするための基盤を構築できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Y. Tsubotani, Y. Iwata, R. Tatsumi, A. Hatayama, K. Hoshino
2. 発表標題 Analysis of Plasma-Neutral interaction in Detached Divertor Plasmas by Particle Simulation
3. 学会等名 17th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星野一生、櫻井陽都、吉田旬汰
2. 発表標題 PICシミュレーションによる非接触ダイバータプラズマ解析
3. 学会等名 第39回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yoshida, H. Sakurai, Y. Takaki, K. Hoshino
2. 発表標題 Numerical Analysis of Detached Divertor by Particle Simulation with Plasma-Neutral interaction
3. 学会等名 The 19th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 櫻井陽都、吉田旬汰、星野一生
2. 発表標題 ダイバータ領域におけるプラズマ-中性粒子相互作用のPICシミュレーション
3. 学会等名 第40回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高木佳仁、星野一生
2. 発表標題 非接触ダイバータにおける原子分子過程の0次元数値解析
3. 学会等名 第40回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	林 伸彦  (Hayashi Nobuhiko)  (10354573)	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・グループリーダー(定常)  (82502)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	吉田 旬汰  (Yoshida Shunta)	慶應義塾大学大学院・理工学研究科	2020年度-2023年度のみ
研究 協力者	坪谷 友香  (Tubotani Yuka)	慶應義塾大学大学院・理工学研究科	2019年度のみ
研究 協力者	櫻井 陽都  (Sakurai Haruto)	慶應義塾大学大学院・理工学研究科	2022年度-2023年度のみ

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	高木 佳仁  (Takaki Morihiro)	慶應義塾大学大学院・理工学研究科	2021年度-2023年度のみ
研究協力者	矢本 昌平  (Yamoto Shohei)	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	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関