

## 36. ビリアル限界コイルを用いた小型トカマク装置の設計と製作

飯尾研究室 00M19232 中山 和郎

### 1 はじめに

磁場閉じ込め型核融合炉に最も近いとされるトカマク装置において、強磁界を発生させることは、非常に有利である。しかしこうした強磁界が求められるとき、それに伴う電磁力の大きさが問題となっている。電磁力は、コイル導体及びその支持構造材に大きな負担を与える。つまり電磁力は装置のサイズ及び性能を決定する重要な因子となっているのである。

こうした背景により、磁界コイルに発生する電磁力を大幅に低減することが可能である、トロイダル磁界コイル (TFC) とポロイダル磁界コイル (PFC) を一体としたヘリカル型ハイブリッドコイル「電磁力平衡コイル (FBC)」を開発し、これを用いた小型トカマク装置「等々力 1号」を製作した。この装置より電磁力の低減効果、及びトカマクプラズマ生成を実証してきた[1]。しかし、その後の研究活動により、コイル支持構造材を決定する最終的なパラメータは、電磁力を荷重としたコイル及びコイル支持構造材に生じる最大応力であり、FBC の電磁力低減効果は発生応力の低減に繋がるが、最適形状でないことが明らかになった。

本研究は、構造体を決定する最終的な因子である発生応力に対して最適化を行った FBC の発展型コイルに相当する「ビリアル限界コイル (VLC)」を新たに提案し、これを磁界コイルとして用いた小型トカマク装置「等々力 2号」の設計、製作を行ったものである。

### 2 VLC のトカマク装置への適用

#### 2.1 ビリアル定理について

電磁力の作用する物体だけに電流が流れている場合、ビリアル定理は以下の式で書き表せる。

$$\int_V \sum_i \sigma_i dV = \int_V \frac{B^2}{2\mu_0} dV = E$$

ここで  $\sigma_i$  は主応力、 $B$  は磁界強度、 $E$  は磁気エネルギーを表す。これは、応力の体積積分が磁気エネルギーに相当することを意味する。すな

わちこの式より、構造体に生じる最大応力を低減させるためには、負になる圧縮応力をなくし、一様な引張応力分布を達成することが必要であることが示される。

#### 2.2 ビリアル限界条件

ビリアル定理をアスペクト比 (大半径 / 小半径) が十分大きく、かつ厚みが無視できる場合のトーラス環に適用する。最大応力を低減する条件は、図 1 に示すトロイダル方向応力  $\sigma_\phi$  とポロイダル方向応力  $\sigma_\theta$  が釣り合う時で、ピッチ数  $N$  (コイルのトロイダル方向 1 周に対するポロイダル方向ターン数) とアスペクト比  $A$  を用いて以下の式で示される[2]。

$$N^2 = \frac{2}{3} A^2 \log(8A)$$

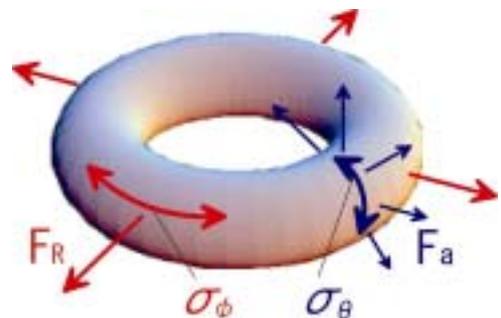


図 1 トーラス環に発生する応力

#### 2.3 有限要素法を用いた VLC の応力解析

ビリアル限界の条件式は、多くの仮定を用いて導かれる式であり、VLC の工学的応用想定した場合に、その有用性を正確に示す必要がある。そこで、有限要素法 (FEM) プログラムコード NASTRAN による構造解析計算を行い、VLC の応力状態について詳細な評価を行った。以下に本解析の手順を示す。

コイル断面の座標データの計算。(コイルの 3 次元形状作成)

精度の高いとされる 6 面体の有限要素 (いわゆるメッシュ) を作成。

境界条件（節点1点拘束）の作成。  
 材料特性の入力。  
 要素形状データの作成。  
 要素形状データに対応した荷重条件の決定。（自己電磁力の計算）  
 有限要素法の計算。（*NASTRAN*実行）

VLC のモデルは、核融合装置への適用に的を絞って、低アスペクト比であるピッチ3形状を構築した。また比較解析を行うために、FBC ピッチ4、変調ピッチ角制御を行わない単純ヘリカルコイル(HC)のピッチ3、ピッチ4についても同様にモデル化した。図2に全モデルの鳥瞰図を示す。また有限要素の形状は、計算精度に大きな影響を与えるが、本解析モデルのメッシュは、形状チェック[3]により、捻り、歪み、辺比などすべての項目において閾値を十分満たしている。図3にメッシュを作成したFEMモデルの例を示す。

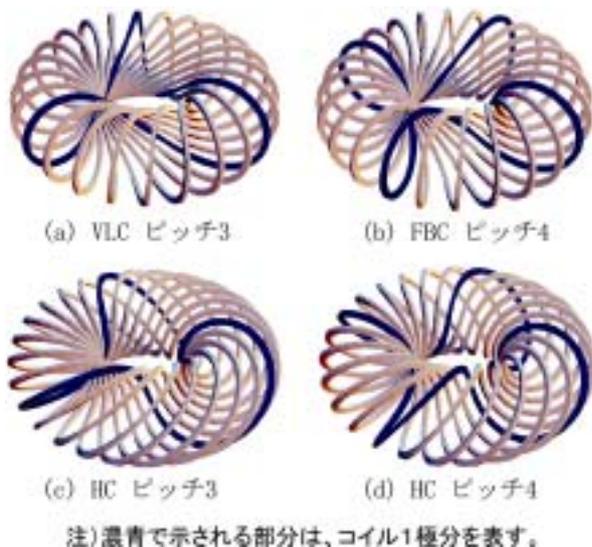


図2 解析モデルのコイル鳥瞰図

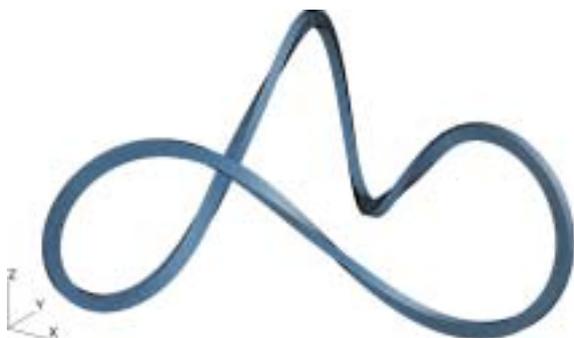


図3 VLC ピッチ3形状のFEMモデル

図4に強度評価に用いられる von Mises の相当応力[4]の解析結果を示す。また表1にはこの応力の最大、最小値(  $\sigma_{max}$ 、  $\sigma_{min}$  )をまとめる。VLC は他のコイルと比較して、応力分布の差、最大応力が最小となっており、これより VLC の条件である応力の平準化が達成されていることが分かる。ゆえに VLC が磁界コイルとして最適であることが示された。

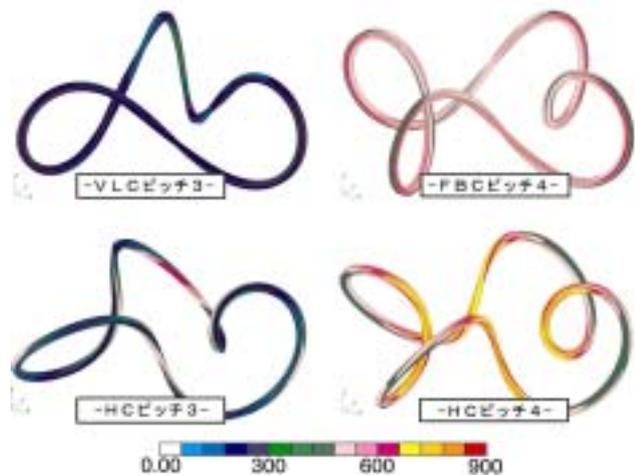


図4 相当応力の3次元分布図(単位は  $N/mm^2$ )

表1 相当応力の最大、最小値

応力成分 ( $N/mm^2$ )	VLC3	FBC4	HC3	HC4
$\sigma_{max}$	395	665	627	892
$\sigma_{min}$	66.4	164	49.2	127
$\sigma_{max} - \sigma_{min}$	329	501	578	765

### 3 小型トカマク装置の設計と製作

#### 3.1 新装置「等々力2号」の設計概要

VLC を磁界コイルとして適用するだけでなく、前装置「等々力1号」で課題となっていた点を改善することを目的とした、新装置「等々力2号」を設計、製作した。以下に新装置の設計概念を記す。

- ・ 応力を平準化及び最小化した VLC を磁界コイルとして適用したヘリカル型ハイブリッドコイルトカマク装置を建設する。
- ・ 最適な変調ピッチ角計算によるコイル軌道の採用により、プラズマ着火に妨げとなる不整磁界を極力低減する。
- ・ 真空容器ポートの径を最大限確保し、リーク原因となるフランジ部の構造を工夫、改善することによって  $10^{-6}$ Torr 以下の高真空

達成を目指す。

- ・ 垂直磁界コイルを最適な場所に配置し、プラズマ位置制御を行うことによって、プラズマ電流持続時間の長時間化を目指す。

以上の設計概念を踏まえて、真空度及びコイル張力、導体耐熱限界、トロイダルリップルなどを検討した結果、表 2 に記す装置設計パラメータを決定した。図 5 には装置全体構成の鳥瞰図を示す。

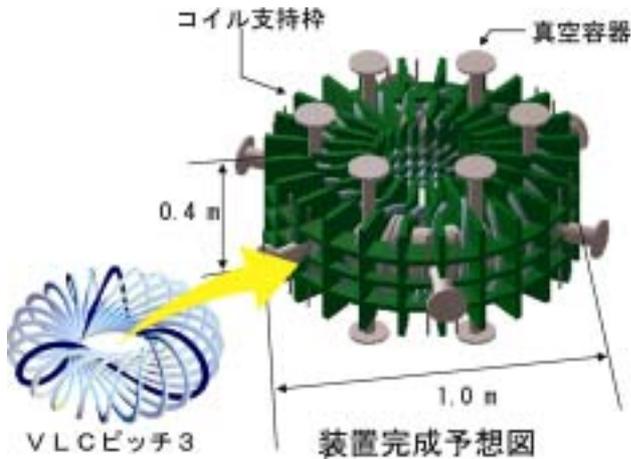


図 5 装置全体構成の鳥瞰図

表 2 装置設計パラメータ

パラメータ	値
コイル大半径	0.30 m
コイル小半径	0.14 m
コイルアスペクト比	2.14
コイルピッチ	3
コイル極数	8
インダクタンス	1.53 mH
真空容器大半径	0.30 m
真空容器小半径	0.08 m
中心トロイダル磁場	1.55 T
プラズマ小半径	0.07 m
プラズマ電流	40.0 kA
トロイダルリップル	約 2 %

### 3.2 装置の磁界強度

VLC は真空容器内の不整磁界を極力低減することが可能であるが、電流導入部分を適切に配置しないと不整磁界を生成し、プラズマ着火に適した磁界配位でなくなる可能性がある。そこで図 6 のように電流導入部分の影響を考慮した、真空容器内の磁界強度計算を行った。

プラズマ着火には、トロイダル磁界強度で規格化したポロイダル磁界強度  $B_P/B_T$  が  $10^{-3}$

以下なることが望ましいとされる。そこでトロイダル方向全周に渡って平均した規格化ポロイダル磁界強度の分布を図 7 に示す。

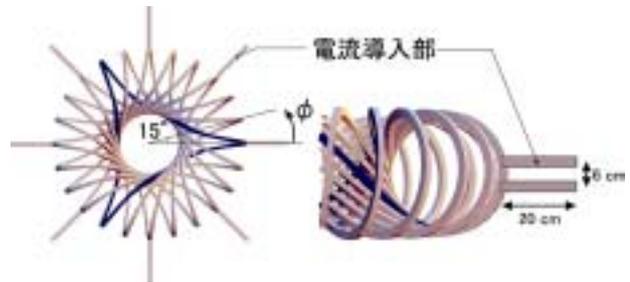


図 6 電流導入部分の模擬

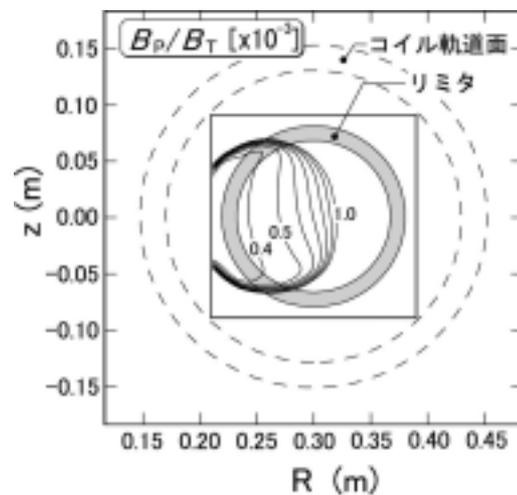


図 7 規格化ポロイダル磁界強度分布

同図より、トーラス中心側に偏った領域であるが、リミタ半径内全体の約半分相当の領域が規格化ポロイダル磁界強度  $10^{-3}$  以下を達成していることが分かる。よって本装置は不整磁界を抑え、プラズマ着火に適した磁界配位になっていることが示された。

### 3.3 垂直磁界コイルの最適配置

VLC はヘリカル形状であるため、コイル外側にポロイダル磁界を発生する。このため VLC 電流の立ち上げに際して、垂直磁界コイル (VFC) には逆起電力が生じる。よって VFC の能動的制御を行うためには、VLC との相互インダクタンスを最小にする必要がある。VFC は、このような条件を満たし、且つプラズマ位置を安定的に保つ指標として  $n$ -index の安定条件を計算し、具体的な配置を決定した。決定された VFC の配置と  $n$ -index の安定領域をそれぞれ図

7、8に示す。図8より、真空容器内のほとんどの領域において安定条件を満たしていることが示されている。

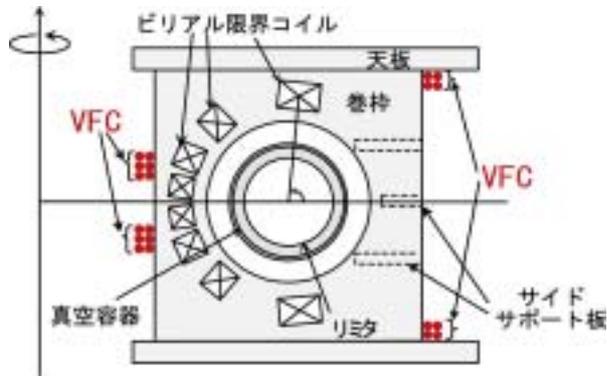


図7 VFCの配置と装置のポロイダル断面

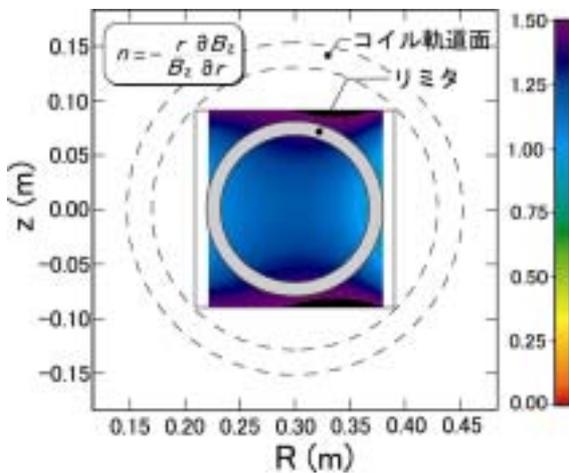


図8 真空容器内  $n$ -index 安定領域

### 3.4 装置の製作状況



図9 真空容器ベーキング及び排気試験の様子

完成した真空容器は、真空容器内溶接部の粒子酸化による多量のアウトガスが心配されたが、図9に示すように、容器を電熱線で覆って断熱を施し、約100 のベーキングしながら排気を5~6

日間行ったところ、真空度は $1.0 \times 10^{-6}$  Torrに達し、目標どおりの高真空が得られることが確かめられた。なお、コイル支持枠の製作も完了している。

## 4 結論

### 4.1 研究のまとめ

1. ビリアル定理より支持材量を最小化するビリアル限界条件を導出し、この条件を満たすVLCを磁界コイルとして用いた小型トカマク装置の設計を行った。
2. VLCの核融合装置への応用を想定した場合における形状をモデリングし、FEMによる構造解析を行い、VLCの詳細応力分布を求めた。これよりVLCが応力の平準化、最小化を実現していることを示され、磁界コイルとしての有用性が明らかになった。
3. 電流導入部分を含めた詳細な磁界強度計算を行った。これよりプラズマ着火に支障のない磁場配位が得られていることを示した。
4. VFCの配置を決定し、プラズマの平衡が安定に保たれる最適配置であることを示した。
5. 真空容器のベーキング及び排気試験を行い、目標値である $1.0 \times 10^{-3}$  Torrを達成した。

### 4.2 今後の課題

1. プラズマ計測用各種機器を真空容器に設置し、計測システムを完成させる。
2. 真空容器渦電流の影響を詳細に評価し、予想される磁界配位、プラズマ着火特性を検討する。
3. 最適な運転方法を検討し、放電回路、電源を改良する。

### 参考文献

- [1] 近藤潤次、他、『電磁力平衡コイルを用いたトカマク装置の実験』電気学会論文誌B、118、4、p444~451、1998年)
- [2] 筒井広明・野村新一・嶋田隆一、『Virial定理の磁気閉じ込め核融合装置への応用』プラズマ核融合学会誌、77、No.3、p300~308、2001年)
- [3] MSC.Patran 基礎セミナーコースノート Version 9.0 (日本エムエスシー株式会社)
- [4] 三村宏・町田進 共著、『基礎材料強度学』(培風館、2000年)