

### 3 電磁力平衡トカマクにおけるプラズマ制御に関する研究

嶋田研究室 97M21130 小松康弘

#### 1. 序論

トカマク型核融合装置において、プラズマの閉じ込めに必要な磁界強度を増すことは、プラズマ性能の向上につながる。しかしながら、高磁界化を行うことで磁界コイル及び支持構造材にはより強力な電磁力が作用する。本研究室ではこの問題に対し、コイル巻配位を適切に設定することにより、この電磁力を低減することができる「電磁力平衡コイル」を用いた小型強磁界トカマク装置に関する研究を行い、プラズマの生成が可能であることを実証してきた。

本論文ではまず第2章において、電磁力平衡コイルを用いたトカマク装置「等々力1号」における生成プラズマの挙動を解析し、垂直不整磁界のプラズマ挙動への影響を調べた。第3章では、プラズマリングの大半径方向位置制御のための垂直磁界コイル電源を開発した。プラズマ電流持続時間延長を目的とした磁界印加実験を行った。

#### 2. 電磁力平衡コイルを用いたトカマク装置

等々力1号の諸元及びその定格運転でのパラメータを表1に、また装置のポロイダル断面を図1に示す。磁界コイルは電磁力平衡コイル以外に、不整磁界キャンセルコイル、垂直磁界コイルが設置されている。不

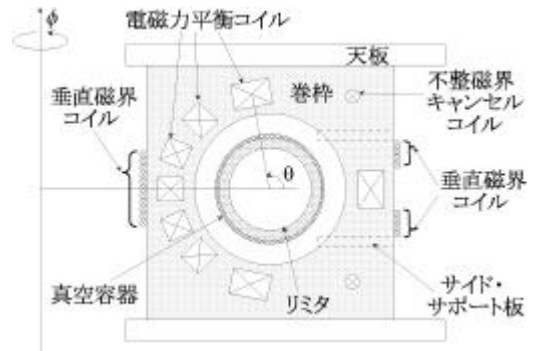


図1 等々力1号のポロイダル断面

整磁界キャンセルコイルは、プラズマ着火またはその位置制御時において妨げとなるトラス内部に生じる不整磁界を低減するために上下一周ずつ巻かれており、電磁力平衡コイルと直列接続されている。垂直磁界コイルは、外側上下各4ターン、内側11ターン巻かれており、生成されたプラズマが大半径方向に広がるのを抑えるための垂直磁界を印加する目的で、別電源から通電される。

等々力1号の電気回路構成を図2に示す。回路は電磁力平衡コイルへの放電を行う電磁力平衡コイル励磁用主回路、プラズマ着火の際の火種を作る予備電離回路、生成プラズマの大半径方向位置の制御を行う垂直磁界コイル回路から成り立っている。運転手順について述べる。まず、放電開始時刻  $t_0$  の数秒前に真空容器内に水素ガスを注入する。ガス注入の後の待ち時間を調整することによって、プラズマ着火に適したガス圧にまで水素ガスを排気する。時刻  $t_0$  において励磁開始用イグナイトロンをオンし、電磁力平衡コイルの励磁を行う(1段目)。時刻  $t_1$  において予備電離によってプラズマを生成し、周回電圧発生用イグナイトロンをオンすることによってプラズマ電流を立ち上げる(2段目)。また、垂直磁界コイル回路による垂直磁界印加も同時に行なわれる。2段目の放電タイミングに関して、プラズマの着火が早すぎると十分なトロイダル磁界が真空容器内に発生していないため、プラズマ電流は立ち上がらない。これらの印加タイ

表1 装置諸元と運転パラメータ

パラメータ	値
大半径 R	0.297 m
コイル小半径 a	0.115 m
コイルピッチ数 $\frac{1}{2}$	5
コイル極数 l	8
コイルインダクタンス	0.65 mH
プラズマ小半径	0.055 m
中心トロイダル磁界	2 T
プラズマ電流	40 kA
プラズマ持続時間	4 ms
コンデンサバンク	4 mF, 12.5 kV (300 kJ)

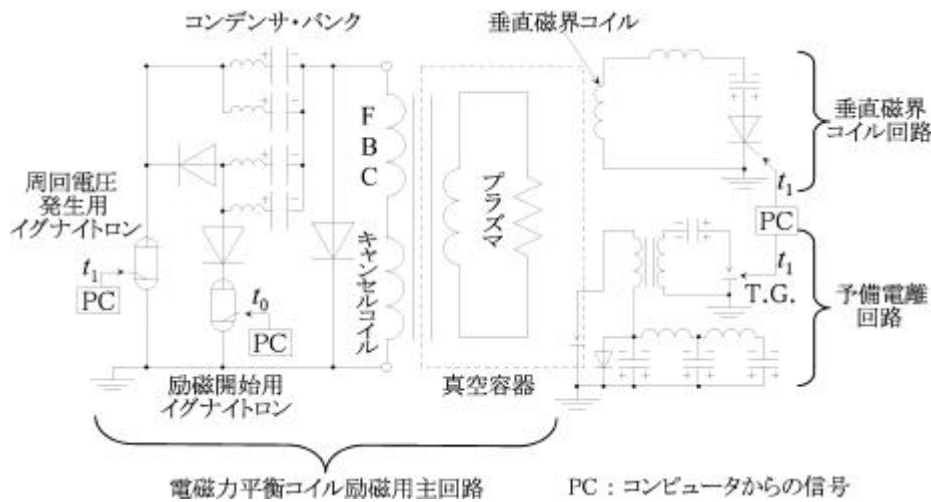


図 2 等々力1号の電気回路構成

ミングは全てパーソナル・コンピュータで制御している。

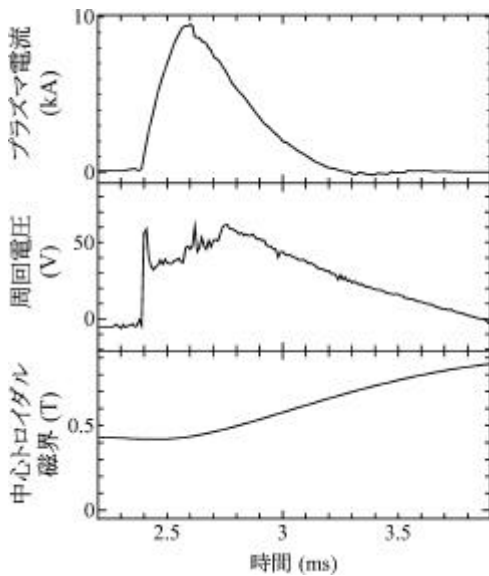


図 3 生成プラズマ波形の例

生成されたプラズマについて、プラズマ電流、周回電圧、中心トロイダル磁界の時間変化を図3に示す。着火時刻 2.4 ms の水素ガス圧は  $1.0 \times 10^{-4}$  Torr、充電電圧は 7 kV で、1段目を 0 ms に、2段目を時刻 2.4 ms に放電した。プラズマ電流は最大 10 kA、持続時間は 2.4  $\times$  3.2 ms までの 0.8 ms であった。プラズマ電流最大時における中心トロイダル磁界強度は 0.43 T であり、プラズマ電流消滅後も増加を続け、時刻 4.3 ms において 0.9 T にまで達している。

生成プラズマの真空容器内での位置、形状及び挙動の解析を行った。プラズマ電流を 6 本のフィラメント電流(図4上段の6個の黒点)で近似した。次に、それらで作る磁力線の軌跡を 3 次元計算し、ポロイダル断面に投影した。解析結果と真空容器内の垂直不整磁界の時間変化を図4に示す。図4上段の破線による円はポロイダルリミタ、実線は最外殻磁気面を表す。円環状プラズマ電流は大半径方向に膨らもうとするので、通常のコトカマク装置では垂直磁界を印加し、内向きのローレンツ力により平衡を維持している。プラズマ電流値が充分大きい時刻 2.5  $\times$  2.7 ms (図4中のアルファベット B  $\times$  D) においては、平衡に必要な垂直磁界より垂直不整磁界が小さいため、プラズマはポロイダル断面外側に留まっている。また、垂直不整磁界と平衡に必要な垂直磁界の強度がほぼ等しい時刻 2.8 ms (E) では、プラズマはポロイダル断面の中央付近に位置している。時刻 2.9 ms (F) では垂直不整磁界は増加傾向にあり、プラズマが内側へ移動してしまっていることがわかる。時刻 2.7 ms 以降のプラズマの急激なトーラス内側への移動は、減少するプラズマ電流に対してトーラス内部に過度の垂直方向不整磁界が印加された可能性を示唆する。

トカマク装置において、ポロイダル不整磁界はプラズマ着火に要求される周回電圧値の上昇を招くため、極力抑えるように設計する。しかし等々力1号の製作時には、電磁力平衡コイルによる不整磁界を最小化する手法が確立していなかったことと、装置の製作精度

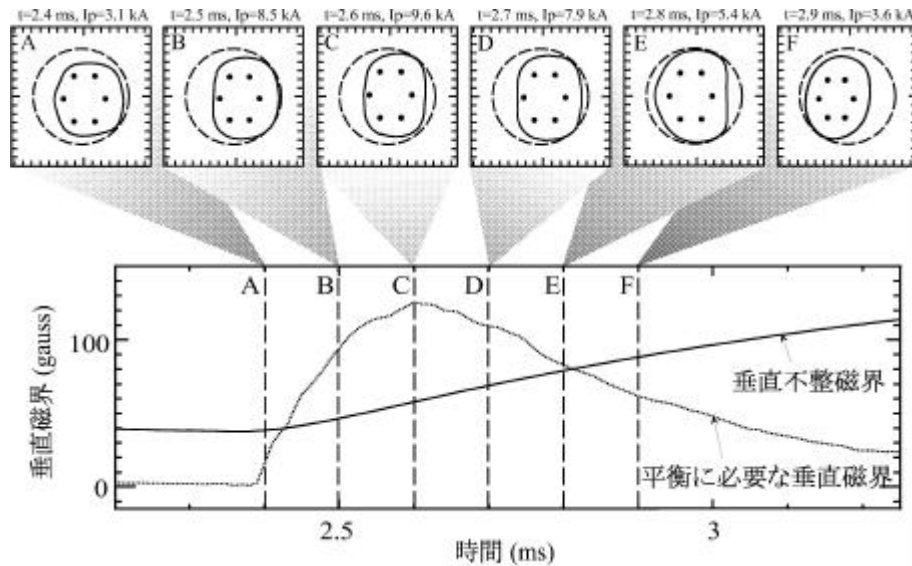


図 4 垂直不整磁界波形とプラズマ断面形状の時間変化

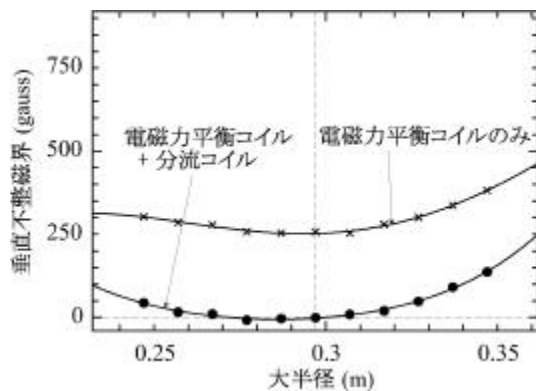


図 5 プラズマ着火時の分流コイルによる垂直不整磁界低減

が低いことから、本装置にはある程度の不整磁界が発生する。この不整磁界のほとんどが垂直成分であり、これを低減するために図1に示したキャンセル・コイルに可変インダクタンスによる分流コイルを並列に接続し、キャンセル用の垂直磁界強度を調整した。図5にプラズマ着火時における、キャンセル後の垂直磁界成分の大半径方向分布を示す。プラズマ生成領域のうち大半径 0.27 ≫ 0.31 m の領域で垂直不整磁界をキャンセルすることができた。

### 3. 電磁力平衡トカマクにおけるプラズマ位置の制御

通常のとカマク装置では、プラズマを真空容器とい

う限られた空間に長時間維持するために、外部コイルを用いた能動的なプラズマ制御を行っている。先述の通り、大半径方向に対しては垂直磁界とプラズマ電流とのローレンツ力によって平衡が保たれる。プラズマ電流値  $I_p$  と大半径方向の平衡に必要な垂直磁界強度  $B_z$  は

$$B_z(R) = i \frac{1_0 I_p}{4R} \mu \ln \frac{8R}{a} + \frac{I_i}{2} i \frac{3}{2} + \bar{\rho}$$

ここで、 $R$ : 大半径、 $a$ : 小半径、 $I_i$ : プラズマ内部インダクタンス、 $\bar{\rho}$ : ポロイダルベータ

で与えられる。垂直不整磁界発生時にもプラズマ電流の立ち上げが可能であることを考慮し、図6に示すような垂直磁界 A, B それぞれの印加実験を行った。

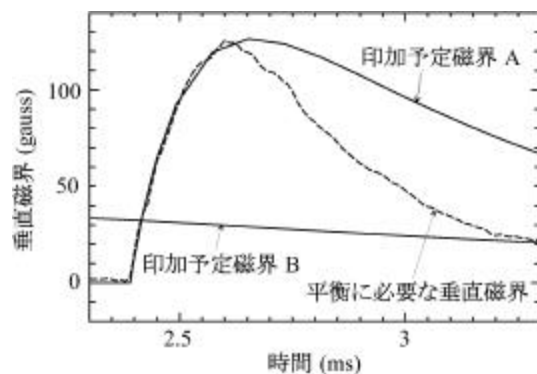


図 6 プラズマ電流波形からの必要磁界換算値と印加予定磁界の時間変化

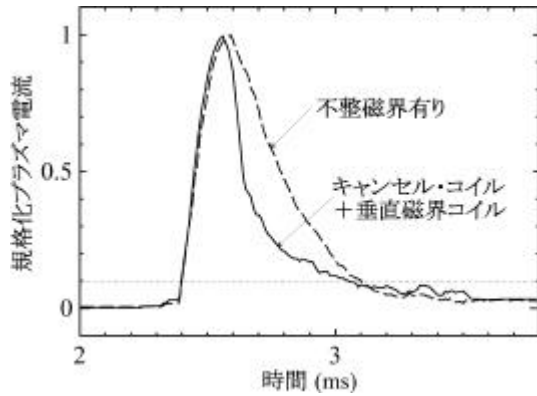


図 7 印加予定磁界 A の場合のプラズマ電流波形

予定印加磁界 A はプラズマ電流の立ち上がりに合わせて垂直磁界波形, B はプラズマ電流立ち上げ時点で既に減少フェーズに入っているような垂直磁界波形である。以下に示す実験には, LC 回路電源を垂直磁界コイル電源として用いた。

図 7 に印加予定磁界 A を印加した時のプラズマ電流波形を示す。図 7, 8 の破線は, 不整磁界がある場合のプラズマ電流波形である。LC 回路電源による印加予定磁界 A の印加実験では, 垂直磁界コイル電流の急峻な変化に対して, 真空容器に渦電流が発生する。これに起因して, 予定印加磁界よりもピーク時刻が 0.2 ms 遅れ, プラズマ電流減少時における垂直磁界強度が垂直不整磁界の場合よりも大きくなるため, プラズマ電流持続時間は 0.6 ms に減少した。なお, プラズマ電流持続時間は, 規格化プラズマ電流が 0.1 以上 (図 7, 8 の点線より上部) 流れている時間とした。時間的な磁界印加制御を行うことによって, プラズマ電流波形は変化するもののプラズマ持続時間は同程度であった。

図 8 に印加予定磁界 B の場合の結果を示す。印加には LC 放電のクランプ波形尾部を用いており, 垂直磁界コイル電流の時間変化が緩やかなため, 印加予定磁界 A に比べ渦電流の影響が少ない。図 4 及び 6 より, 垂直不整磁界強度はプラズマ電流減少時において増加するのに対し, 印加予定磁界 B は減少する。印加予定磁界 B の印加により, プラズマ電流減少時にプラズマを内側へ押し, 電流値を減少させていた垂直磁界を低減できる。プラズマ電流増加から減少へ転じる時間が延びたこと及びプラズマ電流の減少比率

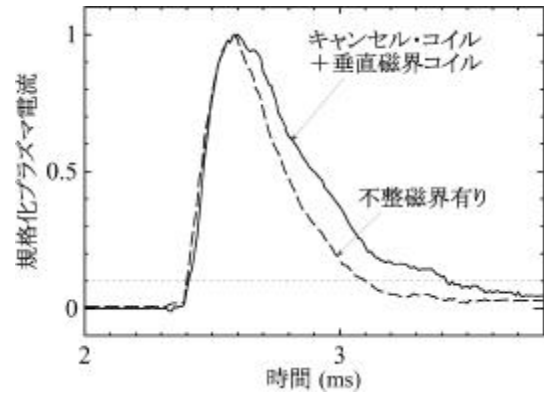


図 8 印加予定磁界 B の場合のプラズマ電流波形

が不整磁界がある場合に比べ小さくなったことから, 全プラズマ電流持続時間が 0.8 ms から 1.0 ms まで伸びた。

#### 4. 結論

1. 真空容器内でのプラズマの挙動を解析した結果, プラズマはポロイダル断面外側で生成され, プラズマ電流が減少に転じると大きく内側へ移動していることがわかった。この原因がプラズマ電流減少時の垂直不整磁界の増加にあると考え, 可変インダクタンスによる分流コイルを用いて垂直不整磁界を抑えることに成功した。
2. プラズマ電流立ち上がり時から減少時にかけて一様に減少する垂直磁界波形を印加した。プラズマ電流減少時における垂直磁界強度が小さくなるため, プラズマ電流増加から減少へ転じる時間が延び, プラズマ電流持続時間を 1.0 ms に伸ばすことに成功した。

#### 5. 今後の課題

1. プラズマ電流の急な減少波形に追従できるスイッチング電源を用いた場合の, プラズマ電流波形, 持続時間及び真空容器内におけるプラズマの挙動を調べる。
2. トーラス内部にポロイダル不整磁界を発生しないよう最適化したトカマク装置「等々力2号」の設計・製作を行う。