U.D.C. 621.039.616:533.95

核融合新技術 特集

不純物低減に有効な低温高密度 ダイバータプラズマの解析

Numerical Analysis of Cold and Dense Divertor Plasma Bing **Effective in Impurity Reduction**

核融合炉でのダイバータの設計は、不純物を低減し炉心プラズマの閉じ込め性能 を向上する上で重要な検討課題となっている。本論文の目的は、ダイバータ近傍で のプラズマ及び中性粒子の挙動を解明し、それにより、ダイバータ受熱面の厳しい 条件を緩和するための対策を見いだすことである。そのために、ダイバータ内プラ ズマを磁力線方向の流体方程式で記述し、中性粒子の輸送をモンテカルロ法で模擬 する数値計算プログラムを開発し、核融合実験炉の解析に適用した。ダイバータ形 状の適切な設定により,ダイバータ板前面に低温かつ高密度のプラズマ層が形成さ れ、ダイバータ板のスパッタリング損耗量及び熱負荷が低減され、かつヘリウム排 気効率を向上できる可能性を示した。

| 藤沢 登* | Noboru Fujisawa |
|----------|--------------------|
| 杉原正芳* | Masayoshi Sugihara |
| 斉藤誠次** | Seiji Saitô |
| 小林朋文*** | Tomofumi Kobayashi |
| 伊東新一**** | Shin'ichi Itô |

言 1 緒

核融合炉開発の重要な技術課題の一つに、炉心プラズマで の核融合反応で生じる多量の熱とヘリウム不純物の処理方式 が挙げられる。このための最も有力な手段として、ポロイダ ルダイバータ方式が研究されてきた¹⁾。ダイバータ方式を用い た核融合炉の一例を、ポロイダル断面で図1に示す。炉心プ ラズマから流出する高温のプラズマ粒子は、炉心プラズマ周 辺部に形成されるスクレイプオフプラズマを介し, 磁力線に 沿ってダイバータ板に導かれ中性化される。その結果発生す る熱とスパッタリングによる損耗のために、ダイバータ板の 設計は厳しくなる。特に受熱面材の損耗により, ダイバータ 装置の定期的交換が必要となるとともに、スパッタされた不 純物が炉心プラズマに混入し、プラズマの閉じ込め性能に影 響を及ぼす可能性がある。



ダイバータに課される条件を緩和する可能性として,ダイ バータ板前面のプラズマを冷却し、スパッタリングによる損 耗量を低減する方法が考えられる。最近の理論的^{2)~4)}かつ実 験的5)~7)な研究により、ダイバータ内のプラズマが低温かつ 高密度となる可能性が示されてきた。このような低温かつ高 密度のダイバータ内プラズマは、ダイバータ内プラズマでの 中性粒子の再イオン化により得られる可能性がある。本論文 ではダイバータの設計条件を明確にするために、ダイバータ ログラムを開発し、核融合実験炉に適用した。

核融合炉の真空容器と炉心プラズマのポロイダル断面図 × I 上下対称の装置構成の上部だけを示す。

45

流束に比べて高くなる。イオン流束の増大とともに、プラズ 内でのプラズマと中性粒子の相互作用を記述する数値計算プ マは高密度になるが、このことによりイオン化率が増大する ので、ダイバータ板前面のプラズマ密度は更に上昇する。密 2 ダイバータ内プラズマと中性粒子の輸送計算モデル 度の増大とともに一つのプラズマ粒子に与えられるエネルギ ダイバータでのプラズマと中性粒子の相互作用を説明する ーが低下するので、 プラズマは低温となる。この密度の上昇 と温度の低下は、ダイバータ内プラズマが定常となるまで続 ために,図1に示す外側ダイバータを模式化して図2に示し く。したがって、ダイバータ内での中性粒子のリサイクリン た。プラズマイオンはダイバータ板で中性化され、その際発 生した中性粒子は、ダイバータスロート内を運動する。この グが高いほど低温・高密度のダイバータ内プラズマが得られ やすい。ダブレットIII装置などでのダイバータ実験では、ダ 中性粒子は炉心プラズマ領域に帰還するか、あるいは排気ダ クトに流入し排気されるが、途中一部の中性粒子がダイバー イバータ板前面に低温($3 \sim 8 \, \text{eV}$)かつ高密度($10^{14}/\text{cm}^3$ 程度) のプラズマが観測され6),この中性粒子のリサイクリングの タ内プラズマで再イオン化し、プラズマイオンとしてダイバ ータ板に戻る。このリサイクリングのために、ダイバータ板 重要性が示唆されてきた。このことは、ダイバータ内でのプ ラズマと中性粒子のイオン化と荷電交換による非線形相互作 付近のイオン流束はダイバータスロート入口での入射イオン

* 日本原子力研究所大型トカマク開発部 工学博士 ** 日立製作所エネルギー研究所 理学博士 *** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 **** 日立製作所日立工場



図2 ダイバータ内でのプラズマと中性粒子の相互作用説明 図1に斜線で示す外側ダイバータに対応する。●で示すイオンと⇔で示す中性 粒子の流れとその相互作用を説明している。



図3 ダイバータ内プラズマと中性粒子の輸送計算モデル ダイ バータ内プラズマを電磁流体方程式により、中性粒子輸送をモンテカルロ法に より記述する。イオン化と荷電交換による両者の相互作用を、逐次近似による 収束解法で解く。

この観点から、ダイバータ内での重水素、三重水素、ヘリウ ムなどの中性粒子の輸送をモンテカルロ法により解く方法を とった。考慮した物理過程は、中性粒子のプラズマ中でのイ オン化と荷電交換及び壁での反射と吸収再放出の過程である。 ダイバータ内のプラズマは、イオン化と荷電交換反応によ り、中性粒子と強く相互作用する。この問題を解くために、 図3に示すような逐次近似による収束解法を用いた。磁力線 方向の熱伝導率はプラズマ温度に強く依存するために、ダイ バータ内プラズマで熱伝導が支配的となる領域と対流が支配 的となる領域が混在する可能性がある。このために起こる数 値不安定性を回避するために、プラズマの流体方程式を一次 の風上差分近似により階差化した。

用を解くダイバータ解析モデルの必要性を示している。

一方,ダイバータの設計では、(1)ダイバータ板の交換頻度、 (2)ダイバータ板の冷却条件、(3)排気系の実効的排気速度な どが最も重要な因子となる。(1)は主にスパッタリングの損耗 量により定まるので、ダイバータ板前面のプラズマ温度及び イオン流束により決定される。(2)はダイバータ板の熱負荷分 布により定まる。また(3)は、炉心プラズマでの核融合反応に より生じるヘリウム不純物の蓄積量を所定量以下に保持する という条件の下で決定される。これらの設計条件を導出する ために、ダイバータ内でのプラズマと中性粒子との非線形相 互作用を解く数値計算プログラムを開発し、ダイバータ内プ ラズマでの熱流束及び粒子束あるいは排気中性粒子束を求め ることができるようにした。

ここでは、ダイバータ内のプラズマの流れは、磁力線方向 の流れが支配的となるので、磁力線方向の粒子保存式、運動 量保存式及びエネルギーの保存式により記述した。磁力線方 向の熱伝導係数には古典的熱伝導率を用いた。ダイバータ内 プラズマを特徴づける条件は、ダイバータスロート入口での 炉心プラズマ周辺部のスクレイプオフプラズマとの接続条件、 及びダイバータ板での境界条件により記述できる。ダイバー タスロート入口での条件は、炉心プラズマから流出しダイバ ータに流入する入射熱流束及び入射イオン流束の磁力線に垂 直方向の分布として与えた。また、ダイバータ板上での境界 条件は、ダイバータ板前面に形成される静電シースの条件と して、シース電場による熱流束の制限条件及びボームのシー ダイバータ内プラズマが高密度となり,ダイバータ内での 中性粒子及び不純物のリサイクリングが高くなると,それら からの輻射損失が増大する。ここでは中性の水素及びプラズ マ中に一定量の混入を仮定した酸素不純物からの輻射損失を 考慮した。ダイバータ内プラズマの流体モデルの詳細は文献 4)に,中性粒子輸送計算のモンテカルロアルゴリズムについ ては文献8)に詳述した。

13 核融合実験炉を対象とした解析例

ダイバータ内プラズマの現象を具体的に示すために、本章 では日本原子力研究所で概念設計を進めている核融合実験 炉を対象として解析した。ダイバータ板前面に形成される プラズマは、炉心プラズマ条件、主に炉心プラズマから流出 しダイバータスロートに流入する流束の条件に強く依存する と考えられる。出力440MWの核融合実験炉では、約60MWの 熱がダイバータに流入し、その際の粒子束は1.3×10²³/s程度 となる。

しかし,入射イオン流束は入射熱流束に比べて不明確な点 も多々あり,ここではダイバータ内プラズマの入射イオン束 に対する依存性を調べた。

ダイバータ板前面に形成されるプラズマの最高密度及び最

| ス安定性条件をとった。 | 高温度と入射イオン流束との関係を図4に示す。同図(a)はダ |
|-----------------------------|---|
| ダイバータ内プラズマの特性は、ダイバータ内での中性粒 | イバータ内プラズマからの輻射損失を無視した場合の結果で |
| 子のリサイクリングに強く支配されるので、ダイバータ外へ | あり、同図(b)は中性粒子と酸素不純物からの輻射損失を考慮 |
| 逃れる中性粒子の割合を正しく評価することが肝要となる。 | した場合の結果である。ここで酸素不純物の混入量は1%と |
| すなわち、ダイバータ板で発生する中性粒子が、ダイバータ | 仮定している。電子温度は、入射イオン流束が10 ²² /sを超え |
| スロートを逆流し炉心プラズマ領域に戻る割合と排気ダクト | ると急激に10eV以下に低下し、2.5×10 ²² /sを超えるとほぼ一 |
| を通じて排気される割合とを定量的に評価する必要がある。 | 定となる(同図中で、入射イオン流束は、上部外側ダイバータ |

46

不純物低減に有効な低温高密度ダイバータプラズマの解析 677



図4 ダイバータ板前面の電子密度及び電子温度の入射イオン流 束への依存性 図中(a)はダイバータ内プラズマでの輻射損失がない場合を、 (b)はプラズマ中の中性の水素及び酸素不純物からの輻射損失を考慮した場合を 示す。

に対する値を示した)。炉心プラズマの粒子閉じ込め時間200ms に相当する入射イオン流束5×10²²/sでは3eV程度まで冷却 されることとなり、10eV以下の低温のプラズマがダイバータ 板前面に形成される可能性は高いと考えられる。また電子密 度は、 10^{14} /cm³程度に高密度となることが分かる。

に伴うダイバータ内プラズマ密度の非線形的増大,などであ り,これらの結果をよく再現できることが明らかになった⁹⁾。 更に詳細にダイバータ内プラズマの特性を示すために、ダ イバータ内プラズマの2次元空間分布を図5,6に示した。 図5,6は、中性粒子と酸素不純物からの輻射損失を考慮し た場合を示し、プラズマ状態がほぼ一定となる入射イオン流 束2.5×10²²/sに対する結果である。図5から電子温度は、ダ イバータスロート入口で約40eVからダイバータ板前面で急激 に約3eVまで低下していることが分かる。このように、ダイ バータ板前面のプラズマが低温となることにより、ダイバー タ板のスパッタリング損耗量は著しく低減する。

タングステンのような高Z材は、高温プラズマのもとでは 自己スパッタリングが多大となるためにその使用は不適当で あるが、電子温度が20eV程度以下となるとスパッタリングの しきい値以下となるために,損耗量は無視できるほど小さく なり適用できる。また、電子温度が3eV程度まで冷却すると、 SiCあるいはTiCのような低Z材料でもスパッタリングのし きい値以下となり, その適用可能性があることが分かった。 他面では, 低 Z 材は高 Z 材に比べて 炉心 プラズマに 混入した 際に, 炉心プラズマを冷却し, 自己点火条件を壊す危険性が 少ないという利点もあり,今後更に低Z材のダイバータ板へ 適用の可能性を検討する必要がある。

得られた解の妥当性を確認するために、 ダブレットIIIのダ イバータ実験を数値シミュレーションした。ダブレットIIIの 主な実験結果は、(1)低温高密度($3 \sim 8 \text{ eV}, \sim 10^{14}/\text{cm}^3$)のダ イバータプラズマの形成, (2) 高いダイバータ内プラズマから の輻射損失(入射熱流束の約50%),(3)主プラズマ密度の増大

図4中の(a)と(b)の比較から分かるように、電子温度の入射 イオン流束は輻射損失の程度にさほど依存しない。これは, 電子温度が10eV以下になると、中性粒子のイオン化率が電子 温度の低下とともに急激に低下することによるものである。 輻射損失がない状態から出発し,輻射損失を導入した状態へ の変化を考えると、上記の依存性を解釈できる。輻射損失が 増大すると電子温度が低下するが,このことにより中性粒子 のイオン化率が低下し,ダイバータ板に到達するイオン流束 が減少する。前述のように、イオン化率は電子温度に強く依



図5 ダイバータ内プラズマ電子温度の2次元空間分布 入射イ オン流束2.5×10²²/sの場合を示す。電子温度は、ダイバータ板付近で急激に10 eV以下に冷却される。

ダイバータ内プラズマ電子密度の2次元空間分布 凶 6 入射イ オン流束2.5×10²²/sの場合を示す。電子密度は、ダイバータスロート入口で3 $\times 10^{13}$ /cm³からダイバータ板で2×10¹⁴/cm³まで増加している。

47

678 日立評論 VOL. 66 No. 9(1984-9)



図7 ダイバータ内プラズマの全輻射損失と入射イオン流束の関係 図4の(b)に対する輻射損失パワーを示す。



要がある。以下では、このために必要な排気系全体の実効的 排気速度を求める。同様の計算条件のもとで、排気ダクト入 口での実効的排気速度と中性粒子帰還率の関係を求め図8に 示す。ここで、中性粒子帰還率はダイバータスロート入口に 流入したイオンが、中性粒子として炉心プラズマ領域に帰還 する割合として定義した。核融合実験炉では、トロイダルベ ータ値の限界のために、炉心プラズマで発生したへリウム不 純物の混入量を5%以下に保持するよう設計している。この ためには、炉心プラズマでの粒子バランスから、へりウム不 純物の帰還率を0.94程度に抑制することが必要となる。した がって、同図から分かるように、排気系の実効的排気速度は 5×10⁴*l*/sとなり、複合クライオポンプを用いた排気系の設 計で達成可能であることが分かる。

4 結 言

ダイバータ板のスパッタリングによる損耗量,ダイバータ 内壁の熱負荷分布,排気系の実効的排気速度などのダイバー タ設計条件を明確にするために,ダイバータ内でのプラズマ と中性粒子の輸送を解析するモデルと数値計算プログラムを 開発した。日本原子力研究所で概念設計を進めている核融合 実験炉を対象とし解析した結果では,(1)ダイバータ板前面の 電子温度は3eV程度にまで低下し,スパッタリングによる損 耗量を著しく低減できる。(2)ダイバータ内中性粒子及び酸素

図8 中性粒子帰還率と実効的排気速度の関係 ヘリウム排気に必要な実効的排気速度は、5×10⁴l/sとなる。

存するために、わずかな電子温度の低下が大きなイオン流束、 すなわちプラズマ密度の減少を誘導する。したがって、輻射 損失により、ダイバータ板に到達する熱が減少した新たな平 衡状態では、電子温度はわずかに減少し、電子密度は大幅に 減少することとなる。同様の考察から、入射熱流束の変化に 対しても、電子温度の入射イオン流束依存性は弱いことが分 かる。

図4に示した輻射損失を考慮した場合の結果に対する輻射 損失パワーと入射イオン流束の関係を図7に示す。入射イオ ン流束が2.5×10²²/sを超えるとほぼ一定となり、中性の水素 からの輻射は入射熱流束の約40%に、また酸素からの輻射は 約25%に達し、高い輻射冷却が期待できることが分かる。ダ イバータ内プラズマからの輻射熱が増大すると、ダイバータ 板に直接流入する熱が低下するために、ダイバータ板の熱負 荷が緩和されることとなる。輻射による熱はダイバータ内壁 及び第一壁に吸収されるが、その一部はダイバータ板に戻る。 この熱を含めて、ダイバータ板上の熱負荷を詳細に求めると、 入射熱流束がそのままダイバータ板に流入する場合に比べて 約40%低減し、最大熱流束は約1.7MW/m²となる。 不純物(プラズマ中に1%を仮定)からの輻射損失は、入射熱 流束の約65%に及び、ダイバータ板の熱負荷は入射熱流束が 直接流入した場合に比べて約40%低減し、最大熱流束は約1.7 MW/m²となる。(3)炉心プラズマでのへリウム不純物の混入 量を5%以下に保持するために必要な実効的排気速度は5× 10⁴l/sとなり、既存の排気装置で十分達成可能となる、など のことが分かった。

本報告では、ダイバータ内プラズマを炉心プラズマから分離し独立に解析した。しかし、炉心プラズマの閉じ込め特性 を論じるには両者を結合した解析が必要であり、今後の重要 な研究課題である。また、ダイバータ内での不純物輸送の詳 細な解析を実施する予定である。

本研究を遂行するに当たり御指導いただいた日本原子力研 究所大型トカマク開発部部長の吉川九二理学博士,主任研究 員の東稔達三工学博士に対し深く謝意を表わす次第である。

参考文献

- K. Tomabechi, et al. : Proc. Ninth Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Vol. 1, p. 399, Baltimore, 1982(IAEA, Vienna, 1983)
- M. Petravic, et al. : Proc. Ninth. Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Baltimore, IAEA-CN-41/-D-3-2, 1982
- 3) D. Heifetz, et al. : J. Comput. Phys. 46, 309(1982)
- 4) S.Saito, et al. : J.Nucl. Mater. 121, 199(1984)
- 5) M. Shimada, et al. : Phys. Rev. Lett. 47, 796(1981)
- 6) S. Sengoku, et al. : To be Published in Nucl. Fusion

炉心プラズマ中で核融合反応により発生するヘリウム不純物が, 炉心プラズマに所定量以上に蓄積することを防止する ためには, ヘリウム不純物をその発生率の割合で排気する必

- 7) Y. Shimomura, et al. : IPP III/80(1982)
- 8) S. Saito, et al. : Nucl. Technol./Fus. 4, 498(1983)
- 9) S. Saito, et al.: To be Published in J. Nucl. Mater.

48