

|         |  |        |      |  |
|---------|--|--------|------|--|
| 氏名(本籍地) | 武田 寿人  |        |      |  |
| 学位の種類   | 博士(理学)   |        |      |  |
| 学位記番号   | 博甲第 7221 号   |        |      |  |
| 学位授与年月日 | 平成 27 年 3 月 25 日   |        |      |  |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当   |        |      |  |
| 審査研究科   | 数理解物質科学研究科   |        |      |  |
| 学位論文題目  | Numerical Simulation Study of Plasma Flow in the GAMMA 10/PDX End-cell by Using a Fluid Code<br>(流体コードを用いた GAMMA 10/PDX エンドセルにおけるプラズマ流の数値シミュレーション研究) |        |      |  |
| 主査      | 筑波大学教授   | 工学博士   | 中嶋洋輔 |  |
| 副査      | 筑波大学教授   | 理学博士   | 坂本瑞樹 |  |
| 副査      | 筑波大学准教授  | 博士(理学) | 吉川正志 |  |
| 副査      | 慶應義塾大学教授   | 工学博士   | 畑山明聖 |  |

## 論 文 の 要 旨

### <研究の背景と目的>

核融合発電実現の為に、コアプラズマは閉じた磁場配位とし、周辺部の低温プラズマや不純物をダイバータ部に導き排気可能とするダイバータ配位が採用されている。一方、直線型装置を使用した周辺プラズマ研究が、広く世界中で行われている。これらの直線型装置は、トカマク装置に匹敵する粒子束で研究可能である PSI-II の様に、其々の特徴を生かした研究を行っている。そこで、数値計算シミュレーションによって、プラズマにどの物理過程が強く影響を及ぼしているのかを評価する事が非常に重要となる。筑波大学に設置されているタンデムミラー型装置 GAMMA 10/PDX の西エンド部においても、ダイバータ模擬実験が行われている。

本研究の目的は、他の直線型装置と比較してイオン温度が非常に高い GAMMA 10/PDX を用いたダイバータ模擬実験に対して、新たに構築した数値計算コードを用いて数値シミュレーションによる解析を行う事によって、高イオン温度プラズマ下におけるプラズマ挙動を解明する事である。また、高イオン温度プラズマに不純物粒子や中性粒子の外部ガスパフを行った際の背景プラズマ挙動並びに、ターゲット板への熱・粒子負荷について数値計算コードを用いて評価する事である。

### <流体コードの GAMMA 10/PDX への適用>

本研究で開発した流体コードは、トカマク等で広く用いられている B2 コードと同様の物理モデルで構築された方程式を使用している。GAMMA 10/PDX では、端部ミラーから流出する端損失プラズマを利用してダイバータ模擬実験を行っている。その為、エンド部における磁力線構造を基に計算空間内のメッシュを作成した。また、エンド部に流入するプラズマパラメータは常に一定であり、軸対称性を持つと仮定した。ターゲット板は、計算空間終端に、タングステン製の円形ターゲット板を設置していると仮定した。以上の仮定の基に、新たに開発した数値計算コードに適用させた上で、GAMMA 10/PDX エンド部にお

る開いた磁場配位とエンドスロート部の磁力線強度を、一様に発生させる円筒形磁場配位で比較を行った。中性粒子との相互作用による運動量損失が無い系で、運動量バランス式の簡易モデルによって、解析解を評価した場合、上流領域とターゲット上でのプラズマ静圧比は、約 1/10 倍となり、数値計算コードによる計算結果を 2 メッシュモデル間で比較した結果、ほぼ同程度の割合となり、磁力線形状効果も計算コード内に反映されている事が分かった。これらの事実から、新たに開発した流体コードが導出する数値解は、十分に正しい解であると結論づけた。

#### <1 流体コードによるガス入射時の背景プラズマ解析>

GAMMA 10/PDX での一般的な温度条件であるイオン温度 100eV、電子温度 30 eV において、水素中性粒子をプラズマに入射した条件でのシミュレーションを行った。入射中性粒子密度量は、 $1.0 \times 10^{17} \sim 6.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ まで変化させる条件下で行った。その結果、入射中性粒子密度上昇と共に、電子衝突電離反応による、電子温度減少効果とプラズマ密度の上昇が観測された。また、荷電交換反応によるイオン温度の減少も確認された。しかしながら、イオン温度が電子温度より有意に高い状況が維持される為に、電子ドラッグによりイオンから電子にエネルギー輸送が起こりこの事が原因で、電離優勢状態からの遷移が困難となり、ターゲット板上での熱・粒子束の減少傾向が見られない事が、数値計算により明らかにされた。この計算事実の検証の為、低イオン温度条件下(イオン温度: 100, 30, 10 eV)で計算を行った。その結果、イオン温度が低い条件での計算結果ほど、中性水素粒子入射によるターゲット板上での電子温度と熱流束密度の減少効果が、明白にあらわれる事を確認した。

#### <多流体コードを用いた背景プラズマ挙動解析>

多流体コードを用いて、アルゴン単体入射時とアルゴンと水素中性粒子同時入射について、背景プラズマと Ar イオン流についての解析を行った。実際の観測データに基づいて、Ar は1価イオンのみ存在すると仮定し、Ar イオン温度は、室温で一定と仮定した。以上の仮定を基に、コード中のイオンエネルギーバランス方程式に新たな水素イオンと Ar イオン間衝突による摩擦力がする仕事の項を加え、電子エネルギーバランス方程式には、Ar イオンと電子の温度緩和項を新たに加える拡張を行った。

Ar 単体入射時には、入射量が増加するにつれて、電子温度とイオン温度の減少が認められた。同様に、Ar イオンと水素イオンも、Ar 中性粒子入射量と共に減少が確認された。ターゲット板に到達する粒子束は、減少傾向を見せていたが、熱流束は大きな変化を起こす事が無く、Ar イオン由来の熱負荷は、無視できる程小さい事が分かった。また、イオンエネルギー減衰を引き起こす過程は、電子温度が減少した事による圧力駆動項の影響が支配的である事が、シミュレーションの結果から明らかにされた。Ar イオンの主電離領域は、プラグ・バリア部西スロートコイル付近であり、同じ位置で電子密度のピーク値をとり、スロート部における高圧力勾配が生成される事が、不純物イオンの逆流を引き起こす原因となっている可能性があることが判った。

Ar と水素中性粒子同時入射の解析結果から、アルゴンイオンとの衝突によるエネルギー減少効果もガス入射量増加と共に上昇するが、水素イオンは主として、入射された水素中性粒子との荷電交換反応によりエネルギーを失う事が分かった。このことから、Ar 単体入射と比較してプラズマエネルギー損失が非常に大きく現れる為、イオンと電子温度は低い温度で緩和できる事が明らかになった。

ターゲット板に到達する熱負荷は水素中性粒子入射量増加に伴い有意に減少し、熱負荷の減少量は、最大で約 1/5 まで減少した。一方、水素イオン粒子束は、印加中性水素量が増加すると共に増加する傾

向を見せる。しかし、入射中性水素密度が高い条件では、粒子束密度の増加量は小さくなる傾向を見せられている。そこで、ターゲット前面でのプラズマ全圧を評価した結果、ある入射量でピークを取る依存性を持っていたことから、ターゲット板前面でのプラズマ圧力減少が引き起こされる非接触状態への移行を示す兆候が現われていると示唆される結果を得た。

#### <流体コードとモンテカルロ中性粒子輸送コードを併用した数値シミュレーション>

Boltzmann 方程式をモンテカルロ的手法で解く中性粒子追跡コード DEGAS を用いる事によって、ターゲット板からのリサイクリング中性粒子の分布を求め、その結果を流体コードに組み込むことによって、より精度の高い背景プラズマの挙動解析を行った。DEGAS コードを用いて計算した中性粒子密度分布は、ターゲット板近傍に局在化した分布を示し、計算空間内の中性粒子の存在量は、低い事が明らかとなった。流体コード内で使用していた1次元解析モデルによる中性粒子分布は、計算空間内に広く存在する分布構造をしていたことから考えると、大きな差異が存在している事が分かった。各々の中性粒子密度分布を用いて、流体コードでプラズマを計算した結果、今回の計算条件下では有意な差異は見受けられなかった。この結果から、リサイクリング中性粒子による背景プラズマへの影響は低いと考えられる。

#### <結論>

本研究では、新たに多流体コードを開発する事によって、水素イオンや不純物イオン挙動について数値計算シミュレーションによる解析が可能になり、異種イオンや異種中性粒子効果が混在する GAMMA 10/PDX ダイバータ模擬モジュール内のプラズマにおける、種々の物理過程がプラズマ挙動に与える影響について、定量的な解析が可能となった。これにより、他のダイバータ模擬装置に比べ高いイオン温度を持つ GAMMA 10/PDX におけるダイバータ模擬プラズマで起こっている物理過程において、詳細な解析を行う事が可能となり、ITER 等におけるダイバータ物理の研究に貢献する事ができると考える。

## 審 査 の 要 旨

### 〔批評〕

本論文は、GAMMA 10/PDX を用いたダイバータ模擬実験に対して、数値計算コードを用いて数値シミュレーションによる解析を行う事によって、端部プラズマの挙動を解析した結果について述べたものである。本研究では、流体モデルに基づいた GAMMA 10/PDX 端部の磁場構造を取り入れた数値計算コードを新たに構築し、正常な動作を確認した後、水素ガスを端部に導入した際のシミュレーションを1流体モデルにて行った。その結果、GAMMA 10/PDX でのダイバータ模擬では、イオンから電子への衝突によるエネルギー遷移が、背景プラズマ挙動に大きな影響を与える事が定量的に検証され、イオン温度減少させる為のプロセスとして、水素イオンと中性粒子との荷電交換反応が重要であるという示唆が得られた。その後、本計算コードを多流体モデルに拡張し、背景プラズマと Ar イオン流についての解析が行えるように改造を行った。その結果、異種イオン、中性粒子や不純物粒子が混在する GAMMA 10/PDX を用いたダイバータ模擬プラズマの挙動を、2 次元的に理解する事が出来る様になり、1 流体コードを用いた解析のみでは、明らかにすることができなかった不純物イオンと水素イオン間相互作用の影響評価、GAMMA 10/PDX における支配的な電子エネルギー輸送経路の解明や不純物イオン輸送について、理解を得ることが可能となった。これらの結果は、今後のタンデムミラー装置を用いてダイバータ模擬を進めてゆく上での重要な指針を与える研究であり、博士論文として十分価値のあるものである。

〔最終試験結果〕

平成27年 2月20日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。