S4-29

高ベータ自己組織化プラズマの積極的制御とその応用

Control of self-organized high-beta plasmoid and its applications

○浅井朋彦[1]，　高橋　努[1]，　小口治久[2]，　井　通暁[3]
Tomohiko Asai[1], Tsutomu Takahashi[1], Haruhisa Koguchi[2], Michiaki Inomoto[3]

Abstract: Both active and passive control methods of self-organized high-beta plasmoid, i.e. compact toroid (CT) have been studied. CTs are isolated magnetized plasmoid whose toroidal equilibrium is in simply-connected configuration while the major plasma current flows toroidally. Because of the simply-connected configuration and high-beta feature; nearly 100% for a field-reversed configuration (FRC), the CTs have several advantages as a fusion reactor core and for related applications. CTs do not have any structure link with plasma torus. Therefore, CTs can be accelerated and translated by the Lorenz force or magnetic gradient. One of the applications of CTs, a compact magnetized coaxial plasma gun (MCPG) has been tested and several applications have been demonstrated. Through the merging process of two plasmoids ejected into a magnetic flux conserver from the MCPGs facing each other, it is utilized as a EUV light source. Also the MCPG has been utilized as an ultrasonic particle and plasmoid source. The MCPG has been studied as a tool for the rapid formation of metallic thin film especially for hydrogen adsorption in this project.

１．序論

高温／高密度で，自己組織化傾向の強い磁化プラズモイドであるコンパクトトーラス（CT）の制御法の開発とその応用に関する研究を進めている。研究の対象である CT は，トーラス状のプラズマ環と鎖交するコイルを持たないことを特徴とし，このため容易に軸方向に移送が可能である。またその速度は条件によって超アルヴェーン速度に達することから，天体プラズマなどに関連する様々な物理機構を検証する実験環境としても着目されている。

この CT に分類されるプラズモイドの中で，閉じ込め効率の指標となるベータ値（プラズマの熱圧力／磁気圧）が極限的に高い（～100%）磁場反転配位（Field-Reversed Configuration: FRC）と，磁化同軸プラズマガンを用いて比較的に容易に生成・加速でき，原理的には無力配位（テイラー状態）に緩和するスフェロマックについて，これらを応用を進めている。

２．磁場反転配位の積極的制御法

FRC を利用するためのもっとも重要な開発要素として緩和の積極的制御があるが，前述のスフェロマックを利用した方法として,磁化同軸プラズマガン（Magnetized Coaxial Plasma Gun: MCPG）を用いた磁気ヘリシティ入射法を提案し，その効果を世界で初めて実験的に示した[1]．この現象は，多様な応用実験に対応することで知られる日本大学理工学部の逆磁場シータピンチ型 FRC 装置において実施され，MCPG の応用が FRC の配位持続時間を制限する極めて破壊的な不安定性を抑制することを実証した．

FRC は，多くの魅力的な工学的特性，すなわち高いベータ値，トーラスと鎖交するコイルのない円筒状の装置配位，そして生成部と閉じ込め部の分離を可能にする軸方向移送によって，ユニークで高いパフォーマンスを持つ核融合炉心プラズマとなることが期待されている．Figure 1 に FRC の構造の模式図を示すが，特にその磁場配位はポロイダル磁場のみからなる極限的にシンプルなものであり，プラズマ領域を取り巻く開いた磁力線領域はダイバータ配位を形成する．これらの特徴から，反応に高いプラズマ温度が要請されるため，シンクロトロン放射損失によりトカマクなどの低ベータシステムでは実現が困難な D-^{3}He 核融合炉心としても期待され，特にこの反応において適用が期待される直接エネルギー変換法との適合性も高い．プラズマを閉じ込めるポロイダル磁場の形成はプラズマ中を流れる反磁性電流が担うことから，圧力勾配のみを維持すれば原理的には配位が恒久的に維持される可能性を持ち合わせ，その応用が期待されている．

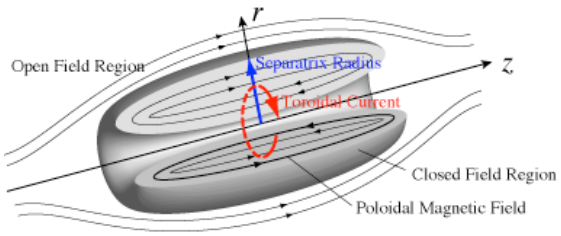

Figure 1. Schematic view of the field-reversed configuration.

１：日大理工・教員・物理，２：産総研，３：東大院新領域

３．スフェロマックの応用

MCPG は，スフェロマックの生成手段として古くから知られる方法であるが，近年，その性能の向上やプラズマの緩和現象などの物理的理解の進展により，トカマクなどの炉心プラズマへの燃料供給，球状トカマクやスフェロマックへの同軸ヘリシティ入射などの手段としての利用が提案，実証されて来た． 内部電流により閉じ込め配位を形成する自己組織化プラズモイドは，温度・密度などのパラメータ領域の広さやその制御の柔軟性から幅広い応用が期待される。本研究では，汎用的に利用可能なプラズマ源を開発し，高速成膜や極端紫外光源への応用の可能性を示すとともに，その発展的な応用について検討を進めている。

３．１．磁化同軸ガンを応用した成膜法の開発 [2]：イオンビームアシスト蒸着装置などを用いた真空蒸着など，極めて方法が限定される Ti-Fe 系薄膜の生成などへの応用が期待される磁化同軸プラズマガンについて装置開発およびその特性評価を終え，試験的にステンレス電極を用いた薄膜形成を行い，ガン口から 300mm 離れたターゲット基板上に金属膜が形成されることを確認した。

この手法では，プラズマ電流とそれにより誘起される自己ローレンツ力により，磁場構造を持ったプラズモイドが放電領域から加速・射出される。この際に，電流密度の高くなる中心電極材料が溶出し，ドリフト管領域で混合され，ターゲット基板上に堆積する。射出される磁化プラズモイドは，生成時の磁気ヘリシティを保持したまま磁束保持容器内で無力磁場配位へと緩和するため，外部制御なしにプラズマ生成部から離れた反応炉へ誘導することができる。またこのため，基材への熱負荷の低減やより精密なプラズマパラメータの制御が可能となることもこの方式の特長である。

３．２．無力配位プラズモイド合体を応用した極端紫外光源の開発 [3]:磁化同軸ガンの派生技術の一つとして，同装置で生成・射出される磁化プラズモイド（= スフェロマック）の衝突・合体時における磁気再結合加熱を利用した極端紫外光源についてその改良と特性評価を進めた。生成・衝突するスフェロマックが持つ磁束の方向の組み合わせ方により，衝突後のプラズマ温度や閉じ込め性能を制御できることが見いだされ，より精密な制御が可能となった。

４．回転磁場法による無電極プラズマ源の開発 [4]

閉じた閉じ込め配位を有するプラズモイドを定常的に生成・維持可能なプラズマ生成法として，回転磁場

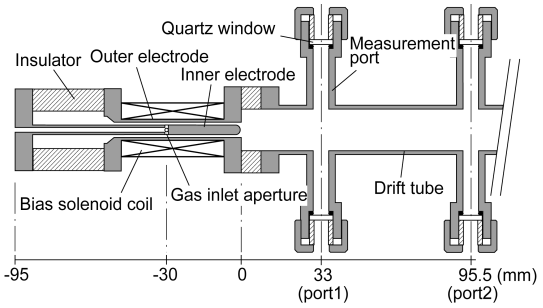

Figure 2. Schematic view of the field-reversed configuration.

（RMF）法によるプラズマ反応炉を開発し，RMF アンテナに磁気回路を組み合わせることでプラズマの生成効率が向上することを実験により確認した。

５．まとめ

自己組織化傾向強い磁化プラズモイドである FRC とスフェロマックについて，その積極的制御法と，磁力線再結合加熱を利用した短波長光源，高速薄膜形成法，さらに FRC 生成法の一つである RMF を応用した，無電極プラズマ生成法を提案し実験的に実証した．本稿では詳しく触れなかったが， MCPG はその特徴から，核融合プラズマ，特に FRC において，(1) ST やスフェロマックにおける CHI と同様の電流駆動法，(2)径電場の制御を実現するプラズマ電極，そして(3)粒子補給の効果が期待されており，現在船橋校舎物理実験 A 棟において建設中の実験装置 FAT（FRC Amplification via Translation / Transformer）を含め，電子密度として 1×10^{20} から 5×10^{21} m^{-3}，温度として 50 から 500 eV の極めて広いパラメータ領域における FRC 実験が可能となっており，さらなる実験の展開が国内外より期待されている．

６．参考文献

[1] T. Asai, Ts. Takahashi, H. Matsunaga et al, : “Active stability control of a high-beta self-organized compact torus”, in 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon, Korea, ICC/P5-01, 2010.

[2] T. Asai et al., *JP Pat*. 4769014, 2011-06-24.

[3] T. Asai et al., *JP Pat. Appl.* 2009-47294, 2009-02-17, *PCT/JP* 2010/053213, 2010-03-01.

[4] T. Asai et al., *JP Pat*. 2011-068129, 2011-03-25.