

YBCO線材のコイル化技術開発と 磁気浮上コイルシステムの高度化

56207 加藤 肇

(指導教員 小川 雄一 教授)

Key Words : YBCO、Digital control、Tilt control、non-controlled levitation

1. はじめに

Voyager2号などにより、木星磁気圏に > 100%の超高プラズマが観測され、また、Mahajan-Yosidaの理論において、フローイングプラズマの自己組織化による超高ベータプラズマの可能性が指摘され、磁気浮上内部導体装置Mini-RT、およびRT-1が建設された。

内部導体装置の高性能化の方法としては、以下の3点があげられる。

- ・ Bi-2223線材で作られているコイルをYBCO線材によるコイルに変更することにより、電流値を増加させることができ、浮上コイルのコンパクト化や磁場強度の強化を行うことができる
- ・ チルトやスライディング不安定性の安定化技術の導入により、現在の装置には設置されていない垂直磁場やトロイダル磁場の導入が可能となり多様な磁場配位でのプラズマ閉じ込めが可能になる
- ・ 無制御での磁気浮上の可能性を模索する

この3点の基礎技術の開発を目的として、本研究は行われた。

2. YBCO線材を用いたコイル製作

YBCOのコイルはBi2223の10倍程度の臨界電流密度があり、磁場中での臨界電流特性に優れているため、Mini-RTの性能の向上が期待できる。しかし、YBCO線材のコイル化技術と接続方法はまだ確立されていないため、その開発を行った。

本研究でのコイル製作にはISTEC製のYBCO線材とAMSC製のYBCO線材を用いた。

ISTEC製の線材は250m程度まで長尺化ができており、臨界電流値においてもAMSC製のものより優れている。しかし、コイル製作においては、円環状にした際にたわみが生じることと、はんだ付けができないことによりコイル化を断念した。

AMSC製のYBCO線材を用いたコイル製作においては、自動巻き線機を使用し、一定の速度(2.4rpm、14mm/s)の巻き線を行い、製作段階での線材の歪みを解消することと、コイルの構造をダブルパンケーキとし、上層と下層をはんだ付けによるラップ接続を

行うことを目的としてコイル製作を行い、コイル化には問題が無いことが確認された。

接続抵抗は、 $94.8\text{ n}\Omega$ となり、Bi-2223の1/4程度の接続抵抗となった。この値から計算される電流減衰時定数は180時間であるが、実測値では81時間となり、線材に劣化が起こった可能性がある。劣化の原因として考えられるものとその対策は以下の3点となる。

- ・ 巻き線の際に応力管理をしていなかったため、トルクを一定にして巻き線を行う方法を用いる必要がある。
- ・ はんだ付けによる熱でコイルに歪みが生じていることが考えられるため、熱を加えすぎないはんだ付けの方法を採る。
- ・ 急速な冷却によりコイルが劣化している可能性があるため、伝導冷却による冷却を行う。

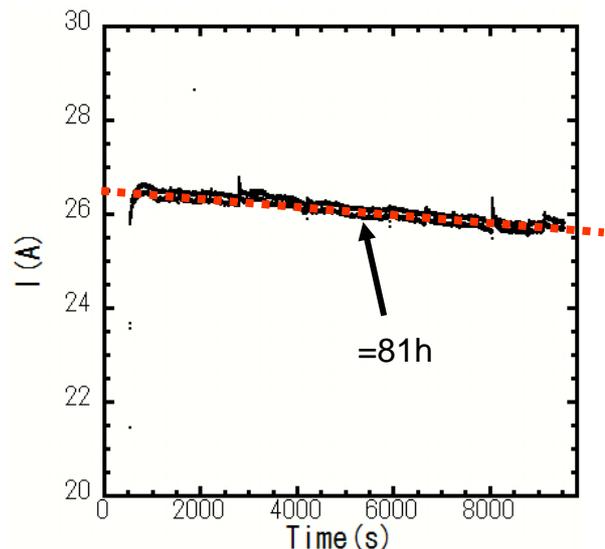


図1. コイルの電流減衰時定数測定

3. 磁気浮上コイルのデジタル多軸制御システムの開発

超伝導コイルの制御コイルと位置検出系は図1のような構成になる。このシステムでは、レーザー変位計P1~P3で得られる位置信号で浮上コイルの垂直

方向の位置とx軸、y軸に対する傾きを求め、それを補正するようにサドルコイルに通電しフィードバック制御を行うことによって、チルト制御を行う設計になっている。また、レーザー変位計P0、P90によって浮上コイルのx-y平面上での位置を検出し、サドルコイルに通電することによって、スライディング制御を行えるように設計されている。

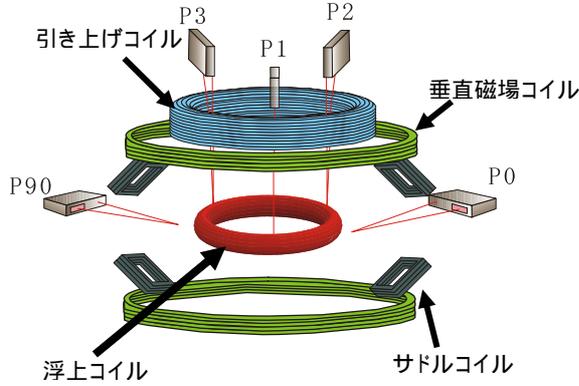


図2. 浮上コイルの姿勢制御システム

この多軸制御系をアナログ処理によって構築すると、アナログ処理上のオフセットの問題や、システムが非常に複雑になるといった問題がある。そのため、National Instruments社製のPXI8196、PXI7833、および、制御ソフトであるRabVIEW-FBGAを導入してデジタル制御系を構築した。これにより、シフト調整、位置計算処理、目標値に関してデジタル処理を行い、オフセットの問題の解決と同時に制御系のコンパクト化を計ることができる。また、プログラミングによる制御回路の製作を行うこととなるため、回路製作が容易になる。

この回路を用いてチルト制御を行った結果が図2である。この制御は4つのサドルコイルを並列に接続し、ミラー磁場を作り制御を行っているため、セラィディング制御は行っていない。また、チルト安定な状態から強制的にチルトを起こしての制御となっている。そのため、運動方程式は式となる。

$$m \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = 2\pi I_F B_r - m\alpha\omega^2$$

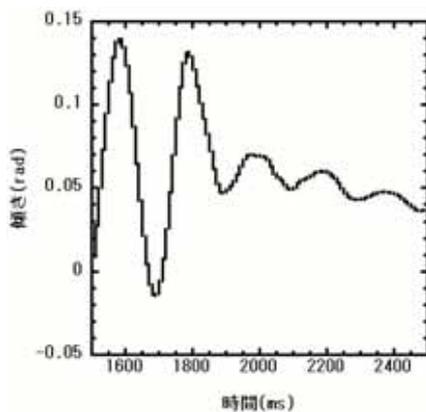


図3. チルト制御結果

図2で、0.05rad付近にチルトが収束するように制御が行われているが、これはコイルの重心のずれなどによる初期状態での傾きをデジタル制御系でオフセットとして用いているからである。

4. 新たな磁気浮上方法の探究

小型HTSコイルは、無制御でも浮上させることが可能である。引き上げコイルの電流を大きくすることで、磁束保存によりHTSコイルの永久電流は大きく変化し、力学的に安定化するために無制御にて浮上するのである。この場合の運動方程式が式で、磁束の保存が式となる。

$$F(z) = 2\pi r_F I_F(z) B_r(z)$$

$$L_F I_F(z) + M_{FL}(z) I_L = \Phi_0$$

式、式により計算しコイルの無制御状態での力学的安定点を示したのが図4であり、Z=8.7cmの点に戻るよう浮上コイルの電流値が増減するようになっている。なお、この浮上条件を満たすためには、引き上げコイルの電流値が浮上コイルの電流値に比べて十分に大きいことが必要であり、Mini-RT以上の規模の装置ではこの条件は満たせない。

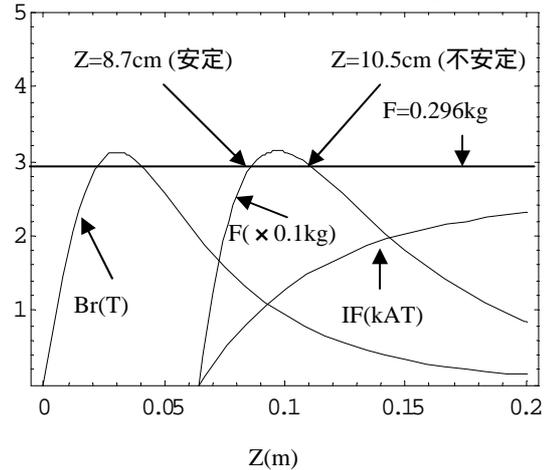


図4. 制御無しでの浮上の条件

5. まとめ

AMCSのYBCO線材ではコイル化が可能であり、従来どおりのはんだ付けによる接続ができた。また、コイルの磁気浮上にも成功したため、浮上コイルとして用いる点では問題はないと考えられる。ただし、その製作の過程で劣化が起こっていることが考えられ、その対策を行うことが必要となった。

コイルの浮上制御系にデジタル制御を導入しそれによる浮上制御とチルト制御が可能になった。

計算によって示された無制御状態での浮上が実験結果と一致しており、この浮上方法は超伝導軸受けなどへの応用が期待される。

