

液体窒素中で動作する **Bi-2223** 超伝導  
マグネットの改良

根本 慎司

平成 21 年 2 月 24 日

電子情報工学科

# 目次

第1章	序章	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 (CT-OP:ConTrolled-Over Pressure) 法 . . . . .	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 . . . . .	9
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 . . . . .	10
1.5	本研究の目的 . . . . .	12
第2章	実験	13
2.1	超伝導マグネット . . . . .	13
2.2	マグネット諸元 . . . . .	14
2.3	中心最大磁界の向上 . . . . .	15
2.4	中心最大磁界の向上のための改良案 . . . . .	18
第3章	結果	21
3.1	各 case 結果 . . . . .	21
3.1.1	case 1-1 結果 . . . . .	21
3.1.2	case 1-2 結果 . . . . .	22
3.1.3	case 2-1 結果 . . . . .	23
3.1.4	case 2-2 結果 . . . . .	24
3.1.5	case 3 結果 . . . . .	25

3.1.6	結果まとめ . . . . .	26
3.2	均一度 . . . . .	27
3.3	線材効率 . . . . .	28
3.4	実測値 . . . . .	29
<b>第4章</b>	<b>考察</b>	<b>33</b>
4.1	77.3 Kにおける実測値と理論値 . . . . .	33
4.1.1	present case . . . . .	33
4.1.2	case 1-1 . . . . .	34
4.2	改良案の評価 . . . . .	35
4.2.1	case 1-1 . . . . .	35
4.2.2	case 1-2 . . . . .	35
4.2.3	case 2-1 . . . . .	36
4.2.4	case 2-2 . . . . .	36
4.2.5	case 3 . . . . .	37
<b>第5章</b>	<b>まとめ</b>	<b>38</b>
	参考文献	41

## 表目次

2.1	Bi-2223 超伝導マグネットの諸元 . . . . .	14
2.2	マグネットに使用された Bi-2223 線材の諸元 . . . . .	14
2.3	超伝導マグネットに 1 A 通電したときの $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ の値 . . . . .	17
2.4	case 2-1 のマグネットの諸元 . . . . .	19
2.5	case 2-2 のマグネットの諸元 . . . . .	20
3.1	case 1-1 の 1 A 当りの $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ の値 . . . . .	22
3.2	case 1-2 の 1 A 当りの $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ の値 . . . . .	23
3.3	case 2-1 の 1 A 当りの $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ の値 . . . . .	24
3.4	case 2-2 の 1 A 当りの $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ の値 . . . . .	25
3.5	case 3 の 1 A 当りの $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ の値 . . . . .	26
3.6	各 case の磁界予測 . . . . .	27
3.7	各 case の均一度 . . . . .	27
3.8	線材使用率 $Q$ と線材効率 . . . . .	29

## 図目次

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。 $B_1$ は中心最大磁界、 $B_2$ は線材に対する 平行磁界成分の最大値、 $B_3$ は線材に対する垂直磁界成分の 最大値を示す。また領域はそれらが起こる領域を示す。また、 オレンジ、黄色、無色のコイルはそれぞれ、短尺線材が 77.3 K、自己磁界中で臨界電流が 165 A, 147 A, 135A の線材 を用いたコイルを示す。 . . . . .	15
2.3	Bi-2223 線材の $I_c$ - $B$ 特性。実線がテープ線材に垂直に磁場を かけたときのもので破線が水平に磁場をかけたもの。黒、 緑、赤の線はそれぞれ 77.3 K の自己磁界中での臨界電流が 165 A,147 A,135 A の Bi-2223 線材を表している。 . . . . .	16
2.4	$I_c$ - $B(B \perp c)$ 及び $I_c$ - $B(B // c)$ 特性と対応する $B_2$ と $B_3$ のロー ドライン。 . . . . .	17
2.5	超伝導マグネットの改良案 . . . . .	18
2.6	パンケーキ型コイルの解析モデル . . . . .	20
3.1	case 1-1 の二つの $I_c$ - $B$ 特性とロードライン。 . . . . .	22
3.2	case 1-2 の二つの $I_c$ - $B$ 特性とロードライン。 . . . . .	23
3.3	case 2-1 の二つの $I_c$ - $B$ 特性とロードライン。 . . . . .	24
3.4	case 2-2 の二つの $I_c$ - $B$ 特性とロードライン。 . . . . .	25
3.5	case 3 の二つの $I_c$ - $B$ 特性とロードライン。 . . . . .	26
3.6	各 case のマグネット中心軸方向の規格化した磁束密度分布。 $d$ はマグネット中心部からの距離で、マグネットの底部が負 方向、上部が正方向。 . . . . .	28
3.7	77.3 K 及び 65.0 K の $V$ - $I$ 特性 . . . . .	30

3.8	65 K のときの case 1-1 のロードライン . . . . .	31
3.9	case 1-1 のマグネットに 1 A 通電したときの中心軸方向の磁束密度分布。 $d$ はマグネット中心部からの距離で、マグネットの底部が負方向、上部が正方向。 . . . . .	31
3.10	case 1-1 のマグネットに 1 A 通電したときの径方向の磁束密度分布。 $d$ はマグネット中心部からの距離。 . . . . .	32
4.1	present case の $I_c$ - $B$ 特性。 $B_{3s}$ は $B_3$ をスケーリングしたもの。 . . . . .	34

# 第 1 章 序章

## 1.1 はじめに

1908 年, オランダのヘイケ・カメルリング・オネス (Heike 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た。そして 1911 年、当時最も純度の高かった金属である水銀に、極低温で突然電気抵抗がゼロになるという超伝導性が発見された。その後、様々な単体金属、合金や化合物からも超伝導性が発見され、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 BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer) 理論が登場。これによると、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 程度が限界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、液体窒素の沸点 (77.3 K) を大きく超える臨界温度を持つ Y-Ba-Cu-O や Bi-Sr-Ca-Cu-O などの酸化物超伝導体が発見された。これらのいわゆる高温超伝導体は、臨界温度の高さから冷却コストの削減という点で応用化に大きな期待が寄せられており、高温超伝導体を用いた線材の開発が行われてきた。しかし、発見から 20 年以上経った現在においても実用化には多くの課題が残っており、超伝導機器への応用のためのいっそう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がゼロという性質から、大容量の電流をエネルギーの損失なく送電できる送電線や、超伝導を用いたエネルギー貯蔵装置 (Superconductive Magnetic Energy Storage) や、超伝導を利用して数 100 A の高電流を得ることができる超伝導トランス、また、高磁界を発生させられるという点から、磁気浮上式列車用超伝導マグネットや船舶推進用モーターなどが考えられている。また、

SQUID(Superconducting QUantum Interference Device : 超伝導量子干渉素子) などの高感度センサや、医療用の応用として磁気共鳴映像診断装置(MRI) などが製作されている。これらの機器の性能を向上させるためには、超伝導体に損失なしに流すことができる最大電流である臨界電流の向上が不可欠であり、応用研究の中でも、臨界電流特性のよい線材を開発するための線材加工は大きなウェイトを占めている。

現在実用化されている超伝導線材はNbTiやNb<sub>3</sub>Sn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2つの金属超伝導体は、使用できる温度域や磁界に限りがあるため、液体ヘリウムから液体窒素での冷却までの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期待されている。

## 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るため、金属超伝導体に比べ、非常に脆い。また、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、そのためピン力が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るので、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。しかし結晶を配向させるために、IBAD法やPLD法を実現するための高価な機材を必要とし、また面方向に結晶を積層させるように成長させていく方式のため、製造速度が遅い。それゆえ、長尺な線材の製作には向いていない。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が広がった $ab$ 平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 1.8km を超える線材が作製されており、km オーダーの線材の量産が可能となっている。一方、RE 系も数年の内に長尺線材の製作が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。現在、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 Bi 系でもっとも臨界温度が高いこと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おり、Bi 系酸化物超伝導体で最も有用とされている。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、Bi 系酸化物超伝導体は長尺線材への応用という点で、Y 系、Gd 系高温超伝導体と比べて原料のコストや線材加工が容易という点で優れており、また Bi 系酸化物超伝導体の中では Bi-2223 がその高い臨界温度による応用範囲、さらに運用コストにより、現段階では超伝導長尺線材の材質として適しているといえる。

Bi 系酸化物超伝導体は、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問題点がある。そのため、Bi 系酸化物系超伝導体は磁界の影響を受けやすく、特に高温高磁界下における磁束クリープの影響は大きく、臨界電流密度  $J_c$  は自己磁場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  $n$  値 (超伝導体の実用性を判断する指標の 1 つ) が高温高磁界中で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窺えるが、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  $J_c$  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。これを機械的に実現可能にしたのが 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。銀シース線材は、万が一超伝導体の超伝導状態が壊れてしまった時、銀が電流パスとして働くことから線材の安定性が向上する。このようにして単芯線が作られるのだが、Bi 系超伝導体はセラミックスであるため、著しく強度に欠ける。そのために、線材を多芯化することで機械的な安定化を図る必要がある。線材を多芯化することによるメリットとして、機械的強度の向上や可撓性の向上、交流電流を送電する際に起こる交流損失の低減などがあげられる。しかし線材内におけるシース材の比率が上がるため工業的臨界電流密度  $J_e$  が低下してしまうことがある。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。

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。

(1) 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。

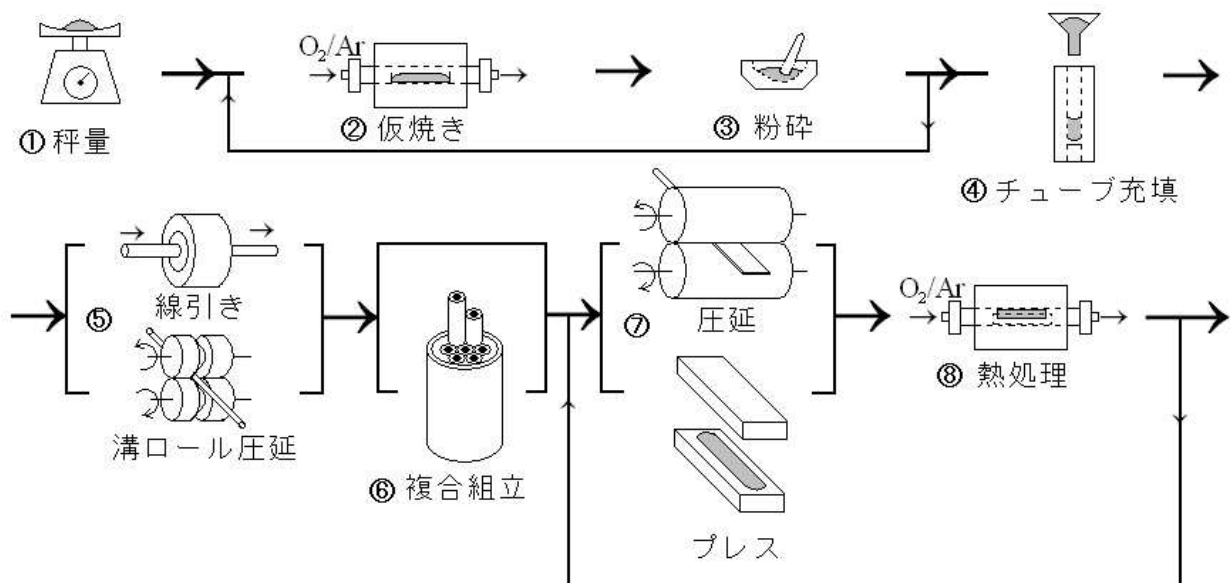


図 1.1 PIT 法概要図

- (2) 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て多芯線化が完了する。
- (3) 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。その後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。
- (4) 熱処理について：Bi-2212では、部分溶融が起こる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は同様の方法では溶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 conditions 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<sup>1)2)</sup>。

このようにしてBi-2223長尺線材が製作される訳だが、PIT法によって製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 (CT-OP:ConTrolled-Over Pressure) 法

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)<sup>3)</sup>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

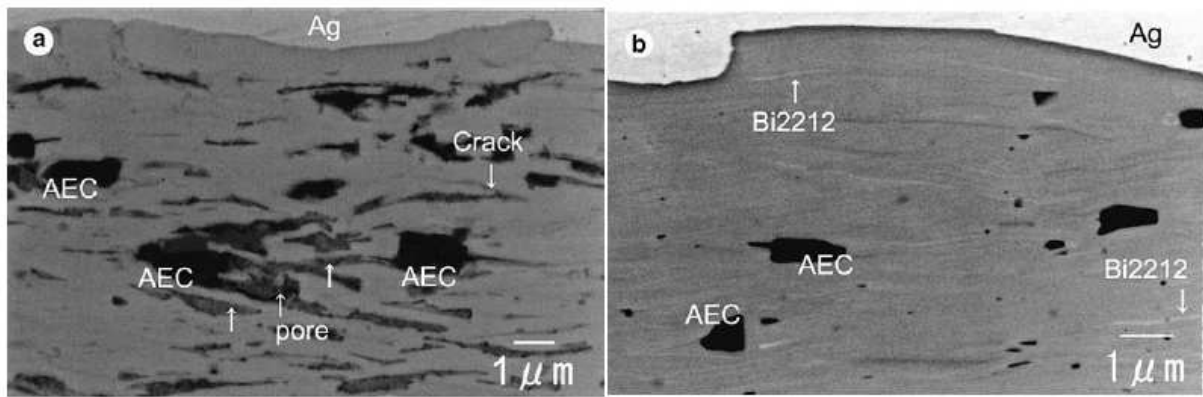


図 1.2 焼結後の SEM 像 (a) 大気圧 (従来) 焼結線材 (b)CT-OP 線材

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。

- (1) **フィラメント内の密度**：Bi-2223 の理論密度は  $6.3 \text{ g/cm}^3$  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。
- (2) **Bi-2223 単相化**：2 次焼結後の線材のフィラメント断面を SEM 顕微鏡で観察すると、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。しかし、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。さらに、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。

- (3) 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度強だったのに対して、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。
- (4) 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。
- (5) 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/cm<sup>2</sup>から37.0 kA/cm<sup>2</sup>に、銀比2.2の線材で32.3 kA/cm<sup>2</sup>から40.0 kA/cm<sup>2</sup>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。
- (6) 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、製作された線材とCT-OPを導入した線材とを比較したとき、臨界電流特性が劣化し始める引っ張り応力は、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、それによって空隙、クラックなどの周辺に比べて引っ張りによる負荷に弱い部分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<sup>4)5)</sup>。

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カのばらつきの改善)
- 不可逆磁界 $B_i$ の向上(ピンカのばらつきの改善によるピンカの向上、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

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。そこで、それまでおざなりであったエネルギー問題を解決するため、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がたった。その先駆けとして、デモンストレーションの意味をこめて、住友電気工業製の Bi-2223 線材を用いて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の敷設が 2006 年 6 月末に起工され、同年 8 月に竣工、半年の試験運用が行われた。この超伝導ケーブルは従来のケーブルに比べ、35 倍の電力を運べる上に損失を抑えることができ、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 165 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言うことから、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 法によって作製された 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<sup>6)</sup>。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、先ほど挙げた Gd コート線材超伝導マグネットより全体のサイズは 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 Nb<sub>3</sub>Sn 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 165 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。このマグネットは Bi-2223 線材の高い異方性のため、Bi-2223 線材のテープに侵入する垂直成分の自己磁界により性能が決定されるという問題点がある。そこで、Bi-2223 線材に侵入するテープ線材に垂直成分の磁界を減らすようにマグネットに改良を加え、その評価を行う。

## 第 2 章 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。また、図 2.3 は、超伝導マグネットに使用されている線材と同じ臨界電流を持つ Bi-2223 線材の 77.3 K における  $I_c$ - $B$  特性のデータとなっている。

実際のマグネットは表 2.1 にあるようにパンケーキコイル数が 20 個であるが、ダブルパンケーキコイルとなっているので、模式図では簡略のため、2 個のパンケーキコイルを 1 つのコイルとみなしている。マグネット全体の電流領域は実際のマグネットのものとはほぼ変わらないため、計算上大きく値がずれることはない。

## 2.2 マグネット諸元

図 2.2にある  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  は、それぞれ超伝導マグネットの中心部の最大磁界、線材にかかる磁界の水平成分の最大値、線材にかかる磁界の垂直成分の最大値となっている。

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

両端 2 層の臨界電流 (77.3 K、自己磁界中)	165 A
両端から 3 層目の臨界電流 (77.3 K、自己磁界中)	147 A
中心 4 層の臨界電流 (77.3 K、自己磁界中)	135 A
線材の幅	4.4 mm
線材の厚さ	0.22 mm
使用した長さ	267 m

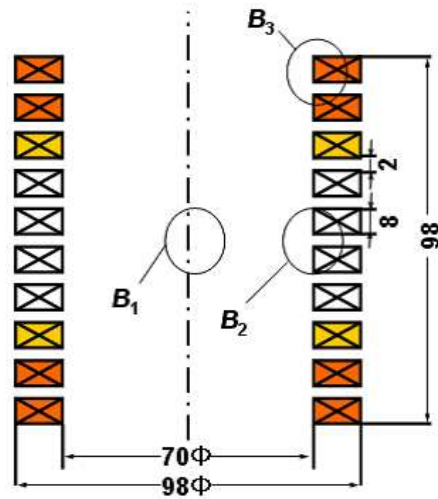


図 2.2 径方向断面模式図。  $B_1$  は中心最大磁界、  $B_2$  は線材に対する平行磁界成分の最大値、  $B_3$  は線材に対する垂直磁界成分の最大値を示す。また領域はそれぞれが起こる領域を示す。また、オレンジ、黄色、無色のコイルはそれぞれ、短尺線材が 77.3 K、自己磁界中で臨界電流が 165 A, 147 A, 135A の線材を用いたコイルを示す。

### 2.3 中心最大磁界の向上

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、コイルの形状や、条件を変えることでテープ線材にかかる垂直成分の磁界を減らし、それにより臨界電流を上げ、中心最大磁界を向上させるための検討を行う。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 1 A 通電した際の中心最大磁界  $B_1$ 、線材に加わる磁界の平行の成分の最大値  $B_2$ 、及び垂直成分の最大値  $B_3$  を計算する。

平行方向、垂直方向の最大磁界成分に対する Bi-2223 線材の  $I_c$ - $B$  特性曲線とそれぞれのロードラインとの交点から、平行方向、垂直方向の磁界によりそれぞれ決定される臨界状態、及び臨界電流を求めることができ、その臨界電流の低いほうの値がマグネット全体の臨界電流となる。これにより、マグネットの臨界状態、及び達成できる中心最大磁界を求めることができ、これを  $B_{1MAX}$  とする。

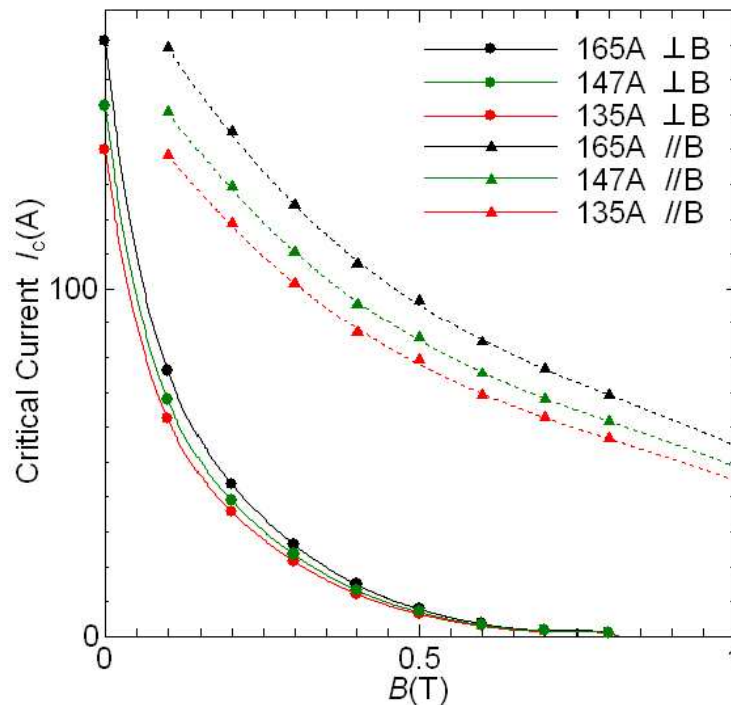


図 2.3 Bi-2223 線材の  $I_c$ - $B$  特性。実線がテープ線材に垂直に磁場をかけたときのもので破線が水平に磁場をかけたもの。黒、緑、赤の線はそれぞれ 77.3 K の自己磁界中での臨界電流が 165 A, 147 A, 135 A の Bi-2223 線材を表している。

ここで図 2.4 は、図 2.3 に表 2.1 のマグネットの  $B_2$ 、 $B_3$  のロードラインを加えたものであり、この単位電流あたりの磁束密度の値は表 2.3 の通りとなっている。この超伝導マグネットはそれぞれの短尺線材が 77.3 K の自己磁界中において臨界電流 165 A, 147 A, 135 A の 3 つのコイルにより製作されているが、表 2.3 はそれぞれの臨界電流を持つコイルにかかる磁界を考慮して  $B_2$ 、 $B_3$  を決定している。ここで、図 2.4 の青の点は平行方向磁界により決定される臨界状態及び臨界電流、緑の点は垂直方向磁界により決定される臨界状態及び臨界電流を表しており、青の点より決定される臨界電流は 63.7 A、緑の点より決定される臨界電流は 38.2 A と読み取れ、マグネット全体の臨界電流は 38.2 A と決定することができ、これに単位電流当りの中心磁界である  $B_1$  をかけることでマグネットの  $B_{1MAX}$  は 0.386 T となる。

このようにして中心最大磁界を求め、中心最大磁界を向上させる検討を行う。また、中心最大磁界だけではなく、中心磁界の均一度やマグネットを作製するためのコスト面の検討も行う。

表 2.3 超伝導マグネットに1 A 通電したときの  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  の値

$B_1$	$1.01 \times 10^{-2} \text{ T/A}$
$B_2$	$1.07 \times 10^{-2} \text{ T/A}$
$B_3$	$5.95 \times 10^{-3} \text{ T/A}$

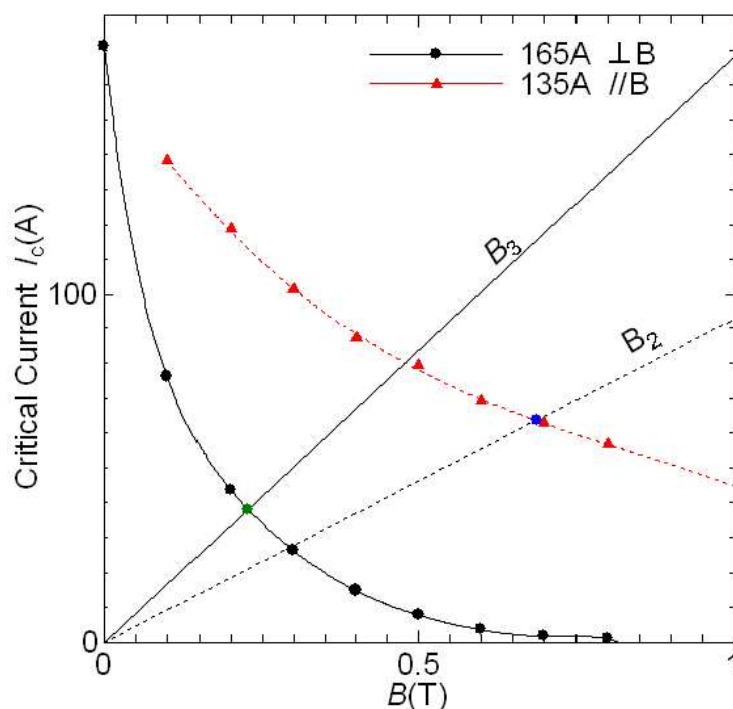


図 2.4  $I_c$ - $B(B \perp c)$  及び  $I_c$ - $B(B // c)$  特性と対応する  $B_2$  と  $B_3$  のロードライン。

**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 中心最大磁界の向上のための改良案

前述のとおり、Bi-2223 超伝導マグネットはその高い異方性のため、線材の面に対して垂直な磁界がボトルネックとなっている。ここでは、中心最大磁界を向上させるための5つの検討を行った。図2.5は、4つの改良案の模式図である。コイルの両端にある灰色の部分には鉄となっており、磁化特性はJFEスチールの50JN1000のものを使用しており、これは一般的に流通している鉄とほぼ同じものである。また、case 1-1のみ実際に改良案を製作し、測定を行った。そのためcase 1-1のみ超伝導コイルは表2.1と同様として解析しているが、case 1-1以降の改良案は全て臨界電流が77.3 K、自己磁界中で165 Aの線材を使うものとしている。

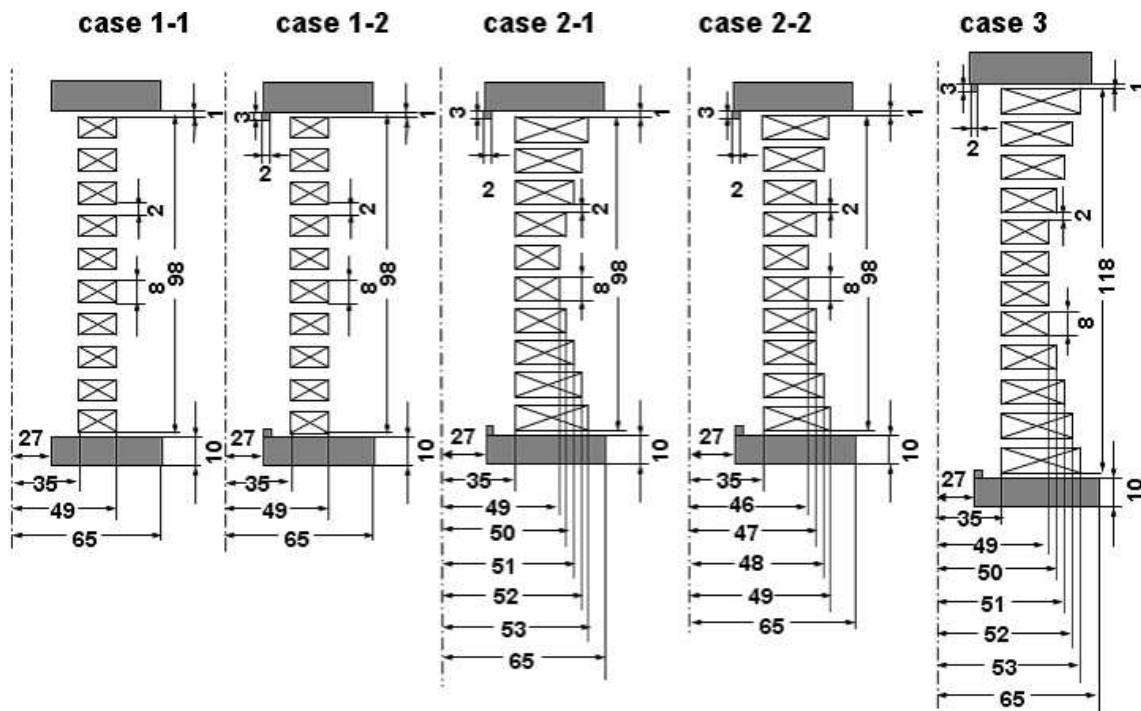


図 2.5 超伝導マグネットの改良案

**case 1-1** case 1-1 では、マグネットの両端の留め具(フランジ)を鉄で作製することにより、テープ線材にかかる磁束が磁性体である鉄フランジに引き寄せられるため、 $B_3$  が低下し、その結果中心最大磁界が向上すると考えられる。

**case 1-2** case 1-2 では、case 1-1 の鉄で作製したフランジの内側に突起部をとりつける。突起部をとりつけることにより、両端のコイルの内径部



周辺の磁束が突起部に引き寄せられ、周辺の磁束をテープ線材に水平にすることができる。これにより case 1-1 よりさらに中心最大磁界が向上すると考えられる。

**case 2-1** case 2-1 では、case 1-2 の改良に加え、コイルの巻き数を表 2.4 のように巻く。このように巻くことで、中心部の磁束分布の均一度が良くなるとともに、巻き数を段階的に増やしているので、1 個のダブルパンケーキコイルが発生させる磁束のテープ線材に対し垂直成分のものを、外側のより巻き数が多いダブルパンケーキコイルが発生させる垂直成分方向の磁束により打ち消すことができるため、 $B_3$  を抑えつつ  $B_1$  を上げることができ、それにより中心最大磁界を向上させることができると考えられる。

**case 2-2** case 2-2 では、case 2-1 の巻き数を表 2.5 のように巻く。これは、線材の使用量を減らして段階的に巻き数を変えたものである。段階的に巻くことで、線材の使用量を抑えつつ高い中心最大磁界を出すことができると考えられる。

**case 3** case 3 では、case 2-1 のコイルの中心に 104 回巻きのコイルを 2 層加え、全体をダブルパンケーキコイル 12 層とする。これにより、高い中心最大磁界を維持しつつ均一度を上げることができると考えられる。

表 2.4 case 2-1 のマグネットの諸元

両端のコイルの巻き数	130 回
端から 2 つ目のコイルの巻き数	124 回
端から 3 つ目のコイルの巻き数	117 回
端から 4 つ目のコイルの巻き数	111 回
端から 5 つ目のコイルの巻き数	104 回

表 2.5 case 2-2 のマグネットの諸元

両端のコイルの巻き数	104 回
端から 2 つ目のコイルの巻き数	99 回
端から 3 つ目のコイルの巻き数	93 回
端から 4 つ目のコイルの巻き数	88 回
端から 5 つ目のコイルの巻き数	83 回

なお、FEM での解析には日本総合研究所の JMAG studio version 9.0 を用いている。また、解析に用いたモデルは図 2.6 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。

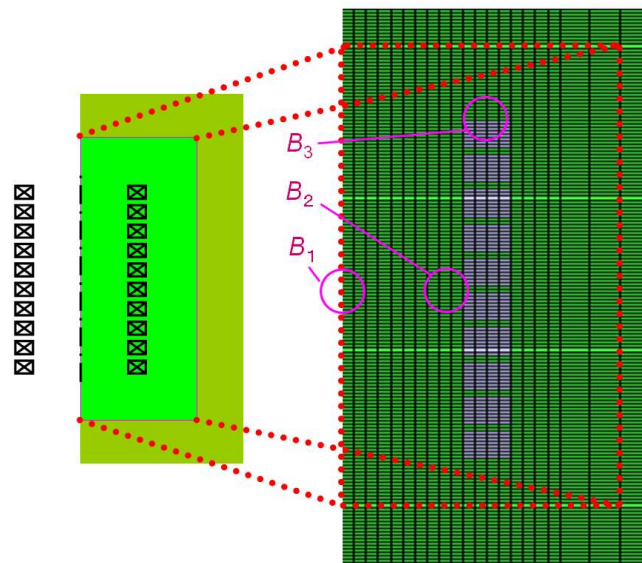


図 2.6 パンケーキ型コイルの解析モデル

## 第 3 章 結果

### 3.1 各 case 結果

2.3 節で求めた方法と同様にして、 $B_{1MAX}$  を求める。なお、各改良案ごとのロードラインの図は表 2.4 のように緑の点が  $B_3$  と垂直磁界の  $I_c-B(B//c)$  特性との交点で、青い点が  $B_2$  と平行磁界の  $I_c-B(B//c)$  特性との交点である。

#### 3.1.1 case 1-1 結果

case 1-1 の  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  の値は表 3.1 のようになっており、これを図 2.3 に加えると図 3.1 のようになる。実際には  $B_2$ 、 $B_3$  の値はそれぞれ  $1.21 \times 10^{-2}$  T、 $1.24 \times 10^{-3}$  T であるが、これは  $I_c-B$  特性の最も良い 165 A のコイル層にかかるものであるため、線材にかかる磁界は一番大きくなるが、臨界電流は 135 A のコイル層にかかる水平・垂直方向の磁界により決定される臨界電流よりも大きくなるので、上記の値を  $B_2$ 、 $B_3$  として使用してはいない。147 A 層にかかる平行・垂直方向の磁界の値も同様である。 $B_2$ 、 $B_3$  の値から、2.3 節のように図 3.1 に水平・垂直方向の磁界により決定されるそれぞれの臨界状態及び臨界電流が青い点と緑の点で表せる。ここで臨界電流が低いのは水平方向の磁界により決定される臨界電流であり、これを読み取り、マグネット全体の  $I_c$  は 62.0 A となり、 $B_{1MAX}$  は 0.691 T となった。

表 3.1 case 1-1 の 1 A 当りの  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  の値

$B_1$	$1.11 \times 10^{-2} \text{ T/A}$
$B_2$	$1.15 \times 10^{-2} \text{ T/A}$
$B_3$	$9.58 \times 10^{-4} \text{ T/A}$

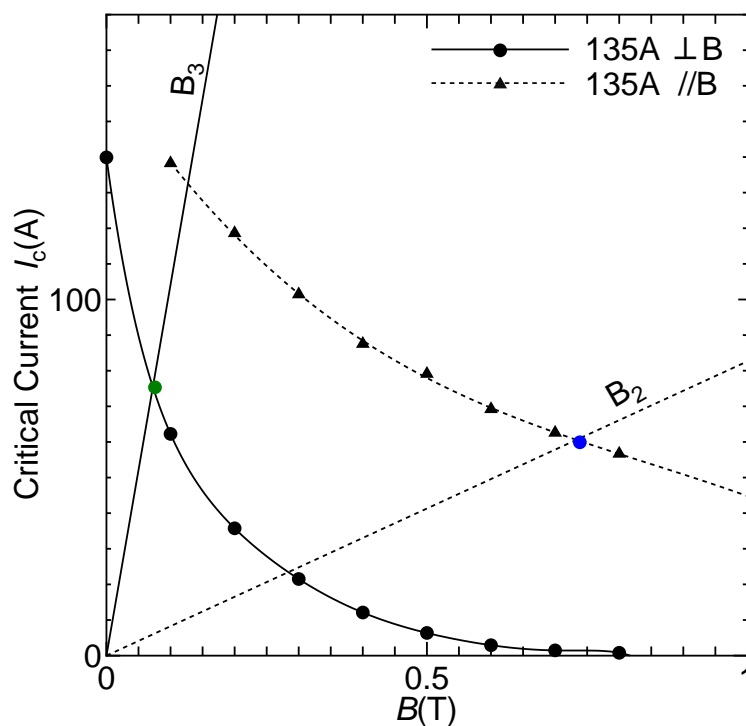


図 3.1 case 1-1 の二つの  $I_c$ - $B$  特性とロードライン。

### 3.1.2 case 1-2 結果

case 1-2 の  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  の値は表 3.2 のようになっており、これを図 2.3 に加えると図 3.2 のようになる。 $B_2$ 、 $B_3$  の値からマグネット全体の  $I_c$  は 69.1 A となり、 $B_{1\text{MAX}}$  は 0.782 T となった。

表 3.2 case 1-2 の 1 A 当りの  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  の値

$B_1$	$1.13 \times 10^{-2} \text{ T/A}$
$B_2$	$1.17 \times 10^{-2} \text{ T/A}$
$B_3$	$9.09 \times 10^{-4} \text{ T/A}$

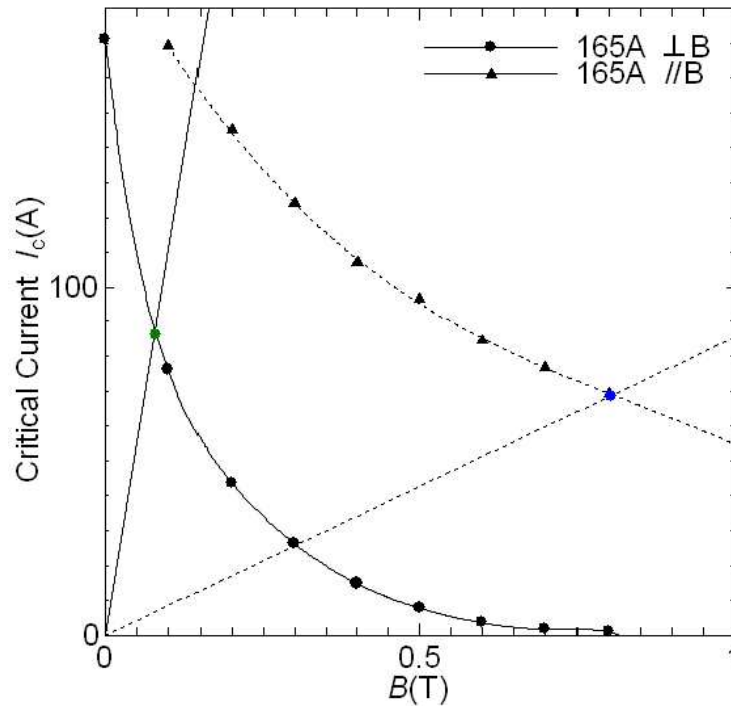


図 3.2 case 1-2 の二つの  $I_c$ - $B$  特性とロードライン。

### 3.1.3 case 2-1 結果

case 2-1 の  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  の値は表 3.3 のようになっており、これを図 2.3 に加えると図 3.3 のようになる。 $B_2$ 、 $B_3$  の値からマグネット全体の  $I_c$  は 65.0 A となり、 $B_{1\text{MAX}}$  は 0.813 T となった。

表 3.3 case 2-1 の 1 A 当りの  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  の値

$B_1$	$1.25 \times 10^{-2}$ T/A
$B_2$	$1.33 \times 10^{-2}$ T/A
$B_3$	$9.46 \times 10^{-4}$ T/A

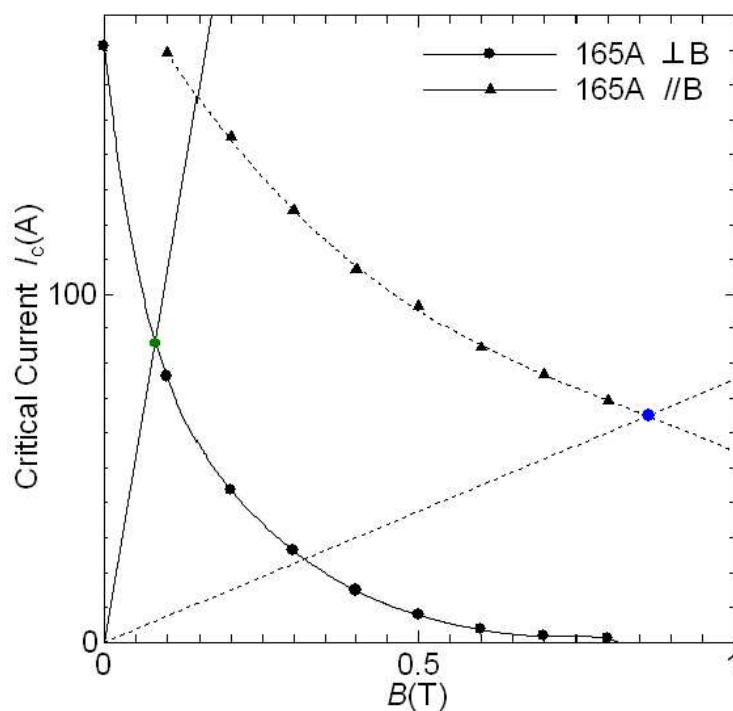


図 3.3 case 2-1 の二つの  $I_c$ - $B$  特性とロードライン。

### 3.1.4 case 2-2 結果

case 2-2 の  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  の値は表 3.4 のようになっており、これを図 2.3 に加えると図 3.4 のようになる。 $B_2$ 、 $B_3$  の値からマグネット全体の  $I_c$  は 71.5 A となり、 $B_{1\text{MAX}}$  は 0.719 T となった。

表 3.4 case 2-2 の 1 A 当りの  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  の値

$B_1$	$1.01 \times 10^{-2} \text{ T/A}$
$B_2$	$1.08 \times 10^{-2} \text{ T/A}$
$B_3$	$9.49 \times 10^{-4} \text{ T/A}$

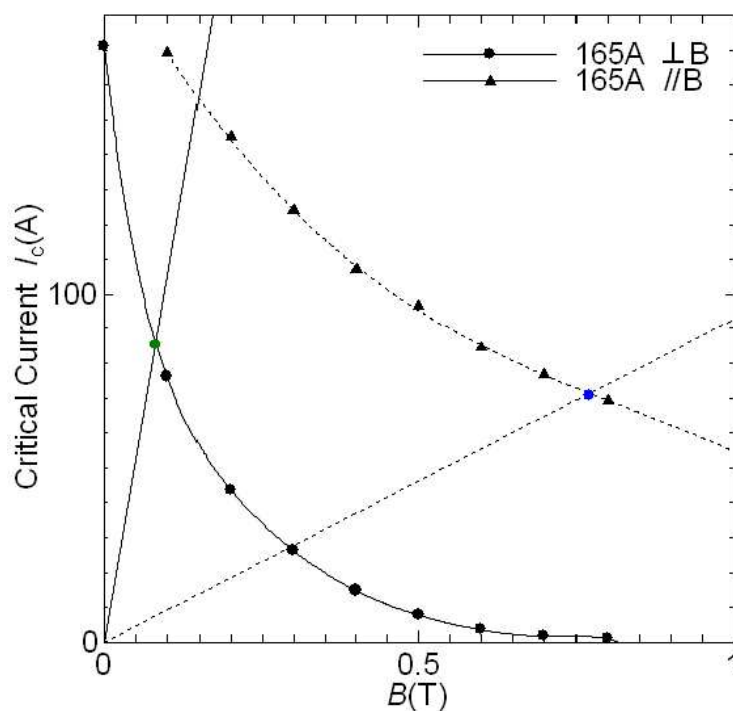


図 3.4 case 2-2 の二つの  $I_c$ - $B$  特性とロードライン。

### 3.1.5 case 3 結果

case 3 の  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  の値は表 3.5 のようになっており、これを図 2.3 に加えると図 3.5 のようになる。 $B_2$ 、 $B_3$  の値からマグネット全体の  $I_c$  は 64.8 A となり、 $B_{1\text{MAX}}$  は 0.815 T となった。

表 3.5 case 3 の 1 A 当りの  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  の値

$B_1$	$1.26 \times 10^{-2} \text{ T/A}$
$B_2$	$1.34 \times 10^{-2} \text{ T/A}$
$B_3$	$9.84 \times 10^{-4} \text{ T/A}$

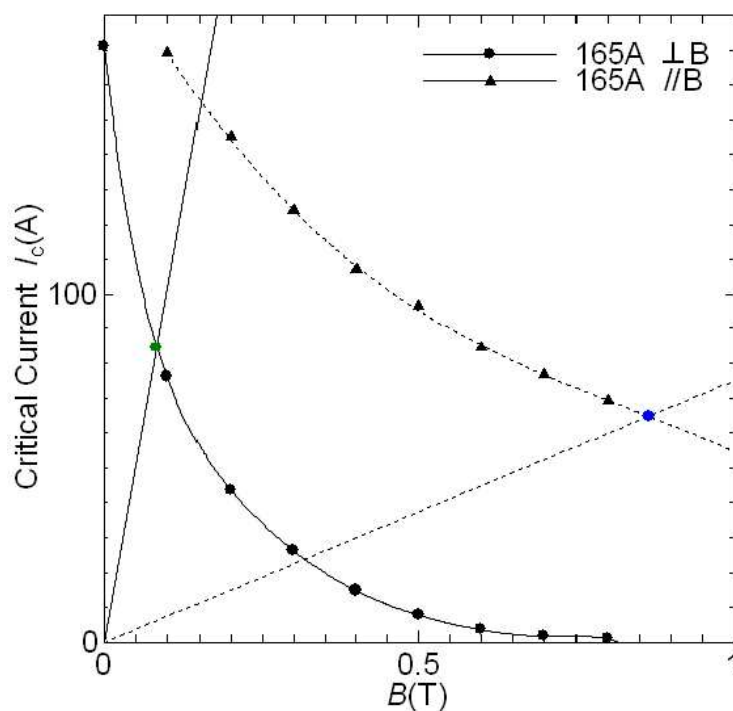


図 3.5 case 3 の二つの  $I_c$ - $B$  特性とロードライン。

### 3.1.6 結果まとめ

全ての改良案をまとめると、表 3.6 となる。なお、改造を施していない超伝導マグネットを present case とする。



表 3.6 各 case の磁界予測

case	$B_1$ [T]	$B_2$ [T]	$B_3$ [T]	$I_c$ [A]	$B_{1MAX}$ [T]
case 1-1	$1.11 \times 10^{-2}$	$1.15 \times 10^{-2}$	$9.58 \times 10^{-4}$	62.0	0.691
case 1-2	$1.13 \times 10^{-2}$	$1.17 \times 10^{-2}$	$9.09 \times 10^{-4}$	69.1	0.782
case 2-1	$1.25 \times 10^{-2}$	$1.33 \times 10^{-2}$	$9.46 \times 10^{-4}$	65.0	0.813
case 2-2	$1.01 \times 10^{-2}$	$1.08 \times 10^{-2}$	$9.49 \times 10^{-4}$	71.5	0.719
case 3	$1.26 \times 10^{-2}$	$1.34 \times 10^{-2}$	$9.84 \times 10^{-4}$	64.8	0.815

### 3.2 均一度

各 case の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の磁束密度分布を規格化したものを、図 3.6 に示す。磁束密度分布はマグネットの中心軸上のものを解析している。

また、表 3.7 は各 case のマグネット中心軸上の中央部の磁界との誤差 5% の範囲間の距離を記したものである。

表 3.7 各 case の均一度

present case	case 1-1	case 1-2	case 2-1	case 2-2	case 3
36.6 mm	45.6 mm	47.2 mm	50.6 mm	52.2 mm	70.2 mm

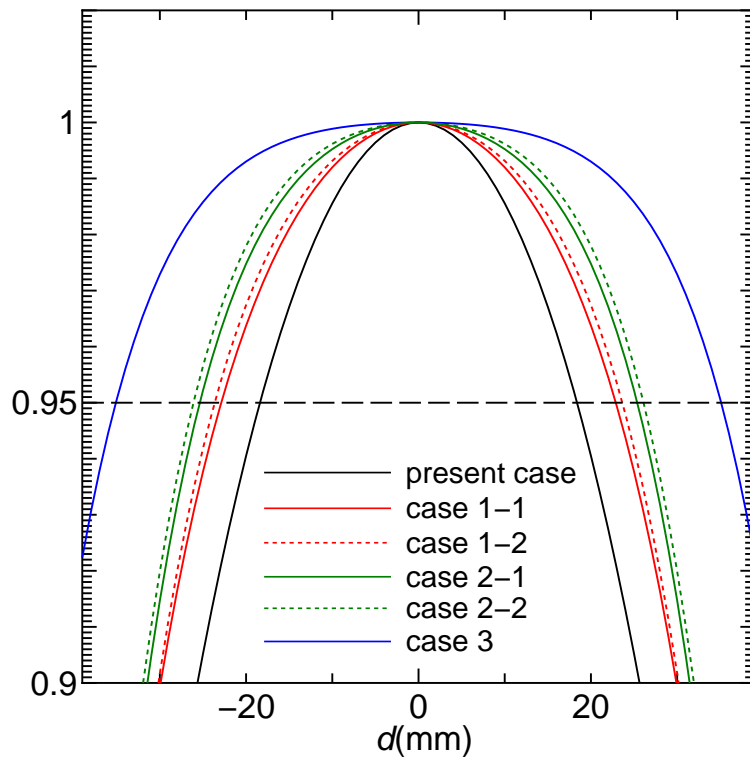


図 3.6 各 case のマグネット中心軸方向の規格化した磁束密度分布。  $d$  はマグネット中心部からの距離で、マグネットの底部が負方向、上部が正方向。

### 3.3 線材効率

表 3.8 の、線材使用率  $Q$  は、 present case に用いた線材の使用量を 100 % としたときの、各 case の線材使用量を % で表したもので、線材効率は線材使用率に対する中心最大磁界を表し、  $B_{1MAX}/Q$  で表される。

表 3.8 線材使用率  $Q$  と線材効率

case	線材使用率 $Q$ [%]	線材効率 ( $B_{1\text{MAX}}/Q$ ) [T]
present case	100	$3.86 \times 10^{-3}$
case 1-1	100	$6.91 \times 10^{-3}$
case 1-2	100	$7.82 \times 10^{-3}$
case 2-1	117	$6.95 \times 10^{-3}$
case 2-2	87	$8.27 \times 10^{-3}$
case 3	137	$5.95 \times 10^{-3}$

### 3.4 実測値

present case 及び case 1-1 は実際に改良案を作製し、77.3 K 及び 65.0 K で測定を行っている。測定は四端子法により行い、電流値と電圧値の記録を行い、この際の電界基準は  $100 \mu\text{V/m}$  とした。マグネットに用いられた線材の長さが 267 m なので、電圧の基準は 0.0267 V とすることができる。このときのマグネットの  $V$ - $I$  特性曲線は図 3.7 のようになり、電圧の基準値との交点より臨界電流を決定した。四端子法で測定し、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 3.7 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。解析ではこの接続抵抗を考慮していないため、接続抵抗を考慮しない、線材のみで見た  $I_c$  の場合では、この実測値よりも 2 A ほど  $I_c$  が高くなると考えられる。よって、今回のマグネットまた、マグネットに 1 A の電流を通電した際の中心磁界と、マグネットボビン内の径方向と中心軸方向の磁界の測定を行った。マグネットに使われた線材の 65.0 K の  $I_c$ - $B$  特性は、77.3 K の平行磁界に対する  $I_c$ - $B$  特性から、典型的な Bi-2223 テープ線材の温度依存性により見積もったものである。present case の  $I_c$  は 45.2 A と、解析の値と 6.5 A ほど大きくでている。また、 $B_1$  の値は  $9.50 \times 10^{-3}$  T で、 $B_{1\text{MAX}}$  は 0.429 T となり、case 1-1 ではマグネット全体の  $I_c$  は 65.0 A となり、 $B_1$  の値は  $1.08 \times 10^{-2}$  T となった。これより、実際に case 1-1 の改良案を施したマグネットの  $B_{1\text{MAX}}$  は 0.702 T となる。また、65.0 K では FEM 解析では図 3.8 のようになり、

$I_c$  の理論値は 115 A、 $B_{1MAX}$  の理論値は 1.27 T となった。実際に通電試験を行ったところ、 $I_c$  は 120 A となり、 $B_{1MAX}$  は 1.30 T となった。実測値と解析値の差の理由について、4.1 節で考察を行う。

図 3.9 と図 3.10 に、case 1-1 のマグネットの軸方向と径方向の磁束密度分布を示す。

また、図 3.9 より、case 1-1 のマグネット中心軸上の中央部の磁界との誤差 5% の範囲間の距離はおよそ 44.6 mm となった。

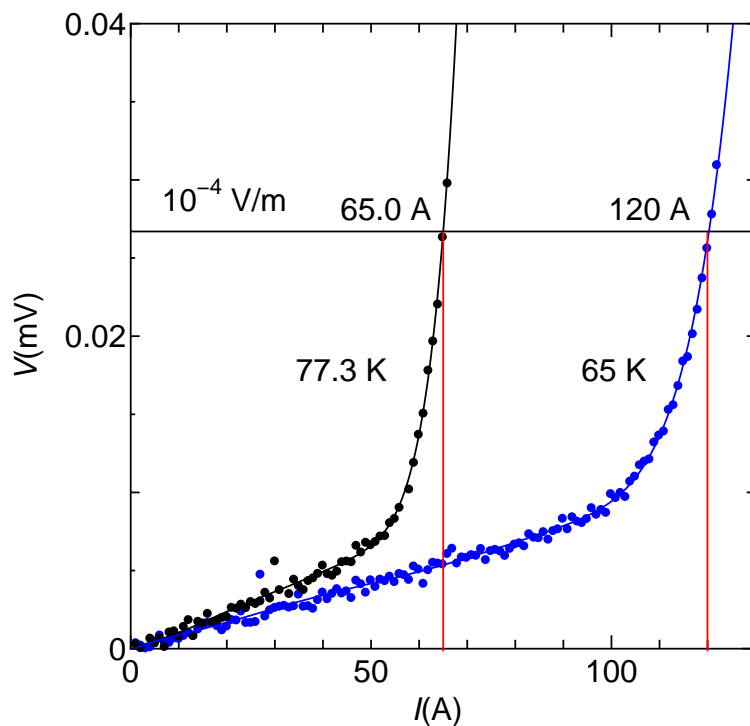


図 3.7 77.3 K 及び 65.0 K の  $V$ - $I$  特性

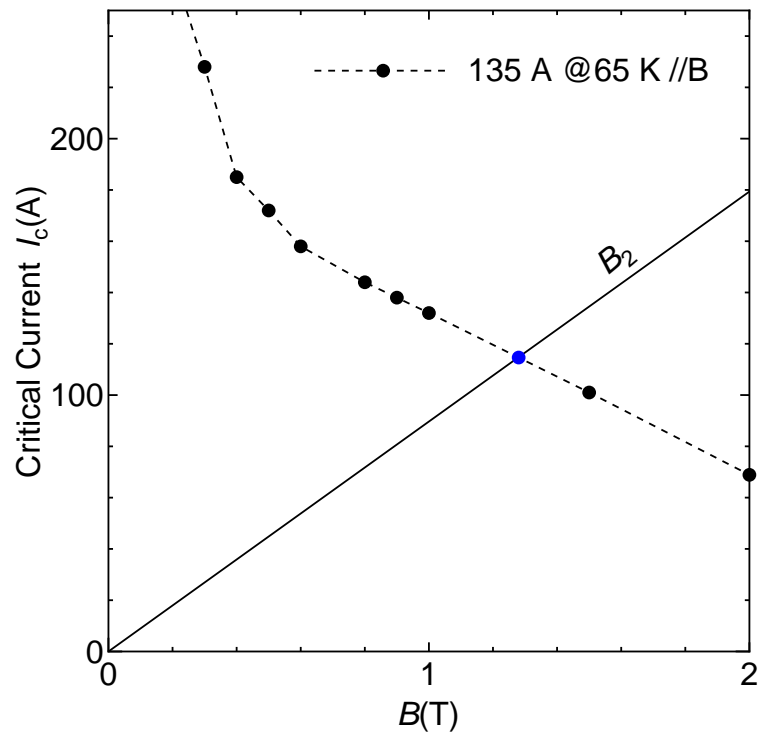


図 3.8 65 K のときの case 1-1 のロードライン

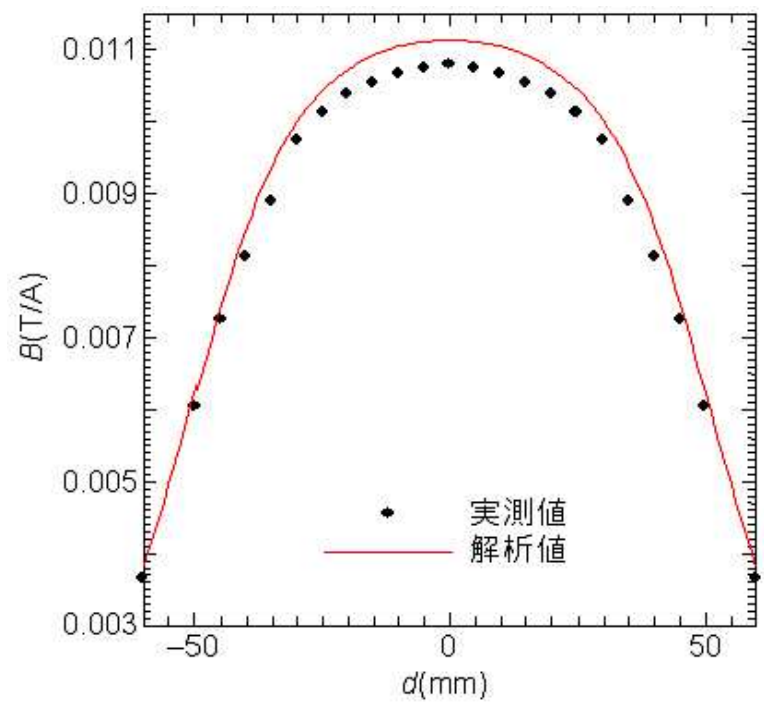


図 3.9 case 1-1 のマグネットに 1 A 通電したときの中心軸方向の磁束密度分布。d はマグネット中心部からの距離で、マグネットの底部が負方向、上部が正方向。

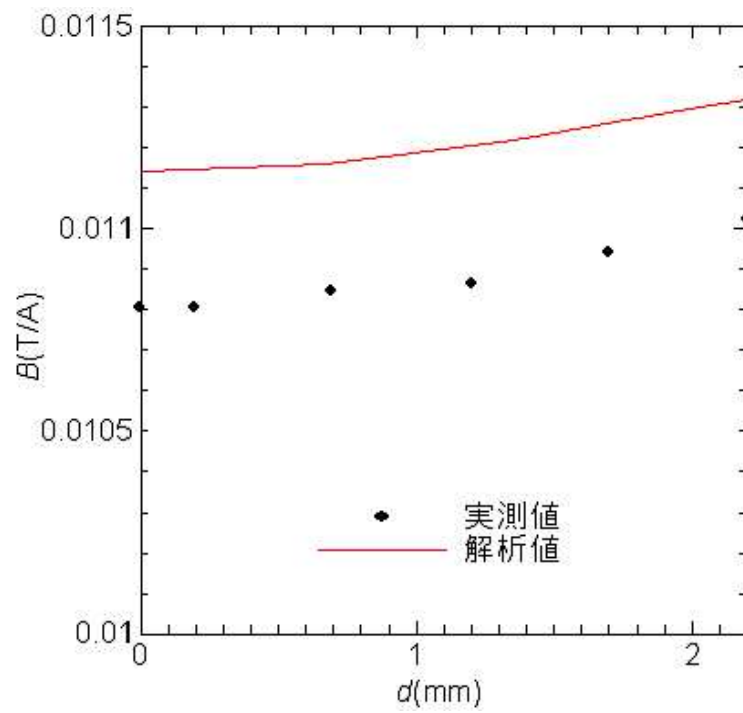


図 3.10 case 1-1 のマグネットに 1 A 通電したときの径方向の磁束密度分布。  $d$  はマグネット中心部からの距離。

## 第 4 章 考察

### 4.1 77.3 K における実測値と理論値

ここでは、present case および case 1-1 の改良案を実際に製作し、測定したデータと、FEM により解析した中心最大磁界との比較を行い、超伝導マグネットの特性評価および FEM による解析についての評価を行う。

#### 4.1.1 present case

present case の  $B_{1\text{MAX}}$  は 0.429 T で、FEM による理論値は 0.386 T と、理論値は実測値の約 90 % 程度となった。この理由については、 $I_c$  が実測値よりもおよそ 6.5 A ほど低いことが原因と考えられる。この原因として、単位電流当りの中心磁界である  $B_1$  の値が、理論値に比べて実測値が約 5 % 程度下がっていることから、FEM 解析ではマグネットのボビン壁内の磁束密度分布が実際のものよりも大きくなる傾向があるということが第一に考えられる。ボビン壁内の磁束密度が上がるということは、解析での  $B_2$ 、 $B_3$  の値も同様に大きくなると考えられる。present case では、 $B_3$  がボトルネックとなりマグネットの臨界電流を決定しているため、 $B_3$  が大きくなったことにより、臨界電流値も実測値より小さくなる。図 4.1 の  $B_{3s}$  は present case の 1 A 通電時の  $B_3$  の値を、 $B_1$  の実測値と理論値のずれよりスケーリングしたロードラインである。これより臨界電流を読み取ると 39.5 A となる。これでもまだ 5 A ほど差があるが、この原因は  $I_c$ - $B$  特性曲線のデータがマグネットに用いられている線材と同じものではないということと、マグネット内壁部分の磁束密度の分布の見積もりが FEM 解析と実際のものとは違うためと考えられる。

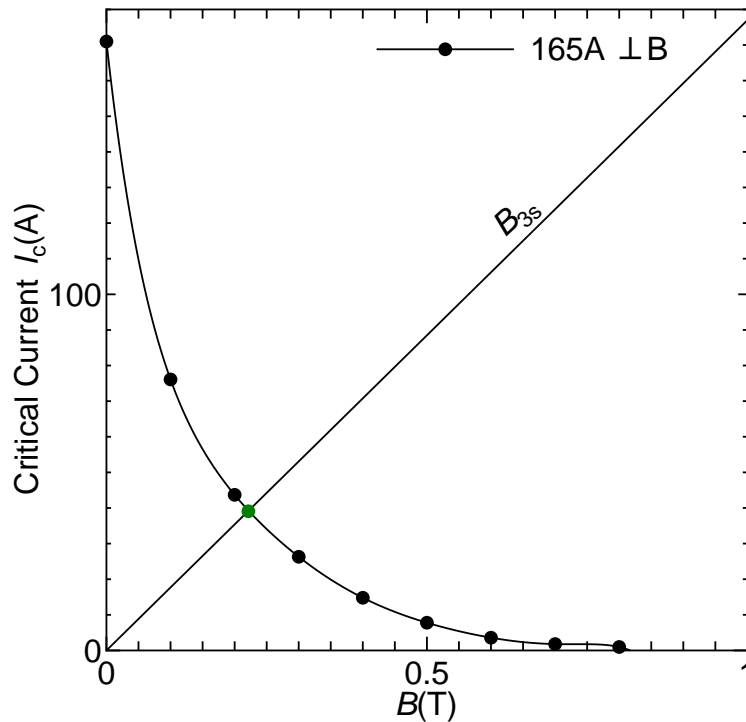


図 4.1 present case の  $I_c$ - $B$  特性。  $B_{3s}$  は  $B_3$  をスケーリングしたものの。

#### 4.1.2 case 1-1

case 1-1 の実測値は present case と異なり、77.3 K の測定で  $B_{1MAX}$  は 0.702 T、理論値は 0.691 T となり、理論値と実測値がほぼ一致する結果となった。また、65.0 K の測定においても、 $B_{1MAX}$  は 1.30 T、理論値は 1.27 T となりほぼ一致している。また、臨界電流の実測値は 77.3 K において 65.0 A、理論値は 62.0 A と、誤差は約 5% となる。この誤差の原因としては、present case と同様に、図 3.9 と図 3.10 から、ボビン内の磁束密度分布が実際のものより 3% 程度ずれていることと、 $I_c$ - $B$  特性曲線のデータがマグネットに用いられている線材と同じものではないからと考えられる。また、65.0 K の測定においては、実測値 120 A、理論値 115 A と、誤差が約 4% と、77.3 K とおおむね同じ誤差になっている。

図 4.1 のように、77.3 K の測定においての実測値と理論値のずれをスケーリングした case 1-1 のロードラインより臨界電流を読み取ると 63.0 A となる。臨界電流が 5% 程度ずれているのに対し、 $B_{1MAX}$  の値はほとんどずれがない理由としては、臨界電流が小さくなっているかわりに、 $B_1$  の値が大きくなるため、結果として誤差がでなかったと考えられる。



また、present case と比べて  $B_{1MAX}$  の実測値と理論値の値でほとんど誤差がでなかった理由について考察を行う。present case と case 1-1 との違いは、フランジが鉄になっていることである。これにより、マグネット内壁部の磁束はコイル近傍においても、テープ線材に対しほぼ水平方向に進む。このため、マグネット全体の  $I_c$  を決定する要因が  $B_2$  となるので、テープ線材に対し垂直成分の磁界の振る舞いを無視して  $B_{1MAX}$  を決定できるということになる。一方、present case では  $I_c$  を決定しているのは  $B_3$  なので、FEM 解析では垂直成分の磁界の振る舞いが実際のもものと異なるために、臨界電流値にずれが生じていると考えられる。そのため、鉄フランジを取り付けたことにより、ずれが生じる垂直成分の磁界の振る舞いを無視して解析を行うことができるようになるため、case 1-1 以降の改良案についても、大きく値がずれることはないだろうと考えられる。

## 4.2 改良案の評価

前述のように、鉄フランジをつけたことで、FEM 解析の値と実測値は大きく値がずれることはないと考えられる。ここでは、誤差は出ないものをして、各 case の改良案についての特性評価を行う。

### 4.2.1 case 1-1

case 1-1 の改良案は前述の通り、 $B_{1MAX}$  は実測値が 0.702 T、理論値は 0.691 T とほぼ一致した値が出ており、また、実測値と比較して present case の約 1.64 倍の中心最大磁界を得ることができた。鉄フランジは改良にかかる費用がマグネットに用いた線材と比較して非常に安く行えるため、材料が非常に高価である超伝導マグネットにおいては大変有効な改良といえるだろう。

### 4.2.2 case 1-2

case 1-2 の改良案は、鉄の突起をつけることでマグネット両端の近傍の磁束を突起部に引き寄せるため、 $B_3$  の値が  $9.58 \times 10^{-4}$  T から  $9.09 \times 10^{-4}$  T に下がっている。また、case 1-2 以降ではマグネットに用いる線材を 77.3K、自己磁界中で 165 A のもので製作しているので、case 1-1 と比較して  $I_c$  が 62.0 A から 69.1 A、 $B_{1MAX}$  が 0.691 T から 0.782 T と性能が上がっている。さら

に、case 1-2 の臨界電流が 165 A のコイル層にかかる垂直磁界は  $1.21 \times 10^{-2}$  T だったものが  $1.17 \times 10^{-2}$  T まで下がっていることから、突起部が磁束を引き寄せることで  $B_2$  の値も多少小さくでき、 $B_{1\text{MAX}}$  を多少上げることができると予想される。ただし、突起の大きさを決定することが非常に難しく、大きすぎると  $B_3$  が大きくなってしまい、逆に小さすぎると効果がない。そのため、この改良を行うにはマグネットの形状にあった突起の大きさを検討する必要がある。

#### 4.2.3 case 2-1

case 2-1 の改良案は、 $B_{1\text{MAX}}$  が 0.813 T となると考えられる。ただしこれは  $B_1$  が大きく上がったため、その結果  $B_2$  も大きくなるため、 $I_c$  は case 1-2 の 69.1 A と比べて 65.0 A と小さくなっている。また、線材を多く巻いているため、線材の使用量も present case と比べ 17 % 増えているが、表 3.8 の線材効率をみると、case 1-1 とほぼ変わらないことが分かる。さらに、均一度は表 3.7 のように case 1-1 よりも 5 mm 大きくなっているため、case 2-1 の改良は線材効率を維持したまま高い中心最大磁界と均一度を上げることができる改良といえる。

#### 4.2.4 case 2-2

case 2-2 の改良案は、線材の使用量を減らしているため、 $B_{1\text{MAX}}$  は 0.719 T と、case 1-1 とあまり変わらない。しかし、線材効率で比較すると、 $8.27 \times 10^{-3}$  と、改良案の中ではもっとも高い値を示している。case 1-1 では、鉄フランジを取り付けたことにより、テープ線材に平行な磁界がマグネットの性能を決定するようになっていたため、線材の量を増やして  $B_1$  を増やしても、代わりに臨界電流が下がるので中心最大磁界が上がらない。しかし、case 2-2 のように線材を減らすと、両端の巻き数を増やす改良による効果が上がり、臨界電流をあまり下げずに  $B_1$  を上げることができるとこの結果から予想される。また、均一度を見ても、若干ながら、case 2-1 よりも上がっており、case 2-1 は中心最大磁界こそ低いものの、製造コストを下げ、均一度が高い磁界を発生することができる改良といえる。

#### 4.2.5 case 3

case 3では、case 2-1にさらにコイルを増やすことで、改良案の中で最も高い均一度を得ることができる。ただし、 $B_1$ はcase 2-1とほぼ変わらないため、 $B_{1MAX}$ はcase 2-1とほぼ同じ値となる。また、線材効率も改良案の中で最も悪い値となっているため、マグネット製作のコスト面からみるとあまりいい改良とはいえない。とはいえ、case 2-1と同じ中心最大磁界を保ったまま均一度を大きく上げることができるので、コストを考慮しない、マグネットの性能の面のみでいえば良い改良といえる。

## 第 5 章 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、自己磁界中において 165 A, 147 A, 135 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、自己磁界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 0.43 T となった。このマグネットに対し、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、マグネットの中心最大磁界を求めた。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、マグネットのテープ線材に垂直にかかる磁界を減少させるようマグネットに改良を加え、中心最大磁界を向上させる改良案、および均一度やマグネット作製のコスト面の検討を行った。

また、改良案の一つとして、マグネットのフランジを鉄で作製し、77.3 K, 66.5 K において測定を行った。

改良案は次の 5 つとなっている。マグネット両端の磁束を引き寄せるためにフランジを鉄にした case 1-1, さらに両端の磁束をコイルから引き離すためにフランジの内径部に突起をつけた case 1-2, 均一度やコスト面に優れたものとするためにコイルの巻き数を両端に向かって段階的に増やした case 2-1, case 2-1 の巻き数を present case より減らした case 2-2, 均一度を大きく上げるために case 2-1 にコイルを 2 層増やして 12 層コイルにした case 3 である。

present case と case 1-1 は実際に測定を行ったが、present case の  $B_{1\text{MAX}}$  は 0.429 T で、FEM による理論値は 0.386 T と、理論値が実測値の 90 % 程度と、大きく誤差が出た。しかし、case 1-1 では 77.3 K の測定で  $B_{1\text{MAX}}$  は 0.702 T、理論値は 0.691 T となり、理論値と実測値との誤差はほぼなかつ

た。また、65.0 K の測定においても、 $B_{1\text{MAX}}$  は 1.30 T、理論値は 1.27 T となりほぼ一致している。この誤差の違いの原因として、present case の臨界状態を決定している要因が、テープ線材に垂直にかかる磁界であるのに対し、case 1-1 ではフランジを鉄にしたことにより、テープ線材に平行にかかる磁界が臨界状態を決定するようになったことから、FEM 解析において、テープ線材に対し垂直成分の磁界の見積もりが実際のものとは異なることが考えられる。しかし、以降の改良においては鉄フランジを組み込んであるため、垂直成分の磁界を無視してマグネットの臨界状態を決定できるようになるため、case 1-1 のように大きな誤差がでることはなくなると考えられる。

case 1-1 以降の改良案の解析結果では、中心最大磁界の改良としてみると、case 2-1, case 3 の改良が優れている。また、コスト面においては case 2-2 がもっとも良くなっており、均一度は、case 3 が最も良く、10 層コイルだけでみれば case 2-2 の結果が優れている。

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。今回 case 1-1 の改良を施したマグネットでは 65.0 K において 1.30 T と、従来の 2 倍近い中心最大磁界を得ることができた。鉄フランジの導入により、マグネットの臨界状態を決定する要因がテープ線材に対し平行な磁界になった。この結果より、マグネットにおける異方性の問題がほぼ解決されたといえる。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、線材の最適化が進めば、77.3 K で 1 T を超えるマグネットの作製が可能になると考えられる。

## 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住友電気工業株式会社の方々に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) M. Ueyama, K. Ohkura, K. Hayashi, S. Kobayashi, K. Muranaka, T. Hikata, N. Saga, S. Hahakura and K. Sato, *Physica C* **263** (1996) 172
- 2) M. Ishizaka, Y. Tanaka and H. Maeda, *Physica C* **252** (1995) 339
- 3) 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
- 4) 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.
- 5) 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. Y. Yamada a, Y. Shiohara b
- 6) H. Fukushima, A. Ibi, H. Takahashi, R. Kuriki, S. Miyata, *Physica C* **463-465** (2007) 501-504