1 解説

REPUTE-I

東京大学逆転磁場トーラス実験装置 REPUTE-I

(東京大学工学部) 井 上 信 幸

東京大学では昭和58年度より逆転磁場トーラス研究計画がスタートし、実験装置 REPUTE-I が建設された。この計画は理・工両学部の間で共同計画であり、装置は核融合炉心プラズマの研究と、学生の教育に供せられる。REPUTE-I が他の逆転磁場ピンチ装置と異なる点は、シェルの抵抗性であることである。シェルの導電性でなくても逆転磁場配位の形成されることが、初期実験により確認された。今後の課題は、プラズマ平衡をシェルの頼らず、外部垂直磁場により維持することである。

I. はじめに

東京大学では、理・工両学部の間で核融合に関する協力体制が組織され、昭和58年度より逆転磁場ピンチ装置を用いての教育、研究の推進が共同で行われることになった。逆転磁場ピンチが特に選ばれたのは、次のような理由によるものである。

- (1) 低価格核融合炉としての将来性を備えている。
- (2) プラズマと磁場との相互作用における非線形現象等、学術的に興味深く、かつ未解決の研究課題が多い。
- (3) 現段階において、大学としての適正規模の設備で上記の実験研究が可能である。
- (4) トカマクに類似する装置であり、従来トカマクの研究を行ってきた両学部の研究者にとって転換が容易である。
- (5) 同様に、この装置で学習した学生は、トカマクが主流である核融合社会で即戦力になりうる。

両学部の関係者は、昭和58年度初期より密接な協力のもとに装置本体、電源、制御系等の設計を行うとともに、これらの発注先である日立製作所との間で製作に関する打合せを進めてきた。その結果、装置は予定通り年度末に納入され、慎重な初期調整期間を経た後、昭和59年7月より実験研究が開始された。この逆転磁場ピンチ装置には REPUTE-I (Reversed Field Pinch-University of Tokyo Experiment No.1) という名称がつけられた。

なお、昭和59年度には各種プラズマ測定器の整備が行われつつあり、年度末までにすべてが揃って本格的な教育、研究がスタートする予定である。

II. 逆転磁場ピンチの概要

逆転磁場ピンチは通称 RFP (Reversed Field Pinch)

と呼ばれる。この装置はトカマクと同様、プラズマ電流が流れたトーラス型磁気閉じ込め装置である。トカマクも RFP も第1図のように、プラズマ電流によって作られるポロイダル磁場と、外部コイルによって作られるトロイダル磁場を合成して出来るヘリカル磁場によってプラズマを閉じ込める。トカマクでは、決められたトロイダル磁場に対して流すことのできるプラズマ電流の大きさには限界があるが⁽¹⁾、RFP ではこれを越えて流せる。プラズマ電流が増加するとポロイダル磁場も増加するので、ヘリカル磁場の磁力線のピッチはそれにつれて小さくなる。トカマクではトロイダル磁場がポロイダル磁場に比べて大きいために、ピッチはトーラスの1周よりも大きくなるのであるが、RFP では小さくなる。ピッチの減少はプラズマの中心よりも表面の方が激しい。

第1図 プラズマ電流が流れたトーラス型磁気閉じ込め装置の中の磁場

さて、プラズマ電流を運ぶ電子はほぼ磁力線に沿って流れるので、電流はヘリカルに流れることになる。そして、ヘリカルに流れる電流は新たにトロイダル磁場を生じる。こうして出来る磁場の向きは初めに加え

Reversed Field Pinch Device of University of Tokyo, REPUTE-I: Nobuyuki INOUE.
(1984年 12月1日 受理)

られていたトロイダル磁場のそれと同じである。一般に磁場に閉じ込められたプラズマは反磁性を示すが、電流が流れたプラズマは常磁性の性質を持つわけである。ヘリカルピッチが大きいトカマクでは反磁性のほうが強い。これに対して RFP は常磁性を示す。もし初めのトロイダル磁場の磁束が保存されるならば、プラズマ中に電流が流れることによりプラズマ中心で増えた分のトロイダル磁束は、表面で磁場が逆転することにより相殺されるはずである。逆転磁場ピンチ装置はトロイダル磁束が保存するように運転されるので、上のような磁場配位ができる。第2図は、RFP のトロイダル磁場とポロイダル磁場のプラズマ半径方向分布を示す。トカマクでは、プラズマ表面のポロイダル磁場はトロイダル磁場に比べて遙かに大きい、RFP はその逆である。このため、RFP ではトロイダルコイルが作る磁場は弱くてすみ、コイルの設計も楽である。

第2図 RFP プラズマ中の磁場の半径方向分布

プラズマ中に電流を流すとオーム加熱が起こり、プラズマの温度が上がる。トカマクの場合は電流値に制限があるために、オーム加熱だけで炉心点火温度に達するまでプラズマを加熱することは難しい。このため、複雑な加熱装置を別に用意する必要が生じ、それだけ炉のコストが上がる。一方、RFP ではオーム加熱のみで点火温度に達する見込みであり、低価格核融合炉の可能性がある⁽²⁾。

先に述べた逆転磁場配位というものは、一見不自然な磁場分布であり、時間が経過すると自然に消滅しそうに思える。ところが案に相違して、この配位は電流が流れたトロイダル系がとるエネルギー極小の条件を満たしている⁽³⁾。すなわち、プラズマはこの配位を選んで落ち着く傾向があり、実際的にもこのことは観測されている。また、不自然に見える逆転磁場分布は、プラズマ電流を流し続ける限り維持されている。つまり、電流の作るポロイダル磁場がトロイダル磁場に変換されるのである。この現象はダイナモ効果として説明され、その機構としてプラズマの巨視的不安定性等が候補としてあげられているが、その説明は今後に残

されている。実は先に述べた逆転磁場配位の発生にも単なるプラズマの常磁性のみならず、これらの磁場変換機構が一役かっていると考えられている。

プラズマ電流を流すにはトランスの原理が利用されている。しかし、トランスでは一方向にいつまでも電流を流すことはできないので、将来 RFP 核融合炉を定常運転するためには、定常電流駆動法の開発が必要になる。同じ問題はトカマクにもあって、高周波電力や粒子ビームによる電流駆動法の研究が行われている。トカマクの電流駆動法は RFP にも利用できるはずである。しかし RFP の場合は、トロイダル電源回路とオーム加熱電源回路が、プラズマを通じて固有の非線形結合していることをうまく利用する方法が提案されている⁽⁴⁾。この方法は F- θ ポンピングと呼ばれている。

RFP では大きな電流を流すために、電流が駆動する巨視的不安定性が起こる。また、閉じ込めるプラズマの圧力が高すぎても巨視的不安定性が起こる。さらに電流を運ぶ電子の流れが微視的不安定性を駆動する可能性もある。これらの不安定性は熱や粒子の輸送を増大して、閉じ込めを悪くしているはずである。現にエネルギーの閉じ込め時間はトカマクに比べて遙かに短い。不整磁場の存在は閉じ込めを著しく悪くするが、これと不安定性や輸送との関係も明らかでない。最近ではトカマク研究を行ってきた理論家が RFP に関心を持つようになってきたので、不安定性や輸送現象の解明も急速に進むことが期待される。

RFP では、プラズマ発生後密度が急激に減少するポンプアウトと呼ばれる現象が起こるが、その理由は明らかでない。プラズマと壁との相互作用の解明が重要である。

以上のように、逆転磁場ピンチはトカマクに比べて実験的研究が難しいことから、物理的解明はまだ十分でないものの、プラズマ閉じ込め原理、炉工学的潜在性において優れた点が多い。近い将来、トカマクによる核融合炉の科学的実証が行われて実用炉の研究に移行すれば、今度は経済性向上のために、トカマクの改良や別の炉型の模索が行われるであろう。RFP はトカマクに代わる有望な炉型として、閉じ込め技術の確立を早期に達成すべきものである。

Ⅱ. REPUTE-I について

REPUTE-I の装置ならびにプラズマパラメータを第1表にまとめてある。第3図はその正面図と平面図である。第4図は、国内外で稼働中あるいは計画中の、主な逆転磁場ピンチ装置のサイズを比較したもの

(a) 正面図

(b) 平面図

第3図 REPUTE-Iの概略図

第1表 REPUTE-I のパラメータ

プラズマ	
主半径	82cm
副半径	20cm
最大トロイダル電流	400 kA
放電時間	20~40 ms
電流立ち上がり時間	0.5, 1, 2, 4 ms
トロイダル磁場	
最大バイアス磁場	0.25 T
最大逆転磁場	-0.1 T
立ち下げ時間	0.5, 1, 2, 4 ms
垂直磁場	
最大磁場	0.18 T
インデックス	0~1.5
立ち上げ時間	2, 4 ms
水平磁場	
最大磁場	±0.002 T
ヘリカル磁場	
ピッチ	$l=2, m=9$

破線は計画中または提案中の装置

第4図 国内外で稼働中あるいは計画中の主な逆転磁場ピンチ装置 (1984年9月現在)

であり、断面内の数字はMA単位のプラズマ電流の設計値を示す。

これまでのRFP装置では昔のトカマクと同じく、プラズマ平衡の保持のために導電性シェルでプラズマの回りを取り囲んでいる。プラズマの変位はシェルに流れる渦電流が生じる磁場により自動的に抑制される仕組みである。しかし、シェルの電気抵抗がゼロでないために、渦電流は時間の経過とともに消滅する。また真空排気や測定のためにシェルにあげた孔や、電気絶縁のためのギャップは磁場の乱れのもととなり、プラズマ閉じ込めに悪影響を及ぼす。将来の核融合炉においては、炉心の近くに厚いシェルを付けることは、中性子照射による大量の2次放射性元素の発生を招くおそれがあり、好ましくない。

REPUTE-Iではプラズマの平衡を厚い導体のシェルに頼らず、垂直磁場コイル系により保つように設計した。この装置には薄いステンレス鋼製のシェルがついているが、これは不安定性を抑止するためのもので、プラズマ平衡にはほとんど用をなさない。シェルに誘起される渦電流は約1msで減衰するので、その後はシェルの孔やギャップによる磁場の乱れは少なくなり、プラズマに及ぼす影響も小さくなる。このためトカマクのように大きな観測窓が取り付けられ、プラズマ温度や密度等のパラメータの空間分布の計測が可能になっている。

REPUTE-Iにはヘリカルコイルが付いている。トラスプラズマでは螺旋状の磁力線が重要であり、そのピッチの空間的变化は閉じ込め性能を左右する。この装置ではヘリカルコイルの電流を変化させて、磁力線のピッチの時間的、空間的制御を試みる予定である。ヘリカルコイルを用いることにより、逆転磁場配位に限らず、OHTEやステラレータ等の閉じ込め配位をも試すことができる。トカマク放電もできるので、各種の閉じ込め配位の比較を一つの装置で行うことが可能である。

この装置で行う研究の課題は、主として次のようなものである。

- (1) 逆転磁場ピンチ配位形成の最適化条件の追究
- (2) シェル効果に依存しないプラズマの平衡制御
- (3) 逆転磁場配位維持機構(ダイナモ効果)の解明
- (4) プラズマパラメータ、閉じ込め時間に関する比例則の導出
- (5) ヘリカル磁場を用いるOHTE、ステラレータ配位の研究
- (6) 超低安全係数トカマク放電の研究
- (7) RFPプラズマの電流駆動法の探求
- (8) 新しいプラズマ計測法の開発

Ⅳ. 装置の概要

REPUTE-I 装置は、第 5 図のブロックダイアグラムに示すように本体、電源、制御装置、それに真空排気装

置、ガス供給装置等の補助機器で構成されている。制御装置、測定装置、電源の間の信号はすべて光伝送で行い、制御、測定室へのノイズや高電圧の侵入を防止している。以下にそれらの用途、性能等について述べる。

第 5 図 REPUTE-I 装置の機器の配置

1. 本体

本体は第 3 図の概略図にあるように、真空容器、シェール、各種磁場コイル、変流器、架台からなる。

真空容器の材質は比抵抗が大きい Inconel-625 であり、厚さ 1 mm のベローズ部と厚さ 2.4 mm の直線部を、それぞれ 18 個ずつ交互に溶接している。直線部には上下と水平方向の 3 個所に、測定と真空排気のためのポートがついている。また直線部の内面には 5 個ずつの薄鋸型リミターがついていて、プラズマ副半径を 20 cm

に決めるほか、プラズマの接触による放電管の融解を防ぐ。RFP プラズマ表面の磁力線はほぼポロイダル方向を向いているので、リミターはトロイダル方向に沿って取り付けられた。

真空容器のトロイダル方向の抵抗は 6.5 mΩ、ポロイダル方向の単位長さ当りの抵抗はベローズ部と直線部で等しくなるように、ベローズのピッチと直線部の厚みを調節してある。トロイダル磁場、ポロイダル磁場、垂直磁場の真空容器内への染み込み時間はそれぞ

れ270, 220, 76 μ sである。

真空シールはバイトンと金属リングのいずれも使用できる。ベーキングは変流器に50 Hz, 254 V, 63 Aの交流電力を加えて行う。最高温度は150°Cである。バイトン使用時の最高到達真空度は 3.0×10^{-8} Torrであった。

シェルは5mmのSUS 316 ステンレス鋼で出来ている。電磁波に対する表皮時間は1msで、成長時間がこれよりも速い不安定性に対して有効である。シェルにはポロイダル方向に1個所、トロイダル方向に2個所のカットが設けてある。シェルはエポキシ樹脂で強化されていて、真空容器とトロイダルコイル、ヘリカルコイルはこれに固定されている。

第6図はガス供給、予備電離、各種磁場、プラズマ電流の時間変化の1例である。

トロイダルコイルは54個の単巻きコイルを直列に接続したものである。給電部はそれに流れる電流が発生する不整磁場を極力小さくするため、折り重ねた往復導体で出来ている。このコイルで発生する磁場の波形は第6図に示すようなもので、最大磁場は、正方向が2.5 kG, 負方向が1 kGである。正のフラットトップで

第6図 REPUTE-I 各機器の運転時間シーケンス

プラズマ生成を行う。正から負への逆転時間は0.5, 1, 2, 4 msのいずれかを電源の結線により選択できる。

垂直磁場コイルは、プラズマ中心で最大1.8 kGの磁場を発生できる。0.9 kG以下の磁場の時には、 $\pm 10\%$ 以内の範囲でプラズマ変位に応答するような負帰還制御ができる。コイルの配置は平衡計算により決めた。また、プラズマ中いたる所で磁場のインデックスが0と1.5の間の値となるように配置されている。垂直磁場の立ち上がりは2または4 msのどちらかを選ぶ。水平磁場は最大20 Gで、正負の両方について負帰還制御ができる。

ヘリカルコイルのピッチはトロイダルモード数が9, ポロイダルモード数が2である。このコイルはトロイダルコイルに縛りつけて固定されている。

変流器は3脚鉄心の中心脚鉄に、オーム加熱コイルとバイアスコイルを巻いたものである。鉄心そのものが電気的ループを作ると、トロイダルコイルと結合して鉄心に沿った電流が流れ、不整磁場の発生を招く。これを避けるため上部鉄心は脚鉄の部分から薄い絶縁シートで電気的に切り離されている。そのために生じる漏れ磁場の影響は3Dコードでチェックした⁽⁵⁾。鉄

心の磁束容量は1.6 Vsであり、最大400 kAのプラズマ電流を流すことができる。電流の立ち上がり時間はトロイダル磁場と同様、0.5, 1, 2, 4 msのいずれかを選ぶ。

架台は真空容器、シェル、各種コイルを所定の位置に精度よく、かつ強固に固定する働きをする。変流器や各種コイルからの磁場誘導による渦電流の発生が起きないように設計されている。

2. 電源⁽⁶⁾

電源は、各コイルに第6図のような波形の電流を供給するためのものである。水平磁場を除いて、磁場コイル電源はすべてコンデンサバンクである。特にトロイダル磁場コイル電源、オーム加熱コイル電源、垂直磁場コイル電源では、フラットトップの部分を作るため立ち上げ用コンデンサに直列に波形整形回路を接続した。波形整形回路は負荷との整合を取るにより、コンデンサバンクエネルギーのほとんどすべてを負荷に投入できるので経済的である。垂直磁場と水平磁場の負帰還制御はトランジスタを用いて行う。垂直磁場コイルは電流が大きいので、多数のトランジスタを並列に接続した回路を用いている。

(a) トロイダルコイル電源

(b) オーム加熱コイル電源

第 7 図 コイル電源の回路図

(a) トロイダルコイルと垂直磁場コイルの電流, 5ms/div.

(b) 変流器コイル電流, 10ms/div.

写真 1 模擬負荷で得られた電流波形

第7図は、トロイダルコイル電源とオーム加熱コイル電源の回路図である。トロイダルコイル電源では、正方向と負方向の電流を流す回路をデカップリングインピーダンスで分離している。オーム加熱コイル電源ではプラズマ負荷との整合を取るために、インピーダンス変換用のステップダウントランスを用いて、プラズマのインピーダンスに合わせてトランスの1次側と2次側の巻き数比が変えられるようになっている。写真1は模擬負荷で得られた電流波形であり、計算機シミュレーションの結果とよく一致する。

これらの電源のほかに鉄心バイアス用電源、真空容器ベキング電源、予備電離装置電源、放電洗浄電源がある。放電洗浄電源は10 s または1 s ごとに10 msの間トカマク放電を行うためのトロイダルコイル、変流器、垂直磁場コイル電源である。

3. 補助機器

真空排気装置は軸流分子ポンプ、メカニカルブースターポンプ、油回転ポンプで構成されている。排気ポートにおける総合排気速度は500 l/sである。

ガス供給装置はピエゾ素子で出来たバルブとソレノイドバルブを組み合わせたものである。水素ガスの場合、最大流量1,000 Torr·l/sとなる。RFPではポンプアウト現象があるので、これを補うために大きい流量がとれるようにした。

予備電離装置は最大定格1 kV, 1 Aの電子ビームが放射できる電子銃である。電子がトロイダルドリフトにより真空容器中に入るように、上下ポートに設置されている。

4. 制御装置

制御装置の機能は各種電源、真空排気装置、放電洗浄装置、ガス供給装置、予備電離装置を統括的に運転制御するとともに、運転状況を表示し、かつ運転パラメータのすべてを磁気記録して保存することである。異常の発生を検知して、即座に運転を停止して警告を発するとともに、安全を確保する機能も果す。これらの制御はマイクロコンピュータで行なっている。

制御装置からそれぞれの機器への制御信号はすべて光ファイバーを通して伝送され、制御・測定室から本体室、電源室への電源コードや電気信号による配線は一切行われていない。

5. 測定器

この研究で準備している測定器と、それらで測定できるプラズマパラメータは次の通りである。

CO₂ レーザ干渉計：電子密度

トムソン散乱測定系：電子温度、密度の空間分布

可視分光器：ドップラーイオン温度、不純物の種類と時間変化

高速中性粒子エネルギー分析器：イオン温度

ビームプローブ：イオン温度、密度、電子温度、電場、磁場、不純物の分布

ボロメータ、パイロメータ：エネルギー放射

磁気プローブ、磁束ループ、ロゴスキーコイル：

磁場およびその揺動、磁束、電圧、電流

軟X線計測用半導体：電子による放射の放射とその揺動

硬X線測定器：逃走電子の発生

残留ガス分析器：残留ガス成分の分析

データ処理用ミニコンピュータ、CAMAC系：

データ処理、保存

V. 初期実験結果

昭和59年度は各種測定器を準備中であり、そのための工事、調整等で装置の運転に当てられる時間は極めて少ないが、簡単な測定器を用いて初期実験を行なった。以下はその結果である。

第8図は、水素放電の場合のトロイダル磁束、プラズマ表面のトロイダル磁場、トロイダル電流、ループ電圧の時間変化である。プラズマ表面のトロイダル磁場は真空中に挿入した磁気プローブで測定した。破線はプラズマを発生しなかった時の信号である。このときトロイダル電流は真空容器に流れている。放電時間は立ち上げコンデンサと負荷のインピーダンスからなる振

第8図 水素放電の場合のトロイダル磁束、プラズマ表面のトロイダル磁場、トロイダル電流、ループ電圧の時間変化

動回路の半サイクルだけ続いており、クローバ回路は動作していない。これまでのところループ電圧が設計値の50 V に比べて高く、クローバ回路を働かせるには放電の最適化によりこれを下げる必要がある。

プラズマ電流によりトロイダルフラックスが生成されるのは、RFP プラズマの特徴である。プラズマ表面のトロイダル磁場は逆転していて、RFP 配位が形成されていることがわかる。薄いシェルで RFP 配位が形成された初めての例である。放電時間が2 ms 程度であることから、シェルの時定数1 ms よりも長い時間にわたり RFP 配位が維持されているか否かの判定を行うには十分でない。

第9図は、時間間隔100 μ s ごとにデータ処理を行なったプラズマ電流、ループ電圧、F- θ ダイアグラムである。プラズマ電流は真空容器に流れる分を含まない正味の値である。F- θ ダイアグラムに見られるように、

プラズマは逆転磁場配位に滞留する傾向が見られる。これまでのところ、正味のプラズマ電流の最大値は200 kA である。CO₂ レーザー干渉測定によれば、電子密度は初期値 6×10^{13} から $1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ までポンプアウトにより急速に減少している。

第9図 データ処理を行なったプラズマ電流とループ電圧(F- θ ダイアグラム)

Ⅶ. おわりに

REPUTE-I は所定の性能を満足して測定器の整備が済み次第、本格的実験が開始できる状況である。当面の研究目標は、薄いシェルの装置での RFP 配位の維持達成である。

本計画の遂行にあたり、文部省、東京大学の関係各位のご理解とご支援を頂いた。また、本装置は(株)日立製作所の関係各位による高度な技術を駆使した献身的作業のお陰で完成した。内田岱二郎元東京大学教授は、本計画の立案当初からグルーリーダーとして指導にあたられたが、途中請われて名古屋大学プラズマ研究所所長に就任された。本計画は内田教授のご尽力

なしには実現しえなかったであろう。これらの方々には深く感謝の意を表する次第である。

—参考文献—

- (1) 内田岱二郎, 井上信幸: “核融合とプラズマの制御, 下”, 154 (1982), 東大出版会.
- (2) HAGENSON, R.L., et al.: *Proc. 9th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion Research*, Vol. I, 373 (1983).
- (3) TAYLOR, J.B.: *Phys. Rev. Lett.*, **33**, 139 (1974).
- (4) SCHOENBERG, K.F., et al.: *Phys. Fluids*, **27**, 548 (1984).
- (5) 藤田隆明: 鉄心付変流器磁束の3次元解析コードの作成, 昭58年度東大工原子力工学科卒論.
- (6) ISHIGAKI, Y., SAITO, K., KUBO, M., DEN, M., FURUYA, K., INOUE, N., MIYAMOTO, K., NIHEI, H.: To be published in *Proc. 13th Symp. on Fusion Technology*, Varese, Italy.