

Bi-2223 超伝導マグネットの設計と製作及び解析

04232024 小田部研究室 薦田 優

背景と目的 完全導電性、ジョセフソン効果などの特性を生かして超伝導線材は様々な分野での応用が期待されている。しかし、現在実用超伝導線材として用いられている Nb-Ti や Nb₃Sn は、臨界温度が低く、液体ヘリウム温度でのみしか使用できない。そこで、新たな超伝導線材として、液体窒素温度での応用が可能とされている高温超伝導体の Bi 系、RE 系線材の実用化が期待されており、特性の改良が進められている。特に、Bi-2223 線材は発見当初より機械的に長尺線材の製造が可能であり、現在では 1 km を超えるものも製造可能である。また、製造方法である PIT(Powder In Tube)法、その焼結プロセスでの加圧焼結(ConTrolled-Over Pressure)法の最適化が進み、線材の特性も大きく向上している。現在では、大容量の送電ケーブル、磁気浮上式列車用マグネットとして試験的に用いられるようになってきている。今回、住友電気工業と当研究室の合同で Bi-2223 線材を用いた超伝導マグネットの設計、製作を行った。その特性の評価を行い、報告することを目的とする

設計 マグネットに用いられた Bi-2223 線材の臨界電流は温度が 77.3 K の自己磁界中において 147 A であった。超伝導マグネットの形状は 10 層のダブルパンケーキコイルとなっており、全体の高さは 100 mm で内径 70 mm、外径 98 mm となり、線材の総巻き数は 1040 回となる。その概形は図 1 のようになる。諸元に基づいてマグネットのモデルを作成し、有限要素法を用いてマグネットに 1 A 通電したときの磁界の分布を求めたとき、マグネットの中心での磁界(A)は 9.56 mT、テープに印加されるテープ表面に垂直な磁界成分(C)は 6.19 mT であった。酸化物超伝導線材の使用限界は垂直磁界中での臨界電流によって決定されることから、ロードラインを作成してマグネットの動作特性を予測することができる。マグネットに用いた線材と同様の臨界電流値の線材の垂直磁界中の臨界電流特性とロードラインを図 2 に示す。ロードラインは 6.19 mT/A であり、77.3 K での(C)での磁界のテープ表面に垂直な成分は 0.220 T となり、そのとき臨界電流は 35.5 A に達すると予測できる。このとき中心磁界は 0.34 T となると予測できる。同様にして他の温度域を 45 K まで、臨界電流とマグネットの中心磁界を導出していき、その結果から液体窒素を過冷却状態にしたときの温度 65 K で動作させれば 0.7 T 近くの磁界を発生させられることが予測できる。

結果及び考察 製作されたマグネットに直流電流と交流電流及び直流と交流の重畳電流をそれぞれ通電した。77.3 K 下での直流電流通電では、10⁻⁴ V/m の電界基準で測定したマグネット全体の臨界電流は 45.2 A、中心磁界は 0.45 T であった。また 65 K 下での臨界電流は 78.4 A となった。また、マグネットのそれぞれのパンケーキコイルが銅製のコネクタで接続されているため、この接続部分が原因となって多少の抵抗が生じていた。交流電流と重畳電流の通電では、マグネットのコネクタ部分の抵抗が 93 μΩ、インダクタンスが 32 mH であり、300 Hz の交流電流ではほとんどがリアクタンスなので、図 3 のように電流に対して端子電圧は π/2 周期遅れたきれいな正弦波を描いていた。製作したマグネットが交流電流下での動作に対応しているということがいえる。

また、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。また、磁束密度の変化をみると、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 の範囲で、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。

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られるものになるものと考えられる。マグネットに用いられている Bi-2223 線材には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。

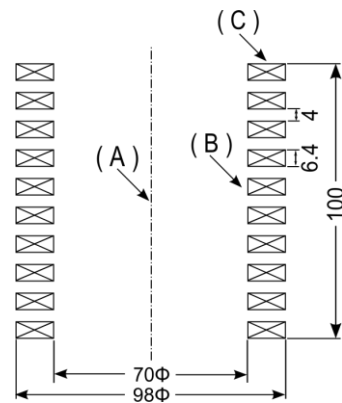


図 1 Bi-2223 超伝導マグネットの概形

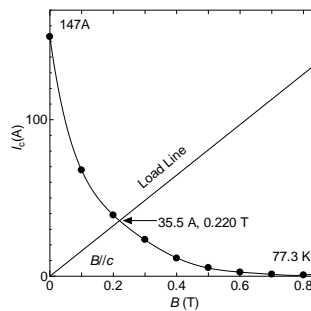


図 2 Bi-2223 線材の B-I 特性とロードライン(77.3 K)

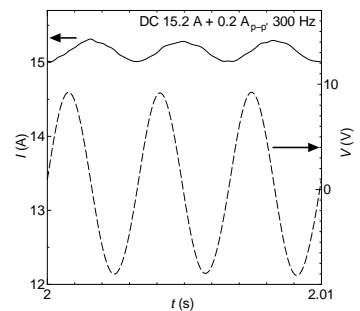


図 3 重畳電流通電時の V-I 特性

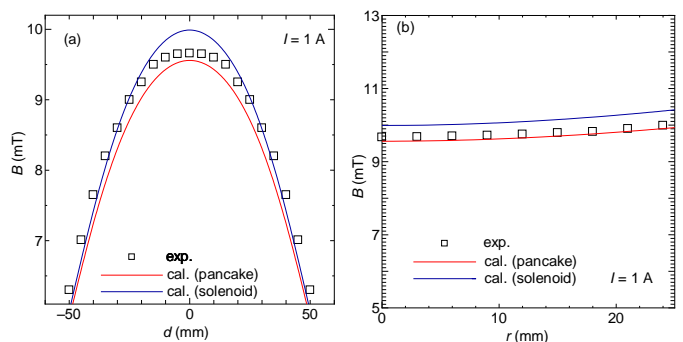


図 4 マグネットの磁束密度分布 (a)軸方向 (b)径方向

表 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 mm
線材の臨界電流(77.3K、自己磁場中)	147 A
線材の幅	4.4 mm
線材の厚さ	0.22 mm
使用した線材の長さ	267 m