

東京大学 大学院新領域創成科学研究科  
基盤科学研究系  
先端エネルギー工学専攻

平成 18 年度

修士論文

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

2007 年 2 月提出  
指導教員 小川 雄一 教授

56207 加藤 肇

# 目次

## 第1章 はじめに

- 1-1 核融合とは . . . 4
- 1-2 超伝導材料の開発の歴史 . . . 5
- 1-3 磁気浮上超伝導コイルの利用の現状 . . . 8
- 1-4 高ベータプラズマの閉じ込め . . . 9
- 1-5 過去の磁気浮上内部導体コイルを用いたプラズマ閉じ込め装置 . . . 10

## 第2章 Mini-RT の概要

- 2-1 Mini-RT の構造 . . . 12
- 2-2 Mini-RT における磁気浮上コイルの磁気浮上 . . . 17
- 2-3 今後の Mini-RT . . . 22

## 第3章 浮上コイルの高度化

- 3-1 YBCO線材を使ったコイルの製作 . . . 24

3-2	YBCOコイルの特性の測定	・・・31
3-3	超伝導コイルの制御なしでの浮上	・・・35
<b>第4章 磁気浮上コイルシステムの高度化</b>		
4-1	浮上コイルのフィードバック制御	・・・41
4-2	FB-RT 装置の構成	・・・45
4-3	デジタル制御系の導入	・・・48
4-4	チルト制御実験	・・・51
<b>第5章 結論</b>		
<b>参考文献</b>		
<b>謝辞</b>		

# 第1章 序論

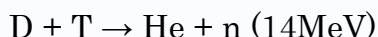
## 1 - 1 核融合とは

現在ある核分裂エネルギーを利用する原子力発電に替えて、核融合エネルギーを用いた発電が注目されている。原子番号 28 ぐらいまでの軽い元素では、核子一個あたりの結合エネルギーが比較的小さいので、原子核融合によって余分なエネルギーが放出される可能性がある。しかし、原子核の電荷が互いに反発して反応を阻害するため、実際にエネルギーを取り出して利用できるような形で反応を起こすことが可能なのは、電荷がごく小さい水素やリチウムなどに限られると見られている。実際に核融合反応で発電するためには、原子核が毎秒 1000km 以上の速度でぶつかりあう必要がある。この速度の実現には、「発電炉内でプラズマ温度 1 億度 C 以上、密度 1 立方センチメートルあたり 100 兆個とし、さらに 1 秒間以上閉じ込めることが条件」と、いうことになる。現在 (2006 年 9 月) の到達レベルは密度は 500 兆個と大幅に条件をクリアしているが、依然として温度条件等の壁は高く、挑戦がつづいている。利点としては、

- ・原子力発電で問題となる高レベル放射性廃棄物が生じないこと
- ・原子力発電と同様、温室効果の原因となる二酸化炭素の放出が少ないこと
- ・水素など、普遍的に存在し、かつ安価な資源を利用できること
- ・海水中の無尽蔵の重水素やリチウムを活用していく構想があること
- ・核分裂反応のような連鎖反応がなく、暴走が原理的に生じないこと

などが挙げられる。技術的困難としては、1 億度程度の高温でなければ十分な反応が起こらず、そのような高温状態では物質はプラズマ状態となり、通常の容器に安定して収納することができず、そもそもこのような高温に耐えられる融合炉の材料が無い点等にある。そのため磁力線を利用してプラズマを保持する磁気閉じ込め方式などが開発された。現在最も研究が進んでいるのは、磁気閉じ込め方式の一種であるトカマク型であり、現在計画中の ITER (国際熱核融合実験炉) もこの方式を用いている。しかし、このトカマク型にも弱点がある。核融合のさい電気的に中性の性質を持つ中性子が飛散し、炉を傷つけるために、

炉の耐久力が問題となる。とりわけITERでは前述のD-D反応よりも反応断面積が約 10 倍大きいD-T反応を用いる計画であるが、D-T反応では



と高速中性子が発生する。この高速中性子により炉の構成材内部では多数の原子が弾き飛ばされ(カスケード)、材料内部に欠陥が生じ原子レベルで空洞が生じる。これが結果として材料の膨張(スウェリング)につながり、この状態ではもはや十分な耐久性を維持出来ない。また、脆化以外にも高速中性子により炉を構成する原子が核変換してしまい、材料が放射化することから、高レベル放射性廃棄物が生成する問題も挙げられている。その他、各種の閉じ込め方式があり、それぞれ各国で研究が進められている。日本では、核融合研究の中心は日本原子力研究所のJT-60(トカマク型)、核融合科学研究所などで進めているヘリカル型と、大阪大学で研究が進んでいるレーザー核融合である。圧力の低いプラズマを保持することは比較的容易であるが、エネルギーとして利用可能な程度の圧力のプラズマを保持するのは難しく、前述のJT-60で、高圧力プラズマの保持時間は 30 秒程度である。(この 30 秒という時間は加熱装置である高周波装置と中性粒子ビーム装置の稼働時間の上限で決まっているようである。現在ITERのために 1000 秒以上稼働できる装置を開発中である。)また、保持のために投入するエネルギーに比較して反応により得られるエネルギーはまだ小さく(Q値 ~ 1.25)、世界の各種装置で核融合利得 1 を若干超える程度である。これらの課題については、ITERで研究が進められる予定である。(ITERの目標値はQ値 ~ 10)

## 1 - 2 超伝導材料の開発の歴史

超伝導材料の発見は 1914 年に遡る。オランダの Kamerlingh-Onnes は極低温での金属の電気抵抗の測定中に、水銀の電気抵抗が 4.2K 以下で消失することを見出し、これを超伝導と呼んだ。Kamerlingh-Onnes らは水銀以外にも鉛、スズなどの金属も低温で超伝導性を示すこと、さらに超伝導状態から電気抵抗がある常伝導状態へと相変化する温度(臨界温度  $T_c$ )および磁界(臨界磁場  $H_c$ )が存在し、その値は資料の材質によって決まる値であることを示した。その後の研究により、多くの金属元素が低温で超伝導性を示すことが明らかにされ、薄膜や合金といった加工して得られる金属間化合物や有機物を含めれば 1000 種以上の超伝導体が存在する。

1973年に $\text{Nb}_3\text{Ge}$ スパッタ薄膜で $T_c=23.2\text{K}$ が達成されるまで臨界温度は上昇したが、その後13年間 $T_c$ が $23.2\text{K}$ より高い物質は発見されなかった。ところが1986年に $\text{La-Ba-Cu-O}$ の材料を焼結したセラミックスが超伝導を示すことが発見され、酸化物超伝導体の研究が進められた結果、高い $T_c$ の可能性が認められた。その後、各国の研究機関の開発競争により、液体窒素温度よりも高い $T_c$ を持つ高温超伝導体が現れた。金属系低温超伝導材料を用いるためには、液体ヘリウムによる冷却が必要不可欠であり、特殊な大型研究用途やごく一部の民生応用以外には超伝導の実応用という観点から難しいものがある。しかし、高温超伝導材料は臨界温度が高いために液体窒素を用いた冷却が可能であり、液体ヘリウムで冷却する際の経済性の悪さや取り扱いの難しさが克服された。また、特に低温では臨界磁場が金属系超伝導材料に比べて圧倒的に高いことや、併せて、臨界電流密度も高く取れることから、高磁場コイルへの適用に有望と考えられている。

高温超伝導材料のうち、ビスマス系材料は、1987年に日本で発見されたものであり、現在最も実用化が進んでいる。 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ の組成でBi-2212と呼ばれる低温相と $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ の組成でBi-2223と呼ばれる高温相の2種類がある。Bi-2223は臨界温度が $110\text{K}$ と高く、液体窒素による使用が十分に可能であり、すでに世界の数社において単長で $1\text{km}$ を超える線材の製造が可能になっている。現在製造が行われているのは、いずれも幅が $4\text{mm}$ 程度、厚みが $0.2\sim 0.3\text{mm}$ のテープ状のものである。後に述べるイットリウム系線材と対比して「第1世代高温超伝導線材」と呼ばれ、大電力輸送用の超伝導ケーブルや変圧器、モータなど、各種の民生用電力機器への応用に期待が持たれ、すでに多くのプロトタイプが製作されるに至っている。

上述のようにビスマス系線材については、既に長尺線材の開発に成功すると共に、様々な応用機器が試作されている。しかしながら、特に液体窒素温度で用いる高温領域では磁場による特性低下が大きいいため、実用的には $20\text{K}$ 程度の低温領域で使用押されることが多い。これに対し、希土類(RE)系の超伝導材料は、磁場中での臨界電流特性に優れており、コイルとしても使用が可能であるため、将来有望である(図1)。希土類元素としてイットリウムを用いた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ は、YBCO、あるいはY123と表記され、「イットリウム系」あるいは「Y系」と称される。これは1987年に米国で発見された酸化物で、 $90\text{K}$ の臨界電流を持ち、液体窒素温度より高い温度でも使用可能な本格的な高温超伝導材料として最初に見つかったものであるとともに、現在でも本命の材料となっている。

イットリウム系線材のYBCO層の厚みは、現在のところ、 $1\sim 2\mu\text{m}$ となっており、臨界電流密度としては、長尺線材においても、 $77\text{K}$ 、自己磁場において数万

A/mm<sup>2</sup>が達成されている。これにより、10mm幅のテープとして、臨界電流 250A にいたる線材も作成されている。

上述のように、イットリウム系線材はビスマス線材と比べて、臨界電流密度が格段に高く、また、温度が高い状態においても臨界電流密度が急激には低下しないため、磁場を発生するコイルとして用いることにも有望である。また、現在のものよりもさらに効率の高い超伝導送電ケーブルの製作にも期待が持てる。このため、イットリウム系線材はビスマス系線材と対比して「第2世代高温超伝導線材」と呼ばれ、各国で開発競争が行われている。今後、交流損失や安定性について、十分な検討が進められる必要がある。コイルに用いられる場合には、コイル内の導体への磁場の印加角度の変化による特性の変化を検討することが必要である。大型の核融合装置用超伝導コイルへの適用を考えて、イットリウム系線材を集合、および、転移した導体が試作されている。また、イットリウム系線材を用いた大電流要領導体を想定した核融合炉の設計も一部行われている。

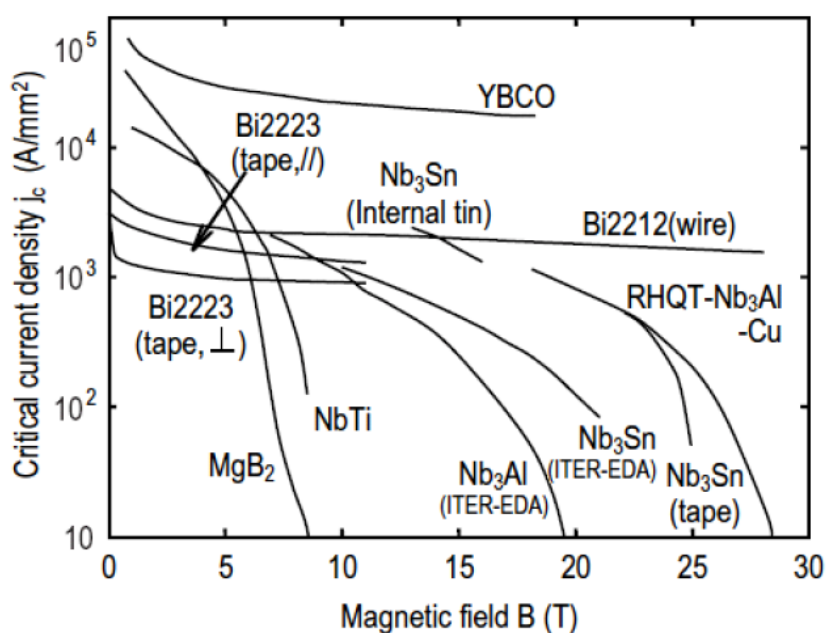


図 1 . 各種超伝導線材の臨界電流特性

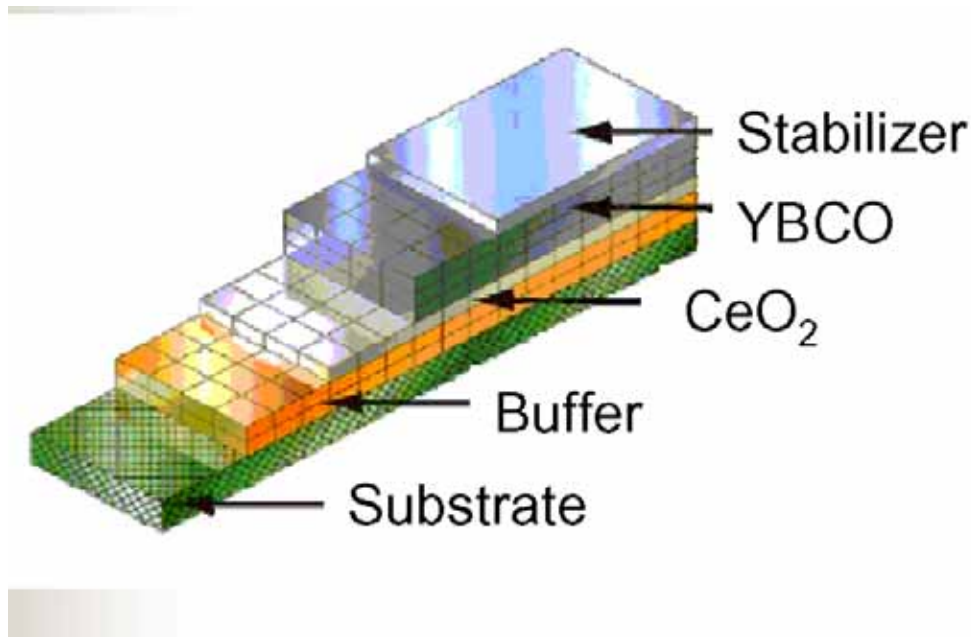


図 2 . YBCO テープの断面組成

### 1 - 3 超伝導コイルの利用の現状

Bi-2223 線材を使って第 2 章で説明を行う Mini-RT 装置や RT-1 装置の磁気浮上超伝導コイルの巻線も行われ、良好な特性を得ることができている。また、JR が開発を進めている磁気浮上式リニアモーターカーMAGLEV の車両搭載コイルにもこの線材で巻かれた高温超伝導コイルが用いられ、実際の走行試験において従来のニオブチタンコイルと遜色のない結果が出るにいたっている。一方、Bi-2223 線材を用いた超伝導送電ケーブルについては、世界中で開発が進められており、実際に数百 m 長の超伝導ケーブルの試作とそれを用いたフィールド試験も実施されている。

そのほか、この線材の大型超伝導機器への応用としては、常温の外部電源から超伝導コイルに接続するためのインターフェイスである電流リードに適用され、既に 80kA 級のもが開発されている。また、小型の電流リードについては、すでに実用化され市販されてもいる。この線材について、今後は、さらなる組織改善による臨界電流密度の向上や、高強度化、コストの低減等の改良が見込まれている。

一方、もうひとつのビスマス系線材である Bi-2212 は、Bi-2223 に比べて臨



界温度は低いものの、低温において磁場中における臨界電流密度が高いのが特徴である。そのため、高磁場を発生するコイルへの応用に期待がもたれており、超伝導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)や NMR、MRI などへの適用が進められている。この線材の場合、丸線形状でも高い電流密度を得られていることは光学的に重要であり、テープ形状に限定されている Bi-2223 に比べると大電流容量の大型導体を製造する観点で有望である。

## 1 - 4 高ベータプラズマ閉じ込め

通常「プラズマ」というと、電離した気体を意味し、したがって、平均すると電氣的に中性の荷電粒子多体系を指す。核融合エネルギーの研究に関連して進歩してきた高温プラズマの物理も、主として中性プラズマを対象としたものである。しかし、プラズマ物理は、電磁力によって相互作用する多粒子系の「集団現象」に関わる非線形科学として進化し、特に中性条件を取り除いた「非中性プラズマ」の研究はプラズマ物理の視界を格段に広げるとともに、さまざまな分野が関連する新領域の創成につながるものと期待される。

非中性プラズマは、中性プラズマとは異なり、荷電粒子集団自体が持つマクロな電荷による「自己電場」を有し、これが集団総体の運動と構造を支配する主要因となる。この点は、銀河などの重力多体系に類似する（重力は引力であるが、静電力は同種粒子に対して斥力である点が異なり、更にプラズマでは磁気相互作用を含むローレンツ力の複雑性が加わる）。銀河が自己重力に対抗して回転する平衡状態を作る様に、非中性プラズマは自己電場に対抗して静磁場に対する回転がバランスした平衡状態を作る。この種の平衡状態は、回転系の実効的なポテンシャル場の中での「熱平衡状態」となり得る。すなわち、運動論的な意味における「緩和状態」である。自己場のない系では、これに対応する熱平衡状態は一様分布の自明な状態ではないが、自己場をもつ系の熱平衡は、ある束縛条件（総体の角運動量など）のもとで「構造をもった」状態となり得るのである。この「熱平衡」たる平衡は、さまざまな揺らぎに対して安定な構造であると予測される。

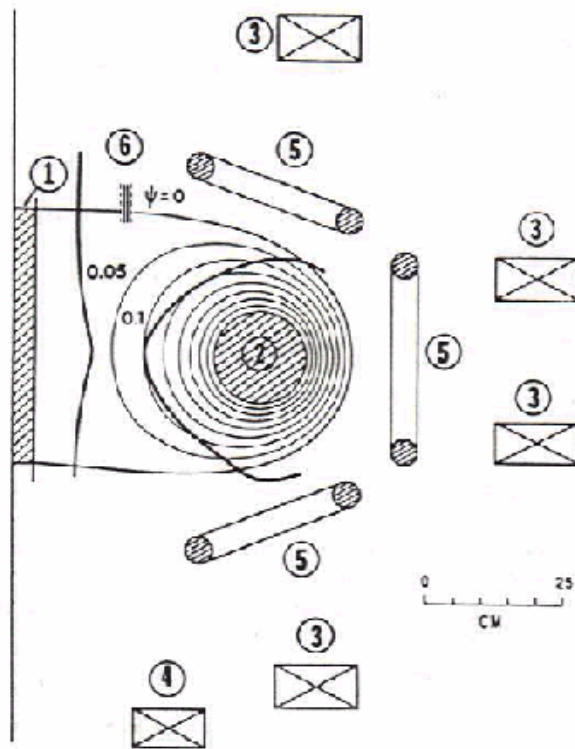
我々の研究室では円環状の磁気浮上内部導体コイルを有するトーラス型プラズマ閉じ込め装置(Mini-RT)において、非中性プラズマを用いた先進的核融合(D-<sup>3</sup>He等の核融合)のための超高ベータ( $\beta > 1$ )炉心プラズマを閉じ込めることを目的とした研究が進んでいる。

## 1 - 5 過去の磁気浮上内部導体コイルを用いた

### プラズマ閉じ込め装置

磁気浮上型内部導体コイルを用いたプラズマ閉じ込め装置としては、古くはレビトロン、プリンストンの FM-1 そしてスフェレータがあり、最近では MIT 等による LDX 装置などが挙げられる。スフェレータやレビトロンは、浮上コイル周辺に安定化シェルやコイルを配置することで、不安定化を防いでいるという特徴がある。また、スフェレータの予備実験では制御精度が  $25.4[\mu\text{m}]$  を達成し、制御磁場も定常磁場の 0.5% 以下に抑えられている。その結果、内部導体コイルが支持棒で支えられていたときに比べ、プラズマの閉じ込め時間は大幅に改善された。

高速プラズマ流を利用した動圧によるプラズマ閉じ込めでは、ベータ値が 100% を超える平衡解の可能性が理論的に示されている。但しそのためには、プラズマ流をアルフベン速度にまで高速化させる必要がある。ここではトロイダル方向の高速プラズマ流を、プラズマを非中性化することにより形成される径方向電場  $E$  と、ポロイダル方向磁場  $B_p$  との  $E \times B$  ドリフトで発生させる。



トロイダルコイル      浮上用超伝導コイル      外部磁場コイル  
 反発コイル      安定化コイル      リミッター

図 3. スフェレータ

## 第2章 Mini-RT の概要

われわれの研究室では、内部導体型プラズマ閉じ込め装置 Mini-RT での研究が行われており、本研究で行った YBCO でのコイル製作技術の開発、デジタル制御系の導入、浮上コイルの多軸制御は、Mini-RT 装置を高性能化するための基礎となるものである。この章では、その Mini-RT の概要と超伝導コイルの浮上制御、そして今後の Mini-RT について述べる。

### 2 - 1 Mini-RT の構造

Mini-RT 装置の概観を図 4 に示す。磁場発生コイルとして、現在の Mini-RT 装置には、

- ・ 磁気浮上内部導体コイル
- ・ 引き上げコイル

が設置されている。

また、現在は設置されていないが、設計がされているコイルは

- ・ トロイダルコイル
- ・ 垂直磁場コイル
- ・ サドルコイル

である。

内部導体コイルを磁気浮上させるには、装置上部にコイルを設置して引き上げるか、装置下部にコイルを設置して反発力で浮上させるかの、2 通りの方法がある。詳細は次節で述べるが、引き上げ方式では上下方向に不安定であり、反発方式では回転(チルト)に関して不安定である。前者は 1 方向(Z 方向の変位)に不安定であり、後者は 2 方向(X、Y 方向の回転)に対して不安定であるので、制御としては引き上げ方式のほうが用意である。また、装置下部にはコイル励磁などに必要な機器が設置されるので、反発コイルを設置するのが容易ではない。以上のような理由により、Mini-RT では引き上げ方式を採用した。

円環コイルは 6 つの運動の自由度(X、Y、Z 方向への移動と X、Y、Z 軸周りの回転)を持っており、Z 軸(コイルの中心軸方向)の回転以外の 5 つの自由度を制御する必要がある。これは上下方向(Z 軸方向)、スライディング方向(X、Y 軸方向)、チルト方向(X、Y 軸周りの回転)に分類できる。現在の Mini-RT においては上下方向のみ不安定であるので、1 軸の制御のみでよいが、現在設置されていないコイルを追加することで、チルト不安定性や、スライディング不安定性が

発生する可能性がある。したがって、最終的には、5つの自由度すべてを制御する必要がある。

Mini-RT における位置検出は図 5 のようになっている。コイル位置検出用のセンサーとして、レーザー反射方式を採用しており、これはコイル表面で乱反射されたレーザー光を検出して、コイルまでの位置を算出するものである。Mini-RT においてはキーエンス社の LK-500 型(図 6)を使用している。レーザー変位計 P1、P2、P3 によりコイルの Z 軸上の位置と X、Y 方向へのチルトが検出され、P0、P90 によって、X、Y 方向へのスライディングが検出される。

Mini-RT におけるコイルの位置制御は図 7 のようになっており、現在はこの中の Z 軸方向のみの制御となっている。

現在の Mini-RT で可能な磁場配位としては以下の 2 ケースが挙げられる。

- ・ ダイポール磁場配位 (磁気浮上コイルのみ・図 8)
- ・ 標準配位 (磁気浮上コイルと引き上げコイル・図 9、10)

ダイポール配位では、磁気浮上コイル電流のみを考慮しているため、これは磁気浮上コイルをメカニカルに支持した場合に対応する。引き上げコイル電流と磁気浮上コイル電流による磁場配位を標準配位と呼んだ。

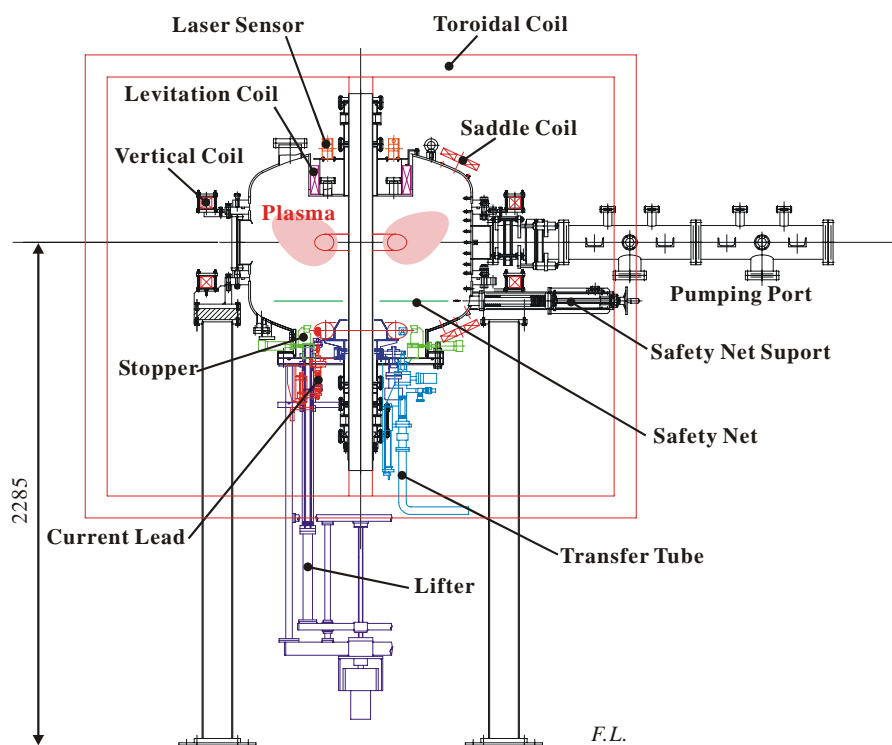


図 4 Mini-RT の構成

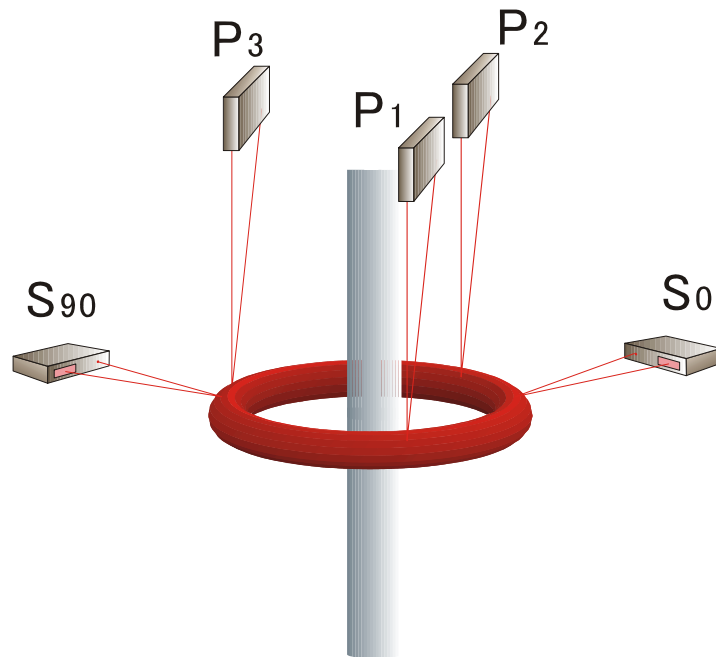


図 5 . コイル位置検出システムの配置



図 6 . キーエンス社製レーザー変位計 LK-500

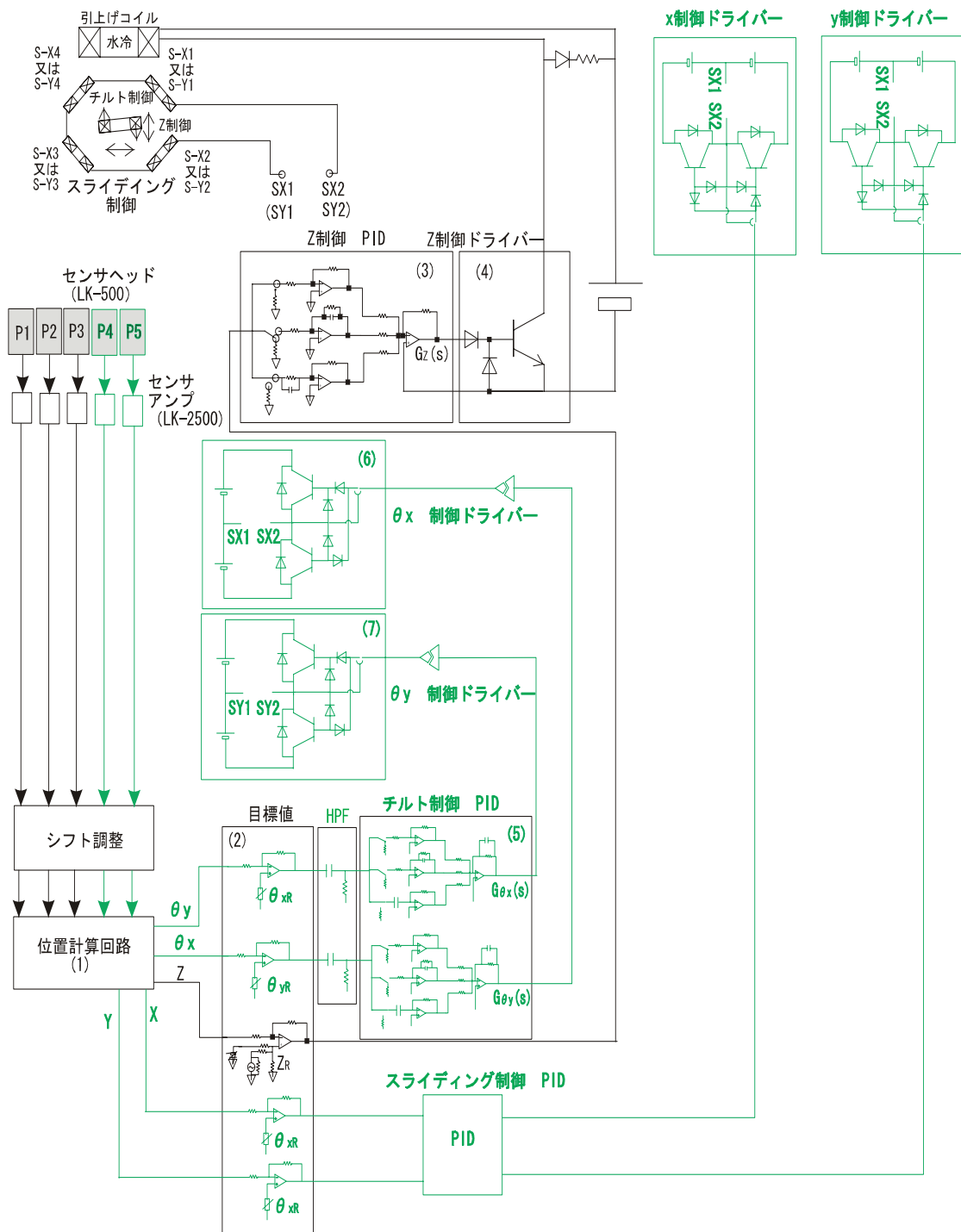


図 7. Mini-RT における多軸制御システム(緑色の部分は計画)

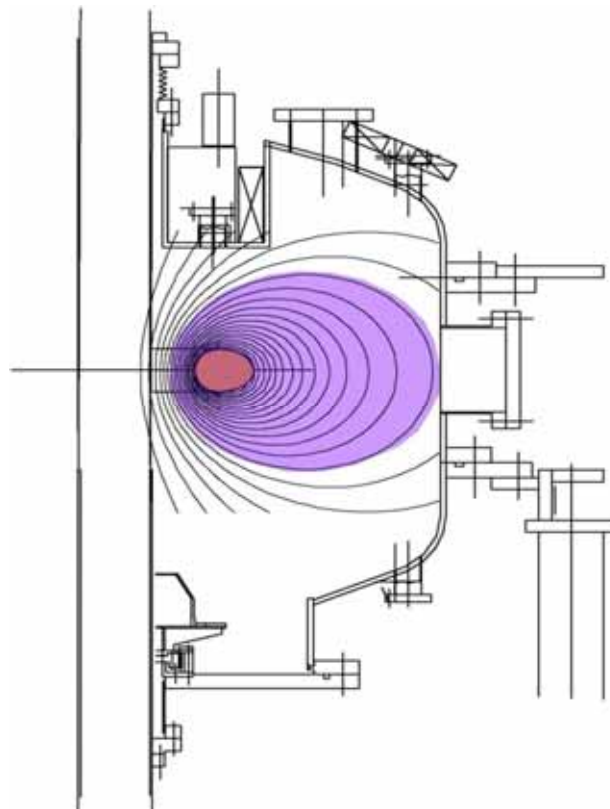


図 8 . Mini-RT におけるダイポール磁場

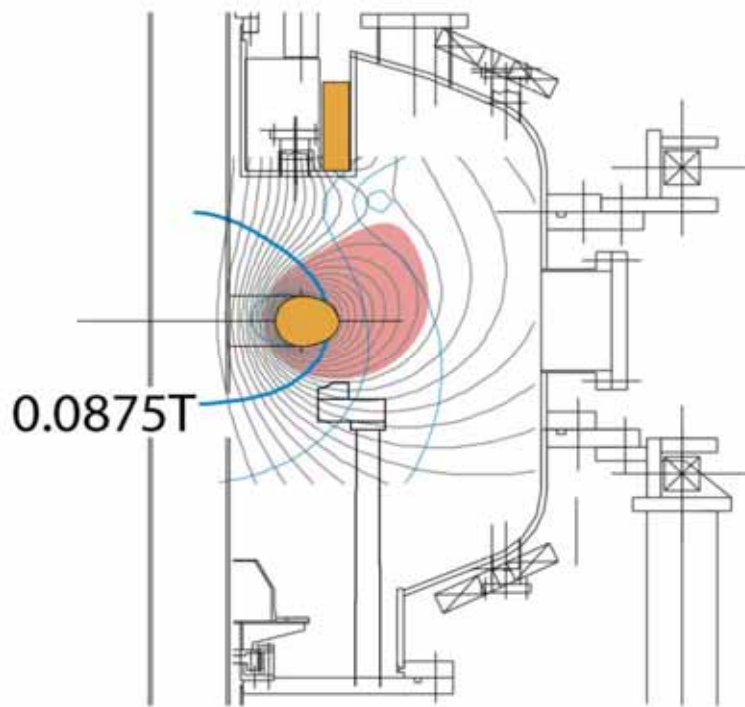


図 9 . Mini-RT の標準的な磁場配位



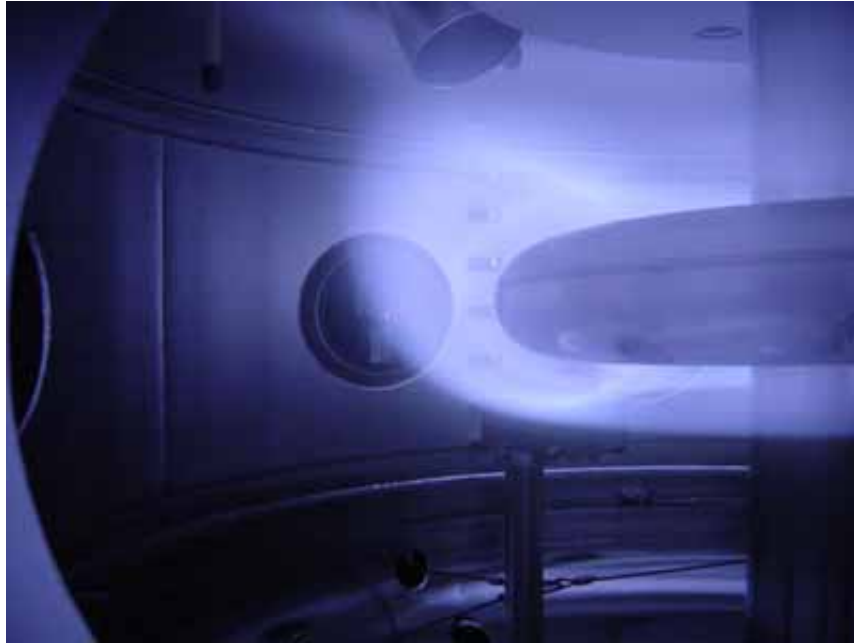


図 10 . 標準配位でのプラズマ

## 2 - 2 Mini-RT における超伝導コイルの磁気浮上

古典物理である電磁気学の一般的知識として知られる Earnshaw の定理より、どのような磁石や電荷を組み合わせても静的な磁気浮上（重力に対して物体が安定して浮遊状態にあること）は不可能であることが証明されている。しかしながら、この定理の仮定以外ではいくつか磁気浮上させる方法が存在する。それは、量子効果、フィードバック制御、反磁性効果、振動場、回転である。これらは、Earnshaw の定理の例外ではなく、この定理の仮定外に属するものと理解される。まず、量子効果とは、表面上にある物体はミクロの距離で浮上していることを指す。これは電磁気的の内部分子間力によるものであり、距離が小さいため現代物理学の量子効果は無視できないのである。次の、フィードバック制御とは、浮上している物体の位置を検出し、その情報をフィードバックして電磁力を変化させることで一定の位置に保持することである。そして、反磁性体である超伝導体は外部磁場を打ち消す方向に磁化するため、定量的ではあるが磁気浮上は可能である。また、高温超伝導のバルク材では、ピン止め効果により力学的に不安定な磁場構造でも固定され、浮上する。また、振動磁場

により導体中に電流を励起し、電磁力にて浮上力を与えることにより安定に磁気浮上させることも可能である。さらに、回転を浮上物体に与えることにより、固定したいいくつかの磁石を用いて浮上させることも可能である。

まず、高温超伝導コイルの位置制御系を用いた磁気浮上をおこなうための、その力学的不安定性について考える。表 1 に吸引方式と反発方式による各自由度に対する不安定性を表す。吸引方式では、重力に平行な縦方向への不安定性があり、反発方式では重力に垂直の横方向への不安定性が起こるため、それぞれフィードバック制御を行う必要がある。チルト方向への不安定性は図 11 にある様に吸引方式の場合は引上げコイルと超伝導浮上コイルの距離や半径の比によっている。

表 1 . 浮上コイルの力学的安定性

	吸引方式	反発方式
縦 (Z) 方向	不安定	安定
横 (X, Y) 方向	安定	不安定
チルト ( x, y) 方向	条件による	条件による

ここでは、Mini-RT 装置の磁気浮上方式が先述した様に吸引方式のため、吸引方式におけるチルト不安定性について考えた。まず、引上げコイルにより浮上コイル付近に生成される磁場構造を図 12 に示す。図のように、縦[Z]横[R]方向の磁場強度をコイル面へ遮蔽し、チルト方向への力学的計算を行った。まず、浮上コイルを安定化させる磁場方向は

$$B_{r2} \approx B_{r0} + R\theta \left. \frac{\partial B_r}{\partial z} \right|_0$$

$$B_{z1} \approx \left( B_{z0} + R\theta \left. \frac{\partial B_z}{\partial z} \right|_0 \right) \sin \theta \approx B_{z0} \theta$$

$$B_{z2} \approx \left( B_{z0} - R\theta \left. \frac{\partial B_z}{\partial z} \right|_0 \right) \sin \theta \approx B_{z0} \theta$$

である。一方、不安定化させる磁場方向は、

$$B_{r1} \approx B_{r0} + R\theta \left. \frac{\partial B_r}{\partial z} \right|_0$$

である。よって、浮上コイルのチルト安定化条件は、安定に働く磁場から、不安定に働く磁場の差をとって、下記のようになる。

$$(B_{z1} + B_{z2} + B_{r2}) - B_{r1} = 2B_{z0}\theta - 2R\theta \frac{\partial B_r}{\partial z} \Big|_0 = 2 \left( B_{z0} - R \frac{\partial B_r}{\partial z} \Big|_0 \right) \geq 0$$

この計算を数値的に解いた結果が図 11 である。図 11 は各軸方向には任意の単位であり、浮上コイルの断面位置が(R,Z)=(1,0)において、チルトが力学的に安定であるための引上げコイルの位置である。この様に、チルト不安定性は、浮上コイルと引上げコイルの半径とコイル間距離による。Mini-RT や FB-RT に関しては、これらの考察からチルトは力学的に安定となるように設計されている。

次に垂直磁場コイルが作る磁場を考える。セパトリックス配位を形成するための垂直磁場による磁場構造は図 13 となり、この磁場はコイルのチルトを安定化させる方向へと働くため、この場合にはチルト制御は必要とならない。

これに対し、スフェレータ配位を形成するための逆垂直磁場をかけた時の磁場構造が図 14 である。この場合には、逆垂直磁場はチルト不安定な方向へと働くため、チルト制御が必要となる。

このチルトを制御するためにサドルコイルによって作られる磁場が図 15 であり、水平方向の磁場でチルトを制御し、垂直方向の磁場でスライディングを制御する設計になっている。

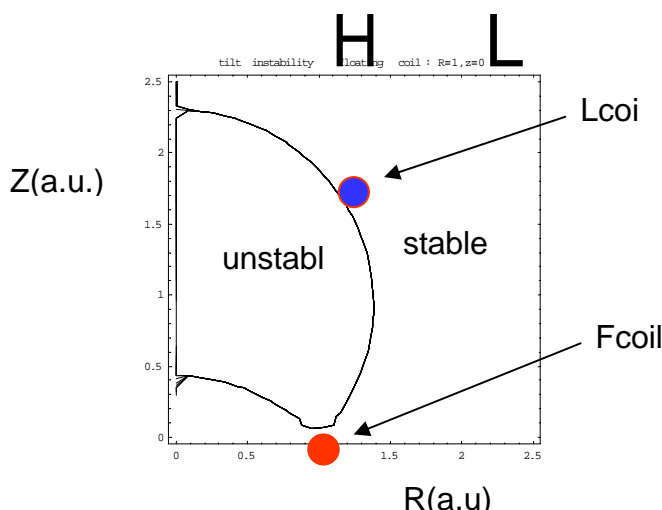


図 11 . 吸引方式でのチルト安定化領域

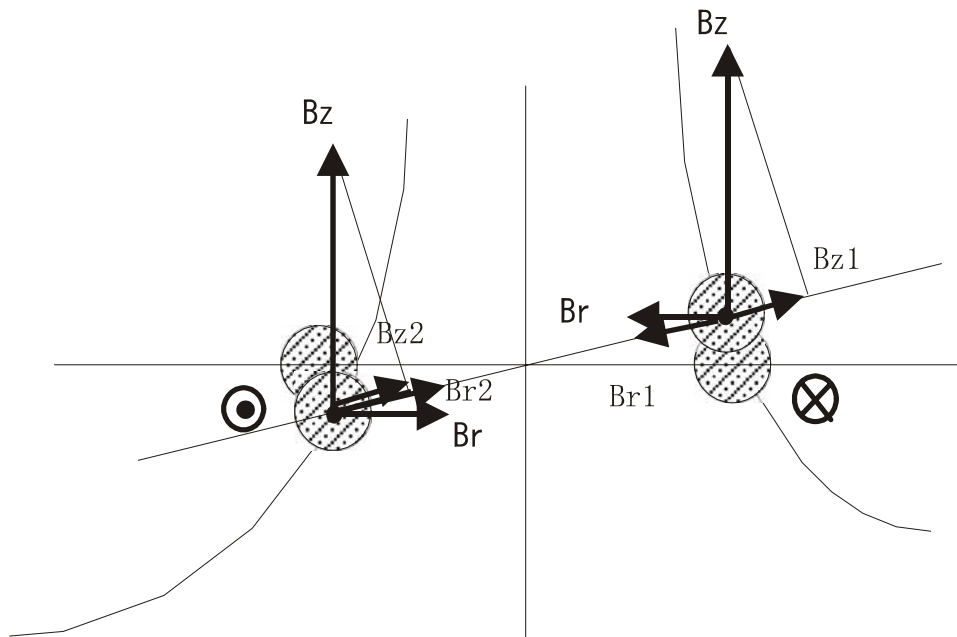


図 12 . 引き上げコイルが作る磁場

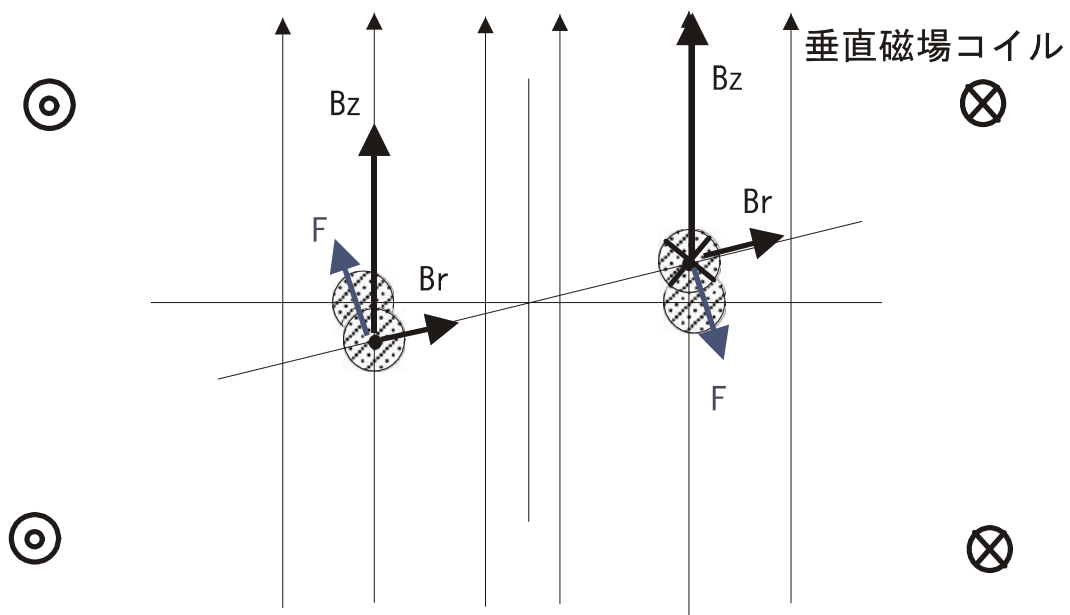


図 13 . 垂直磁場コイルによる磁場でのコイルの安定性

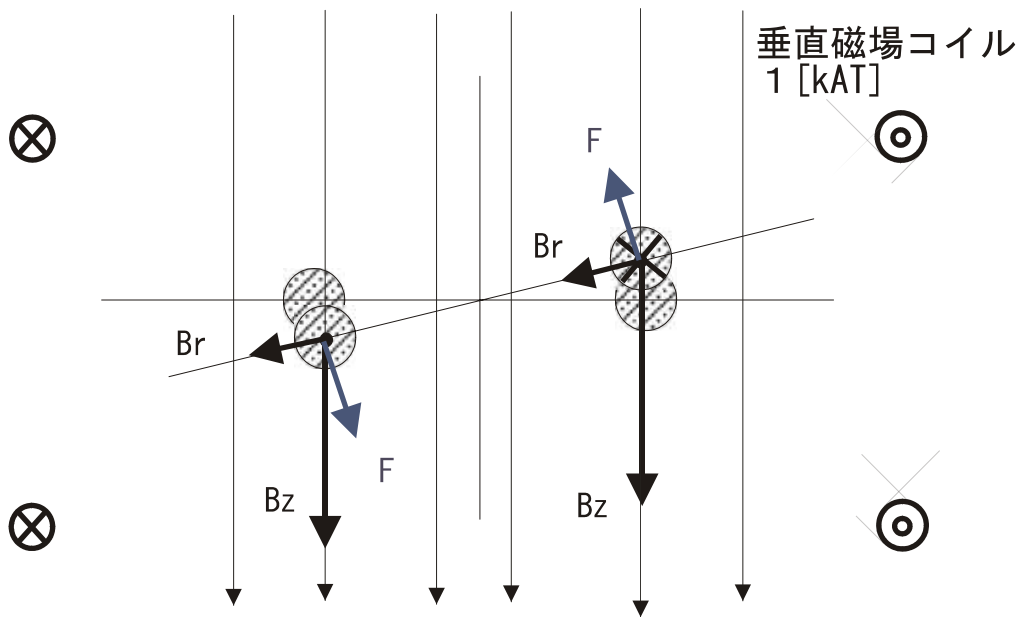


図 14 . 逆垂直磁場による磁場でのコイルの不安定性

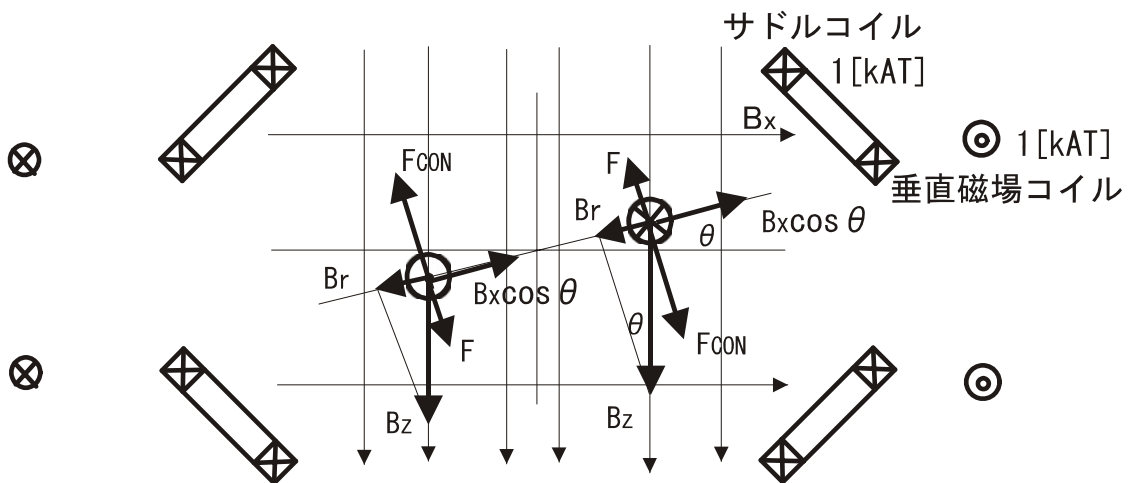


図 15 . サドルコイルによる制御磁場

## 2 - 3 今後の Mini-RT

今後の Mini-RT で計画されているものは以下の 3 点である。

- ・ 垂直磁場コイルの設置
- ・ サドルコイルの設置
- ・ 浮上コイルの YBCO 化

真空容器の外側に上下 1 対の垂直磁場コイルを設置し、これに浮上コイルと同方向の電流を流すと、図 16 のようなセパトリックス配位を形成され、逆方向に電流を流すと図 17 のようなスフェレータ配位が形成される。

前節で述べたとおり、スフェレータ配位を形成した場合にはチルト不安定になるため、これを制御するためのサドルコイルが必要となる。

また、超伝導コイルを YBCO 線材で作成することにより、より強い磁場を形成できることが期待されている。

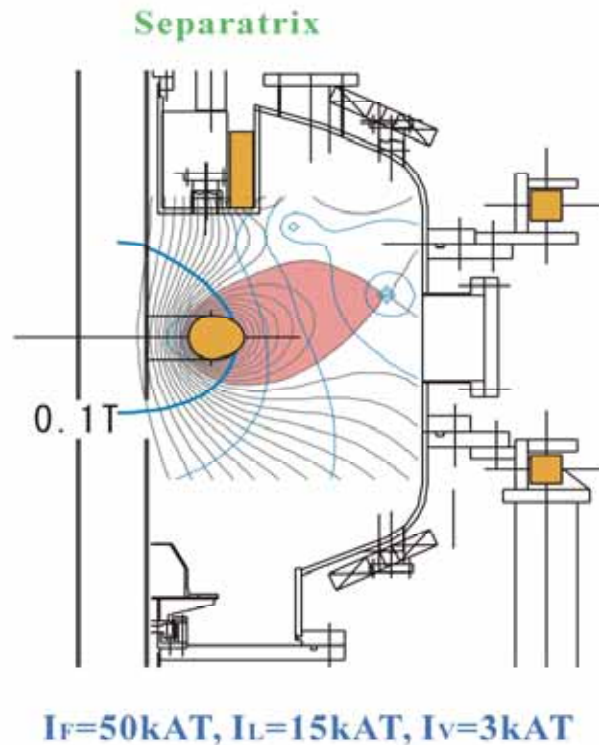


図 16 . Mini-RT でのセパトリックス配位

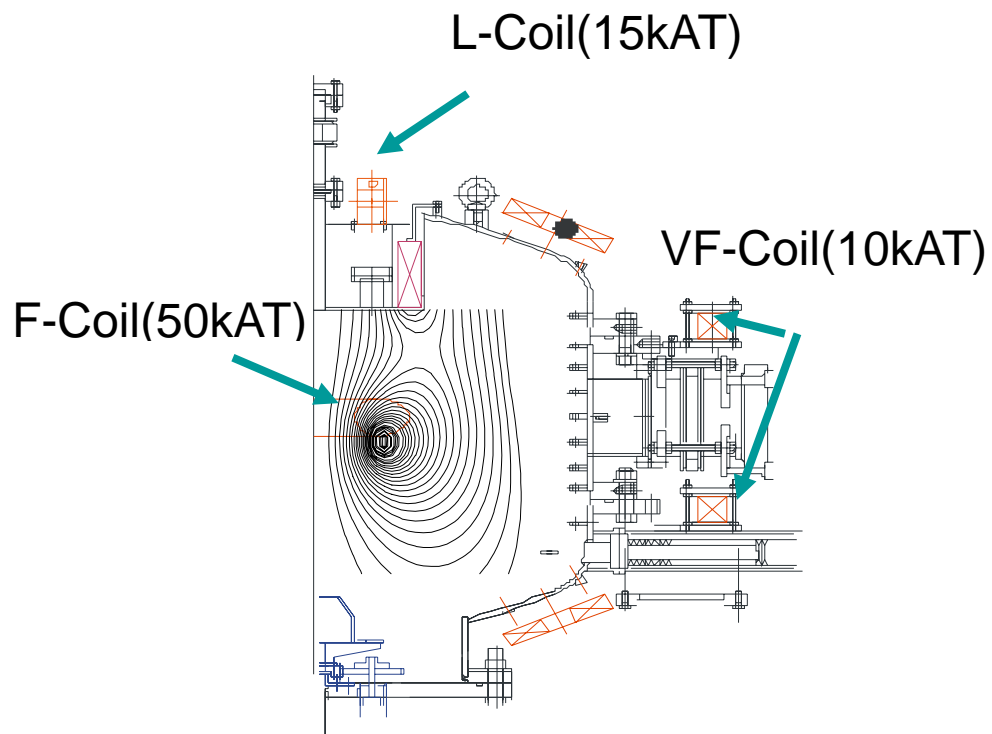


図 17 . Mini-RT でのスフェレータ配位

## 第 3 章 YBCO 線材を用いたコイル製作

前述のとおり、現在の Mini-RT 装置は Bi-2223 の高温超伝導コイルを用いた磁気浮上型内部導体プラズマ閉じ込め装置である。第 1 章で述べたとおり、超伝導線材をコイルとして利用する上で、Bi-2223 より YBCO 線材を用いたほうがより性能の良いコイルを製作できることが期待される。そのため、Mini-RT のコイルを Bi-2223 線材のものから YBCO 線材のものへと変更する計画がなされている。ところが、現時点では YBCO でのコイル製作技術は確立されていないため、小型のコイルを製作してコイル製作技術を開発する必要がある。この章では、YBCO 線材を用いたコイル製作、および、その特性の測定結果、さらに、コイルの磁気浮上に関する新たな方法について記述する。

### 3 - 1 YBCO 線材を使ったコイル製作

Mini-RT における磁気浮上型高温超伝導コイルの線材に YBCO を導入するためのコイル製作技術の開発を目的として、下記の小型の YBCO コイル 1 号機を製作した。

- (1) 線材：AMSC 製 YBCO  
0.19mm (thick) × 4.4mm (wide)
- (2) 巻き線構造：ダブルパンケーキ、各パンケーキあたり 15 層  
最外層においてラップ接続
- (3) 巻き線部断面積：7.6mm (R) × 9.0mm (Z)
- (4) コイル巻き線直径：90.8mm (内径) × 98.4mm(外径)
- (5) コイル容器材質：発泡スチロールによる断熱
- (6) 質量：123.5g (冷却前)

HTS コイルの巻き線は次のように行った。まず、HTS コイルはダブルパンケ



ーキ型を採用したため、コイル用線材の中心まで巻き上げた。そして、下パンケーキの巻線作業を行なった。コイルの軽量化のために、枠の無い仕様としたため、内側には仮の枠を使って巻き線終了後に取り外せるようにした。巻き線の際には、アラルダイトを HTS 線材の外側に塗り、コイル型が浮上力にて崩れない様にそれぞれを互いに接着した。目的のターン数まで巻き、最終端の 4 分の 1 周を上パンケーキとの半田付けによるラップ接続に利用するため、下パンケーキの最終端は、半周分以上の余裕を持って切断した。その後、HTS コイルを上パンケーキ巻き様の回転テーブルに移し変え、同様に上パンケーキの巻線作業を行なった。上パンケーキの最終端は、下パンケーキと同様にラップ接続のために半周以上残して切断した。最後に下パンケーキと上パンケーキの終端コイル同士を半田付けにてラップ接続をした。尚、このコイルの励磁には間接励磁を用いるため、巻き線においては、カプトンテープによる絶縁を行わなかった。HTS コイルの断熱には、軽量で断熱効果のある発砲スチロールの容器を用いており、この中にアラルダイトで固定した。完成したコイルが図である。

製作中に特に注意を要する点は、Bi-2223 線材と同様に、まず巻線中にコイルを弛ませない様にすることである。大きな歪みにより超伝導体が切れてしまう可能性があるためである。2 つ目には、半田にてラップ接続をする時に、熱を加えすぎないことである。また、YBCO 線材はその構造上、銀のテープが入っている面と入っていない面があり、銀のテープが入っている面で接続した場合に接続抵抗が増加することがわかった。このことについては 3-2 で詳しく述べるが、これは YBCO でコイルを製作する場合の注意事項として、重要な点である。コイル製作の際には、図 18 のようにサンプルの表面をはがして、銀シースの入っている面を確認した。

以上の方法を用いて YBCO の巻き線を行った結果、Bi-2223 と同様の方法で行っても特に問題は無いことがわかった。製作したコイルは図 19 である。

また、このコイルの作成において、以下の 3 点が問題となった。

1. 一周巻くごとに接着剤を用いて固定していたので、コイルの巻き数に比べてコイルが厚くなっている  
(1 周あたりおよそ 0.5mm となっている)
2. 軽量化のために芯を取り外したのだが、このために重心のずれが起きている

3. コイルと断熱材の発泡スチロールの間のスペースが大きいため液体窒素の充填量は多くなっているが、浮上試験の際にはそのことと 2 の重心のずれのために、コイルが傾いた浮上制御になっている。

この結果を元に 100m の YBCO 線材を用いて下記の YBCO コイル 2 号機を作成した。

- (1) 線材：AMSC 製 YBCO  
0.20mm (thick) × 4.0mm (wide)
- (2) 巻き線構造：ダブルパンケーキ  
上層 65.5turn、下層 63.5turn、合計 139turn  
最外層においてラップ接続
- (3) 巻き線部断面積：16.0mm (R) × 8.0mm (Z)
- (4) コイル巻き線直径：104mm (内径) × 120mm(外径)
- (5) コイル容器材質：FRP による構造強化  
発泡スチロールによる断熱
- (6)自己インダクタンス：3.7mH
- (7) 質量：424.0g (冷却前)

このコイルの製作において、1 号機との製作上での相違点は以下の 6 点である。

1. コイルの芯に FRP のリングを使用し、構造を強化した。(図 20、図 21)
2. FRP のリングに紙製のガイドを貼り付けることにより、下層から上層への渡りの部分での段差を無くし、コイル全体が歪まないようにした。(図 20、図 21)
3. 1 周ごとにセメダインで全周を固定するのをやめ、2 周おきにアロンアルファを用いて 1 点のみを接着し、巻き線終了後に全体をアラルダイトで固めた。

4. 液体窒素の充填容量を減らして浮上実験時の重心のずれを小さくした
5. 接続抵抗を小さくするために最外周でのラップ接続を上層 1 周、下層 1 周の合計 2 周分行った。
6. 均等なトルクで巻けるように、自動巻き線機(図 22、図 23)を使って巻き線を行った。

以上の点を踏まえた上で製作されたコイルが図 24 の YBCO コイル 2 号機で、それを発泡スチロールの断熱容器に収めたものが図 25 である。



図 18 . YBCO 線材での銀シースの面の確認



図 19 . 完成した YBCO コイル 1 号機

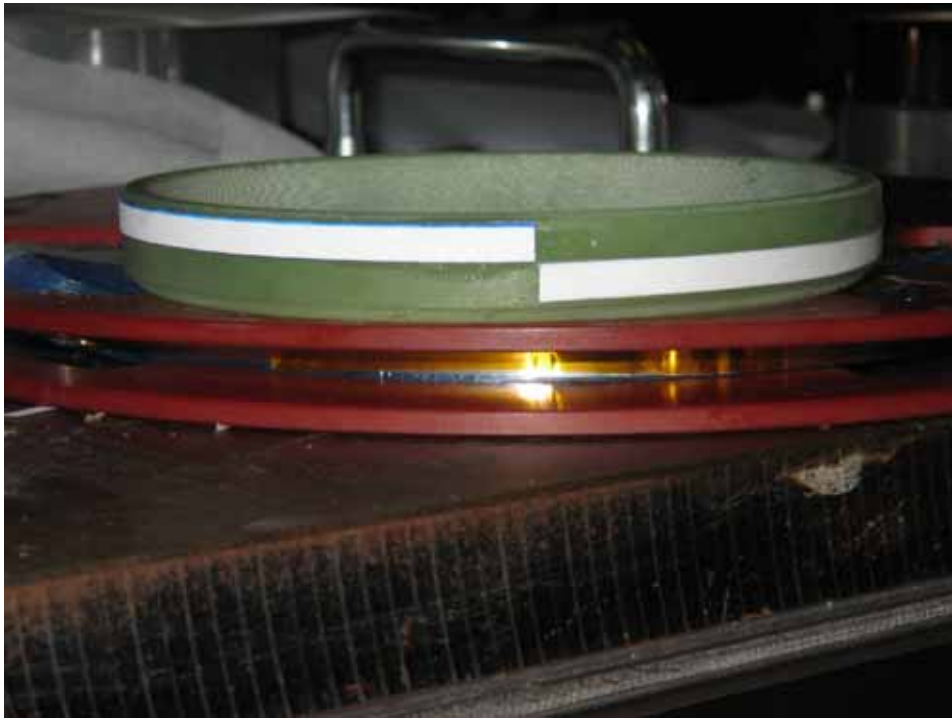


図 20 . 構造強化のための FRP の芯と紙製のガイド



図 21 . ガイドを使用した上層から下層への渡り



図 22 . 自動巻き線機



図 23 . 自動巻き線機のコントローラー



図 24 . 完成した YBCO コイル



図 25 . 断熱容器に収めた YBCO コイル

### 3 - 2 YBCO コイルの特性の測定

YBCO 線材の接続抵抗は、次のように測定した。まず、10cm のもの 2 本と 20cm のもの 1 本の YBCO 線材を用意し、図 26 のように 5cm のはんだ付けによる接続を 2 箇所行った。線材を超伝導状態にするために、発泡スチロール容器に満たした液体窒素の中に線材を入れた。その後、線材の両端から電流を流して、 $L_1$  の区間と  $L_2$  の区間の電圧をナノボルトメーターで測定した。 $L_1$  の区間の電圧と  $L_2$  の区間の電圧の差を取り、その値から 10cm のはんだ付けを行った際の接続抵抗を求めた。この際に、 $L_1$  の区間は、銀の入っていない側(これを表側とする)同士の接続、銀の入っている側(これを裏側)同士の接続、表側と裏側との接続の 3 通りに関して接続抵抗を測定した。その結果が図 27 ~ 29 である。この結果より、接続抵抗は次のように求まる。

表 - 表	23.7n
表 - 裏	1.05 $\mu$
裏 - 裏	2.12 $\mu$

したがって、10cm の接続をした場合の接続抵抗は 23.7n であるので、YBCO 線材をはんだ付けにより接続した場合の接続抵抗は 237n /cm である。

接続抵抗と自己インダクタンスの値から、今回製作した YBCO コイルの電流の減衰時定数  $\tau$  の計算値は、

$$\tau = L / R \cong 180h$$

と求まる。

次に電流の減衰時定数の測定を行った。まず、コイルを永久電流状態にするために、以下の方法で励磁を行った。まず励磁用コイル (2.6kAT) に電流を流し、冷却されていない HTS コイルに磁束を加えた。その時、磁束の漏れが少ないように図の様に鉄心を用いた。その後、液体窒素を HTS コイル容器に HTS コイルの温度が急激に低下しないように少しずつ加えた。20 分ほど時間をかけ、十分に HTS コイル全体が冷却 (77K) した後に励磁用コイルの電流を停止し、HTS コイル中心における Z 方向 (コイルに対して垂直方向) の磁場強度をホール素子にて測定した。また、磁場強度測定中は、常に液体窒素を補充し、温度が上昇しない様にした。



電流の減衰時定数は図 31 のようになった。  
この結果より、コイル電流の減衰時定数は 61 時間と求まる。実測値と計算値には、およそ 3 倍の開きがあるが、これはコイルのラップ接続時のはんだ付けのずれなどによるものと考えられ、許容範囲内である。

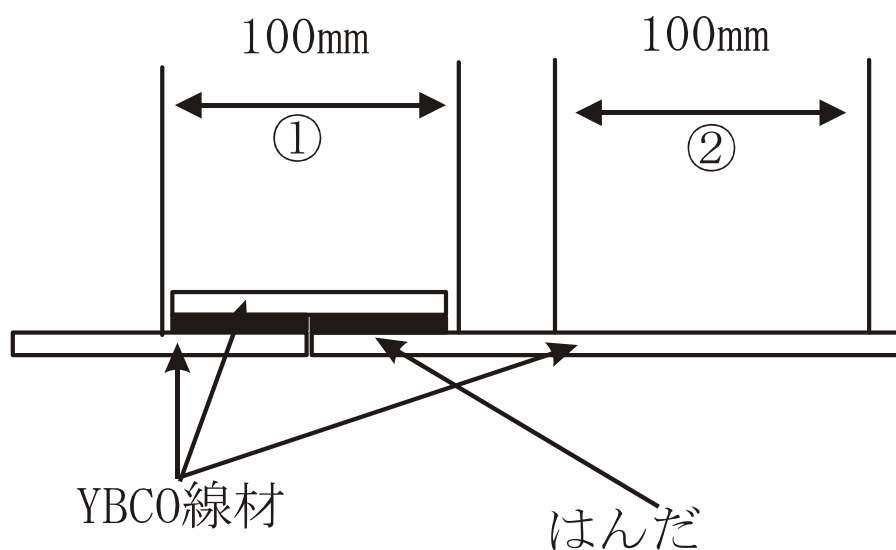


図 26 . 接続抵抗の測定方法

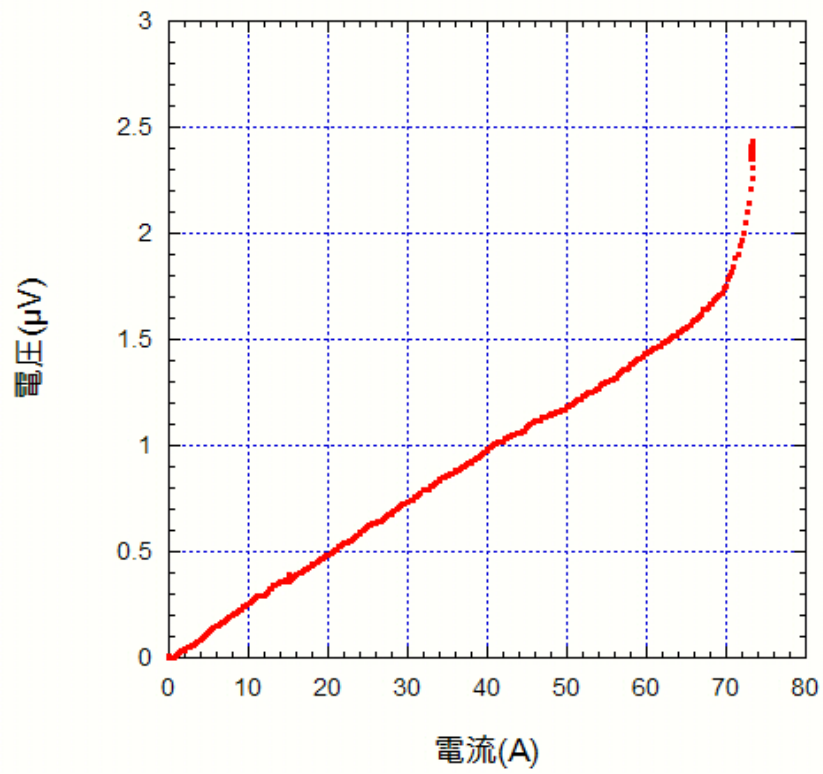


図 27 . 接続抵抗の測定結果(表 - 表)

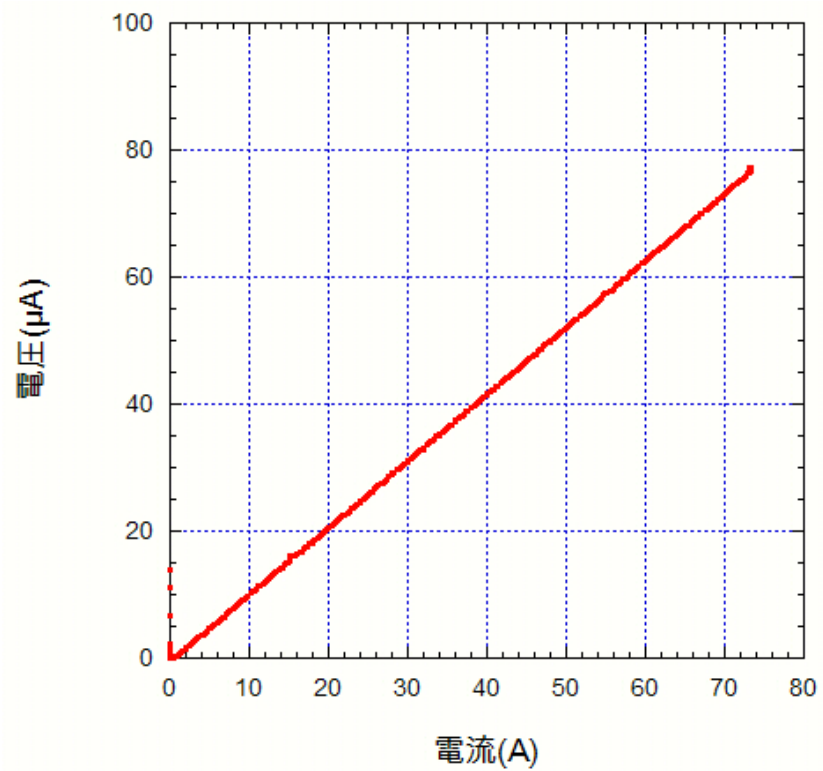


図 28 . 接続抵抗の測定結果(表 - 裏)

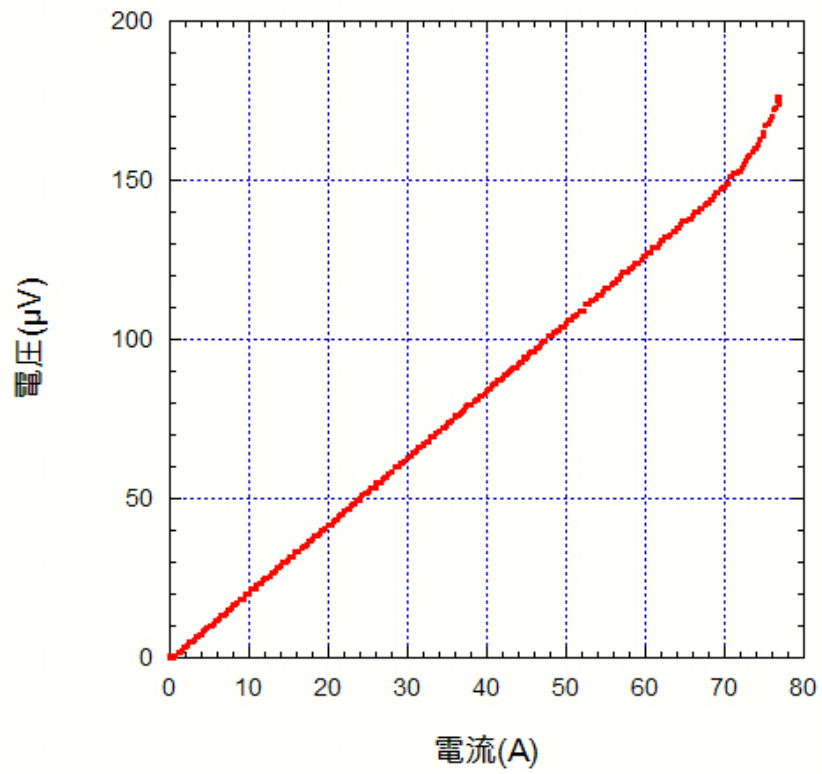


図 29 . 接続抵抗の測定結果(裏 - 裏)



図 30 . 鉄芯を用いた超伝導コイルの励磁

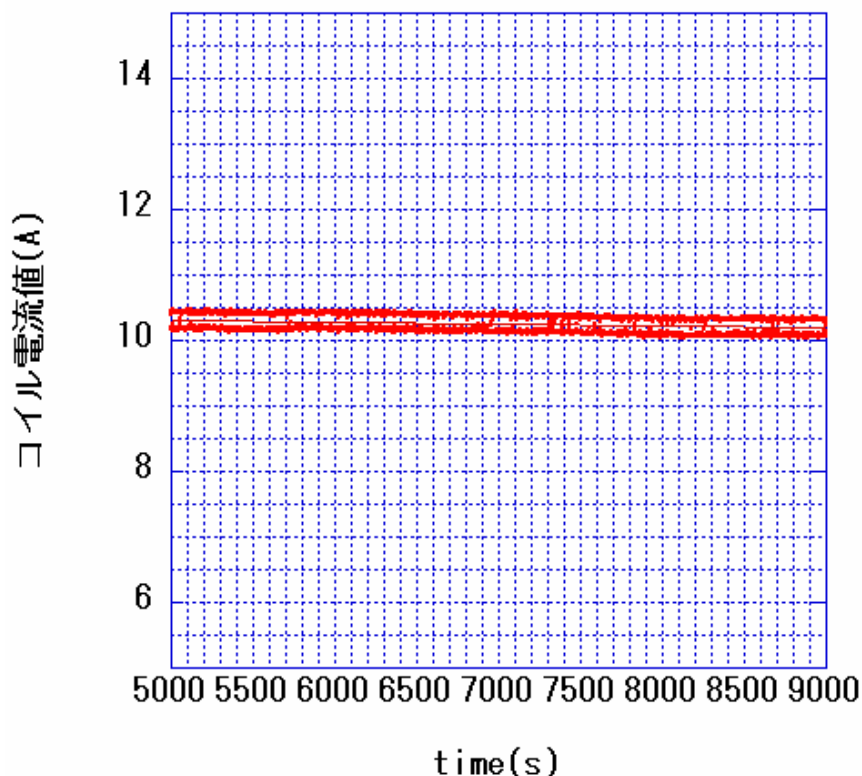


図 31 . YBCO コイル電流の減衰時定数の測定結果

### 3 - 3 超伝導コイルの制御無しでの浮上

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。空心のためカップリングは良くないが、引上げコイルの電流を大きくすることで、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。本計算では、その力学的安定解について、定量的に計算を行ない、実験結果との比較を行った。

最初に、制御状態での小型 HTS コイルの浮上状態を図 32 に示す。この計算では、HTS コイルに励起された電流値を  $40\text{A} \times 60\text{turn} = 2.4 \text{ kAT}$  とし、引き上げコイルの電流値を  $20\text{A} \times 283\text{turn} = 5.6\text{kAT}$  としてある。この状態でのコイルの浮上位置は 90mm 付近となっている。

制御無しでの浮上における方程式は、運動方程式が式、磁束の保存則が式となる。

$$F(z) = 2\pi R I_F(z) B_r(z) + mg$$

$$0 = \frac{d}{dt}(L_F I_F + M(z)I_L)$$

まず、同様に HTS コイルには 2.4kAT の永久電流を励起する。そして、起磁力が  $50\text{A} \times 283\text{turn} = 14.15\text{kAT}$  の引き上げコイルに小型 HTS コイルを近づけた時の永久電流は磁束保存の法則により急激に減衰する。よって、各位置での引き上げコイルによる磁場強度、HTS コイルの電流値、浮上力 (Z 方向へのローレンツ力) は図 33 のようになり、コイル重量に相当する浮上力を有する  $Z=87[\text{mm}]$  付近ではコイル間の距離が離れると吸引力 (浮上力) は増し、近づくと減少する。よって浮上コイルは力学的に安定であり、制御を要せずに浮上可能である。

このことを実験的に示したのが図 34、35 である。図 34 では、引き上げコイルの電流値が一定の状態のコイルが安定に浮上していることがわかる。また、制御無しで浮上している HTS コイルに Z 方向に 10mm の摂動を与えたのが図 35 である。

最後に、引き上げコイルの電流値を変化させた場合での計算と実験を行った。引き上げコイルの電流値が 48A の時と 52A の時の浮上力は図 36 のようになる。これにより、引き上げコイルの電流値を増加させるとコイルの位置は引き上げコイルに近づくことがわかった。通常の制御状態での浮上においては、コイルの位置が引き上げコイルに近づいた場合には電流値を下げるようにフィードバック制御が行われるが、制御無しの場合では逆になっている。この条件での実験結果が図 37 で、計算結果とよく一致している。

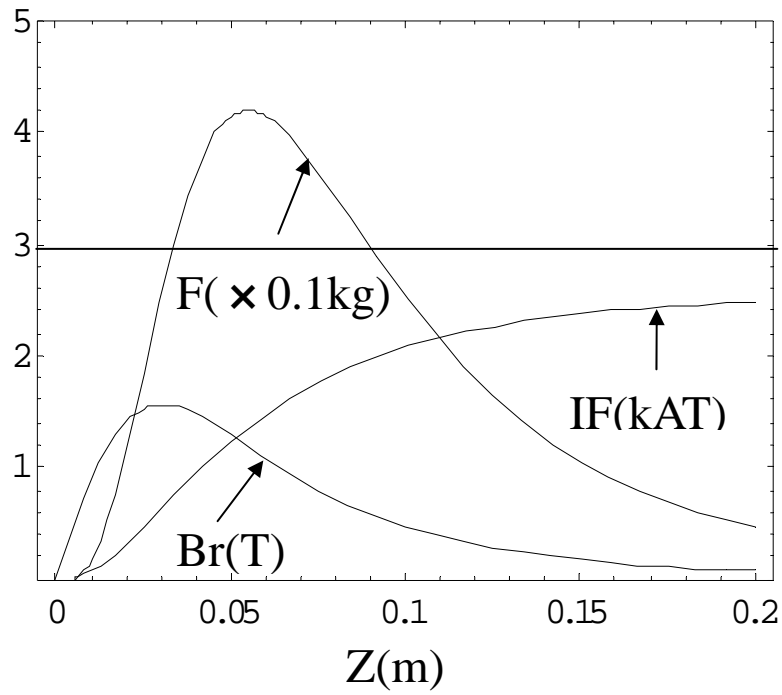


図 32 . 制御有りでの浮上条件

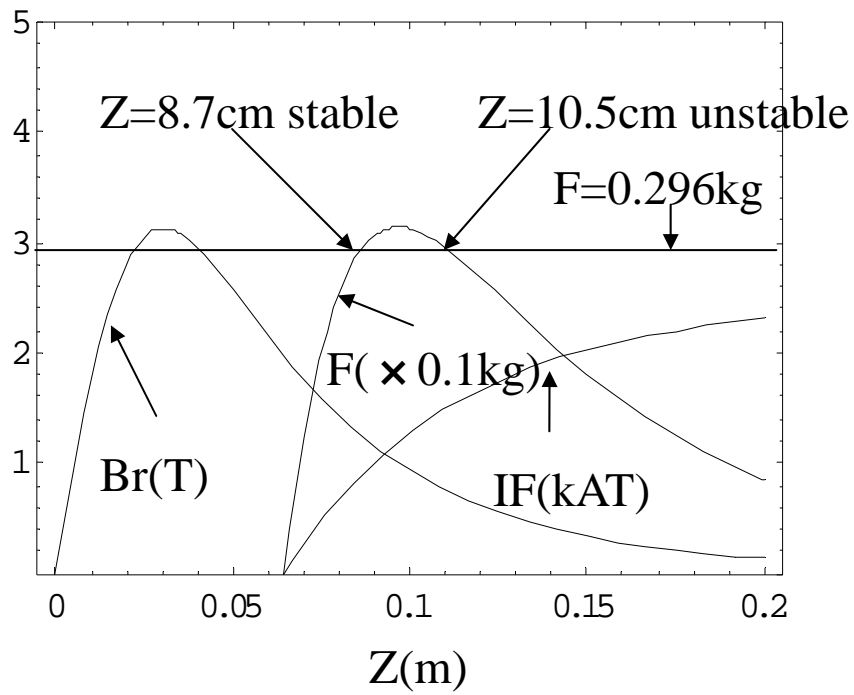


図 33 . 制御無しでの浮上条件

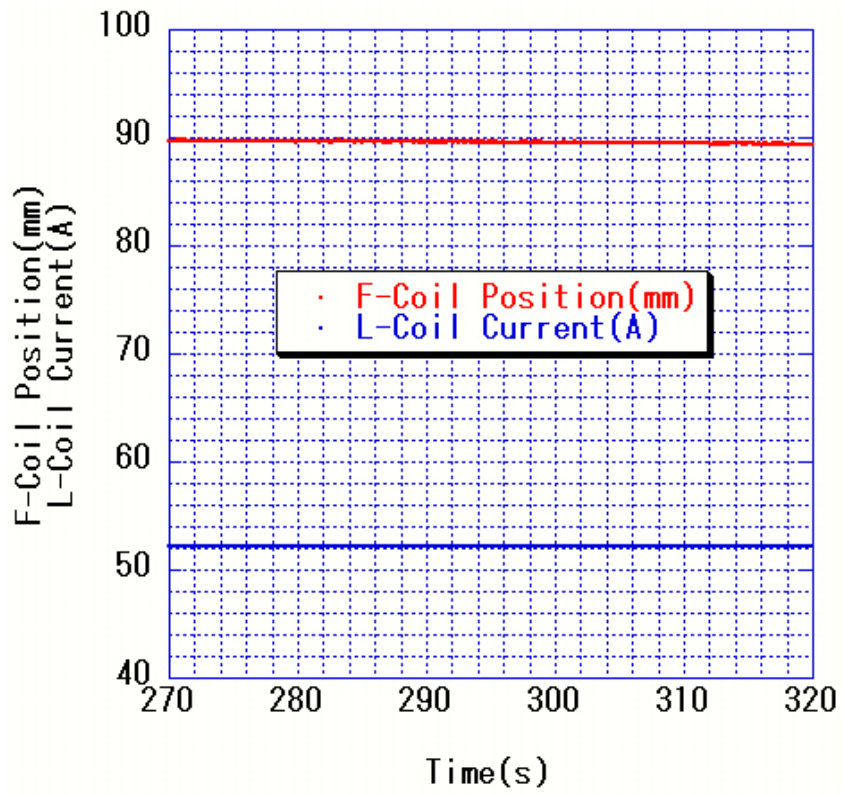


図 34 . 制御無しでの浮上

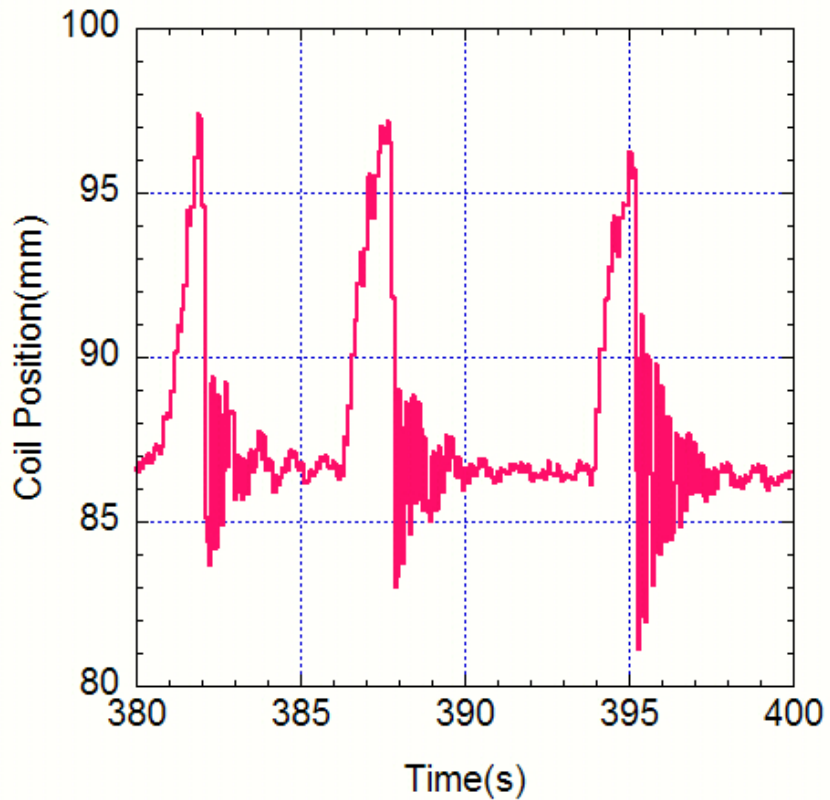


図 35 . 制御無し状態で摂動を与えたときの振動

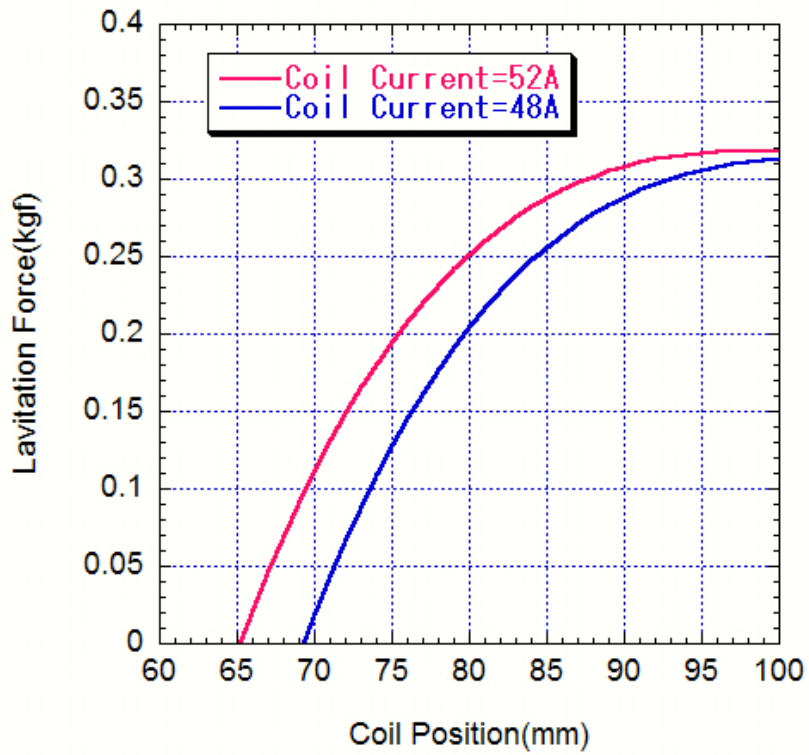


図 36 . 引き上げコイルの電流値を変えた時の浮上力

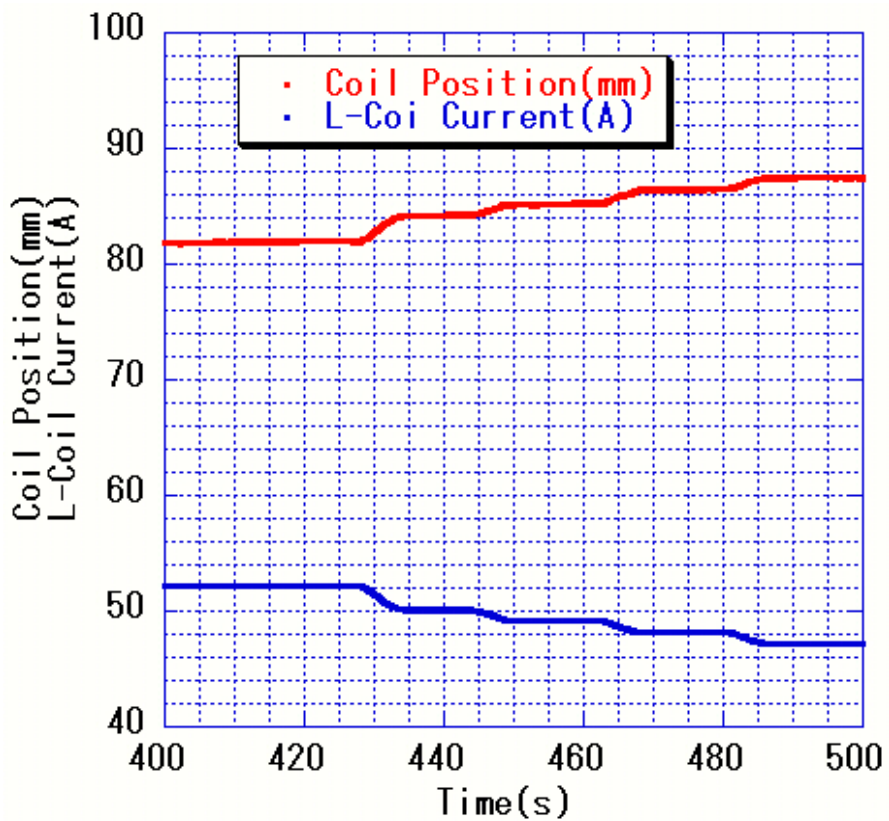


図 36 . 引き上げコイルの電流値を変えた時のコイル位置



## 第4章 FB-RT における多軸制御実験

第2章で述べたように、Mini-RT 装置においてトロイダルコイルや垂直磁場コイルによる磁場を発生させた場合、垂直方向のみならず、チルトに関しても不安定になる。そのため、チルトの制御方法について検証し、可能であることを実証した。また、チルト制御に加えて、スライディング制御も検討されており、この場合の制御系は5系統となり複雑になるため、デジタル制御系を導入した。

### 4 - 1 浮上コイルのフィードバック制御

ここでは、磁気浮上超伝導コイルのフィードバック制御について述べる。浮上コイルの電流値と自己インダクタンスをそれぞれ $I_L$ 、 $L_L$ 、引き上げコイルの電流値と自己インダクタンスをそれぞれ $I_F$ 、 $L_F$ とすると、運動方程式は 式、回路方程式は 式、磁束の保存則は 式となる。

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = I_L I_F \frac{\partial}{\partial z} M(z) + mg$$

$$eN = \frac{d}{dt} (L_L I_L + M(z) I_F) + R I_L$$

$$0 = \frac{d}{dt} (L_F I_F + M(z) I_L)$$

ここで、各パラメータに 式のような摂動を与える。

$$\begin{aligned} z(t) &= Z_0 + \hat{z}(t) & I_L(t) &= I_{L0} + \hat{I}_L(t) \\ I_F(t) &= I_{F0} + \hat{I}_F(t) & e(t) &= E_0 + \hat{e}(t) \end{aligned}$$

また、初期条件より、 式、 式が与えられる。

$$0 = I_{L0} I_F \frac{\partial}{\partial z} M(z) \Big|_{z=Z_0} + mg$$

$$E_0 = RI_{L0}$$

～ 式を用いると、～ 式は～ 式となる

$$m \frac{d^2 \hat{z}}{dt^2} = (I_{F0} I_{L0}) \frac{\partial^2 M(z)}{\partial z^2} \Big|_{z_0} \hat{z} \\ + I_{F0} \frac{\partial M(z)}{\partial z} \Big|_{z_0} \hat{I}_L + I_{L0} \frac{\partial M(z)}{\partial z} \Big|_{z_0} \hat{I}_F$$

$$\hat{e}N = \frac{d}{dt} (L_L \hat{I}_L + M(Z_0) \hat{I}_F + \frac{\partial M}{\partial z} \Big|_{z_0} I_{F0} \hat{z}) + R \hat{I}_L$$

$$0 = \frac{d}{dt} (L_F \hat{I}_F + M(Z_0) \hat{I}_L + \frac{\partial M}{\partial z} \Big|_{z_0} I_{L0} \hat{z})$$

また、PID 制御式は～ 式である。

$$\hat{e} = K_z \hat{z} + K_v v - K_i \frac{\hat{I}_L}{N} + K_I \int_0^\infty \hat{z} dt$$

式～ をラプラス変換すると、式～ が得られる。

$$m(s^2 Z(s) - sZ(0) - \dot{z}(0)) = I_{F0} I_{L0} \frac{\partial^2 M(z)}{\partial z^2} \Big|_{z_0} Z(s) \\ + I_{F0} \frac{\partial M(z)}{\partial z} \Big|_{z_0} I_L(s) + I_{L0} \frac{\partial M(z)}{\partial z} \Big|_{z_0} I_F(s)$$

$$NE(s) = L_L (sI_L(s) - I_L(0)) + M(Z_0) (sI_F(s) - I_F(0)) \\ + \frac{\partial M}{\partial z} \Big|_{z_0} I_{F0} (sZ(s) - z(0)) + R I_L(s)$$

$$0 = L_F (sI_F(s) - I_F(0)) + M(Z_0) (sI_L(s) - I_L(0)) \\ + \frac{\partial M}{\partial z} \Big|_{z_0} I_{L0} (sZ(s) - z(0))$$

$$E(s) = K_z Z(s) + K_v (sZ(s) - z_0) - K_i \frac{I_L(s)}{N} + K_I \frac{Z(s)}{s}$$

～ 式を解き、FB-RTのパラメータを代入すると、21式となり、これが伝達関数である。

$$Z(s) = \frac{s^2 + 166(0.03 + K_i)}{s^4 + 166(0.03 + K_i)s^3 + 166(-1.51 + 0.047K_v)s^2 + 166(-0.75 - 25K_I + 0.047K_z)s + 0.78K_I} \dot{z}$$

21

次にコイルのチルト、およびスライディングの運動方程式について記述する。コイルのチルト方向、およびスライディング方向への方程式は 22 式～25 式である。

$$F_x = \pi R I \left( u \frac{\partial B_z}{\partial r} - \frac{w_x}{R} B_\theta - w_y \left( \frac{\partial B_z}{\partial z} + \frac{B_r}{R} \right) \right) \quad 22$$

$$F_y = \pi R I \left( v \frac{\partial B_z}{\partial r} - \frac{w_y}{R} B_\theta + w_x \left( \frac{\partial B_z}{\partial z} + \frac{B_r}{R} \right) \right) \quad 23$$

$$L_x = -\pi R^2 I \left( v \frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{u}{R} B_\theta + w_x \left( \frac{\partial B_r}{\partial z} + \frac{B_z}{R} \right) \right) \quad 24$$

$$L_y = -\pi R^2 I \left( -u \frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{v}{R} B_\theta + w_y \left( \frac{\partial B_r}{\partial z} + \frac{B_z}{R} \right) \right) \quad 25$$

ここで、

$$R \sin \beta' = w \sin(-\alpha) = -w_y \quad , \quad R \sin \alpha' = w \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = w \cos \alpha = w_x$$

$$u = d \cos \gamma = x, \quad v = d \sin \gamma = y$$

とすれば、式 22～25 は式 26～29 となる。

$$\begin{aligned}
F_x &= \pi R I \left( \frac{\partial B_z}{\partial r} x - B_\theta \sin \alpha' - R \frac{\partial B_r}{\partial r} \sin \beta' \right) \\
&\approx \pi R I \left( \frac{\partial B_z}{\partial r} x - B_\theta \alpha' - R \frac{\partial B_r}{\partial r} \beta' \right)
\end{aligned} \tag{26}$$

$$\begin{aligned}
F_y &= \pi R I \left( \frac{\partial B_z}{\partial r} y + B_\theta \sin \beta' - R \frac{\partial B_r}{\partial r} \sin \alpha' \right) \\
&\approx \pi R I \left( \frac{\partial B_z}{\partial r} y + B_\theta \beta' - R \frac{\partial B_r}{\partial r} \alpha' \right)
\end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
L_x &= -\pi R^2 I \left( \frac{B_\theta}{R} x + \frac{\partial B_r}{\partial r} y + R \left( \frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{B_z}{R} \right) \sin \alpha' \right) \\
&\approx -\pi R^2 I \left( \frac{B_\theta}{R} x + \frac{\partial B_r}{\partial r} y + R \left( \frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{B_z}{R} \right) \alpha' \right)
\end{aligned} \tag{28}$$

$$\begin{aligned}
L_y &= -\pi R^2 I \left( \frac{B_\theta}{R} y - \frac{\partial B_r}{\partial r} x - R \left( \frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{B_z}{R} \right) \sin \beta' \right) \\
&\approx -\pi R^2 I \left( \frac{B_\theta}{R} y - \frac{\partial B_r}{\partial r} x - R \left( \frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{B_z}{R} \right) \beta' \right)
\end{aligned} \tag{29}$$

よって、運動方程式は、スライディング方向が 30、31 式、チルト方向が 32、33 式となる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \pi R I \left( \frac{\partial B_z}{\partial r} x - B_\theta \alpha' - R \frac{\partial B_r}{\partial r} \beta' \right) \tag{30}$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = \pi R I \left( \frac{\partial B_z}{\partial r} y + B_\theta \beta' - R \frac{\partial B_r}{\partial r} \alpha' \right) \tag{31}$$

$$mR^2 \frac{d^2 \alpha'}{dt^2} = -2\pi R^2 I \left( \frac{B_\theta}{R} x + \frac{\partial B_r}{\partial r} y + R \left( \frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{B_z}{R} \right) \alpha' \right) \quad 32$$

$$mR^2 \frac{d^2 \beta'}{dt^2} = 2\pi R^2 I \left( \frac{B_\theta}{R} y - \frac{\partial B_r}{\partial r} x - R \left( \frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{B_z}{R} \right) \beta' \right) \quad 33$$

## 4 - 2 制御コイルの構成

FB-RT 装置のコイル、浮上実験用磁石、および、レーザー変位計のパラメータは下記のようになっている。これらは、図 36、および図 37 のように配置されている。なお、図 37 中の P0、P90 は現在設置されていない。

### 引き上げコイル

ターン数 N=283

コイル直径 160[mm], 内径 80[mm], 外径 240[mm], 高さ 56[mm]

線径 1[mm]×6[mm]

抵抗 0.21[Ω] (測定値)

自己インダクタンス 9.9[mH] (測定値)

起磁力 6[kAT] (21[A] × 283 ターン) 水冷にて定常

### 浮上実験用永久磁石

直径 60φ-40φ[mm] (リング型), 厚み 10[mm]

質量 0.13[kg]

表面磁場強度 0.33[T]

表面処理 ミツヤマの研磨

### サドルコイル

ターン数 N=48

コイル形 34.6[mm]×50[mm] 長方形

線径 1.3φ[mm]

抵抗 0.1[Ω]

自己インダクタンス 0.16[mH] (計算値)

起磁力 1[kAT] パルス運転

FB - RT ではキーエンス社製赤外半導体レーザー変位センサ (LB - 01) にて位置検出を行った。位置信号はに電圧で出力され、 $10\mu\text{m}/\text{mV}$  である。このセンサを 3 個使用することで、(Z、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ ) のそれぞれの軸について位置を検出する。スライディング (X, Y) 制御を行なうためには、5 個を要する。位置検出法は、浮上物体の下部より 3 本のレーザーを照射し、その位置信号を演算することで位置 Z とチルト ( $\theta_x$  ,  $\theta_y$ ) の変位信号を検出する。

LB-01 ( センサーヘッド )

赤外半導体レーザー変位センサ ( 高精度モードにて使用 )

基準距離 100[mm] , 測定範囲 40[mm] , 分解能 40[ $\mu\text{m}$ ]

波長 780[nm] (不可視) 、 出力 3[mW]

アナログ出力 4[V] ( $10\mu\text{m}/\text{mV}$ )

サンプリング周期 20ms]

LB-60 ( センサーアンプ )

ゼロ点調整可能

ゲイン調整可能

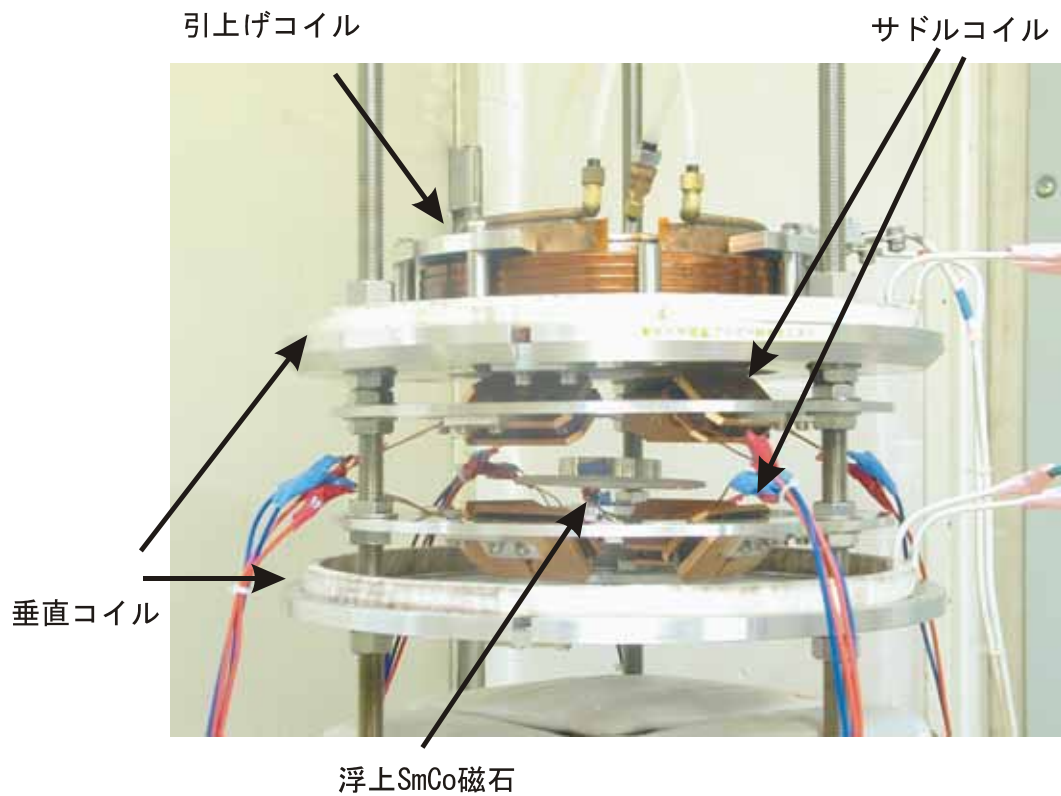


図 36 . FB-RT の構成

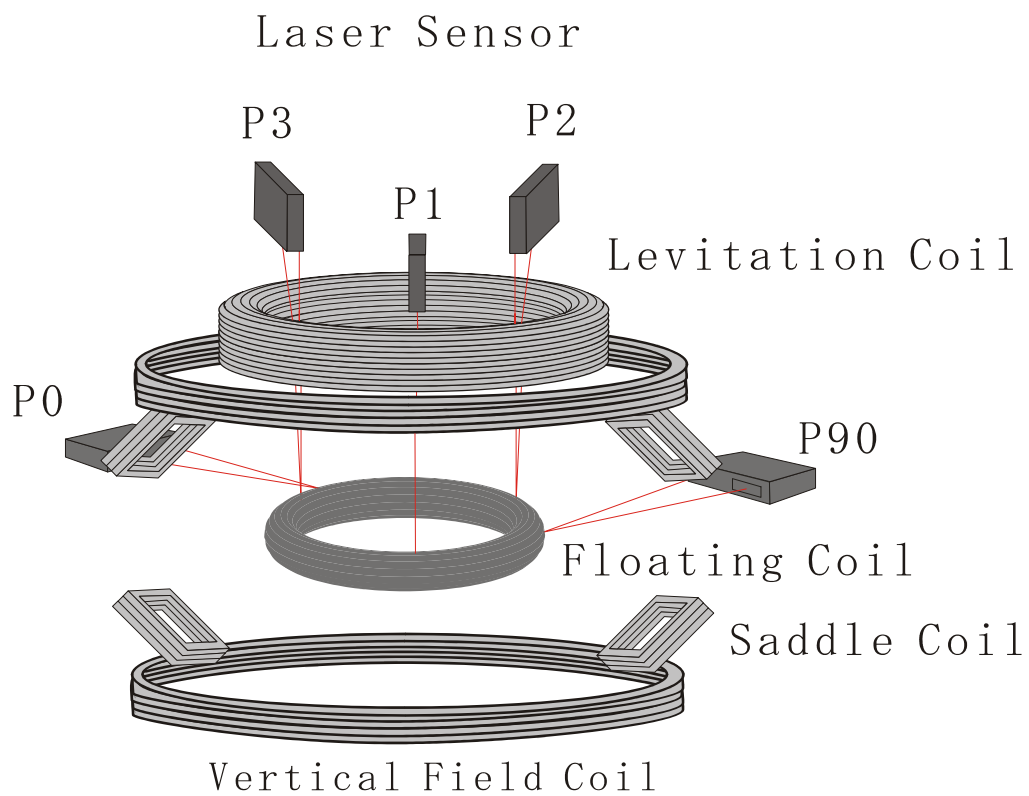


図 37 . FB-RT のコイル位置検出システム

### 4 - 3 デジタル制御系の導入

コイルの多軸浮上制御を行う場合、制御系統の増加によりアナログ回路では回路が複雑になるといった問題がある。また、オフセットの調整の問題が生ずる。そのため、デジタル制御系を導入し、これらの解決を図った。

FB - RT 装置での小型コイルの浮上実験を行うことを考え、検討した結果、以下の性能のデジタル制御系が必要であることがわかった。

- ・ コイルの不安定性の時定数が $\sim 20\text{ms}$  であるため、 $100\ \mu\text{s}$  程度のサンプリング時間が必要
- ・ 浮上制御中の非常事態において割り込み処理が必要
- ・ アナログ入力 $\cdots 5\text{ch}$  (レーザー変位計による位置測定)
- ・ アナログ出力 $\cdots$  引き上げコイル  
+ サドルコイル (姿勢制御用) 4 系統
- ・ レーザー変位計の出力電圧が $\pm 4\text{V}$  であるため、 $\pm 10\text{V}$  程度のアナログ I/O であること (Mini-RT に設置されているレーザー変位計の出力は $\pm 10\text{V}$  であるため、デジタル制御系を Mini-RT に導入した場合、 $\pm 10\text{V}$  の I/O が必要である。)

この条件により、National Instruments 社製の PXI を導入し、同社の Lab-VIEW FPGA を用いたリアルタイム制御を行うこととした。

図 38 がデジタル制御系の構成で、フィードバック制御回路はすべて PXI 中にデジタル回路として構築され、アナログ I/O を通して FB-RT の制御を行う構成になっている。

デジタル制御系を用いて Z 軸での位置を制御した結果が図 41 である。図 39 の計算結果、および図 40 のアナログ回路での制御結果と比較しても、問題なく制御できており、デジタル回路での制御には成功したと言える。



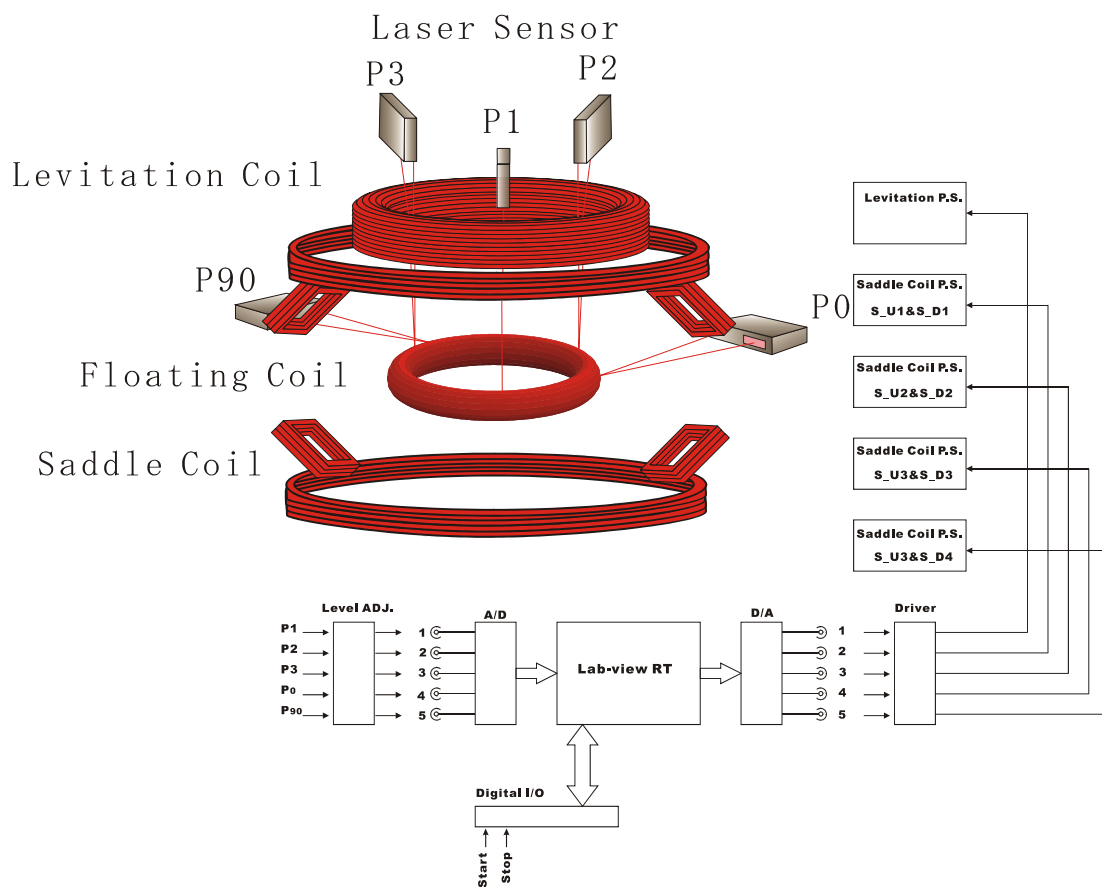


図 38 . デジタル制御系の構成

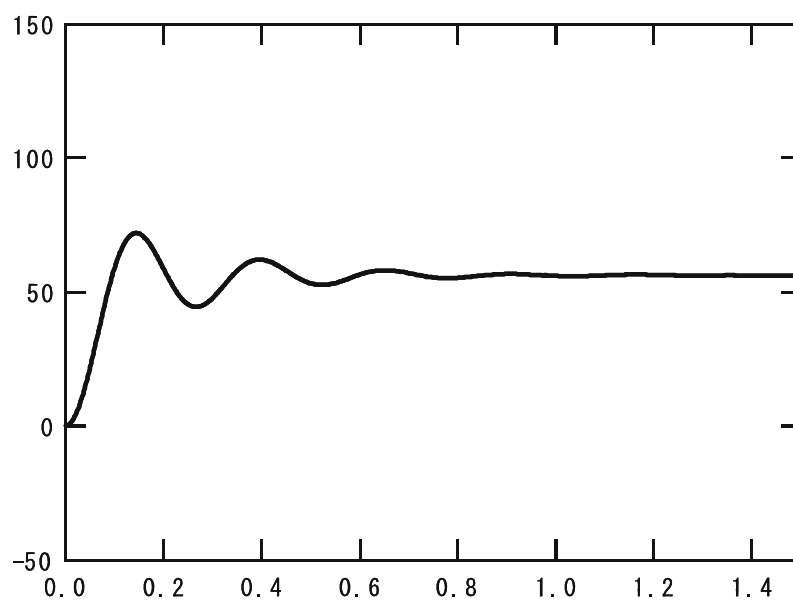


図 39 . 浮上制御の計算結果

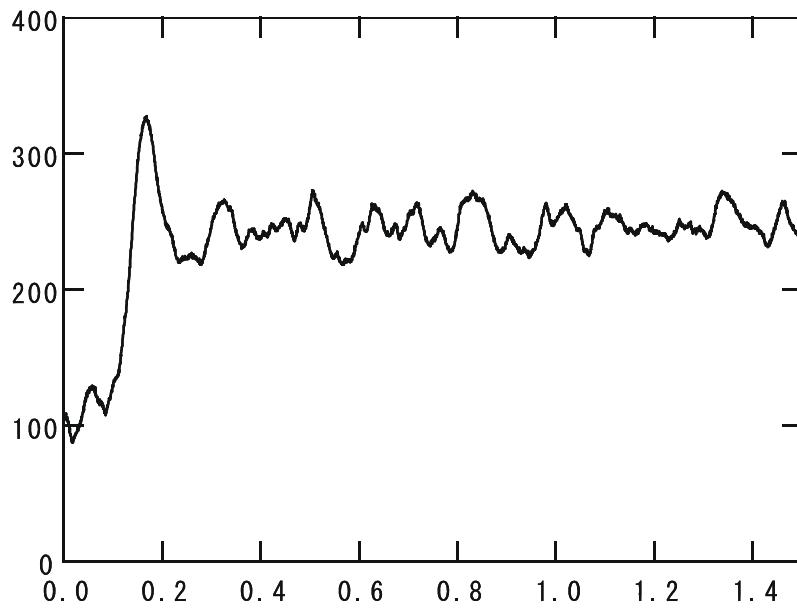


図 40 . アナログ回路での制御

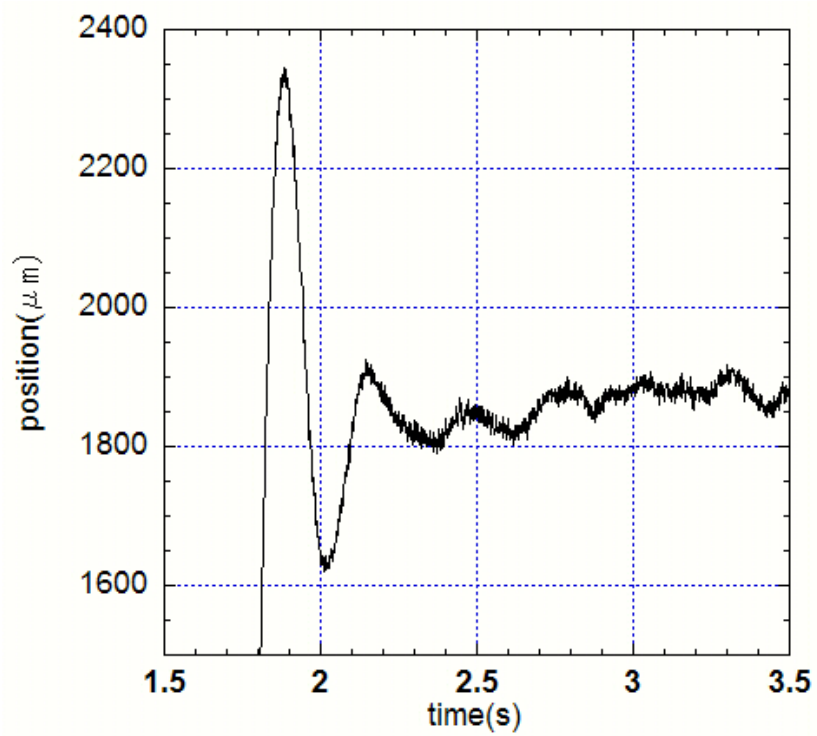


図 41 . デジタル回路での制御

#### 4 - 4 チルト制御実験

前節までに述べたシステムによりチルト制御を行った。まず、浮上している浮上試験用磁石に外乱を与え、チルトが力学的に安定な磁場配位にてチルトを発生させ、その後、制御系を ON にした。約 5[Hz]のチルトは図 42、44 の様に減衰し、安定化した。その時の制御電流はそれぞれ、図 43、45 である。チルト制御系が ON の状態にて、チルト信号が完全にゼロに落ち着かない理由は、スライディング方向の制御を行っていないためである。したがって、スライディング制御を行なうことにより、この信号は安定に落ち着かせる事が可能となる。

また、この結果において、X 方向のチルトは 0.05(rad)付近、Y 方向のチルトは-0.07(rad)付近で安定化している。これは、チルトが起こっていない状態において、浮上試験用磁石が重心のずれによって傾いており、この値をオフセットとしてプログラム中に入力し、この点を 0 としてフィードバック制御しているからである。

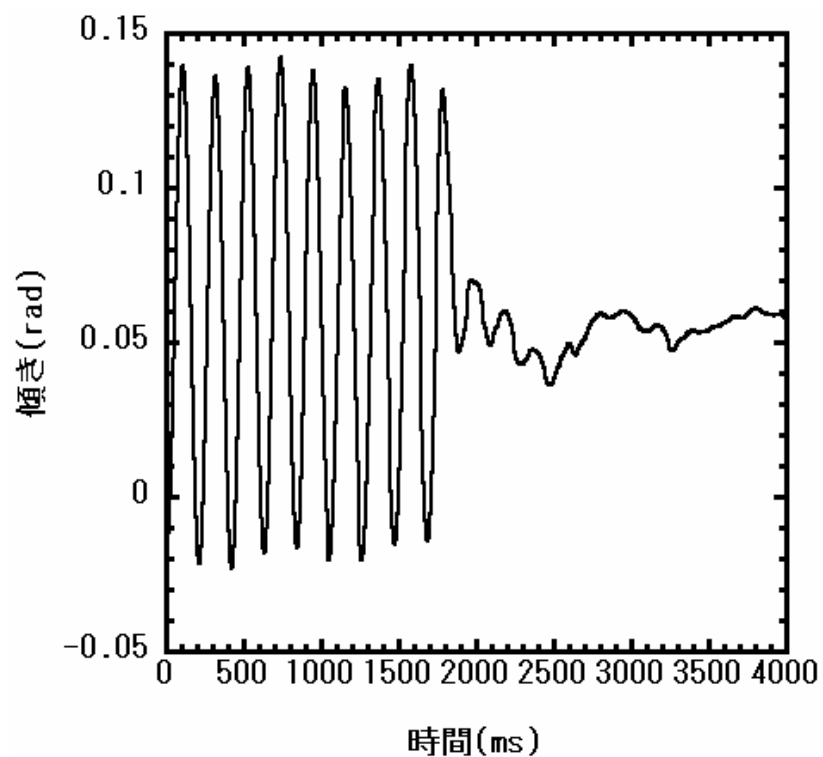


図 42 . X 方向へのチルト制御結果

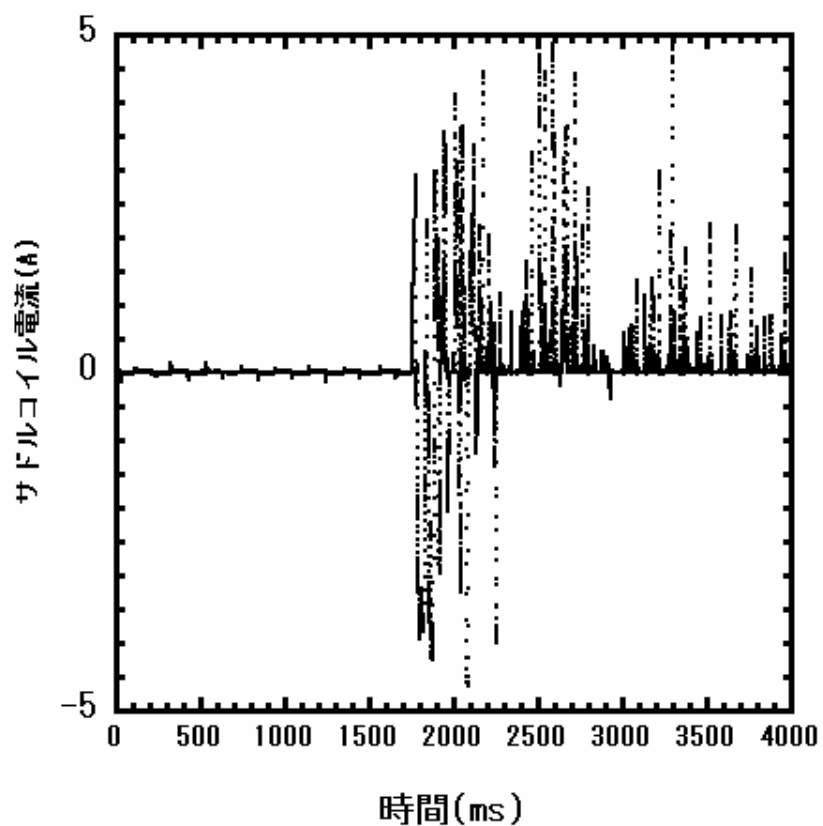


図 43 . X 方向へのチルト制御時のサドルコイルの電流値

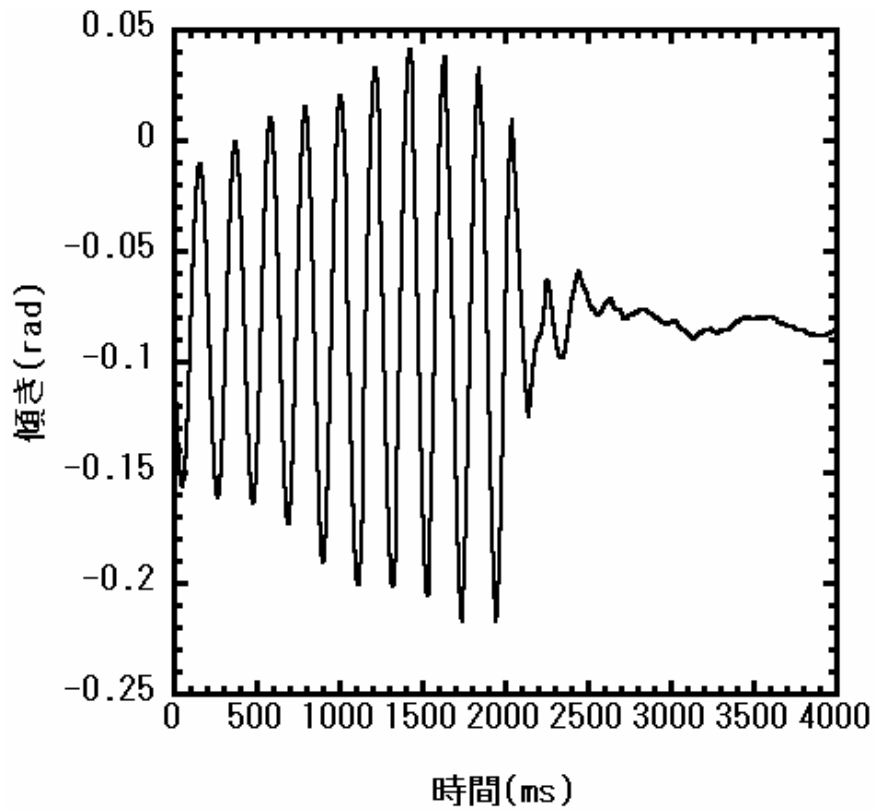


図 44 . Y 方向へのチルト制御結果

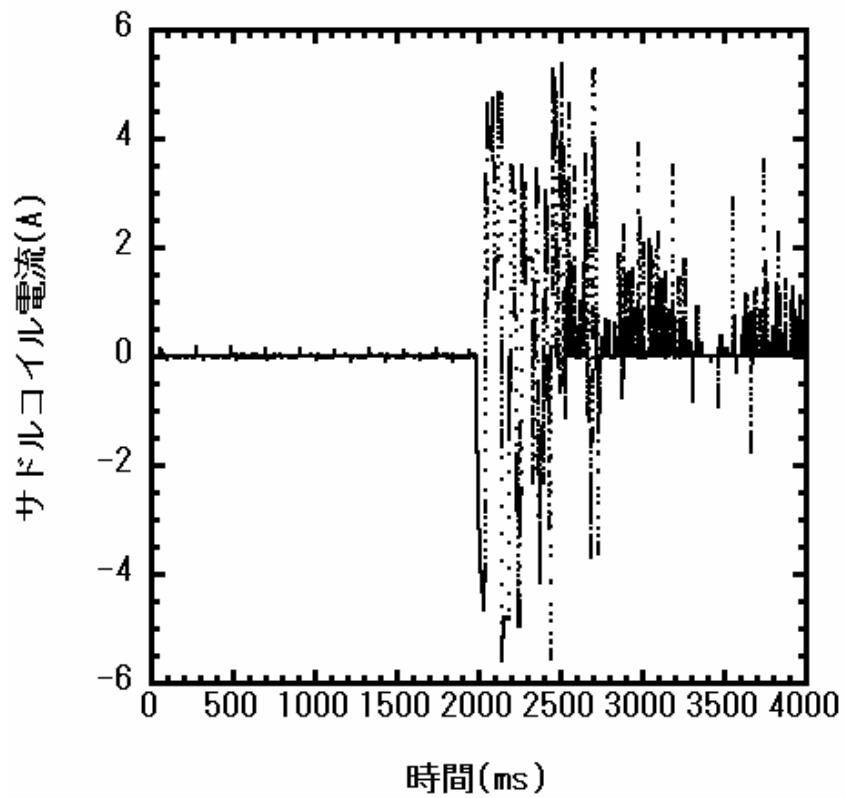


図 45 . Y 方向へのチルト制御時のサドルコイルの電流値

## 第 5 章 結論

1. YBCO 線材を用いて小型の高温超伝導 (HTS) コイルを製作し、YBCO 線材によるコイル製作において、接続の際の問題点とその回避方法を示すことができた。また、それにより、YBCO でのコイル製作には本質的な問題は無く、Bi-2223 と同様の方法で製作できることを確認し、60 時間以上の電流減衰時定数を得た。ただし、本研究で行った巻き線方法では、線材の劣化が確認されているため、その対策を採る必要がある。
2. 制御無しでの浮上について解析と実験を行い、それが一致していることを示すことができ、それにより、Mini-RT のような大型の装置には適用されないことを確認した。この浮上方法は、超伝導軸受けなどに応用することが考えられる。
3. FB-RT の制御系をアナログ制御からデジタル制御に切り替え、これを用いての浮上制御、および、チルト制御を行えるようにした。多軸制御系では、現在は 3 軸制御となっているため、スライディング制御が行えない。

## 参考文献

- [1] C.H. Woods, R. K. Cooper, V.K. Nell, and C. E. Taylor, *Journal of applied physics*, Vol. 41, p. 3295, 1970
- [2] J. File, G. D. Martin, R. G. Mills, and J. L. Upham, *Journal of applied physics*, Vol. 40, p. 2106, 1969
- [3] V. Kelvin Nell, and Richard K. Cooper, The review of scientific instruments, Vol. 40, p. 295, 1969
- [4] J. File, G. D. Martin, R. G. Mills, and J. L. Upham, *Journal of applied physics*, Vol. 39, p. 2623, 1968
- [5] R. Freeman, M. Okabayashi, G. Pacher, B. Rip in, J. A. Schmidt, J. Sinnis, and S. Yoshikawa, p. 27, IAEA-CN-28
- [6] J. H. Schultz, et.al, IEEE Trnns.Appl.Supercoud. 9, p.378. 1999
- [7] L.Masur, et.al, IEEE Trnns.Appl.Supercoud. 11, p.3256. 2001
- [8] J.Morikawa, et.al, Jpn.J.Appl.Phys. 40, p.1029, 2001
- [9] J.Bechhoefer, Rev.Mod.phys, Vol.77,No.3,July,2005
- [10] Y.Ogawa, et.al, J.plasma and Fusion Res. SERIES , Vol.5(2002) 100-105
- [11] Y.Ogawa, et.al, in Fusion Energy , IAEA-CN-94/ICP-12
- [12] Y.Ogawa, et.al, J.plasma and Fusion Res. 79, 2003, 643-644
- [13] 伊藤正美著、自動制御概論、昭晃堂

[14] 電気学会編、磁気浮上と磁気軸受、コロナ社

[15] 小沢大作 東京大学大学院工学系研究科修士論文



## 謝辞

この修士論文を執筆するに当たり、まずは平日はもちろん週末まで、ほとんど年中無休で一年間御指導を頂いた小川雄一教授に心から感謝致します。森川惇二助手は、実験方法や回路の設計を根気よく教えてくださり、そのおかげで実験、装置に関する様々なノウハウを得ることができ、装置を作り上げることができました。吉田善章教授には私の発表の機会などで非常に鋭いご指摘を頂き、常に緊張感のある雰囲気の中で研究に取り組むことができました。古川勝助教授には、発表の機会などで、非常に優しく指導していただき、大変励みになりました。斉藤晴彦助手には、吉田研に伺った際に大変優しく対応していただきました。NIFSの水戸先生には、研究会などの場で非常に参考になるご指摘をいただきました。NIFSの柳長門助教授には、超伝導分野から多くの実験技術を変丁寧にご指導いただきました。NIFSの辺見努さんには実験の際に様々なご指導をしていただきました。

小川研究室の皆さんからは大変多くの協力をして頂きました。D2の後藤さんには輪講で大変お世話になりました。D1の谷塚さんには、実験の際に様々な協力をしていただきました。M2の坂田君は、夏を前にしていなくなりましたが、その研究に対する姿勢が非常に励みになりました。M1の寺井君は輪講の時の鋭い指摘が大変参考になりました。卒論生の二宮君は様々な話題を提供してくれました。吉田研の方々とは、研究室が離れており、接する機会がありませんでしたが、授業の時などにやさしく接していただきました。この2年間は、このように大変多くの皆さんに協力を頂き、有意義に研究活動を進めることができました。ここに深く感謝致します。

2007年2月吉日

加藤 肇

## 学会発表リスト

2006年 核融合エネルギー連合講演会 ポスター発表

「磁気浮上コイルの多軸制御システムの開発」

2006年 プラズマ核融合学会 ポスター発表

「磁気浮上コイルのデジタル多軸制御システム」