

磁気ノズルからのプラズマ分離に関する数値解析

川淵, 亮
九州大学大学院総合理工学府先端エネルギー理工学専攻

梶村, 好宏
九州大学大学院総合理工学府先端エネルギー理工学専攻

中島, 秀紀
九州大学大学院総合理工学府先端エネルギー理工学専攻

<https://doi.org/10.15017/1467690>

出版情報 : 九州大学情報基盤センター広報 : 全国共同利用版. 6 (3), pp.188-190, 2007-03. Computing and Communications Center Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

磁気ノズルからのプラズマ分離に関する数値解析

川淵亮, 梶村好宏, 中島秀紀(九州大学大学院総合理工学府先端エネルギー理工学専攻)

概要

本研究では、慣性核融合推進機における磁場からのプラズマ分離 (detachment) 現象を、プラズマ粒子コードを用いてシミュレーション可能であるか検証した。

1. 背景・目的

爆発的に膨張するプラズマを磁場によって制御し、有効に推力に変換する磁気ノズルは、慣性核融合推進において従来から提案されてきた概念である。磁気ノズルの利点は、プラズマ噴出時にプラズマと固体壁の直接的な接触がないため排出速度を高速にでき、その結果高い推進効率が得られることである。この磁気ノズルを用いたロケットとして、レーザー核融合ロケットが提案されており、過去に設計、シミュレーションが行われてきた。このロケットは、超伝導コイルで構成された磁気ノズルを用い、レーザー核融合により生じたプラズマ流を制御し、ロケットの後方に噴出させることで推進力を得るものである。推進原理を図1に示す。

これまで当研究室では、磁気ノズルによって制御されるプラズマの挙動について、3次元ハイブリッドコードを用いて数値解析を行ってきた。3次元ハイブリッドコードはプラズマ中のイオンを粒子とし、電子を慣性を無視した流体として扱うコードであり、イオンのダイナミクスが支配的となる磁気ノズル中のプラズマ挙動を解析する上で有効なコードである。いかにしてプラズマを磁気ノズルによって制御し、効率的に推進力を得るかという着眼点の下、コイルの径や位置、コイルに流す電流の大きさなどをパラメトリックに変更し、推進効率 (プラズマの運動量を排出方向に変換できる割合) の向上を目指し研究を行ってきた[1]。

この磁気ノズルを用いたレーザー核融合ロケットの実現性を議論するにあたっては、

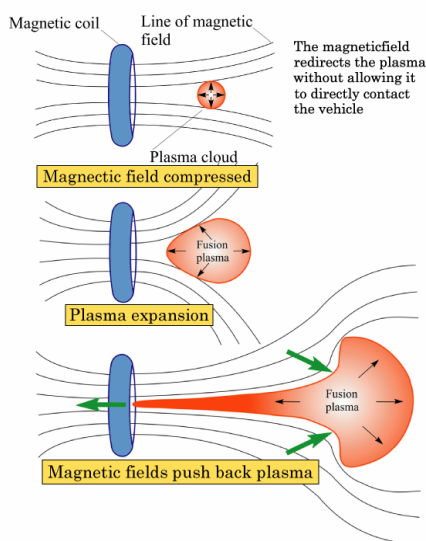


図1 推進原理

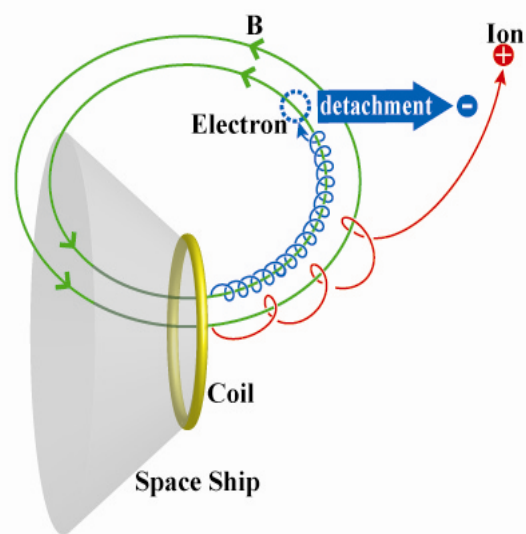


図2 プラズマデタッチメント概念

磁気ノズルからのプラズマの分離(detachment)が重要なテーマの一つとなっている。つまり、コイルが生成する磁場はコイル中を回って一周しており、制御されたプラズマがその磁力線に沿って元に戻ってくる可能性が考えられる。そうなれば、推力が得られるという議論は成立しない。実際のプラズマは、噴出直後は電気的中性を保っていたとしても、イオンと電子のラーマー半径の違いから、イオンは磁力線から離れ、電子は磁力線に巻きつき、磁力線に沿って運動することが考えられる (図 2)。この物理過程を考慮し、本当にプラズマが磁場から離れるかどうかを検証するためには、これまで使用してきた 3 次元ハイブリッドコードでは不十分であり、イオンと電子を共に粒子として扱う Full-PIC コードを用いて検証する必要がある。

今回のキャンペーンでは、高性能演算サーバーにおいて大メモリを要する計算が可能であることから、Full-PIC コードとして有名な TRISTAN コードを用いて、慣性核融合推進機の磁気ノズル内プラズマ挙動シミュレーションが可能であるか検証し、プラズマ分離の確認を試みた。

2. 解析手法・モデル

2.1 解析手法

本研究では 3 次元 TRISTAN コードを用いて粒子シミュレーションを行った。基礎方程式として、Maxwell 方程式と衝突項を含まない粒子の運動方程式を用いた。

以下に基礎方程式を記す。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{P}_p}{dt} = q_p (\mathbf{E} + \mathbf{v}_p \times \mathbf{B}) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{J} = \sum_{p=i,e} q_p n_p \mathbf{v}_p$ 、 $\mathbf{P}_p = m_p \mathbf{v}_p$ であり、添え字 p, i, e はそれぞれプラズマ、イオン、電子を示す。電流密度 \mathbf{J} はそれぞれの粒子の位置と速度をもとに、それぞれの格子点に分配される。これが荷電粒子と磁場を繋ぐ重要な役割を担っている。空間について 2 次の中心差分を、時間については 2 次のルンゲクッタのスキームを用いている。

2.2 解析モデル

シミュレーションに用いた解析モデルを図 3 に示す。計算領域は 55 mesh × 55 mesh × 55 mesh とした。初期の核融合プラズマ位置は、領域中央に半径 3 mesh の球内にランダムに分布させ、イオンと電子の位置は同じで電荷は 0 である。各粒子の初期速度は、プラズマの熱速度(Maxwell 分布)に加え、等方的に膨張速度を与えた。計算に用いた主なパラメータを表 1 に示す。

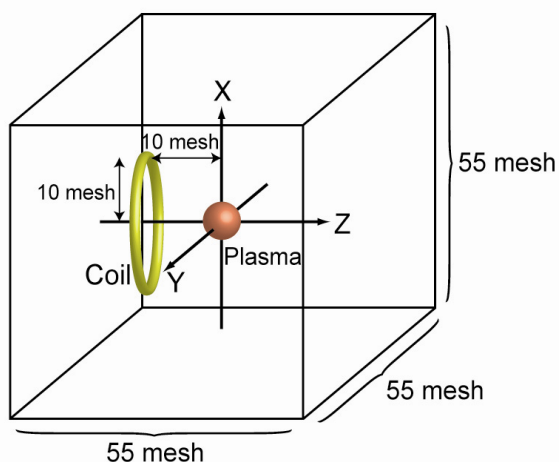


図3 解析モデル

表1 主なパラメータ

電子プラズマ振動数(ω_{pe})	0.025
電子サイクロトロン周波数(ω_{ce})	
質量比(電子/イオン)	16
原子	水素
総粒子数	3.75×10^7
Debye球あたりの粒子数	9.0
コイル半径に対するイオンのラーマー半径比	6.4
コイル半径に対する電子のラーマー半径比	0.4

3. 解析結果・考察

電子、イオンの運動エネルギー時間変化を図4に示す。電子、イオンどちらもZ方向の運動エネルギーがX, Y方向より大きくなっており、磁気ノズルによってプラズマのX, Y方向運動エネルギーがZ方向に変換され磁気ノズルの働きが確認できた。また粒子の振る舞いについては、まず電子が飛び出し、そこに荷電分離の電場が生じて粒子が加速されている様子が見られた。さらに、磁場に沿って運動する電子が磁場から引き離される現象が見られた。これは、電子とイオンの荷電分離による電場により引き起こされたと考えられ、プラズマ分離を確認できる可能性があることが分かった。

4. まとめ

本研究では、TRISTANコードを用いて、慣性核融合推進機の磁気ノズル内プラズマ挙動シミュレーションが可能であるか検証し、プラズマ分離確認のためのパラメータ設定、並びにその計算を行った。その結果、プラズマの運動エネルギーがZ方向に偏り、磁気ノズル内のプラズマ挙動シミュレーションが可能であることが分かった。さらに、電子が磁場から引き離される現象がみられ、プラズマデタッチメントを確認できる可能性があることが分かった。今後、デバイ球あたりの粒子数不足を解消して十分な精度を実現し、解析領域も広げて計算を行う必要がある。

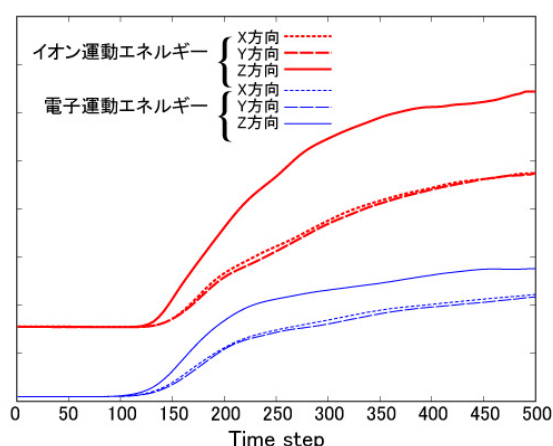


図4 電子・イオンの運動エネルギー変化

参考文献

[1] N. Sakaguchi, Y. Kajimura and H. Nakashima: Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., 48 (2005), 180