

超音速プラズモイド合体による磁場反転配位プラズマの生成条件の検証

日本大学理工学部 物理学科

小林大地

1. 研究背景

磁場により高温のプラズマを長時間閉じ込め、そのプラズマ中で生じた核融合反応により出力されるエネルギーを発電に利用する、磁場閉じ込め方式の核融合発電の研究が世界中で行われている。磁場閉じ込めプラズマのうち磁場反転配位 (FRC) は、ポロイダル磁場のみを持つ磁化プラズモイド (磁場構造を持つ孤立したプラズマ塊) である。閉じ込め磁場の利用効率の指標であるベータ値 (プラズマ熱圧力と磁気圧の比) は、現在磁場閉じ込め方式の中で主流となっているトカマク方式で 10%程度であるのに対し、FRC は 80-100%程度と極限的に高い[1,2]、そのため、他の磁場閉じ込め方式に比べて弱い磁場でより高温なプラズマを閉じ込めることが可能であり、中性子を全く出さない先進核融合燃料 ($p\text{-}^{11}\text{B}$ 反応など) の利用が期待されている。さらに、米国・TAE Technologies 社 (TAE 社) が中性粒子ビーム入射と径方向電場制御を組み合わせることで高性能 FRC を安定化させ、30 ms を超える準定常維持に成功した[3]ことから、高効率核融合炉心の候補としての注目が集まっている。磁場閉じ込めプラズマの特性の理解には、プラズマと磁場が共に運動する流体 (磁気流体) として近似する、磁気流体力学 (MHD) が広く用いられる。MHD 近似に基づいた安定性解析では、FRC は非常に不安定ですぐに配位崩壊に至るはずであるが、実際にはイオン音速 (プラズマ中のイオン密度の疎密が伝播する速度) やアルヴェン速度 (磁化プラズマ中で磁力線の変動が伝播する速度) といったプラズマの特性速度を大きく上回る速度の移送などダイナミックな運動にも耐えるロバストな安定性を持つ[4]。また、高ベータ特性から FRC 内の個々の荷電粒子の運動は無視できず、MHD 近似の適用可能範囲外である可能性が高い。日本大学や TAE 社

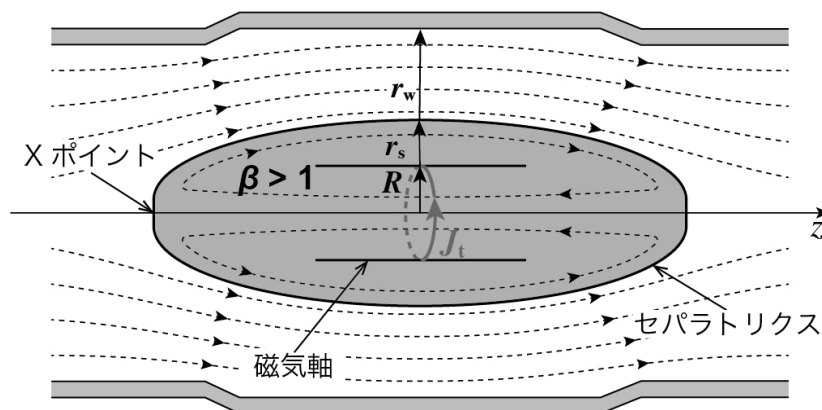


図 1 FRC の概略図

では、超音速・超アルヴェン速度（200–600 km/s）で、2つの FRC 様の磁場構造を持つ磁化プラズモイドを衝突・合体させることで、より高性能な FRC を生成する手法（超音速 FRC 合体）を採用している[5]。この手法による FRC の生成過程では、衝突時に一度 FRC の特徴的な磁場構造が破壊されるにもかかわらず、その後、人為的な制御なしに自己組織化的に FRC が再形成されることが観測されているが、やはりそのメカニズムも MHD 近似だけでは説明がつかない[6]。したがって、FRC の特性や生成メカニズムは MHD 近似の枠組みには収まらず、その理解のためには実験による詳細な観測や荷電粒子の運動論的効果などを含めた理論構築が重要である。

2. 目的および実験方法

他の FRC の生成法には、スフェロマック（Spk）と呼ばれる、トロイダル磁場とポロイダル磁場の両方を持つ磁化プラズモイドを合体させる「Spk 合体法」[7,8]や、磁化プラズモイドの合体を伴わない生成法としては「逆磁場シータピンチ（FRTP）法」[1,2]がある。

図 1 に磁化プラズモイド合体を伴う FRC 生成法の比較を示す。従来の Spk 合体では、磁場構造を乱さないように準静的（相対速度で 10–30 km/s 程度）に Spk 同士を合体させて FRC を生成する。条件によっては FRC ではなく Spk を形成することもでき、同極性の磁気ヘリシティ（磁場のねじれを表す指標で、ここではトロイダル磁場の向きで極性を変化させる）を持つ Spk 同士の合体の場合は Spk が生成され、異極性の場合はトロイダル磁場が打ち消されてポロイダル磁場のみの FRC が生成される（図 1）。Spk 合体は、磁化プラズモイドを合体させるという点で超音速 FRC 合体と類似しているが、閉じ込め磁場の繋ぎ変わり（磁気リコネクション）を利用して FRC 様の磁場構造を形成するため、衝突前の磁化プラズモイドの磁場構造に強く依存する生成法であり、衝突時に磁場構造が破壊される超音速 FRC 合体とは生成メカニズムが異なる可能性が高い。また、Spk と鎖交する中心構造物がない自由空間では、Spk が装置軸に対して傾くティルト運動や装置軸からシフトする運動により対称に衝突せず、FRC の生成が困難であるのに対

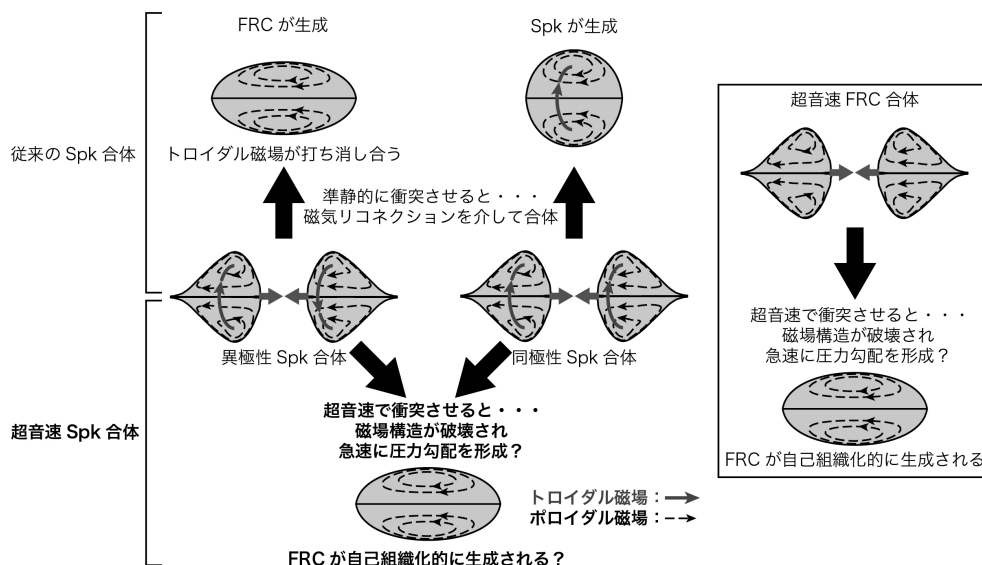


図 2 磁化プラズモイド合体による FRC 生成法

し、超音速 FRC 合体では自由空間においても再現性よく FRC 生成が可能である。アルヴェン速度は MHD 近似における不安定性の成長速度の指標にもなるため、磁化プラズモイド合体による FRC 生成では、不安定性の成長よりも早く磁化プラズモイド同士を衝突させることが重要であると考えられる（仮説 1）。

一方 FRTP 法は、ソレノイド状コイル内において軸方向のバイアス磁場に凍りついたプラズマ柱に対して、バイアス磁場と逆方向の磁場を急速に印加してプラズマ柱を圧縮、トロイダル電流を誘導することで FRC を生成するものである。この手法では、磁場の拡散時間よりも十分に速くプラズマの圧力勾配を形成することが、FRC 生成の条件の一つであるということが知られている[1,2]。仮にこの条件を超音速 FRC 合体に当てはめると、超音速で FRC 同士を衝突させることが、急速に圧力勾配を形成していることに相当すると考えられる。この仮説が正しければ、衝突前の磁化プラズモイドは FRC である必要はなく、たとえ衝突時に磁場構造が破壊されたとしても、超音速で圧力勾配を形成する（磁化プラズモイド同士を衝突させる）ことが重要であり、外部磁場などの境界条件と形成された圧力勾配によって FRC の生成可否が決まると考えられる（仮説 2）。

この 2 つの仮説を検証し、磁化プラズモイドの超音速合体による FRC の生成条件を調査することが本研究の目標である。具体的な方法としては、超音速 FRC 合体と同程度の速度領域（ $\sim 100\text{--}200\text{ km/s}$ ）かつ中心構造物のない自由空間で Spk を衝突・合体させること（超音速 Spk 合体）で FRC 生成を試み、その生成過程の詳細な観測から FRC の生成条件と不安定性の成長速度および磁化プラズモイドの相対速度の関係を調査する。なお、日本大学と TAE 社が共同で実施した過去の実験において、超音速 Spk 合体による FRC の生成はすでに成功している[9]。

3. 実験装置

本研究に用いた実験装置の概略図を図 3 に示す。この装置は、Spk 様の磁化プラズモイドを生成・射出する磁化同軸プラズマガン（MCPG）が 2 機と大容積の透明石英製チャンバー、チャンバーと同軸状に配置された外部磁場コイルで構成される。使用した MCPG は、表 1 に示すようなパラメータ領域の磁化プラズモイドの生成・射出に成功し

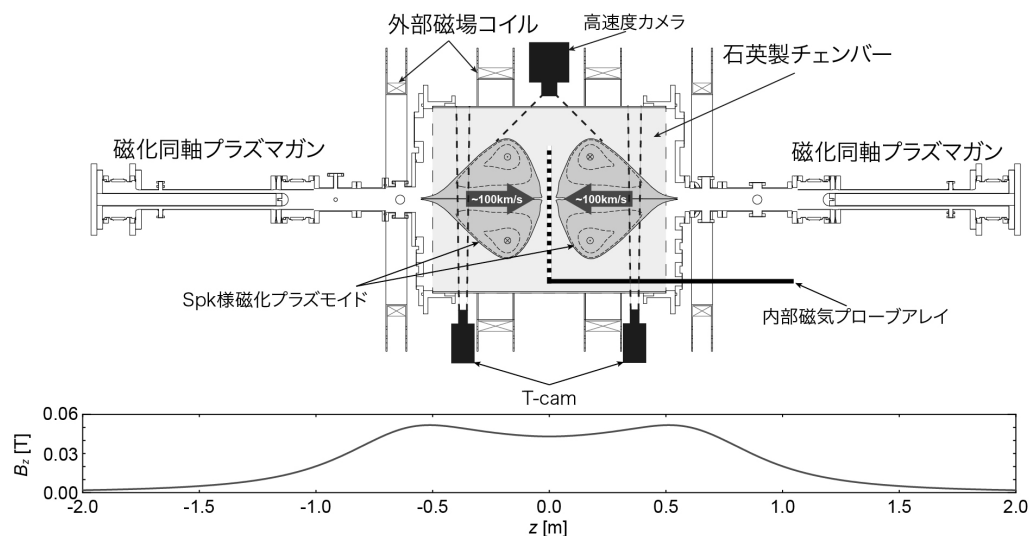


図 3 実験装置の概略図

ている。透明石英製チャンバーの領域では、紫外から可視光領域における光学観測が容易であることに加え、装置中央断面にはプラズマ内部の3方向の磁場ベクトルの径方向分布を観測できる内部磁気プローブアレイが挿入されている。外部磁場コイルはミラー様の軸方向磁場を形成し、磁化プラズモイドの径方向・軸方向の膨張や運動を制限する役割を担っている。

本研究において、衝突前の磁化プラズモイドの不安定性の成長速度を評価するためにトモグラフィ計測系 (T-cam) を新たに構築した。T-cam は透明石英製チャンバーの両端部にそれぞれ1機ずつ設置されている。図4に構築した T-cam の外観と構造を示す。T-cam は光学バンドパスフィルタ、可変スリット、マルチアノード光電子増倍管 (PMT) から構成されている。本研究では、プラズマ生成に用いる水素の線スペクトルの観測するため、中心波長 486 nm、バンド幅 10 nm のバンドパスフィルタを装着した。また超音速で移送される磁化プラズモイドの観測のために、ディテクタにはナノ秒程度で応答可

表 1 これまでに達成された磁化プラズモイドのパラメータ

密度 [$\times 10^{20} \text{ m}^{-3}$]	温度 [eV]	速度 [km/s]
0.1-10	10-70	20-100

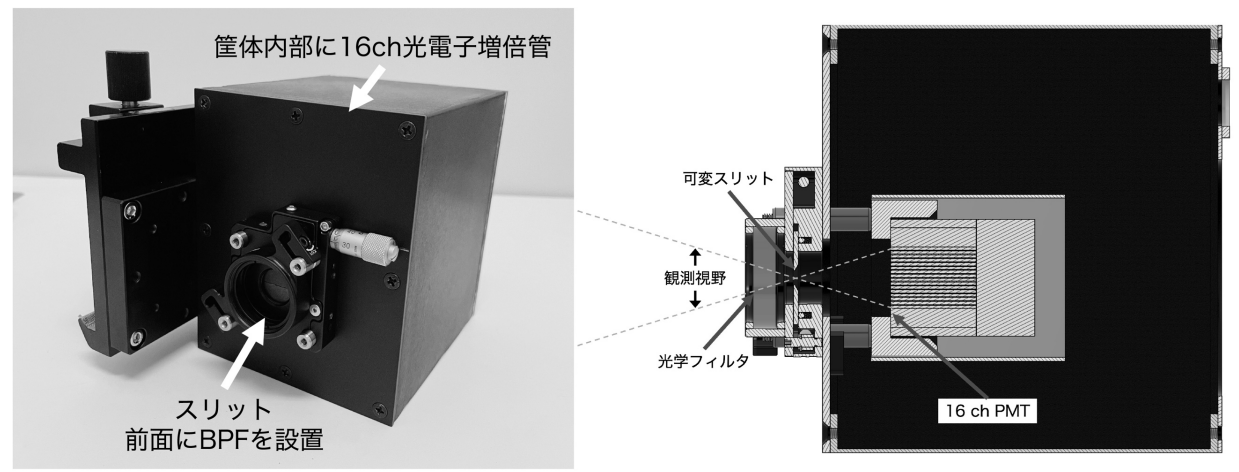


図 4 T-cam の外観と内部構造

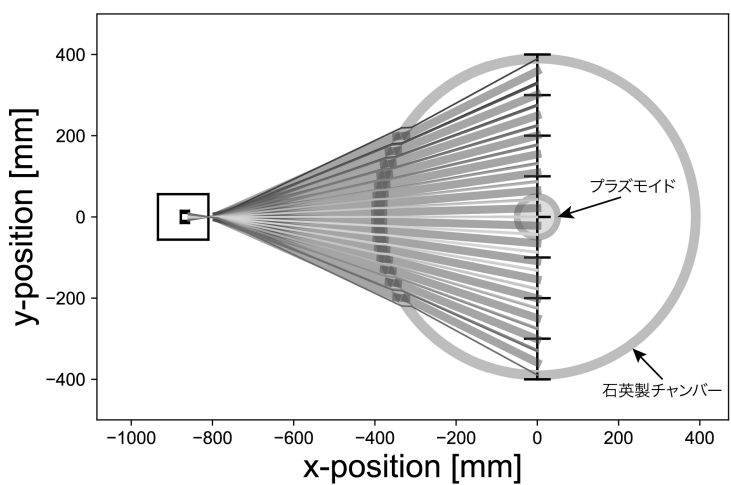


図 5 T-cam の観測視野のレイトレーシング結果。

能かつ 16 ch の光電面を備えた PMT (浜松ホトニクス, R5900U-07-L16) を採用した。事前に実施したレイトレーシングの結果 (図 5) を元に, ファンアレイ状に広がり, チャンバー全体を見込む観測視野を実現するように設計された。T-cam の設置位置やスリットと PMT の間隔を変更することで, 観測視野の調整が可能である。

T-cam により観測された発光分布をプラズマの断面構造の画像再構成や, 重心位置の推定をすることができる。これまでに, 同様の光学系による観測では秒速 100 km 以上で移送された FRC の断面構造や重心位置の時間変化の観測に成功している [10–12]。

4. 実験結果および考察

図 6 に秒速 50 km 程度で射出された Spk 様の磁化プラズモイドを T-cam により観測した結果を示す。横軸は PMT の各チャンネルに対応し, 図 5 に示した各観測視線が見込む径方向位置に相当する。この結果から発光分布は装置中心軸 (8–9 ch) を中心に概ね対称となっており, 時間を経過しても中心位置はほとんど変化しなかった。したがって, 磁化プラズモイドの移送過程では装置軸上からのシフトは見られなかった。これは, 十分なシフトが発生するよりも早く磁化プラズモイドが観測地点を通過したものと考えられる。また, 外部コイルによる軸方向磁場の印加により, 径方向への運動が制限された可能性もある。いずれにしても, 2 機の MCPG を用いた磁化プラズモイドの衝突時には, 少なくともシフトによる影響を受けない (非軸対称な衝突にはならない) 可能性が示された。ただし, 今回の T-cam の設置位置やスリット-PMT 間の距離では, 空間分解能に対してプラズマのサイズが小さかったため, より詳細な観測のためにはこれらを調整する必要がある。

一方で, 射出過程を高速度カメラで撮影したところ, 磁化プラズモイドが振れながら射出され, 螺旋状の構造が形成される様子が観測された。MCPG による磁化プラズモイドの射出過程では, プラズマ中を流れる放電電流が振れるキンク不安定性が成長することが知られており, この不安定性により形成された構造と考えられる。2 つの磁化プラズモイドを衝突させる場合, 非対称性を生む可能性が高いため, この不安定性の観測が今後の課題であることがわかった。同一断面かつ異なる角度に設置した複数の T-cam を用いて断面撮像を行い, 磁化プラズモイドの変形を評価することを目指す。

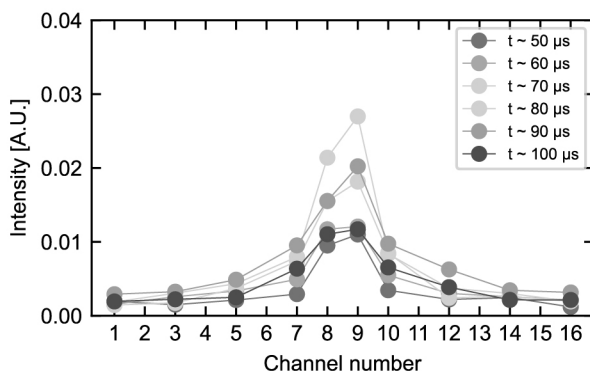


図 6 1 つの磁化プラズモイドを射出した場合の発光分布。チャンネル方向は径方向位置に相当し, 8–9 ch が装置軸近傍。

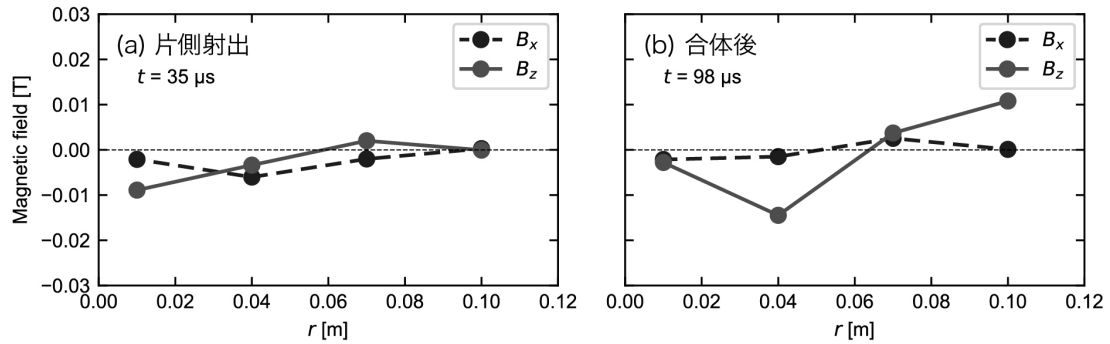


図 7 (a) 1つの磁化プラズモイドを射出した場合および(b) 2つの磁化プラズモイドを合体させた場合の内部磁場の径方向分布

プラズマ中に挿入した磁気プローブアレイにより観測した内部磁場分布を図 7 に示す。片側から磁化プラズモイドを射出した場合 (図 7 (a)) では、ポロイダル磁場とトロイダル磁場にそれぞれ相当する z 方向磁場 B_z と x 方向磁場 B_x が観測された。したがって、射出されたプラズモイドは Spk 様の磁場構造であることが確認できた。一方、2つの磁化プラズモイドを衝突させた場合 (図 7 (b)) では再現性は低いものの、 x 方向磁場は観測されず z 方向磁場のみが観測された。また、 z 方向磁場は $r = 0.06$ m 付近で磁場の向きが逆転しており、FRC の特有の反転磁場構造が形成されている。ただし、想定よりも生成される磁化プラズモイドが小さく、プローブの空間分解能が不十分であったため改良が必須であることがわかった。

5. まとめ

超音速 Spk 合体により FRC の生成とその生成条件について検証を試みた。本研究により、磁化プラズモイドの重心位置やその運動、断面構造を観測するための T-cam を含む実験環境の整備が完了した。T-cam による観測では、磁化プラズモイドの衝突・合体過程の時間スケールにおいては、超音速射出された磁化プラズモイドのシフトによる非対称性はほとんど生じないことがわかった。一方で、高速度カメラの観測結果から磁化プラズモイドが振れるキンク不安定性による非対称性が現れる可能性が示唆され、複数台の T-cam を用いた断層撮像が次の課題となった。また、内部磁場計測からは、2つの Spk 様の磁化プラズモイドの衝突・合体により、FRC 特有の反転磁場構造を持つ磁化プラズモイドに成功していることが示された。ただし再現性が低く、現時点では磁化プラズモイドの相対速度や不安定性の成長速度との関係を調査することは困難であった。

今後は、内部磁場計測系の改良および断層撮像を含む T-cam による詳細な観測のための改良を進めるとともに、FRC 生成の再現性の低さの原因を調査する。その後、FRC の生成条件の評価を目指す。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] M. Tuszewski, *Nuclear Fusion* **28**, 2033 (1988).
- [2] L. C. Steinhauer, *Physics of Plasmas* **18**, 070501 (2011).
- [3] H. Gota *et al.*, *Nuclear Fusion* **61**, 106039 (2024).
- [4] D. Kobayashi *et al.*, *Physics of Plasmas* **28**, 022101 (2021).
- [5] T. Asai *et al.*, *Nuclear Fusion* **59**, 056024 (2019).
- [6] T. Asai *et al.*, *Nuclear Fusion* **61**, 096032 (2021).
- [7] Y. Ono *et al.*, *Physics of Fluids B* **5**, 3691, (1993).
- [8] Y. Ono, *AIP Conference Proceedings* **1721**, 030001 (2016).
- [9] T. Matsumoto *et al.*, *Review of Scientific Instruments* **89**, 10E108 (2018).
- [10] H. Tomuro *et al.*, *Review of Scientific Instruments* **81**, 10E525 (2010).
- [11] T. Seki *et al.*, *Review of Scientific Instruments* **93**, 103520 (2022).
- [12] D. Kobayashi *et al.*, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **66**, 065017 (2024).