

レーザー核融合推進の実現に向けた磁気ノズルにおける磁力線からのプラズマ離脱(デタッチメント)に関する数値解析

児島富彦
総合理工学府

深宇宙資源の利用に向けて

有人火星探査

- 乗務員の心理的負担
- 宇宙線被曝
- 骨密度の減少

→ ロケットの高速化が不可欠

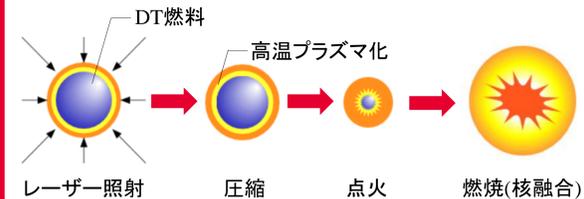


惑星資源の利用へ向けた核融合ロケットの開発が必要

レーザー核融合ロケットの仕組みと課題

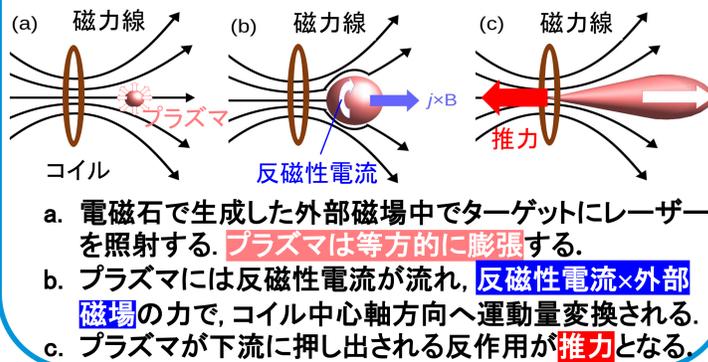
レーザー核融合

核融合燃料ターゲットにレーザーを照射。圧縮(爆縮)することで高温高密度を達成。自己点火し、燃え広がって核融合する。



ロケット推進方法

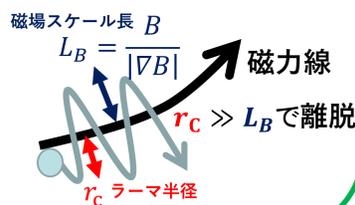
磁気スラストチャンバー



磁力線からのプラズマ離脱(デタッチメント)

反磁性電流が生じるには、プラズマを構成する荷電粒子は磁力線に沿って周回運動する必要がある。一方、推力を得るには、排出されたプラズマが磁力線から離脱(デタッチメント)する必要がある。

デタッチメントシナリオの一例
→ 周回半径(ラーマ半径)の増大で離脱すると言われる。



解析手法と数値解析結果

解析手法

荷電粒子が磁力線に巻き付く運動(ラーマ運動)の半径が磁場スケール長より大きくなると磁力線から離脱するとし、粒子シミュレーションによってプラズマ離脱解析する。

Full-Particle-In-Cellシミュレーション(EPOCH*を使用)

大量の粒子の運動方程式とMaxwell方程式を組み合わせることでプラズマの運動を解析する。

計算コスト削減のため、二次元座標で三次元速度を持つ粒子を計算。等方膨張するプラズマを初期状態とする。

計算条件

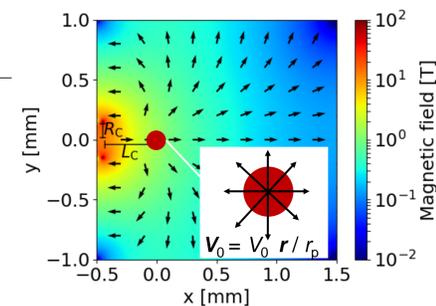
グリッド数 (x, y)	(4000, 4000)
グリッド幅 Δx	$5 \times 10^{-7} \text{ m } (< 0.1c/\omega_{pe})$
時間刻み幅, Δt	$10^{-15} \text{ s } (< 0.01/f_{pe})$
コイル半径, r_c	$150\Delta x$
初期プラズマ密度, n_p	10^{24} m^{-3}
初期プラズマ膨張速度, V_0	$1.41 \times 10^5 \text{ m/s}$
超粒子数	10^6
質量比, m_{ion}/m_e	100
デバイ長, λ_D	$2 \times 10^{-8} \text{ m}$

*T. D. Arber, et al., Plasma Physics and Controlled Fusion 57,113001 (2015)

基礎方程式

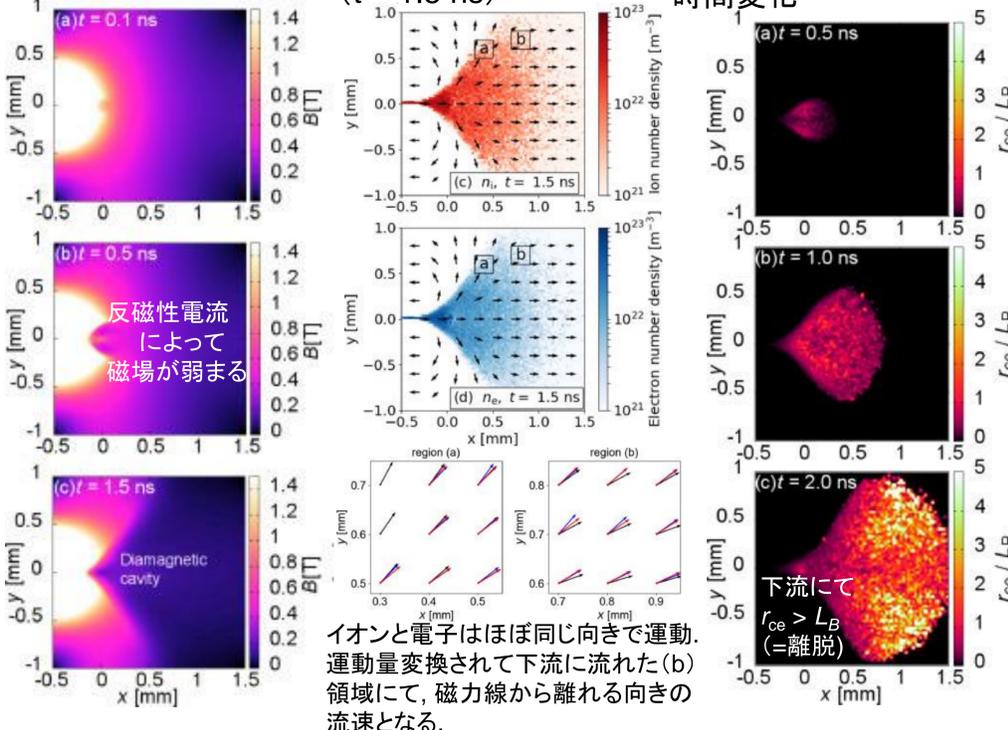
$$\frac{dP}{dt} = q(E + V \times B) \quad J = \sum qnV$$

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



計算結果** **T. Kojima, et al., High Energy Density Physics 36, 100814 (2020)

磁束密度時間変化, イオン・電子密度, 流速と磁力線の比較 ($t = 1.5 \text{ ns}$), 電子ラーマ半径(r_{ce})と磁場スケール長(L_B)比較 時間変化



まとめと今後の展望

- 粒子シミュレーションによって電子ラーマ半径と磁場スケール長の解析を行い、プラズマ離脱と判断し得る領域を確認した。
- 離脱と判断できていない領域がどのように推力に影響するかについて今後調査することで、磁気スラストチャンバーの設計パラメータの取得に繋がり、レーザー核融合ロケットの開発に繋がる。