

レーザー核融合ロケットにおけるプラズマ離脱過程の検証

Investigation of plasma detachment process in a laser fusion rocket using
fully kinetic particle-in-cell simulation

研究代表者：山本 直嗣（九州大学総合理工学研究院）
yamamoto@aces.kyushu-u.ac.jp

研究目的 (Research Objective):

人類の生存圏拡大のための火星移住計画へ注目が高まる中、火星まで大量のヒトとモノを輸送する推進システムの開発が求められる。しかし、既存の推進機の中でも大推力を生み出し得る化学推進をもってしても地球火星間往復に1年以上を要し、乗組員への身体的・精神的な負荷が懸念される。そこで、このミッション期間を約半年間に短縮できる核融合推進が代替推進機として提案されている。その一つであるレーザー核融合ロケットは、核融合燃料ターゲットに高エネルギーレーザーを照射して爆縮させることで慣性核融合反応を起こし、それによって生み出される膨大なエネルギーをパルス状の推力に変える革新的な次世代ロケットである。レーザー核融合ロケットにおける推進システムは磁気スラストチャンバと呼ばれる磁気ノズルの一種である。磁気スラストチャンバは、核融合エネルギーによってプラズマ化した推進剤の運動を超伝導コイルで生成した発散磁場によって制御することでノズルとして機能する。そこで、レーザー核融合ロケットにおける推力発生の鍵を握るのがプラズマの磁力線からの離脱現象（デタッチメント）である。超伝導コイルが生成する磁場の磁力線はロケットを一周する閉ループ構造をしており、磁場にトラップされた（アタッチした）推進剤は推力に寄与しない。近年、数値シミュレーションを用いて磁気スラストチャンバにおけるプラズマデタッチメントのメカニズムが解明されてきたものの、推力の推定は電子が磁力線から完全にデタッチすると仮定した上で行われてきた。

そこで本研究では、電子のアタッチメントを考慮した数値計算によって力積の時間変化を計測した。

計算手法 (Computational Aspects):

計算にはイオン及び電子を荷電粒子として扱う particle-in-cell 法を用いたオープンソースのプラズマシミュレーションコードである EPOCH を用いた。EPOCH では電磁場の更新に有限時間領域差分法を、粒子の運動量の更新に Buneman-Boris 法を、電流密度の更新に Villasener-Buneman 法を用いて計算している。推進剤には密度 10^{23} m^{-3} 、温度 1 keV の 1 価水素イオンと電子を仮定し、コイルが生成する磁場エネルギーとプラズマエネルギーの比 E_B/E_p を 0.5, 1, 2, 5, 10 と変化させた条件で磁気スラストチャンバ内のプラズマの挙動を観察した。計算コスト削減のために、計算座標系を 2 次元、かつイオンと電子の質量比を 100 とした。

研究成果（Accomplishments）：

この計算では電子の円運動を十分分解できる空間・時間スケールとした格子サイズを $\Delta x = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$ として、時間刻みは $\Delta t = 1.12 \times 10^{-15} \text{ s}$ と設定し、図 1 (a), (b) にそれぞれ電子の軌道、および磁場に垂直な方向のラーマー半径の時間変化を示す。問題なく、磁場中の粒子の運動を正確に計算できている。

図 2 に $E_B/E_p = 0.5, 1, 2, 5, 10$ の条件下における力積の時間変化を示す。膨張開始時には、0 であった力積が時間の経過とともに磁気スラストチャンバが作動し、コイル側に進んでいた粒子が反転してコイル下流方向に向かうため、力積が時間とともに増加し、飽和していることが分かるこれは先行研究と定性的に一致している。

また $E_B/E_p > 1$ の条件では、十分時間がたった後の力積の大きさはほぼ一定であるが、 E_B/E_p が 5 から 10 になる条件では下がっている。

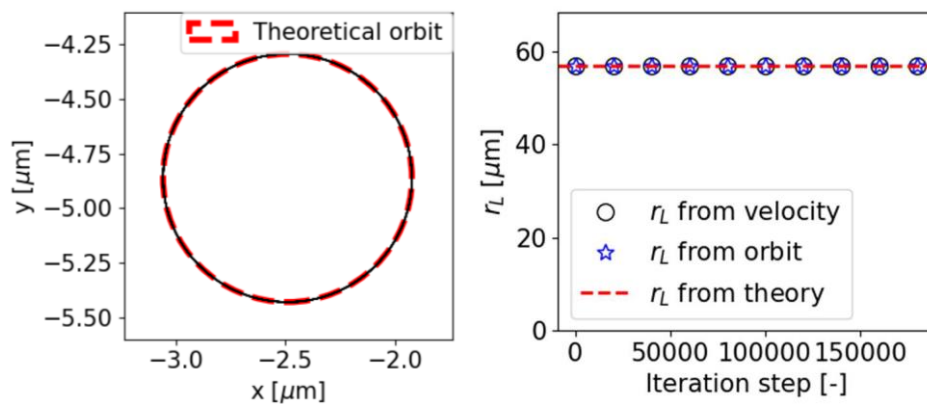


Fig. 1 電子の軌道と半径の変移

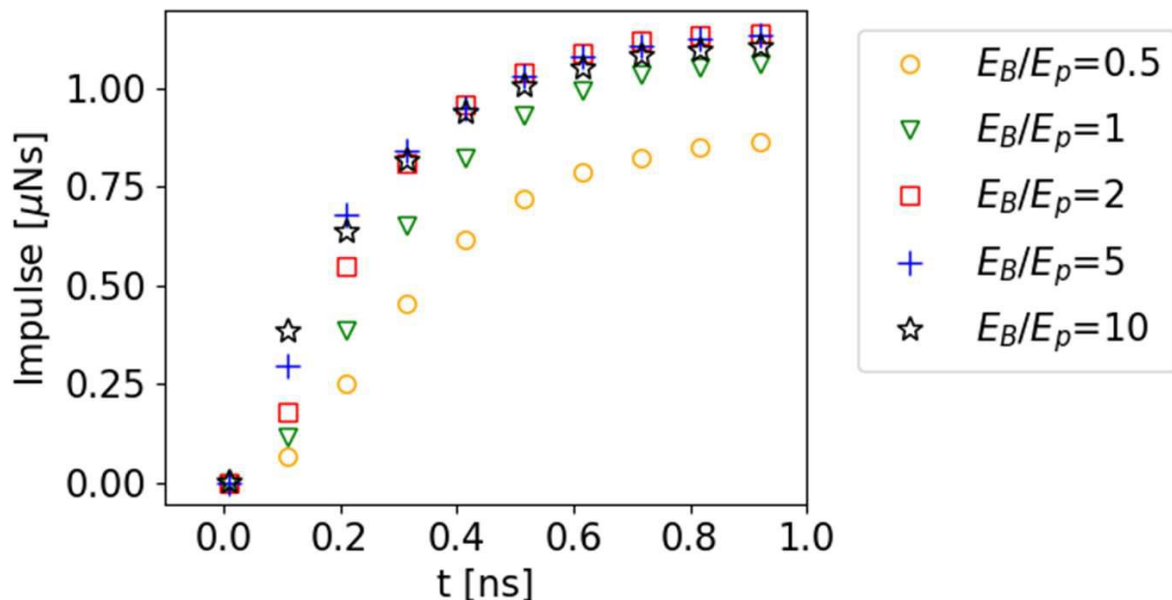


Fig. 2 力積の時間変化

公表状況（Publications）：

卒業論文：

山上晴哉、R7 年度九州大学工学部融合基礎工学科卒業論文、核融合ロケットにおける磁気ノズル最適化の検討

口頭発表：

山上晴哉、核融合ロケットにおける磁気ノズル最適化の検討, 2025 年度 KDK シンポジウム