

26 ビリアル限界コイルを用いた小型核融合装置における垂直磁場によるプラズマ位置制御

飯尾研究室 03m19081 上原 壮一郎

垂直磁場によるプラズマ位置制御の原理

トカマク放電によって作られるプラズマリングには、大半径方向に3つの力が作用する。プラズマの圧力による力 F_p 、トロイダル磁場の張力による力 F_m 、そして大半径方向内側と外側との間に生じるプラズマ電流が作るポロイダル磁場の圧力差による力(フーブ力) F_h の3つである。

これらの力の総和は、プラズマリングを大半径方向外側へ広げる方向に働くため、リングに外部から垂直磁場を加え、図1のようにローレンツ力によってリングの位置的な平衡をとる。

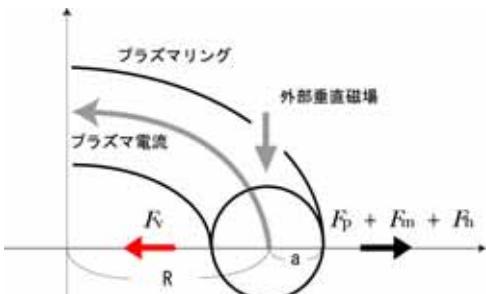


図1 プラズマリングの位置的平衡

プラズマリングの大半径方向の平衡に必要な外部垂直磁場は、

$$B_v(R) = -\frac{\mu_0 I_p}{4\pi R} \left(\ln \frac{8R}{a} + \frac{l_i}{2} - \frac{3}{2} + \beta_p \right) \quad \dots(1)$$

で与えられる。 l_i は、プラズマの内部インダクタンス、 β_p はポロイダルベータである。

ビリアル限界コイルを用いた小型核融合装置

ビリアル限界コイル(VLC)とは、嶋田・飯尾研究室にて開発されたコイルである。巻線軌道の工夫により、通電時のコイルにかかる応力を各方向に平準化しており、コイル内の最大応力が最小となるため、コイル支持材量の低減を図ることができるコイルである。図2の青線がVLC一極のコイル軌道である。

表1に諸元を示す「等々力2号」は、このビ

リアル限界コイル8極を主コイルとして用いた小型トカマク装置であり、本研究以前に、プラズマ着火とそのプラズマ特性の再現性についての実証が行われた。

プラズマ位置制御に用いる垂直磁場コイル(VFC)は図3に示す位置に設置されており、VLCとの相互インダクタンスは $1.5 \mu\text{H}$ (結合度 7.1×10^{-2}) と十分小さい。

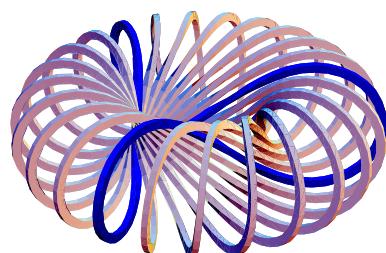


図2 VLCコイル軌道の模式図

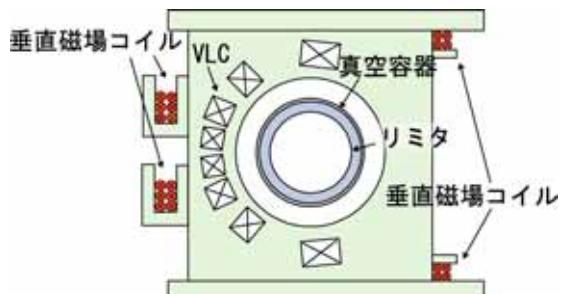


図3 装置断面と各コイルの位置

表1 装置諸元

VLC 大半径 : 0.30 m
VLC 小半径 : 0.14 m
VLC インダクタンス : $320 \mu\text{H}$
真空容器大半径 : 0.30 m
真空容器小半径 : 0.08 m
VFC インダクタンス : $105 \mu\text{H}$

背景および目的

本研究以前に行われた垂直磁場印加実験においては、垂直磁場コイル用電源として、LC放電

回路が用いられた。

しかし、この回路構成では、垂直磁場コイルに流す電流値を能動的に制御することができず、本装置のプラズマ電流の時間変化に対し、適切な垂直磁場を印加できない。そのため、プラズマリングが大半径方向の平衡を保ち続けられず、周回電圧の減衰にくらべ、プラズマ電流の減衰が早い。

また、もうひとつの背景として、プラズマ電流の立上げ時における真空容器の渦電流による不整磁場の問題がある。この不整磁場は、プラズマ電流の立上げを妨げ、着火特性に悪影響を及ぼすが、垂直磁場コイルに通常使用の向きと逆向きの電流を流すことにより、この不整磁場を軽減できることが確認されている。

以上の2つの問題を解決することにより、プラズマ電流値の増大、プラズマ立上げ特性の改善、およびプラズマ持続時間の延長を図ることが、本研究の目的である。

新たな垂直磁場コイル電源の導入

背景として述べた2つの問題を解決するため必要な垂直磁場コイル電流波形を概算した。この目標電流波形は、不整磁場打消しを目的とした負の電流値の区間（図4[1]）と、プラズマリングの大半径方向の平衡を保つことを目的とした、プラズマ電流波形に比例した電流値の区間（図4[2]）の組み合わせから成る。垂直磁場コイルの目標電流波形を実現するためには、両方向に任意の波形の電流を出力できる電源の導入が必要であり、これを製作した。

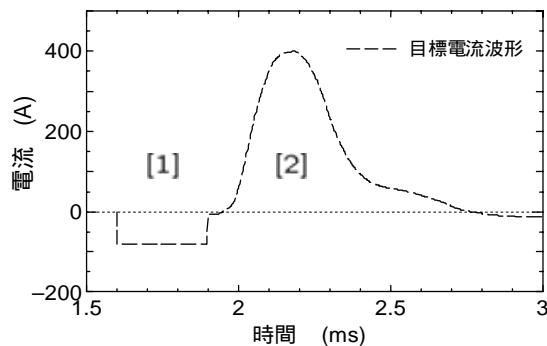


図4 目標電流波形

垂直磁場コイル電源

製作した電源は、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)を用いたインバータ方式を採用した。図5に示すように4つのIGBTのスイッチングを組み合わせることにより、表2に示す4種類

のモードで電流を流すことができ、モードの組み合わせにより、両方向に任意波形の電流を流すことができる。

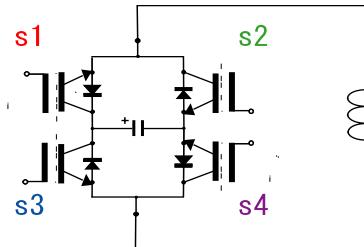


図5 垂直磁場コイル用電源 回路構成

	s1	s2	s3	s4
プラス方向電圧印加モード	on	off	off	on
プラス方向還流モード	on	off	off	off
マイナス方向電圧印加モード	off	on	on	off
マイナス方向還流モード	off	on	off	off

表2 電源の4つのモード

IGBTのスイッチングのためのゲート信号の制御は、以下のように行う。

1. PC上で目標電流波形と三角波を比較し、ゲート用パルス信号を生成する。
2. 生成した信号の出力のためのプログラムをマイコンに書き込む。
3. マイコンを作動させ出力されたゲート信号をゲート駆動回路で絶縁・增幅し、IGBTのゲートに入力する。

製作した電源を本装置の垂直磁場コイル(105 μ H)に使用し、図6に示すように目標電流波形を模擬した電流波形を実現した。

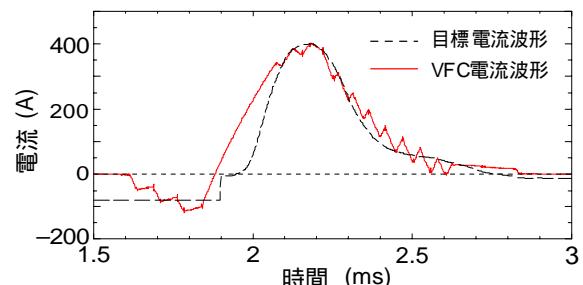


図6 新電源によるVFC電流波形

垂直磁場印加実験

等々力2号のトカマク放電によるプラズマリングに垂直磁場を印加する実験をおこなった。電源と計測の概略図を図7に示す。

本装置では、VFCの励磁に2つのイグナイトロンを、時間差をつけてONすることによりコンデンサバンクを2段階に放電する方式を採用

している。プラズマの着火はこの2段目の放電時であり、この時刻に合わせて垂直磁場コイルに電流を流し、垂直磁場を印加する。

プラズマの大半径方向の平衡をとる手順は、以下のサイクルを繰り返すことにより行う。

1. 放電条件を固定して（コンデンサバンク 5 kV 充電 / 燃料水素圧力 0.030 Pa））プラズマを生成し、垂直磁場を印加する。
2. プラズマ光分布、プラズマ電流等の計測結果を評価する。
3. VFC 電流波形を調整する。
4. (1. に戻る。)

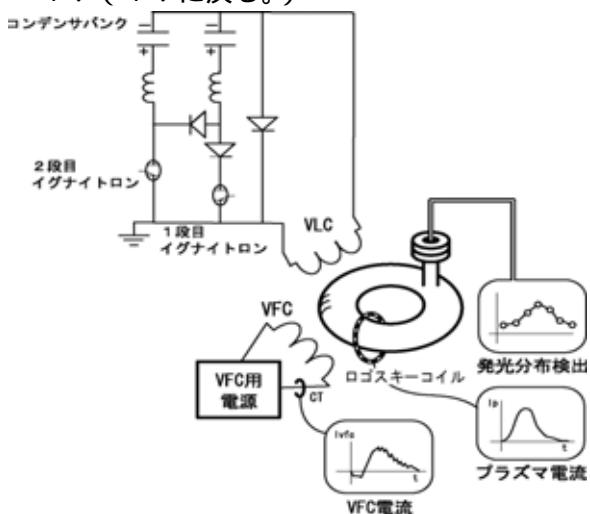


図 7 等々力 2 号の電源と計測の概略図

発光分布検出器

発光分布検出器は、真空容器内のプラズマ光を、スリットを通してポート内に設置されたフォトダイオードアレイで受光することにより、プラズマの光強度の空間分布を得る検出器である。図 8 に示す位置に取り付けられ、大半径方向、垂直方向の分布を検出できる。大半径方向は、8 個のフォトダイオードによる検出となり、各チャンネルの信号をある時間断面で整理することにより、図 9 のようにプラズマ光強度の空間分布が得られる。

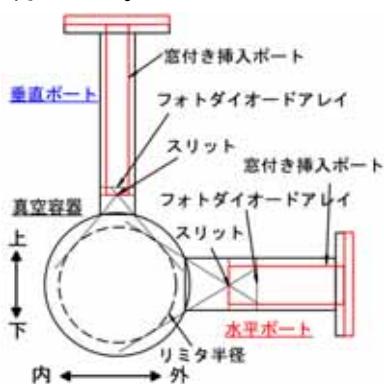


図 8 発光分布検出器取り付け位置

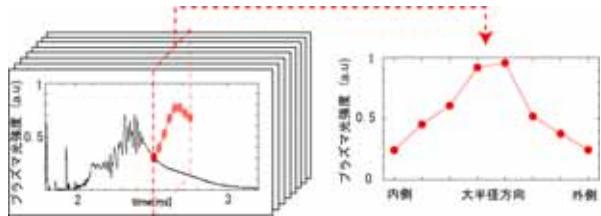


図 9 プラズマ光強度分布の検出方法

実験結果

VFC コンデンサ電圧 230 V (VFC 電流ピーク値 390 A にて、プラズマリングの大半径方向の位置的平衡をとることができた。その際の計測結果を図 10 および図 11 に示す。

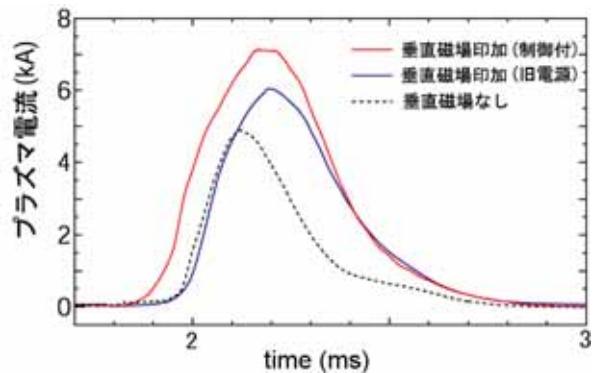


図 10 平衡時のプラズマ電流

また、このときの放電波形を図 12 に示す。時間は1段目放電開始の時刻を 0 ms としたもので、2段目放電開始は 1.8 ms である。

プラズマリングの大半径方向の平衡がとれた際のプラズマ電流値は垂直磁場の印加が無い場合に比べて約 40% 増大し、旧電源による垂直磁場印加の場合と比べても約 17% 増大した。プラズマ持続時間は、約 13% 延長された。

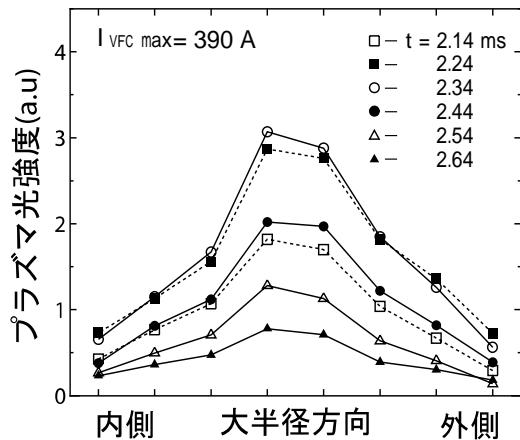


図 11 平衡時のプラズマ発光分布

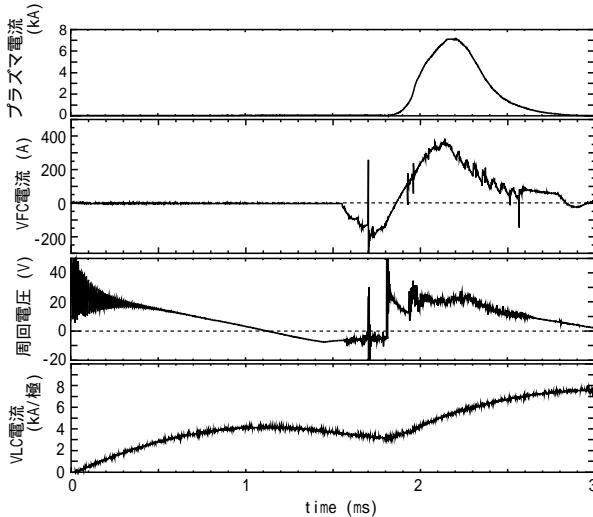


図 1.2 VFC 用 IGBT 電源を用いた放電波形例

大半径方向の平衡に関する考察

平衡がとれた実験のプラズマ電流ピーク値は約 7 kA である。7 kA の電流が流れるプラズマリングの大半径方向の平衡を保つために必要な外部からの垂直磁場を(1)式から求めると、65 G となる。(k は 1、 ρ_p は 0.2 として計算した。)

一方、平衡がとれた実験の VFC 電流は、プラズマ電流がピークの時間には、390 A 流れており、この VFC 電流から真空容器中心における垂直磁場を計算したところ 46 G となった。

つまり、(1)式から予想される平衡に必要な垂直磁場よりも少ない垂直磁場の印加でプラズマリングの平衡を保ったことになる。

これは、本装置のステンレス製の真空容器によるシェル効果（導体壁効果）が、プラズマの変位の抑制に寄与しているためと考えられる。

プラズマ持続時間に関する考察

プラズマ持続時間は、本研究により、約 $100 \mu\text{s}$ 延長された。その延長は、ほぼプラズマ電流の立ち上がり改善に起因する。本装置では、2段階の放電方式を採用し、その2段目の放電時に発生する周回電圧を利用してプラズマ電流を立ち上げる。しかし、本研究以前は着火特性の悪さから、2段目放電回路を ON した際に生じる高い周回電圧ではプラズマが立ち上がらず、その直後に起こる1段目イグナイトロン切断による高い周回電圧をきっかけにプラズマ電流が立ち上がっていた。本研究の垂直磁場印加実験時には、新たに製作した VFC 用電源により、プラズマ電流立上げ時の不整磁場を軽減できたことから、プラズマ電流が2段目放電による高い周

回電圧をきっかけに立ち上がるようになった（図 1.3）。そのため、プラズマ電流の立ち上がる時刻が飛躍的に早まり、プラズマ持続時間の延長につながった。

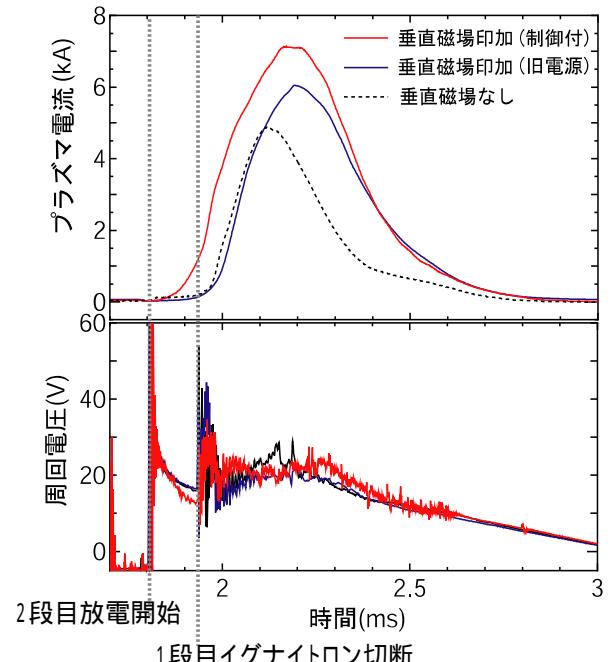


図 1.3 周回電圧とプラズマ電流の立ち上げ

結論

両方向に任意の波形の電流を流すことが可能な、垂直磁場コイル用電源を製作した。この電源を用いた垂直磁場印加実験により、VLC を用いた小型トカマク装置のプラズマ電流値を増大させた。

また、プラズマ立ち上げ時の不整磁場を軽減し、プラズマ着火特性の向上、プラズマ持続時間の延長を実現した。

今後の課題

より高精度なプラズマ位置制御を実現するためには、プラズマ位置、プラズマ電流値等をリアルタイムにフィードバックする制御方式の導入が必要である。

また、VLC 励磁用電源回路にも能動的な制御性を付加することが、さらなるプラズマ持続時間の延長等、本装置の性能の向上に必要である。