

小特集 極限的高ベータプラズマ閉じ込め：FRC 研究の新展開

4. FRC 技術, 理論の波及

4.1 小型核融合への挑戦：パルス高密度 FRC 実験

郷田 博司, INTRATOR Thomas P.¹⁾, SLOUGH John T.²⁾

University of California, Irvine, ¹⁾Los Alamos National Laboratory, ²⁾University of Washington

(原稿受付：2008年5月24日)

FRC プラズマが持つ高ベータ特性や移送による運動エネルギー等の利用により、従来の磁気閉じ込め核融合と慣性核融合の中間領域に位置する新しい核融合方式の検討がなされ実験が進められている。本稿では、FRC プラズマをライナー圧縮する Magnetized Target Fusion (MTF) 方式や、移送しながら磁気圧縮する Pulsed High Density (PHD) 方式など FRC をベースとした新しい核融合方式の物理背景を紹介する。

Keywords:

field-reversed configuration, translation, magnetized target fusion, liner implosion, pulsed high density, magneto-kinetic compression

4.1.1 ライナー圧縮方式 (Magnetized Target Fusion)

磁気プラズマを金属ライナーで圧縮して核融合状態をめざす Magnetized Target Fusion (MTF) の研究[1] は、米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) と同国空軍研究所 (AFRL) との共同研究の下に進められている。LANL では、Field-Reversed-Experiment-Liner (FRX-L) 装置による高密度 FRC プラズマを用いた MTF の科学的可能性を実証することを目指し、現在は FRC プラズマの生成・移送実験を行っている[2]。また AFRL では、シヴァスター施設において FRC の金属ライナー圧縮実験に向けた準備を進めている[3]。

MTF における典型的なプラズマ密度は、磁気閉じ込めおよび慣性核融合の中間領域に位置し $n \sim 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 程度である。また、MTF は他の磁気閉じ込め方式に比べ装置規模が小さく、慣性核融合の運転よりも安価でライナー圧縮できるため[4]、核融合が低コストで実現できる可能性を秘めている。MTF の概略図を図 1 に示す。MTF のターゲットとして様々なプラズマを適用することができるが[1, 4]、FRC の物理機構が比較的良好に議論されていることに加え[5]、移送が容易であるなどの特長から FRC プラズマがターゲットとして選ばれた。また MTF のターゲットに必要な FRC プラズマパラメータが、これまでの FRC 実験データベースの延長線上にくることも理由である。さらに FRC の生成・平衡・安定性・閉じ込め等の経験から、FRX-L 装置で生成される FRC プラズマは安定かつライナー圧縮のための十分な閉じ込め時間を有すると考えられる。また FRC は閉じた磁力線構造で形成され回転軸に沿って容易に移送できることから、MTF の生成領域とライナー圧

縮領域を分けて構成することも可能となる。

ゼロ次元モデルによると[1]、ライナー圧縮に適したターゲット FRC プラズマの密度・温度・エネルギー閉じ込め時間はそれぞれ $n \sim 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 、 $T \sim 0.3 \text{ keV}$ 、 $\tau_E \sim 20 \mu\text{s}$ とされる。FRX-L 装置において径方向圧縮比 ~ 10 程度のライナー圧縮が実現すれば、 $n\tau_E > 10^{19} \text{ m}^{-3}\text{s}$ さらには $T \sim 5 \text{ keV}$ にも達するプラズマ状態が得られるであろう。また過去の FRC 実験による知見から[5]、5 T 程度の外部磁場を印加すれば適正な FRC を生成できることがわかる。

これまで、外部磁場 $\sim 3 \text{ T}$ で FRC プラズマを再現性よく生成することに成功しており[2]。プラズマ密度および温度は前述の目標値の半分程度まで達成されている。現在の LANL における研究の狙いは、プラズマ診断による更なる FRC の物理機構の理解と、金属ライナー領域への効率的な FRC 移送を実証することである。一方、AFRL にも類似した FRC 実験装置が建設され、初期ライナー圧縮実験が近い将来計画されている。また、真空状態でのライナー圧縮実

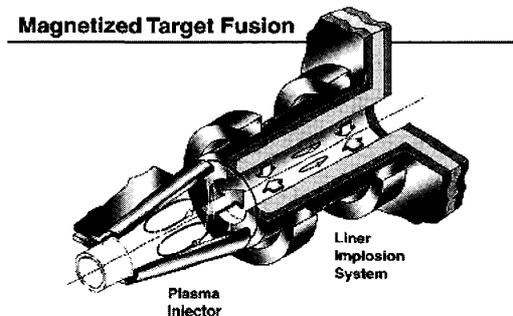


図 1 MTF 実験概念図 (左：FRC 生成領域, 右：ライナー圧縮領域)。

4. Spin-off of FRC Technology and Theory 4.1 Small Scale Fusion: The Pulsed and Compressed High-Density FRC Experiment

GOTA Hiroshi, INTRATOR Thomas P. and SLOUGH John T.

corresponding author's e-mail: hgota@uci.edu

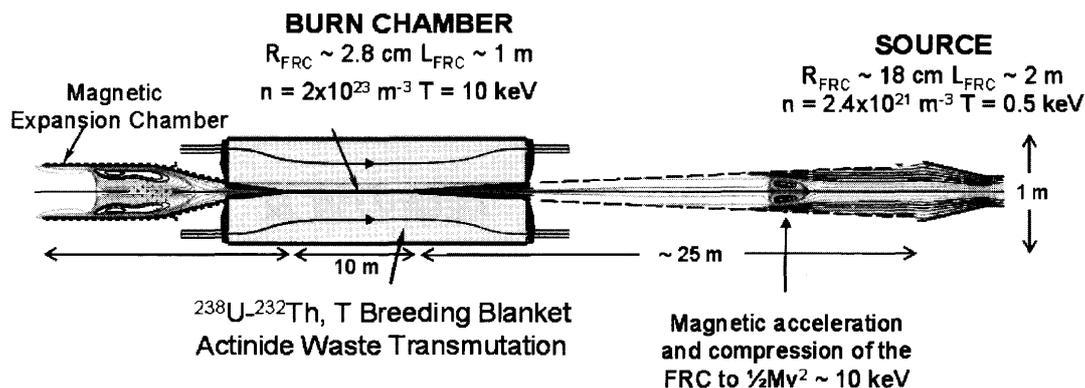


図2 PHD 実験概念図：① FRC の生成，②移送・加速（外部磁場 ~ 0.5 T），③テーパ型磁束保存容器による減速，高磁場燃焼領域（ ~ 5 – 20 T）による自己圧縮・加熱，④数 m に及び燃焼後，FRC は膨張し熱及び磁気エネルギーが電気エネルギーへと変換され蓄えられる。

験はすでに行われ，要求される形状および径方向圧縮比が得られている[3]。

4.1.2 磁気圧縮方式（Pulsed High Density FRC Experiment）

米国ワシントン大学の Plasma Dynamics Laboratory では，FRC プラズマ（プラズモイド）の磁氣的・運動的圧縮による小型核融合の実現に向けて Pulsed High Density (PHD) FRC 実験が行われている[6]。このパルス式 FRC 生成および高密度燃焼による中性子源は，他の核融合方式よりも優れた特長をいくつか持っている。FRC は閉じた磁場構造であり， z ピンチや θ ピンチのような高密度プラズマ生成方法よりも長い配位持続時間を有する。トカマクに代表されるトロイダル磁場系の装置に比べると，FRC の移送簡易性や高いベータ値は特筆すべき利点である。

図2に PHD 実験のコンセプトを示す。核融合状態に必要なエネルギー（温度）は，外部加熱ではなく，FRC が加速・圧縮過程を経ることによって達成される。FRC を高密度状態にするという観点では，必要とされる捕捉磁束量はすでに得られており，磁場強度についても低密度準定常状態に必要な強度よりも低い。ここで最も重要なことは，FRC が傾斜モード等の MHD 的不安定性を生じずに生成領域から燃焼領域まで移送されることである。

PHD の初期の実験的研究は，磁気圧縮により核融合状態に達するために必要な配位持続時間・温度・磁束を有する FRC の生成に焦点が置かれた。初期実験の結果，ターゲットとした FRC のプラズマパラメータに到達し，平衡温度 $T \sim 300$ eV，捕捉磁束 $\phi \sim 15$ mWb 程度が観測された。また FRC の生成および移送を行うため，個々の外部コイルを独

自に運転させる動的生成方法が用いられ，その結果高磁束かつ高速プラズモイドの生成に成功した。現在は，詳細なプラズマ診断のためにドリフトチャンパーを取り付け，次の実験段階に向けて準備を進めている。この段階での主な取り組みは，生成された FRC プラズモイドを外部磁場により 10^6 m/sec 程度まで加速することである。テーパ形状の磁束保存容器を経る過程で FRC は自己圧縮され，小口径の燃焼領域に到達する。この一連の過程により加熱・圧縮された FRC は核融合状態 ($T \sim 5$ keV, $n \sim 10^{23}$ m $^{-3}$) に達すると考えられている。

ここで紹介したような小型核融合の大きな利点は，開発のために莫大な資金や時間を必要としないことにある。このコンセプトに携わる各要素技術は既に開発されているものであり，迅速なテストとその結果を受けた発展的な実験の展開が可能である。このプロジェクトでは，原理実証を行った実験装置を用いて，燃焼実験を遂行することが計画されている。

参考文献

- [1] R.C. Kirkpatrick, I.R. Lindemuth and M.S. Ward, *Fusion Technol.* **27**, 201 (1995).
- [2] T.P. Intrator *et al.*, *Phys. Plasmas* **11**, 2580 (2004); S.Y. Zhang *et al.*, *Phys. Plasmas* **12**, 052513 (2005).
- [3] J.H. Degnan *et al.*, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **29**, 93 (2001).
- [4] R.E. Siemon, I.R. Lindemuth and K.F. Schoenberg, *Comments Plasma Phys. Control. Fusion* **18**, 363 (1999).
- [5] M. Tuszewski, *Nucl. Fusion* **28**, 2033 (1988).
- [6] J. Slough, S. Andreason, H. Gota, C. Pihl and G. Votroubek, *J. Fusion Energy* **26**, 199 (2007).