

# 磁場反転配位プラズマの研究



研究ノート

岡田 成文\*

## Study on Field Reversed Configuration Plasma

**Key Words** : FRC Plasma, D-<sup>3</sup>He Fusion, Plasma Confinement Adiabatic Compression, ARTEMIS

核融合反応によりエネルギーを生産する制御熱核融合の研究は当初、米英ソで秘密裡に進められていたが、1958年の原子力平和利用国際会議で一挙に公開された。次世代のエネルギー源に対するイニシアティブを取るべく、各国は戦略的観点から研究を進めていたが、俄かには実現しそも無かったということだったのだろうか。それから40年後の現在、ようやくトカマク装置で10メガワットを越える重水素(D)と3重水素(T)との核融合反応出力を0.1秒程度得られるようになったが、実用化には更にいくつかの大型装置を建造し、段階的に研究を進めて行かなければならないと考えられている。実際に現在1000秒間の定常運転を目指して国際熱核融合実験炉: International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)が企画されている。この装置はドーナツ型の真空容器をコイルで取り囲んだような形をしており、その間にはD-T核融合反応で主じる中性子を吸収し、Tを生成させるための液体リチウムを循環させる必要があり、極めて複雑な構造となっている。その上、装置本体だけでも直径30m、

高さ30mもの大きさを持っており、日米欧ソの国際協力で作業が進められている。トカマク以外の方式については、トカマクと比較して総合的にその優劣を比較できる段階には無いが、環境適合性や経済性等を模索して研究が続けられている。

そもそも核融合反応はクーロン障壁を越えるだけのエネルギーを原子核に与えて衝突させ、反応を起こす必要があるので重水素及び3重水素から成るプラズマの場合、20keV程度の温度が必要となる。又、この温度を保ち、十分な頻度で核融合反応を起こさせるために、たとえば、 $1 \times 10^{20}$ 個/m<sup>3</sup>の粒子密度と1秒間程度の閉じ込め時間とが必要とされる。このような閉じ込め時間を実現するには現在のトカマク装置では前述のような装置規模が必要になる。このような温度と密度とを持つプラズマの圧力は6気圧程度であり、このプラズマは磁場を用いて閉じ込め・保持されるが、たとえばITERの場合、6テスラ程度の強度の磁場を高さ15m、差しわたし10m程度のコイルにより発生させる。この磁場による圧力は100気圧程度で、プラズマの圧力は、これに対して遙かに小さく10%以下になっている。プラズマの圧力の磁気圧に対する比をベータ値と呼ぶが、これは外部から印加する磁場の利用効率を表わす目安となっている。現在のところ、トカマクではプラズマを安定に保持するために、このような低いベータ値が必要とされている。一方、我々が研究対象としている磁場反転配位: Field Reversed Configuration (FRC)プラズマは円筒ソレノイ

\* Shigefumi OKADA  
1947年4月18日生  
1971年東京大学・理学部・物理学  
科卒業  
現在、大阪大学工学部、附属超高温  
理工学研究施設、教授、理学博士、  
プラズマ物理学  
TEL 06-879-7911  
FAX 06-879-7916  
E-Mail okad@ppl.eng.  
osaka-u.ac.jp



ド状の装置内に生成され、1に近いベータ値を持っていながら、実験的には安定な閉じ込めが得られている。これはトカマクと同程度の磁場で、より高温・高密度のプラズマを保持できることを意味している。実際、これはFRCプラズマに対する核融合炉概念設計ARTEMISに見ることができる。ARTEMISでは燃料として重水素(D)とヘリウム3( $^3\text{He}$ )を用いている。D- $^3\text{He}$ 核融合反応では $^4\text{He}$ とプロトン(p)とが生じ中性子は生じない。又温度を適当に設定することにより、D-D反応による中性子発生量を小さく抑えることができ、環境適合性の高い炉を構成できる可能性がある。又、プラズマ自体はドーナツ型をしているが、プラズマを保持する容器は円筒状で単純であり、又、中性子のためのシールドが軽減でき、液体リチウムによるトリチウムの生産の必要が無いことも装置構造を単純にする要因となっている。D- $^3\text{He}$ 核融合反応を維持するためにはD-Tの場合よりも高温・高密度、圧力にして10倍程度の値が必要となるが、FRCプラズマは1に近いベータ値を有するのでITERと同程度の強度の磁場でプラズマを閉じ込めることができる。核融合反応生成物の大部分は荷電粒子であるため、プラズマからのエネルギー取り出しには直接エネルギー変換を用いることができる。FRCプラズマは円筒状構造を持っており、その両端に変換器を設置できるので、これについても都合が良い。

現在、我々はFRCプラズマを逆バイアスセータピンチ方式で生成している。これは石英製の放電管内に予備電離したプラズマを発生させ、それを円筒状に囲むコイルに高電圧(数10キロボルト)に充電したコンデンサにより方位角方向に数マイクロ秒程度で立ち上がる急速放電を行なって生成するものである。この方式では、軸方向に一樣な磁場を得るため、また高電圧に対する絶縁や機械強度を確保するために、FRCプラズマ生成部には燃料補給装置や追加加熱装置などの付属装置を付置しにくくなっている。尨がFRCプラズマは、その軸に沿って磁場構造を損なうことなく平行移動(移送)できることを実験的に実証しており、この技術を用い

て付属装置を付置しやすい金属製真空容器内へと移送している。ARTEMISにもこの過程が取り入れられており、移送したプラズマに高エネルギーの中性粒子ビームを用いてエネルギーを補給し、又、燃料を注入し、更に閉じ込め磁場強度を増加させることによってプラズマを核燃焼状態にまで導くことを想定している。

FRCプラズマは移送により加熱装置などを容易に付加できるようになったが、実際、米国で移送したプラズマを閉じ込めている磁場を時間と共に増大させることによって磁気圧縮を行ない、目覚ましい加熱を得ている。一方、プラズマの閉じ込め時間(粒子やエネルギーが $1/e$ にまで減少する時間) $\tau$ はプラズマの太さを $R$ 、閉じ込め磁場に対するイオン回旋半径を $\rho$ としたとき、ほぼ $R^2/\rho$ に比例することを反映して短くなってしまふ。我々はFRCプラズマを圧縮しないように立ち上がりの速い磁気パルスを局所的に印加し、これによりプラズマの加熱を得、更に閉じ込め時間を伸長することができた。これは、立ち上がりの速い磁場を得るために特別に設計したコイルを真空チェンバ内に装置軸と同軸状に設置し、通電してプラズマに磁気パルスを印加したもので、プラズマの加熱による膨張でプラズマ径が増加し、このため、 $\tau \propto R^2/\rho$ に従って閉じ込め時間が伸長したものと考えられる。

この実験についてはプラズマ加熱機構の研究や更に効率的なエネルギー注入法の研究を進めて行く必要がある。一方で、この実験からFRCプラズマを閉じ込め磁場を増加させることなく、その長さを短縮するように軸方向のみに断熱的に圧縮し、プラズマ径を増大させることによりプラズマの閉じ込め時間を伸長させる可能性が期待され、その実験のための準備を進めている。

この軸方向圧縮実験については、FRCプラズマの長さが直径に対し充分長くないと不安定性が生じ、プラズマは崩壊してしまうと考えられており、従って軸方向圧縮は無制限には行なえず、たとえば、プラズマの長さを $1/2$ にまで圧縮することを考えた場合、10%程度の加熱しか生じない。他方、プラズマの閉じ込め時間

については、これがプラズマ長に依存しないものとする、 $1/2$ の長さに軸方向に圧縮することにより、2倍程度に伸長させることができる。しかしこれまでのところ、閉じ込め特性のプラズマ長への依存性については明確な結果が

示されていず、軸方向圧縮実験から、これについての情報を得ることが期待される。この実験から更にFRCプラズマからの粒子やエネルギーの損失機構についての研究を進めて行く上で有力な手がかりが得られるものと考えている。

