

学術論文

## 逆磁場ピンチを交流器コイルにより電流駆動した際の 低 $q$ 球状トカマク配位への遷移現象

### Transition phenomena from reversed field pinch with ohmic heating current drive to low $q$ spherical tokamak

林屋 均 (東京大学)                      桂井 誠 (東京大学)

Hitoshi HAYASHIYA Member  
Makoto KATSURAI

Reversed field pinch (RFP) plasmas have been formed in a TS-3 device and an ohmic heating current drive was applied to support the plasma. In such condition, it was found that the direction of the toroidal field induced by the plasma current naturally inverted. A magnetic structure was finally formed like the spherical tokamak (ST) in which the direction of the toroidal field induced by the plasma current is the same as the field generated by the external coil. To understand the dynamical change of the magnetic structure in this process, the toroidal field distributions, safety factor profiles and the profiles of plasma pressure are shown. All of these results indicate the transition phenomena of the magnetic structure from RFP to low  $q$  ST. This phenomenon is also consistent with the latest report from another organization (Himeji Institute of Technology).

*Key Words:* Reversed filed pinch, spherical tokamak, ohmic heating, Taylor relaxation, dynamo.

#### 1 はじめに

磁気閉じ込めプラズマ核融合研究は、欧州の JET 装置や日本原子力研究所の JT60 装置など大型トカマク装置で臨界プラズマ条件 (入力エネルギーと核融合出力が等しくなる条件) に近い条件が達成され、精力的な研究・開発が進んでいるが、発電炉としての実用化を踏まえた検討が進むにつれ、その装置の大型化に伴う経済性の悪さが指摘され、様々な代替閉じ込め方式の可能性が議論されている。その一つとして最近注目されつつあるのが、コンパクトトーラス (CT: Compact Torus) や球状トーラス (ST: Spherical Torus) と呼ばれるコンパクトなプラズマ磁気閉じ込め配位である。

CT や ST は、通常のトカマク配位のアスペクト比

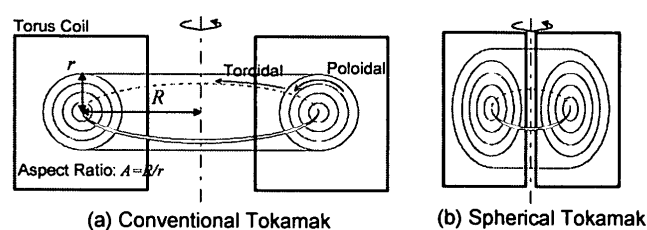


Fig. 1 Shape comparison between conventional tokamak and ST.

(トーラスの大半径  $R$  と小半径  $r$  の差, Fig.1 参照) が 3 程度のドーナツ型であるのに対し、アスペクト比が 1 に近い、球状のずんぐりした配位形状となっているのが最大の特色である。このような低アスペクト比の閉じ込め配位では、簡単な炉構成により建設コストや維持コストが低減できたり、より有効に閉じ込め磁界を利用して経済的にプラズマの閉じ込めが実現できる

連絡先: 林屋均, 〒 113-8656, 東京都文京区本郷 7-3-1, 東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻, email: hayashiya@katsurai.t.u-tokyo.ac.jp

ことなどが期待されており，今日，急速に検討が進められている．特にSTでは，米国のNSTXや英国のMASTなど，プラズマ電流が1MA程度の中規模装置での実験検討が行われつつある段階である(CT, STの概論については文献[1]を参照されたい．)

筆者らの研究室では，プラズマ磁気閉じ込め装置TS-3を用いてCT, STに関連した基礎的な諸研究を行っているが，その中でも筆者は各種CT, ST配位における電子密度分布に注目して研究を行ってきた[2][3][4]．そのような中，最も容易なプラズマ電流駆動手段である中心対称軸に沿って設置された変流器コイル(OHコイル: Ohmic Heating Coil)によるプラズマ電流駆動(以下，OH駆動)が電子密度分布に与える影響を検証した際に，閉じ込め配位の磁界構造がOH駆動することにより急激に変動する現象を見出した．プラズマは安定な配位に落ち着くために磁界構造や電流分布が自律的に変動する生き物のようのものであるとよく言われるが，今回計測された変化は極めて巨視的な磁界構造の変化であり，そのダイナミクスは磁気閉じ込めプラズマの未知の物理を探求し，より魅力的な核融合炉開発に役立てようとする観点から非常に興味深いものと考えており，ここに報告する．

本論文ではまず，第二章でプラズマ磁気閉じ込め配位におけるCT, STの特徴について概説する．続いて第三章で今回実験を行った装置説明と実験結果を示し，第四章で諸データをもとに背景にある物理を検証する．最後に第五章でまとめを行った．

## 2 各種CT, ST配位について

アスペクト比が2以下のコンパクトなプラズマ磁気閉じ込め配位として現在，ST, スフェロマック，逆磁場ピンチ(RFP: Reversed Field Pinch)，逆転磁場配位(FRC: Field Reversed Configuration)などの諸配位が各方面で検討されている．軸対称性を有するトーラスプラズマでは，トーラスの大円周方向( $\theta$ 方向)の磁界 $B_\theta$ ，即ちトロイダル磁界のみによる「単純トーラス」ではドリフト運動により粒子が閉じ込められないため，これと小円周方向のポロイダル磁界 $B_p$ を適度に組み合わせたらせん状の磁界を構成し，粒子を閉じ込めているが，どのようならせん状磁界を構成するかにより，上記の諸配位の違いが生じる．磁界のねじれ具合をあらわす指標が $q$ 値(安全係数)と呼ばれるもので，これは磁界がポロイダル方向(小半径方

向, Fig.1参照)に1周する間にトロイダル方向(大半径方向)に何周するかを表しており， $q$ 値が大きいとは即ち，ポロイダル磁界に比してトロイダル磁界が大きい，つまりトーラスに巻きつく磁力線のピッチの間隔が広いことを意味する．なお， $q=1$ は通常，クルスカルシャフラノフ限界と呼ばれ，閉じ込めの安定性上，重要な $q$ 値である．この $q$ 値により各種CT, STを分類するとSTでは通常，プラズマ端部付近での $q$ 値が $q > 2$ ，スフェロマックでは $0 \sim 0.8$ 前後，RFPでは磁気軸(プラズマ小断面の中心)付近で $0.5$ 前後でセパトリクス(プラズマ端部)付近ではトロイダル磁界の向きが磁気軸付近と逆向きとなるために $q < 0$ となる．また，FRCはトロイダル方向の磁界成分を持たない配位であるため， $q=0$ である．直感的に分かりやすいと思われるトロイダル磁界分布により各配位の特徴を表したものをFig.2(a)に示す．

また，この様な磁界分布を実現する手段にはプラズマ自身の内部を流れるプラズマ電流とプラズマ外部に設けられたトーラスコイルであるが，これにより諸配位を分類したのがFig.2(b)である．STではプラズマ電流が作るトロイダル磁界と同方向の強い外部トロイダル磁界が印加され，これにより高い $q$ 値を実現している．一方，RFPではSTとは逆にプラズマ電流が作るトロイダル磁界と逆向きの外部トロイダル磁界を印加することでプラズマ端部でトロイダル磁界の向きが逆転(負の磁気シア)するような磁界配位を実現しており，これによる高い閉じ込めを目指している．ま

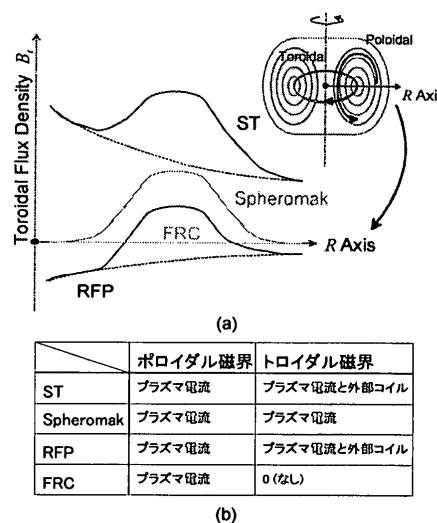


Fig. 2 Classification of ST and CT by magnetic configuration.

た、スフェロマックと FRC はともに外部コイルを用いず安定した配位を実現でき、このようなトーラスコイルを必要としない配位はより簡単に炉が構成できることが期待され、経済性の面から有利である。

これまでの研究によれば、プラズマ端部での  $q$  値が  $q > 3$  のトカマクは閉じ込めが良いが、強い外部磁界を発生するためのコイルが必要であるのに対し、 $q < 1$  の他の方式では欠点として挙げられる閉じ込め性能の悪さが改善されれば経済性に優れた炉になるとの期待が持たれている。このことから、最近では如何に低い  $q$  値の(すなわち、如何に弱い外部磁界による)閉じ込め方式において不安定性を除去して閉じ込め性能を改善するかに重点がおかれ研究が進められている。

### 3 実験装置と結果

#### 3.1 実験装置

Fig.3 にプラズマ磁気閉じ込め装置 TS-3 の構成図を示す。真空容器は全長 960 mm, 直径 750 mm のステンレス製の円筒型で、 $z=0$  mm の中心対称面に左右対称に 8 対 16 本ずつの放電電極を有しており、これらの放電とポロイダル磁界発生コイル (PF Coil) によるトロイダル電流の制御・駆動により左右二つのプラズマを同時に生成可能である。プラズマ生成の詳細については文献 [5] を参照されたい。生成されたプラズマは、プラズマのトロイダル電流の向きと PF コイルを流れるトロイダル方向の電流の向きを逆向きとすることでプラズマとコイルが相互に斥力を及ぼしあい、プラズマが中心対称面方向に押し出され、二つのプラズマが磁力線のつなぎ変わり(磁気リコネクション)を伴って単一のプラズマが生成される。生成されたプラズマは時間とともに  $z=0$  mm の中心対称面付近で減衰、消滅していく。なお、本研究では上記のような一連のプラズマ合体は行っておらず、片側の放電電極のみを用いて単一のプラズマを生成し、中心対称面に押し出されている。

この様にしてプラズマ磁気閉じ込め配位を生成する一連の過程で、トーラスコイル(外部トロイダル磁界発生コイル)に流れる電流の向きや大きさにより前章で説明した ST, スフェロマック, RFP などの各種プラズマ磁気閉じ込め配位を生成することができる。すなわち、トーラスコイル電流が  $I_{tfc}=35$  kA 程度でプラズマ端部での  $q$  値が 3 程度の ST を、 $I_{tfc}=0$  kA とすることでスフェロマックを、 $I_{tfc}=-3.5$  kA 程

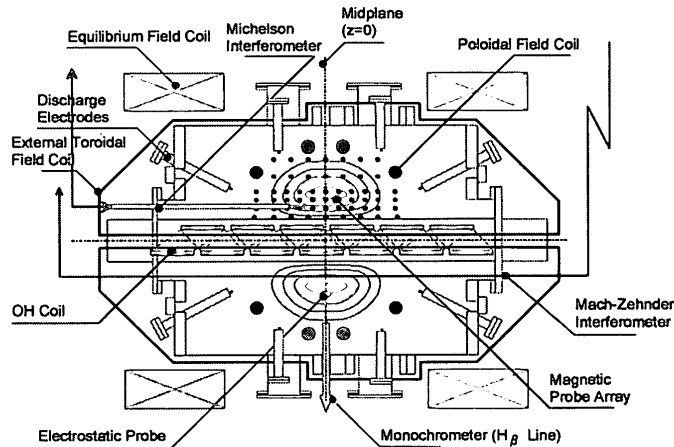


Fig. 3 Configuration of TS-3 device.

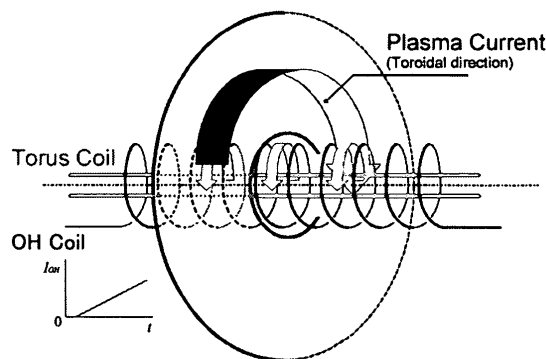


Fig. 4 Ohmic heating current drive.

度とすることで RFP を生成することができる。なお、FRC は TS-3 装置においては二つの互いに逆向きのトロイダル磁界を持ったスフェロマックを合体することにより生成するが、生成手法の詳細は文献 [6] に譲る。

#### 3.2 変流器コイルによる電流駆動(OH 電流駆動)

本実験では、プラズマの配位をより長い時間維持するために OH コイルによるプラズマ電流駆動を行っている。これは、Fig.4 に示すようにトーラス軸上のトーラスコイルの周りにらせん状に巻かれた OH コイルに立ち上がり電流を流すことで、変流器の原理によりプラズマのトロイダル方向電界を誘導する手法である。狭隘なトーラスコイル周辺のスペースにさらにコイルを必要とすることや、また、長時間立ち上がり電流を供給して持続的にプラズマ電流を駆動することは困難であることから、将来の炉においては実用的なプラズマ電流駆動手段とは言えないが、小型基礎実験装

置である TS-3 におけるプラズマの寿命は高々  $100 \mu\text{s}$  程度であり、この範囲で簡単にプラズマ電流を駆動する手段として有用である。TS-3 装置では具体的には、巻き数 22 ターンのソレノイドコイルが  $250 \mu\text{F}$ 、 $20 \text{ kV}$  のコンデンサ電源に接続されており、以下の実験ではこれを  $5 \text{ kV}$  で充電して用いた。充電後、プラズマの生成がほぼ完了する  $t=45 \mu\text{s}$  に OH コイルに接続されたコンデンサバンクの放電を開始し電流駆動を開始する。放電周期は  $1 \text{ ms}$  程度であるため、これより  $200 \mu\text{s}$  程度の間ではほぼ直線的に増加する立ち上がり電流を供給することが出来る。

### 3.3 計測装置

本実験では主に磁気プローブにより得られた磁束密度結果に基づいて検討を行っている。磁気プローブはトーラス軸に平行に  $r=65, 110, 150, 190, 230, 280 \text{ mm}$  の各位置に挿入された外形  $50 \text{ mm}$  のガラス管により真空容器内に配置され、磁束密度の  $z$  方向成分 (トーラス軸と平行な方向) を計測するものと  $r$  方向成分を計測するものがほぼ同数ずつ、合計約 100 個のプローブがアレー状に配置されている。これらにより得られた磁束密度データよりプラズマの軸対称性を仮定することで式 (1) の関係を用いて  $j_t$  や  $j_z$  の算出が可能である。

$$\mu_0 \mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{B} \quad (1)$$

さらにここで算出した電流値と磁束密度データを用いて式 (2) よりプラズマ熱圧力  $p$  が算出できる。

$$\mathbf{j} \times \mathbf{B} = \nabla p \quad (2)$$

また、任意の点  $(r, z)$  におけるポロイダル磁束  $\Psi$  は式 (3) により算出した。

$$\Psi(r, z) = \int_{r_{\min}}^r 2\pi r' B_z(r', z) dr' \quad (3)$$

ポロイダル磁束はプラズマの小円周方向の磁束密度の積分値で、プラズマを維持するのに主要な役割を持つトロイダル電流 (大円周方向の電流) により発生されることから想像できるように、プラズマの強さを反映している。

### 3.4 実験結果-RFP から低qST への遷移現象

本論文では、トーラスコイル電流を  $I_{tfc} = -3.5 \text{ kA}$  程度とし、RFP プラズマを片側の電極のみを用

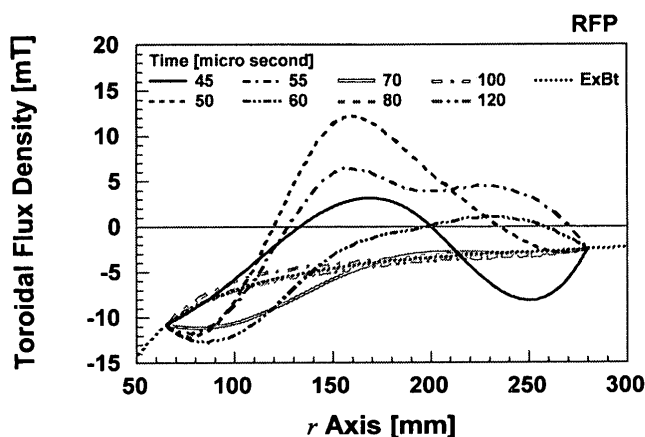


Fig. 5 Distribution of toroidal flux density without OH current drive.

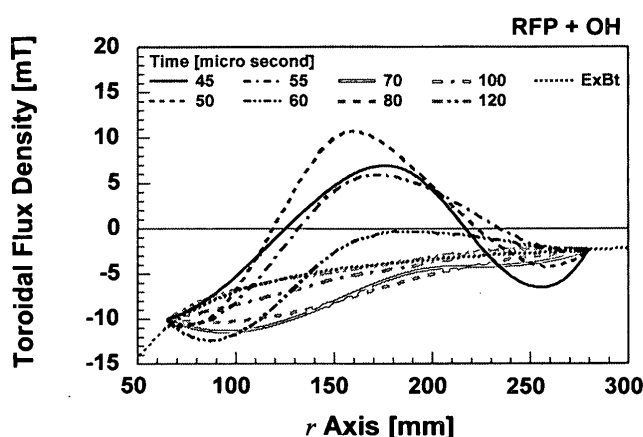


Fig. 6 Distribution of toroidal flux density with OH current drive.

いて単一生成した際の磁界構造について議論している。前記のようにもともとはプラズマ配位中の電子密度分布の動的挙動に興味があり、RFP プラズマを OH 駆動した際の電子密度分布に与える影響に興味があったが、その過程において下記の様に大幅な磁界構造の変化が観測された。

RFP を単一生成した際のトロイダル磁界の径方向分布を Fig.5 に、同様の条件で OH 駆動した際のものを Fig.6 にそれぞれ示す。図中濃い点線で記した曲線はトーラスコイル電流のみにより生成される外部トロイダル磁界を示す ( $t=120 \mu\text{s}$  での曲線はこの点線と重なっている)。また、この間の磁気軸でのポロイダル磁束の時間変化を Fig.7 に、ポロイダル磁束の等高線を描いたポロイダル磁気面の時間変遷を Fig.8 に示す。Fig.8 中、実線で描いた等高線はポロイダル磁束にし

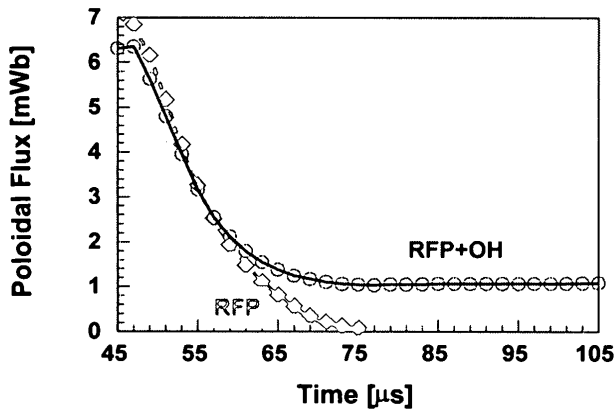


Fig. 7 Time evolution of poloidal flux.

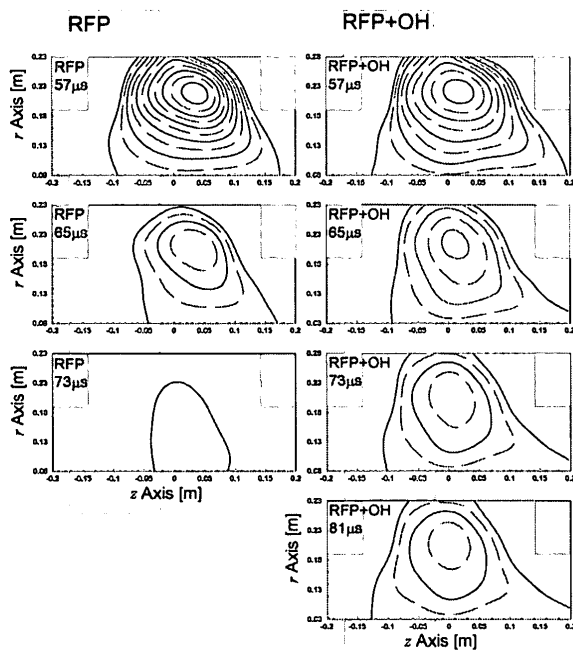


Fig. 8 Time evolution of poloidal flux surface.

て 0.5 mWb 間隔で描いてあり、破線で描いた等高線はその中間 (即ち 0.25 mWb 間隔) を示す。Fig. 7, 8 より分かるように、OH 電流駆動を行うことによりプラズマ電流は小さいものの配位は長く維持されるようになり、OH 電流駆動を行わない場合は 73  $\mu$ s 前後では既に配位は崩壊しているのに対し、OH 電流駆動を行った場合は磁気軸でのポロイダル磁束値で 1 mWb 程度を保ったまま配位が維持されている。一方で、この間のトロイダル磁界の変化に注目すると、OH 電流駆動を行った場合 (Fig. 6) に、 $t=70 \mu$ s  $\sim$  100  $\mu$ s 程度にかけては、外部トロイダル磁界と同方向のトロイダル磁界がプラズマ電流により形成されていることが分かる。すなわち、1) 当初 RFP 配位を形成すべくプ

ラズマ電流が作るトロイダル磁界と逆方向の外部磁界を印加して配位を生成したが、2) 時間とともにプラズマ電流が作るトロイダル磁界の向き (すなわちポロイダル電流の向き) が逆転し、3) 外部トロイダル磁界とプラズマ電流が作るトロイダル磁界が同方向を向くような ST 型の配位に移行した、ことを意味する。

RFP 型の磁界構造から ST 型の磁界構造に移行していることを別の面から確認するため、OH 電流駆動を行った場合と行わない場合の  $q$  値の分布を Fig. 9, Fig. 10

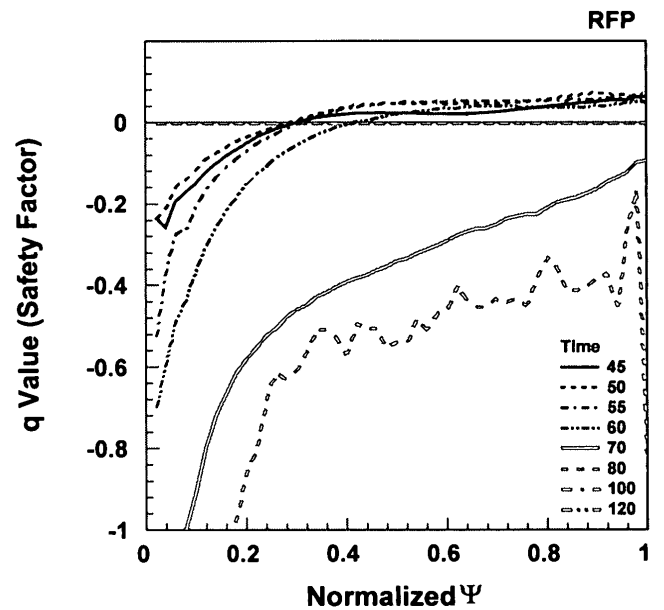


Fig. 9 Distribution of safety factor without OH current drive.

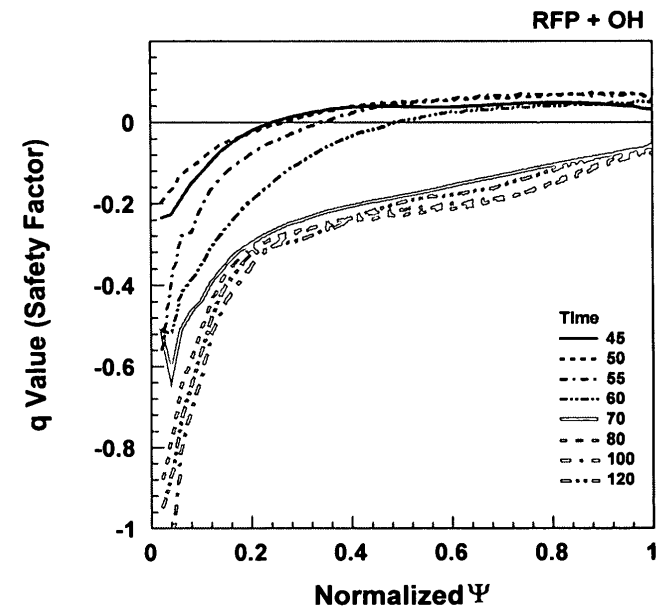


Fig. 10 Distribution of safety factor with OH current drive.

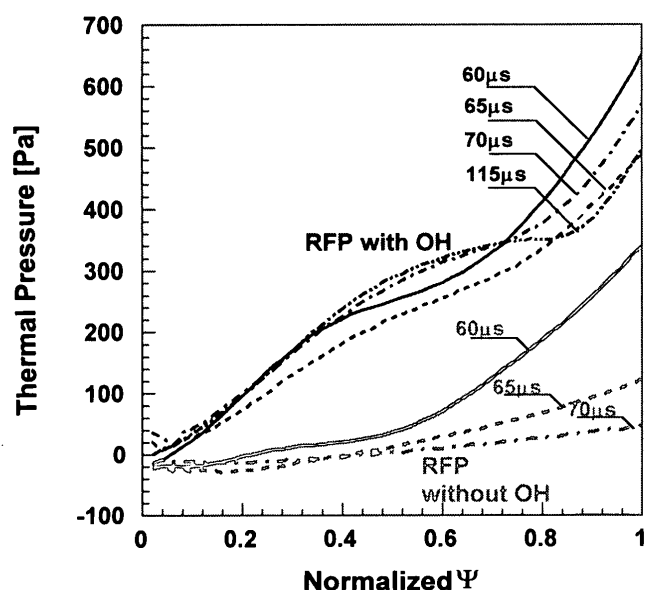


Fig. 11 Distribution of plasma thermal pressure.

に示す。横軸は磁気軸のポロイダル磁束値で規格化したポロイダル磁束を取ってある。すなわち、 $\Psi_{\text{norm}} = 1$ が磁気軸（プラズマ小断面の中心）を、 $\Psi_{\text{norm}} = 0$ がセパトリクス（プラズマ端部）を意味する。これらより OH 駆動を行うか如何に関わらず、 $t=60 \mu\text{s}$  程度までは磁気軸付近では正の  $q$  値を持つものに対し、セパトリクス付近では負の  $q$  値を持つ、即ち、負の磁気シアを持った RFP 型の磁界構造をしていることが分かる。OH 駆動を行わない場合はプラズマが速やかに減衰してしまうため、その後  $t=70 \mu\text{s}$  では  $q$  値がすべて負の値になっているが、これはプラズマの崩壊過程における過渡的な磁界構造であり、 $t=80 \mu\text{s}$  では  $q$  分布も既に乱れていることが伺える。これに対して OH 駆動を行った場合は、 $t=45 \mu\text{s} \sim 60 \mu\text{s}$  にかけて RFP 型の磁界構造をとった後、速やかに磁気軸からセパトリクスにかけての  $q$  値が同符号の（この場合負の  $q$  値の）ST 型の  $q$  分布に移行し、 $t=120 \mu\text{s}$  になってもこの分布を維持している。すなわち、この磁界構造において平衡していることが分かる。なお、通常の ST ではプラズマ端部での  $q$  値は 2 以上であるが、ここで移行した後の  $q$  分布では  $|q| < 1$  となっているため、特に区別するために低  $q$ ST と呼ばれることが多い。

最後に磁束密度計測結果から式 (1), (2) を用いてプラズマ熱圧力を計算した結果を Fig.11 に示す。OH 駆動を行わない RFP においてはプラズマ熱圧力がほと

んど 0 のいわゆる無力磁界配位が形成され、テーラー状態に緩和していることが確認できるのに対し、OH 電流駆動を行った場合はセパトリクス付近でも強いプラズマ熱圧力を支持できる ST 型の磁界構造が形成されており、OH 駆動したことによって大幅に磁界構造が影響されたこと伺える。

#### 4 考察

このような RFP 型の磁界構造から低  $q$ ST 型の磁界構造への迅速な移行は、RFP などに見られるダイナモ現象が深く関わっているものと考えている [7]。RFP やスフェロマックは、エネルギー最小状態（テーラー状態）に自律的に緩和する性質を持っており、即ちプラズマ自身が自ら磁界構造を変化させてエネルギー最小状態に移行する自己組成化の性質を持っている。例えば、プラズマの磁界構造をトロイダル磁束とポロイダル磁束に分けて考えると、その比率がある一定の状態に落ち着こうとする。トロイダル磁束はポロイダル電流により発生されるが、ポロイダル電流はプラズマ小断面において円周付近を流れるために一般に減衰しやすい。このためにトロイダル磁束がポロイダル磁束に比べて減少すると、その減少分を補うようにポロイダル磁束からトロイダル磁束への磁束変換が自発的に生じる性質があり、これをダイナモ現象という。

一方、本論文の実験で行ったように OH 駆動を行うということは、プラズマ中のトロイダル電流を変流器の原理により駆動することであることは既に述べたが、このことは結局、プラズマ中にポロイダル磁束を注入することに相当する。そうするとプラズマを構成するポロイダル磁束とトロイダル磁束のバランスが崩れるために上記のダイナモ現象により RFP の磁界構造が大幅に変動することになる。今回計測された磁界構造の変化は、このような RFP におけるマクロな磁界構造の変動の過程で、それがきっかけとなって RFP とは別の磁界構造でエネルギー的に安定な低  $q$ ST 的な磁界構造に移行したものと考えている。

ここで述べたようなダイナモ現象による RFP におけるマクロな磁界構造の変動は、磁力線が磁気軸付近からセパトリクス付近までつながった、いわゆるストカスティックな磁界構造 [8] をもたらし、そのような磁力線に巻きついて運動した粒子が周辺部に流出してしまうことにより閉じ込め特性が悪くなる要因としても懸念されている。これまでに我々が行った電子密

度分布計測において、RFPをOH駆動してST型の磁界構造に移行する過程で磁気軸付近とセパトリス付近で電子密度にほとんど差が見られなくなるような結果が得られており [9]、本実験においてダイナモ現象に起因したマクロな磁界構造の変動を裏付ける結果が得られている。

これと似た事例としてこれまでも幾つかの報告例がある。筆者らの研究グループにおいても20年近く前にスフェロマックプラズマをOH電流駆動した際にトロイダル磁界の向きが反転する現象が計測され [10]、また、近年では姫路工大の永田らのグループでSTの外部磁界を反転させたところプラズマ電流によるトロイダル磁界の向きが自律的に反転して再びST (Flipped-STと呼ばれている) が形成された報告がある [11][12]。われわれの実験結果は特に後者の実験と似た現象であり、今後の詳細な現象解明が注目される場所である。

なお、今回の一連の実験においては、前記のように250  $\mu$ F、20 kVのコンデンサバンクを5 kV充電して使用しているが、これを2 kV程度の充電電圧で使用してOH電流駆動した場合には今回報告したようなRFPからSTへの遷移現象は見られなかった。このため、このような大幅な磁界構造の変動をもたらすためのしきい値のようなものがこの間に存在すると思われるが、本稿ではこれ以上の議論は行わない。

## 5 まとめ

プラズマ磁気閉じ込め装置 TS-3 において RFP を OH 駆動する過程において、RFP 型の磁界構造から低 qST 型の磁界構造に速やかに移行し暫く平衡状態を保つという事象が計測された。このような移行現象は、OH 駆動した際にダイナモ現象を伴いプラズマの磁界構造が変動した際によりマクロな磁界構造の変化をもたらす、その実験条件においてより安定な ST 型の配位に移行したものと推察される。磁界構造が大幅に変動したことは、これまでに行った電子密度分布計測において粒子閉じ込めが極めて悪くなっていることから推測できる。また、本論文の結果は近年姫路工大のグループで計測されている Flipped-ST と呼ばれる配位の生成を類似の現象として TS-3 装置において裏付けた結果であり、今後その共通した機構の解明に興味がもたれるところである。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、東京大学高温プラズマ研究センターの小野靖助教授には様々なご助言を頂いた。また、東京大学工学部電気工学科桂井研究室の学生各位、特に村田幸弘氏、木村俊郎氏、鳥羽孝幸氏、中川貴嗣氏には実験を手伝って頂くなど多くの助力を頂いた。ここに深謝する。

(2002年1月9日受付)

## 参考文献

- [1] 高瀬 他, 小特集 球状トーラス研究の現状と将来展望, プラズマ・核融合学会誌, Vol.76, No.6 (2000), pp.503-552.
- [2] 林屋, 桂井, コンパクトトーラス合体実験装置 TS-3 における各種プラズマ配位の電子密度分布特性の計測, 電気学会論文誌, Vol.122-A, No.6 (2002).
- [3] 林屋, 桂井, 球状トカマク合体過程における電子密度分布の動的挙動, 電気学会論文誌, Vol.122-A, No.6 (2002).
- [4] 林屋, 浅香, 桂井, 各種 CT, ST 合体過程における電子密度分布挙動の相互比較, 電気学会論文誌 A (投稿中).
- [5] 林屋, 桂井, コンパクトトーラス配位における外部磁場の電子密度分布への影響, 電気学会プラズマ研究会, PST-01-61, (2001), pp.51-56.
- [6] 小野 他, プラズマ合体を用いた磁気リコネクション室内実験, プラズマ・核融合学会誌, Vol.75, No.4 (2001), pp.467-480.
- [7] 平野, 逆磁場ピンチ研究の現状と今後の計画, 電気学会論文誌 A, Vol.118, No.2 (1998), pp.97-100.
- [8] 政宗, 平野, RFP における非線形現象と自己組成化, 核融合研究, Vol.68, No.3 (1992), pp.268-278.
- [9] 林屋, 桂井, CT, ST において OH 電流駆動が電子密度分布に与える影響, 電気学会プラズマ研究会, PST-01-88, (2001), pp.39-44.
- [10] 桂井, 西前, 片山, 変流器を用いたスフェロマックプラズマのトロイダル電流駆動に関する実験研究, 電気学会論文誌, Vol.105-A, No.4 (1985), pp.21-28.
- [11] 大黒, 永田 他, ST から球状 RFP へのヘリシティ駆動緩和配位の遷移, プラズマ・核融合学会第 18 回年会予稿集, No.30pB39P, (2001), p.217.
- [12] M. Nagata, et al., Coaxial Helicity Injection and  $n=1$  Relaxation Activity in the HIST Spherical Torus, the 19<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference, (Submitted).