高ベータプラズマ装置

田 丸 健

(昭和49年12月20日受理)

Apparatus for the confinement of high β plasma

Takeshi TAMARU

(Electrotechnical Laboratory, 5-4-1 Mukodai-Machi, Tanashi-shi, Tokyo,)

(Received December 20, 1974)

1. はじめに

核融合研究の現段階を、高温プラズマを安定に閉込めるための方法の探索的段階と見るか、トカマク型低ベータトラスに、プラズマ加熱や高ベータ化の改良を加えることによって、臨界プラズマ達成の見通しが立て得る段階にあるとするかには種々の議論があろうが、いづれにしても過去20年間にわたるプラズマの閉込めと加熱の研究によって得られた知識をもとに、臨界炉心プラズマを作り出して核融合炉実現の科学的実証性を示すことを当面の目標として、種々の閉込め方式による研究がトカマクを先頭にして進められていることは明らかである。

磁場による閉込め方式を、閉込め磁場の形態によって分類すると、ミラーやカスプのような開放端型装置、トカマクや内部導体型装置のような軸対称トラス磁場装置、ステラレータやヘリオトロンのような非軸対称トラス磁場装置等に分類されるが、これとは別に、プラズマの圧力が、閉込め磁場の圧力に比べてどの程度であるかによって、換言すれば磁場配位によらず、閉込めるプラズマの性質によって分類することもできる。この分類によればプラズマ閉込め装置はいづれも高ベータ、中間ベータ、低ベータプラズマ装置のいずれかに区分される。

例えばトカマクは低ベータ（または中間ベータ）軸対称トラス磁場装置である。ここでベータ値とは、プラズマ圧力 (p) の磁場の圧力 ($B_0^2/8\pi$; C. G. S. 単位) に対する比 ($8\pi p/B_0^2$) であって、プラズマを閉込めるためには、ベータ値は勿論1を越えることはできない。ベータ値1%以下を低ベータ、1%~10%を中間ベータ、10%以上を高ベータとするのが普通である。

高ベータプラズマは閉込め磁場に強い影響をおよぼし、低ベータプラズマのように磁場中に浸ってしまうの

ではなく、図1のように閉込め磁場を押し除けてその中に嵌込むような状態になる。この図はテータピンチプラズマの場合を示したもので、プラズマ円柱の軸は紙面に直角である。図で明らかなようにベータ値はプラズマの圧力分布によってその半径方向位置によって変化するが、プラズマ圧力の最大値と真空磁場の圧力の比をいうのが普通である。D-T反応を使う核融合炉ではイオン温度1億度以上、密度閉込め時間積 10^{14} cm⁻³ sec 以上のプラズマが必要であるが、プラズマ圧力は密度と温度の積に比例するから必要な閉込め磁場は密度によって変化する。密度を 10^{14} cm⁻³ とすれば必要な最小磁場は1万G、密度が 10^{18} cm⁻³ なら100万Gを少しこえる値になる。しかし磁場がプラズマ中に全く滲透しないとは考えられないので、ベータ値によって必要な磁場の強さは大きく変わる。このようにベータ値はプラズマ閉込めの重要なパラメータであり、炉の立場からいえば、磁場の使用効率を示す

図1 高ベータプラズマのプラズマと磁気圧の説明
プラズマ円柱の軸はグラフの中心にある
(LA-465-MS より)

* 電子技術総合研究所 エネルギー部 プラズマ研究室 (田無市向台町)

図2 テーターピンチ装置で発生するプラズマと磁力線および電流
左の写真はプラズマ柱断面の形と密度分布を示す

図3 100 kJ 直線テーターピンチ装置電総研

ことになる。磁場の発生には多大の費用がかかり、とくに強磁場になればなる程費用が急激に増大するから、実用炉ではベータ値は10%以上でなくてはならないとされている。

高ベータプラズマの閉込めには、プラズマのベータ値が高いことによって生ずる困難があり、その研究はトカマクに比べてより基礎的段階にあることは否めない。しかし高ベータプラズマの閉込めは核融合炉実現に向うための基本的に重要な問題であるので、世界の主要国ではトカマク等の低ベータトラス装置による研究とならんで大型の高ベータトラス装置による研究が進められている。

2. 直線テーターピンチ装置

(1) これまでのテーターピンチ装置：典型的な高ベータプラズマはテーターピンチ装置で発生するプラズマである。この装置では μs のオーダーの高速大電流パルス放電技術を駆使し、図2のように予備電離した円柱状のプラズマの表面に立上りの早い大電流を円周方向に流し、磁場による衝撃波加熱とこれにつづく断熱圧縮によって高温高密度のプラズマを発生させる(図3)。1960年代の半ばには世界の主な核融合研究グループで電源キャパシタバンクの容量がMJ級、コイル長数mの装置が建設され、プラズマの加熱機構、不安定性、粒子やエネルギーの損失機構などの研究が進み、図4に見られるように早くから温度対密度・閉込め時間積図で炉心プラズマ条件に最も近い位置にあった。これまでに得られたプラズマパラメータは、ベータ値0.9、密度 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 、閉

図4 核融合研究の進展状況 (1971年)
(Nature Vol. 233, No. 5322, Oct, 1971 より)

込め時間 $5 \mu\text{s}$, イオン温度 5 千万度である。

(2) これからのテーターピンチ装置: テーターピンチでは以上のように衝撃波加熱と断熱圧縮を一つのキャパシタバンクを使って行なっているが, 衝撃波加熱には磁場の立上りが早い程有効であり, 断熱圧縮には最大磁場が大きいことが必要である。磁場の立上りを早くするにはキャパシタバンクの容量が小さい方が有利であるのに対して最大磁場を大きくするには容量の大きいバンクが必要となる。装置が大きくなると, この二つの相反する要求を一つのバンクで満足させることは技術的に困難になるばかりでなく, 立上りの早いキャパシタは高価でもあるので経済的にも不利になる。そこで衝撃波加熱を比較的小容量の高電圧キャパシタバンクで行ない, 断熱圧縮には位上りのよりゆるやかな安価な低電圧キャパシタバンクを使用して, 両者を適当な回路, 適当な時間間隔でつなぐ段階テーターピンチ(Staged θ -Pinch)が考えられている。テーターピンチをトーラス化すると, 安定性を保つため径の太いプラズマが必要となり, 従来のテーターピンチのように強い圧縮を行なうわけにはいかず, 強い衝撃波加熱と弱い断熱圧縮を行なう必要があることも, 段階テーターピンチの出現をうながした大きな要因であろう。米国ロスアラモス研究所では, コイル長 4.5 m, コイル内径 20 cm, 衝撃波加熱用 125 kV, 70 kJ キャパシタバンク 2 個, 弱い圧縮加熱用 50 kV, 350 kJ のキャパシタバンク 2 個の段階テーターピンチ装置を建設し

て実験を始めている。衝撃波加熱用の磁場の立上りは 200~300 ns 最大磁場は 10 kG である。

(3) 直線テーターピンチリアクタ: 直線テーターピンチ装置では(1)で述べたようにすでに核融合温度のプラズマを発生しているにもかかわらず, これが直接炉につながるとは一般的に考えられていないのは, プラズマ保持時間が端損失のために短かく, これを Lawson の条件*を満たすまで延ばすには 1 km 程度の長さのコイルを必要とする計算になるためである。そこで 1960 年代の終り頃から高ベータプラズマ研究の主流は端損失のない高ベータトーラス磁場装置の実現に向って進んできている。しかし直線テーターピンチの有用性が失われてしまったわけではなく, 例えば密度を上げて閉込め時間の短いことを補って直線装置のままで炉を実現しようとする考え方もある。いま炉としてベータ値 1, 温度 1 億度, 密度閉込め時間積 $10^{15} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$ を実現するためのロスアラモス研究所の設計例を示すと次の通りである。

圧縮コイル: BeCu, 厚さ 10 cm, 動作温度 500°C, 長さ 1.2 km, 直径 24 cm,

衝撃波加熱用電界強度: 2 kV/cm, 最大磁場 400 kG,
イオン密度 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, プラズマ直径 4.6 cm, 磁気エネルギー源 58 GJ, 電気出力 1.8 GW。

* プラズマ生成のためのエネルギーが核融合反応による出力と等しい状態になるための条件をいう。重水素と三重水素 50% づつの温度 1 億度のプラズマでは, プラズマの密度と閉込め時間の積約 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$ がこの条件である。

図5 $l=1, l=1, l=0$ の磁界をプラズマ柱に与えたときのプラズマの形と力の発表情况

図6 ミラックの圧縮コイル $l=1.0$ 磁界発生のための波形がつけられている

この設計での主な問題点は高磁場コイルの設計とその寿命にある。そのためロスアラモス研究所では最大磁場 250 kG、コイル長さ 5 m の直線テーターピンチ装置 Scylla IV-P を建設して実験することを計画している。

3. トロイダルテーターピンチ装置

トロイダルテーターピンチ装置の代表的なものはロスアラモス研究所の Scyllac (Scylla closed) である。直線テーターピンチをトーラス状にすると、トーラス方向の磁場がトーラス軸からの距離に比例して弱くなるため、プラズマリングに外向きの力が働き、いわゆるトロイダルドリフトによってプラズマは短時間で放電容器に接触して消滅する。これを押えるには逆向きを力何らかの手段によってプラズマに加えて力の平衡を保つ必要がある。Scyllac はこの力を螺旋状の磁場 ($l=1$) と蛇腹状の磁場 ($l=0$) を外部コイルで作る、これを主圧縮磁場に重畳することによって作り出している。合成磁場は直

図7 $l=0$ フィードバックコイルとその回路

線の場合には図5の左側の図のように一方の側だけ凹凸が激しくなる。磁力線にはゴム紐のように張力が働いていると考えれば図の矢印の方向に、磁力線に凍りついたプラズマが働くことが理解されよう。トーラスの場合この力で外向きの力をつりあわせて平衡をとる。主圧縮磁場とこの付加磁場が重畳され、合成磁場はトーラス軸に対して非対称になるから、この装置は非軸対称高ベータ

トーラス磁場装置である。この磁場配位は理論的には安定性が保証されておらず、予期される $m=1$ モードの不安定性をフィードバックによって安定化することを意図している。次の段階では金属壁安定化効果を取り入れるため、2. (2)でのべた段階ターターピンチによって径の太いプラズマを作り、これをトーラス状にした段階トーラスの実験を計画している。Scyllac の目標とするプラズマパラメータはイオン温度 1 千万度、密度 10^{16}cm^{-3} 、閉込め時間 $100\ \mu\text{s}$ であり、その装置パラメータは次の通りである。

主バンク、60 kV、10.5 MJ

トーラス直径、8 m、円周長: 25.13 m

コイルの平均ボア: 14.2 cm

放電管内径: 8.8 cm

磁場の立上り: $3.7\ \mu\text{s}$

最大電流: 110 MA

最大磁場: 55 kG

小円方向電界強度: 570 V/cm

補助磁場の波長: 41.89 cm

$l=0$ 、 $l=1$ 磁場強度: 主圧縮磁場の 6.4%

$l=0$ 、 $l=1$ 磁場及び主圧縮磁場を同時に発生する圧縮コイルの写真を図 6 に、フィードバックコイルの設置状況とその回路を図 7 に示した。

同種の実験は西独のマックスプランク（ガルヒン）研

図 8 スクリューピンチの概念図

究所でも行なわれている。装置は IsarT-1 とよばれ、直径 2.7 m のトーラスで、 $l=1$ 、 $l=2$ 、 $l=0$ の三つの附加磁場を加えて平衡をとっている。現在、密度 10^{16}cm^{-3} 、温度 $50\sim 250$ 万度、ベータ値 0.7 で、保持時間は $m=1$ の不安定性で制限されている。金属壁安定化効果によって不安定性を除き保持時間を延ばすことを目的に、直径 16 m、プラズマボア 8 cm、密度 10^{16}cm^{-3} 、温度 600 万度の高ベータステラレータ HBS II が計画され、その予備実

図 9 トロイダルピンチ装置 ETL-TPE1

図10 TPE-1 の放電装置

験がコイル長 1 m の直線テーターピンチ Isar II で行なわれている。

4. スクリューピンチ装置

(1) スクリューピンチ装置

テーターピンチでできる高ベータプラズマにゼットピンチを重ねると共に金属シェルを使って平衡をとり、高ベータプラズマをトーラス状に閉込めるのがスクリューピンチ装置で、技術的に簡単な利点がある。図 8 にその概念図を示した。始めオランダのコトアース研究所で小型装置によってこの磁場配位が安定なことが実験的に見出されその理論的裏付けが行なわれたが、その後の西独ガルヒン研究所でのより立上りの早い中型装置での実験では、プラズマ電流が、トカマクの安定性の限界を与える Kruskal Shafranov リミット*を越えると不安定になることが示された。ユートファース研究所の理論のモデルは、中心に高温高密度のプラズマがあり、そのまわりを密度の薄い低温プラズマがかこみ、ここを流れる電流によって磁力線のピッチが外側で一定になる、いわゆる定ピッチモデルであるが、高温でこのモデルがどの程度実際のプラズマと合致しているかにはなお研究の余地を残している。電総研のスクリューピンチ装置 TPE-1 (Toroidal Pinch Experiment-1) はこれらの点を研究することを目的に設計建設された中型装置でそのパラメータは次の通りである。

○放電管；主直径 80 cm，ボア 10 cm，パイレックスガラ

* トカマクではトーラス方向に電流を流し、その作る磁場で抵抗加熱されたプラズマを閉込めるが、プラズマリングが安定なためには強いトーラス方向の磁場が必要で、この磁場の強さと流し得る電流値は比例関係にあり、トーラス磁場の強さによって流せる電流の上限がきまる。この限界電流値をはじめて明らかにした二人の人名をつけて Kruskal-Shefranov リミットと呼んでいる。

ス 4 分割

○金属シェル（プラズマ電流誘起用一次コイル兼用）：
内径 11.6 cm 幅 2 cm

○予備電離用バンク：

テーターピンチ：1.3 kJ, 40 kV, 250 kA, 800 kHz

ゼットピンチ：0.3 kJ, 40 kV, I_p 10 kA, 1 MHz

○Bt バンク：

高 速 160 kJ, 40 kV, 20 kG, 立上り 3 μ s, 立下り 150 μ s

低 速 160 kJ, 5 kV, 4 kG, 立上り 120 μ s,

○Iz バンク：

高 速 21 kJ, 40 kV, I_p 100 kA, 立上り 3 μ s, 立下り 130 μ s

低 速 22 kJ, 5 kV, I_p 50 kA, 立上り 50 μ s.

○実験パラメータ； H_2 , D_2 ガス 10 ~ 150 mTorr, Te ~ Ti ~ 100 eV, $n \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

これまでの実験で高速磁場で加熱圧縮されたプラズマの温度は 100 万度 ~ 200 万度に達するが、磁場の印加から 10 ~ 15 μ s 後の平衡状態ではイオン温度は 50 万度から 30 万程度に下り、この状態で 70 μ s 程度安定に閉込められることがわかっている。問題はプラズマを安定に閉込めるには正バイアス磁場を加えてベータ値を下げて平衡を保つ必要があることで、このため加熱効果が弱まると共に磁場配位が安定性に好ましくない形になる。後の問題についてはプラズマ電流を主トロイダル磁場より僅かに早く印加することによって実験的に良い結果が得られており、このことは計算機シミュレーションによっても確かめられている。TPE-1 の実体図と放電装置の写真を図 9、図 10 に夫々示した。ユートアース研究所ではコンデンサバンクエネルギー 1 MJ, 直径 1.2 m, ボア 40 cm の

図11 非円形断面スクリーピンチ装置の主要部

図12 放電管形状

図13 非円形断面スクリーピンチ TPE-1a の放電装置電総研

ファットな大型スクリーピンチ装置 SPICA を使って実験している。

プラズマ電流 I_p を Kruskal-Shefranov 限界以下にすることは、安定性についてはトカマクと同じ条件が必要なることを示しており、プラズマの芯の外側をプラズマ電

流が流れない程低気圧で動作されば、衝撃波加熱を使ったトカマクと考えられる。今の所抵抗加熱を使う低ベータトカマクでは、得られるベータ値が1%以下なので、高ベータトカマクが将来必要とする10%以上の高ベータプラズマの閉込めの性質を知る上でも有効である。

このような目的の装置としては西独ユーリッヒ研究所の TEE (Torus Einschluss Experiment), および名大プラズマ研究所の STP-II (Symmetric Toroidal Pinch-II) があり, 共に中型の装置である。

(2) 変形断面スクリーピンチ装置

スクリーピンチでは(1)で述べたように平衡安定性を保つためピンチ過程でプラズマのベータ値を押える必要があり, 高いベータ値を得ることは難しい。これを改良するため低ベータトカマクで考えられているようにプラズマリングの大直径とボアの比であるアスペクト比を小さくし, ファットなトーラスにすることが考えられるが, 円形断面では取りうるアスペクト比に限界がある。そこでプラズマリング断面を変形して縦長にすることが考えられた。このことは高ベータプラズマについても小型の装置で或る程度確かめられていて, 西独ガルヒン研究所及びユーリッヒ研究所では, パンクエネルギー 1 MJ 程度の大型のベルトピンチ II 及び TENQ を建設して実験を始めている。

計算によると, トカマクやスクリーピンチのような軸対称トーラス磁場装置では, この限界ベータ値 β_c は

$$\beta_c = \beta_p \left(\frac{r\epsilon}{R} \right)^2 \frac{1}{q^2}$$

図14 軸対称高ベータトーラス装置の磁場配位等 (Woellroech; 3rd Int. Symp. on Toroidal Plasma Confinement, March 1973 より)

ここで q はプラズマの安定条件から 1 より大きく取る必要がある。プラズマのポロイダルベータ値 β_p はこれまでの実験からたかだか 1 程度である。大きいベータ値を得るには実効的アスペクト比を小さくするため, プラズマの楕円度 ϵ を大きくすればよい。例えば $\epsilon = 2$ の縦長楕円断面プラズマは円断面のそれに比べて 4 倍の限界ベータ値を持つ。安定係数 q が 1 より大きい場合でも高ベータ値のプラズマの保持が可能であることは, 変形断

図15 標準ターターピンチリアクタのモジュール断面 (Proceedings of the 5th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, p.121)

面プラズマの大きな利点であるが、問題がないわけではない。すなわち非円形断面トーラスのキンク不安定性に対する安定条件が円形断面トーラスの条件 $q > 1$ に比べて著しく不利にならないか？ 円形断面では生じない位置不安定性のような新しく生じる不安定性を克服できるか？などの問題である。これらの点を実験的に明らかにするため、電総研でも小型の非円形断面スクリーピンチ TPE-1a が建設され実験が始められている。図11に装置の実体図、図12に放電管形状寸法を、図13に装置の写真を示した。図からわかるように放電管断面はD形で、これはプラズマ電流が放電管の広い領域に流れても安定性を保つためである。

5. 逆磁界ピンチ

テーターピンチとならんで古くから研究されていたものにゼットピンチがあり、その最も有名な装置は英国のゼーター (ZETA) であった。ゼットピンチの原型は電極を持つ直線放電管の管軸方向に大電流を流し、電流を巡る自己磁場でピンチ効果を起させて高温高密度を得ようとするものであった。そして電極による不純物の影響をさけるため比較的早くからトーラス化して誘導電流を使うことが試みられた。さらに金属シェルで放電管を覆うとか放電管自身を金属製にすると共に軸方向磁場を加えて安定化を計ることが行なわれた。ゼーターはこれらの工夫を加えた大型装置で核融合プラズマ発生閉込めを狙ったものであった。その目標は結局達せられなかったのであるが、長年に亘る研究の末1968年に、放電初期の乱流状態の後、自然発生的に安定な状態ができ、これが約3ミリ秒つづくことが実験的に見出された。このトロイダル磁場がプラズマリングの外側ではプラズマ中と逆極性になっていることが明らかになった。

この磁場配位を人為的に作り出すため、高ベータトロイダル装置 HBTX (High Beta Toroidal Experiment) が建設され、またその理論が開発された。これまでの実験で、この磁場配位を外部回路の電流を制御することによって作り出すことが出来ることは明らかになっている。この装置で得られたプラズマパラメータは温度40万度、密度 10^{16}cm^{-3} 、閉込め時間 $40 \mu\text{s}$ 、ベータ値 0.3 である。この磁場配位は Kruskal-Shefranov リミット以上にトロイダル電流を流してもプラズマが安定なことが理論的に保証される唯一の軸対称高ベータトーラス磁場装置である。しかし、HBTX で得られたプラズマパラメータから明かなように、より高温でこの磁場配位を作り出す研究を進める必要がある。米国ロスアラモス研究所では早いゼットピンチ装置 ZT-1 でより高温でこの磁場配位を実現する研究を続けており、電総研でも TPE-1 で

同様の実験を始めている。一方カラム研究所は早いゼットピンチを使わず、電流の立上りの遅いバンクエネルギー -7MJ の逆磁界ピンチ装置 HBTX-II の計画を進めている。

スクリーピンチ、高ベータトカマク、逆磁界ピンチはいづれもトーラス方向にプラズマ電流を流す軸対称高ベータトーラス磁場装置であるが、磁場配位によって流せる電流の上限が違っている。逆磁界ピンチは抵抗加熱を使う点でトカマクと同じ温度上昇の制限を受けると考えられるが、トカマクより大きな電流を流すことが出来るため高ベータプラズマを得ることが出来る。磁場のエコノミー、リミッターのないことと共に炉への発展を目指す今後の研究が注目される。

6. おわりに

以上現在研究が進められている高ベータプラズマ装置の概要を述べた。高温高密度のテーターピンチプラズマの性質を損なうことなく、これをトーラス化しようとする方法は、主に非軸対称トーラス磁場装置で追求されており、軸対称トーラス磁場装置ではトカマク型装置との類似性から、安定性を保つためプラズマのベータ値をテーターピンチプラズマより下げる傾向にある。また逆磁界ピンチはゼットピンチから発展したもので、HBTX II のように電流の立上りはむしろ遅くする方向に進んでいて、装置の形態としてはトカマク型装置に近くなりそうである。

テーターピンチの圧縮コイルを 14MeV の中性子に対して透明になるように充分薄くすれば、少くとも原理的には炉になり得ることは1960年代半ばに既に報告されているが、その後米国ではロスアラモス研究所とアルゴンヌ国立研究所が共同で標準テーターピンチリアクタの設計研究を行ない、1972年に設計を完了している。

この炉はエネルギーの直接変換による回収を伴う高ベータパルス炉で、立上り数 10ナノ秒 、 10kG 程度の磁場で衝撃波加熱を行ない、プラズマが平衡状態に達したとき立上り数 10ミリ秒 の磁場でゆるやかな断熱圧縮を行って点火させるもので、直線テーターピンチの所で述べた段階テーターピンチ方式を使用している。シラック装置による実験が予期の成果を納めた後の次の段階では、ロスアラモス研究所は炉の実現性を実証するいわゆる S F X (Scientific Feasibility Experiment) として直径 60m の壁面安定化効果を使う段階テーターピンチトーラス装置を建設実験する計画である。

そのための技術開発と予備実験を既に進めている。その動向には一段の注意を払う必要があろう。