

磁場反転配位プラズマの衝突合体過程における高速中性子の空間分布測定 Measurement of spatial distribution of fast neutron in the collisional merging process of a Field-Reversed Configuration plasma

○迫田大輝¹, 菊池龍之介², 小林大地², 高橋努², 浅井朋彦²*Hiroki Sakoda¹, Ryunosuke Kikuchi², Daichi Kobayashi², Tsutomu Takahashi², Tomohiko Asai²

Abstract : The collisional merging experiment of field-reversed configuration (FRC) is being conducted to generate an FRC plasma on the FAT-CM device at Nihon University. It has been suggested that fast neutrons were produced via the Deuterium-Deuterium (D-D) reactions when two magnetized plasmoids accelerated up to 100–300 km/s collide with each other. In this study, the location of fast neutron generation will be identified from the observed neutron signal and its rising timing. In addition, the kinetic energy of the observed fast neutrons will be inferred from these results, which will confirm that they originate from the D-D reaction.

1. 背景・目的

磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration : FRC) は磁場閉じ込め方式の一つであり, トロイダル電流により形成される閉じた磁力線と外部コイルにより印加される開いた磁力線で構成される. FRC プラズマは鎖交する構造物を持たないトーラス状になっており, 軸方向への移送が可能である. また, 閉じ込め効率を表す指標となる体積平均ベータ値(β)が極限的に高い ($\beta \approx 1$) という特徴を有している.

日本大学で開発された FAT-CM 装置^[1]では, 重水素ガスを用いて, 逆磁場シータピンチ (Field-Reversed Theta-Pinch: FRTP) 法により 2 つの磁化プラズモイドを生成し, 磁気圧勾配によって加速・移送し, 閉じ込め部で衝突合体させることで単一の FRC プラズマを生成する実験が行われている.

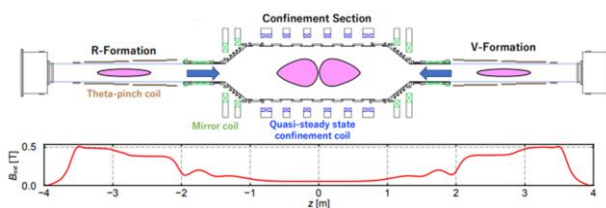


Figure 1. Schematic of FAT-CM

先行研究では衝突合体過程において急峻な中性子信号が観測され, 重水素-重水素 (D-D) 反応が発生したことが示唆された. 式 1 に示す D-D 反応は核融合反応のひとつであり, 2.45 MeV の高速中性子が発生することが知られている. 本実験では D-D 反応由来の高速中性子の空間分布・時間分布の観測を試みる.



1 : 日大理工・院 (前)・物理 2 : 日大理工・教員・物理

2. 中性子検出器

本研究では, 先行研究により開発された, 中性子検出器を用いて非侵襲計測を行う. 中性子検出器は, ポリビニルトルエン製のプラスチックシンチレータ (ELJEN Technology, EJ-200), 光電子増倍管 (Hamamatsu Photonics K.K., H6614-70), ステンレス鋼 (SUS304) 製のハウジングから成る (Figure 2). この検出器は高速中性子以外の放射線にも感度があり, 高速中性子のみを観測するためにはそれらを遮蔽する必要がある. 本実験時に観測が予想される主な放射線として, FRC 衝突合体時に散逸した重水素と金属壁 (${}^{56}\text{Fe}$, ${}^{52}\text{Cr}$) との放射性捕獲によるガンマ線, ガンマ線と重水素との光核反応による熱中性子が挙げられる. 中性子は, 運動エネルギーによって主に冷中性子, 熱中性子, 熱外中性子, 高速中性子に分類され, 熱中性子は約 0.025 eV に位置する. 本計測では各放射線の影響を低減させるため鉛板 (厚さ 2 cm) と熱中性子遮蔽シート (Ask Sanshin Engineering Corp., Ltd, ニュートロンストップ SY20%, 厚さ 5 mm) を併用する. 高速時間応答を維持しつつ, 光電子増倍管からの電流信号を電圧信号へ変換して伝送するために, 計測回路には, オペアンプを用いたトランスインピーダンスアンプ (Transimpedance Amplifier: TIA) を採用した. この回路により 500 ns 程度の時間応答が実現し, さらにフィルタ回路により放電時に発生して計測信号に混入したノイズ ($f > 10 \text{ MHz}$) を減衰させる. また, 外部からの電磁ノイズを遮蔽するため, 計測回路はステンレス鋼 (SUS304) のフレームと 6 枚のアルミ板 (A1100) から成るシールドボックスに格納されている.

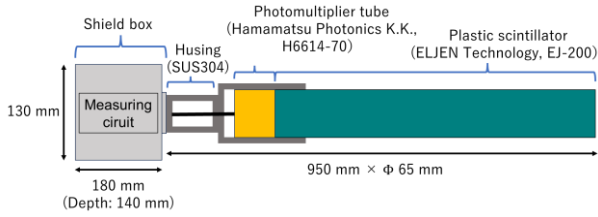


Figure2. Schematic of neutron detector

3. 今後の展望

Figure 3, 4, 5 に先行研究における計測結果^[2]を示す。Figure 3 は遮蔽材を用いなかった場合，Figure 4 は遮蔽材を用いた場合，Figure 5 は真空放電の場合である。(a) は FRC プラズマの排除磁束半径の等高線図，(b) は中性子検出器による中性子信号，(c) は線積分電子密度，(d) はイオン温度を表している。中性子検出器の信号は $t=6 \mu\text{s}$ 付近と $t=13 \mu\text{s}$ 付近の2か所で観測されている。前者の信号はガス未封入で磁場のみを形成した真空放電時にも観測されたことからノイズであると考えられ，後者の信号は，プラズモイドの衝突時刻と概ね合致することから中性子信号であると考えられる。また，ガンマ線や熱中性子の遮蔽を施した場合でも観測されたことから，この信号は D-D 反応由来の高速中性子である可能性が高いと考えられている。

本研究では，中性子検出器を装置両端の生成部近傍へ設置して計測することで，1 つ目の信号が真にノイズであるかを確認する。また，実験ごとの磁化プラズモイドの衝突位置のばらつきを利用し，衝突位置と中性子信号のタイミングの変化から高速中性子の発生源と発生時刻を推定するとともに高速中性子の速度を算出し，D-D 反応由来であるかを評価することを試みる。

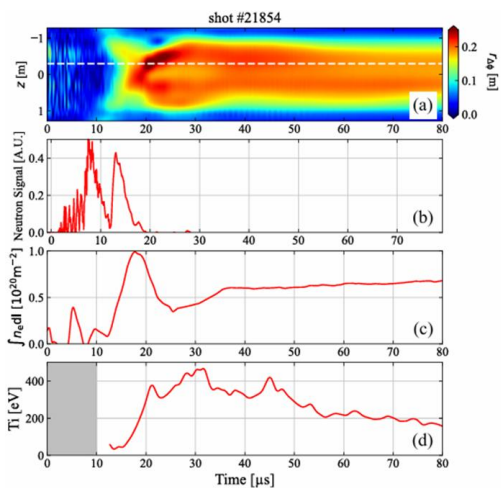


Figure3. Time evolution of plasma parameters without shielding material^[2]

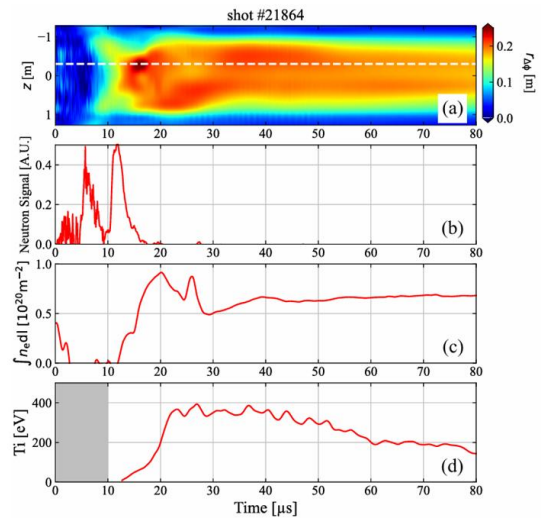


Figure4. Time evolution of plasma parameters with shielding material^[2]

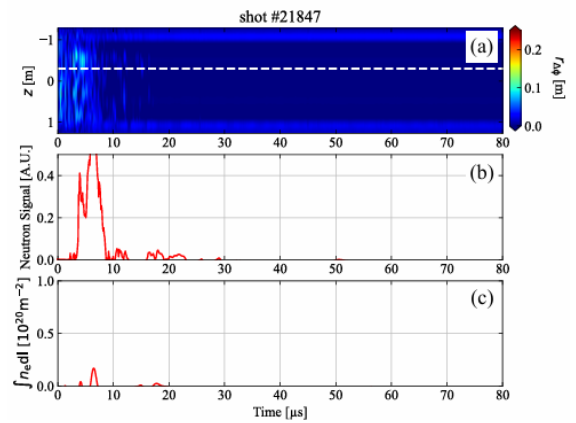


Figure5. Time evolution of plasma parameters during vacuum discharge^[2]

4. 参考文献

- [1] T. Asai *et al.* : “Observation of self-organized FRC formation in a collisional-merging experiment”, Nuclear Fusion, Vol.61, 096032, 2021
- [2] N. Sahara *et al.* : “Development of a fast response neutron detector for the supersonic FRC collision process”, Review of Scientific Instruments, Vol.92, 063501, 2021
- [3] R. M. Magee *et al.* : “Absolute calibration of neutron detectors on the C-2U advanced beam-driven FRC”, Review of Scientific Instruments, Vol.87, 11D815, 2016
- [4] 井浦空太 : 「磁場反転配位プラズマの衝突合体過程における 高速中性子検出」日本大学大学院理工学研究科修士論文, 2024