

Bi-2223超伝導マグネットの 設計と製作及び解析

電子情報工学科

小田部研究室

04232024

薦田 優

2008年2月26日

Contents

1	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	高温超伝導体	2
1.3	Bi-2223線材の製作方法	4
1.3.1	PIT法	4
1.3.2	加圧焼結法:CT-OP(ConTrolled-Over Pressure)	6
1.3.3	CT-OPの効果	7
1.4	Bi-2223線材の超伝導機器への応用	9
1.4.1	超伝導送電ケーブル	10
1.4.2	磁気浮上式列車(JR式マグレブ)用マグネット	10
1.4.3	当研究室での試み	11
1.5	本研究の目的	12
2	実験	13
2.1	超伝導マグネット	13
2.2	通電試験	15
2.3	中心最大磁界の温度依存性	16
2.4	中心部での磁界分布	17
3	結果および考察	20
3.1	通電試験	20
3.1.1	直流電流通電試験	20
3.1.2	交流電流通電試験	21
3.1.3	交流重畳通電試験	23
3.2	中心最大磁界の温度依存性	24

3.3 磁束密度分布	30
4 まとめ	35
参考文献	38

List of Tables

2.1	Bi-2223超伝導マグネットの諸元	15
2.2	マグネットに使用された Bi-2223 線材の諸元	15
3.1	1 A 通電時の主要箇所の磁束密度	25
3.2	各温度域での中心最大磁界予測	29

List of Figures

1.1	PIT 法概要図	5
1.2	焼結後のSEM像 (a) 大気圧 (従来) 焼結線材 (b)CT-OP 線材	7
2.1	Bi-2223超伝導マグネット	13
2.2	径方向断面模式図。(A):中心最大磁界部分 (B):最大経線磁界部分 (C):線材に対する垂直磁界の最大となる部分	14
2.3	パンケーキ型コイルの解析モデル	18
2.4	ソレノイド型コイルのモデル概要図	19
2.5	ソレノイド型コイルの解析モデル	19
3.1	77.3 K でのマグネットの $V-I$ 特性	20
3.2	65K でのマグネットの $V-I$ 特性	21
3.3	交流電流通電 (振幅 10 A、周波数 10 Hz)	22
3.4	交流電流重畳通電 (直流電流 : 15.2 A 、交流電流 : 振幅 0.2 A 、周波数 300 Hz)	23
3.5	図 2.3 の解析結果	24
3.6	77.3 K における $B-I$ 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)	25
3.7	70 K における $B-I$ 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)	26
3.8	65 K における $B-I$ 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)	26
3.9	60 K における $B-I$ 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)	27
3.10	55 K における $B-I$ 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)	27

3.11	50 K における B - I 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)	28
3.12	45 K における B - I 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)	28
3.13	マグネットの B - T 特性	30
3.14	図 2.5 の解析結果	31
3.15	マグネットの軸方向の磁束密度分布	32
3.16	マグネットの径方向の磁束密度分布	32

Chapter 1

序論

1.1 はじめに

1908年にオランダのカメリン・オンネス (Kamerlingh-Onnes) がそれまで永久気体であると考えられていたヘリウムの液化に初めて成功し、それを用いて当時最も純度の高かった金属である水銀に極低温での抵抗測定時に突然ゼロ抵抗となる超伝導性を発見したのが1911年である。それ以来、様々な単体金属、合金や化合物などに超伝導性が認められ、超伝導の発現機構に関する研究が進められてきた。しばらくの間は決定的な理論は現れなかったが、1957年に超伝導発現機構を説明することのできるBCS(Bardeen Cooper Schrieffer)理論が登場し、その理論によると、超伝導体が超伝導状態から常伝導状態へと転移する温度である臨界温度は、高々30 K程度が限度であろうと考えられていた。

しかし、1986年にベドノルツ (Johannes G. Bednorz) とミュラー (Karl Alex Müller) によって、酸化物系物質の (La-Ba-Cu-O) で30 K級超伝導体の可能性が示され、その後、Y-Ba-Cu-O や Bi-Sr-Ca-Cu-O などの液体窒素の沸点 (77.3 K) を大きく超える臨界温度を持つ酸化物超伝導体が発見された。これらいわゆる高温超伝導体はその臨界温度の高さから冷却コストの削減が考えられ、応用化に大きな期待が寄せられ、高温超伝導体を用いた線材の開発が行われた。しかし、発見から20年近く経とうしている現在でも、実用化までには改善課題が残っており、超伝導機器への応用のための一層の特性改善が求められている。

超伝導機器への応用としては、超伝導状態では電気抵抗なしに大容量の電流を流すことができるという性質から、エネルギーの損失なく大電力を送電できる送電線や超伝導エネルギー貯蓄装置 SMES(Superconductive Magnetic Energy

Storage)や超伝導トランス[1]などが挙げられる。また、安定して高磁界を発生させられることから磁気浮上式列車用超伝導マグネット[2]、船舶推進用モーター[3]などが考えられている。これらの機器は線材加工した超伝導体から製作されていることから、応用研究のなかでも線材加工は大きなウェイトを占めている。また、ジョセフソン接合の磁束の量子化の特徴を生かして、SQUID(Superconducting QUantum Interference Device：超伝導量子干渉素子)などの高感度磁気センサが製作されている。医療用では磁気共鳴映像診断装置(MRI)などの機器が挙げられる。

現在実用超伝導線材として利用されているものは、NbTiやNb₃Sn線材であり、高温超伝導体を用いた線材はこれら2つの超伝導線材には実用性の面でまだ及ばない。しかし、これら金属超伝導体は、使用できる温度域や磁界に限りがあり、液体ヘリウムから液体窒素での冷却まで広い温度域で使用可能である高温超伝導体の線材の実用化が待ち望まれている。

1.2 高温超伝導体

高温超伝導体である酸化物超伝導体はセラミックスであり、非常に脆い。何より超伝導状態時に電流が流れやすい方向が決まっているため、大容量の電流を流すためには電流パスとなるCu-O面を電流方向につなぎ合わせ、結晶の配向を揃えてやる必要がある。そのため、線材の設計と加工が難しいとされてきた。これまで主にYやGd、Dyなどの希土類酸化物超伝導体RE-123コート線材と、Bi系酸化物超伝導体の2種類が研究されてきた。

Y-Ba-Cu-OやGd-Ba-C-Oなどの希土類元素を用いたコート線材の臨界温度 T_c は生成条件に左右されるが、高いものではY-Ba-Cu-Oで92 Kを記録している。また、Bi系に比べ異方性が小さく、ピン力がBi系に比べて強い。そのため、高磁界域での臨界電流密度 J_c 特性の低下が抑えられ、広範囲の温度域で利用できる超伝導線材として応用技術の研究が進められている。しかしIBAD法やPLD法などにより結晶を配向させるための高価な機材を必要とする。一方Bi系超伝導体は c 軸方向に比べて、超伝導電流のパスとなるCu-O面方向の成長が非常に早く、薄い平板状の結晶が作られる。平板状の結晶は圧縮されるとブロック層が壊れ、横滑りを起こしやすいという性質を備えているため、銀を被服用の管材として内部に超伝導体の材料となる粉末を注入し、熱処理と機械

的な圧延を繰り返す PIT (Powder In Tube) 法という方式で簡単に c 軸方向に配向し、RE 系に比べて容易に長尺な線材が製作できる。現在では km オーダーの線材が量産できるようになっているが、対する RE 系も数年内には長尺線材が製作可能になるとされている。

Bi 系の酸化物超伝導体だが、臨界温度 T_c が 30 K である $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ (Bi-2201) と、95 K の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi-2212)、110 K の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223) が存在する。このうち、最も有用であるのは臨界温度の高い Bi-2223 層であり、Bi-2212 は低温高磁界での特性が金属超伝導体を遙かに凌ぐことから、冷凍機での冷却が可能であり、かつ高い臨界電流をもっている 20 K での利用が考えられている。一方、Bi-2223 はその高い臨界温度から低温域から液体窒素温度下までの広い温度域での応用を視野にいれ研究開発が進められている。また、Bi-2223 は Bi を部分的に Pb で置換することによって熱的な安定性が得られるということが知られているため、実際は (Bi,Pb)-2223 という形で用いられることになる。このように、長尺線材としては Y 系、Gd 系高温超伝導体と比べて Bi 系酸化物超伝導体が原料のコストや線材加工が容易という点で線材応用に適しているといえ、また Bi 系の超伝導体の中では応用に際して応用範囲、運用コストという点で現段階では Bi-2223 が超伝導長尺線材の材質として適しているといえる。

Bi 系酸化物超伝導体の特徴として、凝縮エネルギー密度が小さく、ピンニング力が弱いということが挙げられる。そのため、Bi 酸化物系超伝導体は磁界の影響を受けやすい。特に高温高磁界下における磁束クリープ [4] の影響は大きく、臨界電流密度 J_c は自己磁界中でのものと比べると著しく低下してしまう。また、 E - J 曲線の立ち上がり、金属超伝導体や、同じ酸化物超伝導体の Y 系などと比べて緩やかであることが知られているが、これは E - J 曲線を

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (1.1)$$

と表したときの n を超伝導体の実用性を判断する指標の 1 つである n 値が高温高磁界中では特に低いという特性を示している。なお、このときの E_c は電界基準、 J_c は E_c を用いて定義された臨界電流密度である。 n 値が低い原因は磁束クリープの影響がより大きいことに加え、臨界電流密度の値が広く分布していることであると考えられる。ここから超伝導体内のピン力の不均一さが覗えるが、これは結晶内部の特性の差や結晶間の弱結合の存在や、線材内の超伝導フィラ

メントのソーセージングなどが影響していると考えられている。前述した PIT 法を用いて Bi 系線材は製作されているが、2 次焼結の段階で加圧焼結法を導入することで線材の I_c が向上することがわかっており、現在は加圧焼結法の最適化がなされるよう研究されている。

1.3 Bi-2223 線材の製作方法

Bi 系超伝導体は異方性が著しく、 c 軸のコヒーレンス長が短いため、薄い平板結晶を c 軸配向させ、結晶間の結合を強める必要がある。これが実現できれば高い J_c を持つ Bi 系線材が製作できるようになると考えられている。前述したとおり、これを機械的に実現可能なのが PIT (Powder In Tube) 法である。

1.3.1 PIT 法

Bi 系線材の製作方法は、発見当初から PIT 法が用いられてきた。PIT 法とは、銀管の中に Bi 超伝導体の材料となる酸化物の仮焼き粉末を充填し、伸線、圧延を繰り返してテープ状に加工した後、生成熟処理を行い、銀管で被服された線材を作製するというものである。このため別名銀シース法とも呼ばれ、線材自身も銀シース線材と呼ばれる。このようにして単芯線が作られるが、線材の超伝導状態の安定化のためには多芯線化が必要であり、そのために PIT 法では生成熟処理を行う前のある程度加工した丸線を束ねて再度銀管の中に挿入し、単芯線同様の工程を繰り返していく。

次に PIT 法による銀シース線材の一般的な作製プロセスとその概要を示す。

酸化物の仮焼き粉末 秤量された酸化物や炭化物を仮焼きによって焼結させ、その後砕いてできる粉末には Bi-2212 を主相として、Ca、Cu、Pb などを含む化合物が生成されている。

粉末の充填・加工 銀管に仮焼きした粉末を充填し、丸ダイスを用いての線引き、溝ロールでの圧延などを行い細線化を行う。これで単芯線が出来上がり、多芯線化を行うために、銀管の中に単芯線を大量に束ねて挿入する。これを何度か繰り返し多芯線化が完了する。

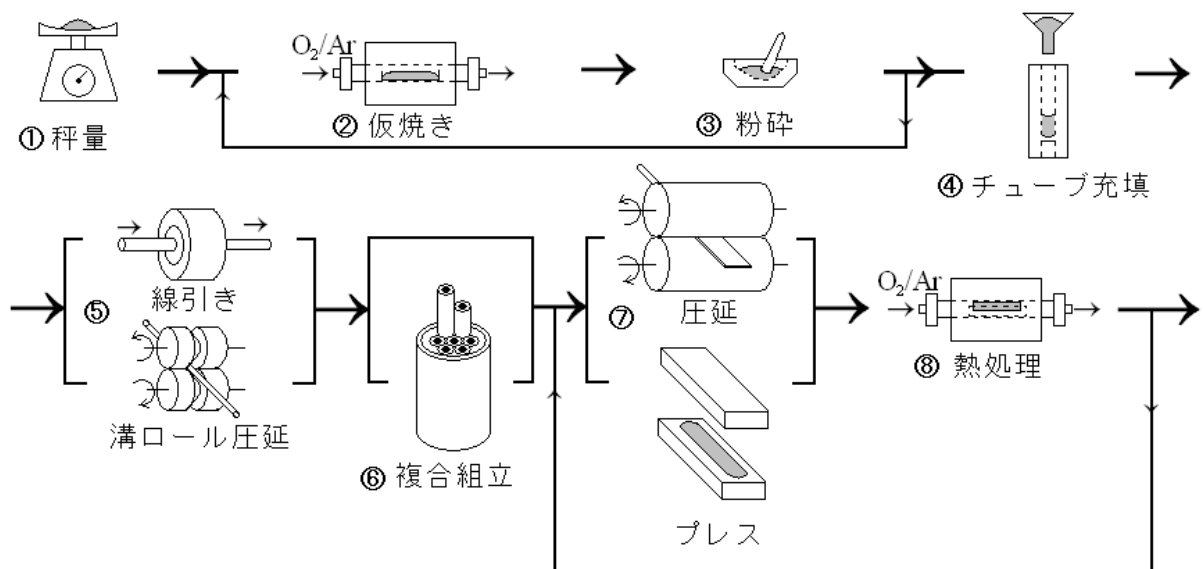


図 1.1: PIT 法概要図

圧延と焼結 図にあるように、焼結プロセスと圧延プロセスは何度も繰り返される。1度目の圧延ではテープ状にした線材を1次焼結し、Bi-2223結晶を成長させ、再び圧延を行う。焼結時に超伝導組織の密度が低下しているが、圧延によりテープ内の結晶が密になると共に、圧縮によって結晶配向がそろうというBi系の特徴のために、結晶配向の向上も行われている。この後2次焼結を行いBi-2223結晶粒同士の結合を強める。これらの工程を繰り返していき、高 J_c の線材が得られる。

熱処理について Bi-2212では、部分熔融が起こる880℃から900℃まで温度を上昇させ、10~1℃/時間の速度で温度を下降させていくことで線材の長さ方向に結晶が配向し結合性の高い組織が得られる。Bi-2223は同様の方法では熔融が起こると同時に組織の分解が起こってしまうため都合が悪い。

PIT法では粉末状の超伝導体材料をパイプの中に詰めるという工程があるが、これはBi系超伝導体がセラミックスであるため、著しく強度に欠ける。そのため機械的強度の向上や可とう性を線材に与えるための補強材としての意味を持っている。万が一超伝導状態が壊れてしまった時、電流パスとして働くことから線材の安定性の向上にも貢献している。しかし、焼結時にBi系が安定化する高温、高濃度酸素雰囲気条件に耐え、酸素を透過する材質のものでなければならない。ここで管材に銀を使用しているのは、経験的に塑性加工性や耐酸

化性、酸素透過性、高い電気伝導率などの面で優れた素材であると同時に、焼結時に内部の超伝導体材料と反応してしまうという問題がなく、同様の条件に当てはまる銅 (Cu) や金 (Au) と比べて容易に加工でき、コスト面で勝っているためである。しかし実際のところは銀だけでは強度に不安が残るため、改善のために銀合金が用いられている。ただし添加金属は Bi-2223 と反応するようなものは除外し、Mg、Sb、Mn、Cu などが候補となっている [5][6]。

また、線材を多芯化することによって単芯線に比べて線材の強度の向上、可とう性や先に述べた通り安定性の向上、交流電流を送電する際に起こる交流損失の低減などが挙げられる。しかし線材内におけるシース材の比率が上がるため J_c の低下は避けられない。そのためシース材と超伝導層の比率を考えて加工しなければならない。

このようにして Bi-2223 長尺線材が製作される訳だが、PIT 法によって制作される線材に問題がないわけではない。圧延プロセスで線材内のフィラメントにクラックが入り、焼結を行っても完全に修復がされず、そのまま残ってしまう。また、圧延時に ab 面がずれた結晶間が焼結で密になった時に空隙が生じる。これらのフィラメント内に生じる空間は線材の特性、特に J_c を低下させる原因となる。また、フィラメント内は Bi-2223 相に加えて、Bi-2201 相や Bi-2212 相、他の酸化物が混合した状態となっており、完全な Bi-2223 単相というわけではない。フィラメント間でみてもその形状や大きさが不均一な状態であり、 J_c の低下の原因となっている。

1.3.2 加圧焼結法:CT-OP(ConTrolled-Over Pressure)

前節で述べた通り、Bi-2223 長尺線材製作における PIT 法には最適化の余地があり、Bi-2223 超伝導線材の特性向上の余地はまだ残されている。PIT 法において特性のよい Bi-2223 線材を製作するために重要な工程は圧延と焼結プロセスであるが、このときクラックが焼結で修復できる程度に 2 次圧延を行い、結晶を密な状態に近づけフィラメント内の密度を低下させずに 2 次焼結を行う必要がある。この 2 次焼結の際に焼結中にガス (不活性ガス+酸素) による外圧を線材に等方的に印加する方法を導入することで、圧延時に生じるクラックの修復と、焼結によって生じる空隙の消滅を一度に行うことのできる加圧焼結法 (CT-OP:ConTrolled-Over Pressure)[7] が開発されている。このときのガス圧は

15 MPa~30 MPa で制御されている。

1.3.3 CT-OP の効果

Bi-2223 超伝導線材製作における PIT 法の焼結プロセスに CT-OP を導入することによって具体的に得られる効果について述べていく。

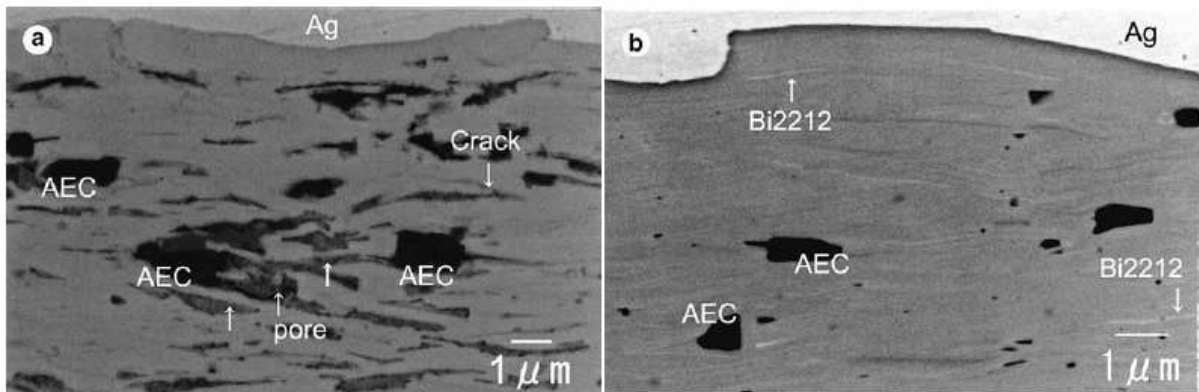


図 1.2: 焼結後の SEM 像 (a) 大気圧 (従来) 焼結線材 (b)CT-OP 線材

フィラメント内の密度 Bi-2223 の理論密度は 6.3 g/cm^3 である。これと比較してフィラメント相対密度を見ると、従来の PIT 法で製作された線材は、2 次圧延の際には 93% の相対密度であったが、2 次焼結を行うことで 83% 程度に低下していた。一方 CT-OP を導入することで相対密度はほぼ 100% の線材が製作される。これより、クラックや空隙の問題が解消されているといえる。

Bi-2223 単相化 2 次焼結後の線材のフィラメント断面を SEM で観察すると、従来の方式で製作されたものには空隙や他の Bi 系相や Ca-Sr-Cu-O、Ca-Pb-O などの異相が多く含まれている。CT-OP を導入したフィラメントは空隙が全く見られず、Ca-Sr-Cu-O、Ca-Pb-O 相も生じない。これはフィラメント Bi-2223 相対密度がほぼ 100% であるという結果とも一致する。しかし、帯磁率の温度依存性の調査により Bi-2201 相は見られなくなるが Bi-2212 相の含まれる割合は 33% ほどから 28% 程度まで減少していることより、Bi-2223 単相化は導入前と比べて若干改善されたといえる。

配向性 X線回折のロックングカーブにより測定した Bi-2223 結晶のテープ面からの結晶配向のずれを見ると、従来の配向のずれは 10 度弱だったのに対して、CT-OP を導入することで 9.7 度程度となり、密度の増加によりフィラメントの厚みが薄くなり、より配向した状態で結晶が成長しやすくなっているといえる。

結晶粒結合 MO (Magneto-Optical imaging) 法による結果より、CT-OP の導入によりクラック等の問題が解消されているだけではなく、フィラメント内の結晶粒同士の結合が強くなっていることがわかる。

臨界電流特性 短尺線材でみた従来法によって製作された線材と CT-OP を導入した線材のフィラメント断面積あたりの臨界電流密度は、銀比 1.5 の線材で 26.0 kA/cm² から 37.0 kA/cm² に、銀比 2.2 の線材で 32.3 kA/cm² から 40.0 kA/cm² に向上しており、30% 以上の臨界電流特性の向上が見込める。

機械的強度 引っ張り試験による線材の機械的強度の評価によると、臨界電流特性が劣化し始める引っ張り応力は従来法で製作された線材と CT-OP を導入した線材とでは、銀比 1.5 の線材で 85 MPa から 144 MPa に、銀比 2.2 の線材で 106 MPa から 167 MPa に向上している。銀比 1.5 の CT-OP 線材の引っ張り応力が銀比 2.2 の従来法線材の引っ張り応力より高いことから、フィラメント密度の向上のみならず、それによって引っ張りによる負荷がかかった際に空隙、クラックなどの周辺に比べて弱い部分がなくなり、弱い部分に応力の集中が起こり全体の引っ張り応力を低下させることがなくなったためだと考えられる。このことから CT-OP 導入によりフィラメントの強度自体が向上したと思われる。

2 次焼結工程に CT-OP を導入することで、上記のような線材の変化が報告されている [8][9]。

まとめると、

- J_c 、 I_c の向上 (相対密度の向上、 c 軸配向性の向上、弱結合の改善)
- n 値の向上 (臨界電流密度 J_c の向上、フィラメントの質の向上によるピン力のばらつきの改善)

- 不可逆磁界 B_i の向上 (ピン力のばらつきの改善によるピン力の向上、臨界電流密度 J_c の向上)
- 機械的強度の向上 (フィラメント強度の向上、相対密度の向上)

以上のような効果が得られている。

また、長尺な線材の臨界電流特性も短尺線材と比較して、従来法で製作された線材も CT-OP 線材もマクロ的にみると特性は劣化するが、CT-OP 長尺線材の特性は短尺線材と比べても遜色ないものとなる。これは全体の不均一さが改善されていることを意味している。

Bi-2223 線材は液体窒素中での動作が想定されているが、フィラメント内に空間がある状態で液体窒素による冷却をおこなうと、空間内に液体窒素が侵入し、温度が上昇したときに中で気化してしまい、線材が膨張してしまうことがある (Ballooning)。これによって線材の特性は大きく低下することになるのだが、CT-OP を導入することでクラックや空隙の除去が行えるために、このような問題も同時に解決されることになる。

このように、CT-OP を導入することによって Bi-2223 超伝導線材の特性は大きく向上したといえるが、Bi-2223 単相化については完全ではなく、特性の向上の余地は残されている。未解決の項目を改善するため、CT-OP の条件最適化については現在も研究されている。

1.4 Bi-2223 線材の超伝導機器への応用

Bi-2223 超伝導線材の製作工程に CT-OP が開発、導入されたことによって、その臨界電流は今では 200 A を記録しており、臨界電流 150 A の Bi-2223 線材が量産可能なところまで来ている。また、歩留りも 20% から 90% と大きく改善され、無欠陥で 1500 m の長尺線材が工業的に量産可能となり、当初は超伝導マグネットへの応用が主だったが、現在ではその他の分野への応用にも強く期待されている。ここでは、実用に十分耐えうるまでに特性改善された Bi-2223 線材の試験運用例をいくつか挙げてみる。

1.4.1 超伝導送電ケーブル

住友電気工業製の Bi-2223 線材が、アメリカニューヨーク州の州都オルバニーの2つの変電所間の一部をつなぐ 350 m 長の超伝導ケーブルとして 2006 年 6 月末に敷設が起工され、同年 8 月に竣工した。このケーブルは 7 km の線材を使用した 350 m、34.5 kV-800 A の三心一括型のケーブルであり、冷却時の収縮や室温と液体窒素温度間の熱サイクルに耐えられるだけの耐久度を有し、また従来の線材に比べると非常にコンパクトである。アメリカでは、2001 年の 1 月にカリフォルニア州での広域停電や、2003 年の 8 月 14 日には北米大停電がおき、規模を問わず、送配電線の損傷や地下ケーブルや発電所の火災などにより停電の問題が後を絶たないという背景があった。現在ではそれを踏まえて、おざなりになっていたエネルギー問題を解決するために 2030 年までに超伝導ケーブルによる高効率、高信頼性、高い安全性をもった電力供給を全米に実現しようという計画の先駆けとして、デモンストレーションの意味をこめて半年の試験運用が行われた。従来のケーブルに比べて 3~5 倍の電力を運べる上に損失が抑えられ、昇圧・高圧トランスを使うことなく電流を送電でき、安全面ではケーブルの火災等も防ぐことができると考えられている。また、ケーブル間の中間ジョイント技術も導入されており、これによってさらに長い線路にも対応することが可能であるということを示した。

1.4.2 磁気浮上式列車 (JR 式マグレブ) 用マグネット

JR 東海が山梨実験線で研究開発を進めている磁気浮上式列車のリニアモーター推進・案内・浮上に兼用する高温超伝導マグネットの線材に Bi-2223 線材が使用されている。2005 年 11 月 22 日から 12 月 9 日にかけて行った走行試験では安定した励磁性能を発揮し、列車の速度は最大で 553.9 km/h を記録した。これまでマグネットの材料としては NbTi が用いられてきたが、コストダウンと磁気浮上式列車の信頼性の更なる向上のために、1998 年より 20 K での運用を視野にいれ Bi-2223 線材を用いた超伝導マグネットの開発が行われていた。Bi-2223 超伝導マグネットの形状は、12 層のパンケーキコイルをステンレス製のコイルケースに組み込んだものである。励磁電流 536 A で 8 時間の永久電流モードにおける磁場衰退率は 0.407%/day 程度であり、Bi-2223 線材を用いたマグネットとしてはきわめて優れた特性を持ったマグネットであった。

1.4.3 当研究室での試み

当研究室でも、Bi-2223 線材を用いた超伝導機器の設計、開発が過去に行われている。住友電気工業と共同で、1998年に液体窒素温度で I_c が 45 A の Bi-2223 線材を購入し、それを用いて小型の超伝導トランスの製作を行っている。当時、熔融法で作製された Y-123 短尺線材の交流通電時の損失の測定を行おうとしていたが、電流値が大きくなるにつれて電源も大型化し、購入に多大な資金を必要としていた。そこで NbTi を用いた液体ヘリウム中で動作させる超伝導トランスの製作体験をもとに Bi-2223 超伝導トランスが設計、製作されることとなった。超伝導トランスの 1 次側は銅線が直径が約 50 mm のボビンに 300 回巻きにされており、対する 2 次側では Bi-2223 線材を 10 本並列に接続して 15 回巻いている。これは 2 次側の巻き数を小さくして、降圧する代わりに電流を大幅に増幅する狙いがある。液体窒素中での動作試験によって、1 次側に 9.28 A、周波数 35 Hz の交流電流を入力したとき、2 次側で最大 841 A の電流が流れたと記録されている。また 35 Hz から 2000 Hz までの周波数域の交流電流を流したときも、目立った高調波は確認されなかった。これは、300 A の交流電源装置の価格が 1000 万円であったということを考えると、Bi-2223 超伝導トランスの製作は、従来のものに比べて低コストであり非常にコンパクトである、運用の敷居が低くなるなど、画期的な試みであった。

冷凍機で冷却すると考えると、2 次側で 1000 A 流すことも不可能ではなく、また、現在では線材自身の性能が大きく向上していることから超伝導トランスの実用性は極めて高い。

そして今回、再び住友電気工業と共同という形で、臨界電流 147 A と性能が大きく向上した Bi-2223 線材を用いた超伝導マグネットの設計・製作を当研究室で行った。前述されたとおり、超伝導マグネットは、安定して高磁界を発生させられるということから、磁気浮上式列車をはじめとして様々な超伝導機器に応用されつつあるほか、材料の磁化特性の測定を容易に行うことができるようになるなど、研究の分野にも応用の幅は広い。最近、IBAD-PLD 法によって作成された Gd コート線材を用いた超伝導マグネットが設計・製作と評価が行われた [10]。それによると 77.3 K で臨界電流 74.2 A、そのときの中心発生磁界は 0.48 T であったと報告されている。これは同形状の銅マグネットと比較すると非常に大きな数値である。しかしながら、コイル製作に用いた Gd コート線材の長さはたったの 60 m であり、それゆえマグネットのボア半径は 28 mm と

非常に小さく、実用的な大きさを持った超伝導マグネットが望まれている。今回当研究室と住友電気工業で製作したものは、Bi-2223 線材を 270 m 使用しており、その大きさは先ほど挙げた Gd コート線材超伝導マグネットより 2 倍程度大きい。

1.5 本研究の目的

前項までに述べたとおり、従来からの実用線材である NbTi や Nb₃Sn の合金超伝導線材に加え、特性向上や工業技術の研究の結果、Bi-2223 シース線材や Y-123 をはじめとする RE-123 コート線材ら高温超伝導線材が 3 番目の実用線材として並べられる日も遠くはない。今回、当研究室と住友電気工業で共同して臨界電流 147 A の Bi-2223 線材を用いた超伝導マグネットを設計・製作した。同じ酸化物超伝導体である GdBCO コート線材や YBCO コート線材で同様に超伝導マグネットが製作されているが、Bi-2223 線材の超伝導マグネットへの応用例ということでその動作特性を評価し、報告する。

Chapter 2

実験

2.1 超伝導マグネット



図 2.1: Bi-2223 超伝導マグネット

今回松下・小田部研究室と住友電気工業の合同で製作された超伝導マグネットは、10層のダブルパンケーキコイルからなっている。1つのダブルパンケーキコイルは銅製の結合器で結合されており、この部分から抵抗を生じる。マグネットの形状としてはソレノイドコイルなども挙げられるが、現状ではパンケーキコイルとして製作するほうが、ソレノイドコイルに比べてコストパフォーマンスに優れており、信頼性に優れている。マグネット径方向断面の模式図は図 2.2 のようになる。また、マグネットの諸元を表 2.1 に、マグネットに使用されている Bi-2223 線材の諸元は表 2.2 のようになっている。

図 2.1 にある (A)、(B)、(C) は、それぞれ超伝導マグネットの中心最大磁界 (A)、最大経線磁界 (B)、線材に対して垂直にかかる磁界の最大成分 (C) と

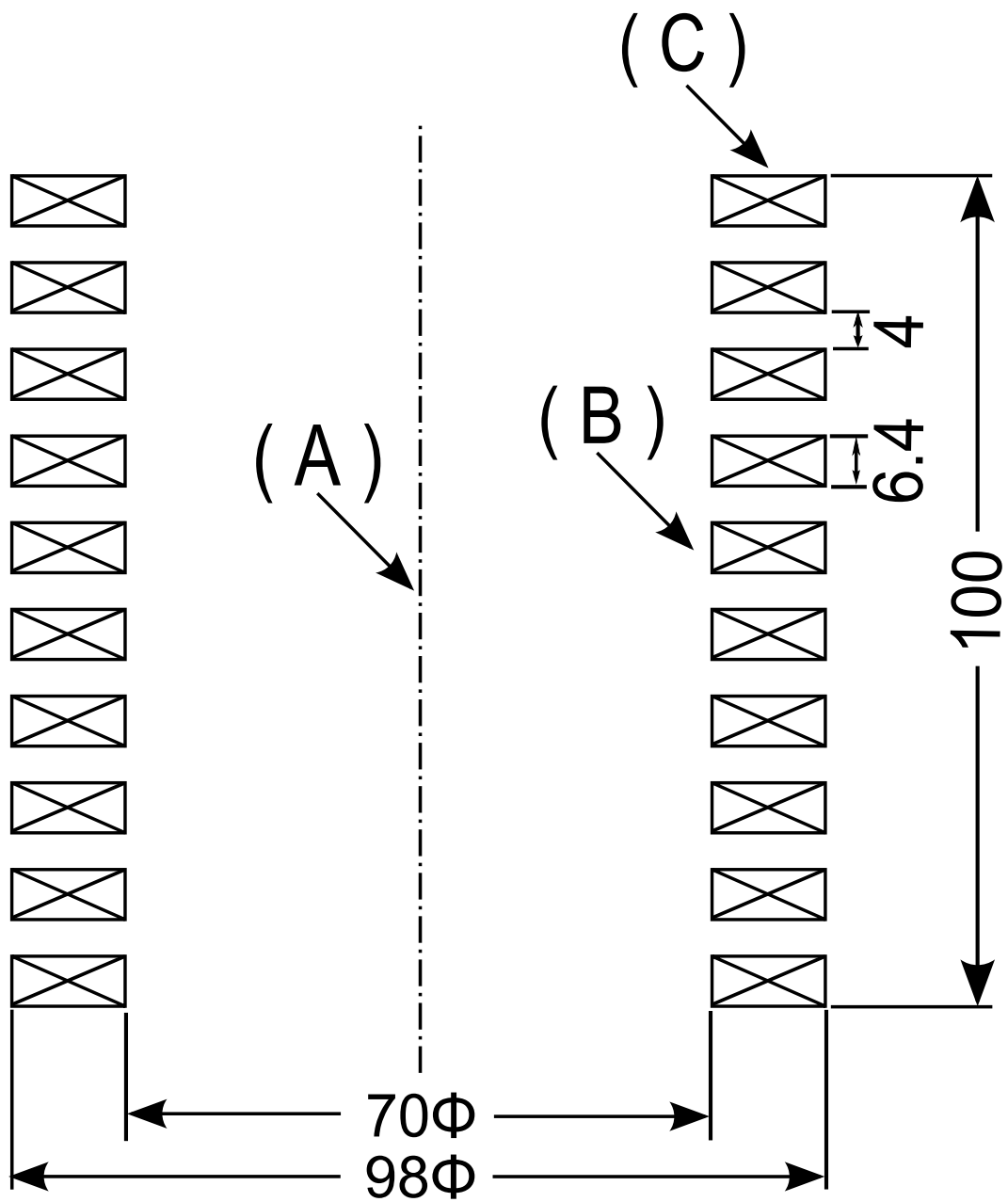


図 2.2: 径方向断面模式図。(A):中心最大磁界部分 (B):最大経験磁界部分 (C):線材に対する垂直磁界の最大となる部分

表 2.1: Bi-2223 超伝導マグネットの諸元

フランジ径	122 mm
ボア径	54 mm
マグネットの高さ	124 mm
マグネットの重量	~3 kg
パンケーキコイルの外径	98 mm
パンケーキコイルの内径	70 mm
パンケーキコイル数	20 個
パンケーキコイルの合計の高さ	100 mm
総巻き数	1040 回
インダクタンス	32 mH

表 2.2: マグネットに使用された Bi-2223 線材の諸元

臨界電流 (77.3 K、自己磁界中)	147 A
線材の幅	4.4 mm
線材の厚さ	0.22 mm
使用した長さ	267 m

なっている。

2.2 通電試験

製作した超伝導マグネットに、直流電流の通電、交流電流の通電及び交流電流重畳通電の試験を行い、直流四端子法、交流四端子法によって、電流値と電圧値を記録する。これによって超伝導マグネットの臨界電流値やマグネットの交流電流通電時の振る舞いを知ることができる。なお、臨界電流値の決定には電界基準値を用い、その値を $100 \mu\text{V}/\text{m}$ とする。

直流四端子法、交流四端子法 直流四端子法は、電圧測定用の端子を電流端子とは別に設ける測定方法である。測定する対象の抵抗成分が接触抵抗よりはるかに小さい時に用いられる。測定する対象が超伝導状態の超伝導体のように極端に抵抗が小さいもの場合は、二端子法では測定試料と電

極の間に生じる接触抵抗や配線の抵抗などの影響を受けてしまうため測定に向かない。しかし四端子法では、電圧測定端子を電流経路と別に設けるため、接触抵抗分の電圧降下を取り除き、より試料本来の持つ抵抗に近い値を測定することができるようになる。交流四端子法も方法としては同様のもので、回路に流す電流は交流電流となる。

2.3 中心最大磁界の温度依存性

超伝導マグネットに電流を通電することで、中心部分では安定した磁界が発生する。実際にマグネットを利用するときには重要なことは、中心部分での発生磁界の強さや、発生磁界が安定した強さとなる空間がどの程度なのかということである。ここでは、中心発生磁界の温度依存性を求める。FEM(Finite Element Method : 有限要素法)を利用して、超伝導マグネットのモデルを作成し、図 2.2 にあるように直流電流を通電した際の中心最大磁界 (A)、最大経験磁界 (B)、線材に垂直な磁界成分の最大値 (C) を計算する。Bi-2223 線材はその異方性の強さより、結晶の c 軸に平行な磁界、つまり線材の面に対して垂直な磁界中での特性がボトルネックとなる。そのため (C) 点での計算結果を使ってマグネットに用いられている線材の各温度域での I_c - $B(B//c)$ 特性にロードラインを加え、マグネットの I_c と $B(B//c)$ を決定することができる。温度別に I_c と $B(B//c)$ を決定していけば、中心発生磁界と温度の依存性を見ることができる。

FEM(Finite Elements Method : 有限要素法) 有限要素法とは、解析的に解くことが難しい微分方程式の近似解を数値的に得る方法の一つである。計算対象を有限の範囲でモデル化し、そのモデルを有限範囲の小領域に分割していき、各小領域ごとに境界条件を満たすようその特性を方程式を用いて表現し、全領域分を足し合わせて連立方程式をつくり、その解を求めるという手法である。主に形状が複雑で評価が困難な対象の評価や、超伝導機器などのように試作・試験を行うために大きなコストがかかるものを仮想的に評価するなどに用いられている。

2.4 中心部での磁界分布

ここでは、超伝導マグネットに直流電流を通電した際に発生する磁束密度の分布を測定する。前節で述べたように、マグネットの利用の際には内部での磁界の分布を知ることが重要である。磁界の測定にはガウスメーター (F.W.BELL 社製、4048型) を用いた。マグネットの中心部分から径方向と、軸方向の磁界分布を測定する。また、実測値の評価の意味としてパンケーキ型とソレノイド型のモデルを FEM 解析した磁界の分布との比較も行う。

なお、FEMでの解析には日本総合研究所のJMAG studio version 8.4を用いている。また、解析に用いたモデルは図2.3、2.5のようになっている。図の緑の空間は空気層、中央の青い部分は超伝導マグネット部分となっている。モデル作成時にはマグネット部分は導体コイルとして扱って設定を簡略化しており、空気層はマグネットの外側に広く取ってある。

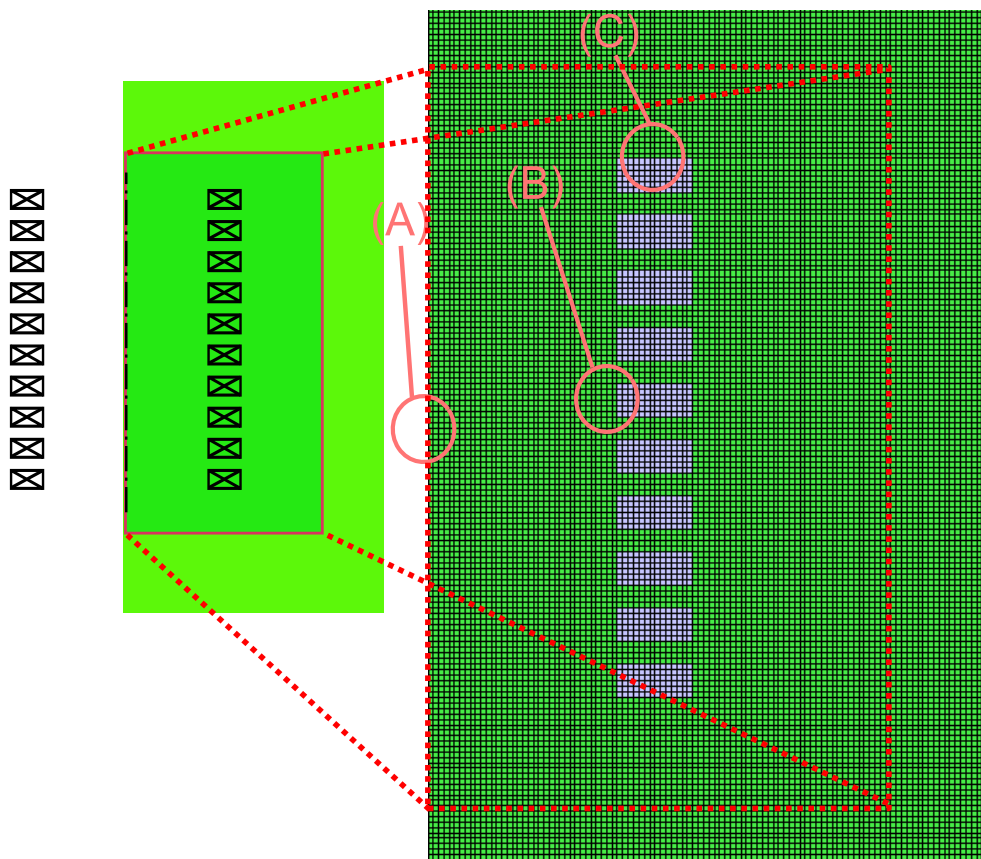


図 2.3: パンケーキ型コイルの解析モデル

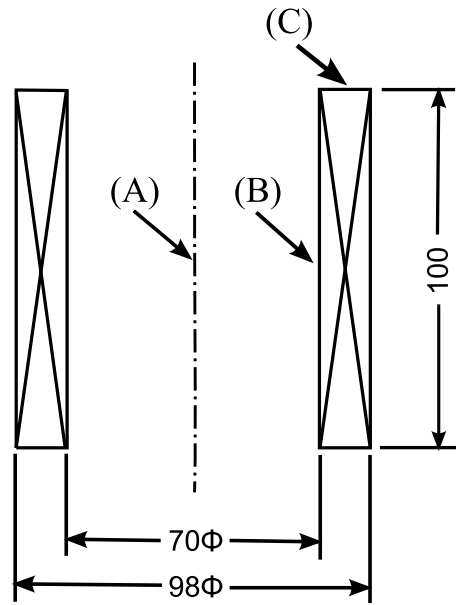


図 2.4: ソレノイド型コイルのモデル概要図

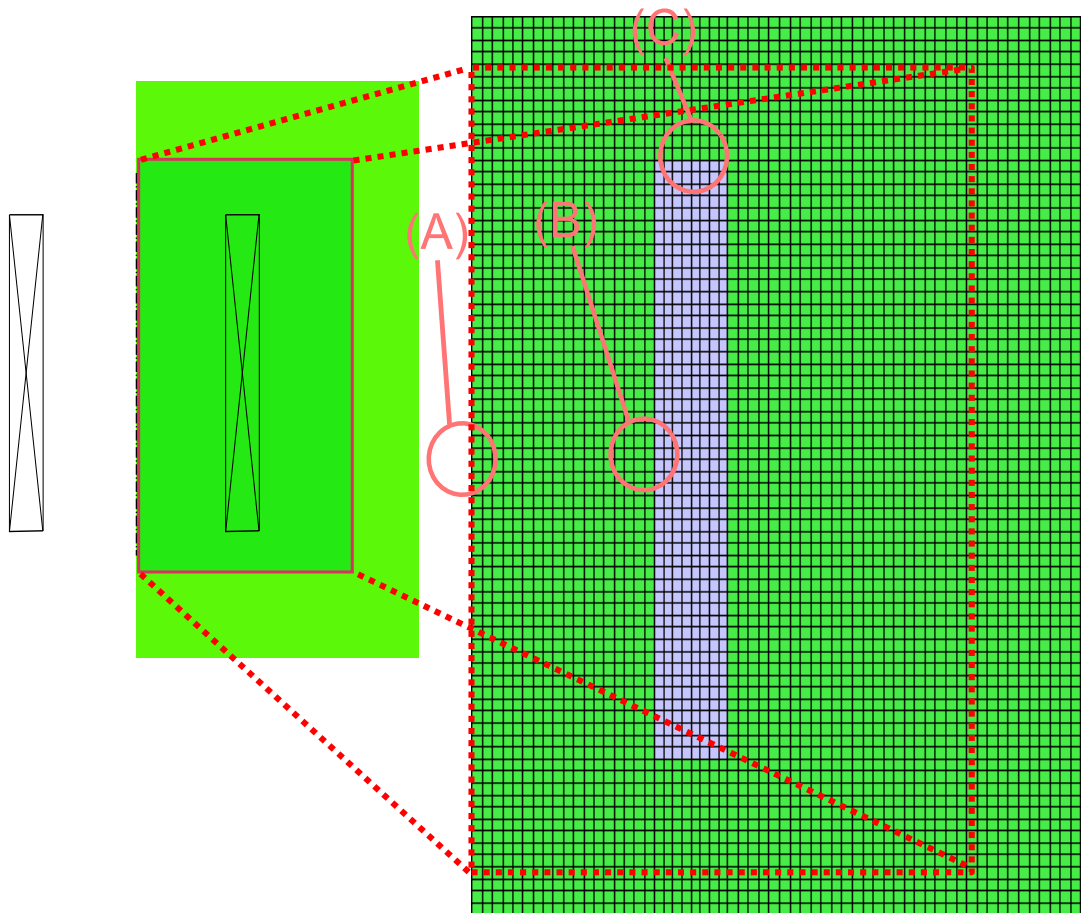


図 2.5: ソレノイド型コイルの解析モデル

Chapter 3

結果および考察

3.1 通電試験

3.1.1 直流電流通電試験

直流電流を超伝導マグネットに通電し、そのときの V - I 特性を測定した。マグネットをデュワーに入れ、デュワー内を液体窒素で満たし、液体窒素温度(77.3 K)に冷却した状態で測定を行った。結果は図3.1の通りである。

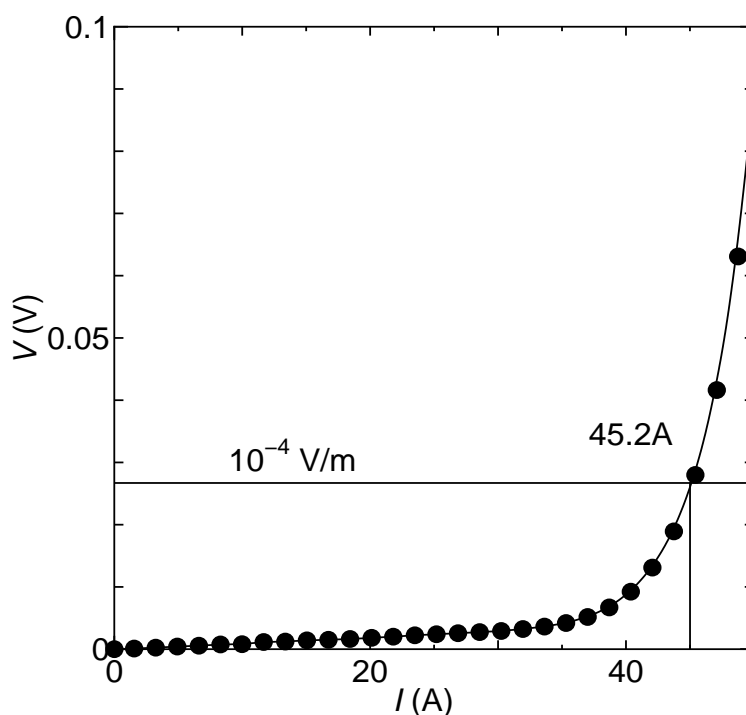


図 3.1: 77.3 K でのマグネットの V - I 特性

電界基準は $100\ \mu\text{V}/\text{m}$ であり、マグネットに用いられている線材の長さは $267\ \text{m}$ である。これより、電圧の基準を $0.0267\ \text{V}$ とすることができる。図3.1に基準線を設けてあり、このときの臨界電流は $45.2\ \text{A}$ である。また、臨界電流値を通電した際の中心磁界は $0.45\ \text{T}$ であった。

次に、マグネットを $65\ \text{K}$ まで冷却して同様に測定を行った。結果は図3.2のようになった。 $65\ \text{K}$ での臨界電流は $78.4\ \text{A}$ であった。四端子法で測定し、

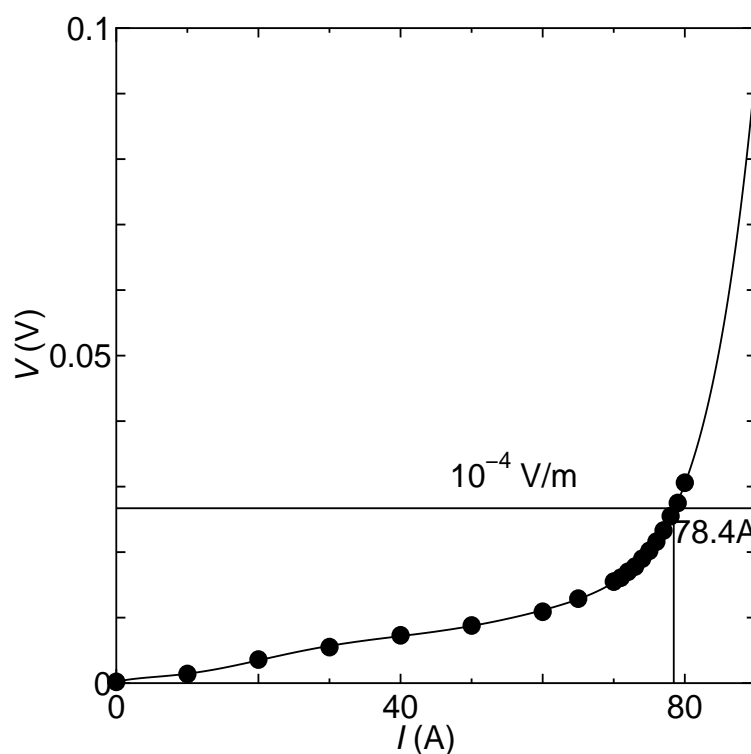


図 3.2: 65K でのマグネットの V - I 特性

超伝導状態の超伝導マグネットに通電したにもかかわらず、臨界電流にいたるまでに線形な電圧が生じていることが図3.1、3.2からわかる。これは、超伝導マグネットがパンケーキコイルを複数連結させて製作されていることより、連結部分に用いている銅製の連結器が起因していると考えられる。

3.1.2 交流電流通電試験

直流電流を超伝導マグネットに通電し、そのときの V - I 特性を測定した。直流電流通電のときと同様に、デュワー内にマグネットを入れ、液体窒素で冷却した状態 ($77.3\ \text{K}$) で測定を行った。振幅 $10\ \text{A}$ 、周波数 $10\ \text{Hz}$ の交流電流を通電

した。そのときの測定結果は図 3.3 のようになる。図 3.3 では、測定した電圧の

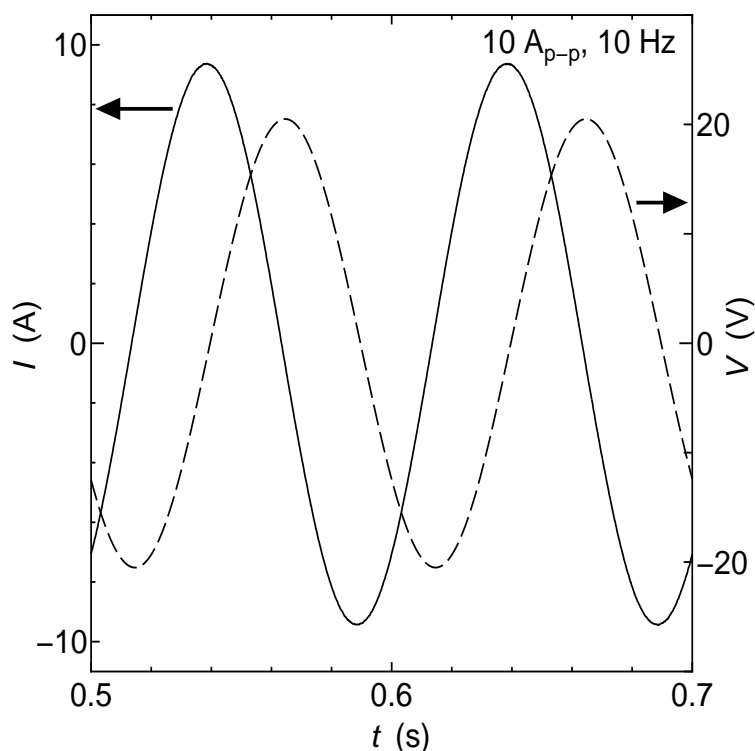


図 3.3: 交流電流通電 (振幅 10 A、周波数 10 Hz)

波形はきれいな正弦波を描いていることがわかる。コイルに交流電流を通電した際には銅製コネクタなどが持つ定常抵抗のほかに、リアクタンスが生じ、電流の流れを妨げるが、今回の超伝導マグネットでは、コネクタ部分等の定常抵抗は $93 \mu\Omega$ と非常に小さく、マグネットのインダクタンス L は 32 mH であり、10 Hz の交流電流ではマグネットのリアクタンスは 2Ω 程度である。インピーダンスの内、ほとんどがマグネットのリアクタンスで占められており、またそのリアクタンスも低い。交流電流を通電した際にはマグネット自身のインダクタンス L によって、正弦波を描く電圧が発生する。

$$V = L \frac{dI}{dt} \quad (3.1)$$

電圧の発生は上記の式のようなため、電圧は電流と比べて $\pi/2$ だけ位相が遅れた波形となって現れる。図 3.3 から電圧が $\pi/2$ だけ電流の位相から遅れていることが読み取れる。

3.1.3 交流重畳通電試験

直流電流に交流電流を重畳して、超伝導マグネットに通電した際の V - I 特性を測定した。直流通電、交流通電のときと同様に 77.3 K までマグネットを冷却して測定を行った。直流電流 15.2 A に加えて、振幅 0.2 A、周波数 300 Hz の交流電流を重畳して通電した。そのときの測定結果は図 3.4 のようになる。

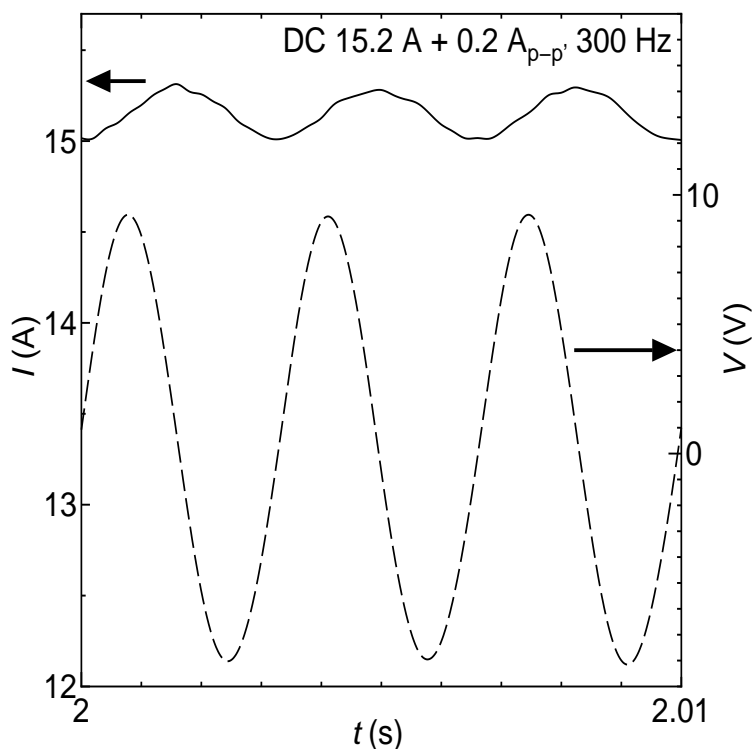


図 3.4: 交流電流重畳通電 (直流電流 : 15.2 A、交流電流 : 振幅 0.2 A、周波数 300 Hz)

周波数 300 Hz の交流電流分の通電により生じるリアクタンスは 60Ω であり、やはり定常抵抗に比べて大きな値となり、マグネットのインピーダンスの内のほとんどがリアクタンスである。そのため、こちらも前節と同様に、マグネットのインダクタンスによって、交流電流の位相より $\pi/2$ 遅れた電流が測定された。また、その電圧の波形はきれいな正弦波を描いていることがわかる。交流電流試験、交流重畳通電試験を通して、測定した電圧の波形に歪みがないことから、今回制作した超伝導マグネットは交流電流を通電しても動作に支障はないといえるだろう。

3.2 中心最大磁界の温度依存性

まず、最初に JMAG studio 上で図 2.3 のモデルの解析を行った。モデルの超伝導マグネット部分に 1 A の直流電流を通電したと仮定してモデルの磁束密度分布を計算した。その結果は図 3.5 の通りである。

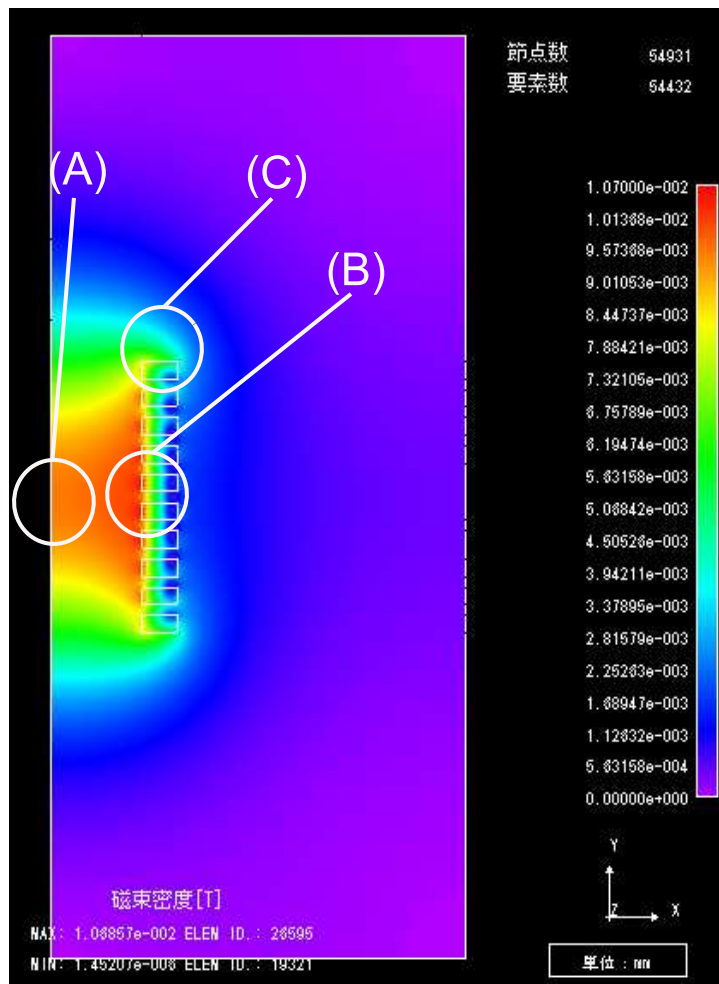


図 3.5: 図 2.3 の解析結果

磁束密度の高低が等高線表示で表されているが、図 3.5 の右側にあるとおり、暖色であればあるほど磁束密度が大きく、赤い部分が磁束密度の一番大きな部分である。実際に超伝導マグネットに電流を流した際は、このような磁束密度の分布になると考えられる。この結果から図 2.2 の中心最大磁界 (位置 A)、最大経線磁界 (位置 B)、線材に垂直な磁界成分の最大値 (位置 C) を見ると、それぞれ表 3.1 のようになっている。また、中心最大磁界と垂直磁界の最大値の比は 1.54:1 となる。

表 3.1: 1 A 通電時の主要箇所の磁束密度

中心最大磁界 (位置 A)	9.56 mT
最大経路磁界 (位置 B)	10.7 mT
$B//c$ 最大磁界 (位置 C)	6.19 mT

ところで、前章で述べたとおり、Bi-2223 線材はその異方性の強さより、結晶の c 軸に平行な磁界、つまり線材の面に対して垂直な磁界中での特性がボトルネックとなることが知られている。つまり、もっとも線材の面に対して垂直な磁界成分が大きくなる (C) 点での実線材の振る舞いと今回の解析結果を利用して、この超伝導マグネットの B - I 特性を予測することができる。今回超伝導マグネットに使用されている Bi-2223 線材は 147A の臨界電流値のものであるが、それと同等の臨界電流値を持つ線材の 77.3 K ~ 45 K の温度域での B - I 特性の測定結果を用いて、6.19 mT / A のロードラインとともにグラフ化する。77.3 K ~ 45 K の温度域での B - I 特性とロードラインのグラフは以下の通りとなる。

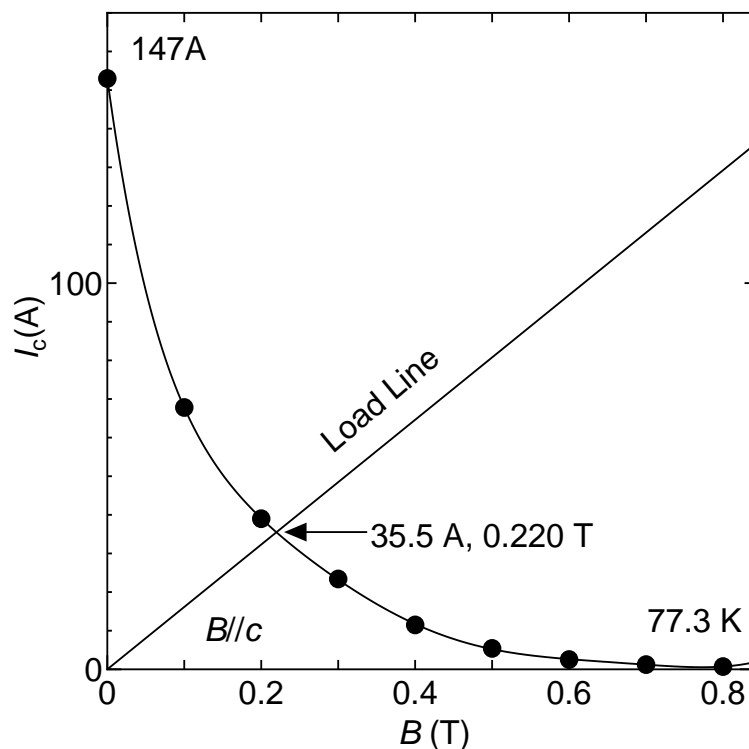


図 3.6: 77.3 K における B - I 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)

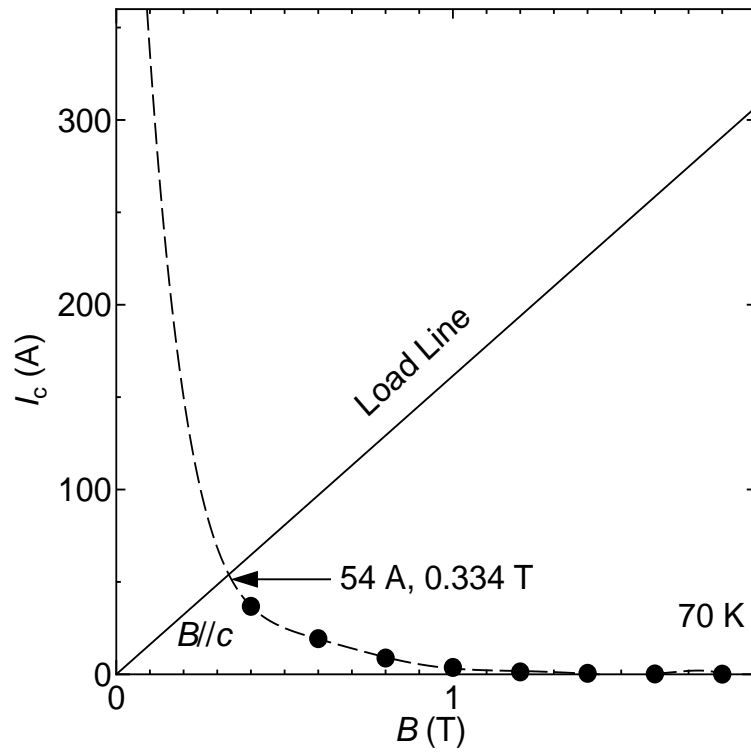


図 3.7: 70 K における B - I 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)

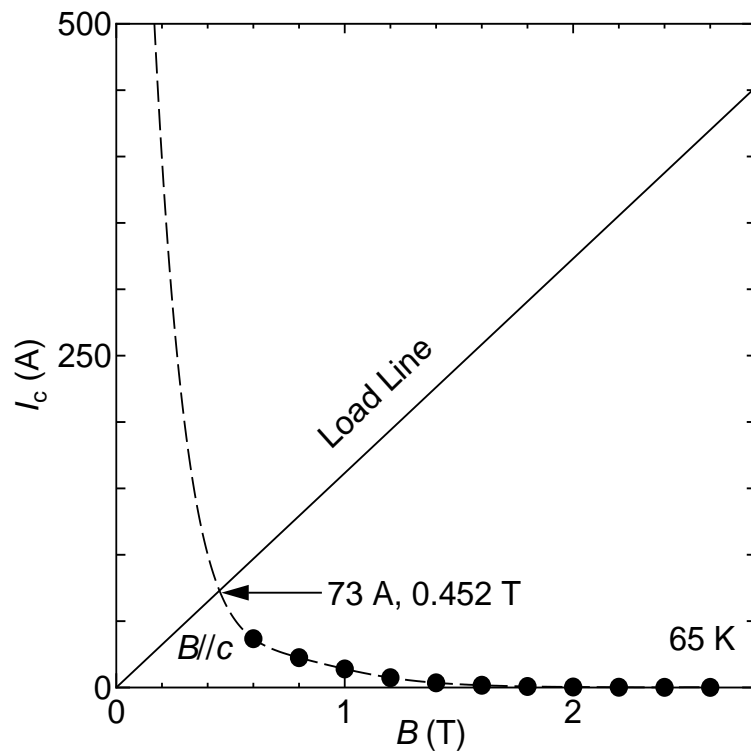


図 3.8: 65 K における B - I 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)

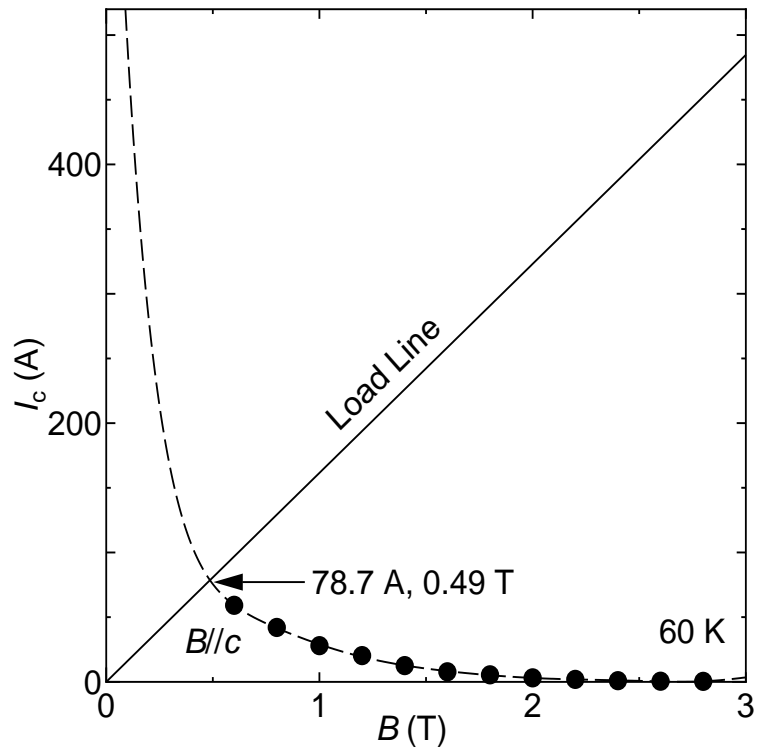


図 3.9: 60 K における B - I 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)

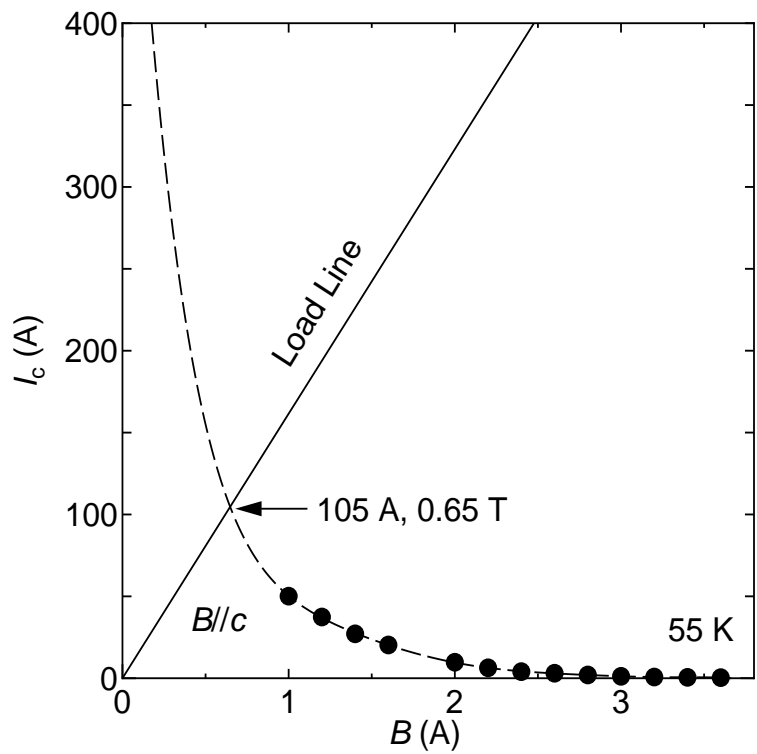


図 3.10: 55 K における B - I 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)

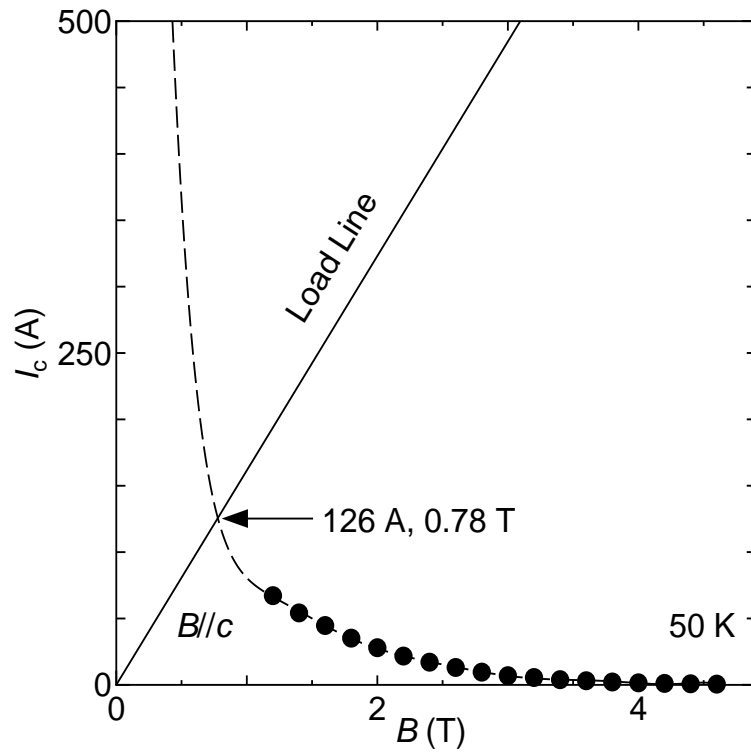


図 3.11: 50 K における B - I 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)

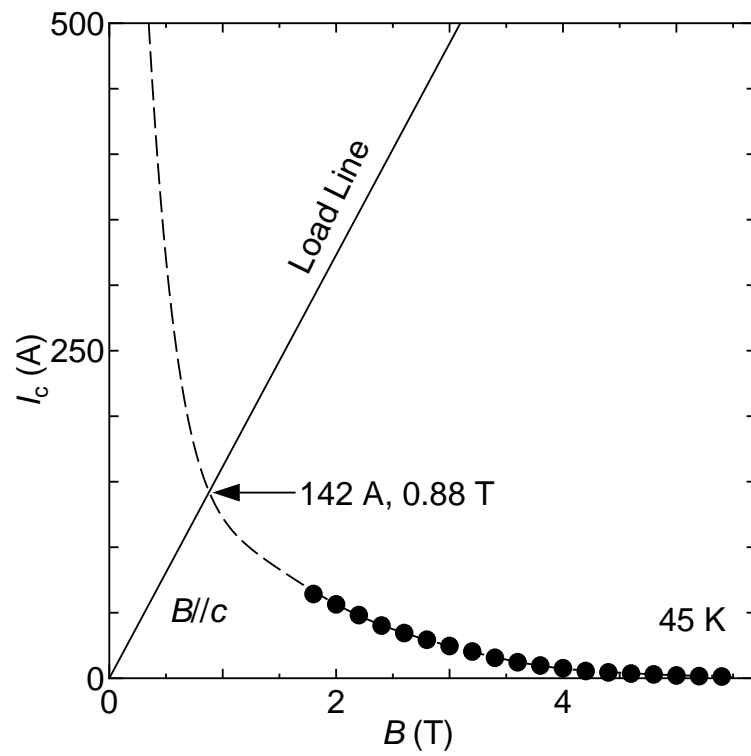


図 3.12: 45 K における B - I 特性とロードライン ($I_c = 147$ A の Bi-2223 線材)

この形状の超伝導マグネットの線材に垂直な磁界成分の最大値とそのときの臨界電流値は必ずロードライン上のどこかにあるとみなすことができる。また、各温度域での $B-I$ 特性のグラフは、線材の臨界電流と外部印加磁界の関係を表したものである。つまり、ロードラインと線材の $B-I$ 特性のグラフとの交点、その温度での超伝導マグネットがとるであろう線材に垂直な磁界成分の最大値と、臨界電流値だといえる。モデルの形状は変化しないので、(A) 点と (C) 点の磁界の比もそのまま保たれていると考えられる。そのため、中心最大磁界と $B//c$ 最大磁界の比 1.54 : 1 を利用して各温度域での中心最大磁界を導くことができる。これまでの結果をまとめると表 3.2 のようになる。

表 3.2: 各温度域での中心最大磁界予測

温度 (K)	臨界電流 (A)	$B//c$ 最大磁界 (T)	中心最大磁界 (T)
77.3	35.5	0.220	0.339
70	54.0	0.334	0.516
65	73.0	0.452	0.697
60	78.7	0.486	0.750
55	104.7	0.648	1.001
50	125.7	0.778	1.201
45	142.0	0.877	1.355

また、この結果から、超伝導マグネットの $B-T$ 特性は、図 3.13 のようになると予測できる。

ここまでの動作予測から、液体窒素の過冷却状態の温度である 65 K まで冷却することで、最大 0.7 T 近くの磁界をマグネット中心部分で発生させられるであろうということが言える。しかし、77.3 K と 65 K での測定結果を見る限りでは、77.3 K での臨界電流と 65 K での臨界電流の実測値はそれぞれ 45.2 A、78.4 A であり、共に解析値から導いた結果より大きい値となっている。ここから、モデルの解析結果からの臨界電流の予測値は多少小さくなっているのではないかと判断できる。これは、マグネットに用いられている線材と、今回ロードラインを作成して動作予測に用いた線材が同一のものではないということが考えられる。また、マグネットから生じる磁束密度は流れる電流の大きさに影響するので、臨界電流が小さく見積もられている解析結果における中心での最

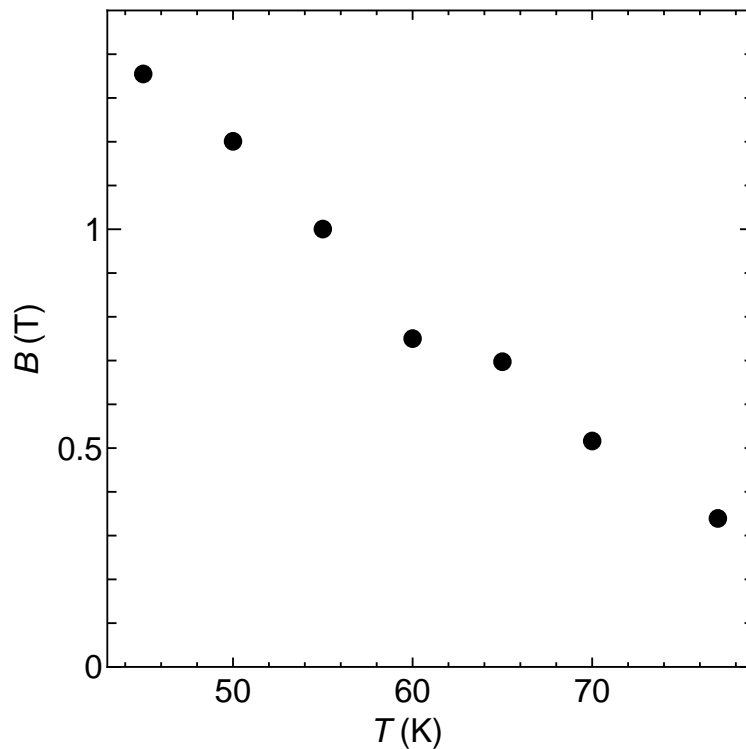


図 3.13: マグネットの B - T 特性

大磁界も下方修正されていると思われるので、マグネットに直流電流を流したときの中心での磁束密度もこの結果と比べて大きくなっていると考えられる。このため、65 K で動作させたときには中心磁束密度は0.7 T を上回る値になると考えられる。

3.3 磁束密度分布

動作条件を温度 77.3 K、自己磁場中としたとき、超伝導マグネットに 1 A 通電した際に発生する、マグネットのボビン内壁内の磁束密度分布を測定した。マグネットの中心部分の軸方向上下 50 mm の範囲の磁束密度分布と、マグネットの中心部分からマグネットボビン内壁までの径方向範囲の 2 種類の磁束密度分布に加えて、前節で行ったマグネットのモデルを FEM 解析して得られた磁束密度分布の両方をグラフにしたのが図 3.15、3.16 である。なお、FEM 解析によるマグネットの磁束密度分布に関しては本来のパンケーキ型とは別に分布の様子を比べるためにソレノイド型のモデルでの FEM 解析結果もグラフに示してある。ソレノイド型のモデルでの FEM 解析は図 2.5 の解析モデルを解析し、そ

の結果は図 3.14 のようになっている。

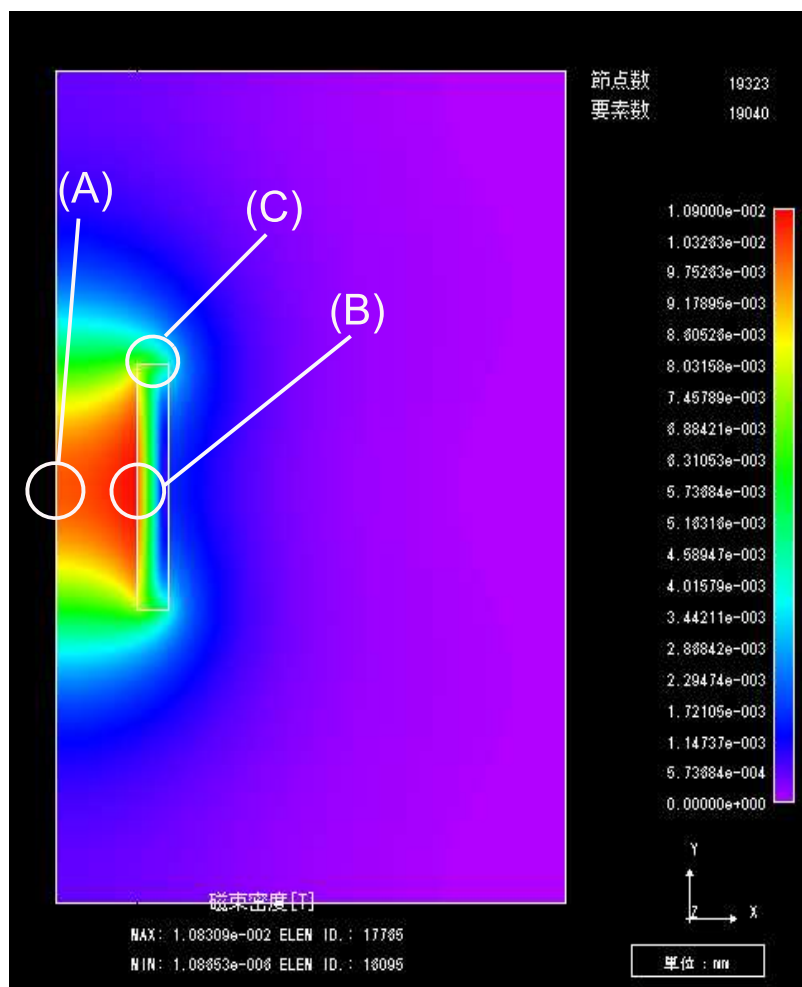


図 3.14: 図 2.5 の解析結果

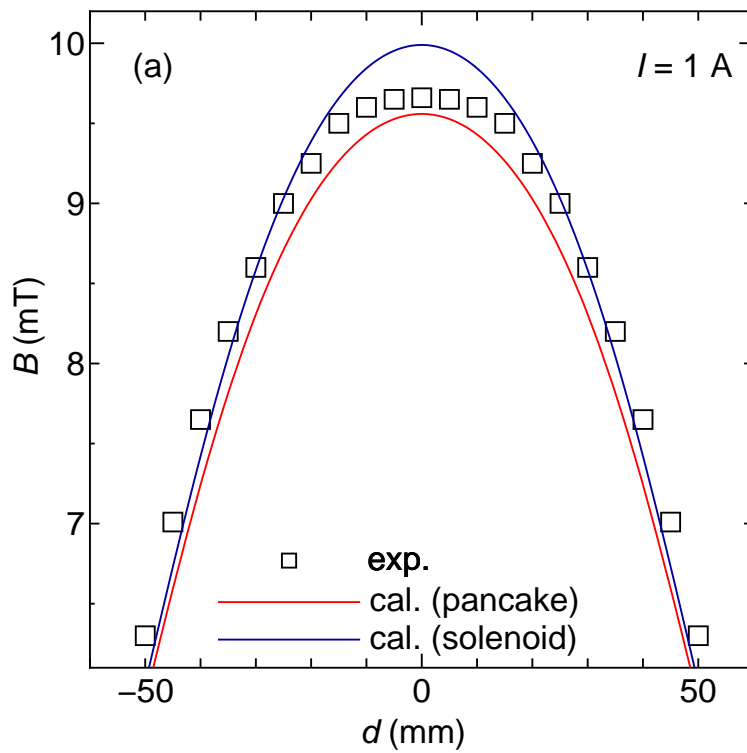


図 3.15: マグネットの軸方向の磁束密度分布

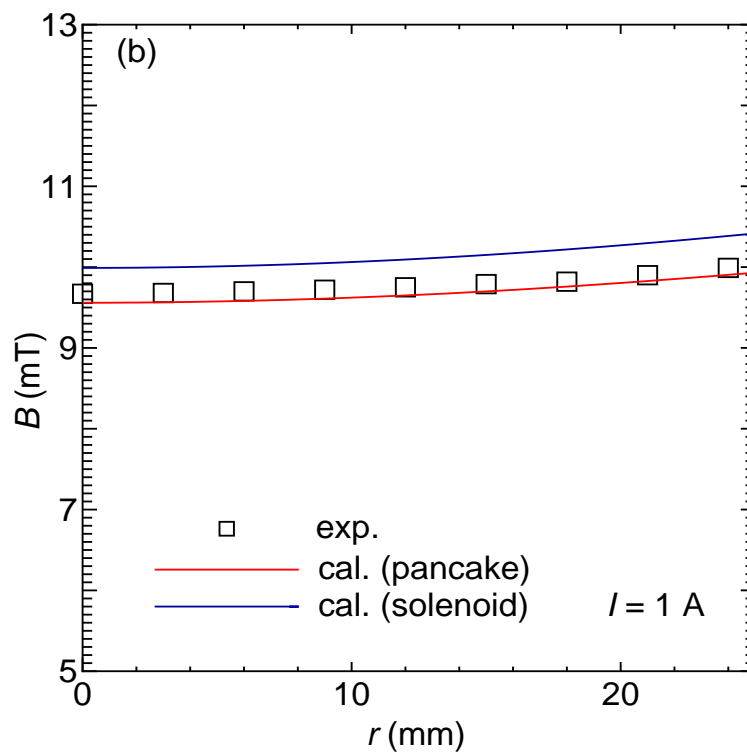


図 3.16: マグネットの径方向の磁束密度分布

図中のシンボルで表されたグラフは、マグネットに通電した際の実測値であり、赤の実線で表されたグラフは、10層のダブルパンケーキコイルのモデルを解析した際の計算値を示している。青の実線で表されたものは参考として内径、外径、高さを超伝導マグネットの寸法に揃えたソレノイドコイルでのFEM解析結果を示している。実測値とパンケーキ型モデルの解析結果の分布を比べると、軸方向及び径方向共に実測値が解析結果を上回る形となっている。これは、前節での実測臨界電流の方がFEMでのモデル解析を利用して得られた臨界電流より大きいという結果からこのようになっていると考えられる。しかし、実測値とパンケーキ型、ソレノイド型の磁束密度分布の差はそれほど大きくはなく、測定での誤差の範囲内といってもよいと考えられる。また、分布の形状を見ると、実測値とパンケーキ型モデルの解析結果に対してソレノイド型モデルの解析結果では特に軸方向分布の形状が異なっており、中心部分での磁束密度がパンケーキ型に比べて大きくなっており、その変化の度合いも大きい。これは、ソレノイド型とパンケーキ型の電流の流れる空間の違いによる中央付近で発生する磁束密度の寄与が異なることが原因だと考えられる。電流は超伝導線材内全体を通電しているわけではなく、1章にあったように銀シース内のBi-2223フィラメントを通っていることや全体に対する電流パスとなるフィラメントの割合が大きいというわけではないことを考えると、今回作製したパンケーキ型及びソレノイド型のモデルはかなり簡略化されているといえるが、図3.15、3.16の結果を見る限りでは、大まかな分布形状や磁束密度の値を読み取るには十分な精度だと思われる。そのため、パンケーキ型モデルとソレノイド型モデルの精度から生じた分布形状の差ではなく、パンケーキ型磁束密度の寄与部分となる電流パスが高さ方向に歯抜けのような構造になっているというマグネットの形状の差が、パンケーキ型とソレノイド型の磁束密度分布形状の差となっているといえる。

また、磁束密度の均一な空間を見てみると、径方向に関して、マグネットの中心からコイル内壁に測定点が移動するにつれて磁束密度は大きくなっていくが、中心から24 mmの点で約3%の誤差となっている。さらに測定点をマグネット内壁に近づけていくと、FEMモデル解析の結果にあるようにパンケーキコイルの形状により磁束密度の変化が大きくなっているため誤差はさらに大きくなる。一方、軸方向に関してはマグネットの中心から磁束密度分布の誤差5%の範囲は中央を中心とした上下28.7 mm程度の空間である。このことか

ら、マグネット中心部に試料をおいてその試料の磁性を測定するなどの際の試料の位置の中心からズレは、径方向のズレよりも軸方向のズレに敏感であるということがいえる。ソレノイド型の磁束密度分布と比べてみると、径方向ではソレノイド型の中心から内壁より 24 mm の点では中心での磁束密度と比べて約 5% 大きくなっている。また、軸方向で見ると中央の磁束密度と誤差 5% の範囲は、上下 18.3 mm の空間となっており、特に図 3.15 にあるように、軸方向に関して、パンケーキ型はソレノイド型の形状に比べて中心最大磁界は小さくなるものの、磁束密度の均一性という点では優れているということがわかる。

Chapter 4

まとめ

今回の Bi-2223 超伝導線材を用いたマグネットは、77.3 K、自己磁場中において 147 A の臨界電流を持つ Bi-2223 線材を用いて 10 層のダブルパンケーキコイルとして製作された。77.3 K、自己磁場中でのマグネットの臨界電流は 45.2 A、そのときマグネットの中心部での磁束密度は 0.45 T となった。また、自己磁場中における液体窒素の過冷却状態である 65 K での動作では、臨界電流は 78.4 A となった。また、10 A、周波数 10 Hz の交流電流及び 15.2 A の直流電流と 0.2 A、300 Hz の交流電流の重畳電流を通電したとき、正弦波形状の電圧を測定することができた。これはインピーダンスが銅製コネクタの抵抗 $93 \mu\Omega$ に対して 300 Hz の交流電流通電時にマグネットのリアクタンスが 60Ω となり、ほぼインピーダンスがリアクタンスで占められることからこのような結果になったと考えられる。製作したマグネットは交流電流での動作に対応しているといえる。一方、製作したマグネットの諸元を元にした解析モデルを作製し、有限要素法 (FEM) を用いてモデルを解析し、直流電流 1 A を通電した際の磁束密度分布を導出した。中心での磁束密度は 9.56 mT、コイルを構成する線材に対して垂直にかかる磁束密度の最大値は 6.19 mT であった。Bi-2223 線材をはじめとして、高温超伝導線材はその結晶構造から *c* 軸方向を貫く磁束密度、すなわち線材の面を垂直に貫く磁界中での臨界電流によって動作限界が決定されることから、この結果を用いて 6.19 mT / A のロードラインを作成し、マグネットに用いられている線材と同じ臨界電流を持つ線材の *B-I* 特性を使って、マグネットの自己磁場中における各温度での動作予測を行った。77.3 K では臨界電流は 35.5 A、そのときの線材の面を垂直に貫く磁界は 0.220 T、中心磁束密度は 0.34 T となると予測できる。また、65 K での臨界電流は 73.0 A、中心磁束密

度は約0.7 T になった。しかし、臨界電流の実測値と比べて予測値が小さくなっており、実際には臨界電流の大きい実測では予測以上の中心磁束密度が発生していると思われる。

直流電流通電時のマグネット内部の磁束密度の分布の測定を行った。77.3 K 下で1 A の直流電流を通電した際のマグネット軸方向、径方向に対する磁束密度と、パンケーキとソレノイドのモデルから有限要素法を用いて計算した磁束密度の分布は図3のようになっている。分布から、中央での磁束密度はパンケーキ型のほうがソレノイド型より軸方向の均一度が高いことが言える。これはパンケーキ型のマグネットの構成が、電流パスとなるコイル層が間が抜けた状態で積み重なっているため、中心付近への磁束密度の寄与が小さくなっているためだと思われる。また、磁束密度の変化をみると、径方向を見ると、中心から24 mm の点で中心磁界からの誤差は約3% となっている。軸方向では、マグネットの中心部分の磁束密度の誤差5% の範囲は中央を中心とした±28.7 mm の範囲となっている。これと比較してソレノイド型のモデルをFEM解析した結果の磁束密度分布を見ると特に軸方向での中心との誤差5% の範囲は中心から±18.3 mm の範囲と、中心付近での磁束密度の均一度がパンケーキ型に比べて低くなっている。

今回製作したBi-2223超伝導線材を用いたマグネットは、従来の超伝導コイルに比べて、動作にコストの高い液体ヘリウムを使うことなく、容易に高磁界を安定して発生させられるという利点があり、物性研究などの分野への導入の敷居を引き下げるものになるものと考えられる。最近では20 K 程度まで冷却することのできる冷凍機も登場しており、強磁界を必要とする場面において、このような高温超伝導線材を用いたマグネットは重宝する存在になっていくだろうと思われる。また、マグネット自体の動作性能を向上として、今回のようにパンケーキ型の形状のものの場合、線材に最も強い垂直磁界が負荷されるマグネット上下端のパンケーキコイルの特性を向上させるという手段が考えられる。平行磁界中ではより大きな磁界に耐えられるため、端のコイルのみ特性のよい線材を用いて構成することでコストを抑えてマグネットの特性を向上させることが可能であると思われる。そして、マグネットに用いられているBi-2223線材にも特性の向上の余地があり、それによってマグネットの小型化や一層の性能向上も見込まれる。

謝辞

本研究を行うにあたり、松下照男教授に多大なるご指導、助言を頂き、深く感謝しております。また、様々な助言やご指導、ご協力をして頂いた小田部荘司准教授、木内勝助教に深く感謝いたします。そして、研究室内外でお世話になりました松下研究室、小田部研究室所属の皆様にも深く感謝をいたします。

最後に、本研究に使用した Bi-2223 超伝導マグネットの製作を行っていただいた住友電気工業株式会社の方々に深く感謝いたします。

Bibliography

- [1] K. Funaki, M. Iwakuma, K. Kajikawa, M. Hara, J. Suehiro, T. Ito, Y. Takata, T. Bohno, S. Nose, M. Konno, Y. Yagi, H. Maruyama, T. Ogata, S. Yoshida, K. Ohashi, H. Kimura, K. Tsutsumi, IEEE Trans. Appl. Supercond. **11** (2001) 1578.
- [2] M. Igarashi, H. Nakao, M. Terai, T. Kuriyama, S. Hanai, T. Yamashita, M. Yamaji, IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 1469.
- [3] 岡崎 徹, 林 和彦, 佐藤 謙一, SEIテクニカルレビュー **167** (2005) 37.
- [4] 松下照男, 磁束ピンニングと電磁現象 (産業図書)
- [5] M. Ueyama, K. Ohkura, K. Hayashi, S. Kobayashi, K. Muranaka, T. Hikata, N. Saga, S. Hahakura and K. Sato, Physica C **263** (1996) 172
- [6] M. Ishizaka, Y. Tanaka and H. Maeda, Physica C **252** (1995) 339
- [7] 山崎浩平, 小林慎一, 加藤武志, 大倉健吾, 上山宗譜, 藤上純, 綾井直樹, 上野栄作, 菊地昌志, 林和彦, 佐藤謙一, SEIテクニカルレビュー **164** (2004) 37
- [8] T. Kato, S. Kobayashi, K. Yamazaki, K. Ohkura, M. Ueyama, N. Ayai, J. Fujikami, E. Ueno, M. Kikuchi, K. Hayashi, K. Sato, Physica C **412-414** (2004) 1066.
- [9] S. Kobayashi, K. Yamazaki, T. Kato, K. Ohkura, E. Ueno, K. Fujino, J. Fujikami, N. Ayai, M. Kikuchi, K. Hayashi, K. Sato, R. Hata, Physica C **426-431** (2005) 1132.
- [10] H. Fukushima, A. Ibi, H. Takahashi, R. Kuriki, S. Miyata, Physica C **463-465** (2007) 501-504 Y. Yamada a, Y. Shiohara b