

(109) 超電導工学

Bi-2223 超伝導テープ線材を用いた メインコイルの垂直磁場を低減する外側コイルの検討

Study of outer coil arrangement to reduce vertical magnetic field of main coil using Bi-2223 superconducting tape

吉田 大将 野田 優利奈 原田 直幸

Hiromasa Yoshida, Yurina Noda, and Naoyuki Harada

山口大学大学院創成科学研究科

1. はじめに

液体窒素温度で使用できる酸化物超伝導テープ線材が市販され、コイルへの応用が進められている。酸化物超伝導テープ線材の中でも Bi 系 2223 テープ線材は、線材の幅広面に対して平行方向に磁場を印加した場合と垂直方向に磁場を印加した場合では臨界電流特性が大きく異なる。この特性を有効に活用するために、コイルの巻線部分の電流密度やコイル配置を検討した結果、外側のコイルの電流密度を小さくする方法やメインコイルの外側に垂直磁場を低減するためのコイルを追加する方法により、コイル中でテープ線材に印加される垂直磁場を低減して、コイルに通電できる電流を増加することが可能であることがわかった。^[1]そこで本研究ではこれまでの検討結果をもとに、Bi 系 2223 超伝導テープ線材を用いるコイルにおいてメインコイルの垂直磁場を低減するために外側に配置するコイルの大きさを変えた場合や外側に多段のコイルを積層する場合について、垂直磁場の低減効果をコイルの最大平行磁場と最大垂直磁場の比に着目して検討を行った。

2. Bi 系 2223 超伝導テープ線材の特性

検討に用いた Bi-2223 超伝導線テープ線材^[2]の 77K における臨界電流の磁場依存性を図 1 に示す。テープ線材の幅広面に対して平行な磁場を平行磁場 $B_{\parallel}$ 、垂直な磁場を垂直磁場 $B_{\perp}$ とする。この図からわかるように、垂直磁場を印加した場合は、平行磁場を印加した場合に比べて、臨界電流は大幅に低下する。そこで、図 1 に示した特性から臨界電流に対する平行磁場 $B_{\parallel}$ と垂直磁場 $B_{\perp}$ を求め、その比 $B_{\parallel}/B_{\perp}$ を計算して図 2 に示す。25A から 160A の範囲で $B_{\parallel}/B_{\perp}$ は 9~11 程度となることがわかる。このように $B_{\parallel}/B_{\perp}$ が大きい線材を用いてコイルを製作すると巻線部分のテープ線材に印加される垂直磁場が最大となる部分で、線材の電気抵抗ゼロで電流を流すことができる臨界電流が制限されることになる。^[3]このような線材に対してはコイルの巻線部分における最大平行磁場と最大垂直磁場の比を、使用するテープ線材の $B_{\parallel}/B_{\perp}$ に近づけることにより、テープ線材の臨界電流特性を有効に活用することができると考えられる。^[1]

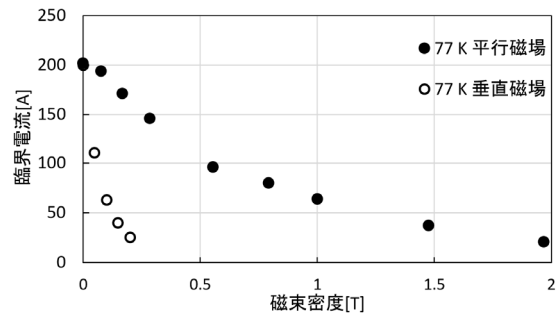


図 1 Bi-2223 テープ線材の臨界電流の磁場依存性

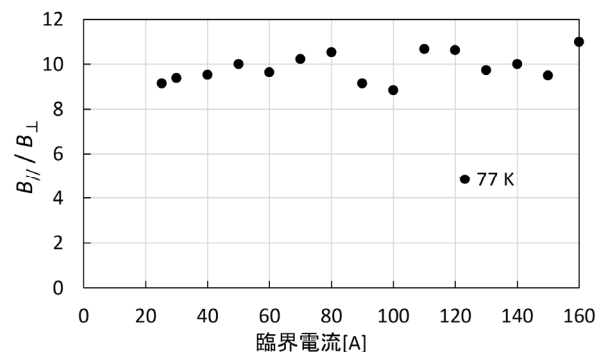


図 2 Bi-2223 テープ線材の各臨界電流に対する平行磁場と垂直磁場の比

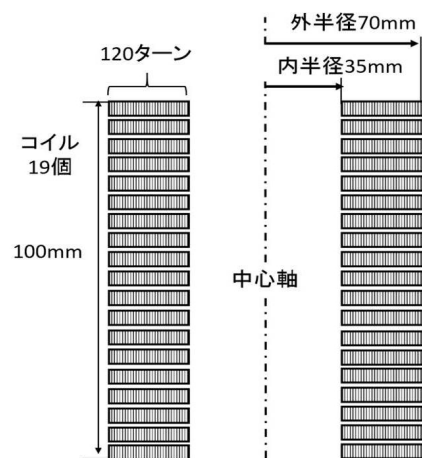


図 3 検討を行ったソレノイドコイルの模式図

3. 検討を行ったコイル

市販の Bi 系超伝導テープ線材を使用するソレノ

イドコイルを考え、その概略図を図3に示す。ここで、テープ線材は幅4.3mm、厚さ0.23mm、1つのパンケーキコイルは内半径を35mm、外半径を70mm、巻数を120ターンとし、各パンケーキコイル間に冷却チャンネルを設け、19個のパンケーキコイルを重ね、軸方向の長さを100mmとした。テープ線材に印加される磁場の方向から、ソレノイドコイルの中心軸に平行な方向の磁場が平行磁場、半径方向の磁場が垂直磁場となる。また、このソレノイドコイルをメインコイルと呼ぶ。

中心軸に垂直な面をコイル側面と表現すると、これまでの検討^[1]から、メインコイルの側面で最大となる垂直磁場を低減するには、側面側のパンケーキコイルの電流密度を小さくする方法やメインコイルの外側に隙間を設けてパンケーキコイルを置く方法により、巻線部分の垂直磁場を小さくすることができ $B_{\parallel}/B_{\perp}$ を大きくすることができた。そこで本研究では、これまでの検討結果^[1]をもとにして、さらに $B_{\parallel}/B_{\perp}$ を大きくする方法があるかどうか、以下の2つのコイルの形状や配置について検討した。

(1) 検討 I

図4に示すように、メインコイルと外側コイルとの間隔を d として、外側コイルにダブルパンケーキコイルを配置する場合を検討する。ダブルパンケーキコイルとはパンケーキコイルを2個を冷却チャンネルを設けて積層したものである。

(2) 検討 II

図5に示すように、外側コイルを多段にしてメインコイルに積層する場合について検討する。なお、コイルの断面形状からこのコイルをクロワッサン型コイル、メインコイルの外側のコイルを内側から順に第1コイル、第2コイル、第3コイルと呼ぶ。

4.1 メインコイルよりも巻線部分が小さい外側コイルを配置する場合

3節の検討Iに示したように、メインコイルの両側に外側コイルとして、ダブルパンケーキコイルを1つずつ配置する場合について検討した。ここで、メインコイルに通電する電流は20Aとした。

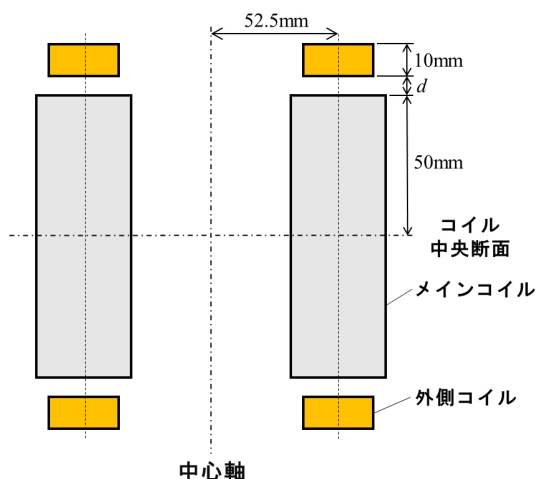


図4 検討 I の配置のコイル断面の模式図

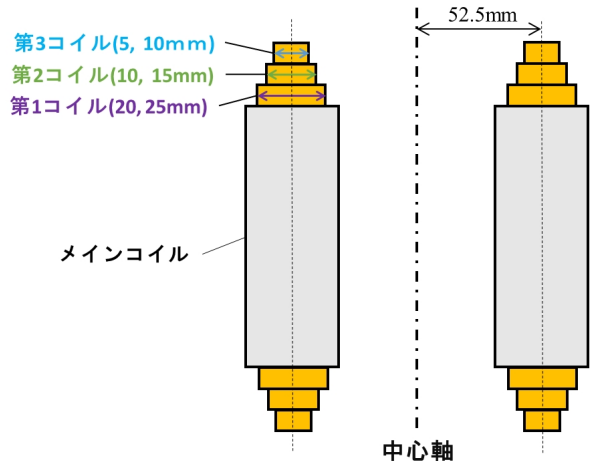


図5 検討 II の配置のコイル断面の模式図

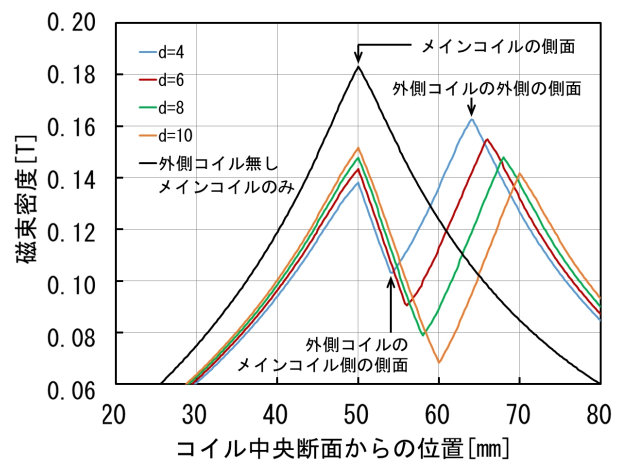


図6 外側コイルが内半径40mm、外半径65mmの場合における垂直磁場の分布

外側に配置するダブルパンケーキコイルは、メインコイルの内半径35mmよりも大きく、メインコイルの外半径70mmよりも小さくし、次の2通りの外側コイルを考えた。1つは内半径40mm、外半径65mmの場合、もう1つは内半径45mm、外半径60mmの場合である。どちらの場合も外側コイルの中心軸方向の高さは10mmとし、外側コイルの電流密度はメインコイルの電流密度と同じ値とした。この外側コイルとメインコイルとの間隔 d を変化させた場合について磁場解析を行った。外側コイルが内半径40mm、外半径65mmとした場合について、外側コイルとメインコイルの間隔 d を4mmから10mmまで2mmずつ増加させ、それぞれの垂直磁場の分布を図6に示す。この図の横軸はコイルの中心軸から52.5mm離れた巻線部分でコイル中央断面からの位置を示している。図中の黒い実線は外側コイルが無くメインコイルのみの場合の分布を示す。この場合、メインコイルの側面の位置(50mm)で垂直磁場が最大となる。一方、外側コイルを配置した場合は、メインコイルの側面の位置(50mm)と外側コイルの外側の側面の位置に垂直磁場のピークがそれぞれ現れている。このような垂直磁場の変化は、 d を大きくしてメインコイルと外側コイルが離れるとメインコイル側面の

垂直磁場を十分低減できず、逆に d を小さくしてメインコイルと外側コイルが近くなると外側コイルの側面の垂直磁場がメインコイルの影響で大きくなることによるものである。また、外側コイルのメインコイル側の側面では垂直磁場が極小となる。次に、 $d = 4 \sim 10\text{mm}$ の4つの場合を比較すると、 $d = 8\text{mm}$ の場合にメインコイルの側面の位置(50mm)における垂直磁場の大きさと外側コイルの外側の側面(68mm)における垂直磁場がほぼ同じ大きさとなり、外側コイルが無いメインコイルのみの場合に比べて垂直磁場を約 20%小さくできることがわかった。

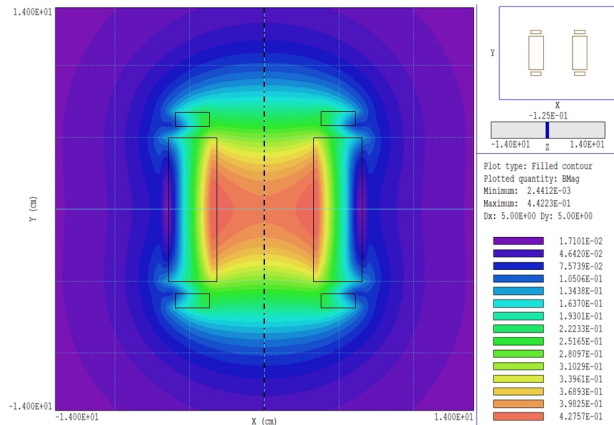


図7 外側コイルが内半径 40mm, 外半径 65mm, $d=8\text{mm}$ の場合における磁束密度の分布

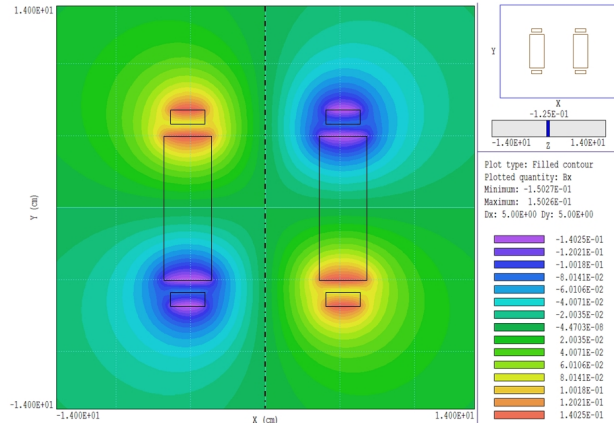


図8 外側コイルが内半径 40mm, 外半径 65mm, $d=8\text{mm}$ の場合における垂直磁場の分布

次に、外側コイルが内半径 40mm, 外半径 65mm, $d=8\text{mm}$ の場合におけるコイル断面の磁束密度の大きさの分布と垂直磁場の分布を図7と図8にそれぞれ示す。図中の黒い実線はコイルの巻線部分を表わしている。図7に示したコイルの内側の磁束密度分布は外側コイルが無い場合に比べて均一度が低下することはなく、図8に示す垂直磁場の分布からメインコイルの側面と外側コイルの側面の両方の位置において垂直磁場の最大値はほぼ同じ値になっていることがわかった。

表1に外側コイルが内半径 40mm, 外半径 65mm の場合の最大垂直磁場と最大平行磁場の比 $B_{\parallel}/B_{\perp}$

をまとめた結果を示す。 $d=8\text{mm}$ のときに $B_{\parallel}/B_{\perp}$ は 3.0 となった。また、表1には示していないが、内半径 45mm, 外半径 60mm の場合についても同様の計算を行い、 $d=4\text{mm}$ のときに $B_{\parallel}/B_{\perp}$ は 2.9 となった。

表1 外側コイルが内半径 40mm, 外半径 65mm の場合における最大垂直磁場と最大平行磁場の比

d (mm)	最大垂直磁場(T)	最大平行磁場(T)	$B_{\parallel}/B_{\perp}$
外側コイル無し	0.183	0.428	2.3
4	0.163	0.444	2.7
6	0.155	0.443	2.9
8	0.148	0.442	3.0
10	0.152	0.442	2.9

4.2 メインコイルの外側に多段のコイルを配置する場合

検討Ⅱとして、外側コイルを多段にしてメインコイルと積層する場合についての検討した結果をまとめる。メインコイルに通電する電流を 20A とし、外側の多段コイルの電流密度をメインコイルの電流密度と同じ値に設定した。検討の中では外側コイルの段数を1段, 2段, 3段として場合についてそれぞれ計算を行ったが、4.2節では3段の場合についての結果を示す。メインコイルに積層する第1コイル, 第2コイル, 第3コイルは、図5に示すように各コイルの内半径と外半径の平均値を 52.5mm になるようにして、内半径と外半径の差を図5中に示す値で設定した。ただし、外側のコイルほど外半径と内半径の差が小さくなるようにし、各コイルの中心軸方向の高さを 10mm とした。

3段クロワッサン型コイルにおける4通りの組み合わせについて、計算結果を図9～図12に示す。図9にメインコイル上端, 図10に第1コイル上端, 図11に第2コイル上端, 図12に第3コイル上端における垂直磁場の分布を示す。図9～図12において図中の3つの長さは、第1コイル, 第2コイル, 第3コイルのそれぞれの内半径と外半径の差を表わしている。図9の横軸はメインコイルの上端の巻線部分の最も内側のターンの位置(35mm)から巻線部分の最も外側のターンの位置(70mm)に対応している。表2はこれらの図に示した各コイルでの垂直磁場の最大値を比較してまとめたものである。上段にはメインコイルのみの場合も示している。表2から、4通りの3段クロワッサン型コイルの構成において、メインコイルを含むすべてのコイルでの最大垂直磁場を低く抑えられるのは、20mm, 15mm, 10mm の組み合わせであることがわかる。この組み合わせにおいて最大垂直磁場と最大平行磁場の比 $B_{\parallel}/B_{\perp}$ は 3.2 であった。また、20mm, 15mm, 5mm の組み合わせにおいても $B_{\parallel}/B_{\perp}$ は同じ値であった。これらの結果から、第1コイルを 20mm, 第2コイルを 15mm とした場合には、第3コイルを 5～10mm の間の値をとることで $B_{\parallel}/B_{\perp}$ を若干大きくできると考えられ

る. 20mm, 15mm, 10mm の組み合わせにおける垂直磁場の分布を図 13 に示す. 第 3 コイルにおいて最も垂直磁場が大きくなっているが, 積層したコイルやメインコイルの側面に垂直磁場の大きい部分が広がっていることがわかる.

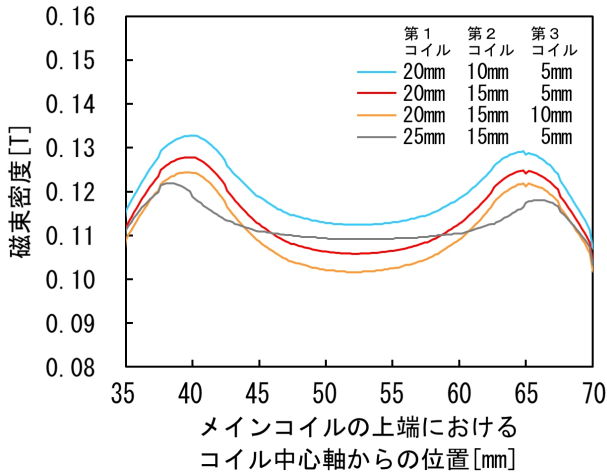


図 9 3 段クロワッサン型コイルのメインコイル上端における垂直磁場の分布

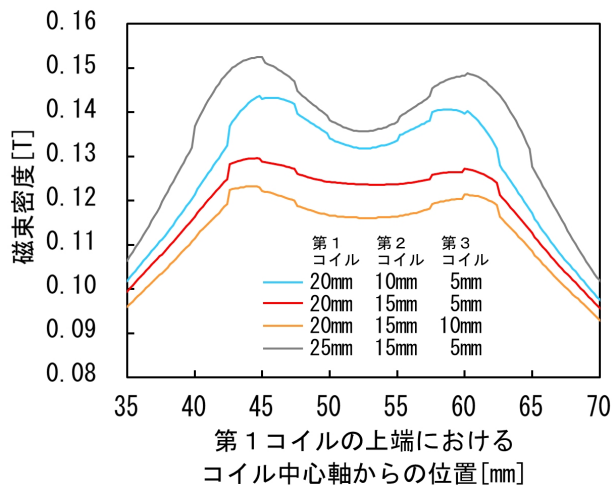


図 10 3 段クロワッサン型コイルの第 1 コイル上端における垂直磁場の分布

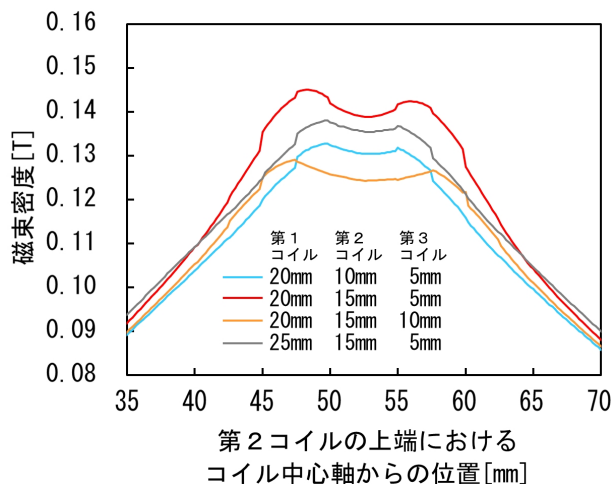


図 11 3 段クロワッサン型コイルの第 2 コイル上端における垂直磁場の分布

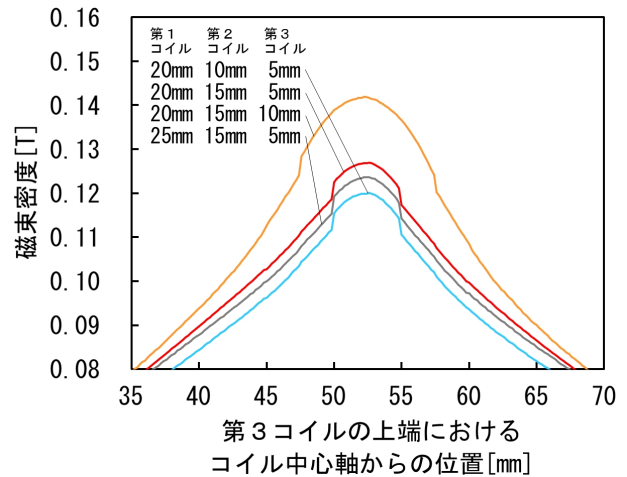


図 12 3 段クロワッサン型コイルの第 3 コイル上端における垂直磁場の分布

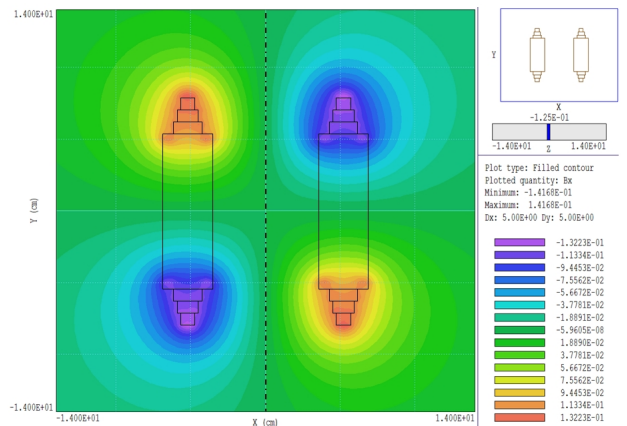


図 13 3 段クロワッサン型コイルの断面における垂直磁場の分布

表 2 3 段クロワッサン型コイルにおける最大垂直磁場, 最大平行磁場, $B_{//}/B_{\perp}$ のまとめ

コイルの巻線の幅 (mm)			最大垂直磁場(T)				最大平行磁場(T)	$B_{//}/B_{\perp}$
第 1 コイル	第 2 コイル	第 3 コイル	メインコイル	第 1 コイル	第 2 コイル	第 3 コイル	メインコイル	
20	10	5	0.183	0.143	0.132	0.119	0.428	2.3
20	15	5	0.127	0.129	0.144	0.126	0.454	3.2
20	15	10	0.124	0.123	0.128	0.141	0.455	3.2
25	10	5	0.121	0.151	0.137	0.123	0.454	3.0

5. 検討

今回検討を行った結果をもとに各コイルの構成において使用する線材の長さ及び最大垂直磁場と最大平行磁場の比 $B_{//}/B_{\perp}$ を表 3 に示す. 使用する線材の長さはメインコイルのみの場合^[1]を基準として比較した. 4.1 節で検討を行った外側コイルを用いる場合では, 外側コイルにメインコイルと同じパンケーキコイルを使用する場合^[1]に比べて $B_{//}/B_{\perp}$ の値を変えずに, 使用する線材の長さを減らすことができることがわかった. また, メインコイルのみの場合^[1]と比較して, 2 段クロワッサン型コイルは使用する線材の長さが 17%増加し, $B_{//}/B_{\perp}$ は 2.3 から 0.6 増加して 2.9 となり, 3 段クロワッサン型コイルでは使用する線材の長さが 26%増加し, $B_{//}/B_{\perp}$ は 2.3 から

0.9 増加して 3.2 となった。使用する線材の長さにおいて、クロワッサン型コイルは 4.1 節で検討を行った外側コイルほど効率は良くないが、線材を使用する長さに応じて $B_{//}/B_{\perp}$ の改善が可能であることがわかった。

表 3 検討を行ったコイルの構成における最大垂直磁場と最大平行磁場の比 $B_{//}/B_{\perp}$ の比較

コイルの構成	使用する線材の長さの比	$B_{//}/B_{\perp}$
メインコイルのみ ^[1]	1	2.3
外側コイル ^[1] (巻線部分35mm, $d=10\text{mm}$)	1.21	3.0
外側コイル (巻線部分25mm, $d=8\text{mm}$)	1.14	3.0
二段クロワッサン型コイル (第1コイルの巻線部分20mm, 第2コイルの巻線部分10mm)	1.17	2.9
三段クロワッサン型コイル (第1コイルの巻線部分20mm, 第2コイルの巻線部分15mm, 第3コイルの巻線部分10mm)	1.26	3.2

6. まとめ

印加磁場の方向により臨界電流の磁場依存性が大きく異なる Bi-2223 テープ線材を用いてソレノイドコイルを作製する場合、ソレノイドコイルの側面で垂直磁場が最大となることから、この場所においてソレノイドコイルに電気抵抗無しに流すことができる電流が制限されると考えられる。本研究では、電気抵抗無しに流すことができる電流を増加させるため、コイルにおける最大平行磁場と最大垂直磁場の比 $B_{//}/B_{\perp}$ に着目して、コイル側面での垂直磁場を低減する方法について検討を行った。メインコイルの外側にコイルを配置する場合やメインコイルの外側にコイルを密着させて配置するクロワッサン型コイルの場合について磁場計算を行い、使用する線材の長さで最大平行磁場と最大垂直磁場の比 $B_{//}/B_{\perp}$ の改善についてまとめた。

参考文献

- [1] 野田優利奈, 原田直幸, “Bi-2223 テープ線材を用いた超伝導ソレノイドコイルの設計検討(III)”, 第 20 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム論文, pp.35-38, 2018.
- [2] 佐藤謙一, “高温超電導技術: 過去・現在・未来”, SEI テクニカルレビュー, 第 177 号, pp.1-7, 2010
- [3] 森山大慶, 原田直幸, “酸化物超伝導テープ線材を用いるコイルの設計検討”, 平成 28 年度(第 67 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, R16-02-03, 2016.