

超高ベータ核融合炉心研究の現状 Current state of high-beta fusion reactor core

浅井朋彦, 郷田博司
Tomohiko Asai, Hiroshi Gota

日大理工, トライアルファエナジー
Nihon Univ, Tri Alpha Energy

はじめに

近年, おもに米国を中心に民間企業による核融合開発の発表が相次いでおり, ロッキード・マーティン社の小型核融合炉開発に関する報道は記憶に新しい[1]。これらの研究は, ネイチャー誌等においても取り上げられるなど, 世界的にも注目を集めている[2]。この講演では, これらの核融合方式の中でも, 特に極限的に高いベータ ($\sim 100\%$) を有する磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration: FRC) による核融合炉心開発について, そのコンセプトと開発の現状を紹介する。

FRCについては, 2008年8月に核融合学会誌において, 「極限的高ベータプラズマ閉じ込め: FRC研究の新展開」と題した小特集が企画された[3]。この記事の中で, 高密度パルス実験と位置付けられてきたFRCについて, 磁気標的核融合 (Magnetized Target Fusion: MTF) 方式によるパルス高密度炉と長時間閉じ込めによる定常炉の2つの開発方針に着目し, 当時の状況と課題について触れた。図1に, 小特集のまとめに用いられたFRC研究の進展と課題に関する図を再掲する。

ここで定常運転のゴールとして示されているD-³He核融合炉は, 90年代に百田弘らによ

て行われたFRCベースの核融合炉の概念設計「ARTEMIS」を想定したものである[4]。これは, それまでに実施されていたFRC実験から得られた閉じ込めのスケーリングに基づき行われたものであるが, 後述するTAE社のC-2/C-2U装置における実験によって, FRCの閉じ込めのスケーリングを遥かに超える性能が示され, 定常炉を目指したFRC研究は大きな転機を迎えている。

また, パルス高密度路線としては, DoEやNASAなどの支援を受けたHelion Energy社が, 秒速200kmを超えるFRCの移送速度を利用してプラズマを圧縮加熱する核融合炉方式について開発を進めている。

FRCとは?

詳細は, TuszewskiやSteinhauerらによるレビュー論文[5, 6]および前述の小特集に譲るが, 以下にその概要を示す。FRCは, 自己電流によるポロイダル磁場のみでプラズマを閉じ込めるという極限的にシンプルな磁場構造を持ち, 100%に近いベータを実現する唯一の閉じ込め方式である。50%以下の平衡がないその特異な配位は, 生成と同時にバルーニングモードの高ベータ側の極限に位置しているとも考えられている。

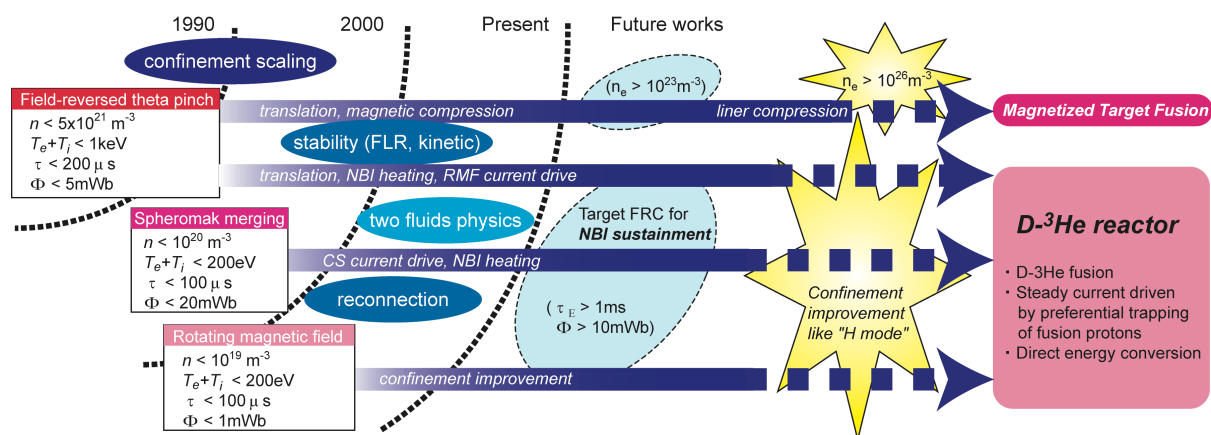


図1 FRC研究の主な進展と今後の方向性 (参考文献[3]より)。

FRCの極限的なパラメータは、シンクロトロン放射損失がさほど大きな問題にならないD-T反応よりも、 $D-^3He$ や $p-^{11}B$ 反応において利点として際立つものである。近年提案されているFRCをベースとした核融合炉方式も、このようなAneutronic Fusion Reactionを想定したものである。

FRC定常炉開発

FRCによる様々な定常炉開発の取り組みにおいて、歴史上最大とも言える成果がTAEのC-2/C-2U実験によって実現された[7, 8]。10 MWのNBIシステムによって形成された“Advanced Beam-Driven FRC”が、5msの配位持続時間と2msを超える粒子閉じ込めを達成したという結果である。

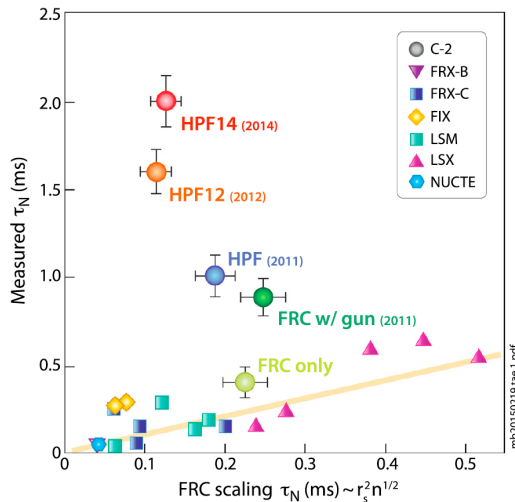


図2 歴代のFRC装置の閉じ込めとC-2による閉じ込めの比較（参考文献[7]より転載）。

C-2/C-2Uでは、逆磁場シータピンチ(Field-Reversed Theta-Pinch: FRTP)法[9]により生成された2つのFRCを超音速で衝突させ、閉じ込め領域に大型のFRCを形成させる。衝突直前のFRCの相対速度は500km/s強に達し、その運動エネルギーは衝突後のプラズマの熱エネルギーに変換される。

上記のC-2U装置における5msの配位持続時間は、NBIや安定化のためのプラズマガンのパルス長で制限されており、実質的にFRCの定常維持が可能になったと言える。これは、空間的微小摂動場を感じないビームイオンによりFRCの高性能閉じ込めが実現されるという故Norman Rostoker教授の提案に基づくものである[10]。

より長時間の高性能なFRC維持には、適切な粒子供給と加熱・電流駆動法の開発が必須であり、日本大学とカリフォルニア大学アーヴァイ

ン校、TAE社との連携研究として、コンパクトトラス入射による粒子供給法[11]や低周波波動による加熱法の開発が行なわれている。

パルス高密度方式

TAEによる定常FRC炉心開発と対をなす形で進められているのが、米国・ワシントン州を拠点とし、NASAなどの支援を受けて研究を進めるHelion Energy社によるInductive Plasma Accelerator (IPA) 装置を用いた高密度パルス炉開発である[12]。TAEと同様に、相対速度にして400 – 600km/sのFRCの衝突合体により、運動エネルギーをイオンの熱エネルギーに変換することで高温のFRCを得る。TAEと大きく違うのが、FRCを衝突と同時に急速に径方向圧縮し、パルスの核融合反応を得ようとしている点であり、またプラズマ消失時の磁束の変化や粒子の拡散による誘導電流によるエネルギー変換等も提案されている。

まとめ

FRC核融合炉心を考える上で最大の課題の一つであった閉じ込め性能は、C-2/C-2Uの実験によって劇的に改善され、閉じ込めや定常化を議論する段階に入った。また、Helion Energyなどが推進するパルス高密度方式は、負荷追従型発電への応用も期待される。また、いずれの方式も、中性子放出のない核融合方式を想定しており、エネルギー変換においても蒸気タービンを用いない斬新な技術開発が進められている。

- [1] “Skunk Works Reveals Compact Fusion Reactor Details”, *Aviation Week & Space Technology*, Oct 15, 2014.
- [2] M. Mitchell, *Nature* **511**, 398 (2014).
- [3] 浅井ほか：プラズマ核融合学会誌 **84**, 498 (2008).
- [4] H. Momota *et al.*, *Fusion Technol.* **21**, 2307 (1992).
- [5] M. Tuszewski, *Nucl. Fusion* **28**, 2033 (1988).
- [6] L. C. Steinhauer, *Phys. Plasmas* **18**, 070501 (2011).
- [7] M. W. Binderbauer *et al.*, *Phys. Plasmas* **22**, 056110 (2015).
- [8] H. Gota *et al.*, *Bull. American Physical Society* **60**, BP12.00012 (2015).
- [9] M. Tuszewski, *et al.*, *Phys. Fluids B* **3**, 2844 (1991).
- [10] N. Rostoker *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1818 (1993).
- [11] T. Roche *et al.*, *Bull. American Physical Society* **60**, BP12.00023 (2015).
- [12] G. Votroubek: Private Communication.