

## 円錐・円柱ハイブリッドシータピンチコイルを用いた 高温・高密度コンパクトトロイド生成法の開発

### Formation of Compact Toroid by Negative Biased Theta Pinch Method Using Conical-Cylindrical Hybrid Theta Pinch Coil

高橋 努<sup>1</sup>Tsutomu Takahashi<sup>1</sup>

Abstract: New compact toroid formation method, which is based on a negative biased theta pinch method, is proposed using conical and cylindrical theta pinch coils. A field-reversed configuration like and a spheromak like compact toroid are formed in the cylindrical and the conical coils, respectively. Each compact toroid is merged in the hybrid coil and the improved one is formed. The process is controllable by a pair of one-turn coils, which is installed in the coil. The coils are wound in the opposite direction, each either. The formation process in the two theta-pinch coils is compared. By the differences of the lift off time, the reconnection time and onset time of the axial contraction, different axial motions are triggered. The step to operate the additional coil will be considered. The power supply system for the new FRTP device and the optical diagnostic system have also been newly developing.

#### 1. はじめに

核融合エネルギーは、サステナブルな原子力エネルギーとして注目されている。特に、中性子を発生しない先進的核融合反応 ( $D-^3He$ , p-B 反応) の実現は、直接発電による熱変換を用いない高効率発電が可能になる。この核融合反応の実現には、磁場利用効率の高いコンパクトトロイド (CT) による高効率閉じ込めの実現が必要である。

近年、CT に属する磁場反転配位 (FRC) の超音速衝突合体生成法により閉じ込め特性を一桁向上した数ミリ秒の寿命を持つ FRC が生成可能になった<sup>[1]</sup>。日本大学では、磁化同軸ガンで生成される CT に属するスフェロマック (SP) を FRC の両端から入射させる方法で自発的に発生する回転を制御し、閉じ込め特性の改善や回転不安定性を制御する手法を開発した<sup>[2]</sup>。これらの 2 つ手法を組み合わせ、CT 同士 (FRC-FRC, SP-FRC, SP-SP) の様々な超音速衝突合体実験を行なえる装置開発を理工学部応用科学研究の支援を受けて開始した。CT プラズマは、ポロイダルトロイダル間の磁束変換現象や運動エネルギーと磁気エネルギーの変換などの自己組織化現象が現れるプラズマ<sup>[3]</sup>で、これらの現象を利用した閉じ込め特性改善方法の開発を試みる。

本研究は、3 つに分けて進められている。①同一の

FRTP 装置で 2 種類の CT 法を生成する方法の開発。② FRTP 用の衝撃電圧発生装置を開発、③二つのプラズマの衝突・合体過程の構造を観測する測定装置の開発である。以下に簡単に開発状況を簡単にまとめる。

#### 2. CT 生成法

CT は、ポロイダル磁場 ( $B_p$ ) とトロイダル磁場 ( $B_t$ ) の量によって表 1 に示すように FRC ( $B_p \gg B_t$ ) と SP ( $B_t \sim B_p > 0$ ) の 2 つの型がある。表からもわかるように、これらの CT は、磁場構造だけでなく、流れの構造も異なっている。CT 入射や CT 衝突実験においては、入射前・衝突前のプラズマが持っている磁気・流れの構造が入射・衝突後のプラズマの安定性や閉じ込め特性に大きな効果を与える。本研究では、この二つの CT を逆バイアステータピンチ法 (FRTP) を用いて生成する。この生成法を用いるのは、高温・高密度のプラズマを容易に生成でき、バイアス磁場回路の運転条件を工夫することでプラズマ密度を  $10^{20}$ - $10^{22}$   $m^{-3}$ 、プラズマ温度を 1 keV から 50 eV の範囲の CT プラズマを生成できる<sup>[4]</sup>。

同一装置内で二種類の CT を生成するには、 $\theta$  ピンチコイルの形状を変えて行う。円錐型の  $\theta$  ピンチコイル (図 1 の右側) では、SP 型の CT が生成される。円錐の角度に依存し、ポロイダル磁気面に沿ってトロイダル電流密度 ( $J_t$ ) の分布が異なるため、ホール効果によってトロイダル磁場 ( $B_t$ ) が生じ、その後緩和現象によってトロイダル磁束に成長し  $B_p \sim B_t$  となる<sup>[5]</sup>。一方、円柱型コイルの場合 (図 1 左側)、ポロイダル磁気面に沿う  $J_t$  は、一様に分布するためその対称性により

Table1 Character of Compact Toroid

	FRC 型	SP 型
Magnetic Structure	$B_p \gg B_t \sim 0$	$B_p \sim B_t$
Flow Structure	$V_t \gg V_p \sim 0$	$V_p \sim V_t$

1 : 日大理工・教員・物理、CST., Nihon-U.

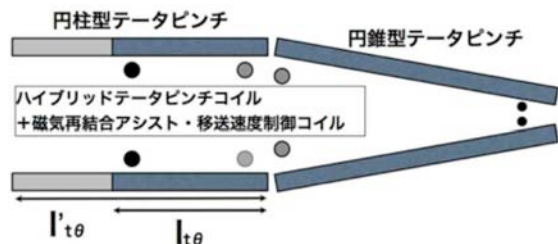


Figure 1 Conceptual Diagram of new Formation Scheme for Compact Toroid

ホール効果による  $B_t$  の正味の発生は少なくなり、 $B_p \gg B_t$  の FRC 型の CT となる<sup>[6]</sup>

CT の新しい生成法では、図 1 に示すような円錐コイル、円柱コイルから構成されるハイブリッドコイルを用いる。円柱コイル部では、FRC 型の種となる CT を、円錐コイルでは SP 型の種 CT を生成する。その後これらを合体（衝突）させ CT を生成させる。ハイブリッドコイル内には、2 対の制御コイルが設置される、このコイルは、テーatapinchコイルの作る磁束をキャンセルし、一方では磁束密度を強め他方では弱める方向に電流を流すため、互いに逆巻の一巻きコイルで構成される。これらの電流の値、および方向を制御することにより磁気再結合の制御、軸方向運動（移送速度）の制御を行うことができる<sup>[7],[8]</sup>。この制御コイルを用いて種 CT の生成および種 CT の合体をアシストする。

この生成法を確立するために、円錐コイルおよび円柱コイルで生成される CT の生成過程の比較実験を行っている。円錐型コイルは、 $z=0.605$  m から  $z=0.33$  m までコイル半径  $r_w=15$  cm、 $z=0.33$  m から  $z=-0.055$  m まで  $r_w=16$  cm、 $z=-0.055$  m から  $z=-0.55$  m まで  $r_w=17$  cm、 $z=-0.55$  m から  $z=-0.99$  m まで  $r_w=18$  cm のセグメントコイルで構成され、実効的な円錐の頂角  $\alpha=1.1^\circ$  となっている。一方、比較する円柱コイルの形状は、 $z=-0.5$  m から  $z=0.5$  m までコイル半径  $r_w=17$  cm、 $z=-0.5$  m から  $z=-0.75$  m、および  $z=0.5$  m から  $0.75$  m まで、 $r_w=0.15$  m でミラー磁場（ミラー比 1.2）形状になっている。

Figure 2 に円錐コイルでの CT 生成過程の排除磁束半径の時間変化 ( $t=0$  から  $t=10 \mu\text{s}$ ) を示す。排除磁束半径の時間推移から磁場の反転は、コイル半径 15 cm（磁束密度の強度の大きい）の領域から起こり、排除磁束半径（プラズマ半径）は、コイル半径の分布と平行（円錐状）にピンチしていく。コイル半径の 15 cm 領域では  $2 \mu\text{s}$ 、コイル半径 18 cm の領域では  $3 \mu\text{s}$  で磁気再結合が完了している。その後、円錐形状を保ちながら磁気圧の勾配により前方のプラズマを取り込みながら左側に速さ約 100 km/s で移動（移送）されていくことが

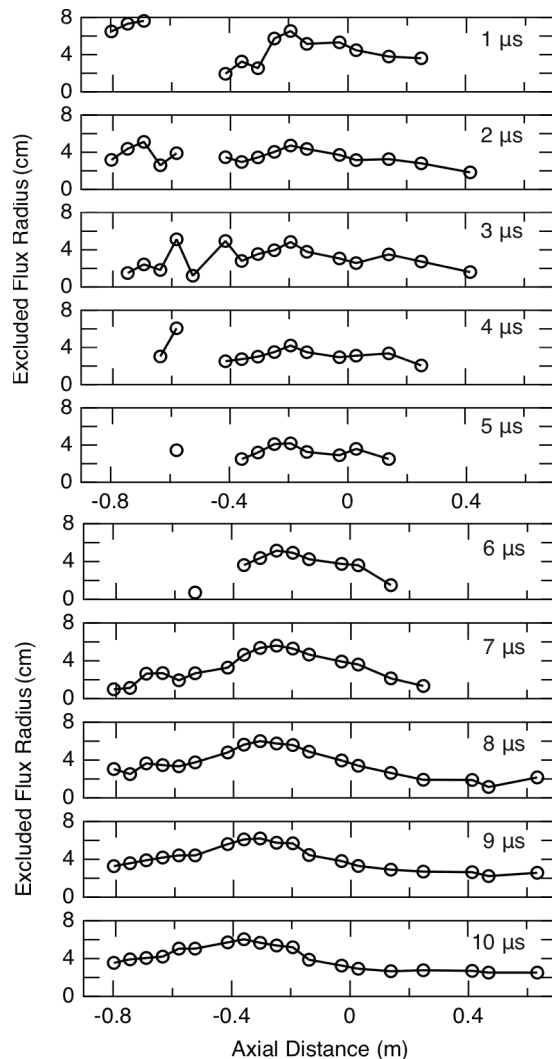


Figure 2 Time Evolution of Excluded Radius on Compact toroid with Conical Theta Pinch (corn angle of 1.1 degree)

分かる。一方、円柱コイルの場合の排除磁束半径の時間変化 ( $3 \mu\text{s}$ ,  $7 \mu\text{s}$ ,  $10 \mu\text{s}$ ) を Fig. 3 に示す。一様なピンチが起りミラーコイル付近で磁気再結合が起り、 $3 \mu\text{s}$  では半径 4 cm、長さ 120 cm の円柱状の CT が生成されている。7  $\mu\text{s}$  では軸方向の収縮がおこりプラズマ中心に向かって収縮し、10  $\mu\text{s}$  では半径 5.5 cm、長さ 80 cm の円柱状 CT が生成されている。このように、円錐型と円柱型テーatapinchコイルによる CT の生成過程の時間発展（リフトオフ時間、磁気再結合時間、軸方向運動の発生時間）が異なることが分かる。これらを時間発展、軸方向運動の違いを考慮して、設置する制御コイルの同期（電流の強度、方向）をとる必要がある<sup>[7],[8]</sup>。現在、これらの実験結果を考慮し、ハイブリッドコイルの設計を行っている。

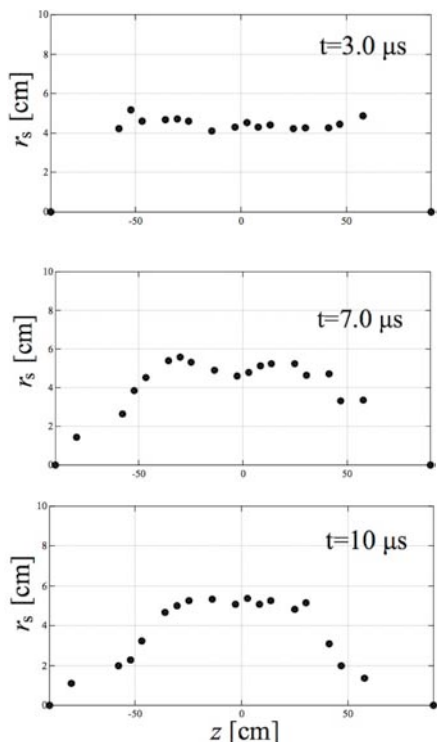


Figure 3 Time Evolution of Excluded Radius on Compact Toroid with Cylindrical Theta Pinch

### 3. FRTP 用電源の開発

これまでの円錐型シータピンチによる CT 生成では、バイアス磁場、予備電離磁場、主圧縮磁場を一つの LCR 回路（スタートスイッチ、クローバスイッチ付き）で行っている<sup>[5]</sup>。ここでは、将来の衝突合体実験を見据え NUCTE 装置の電源とほぼ同出力（バイアス磁場回路 5kV-25kJ, 予備電離回路 25kV-3.5kJ, 主圧縮磁場回路 32 kV-34.6 kJ)の FRTP 電源を製作することにした。主圧縮磁場回路 1 モジュール (35 kV-1.5 kV) のテスト、バイアス回路 (5 kV-25 kJ) の製作を試みた。Figure 3 にテストを行った主圧縮磁場回路 1 モジュールの放電波形を示す。赤実線はクローバ回路動作させない場合で、減衰振動波形となっている。黒実線はクローバスイッチを動作させた場合で、LR 減衰波形となっている。負荷は、磁化同軸ガンを用いた。回路は、高速放電コンデンサーバンク(2.5 μF-30 kV)、スタートスイッチ、クローバスイッチ、負荷への伝送用同軸ケーブル(8 m, 8 本並列接続)からなる。スタートスイッチ、クローバスイッチへのトリガー信号は、0.025 μF-60 kV のコンデンサーバンクから供給される。充電電圧 25kV で立ち上がり時間 3 μs でピーク電流値 80kA の振動しない電流が得られた。このように、1 モジュールのテストに成功したが、最大充電 35kV (トリガー電圧 60 kV) では、一部絶縁破壊が生じている箇所がある。これら

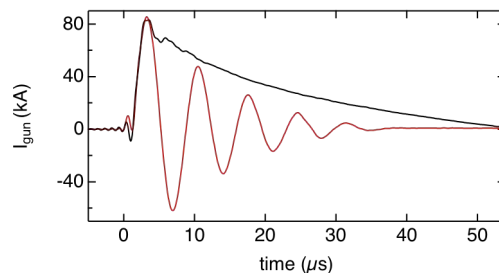


Figure 4 Typical Wave Form of a Module Circuit for Compression Magnetic Field. Black and Red Lines are with and without Crowbar Circuit, respectively.

の防止策などを考え、8 モジュール、16 モジュール、24 モジュールへの運転を行っていく予定である。これに合わせて、5 モジュールとスタートスイッチから構成される予備電離回路 (12.5 μF-3.9 kJ) の製作も進めている。

### 4. 同一位置多波長放射光測定装置の開発

新しい CT 生成法における種 CT の合体（衝突）過程の物理メカニズムを明らかにするためには、動作ガス（水素、重水素、ヘリウム(I, II)) の線スペクトルや制動放射光( $\propto n_e^2 \sqrt{Te}$  : 電子密度( $n_e$ ), 電子温度( $Te$ ))の同一断面での分布の時間発展の計測を行うことは重要である。我々のグループでは、制動放射光や線スペクトルの空間分布の時間発展を計測して FRC 型の CT の内部時機構を推定するプラズマ計測法を開発した<sup>[9]</sup>。この手法を改造して同一断面での複数波長(制動放射光, 重水素線スペクトル ( $D_{\alpha}$ ,  $D_{\beta}$ ,  $D_{\gamma}$ ) 同時計測するシステムの開発を進めている。Figure 5 にその概略図を示す。プラズマ放射光は、コリメータ(焦点距離  $f=100\text{mm}$ ,  $\phi 8.5\text{mm}$  の平凸レンズ)で集光されて開口角 15 度、 $\phi 1\text{mm}$  のバンドル可視光ファイバー(50 μm, 住田光学 SOG-15)に入射する。出射側は 3 本に分割され、バンドパスフィルター(分解能 10nm, シグマ光機)で分光された後に光電子増倍管(浜松ホトニクス: R374, H9530)

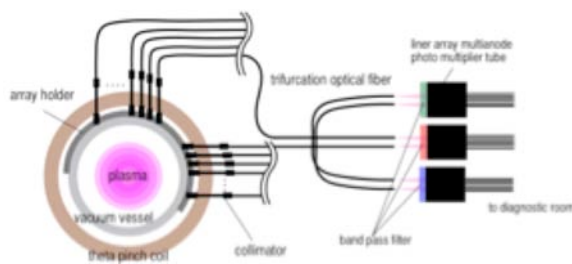


Figure 5 Schematic view of the developed 3-channel optical diagnostic system.

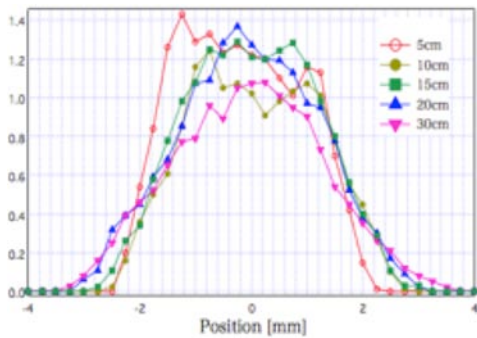


Figure 6 Spatial resolution of collimator with  $f=100\text{mm}$ . Each of line indicates the profile of light intensity incident from the each position (5,10,15,20,30 cm).

で電気信号に変換される。Figure 6 にシステムの分解能調べた結果を示す。コリメータからの距離に対する光ファイバーに入射される光の強度分布を示す。光ファイバーには、コリメータが見る線積分値の光量が入射していることが分かる。また、分岐した各ファイバーにはほぼ3分割された光量が各ファイバーに入射されていることを確認した。これらの計測装置を8チャンネル製作し、システム較正し実際のプラズマ放射光の観測を行っている。放電ノイズや磁場による誘導電圧の対策を行っている。

## 6. まとめ

昨年度から現在に至るまでの研究経過についてまとめる。円錐型と円柱型シートピンチによる CT 生成過程の違いが分かった。リフトオフ時間（プラズマが放電管から離れる時間）の違いにより磁気再結合時間、軸方向圧縮スタート時間に差があり、ここで提案するハイブリッドコイル内では、種 CT の径方向運動・軸方向運動が複雑になることが予想される。現在、これら運動を能動的に制御するために、コイル内に設置される制御コイルの電流波形の検討を行い、運転シナリオを考えている。これらの結果をもとにハイブリッドコイルを用いた実験を開始する予定である。また、Table1 に示す CT の内部構造の違いなどについても実験的に調べていく予定である。

FRTP 電源は、予備電離回路の設計が終わり、組み立て作業の段階にはいっている。また、主圧縮磁場回路の絶縁耐力の増強を行った後、テスト結果をもとに、8モジュールの運転、16モジュール運転、24モジュール運転へと電源エネルギーを増やしていく予定である。

3波長プラズマ放射光計測システムは、現在、プラズマ計測における放電ノイズの対策、閉じ込め磁場に

よる誘導電場の対策などを行っている。合わせて実験データの解析法（アーベル変換、トモグラフィ（級数展開法、代数的再構成法））を考慮にいれ、開発中のコリメータの配置などの検討を行っていく予定である。

## 7. 謝辞

本研究を進めるにあたって、理工学部応用科学研究助成の支援に対して感謝致します。また、実験装置の製作、実験の遂行、実験結果の議論にあたり、物理学科・専攻の核融合科学研究室およびプラズマ物理学研究室所属の教員、大学院生、学部4年生の支援に対して感謝致します。

## 8. 参考文献

- [1] H. Y. Guo, and TAE Team, et al., "Formation of a long-lived hot field reversed configuration by dynamically merging two colliding high- $\beta$  compact toroids", *Phys. Plasmas* **18**, 056110 (2011)
- [2] H. Itagaki, T. Asai, M. Inomoto and Ts. Takahashi, "Mitigation of rotational instability of high-beta field-reversed configuration by double-sided magnetized plasmoid injection", *Phys. Plasmas* **21**, 030703 (2014)
- [3] L. C. Steinhauer, "Review of field-reversed configurations", *Phys. Plasmas* **18**, 070501 (2011)
- [4] Y. Ohkuma, M. Urano, M. Nakamura, Y. Narushima, T. Takahashi, Y. Nogi, "Production of Low Density Field Reversed Configuration Plasma", *Nuclear Fusion* **38**, p1501 (1998)
- [5] K. Wira and Z. A. Pietrzyk, "Toroidal field generation and magnetic field relaxation in a conical theta pinch generated configuration", *Phys. Fluids B* **2**, p 561 (1990)
- [6] T. Takahashi, H. Gota and Y. Nogi, "Control of elongation for field-reversed configuration plasmas using axial field index of a mirror confinement field", *Phys. Plasmas* **11**, p4462 (2004)
- [7] T. Fujino, H. Gota, Y. Hasegawa, Y. Kanamaru, K. Fujimoto, T. Asai, T. Takahashi and Y. Nogi, "Control of translating velocity using pulse field on field-reversed configuration plasmas", *Phys. Plasmas* **13**, 012511 (2006)
- [8] K. Fujimoto, A. Hoshikawa, S. Ohmura, T. Takahashi, et al., "Control of a global motion on field-reversed configuration", *Phys. Plasmas* **9**, 171 (2002)
- [9] T. Takahashi, et al., "Multichannel optical diagnostic system for field-reversed configuration plasmas", *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 5205 (2004)