

FRC への同軸対向プラズモイド入射の MHD シミュレーション MHD simulation of axially opposing FRCs injection into a pre-existing FRC plasma

○小岩昂太郎¹, 水口直紀², 高橋拓也³, 高橋俊樹³, 小林大地⁴, 高橋努⁴, 浅井朋彦⁴

*Kotaro Koiwa¹, Naoki Mizuguchi², Takuya Takahashi³, Toshiki Takahashi³, Daichi Kobayashi⁴, Tsutomu Takahashi⁴, Tomohiko Asai⁴

Abstract: Collisional merging experiments of Field-Reversed Configuration (FRC) are conducted at FAT-CM device at Nihon University. As a method to supply particles and magnetic flux to the pre-formed FRC, experiments are being conducted where a pair of FRCs are injected axially from both ends into a collisionally merged FRC. In this study, we aim to emulate these experiments using MHD (Magnetohydrodynamics) simulations. We simulate the plasmoid injection into the FRC in the confinement section, using the pressure equilibrium state of the plasma calculated by solving the Grad-Shafranov equation as the initial condition.

1. 研究背景・目的

本研究室で開発した FAT-CM 装置 (日本大学) を用いた超アルヴェン速度での磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration : FRC) 衝突合体生成実験が行われている^[1]. 衝突によって生成された FRC^[2]は閉じ込め効率の指標であるベータ値が極限的に高いことで知られている. 装置両端部における生成部において FRC 様磁化プラズモイドを逆磁場シータピンチ (Field-Reversed Theta Pinch : FRTP) 法^[3]によって生成する. 生成したプラズモイドを中央部の閉じ込め領域においてイオン音速やアルヴェン速度を超える相対速度で衝突させるために, 真空容器と同軸上に配置されたコイルにより形成した磁気圧勾配を利用し, 生成部から閉じ込め部へとプラズモイドを加速する.

通常の FRC 衝突合体生成実験では, 生成部のプラズモイドが閉じ込め部で衝突し, FRC が生成されるが, FRC のポロイダル磁束や粒子数の供給を目的とし, 生成された FRC にさらに2つの FRC を衝突・合体させる実験も行われている^[4]. 実験の概略図を Fig.1 に示す.

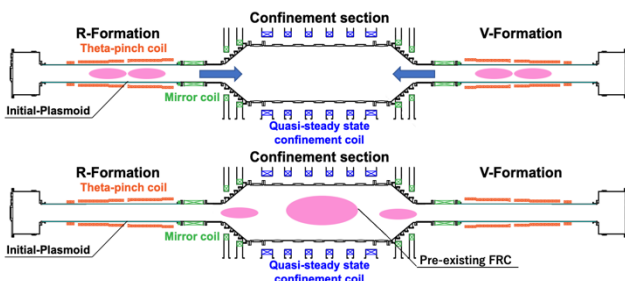


Figure 1. Schematic diagram of a two-stage FRC collision generation experiment.

本研究では, この衝突合体が二回起こる追衝突実験を磁気流体力学 (MHD) シミュレーションにより再現することを目指し, MHD 環境下において FRC の配位が形成される時に生じる磁気リコネクションの有無や, 実験では制御が困難であるプラズモイドのサイズの FRC 生成への影響などを確認する.

2. 平衡計算

実験モデルを MHD モデルでシミュレーションする上で, 時間発展データの初期条件として, FRC プラズマの静止平衡状態を計算する. プラズマの圧力平衡計算には装置中央部の FRC を維持させるための磁場を生成するストレートコイルと閉じ込め部から生成部に FRC が漏れないように抑えるミラーコイル, 生成部のシータピンチコイルが作る磁束関数を円筒座標系を用いたベクトルポテンシャルの式

$$A_\varphi(R, \varphi, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{a \cos \chi d\chi}{\sqrt{z^2 + (R^2 + a^2 - 2aR \cos \chi)}} \quad (1)$$

から求める. このとき磁束関数は

$$\psi = r A_\varphi \quad (2)$$

と書ける. 計算結果の一部である装置壁付近での外部磁束を円筒座標系の Grad-Shafranov 方程式

$$\mu_0 r \frac{\partial P}{\partial \psi} = \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \quad (3)$$

1 : 日大理工・院 (前) 2 : 核融合科学研究所 3 : 群馬大学大学院理工学府 4 : 日大理工・教員・物理

に代入し、反復計算を行う。(3)式のプラズマ圧力 P は磁気中性点である O 点の磁束で規格化した ψ_n と定数 P_0 , α を用いて

$$P(\psi) = P_0 \psi_n^\alpha \quad (4)$$

と表される。ただし、定数 P_0 , α は閉じ込め部と生成部で異なる値を持つ。結果から得られた磁束関数の等磁束面を Fig.2 に等高線で表す。ここで、 r , z は装置の長さをメッシュ数で表したもので、 ψ は規格化後の磁束である。

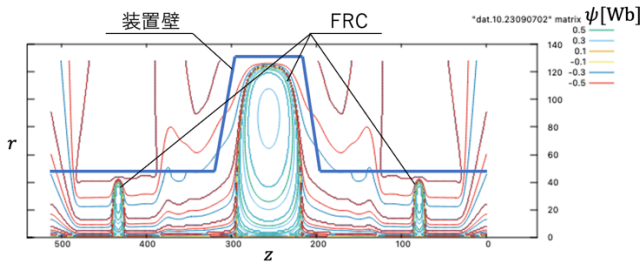


Figure 2. Calculation result of magnetic flux function calculated by Grad-Shafranov equation.

3. MHD シミュレーション

MHD シミュレーションでは、1 回目の衝突合体により閉じ込め部に生成された FRC が平衡状態に至ったあと、2 回目の衝突のために生成部からプラズモイドが閉じ込め部へ入射される直前を初期状態とした。以下にシミュレーションに用いた MIPS コードの円筒座標系を用いた基礎方程式を示す^[5]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\rho \mathbf{w} \times \mathbf{v} - \rho \nabla \left(\frac{v^2}{2} \right) - \nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \frac{4}{3} \nabla [v\rho(\nabla \cdot \mathbf{v})] - \nabla \times [v\rho \mathbf{w}] \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E} \quad (7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\nabla \cdot (p\mathbf{v}) - (\gamma - 1)p\nabla \cdot \mathbf{v} + (\gamma - 1) \left[v\rho w^2 + \frac{4}{3}v\rho(\nabla \cdot \mathbf{v})^2 + \eta j^2 \right] \quad (8)$$

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \eta \mathbf{j} \quad (9)$$

$$\mathbf{J} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B} \quad (10)$$

$$\mathbf{w} = \nabla \times \mathbf{v} \quad (11)$$

$$\mathbf{v} = \frac{\eta}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{j} \quad (12)$$

ここで、 ρ はプラズマ質量密度、 \mathbf{v} は速度、 \mathbf{w} は流体の渦度、 γ は断熱定数、 \mathbf{J} は電流密度、 \mathbf{B} は磁束密度、 μ_0 は真空透磁率、 ν は拡散係数、 η は抵抗率である。また、式(5)は質量保存に関する連続の式、式(6)は流体に関する Euler 方程式、式(7)は Maxwell 方程式から Faraday の法則、式(10)は Ampere の法則を記述している。これらの式を用いて上述の変数の時間発展を計算する。差分は4次の有限差分、解法は Runge-Kutta 法を用いている。

4. まとめ

本予稿では、軸対称を仮定した予備計算である平衡計算結果とそれを初期条件とした MHD シミュレーションの計算手法の概要を紹介した。

講演会では、平衡計算結果を踏まえた 2 次元 MHD シミュレーション計算による時間発展の結果を紹介し、左右生成部のプラズモイドを含む計算モデル設計の現状と初期結果について詳述する。

5. 参考文献

- [1] T. Asai et al. : "Observation of self-organized FRC formation in a collisional-merging experiment", Nuclear Fusion, VOL.61, No.9, 096032, 2021
- [2] T. Tsuzuki : "Field reversed configurations", Nuclear Fusion, VOL.28, No.11, 2033, 1988
- [3] A. L. Hoffman and J.T. Slough : Nuclear Fusion, VOL.33, No.27, 1993
- [4] 備後光貴 : 「軸方向プラズモイド入射による衝突合体 FRC への粒子・磁束供給法の開発」日本大学大学院理工学研究科修士論文, 2023.
- [5] N.Mizuguchi et al. : "Modeling of Formation of Helical Structures in Reversed-Field Pinch", Plasma Fusion, VOL. 7, 2403117, 2012