

移送 FRC プラズマの反射過程における金属チェンバーの効果

Effects of metal chamber in the reflection process of a field-reversed configuration translation

○秋本和宏¹, 赤川駿介¹, 多田直樹¹, 山内貴紀², 松澤芳樹³, 平野洋一³, 浅井朋彦³, 高橋努³
 *Kazuhiro Akimoto¹, Shunsuke Akagawa¹, Naoki Tada¹, Takanori Yamauti²,
 Yoshiki Matsuzawa³, Yoichi Hirano³, Tomohiko Asai³, Tsutomu Takahashi³

Super-sonic translation of a field-reversed configuration (FRC) has recently performed on Nihon Compact Torus Experiment (NUCTE) facility. High temperature ($\sim 200\text{eV}$) and High density ($3 \times 10^{21}\text{m}^{-3}$) FRC plasma, which is formed by a field-reverse bias theta pinch (FRTP), has been translated with the velocity of $\sim 100\text{km/s}$. Translation device has metal boundaries at up and down stream mirror region. When the FRC injects into metal boundary, inductive reaction acts on the plasma. It is important for understanding the physics of translation process to estimate the effects. The effect has been investigated experimentally and primary result will be presented.

1. 超音速移送実験⁽¹⁾

Fig.1 に逆バイアスシータピンチ移送装置 NUCTE-III/T の概略図を示す. 右側の逆バイアスシータピンチで生成された FRC は, Fig.1 に示されるような磁場勾配により左側の閉じ込め領域に移送される. 移送部の上流, 下流にはミラーコイルが設置されている. この領域は, ステンレス製の金属真空容器となっている. この金属容器を FRC が通過するとき, 移送する FRC プラズマは, 閉じ込め磁場を排除するため金属容器を閉じ込め磁場の磁束が通過する. このとき金属容器内には誘導電場が発生し移送プラズマに相互作用を及ぼす. この相互作用の効果を定量的に評価するのが本研究の目的である. Fig.2 には, 排除磁束法で推定した移送過程における FRC プラズマの半径分布の時間発展を示す. 逆バイアスシータピンチ法による高温高密度のプラズマ生成は, 10μ 秒で完了し自発的に移送が開始される. 20μ 秒には, プラズマは上流の金属チェンバーを抜け一気に加速される. 移送速度は, およそ 150km/s に達し, 下流ミラー領域の金属チェンバー内に入射する. 下流部での反射は, 45μ 秒で終了し, 上流部へおよそ 80km/s で移送される. これらの半径の時間発展を見ると, 上流の金属チェンバー入射時および下流の金属チェンバー入射時に誘導起電力による相互作用が働いていると考えられる.

2. 金属チェンバーのしみ込み時間の推定

Fig.1 に示したように下流ミラー部の金属チェンバーの側面に沿って磁気探針アレイが管壁から 1cm から 9cm のところに設置されている. この磁気探針で観測される磁束密度と閉じ込めコイルに流れる電流の最大値になる時刻の差から各測定位置でのしみ込み時間を測定した. 磁気探針アレイの応答時間は, 磁場の立ち上がり時間および金属チェンバーのしみ込み時間より十分に速い.

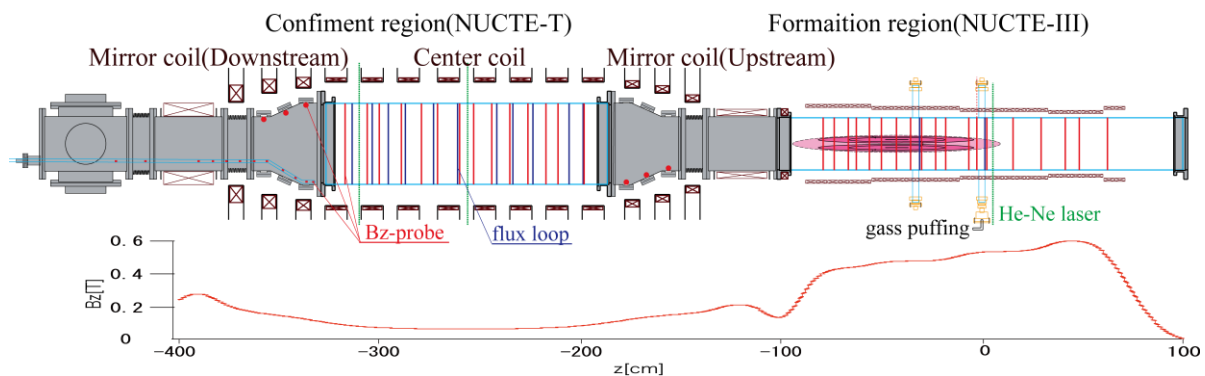


Fig.1 Outline drawing of NUCTE-III/T for Super-sonic translation experiments

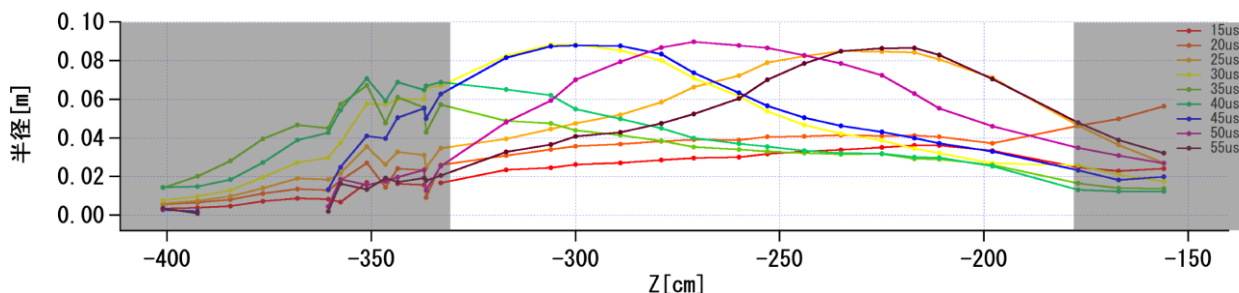


Fig.2 Time evolution of separatrix radius profiles of super-sonic translation

Fig.3 は、測定位置を横軸、縦軸をしみ込み時間にした図である。各位置でのしみ込み時間は、測定ポートなど設置されている部分では長く、ない部分では逆に短くなっている。この値は、 $d = r_w$ (d : 金属容器の厚み, r_w : 半径) で無限に長い薄肉円筒の場合のしみ込み時間 $\tau = r_w d \sigma \mu_0 / 2$ で見積られる値 (0.65ms : $r_w=0.15m$, 0.87ms : $r_w=0.20m$) の依存性と同じ傾向を示している⁽²⁾。フランジなどによる実効的な厚み d を考慮すると近い値になっていると思われる。これらの実験結果と詳細な比較をするために閉じ込め磁場コイルの作る磁場が金属チェンバー内を拡散していく拡散方程式 (1) の解と比較する予定である。

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{1}$$

ここで、 μ_0 は透磁率、 σ は導電率である。閉じ込めコイルでの境界条件を入れやすいように磁束関数 $\Psi = r A_\theta$ の関係式で (1) 式を書き直すと、

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{\partial \psi}{r \partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \mu_0 \sigma \frac{\partial \psi}{\partial t} \tag{2}$$

が得られる。閉じ込めコイルは一巻きコイルの重ね合わせで表現し、一巻きコイルの位置を (a_j, z_j) とすると、磁束関数は、

$$\Psi_j = \frac{\mu_0 I(t) a_j r^2}{2\pi} \left[\left(\frac{2}{k_j} - k_j \right) K(k_j) - \frac{2}{k_j} E(k_j) \right] \tag{3}$$

(3)式で表される。

ここで $k_j^2 = 4r a_j / (z - z_j)^2 + (r + a_j)^2$ である。

(2)式を上記の境界条件として各時間与える ADI 法 (Alternating Direct Implicit)⁽³⁾ で解き、磁場分布、誘導電流などを求め実験結果と比較する。

参考文献

- (1) T.Asai, et al., Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, Vol. 8, p 0174-0178
- (2) H. Knoepfel, "Pulsed High Magnetic Field" North-Holland Pub. p46
- (3) 部孝, 井門俊治. FORTRAN & C 言語によるシミュレーション技法入門, 日刊工業新聞社,1988.

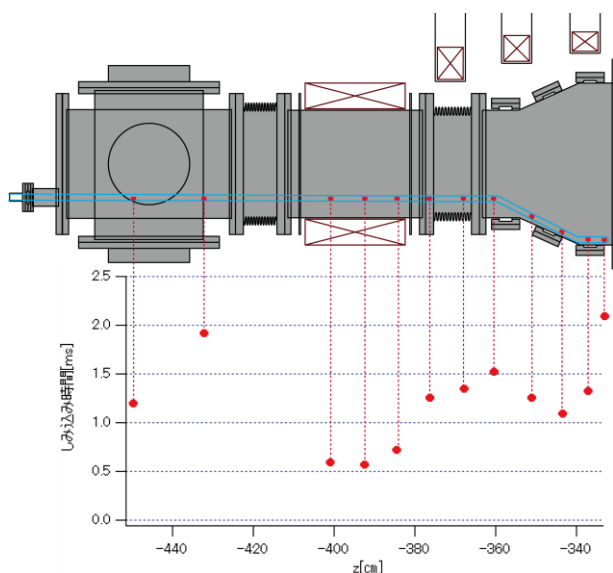


Fig.3 Profiles of skin time of down stream metal chamber