超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2012 年 2 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

【隔月連載記事】

# 超電導マグネット開発のこれまでとこれから（その 1）

独立行政法人 理化学研究所
生命分子システム基盤研究領域 NMR 装置技術研究チーム
チームリーダー　前田秀明

本連載では、はじめに超電導マグネット技術の歩みを簡単に紹介します。次に実用的な超電導マグネットの開発について述べ、最後に、高温超電導マグネットの技術課題と今後の方向について述べます。

## 1. Kammerlingh Onnes の試み

1911 年に Kammerlingh Onnes は超電導を発見した直後に、鉛のワイヤで小さなコイルを作り、液体ヘリウム中で通電しました。これが世界初の超電導マグネットです（図 1）。結果はさんざんで、少しの電流を流しただけでコイルが常伝導に転移してしまい、数百ガウスしか磁場を発生できませんでした。鉛の臨界磁場を越えることができなかったわけです。これにより、彼は超電導線を用いてマグネットを作ることは不可能であると考えました。彼が製作したマグネットは今でもオランダの博物館に展示してあります。このころ、彼は「30 cm 径の超電導マグネットで 10 テスラ（10 T）の磁場を得る」という夢を語っています。夢の実現には、半世紀の歳月が必要でした。

図 1 Kammerlingh Onnes の超電導コイル [1)]

## 2. 超電導マグネットの黎明期

Kammerlingh Onnes による挫折の後で、長いブランクを経て、1950 年代にニオブ（Nb）ワイヤによる超電導マグネットが試作されました。Nb は第 2 種超電導体で、0.4 T の上部臨界磁場を持ちます。当時は第 2 種超電導体という認識はありませんでしたが、高磁場まで耐える線材として注目されていました。1954 年にイリノイ大学の Yntema らが Nb 線を鉄芯に巻いた超電導コイルで 0.71 T の発生に成功しました [2)]。また、1960 年には MIT の Autler らが空芯で 0.43 T、鉄芯で 1.4 T の発生に成功しています [3)]。Autler のマグネットを図 2 に示します。これらは大変大きな技術の飛躍であり、新しい時代の先駆けとなりました。


© ISTEC 2012 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

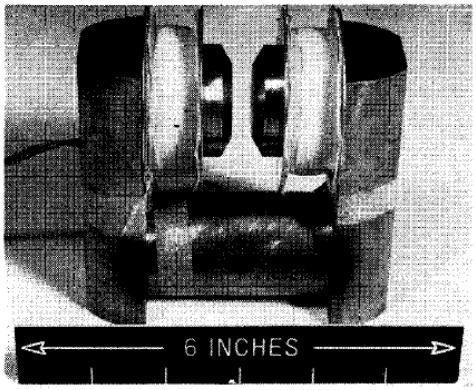


図 2 Autler による Nb 線を巻いた 1.4 T 鉄心マグネット [3)]

1960 年代は超電導マグネットにとって画期的な時代でした。1961 年に Bell 研の Kunzler ら [4)] が、Nb のチューブに $Nb_3Sn$ または Nb と Sn の粉末を入れて加工して $Nb_3Sn$ の線材化に成功しました。同じころ、Westinghouse の Hulm ら [5)] が合金系の NbZr を用いた超電導線材を開発しました。金属間化合物系の $Nb_3Sn$ 線材と合金系の NbTi 線材は、今に至る二つの実用超電導線材の流れを形成しています。両者がほぼ同じ時期に発明されたのは大変興味深いことです。1961 年に MIT で開催された高磁場会議は、さながらマグネット磁場の競技会になりました。Kunzler らは $Nb_3Sn$ マグネットで 6.8 T、Hulm らは NbZr マグネットで 6 T の中心磁場を報告しています。図 3 に、Kunzler らによる世界初の超電導マグネットの特許を示します [6)]。

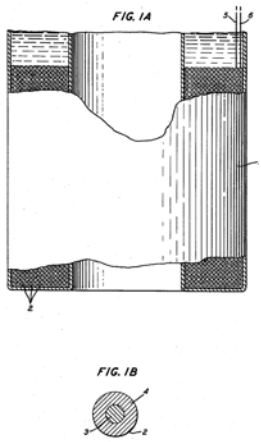


図 3　世界初の超電導マグネットの特許、上はマグネット、下は $Nb_3Sn$ 線材 [6)]

粉末法による $Nb_3Sn$ 線材は、その後、拡散テープ線材として独自の発展を遂げました。これは Nb と Sn を直接反応させてテープ表面に $Nb_3Sn$ 層を生成するもので、IGC 社から 10 テスラ以上の高磁場マグネットが製品化されました。但し、フラックスジャンプによるクエンチが発生しやすいこと、遮蔽電流による磁場ヒステリシスが大きいことなどの欠点がありました。後者は、テープ線材に特有の現象であり、現在の高温超電導マグネットでも問題になっています。これらの欠点のために、拡散法の $Nb_3Sn$ テープマグネットは現在では使用されていません。1970 年代に、金属材料技術研究所の太刀川ら [7)] の研究などにより Nb と Sn の間に銅を介在させることで、低温で効率よく線材を製造できることが明らかになりました（ブロンズ法）。現在では、この製法の $Nb_3Sn$ 線材がマグネットに広く使用されています。


© ISTEC 2012 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

合金系線材では、加工性に優れ臨界磁場が高い NbTi 線が利用されるようになりました。1965 年には Hulm らが、NbZr と NbTi 線材を用いて 10 T を発生したことを報告しています。

**3. 超電導マグネット基礎技術の構築**

1960 年代の技術革新により超電導線材が製造され、容易に入手できるようになると共に、多くの超電導マグネットが製作されました。それに伴って、超電導マグネットに固有の問題が明らかになってきました。中でも、線材の臨界電流よりずっと低い電流でマグネットが突然常伝導に転移するクエンチが開発者を悩ませました。クエンチが起こると、電源が落ち、液体ヘリウムが蒸発するばかりか、コイルが焼損することもありました。

第 2 種超電導体に外部から磁場を加えると磁場を遮蔽する超電導電流が流れます。外部磁場の増加と共に磁場は超電導表面から徐々に内部に侵入しますが、瞬間的に外部磁場が線材内部に侵入することがあり、これをフラックスジャンプといいます。このころクエンチは主にフラックスジャンプにより生じることが明らかになってきました。

1965 年に米国 AVCO-Everett 研究所の Stekly らは、超電導線材に銅材をたくさん付加し、液体ヘリウムによる冷却を十分にとれば、たとえ線材の一部が常伝導になっても再び超電導状態に復帰できることを示しました [8)]。これを完全安定化法といいます。クエンチさせたくない大きなマグネットでは今でも広く使われています。

完全安定化を採用すればクエンチは防げますが、マグネットの電流密度は低くなります。そこで、クエンチの原因であるフラックスジャンプを防ぐ手法が研究されました。1970 年に英国 Rutherford 研究所の Wilson らは、安定化銅マトリクスの中に数十ミクロンの細い超電導フィラメントを多数埋め込んで線材を作り、よじり加工を施せば、フラックスジャンプを抑制できることを示しました [9)]。これを複合多芯線と呼びます（図 4）。この手法は、今でも、超電導線材の基本的な製造方法になっています。

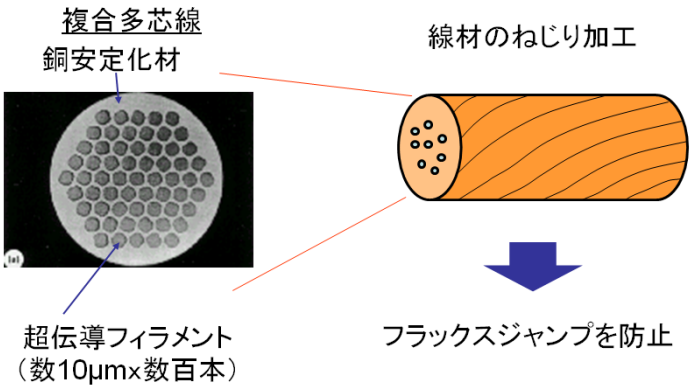


図 4　複合多芯線

線材の複合多芯化によりフラックスジャンプは防止できるようになりましたが、クエンチは依然として残っていました。このクエンチは、電磁力で超電導線材がわずか（数ミクロン）に動き、摩擦熱で温度が上昇して生じることが分かってきました。巻き線をエポキシ樹脂で含浸すると、電磁力による線材の動きを抑える上で有効なのですが、この場合も電磁力による剥離でクエンチが生じます。この種の発熱を機械的擾乱と呼びます。1980 年代に、岩佐ら [10)]により、機械的擾乱によるクエンチの研究がなされましたが、今に至るまで低温超電導の課題として残っています。


© ISTEC 2012 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

4. まとめ

以上の様にして構築された超電導マグネット技術が基礎になり、たくさんの超電導プロジェクトが立ち上がりました。次回は、この種の実用超電導マグネットについて 2 回に分けて解説します。

参考文献:

1. http://www.physicscentral.com/explore/pictures/supercoil.cfm
2. G. B. Yntema, Superconducting winding for electromagnets **98**, Physical Review, 1197 (1955).
3. S. H. Autler, Superconducting electromagnet, Rev. Sci. Inst. **31**, p369 (1960).
4. J. E. Kunzler, Superconductivity in High Magnetic Fields **33**, p501 (1961).
5. H. Riemersma et al., A variable composition, high field solenoid, J. Appl. Phys. **33**, 3499 (1962)
6. USP 3,124,455
7. 太刀川恭治、金属系超伝導線材[1]研究開発の歩み、低温工学、**44**, p456(2009).
8. Z. J. J. Stekly and J. L. Zar, IEEE Trans. **NS12**, 367 (1965).
9. Superconducting Applications Group, Experimental and theoretical studies of superconducting composites, J. Phys. D: Appl. Phys. **3**, 1517 (1970).
10. H. Maeda, O. Tsukamoto and Y. Iwasa, The mechanism of frictional motion and its effects at 4.2K in superconducting magnet, Cryogenics **22**, 287 (1982) .

超電導 Web21 トップページ


© ISTEC 2012 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2012 年 4 月 2 日発行
公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-5717

【隔月連載記事】

# 超電導マグネット開発のこれまでとこれから（その 2）

独立行政法人 理化学研究所
生命分子システム基盤研究領域 NMR 装置技術研究チーム
チームリーダー　前田秀明

超電導マグネットを使用する機器には、MRI、NMR、単結晶引き上げ装置など超電導マグネットをスタンドアローンで利用する場合と、核融合炉、加速器など巨大なシステムの一環として利用する場合とに分けることができます。前者は安価で使い易くコンパクトであることが要求されますが、後者では高い信頼性が重視されます。今回は、前者のタイプの超電導マグネットの開発の歴史と、これからの方向について述べることにします。

## 1. MRI

MRI は核磁気共鳴（NMR）を利用して人体の断層を得る装置で、最も広く利用されている超電導機器です。1973 年、Lauterbur（ニューヨーク州立大学）が発明しました [1)]。図 1 に世界初の MRI 像を示します。彼は 2003 年にノーベル医学生理学賞を受賞しています。

MRI は、身体の中の水や脂肪による水素原子核（$^{1}$H）の密度分布を求めます。均一な磁場にわずかな傾斜磁場を重ねることで、NMR 周波数に位置情報を組みこみます。傾斜磁場の条件を変えながら多数の NMR 信号をとり、多次元フーリエ変換して断層像を求めます。頭部や血管の描出に優れ、脳の活動部位の描出も可能です。常電導と超電導を合わせて 6,000 台が国内で稼働しています。

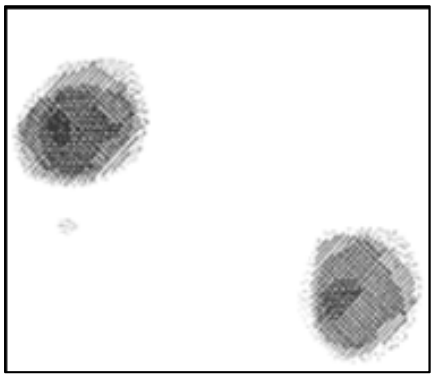

図 1　Lauterbur（ニューヨーク州立大学）による最初の NMR イメージング [1)]。水の入った二つの円筒です。（Nature 誌による。）

MRI の画像の SN 比は磁場強度に比例するので、高磁場ほど品質が良くなります。80 年代に超電導 MRI が利用され始めました。当初は 0.5 T 機が主流でしたが、90 年代には 1.5 T 機、2000 年以降は 3 T 機が急増しています。3T-MRI を図 2 に示します [2)]。3 T 機は国内に 300 台設置されています。また、7 T 機が世界で数十台設置され、イメージングの開発に利用されています。パリ郊外の高磁場 MRI 研究センター（NeuroSpin）では、11.74 T の全身用 MRI の開発を進めており、これが MRI 開発の最前線です。

図 2　3T-MRI（東芝）[2)]

初期（1982 年）の 1.5 T MRI マグネットと、1998 年のそれを比較して表 1 に示しました [3)]。MRI マグネットでは、「イメージングの要求に答える」ために、磁場の空間的な均一度と時間的な安定度が必要です。主コイルと磁気シールドコイルが作る磁場分布を級数展開した場合の低次項が最小になるコイル配置を求め、残存する磁場不均一成分を補正コイルで打ち消します。当初の装置の磁場均一性は 40 ppm でしたが、1998 年には 5 ppm まで向上しています。磁場の時間的な安定性を得


© ISTEC 2012 All rights reserved.

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-5717

るために、マグネットは永久電流運転（0.1 ppm/時）が必要で、NbTi 線の超電導接続技術が必須です。

表 1　1982 年と 1998 年における MRI 磁石の仕様の比較 [3)]

| | 1982 年 | 1998 年 |
|---|---|---|
| 内径 | 1.0 m | 0.9 m |
| 全長 | 2.3 m | 1.6 m |
| 磁場均一度（直径 50 cm） | 40 ppm | 5 ppm |
| 磁場安定性 | 0.1 ppm/h | 0.1 ppm/h |
| 漏れ磁場 | 12mx10m | 4.5mx3m |
| ヘリウム蒸発量 | 500 cc/h | 50 cc/h |

MRI を「専門家でない人が扱いやすいシステム」とするためには、磁気シールドコイルで漏れ磁場を低減します（表 1）。これにより、病院への設置条件が画期的に向上しました。また、20 K や 4 K 小型冷凍機を利用して、液体ヘリウムの蒸発を抑えています。50 cc/h なら、1 年以上の注液間隔で運転できます。

「患者フレンドリー」という観点からは、マグネットを短くする努力がなされました。患者によっては、長いボアに恐怖感を覚えます。そのため、2.3 m から 1.6 m に短縮され、最近では 1.5 m 以下になっています。

「超電導マグネット技術」から見ると、MRI マグネットには、①高い電流密度、②クエンチしないこと、③クエンチしてもコイルが損傷しないこと、などの性能が要求されます [4)]。フォルマール被覆 NbTi 線の密巻きコイルにより電流密度を向上させます（①）。ポリマーで含浸してクエンチを防ぎます（②）。また、コイル間ジョイント部に高電圧が生じアークが発生しない様に、コイルには個別の保護抵抗を取り付けます（③）。

開発品レベルでは、$MgB_2$ 線と小型冷凍機を用いて液体ヘリウム不要とした MRI や、Bi 系高温超伝導（HTS）を用いた頭部イメージング用の 3 TMRI などの開発が進んでいます。いずれも液体ヘリウムを使用しないことが特徴で、今後の技術が進む方向を示唆しています。但し、HTS コイルでは超電導接続技術が開発されていないので、安定な永久電流モード運転ができないことが課題です。フランスで開発中の 11.75 TMRI は巨大すぎる印象があります。ReBCO を用いればコンパクトな 11.75 TMRI も可能で、この面からの開発も課題です。

## 2. NMR

NMR は、有機材料、タンパク質、無機材料などの構造情報の取得に利用されており、国内で約 2,000 台が稼働しています。NMR スペクトルの SN 比は磁場の 1.5 乗に比例するので、良質なスペクトルを得るには高磁場が必須です。図 3 に NMR マグネット磁場の推移を示します。NMR マグネットでは、磁場の強さを対応する水素核（$^1H$）の NMR 周波数で表します。例えば、2.35 T は 100 MHz に対応します。

80 年代に、筆者は高磁場マグネットの開発に

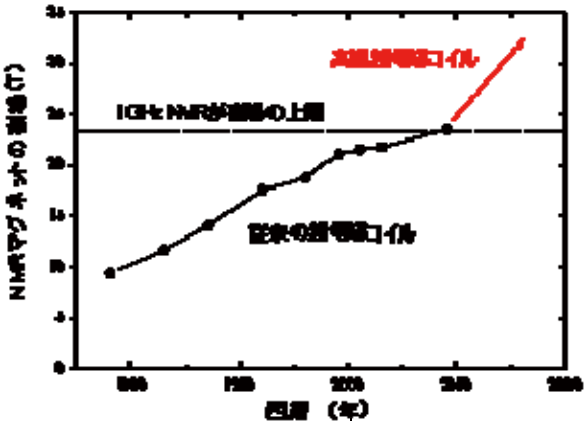

図 3 NMR マグネット磁場の推移


© ISTEC 2012 All rights reserved.

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-5717

従事していました。すでに $Nb_3Sn$ 複合多芯線は実用化されており、$Nb_3Sn$ マグネットも製作されていましたが、12 T 程度が磁場の限界でした。高磁場能力では、$Nb_3Sn$ 拡散テープのコイルに及ばなかったことを思い出します。但し、$Nb_3Sn$ 拡散テープでは磁化による磁場が大きく、磁場が時間変動するので NMR への適用は難しい線材でした。この状況を打ち破ったのは、太刀川らにより開発された Ti 添加 $Nb_3Sn$ 線材です(1982 年)[5]。これにより $B_{c2}$ が 25 T 以上（@4.2 K）にまで向上しました。超流動ヘリウム冷却の導入も、大きなインパクトがありました。東北大学と東芝は $Nb_3Sn$/NbTi コイルを超流動ヘリウムで冷却し高磁場の発生に成功しました[6]。これらの技術と $Nb_3Sn$ の補強線材や低銅比の $Nb_3Sn$ 線材の開発により、20 T を超える磁場が実現可能になりました。現在、低温超電導（LTS）マグネットでは 23.5 T が実現しています。今後期待されるイノベーションの核は HTS コイルです。最近、ReBCO コイルを特性劣化なしで製作する技術が進み、LTS コイルとの組み合わせで 24 T[7]、水冷コイルとの組み合わせで 35.4 T[8]が可能になりました。

ここで NMR マグネットに話を戻しましょう。NMR マグネットの磁場の推移は、高磁場マグネットの開発と軌を一にしています。当初は NbTi マグネットが使用され、400 MHz (9.4 T) が上限でした。Ti 添加 $Nb_3Sn$ コイルにより、これが 700 MHz (16.5T) まで増加しました。更に超流動ヘリウム冷却により 800 MHz (18.8 T) 以上の磁場が可能になりました。図 4 に理化学研究所の 800 MHz (18.8 T) NMR を示します。NMR の最高磁場は 1 GHz (23.5 T) で、フランスにあります。わが国でも、920 MHz (21.6 T) と 930 MHz (21.9 T) の NMR を開発しています[9]。

NMR マグネットでも、「NMR スペクトルの要求」から磁場の均一性（1ppb)や、時間的な安定性（0.1ppb）が必要です。仕様は MRI よりはるかに厳しいですが、これらを満たさなければ、良い品質のスペクトルを得ることができません。均一磁場を作る主コイルと磁気シールドコイルの形状を決め、数十組の補正コイルで不均一磁場成分を補正します。永久電流の減衰率を 10ppb／時以下にするためには、$Nb_3Sn$ の超伝導接続技術が必要です。これが高磁場 NMR の最も重要な技術ですが、メーカのノウハウとして公開されていないものです。NMR では、サンプルに含まれる重水素核の NMR 信号から磁場を求め、磁場を一定値に保つシステム（磁場ロックシステム）を用いて、サンプル周辺の磁場の安定性を更に数桁向上させます。マグネットが数 Hz から数 100Hz で機械振動するとスペクトルにサイドバンドが生じ、スペクトルの品質が劣化します。これを防ぐために、マグネットを除振台にのせ地面からの振動をカットします。図 4 でマグネットが脚で支えられていますが、これが除振台です。

図 4 理化学研究所の 800 MHz NMR

「専門家でない人が扱いやすいシステム」にするためには、NMR でも漏れ磁場の低減が重要です。例えば、最近の 800 MHz (18.8T) NMR 機では、5 ガウスラインは、横方向約 1.5 m、縦方向約 2.5 m と狭いので、装置の有効的な占有面積を低減できます。NMR はスペクトルの分解能が高く MRI に比べてはるかに振動を嫌うので、冷却に小型冷凍機は使用できません。低熱侵入クライオスタットによりヘリウムの蒸発を抑制するクラッシックな手法でヘリウム蒸発量を抑制しています。ヘリウム蒸発量は 50 cc/時なので、数か月に一度の再注液で運転できます。800 MHz 以上の超高磁場マグネットでは超流動ヘリウム冷却用に熱交換器を減圧するので、ヘリウム蒸発量は 200 cc/時に増加します。


© ISTEC 2012 All rights reserved.

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-5717

「超電導マグネット技術」の観点からは MRI と同様に、①高い電流密度、②クエンチしないこと、③クエンチしてもコイルが損傷しないことなどが重要です。NbTi コイルのクエンチ時に $Nb_3Sn$ コイルに電流が誘導され、電磁応力で線材が損傷を受けないように、クエンチ時に $Nb_3Sn$ コイルを強制的にクエンチさせる場合もあります。

現在までの NMR 磁場の限界は 1 GHz (23.5 T) です。これより強い磁場の NMR マグネットを作るには HTS コイルが必要です [10)]。HTS による超 1GHzNMR の開発は世界で競争になっています。わが国でも、筆者も参加して JST のプロジェクトで Bi 系 HTS コイルを用いた開発が進められています。HTS コイルでは永久電流モード運転は不可能であり、外部電源通電運転になります。この場合、磁場の時間的な安定度を得る技術が重要です。我々のプロジェクトでは既に技術を確立しており、超 1GHzNMR の実現が目前に来ています。今後、ReBCO コイルによる超高磁場化と超コンパクト化を組み合わせることで、コンパクトな 1.2 GHz (28.2 T) クラスの NMR が実現する日もそう遠くないものと考えています。

## 3. シリコン単結晶引き上げ装置

LSI の基板に用いるシリコン単結晶は石英のるつぼにシリコン多結晶を溶かし、種結晶をつけて静かに回転しながら引き揚げて製造します。単結晶の直径が大きいほど溶融液量が増え、対流が強くなります。その結果、液温が不安定になると共に、るつぼからの酸素の溶け込み量が増加し問題が生じます。超伝導磁石の磁場を加えることで対流を抑制でき品質を制御できます。これを MCZ 法と呼びますが、300 mm 径単結晶の様に大きな直径になるほど効果があると言われています。スプリットコイルで溶融液に数千ガウスの横向き磁場を加え、シリコンの対流を防ぎます [11)]。現在のシリコン単結晶の生産量からみて、かなりの台数が導入されているものと予想されますが、詳細は公表されていません。この場合にも、小型冷凍機を用いたヘリウム蒸発量の抑制や、漏れ磁場の低減など「専門家でない人が扱いやすいシステム」にする努力がなされています。

開発品レベルでは、Bi2223 線材を用いて冷凍機で冷却する単結晶引き上げ装置用の HTS マグネットの開発が実施されています。

## 4. ヘリウムフリーのマグネット

90 年代末にヘリウムフリーの $Nb_3Sn$／NbTi　高磁場マグネットが開発されました（図 5）[12)]。4 K の小型冷凍機で冷却し、ヘリウムを不要とする技術です。ヘリウム槽がないのでクライオスタットが驚くほど小さくなること、ヘリウムが蒸発しないのでクエンチに気がつかないことなど、開発者も驚くようなことがたくさんありました。ヘリウムフリーのマグネットは今では世界に広がり、ポピュラーな製品になっています。2006 年には東北大学が、高温超電導線材と組み合わせて 18.1 T の磁場の発生に成功しています。スタンドアローンの超電導機器の究極の姿として、また HTS コイルへの今後の拡張性を考慮して、あえて説明に加えさせて頂きました。

図 5 冷凍機冷却マグネット [12)]

## 5. まとめ

MRI や NMR の様にスタンドアローンで市販化されている装置は、（イ）代替技術がない、（ロ）目的にマッチした特別の仕様を満たしている、（ハ）一般ユーザが使いやすい、という 3 つの特徴を持っています。これらは、今後、超電導機器の製品化が成功するために大切なポイントを示唆しているものと考えています。


© ISTEC 2012 All rights reserved.

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-5717

参考文献：

1. P.C.Lauterbur, Nature 242, p190 (1973).
2. http://www.toshiba-medical.co.jp/tmd/products/mri/index.html
3. 清水道夫　「MRI 用超電導マグネットの現状」　2005 年度第 3 回超伝導応用研究会シンポジウム.
4. H. Maeda, M. Urata, T. Wada, T. Yazawa and A. Sato, IEEE Trans. on Magnetics 25, p1763 (1989).
5. 太刀川恭治、低温工学 45、p88（2010）
6. K. Watanabe *et al*., Science Reports of the Research Institutes, Tohoku University 33, p297 (1986).
7. S. Matsumoto *et al*., Superconducting Science and Technology, 25, 025017 (2012).
8. Ulf P. Trociewitz *et al*., Appl. Phys. Lett. 99, 202506 (2011).
9. T. Kiyoshi *et al*., IEEE Trans. Appl. Superconduct. 14, p1608 (2004).
10. T. Kiyoshi *et al*., IEEE Trans. Appl. Superconductivity 18, p860 (2008).
11. 栗山透、佐々木高士、浦田昌身、東芝レビュー、53、p39 (1998).
12. 栗山透、前田秀明、金属、70, p265 (2000).

超電導 Web21 トップページ


© ISTEC 2012 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2012 年 7 月 2 日発行
公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-5717

【隔月連載記事】

# 超電導マグネット開発のこれまでとこれから（その 3）

独立行政法人 理化学研究所
生命分子システム基盤研究領域 NMR 装置技術研究チーム
チームリーダー　前田秀明

前回は、超電導マグネットをスタンドアローンで利用する装置について述べました。今回は、大きなシステムの一環として利用されている超電導マグネットとしてリニア用の超電導マグネットについて紹介します。

超電導リニアの本格的な開発は 1970 年代に始まりました。NbZr 、NbTi、$Nb_3Sn$ などの超電導線材が新しく開発され、それらを用いたコイルが製作され始めた時期に当たります。このような時期に、超電導リニア高速鉄道のコンセプトを発案し、開発を決断したチャレンジ精神には驚嘆させられます。マグネットの開発と共に、1977 年に宮崎実験線、1990 年には山梨実験線が建設されて走行試験が重ねられた結果、2027 年のリニア中央新幹線の開業が決定されたことはご存じの通りです。

超電導リニアでは、車体の下部の台車の両側面に超電導マグネットが搭載されています。マグネットには数個のレーストラックコイルが収められています。超電導マグネットと地上コイルとの相互作用で、浮上力、推進力、案内力などが発生します。マグネット自体は十メートル余りでそれほど大きなものではありませんが、高速リニアシステムの最も重要な役割を担っています。

リニアのマグネットに要求される第 1 の技術的なポイントは、高速走行する車体に搭載するためのマグネットの小型化と軽量化です。このために、数百 $A/mm^2$ まで高電流密度化されています。超電導マグネットは地上コイルの作用により走行時に数百ヘルツで加振されます。この様な厳しい環境下でも、マグネットの安定性を保持する必要があります。この目的にかなうように、レーストラックコイルを樹脂で固め、その外周部を金具で押さえて金属チューブ（内槽と呼びます）に収めた特別な構造をしています[1)]。電磁力対策として、内槽の直線部を補強します。これにより、電磁力に対して十分な強度を持ち、高速走行時の加振で大きな振動が生じない様な構成になっています。マグネットは地上から切り離された車体に置かれるので、電源が不要な永久電流で運転されています。但し、永久電流の時間的な安定度は、NMR や MRI に比べてずっと緩いレベルです。

第 2 の技術的なポイントは、液体ヘリウムや液体窒素の注液なく長時間に亘り稼働できる冷却構成です[2)]。液体ヘリウムは内槽とコイルの間のわずかなスペースに蓄えられているだけです。走行時に蒸発したヘリウムガスをマグネット上部のタンクに集め、小型 GM/JT 冷凍機で再び液体ヘリウムに戻します。コイルの周りの液体ヘリウムの量が少ないので、走行中にドライアップしない様に発熱を低く抑制せねばなりません。走行中に内層に生じる機械的ロスや電気的なロスで液体ヘリウムが蒸発しないように、内槽構造には工夫が施されています。マグネット容器は四角い弁当箱のような形なので、台車の両側に容易に取り付けることができます。

リニアの超電導マグネットには、オリジナリテイにあふれた時代を超えるアイデアがたくさん詰まっています。コイルの周りの液体ヘリウムの量をできるだけ少なく抑え、小型冷凍機を用いたクローズドの冷却系でヘリウムを循環冷却する構成は、現在の冷凍機伝導冷却マグネットのさきがけともいえる斬新なアイデアであると思います。高電流密度であるにもかかわらず、加振力の加わる厳しい環境下でクエンチのない走行を実現しているのも素晴らしい技術です。いずれにしても、斬


© ISTEC 2012 All rights reserved.

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-5717

新なアイデアと長期間にわたる開発の継続により、超電導リニアはわが国の超電導技術を牽引する大きな駆動力の一つとなってきました。

従来のリニアのマグネットは NbTi コイルからなりますが、開発品レベルでは、JR 東海と東芝が Bi2223 高温超電導線材を用いたマグネットを開発しています[3)]。高温超電導コイルを用いて 20 K で運転すれば、クエンチが起こらず、走行時の発熱に対する冷却マージンを大きくできる上、冷凍機伝導冷却方式により冷却構成を簡略化できるという発想です。永久電流スイッチの構成が難しいですが、YBCO の薄膜を用いて、ヒータ加熱でオン・オフさせる方式を用いています。2005 年には、この高温超電導マグネットを用いて 554 km/h で走行する快挙をあげました。さらに JR 総研では、ReBCO マグネットの可能性も検討しているようです[4)]。高温超電導によるリニアは多くのメリットがある反面、線材の価格が欠点です。この点が折り合う様になれば、中央リニア新幹線に利用される様になる日もそう遠くないかもしれません。

ここまで超電導リニアについて述べました。超電導マグネットが中心になるシステムとして、この他に、加速器、核融合炉などがあります。加速器はノーベル賞に結びつくような大きな発見を生み出す人類にとっても重要な装置です。CERN が建設した LHC では、27 km 長のリングに沿って、数千台の 2 極偏向マグネットや 4 極収束マグネットなどが設置されています[5)]。衝突粒子の飛跡の検出器にも超電導コイルが使用されています。マグネットを冷却するために大型の冷凍装置を備えています。一方、核融合炉は、高温プラズマの誘導、閉じ込め、位置制御などに中心ソレノイド、トロイダルコイル、ポロイダルコイルなどを用います。コイルには数万アンペアの大容量の強制冷却超電導導体を用います[6)]。核融合は大きな電磁力が発生する巨大なシステムなので、コイルの機械的な強度やクエンチの生じない安定性が重視されます。加速器用のマグネットや核融合炉用マグネットについては詳細な解説が他にありますから[5),6)]、今は詳しい説明をそちらの方に譲りたいと思います。

今回まで 3 回にわたり「超電導マグネット開発のこれまで」について述べてきました。次回からは「超電導マグネット開発のこれから」として、ReBCO マグネットの開発上の技術課題と今後の可能性について述べていきます。

**参考文献：**

1. 山地睦彦、前田秀明、真田芳直、東芝レビュー 46、p390 (1991)
2. 中島洋、低温工学 4、p148(2002)
3. 五十嵐基仁他、低温工学 H. Maeda, M. Urata, T. Wada, T. Yazawa and A. Sato, IEEE Trans. on Magnetics 25, p651 (2004)
4. 長嶋賢、鉄道総研報告 25、p17（2011）
5. T.M. Taylor, IEEE Trans. Appl. Supercond. 10, p342 (2000)
6. 小泉徳潔、布谷嘉彦、中島秀夫、低温工学、47、p135(2012)

超電導 Web21 トップページ


© ISTEC 2012 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2012 年 9 月 3 日発行
公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-5717

【隔月連載記事】

# 超電導マグネット開発のこれまでとこれから（その 4）

独立行政法人 理化学研究所
生命分子システム基盤研究領域 NMR 装置技術研究チーム
施設長　前田秀明

これまで超電導マグネットの開発の歴史を簡単に述べてきました。ここからは、最近市販化が始まり、マグネット化が進みつつある高温超電導 REBCO のマグネット技術を述べます。

筆者の属する理化学研究所では、2009 年に REBCO 線材が市販化された直後からマグネット開発に取り組み、多くの小型マグネットを製作してきました。この経験によれば、REBCO マグネットは多くの面で、低温超電導（LTS）マグネットとは異なる振る舞いを示します。それ故、REBCO マグネットについては、LTS マグネットとは異なる独自のマグネット技術を構築する必要があると感じています。ここでは、筆者が日頃感じている REBCO マグネットの技術課題と対処法、今後の方向性について述べてみます。

## 1. REBCO 系高温超電導のマグネット技術

LTS では既に超電導マグネット技術が確立しています。代表的な教科書である M. N. Wilson の"Superconducting magnets"[1] や Y. Iwasa の"Case studies in superconducting magnet"[2] などを精読すれば、必要なマグネット技術が取得できます。LTS マグネットでは、表 1 の様に、安定化、交流ロス、クエンチ保護、超電導接続などが技術課題です。一方、REBCO マグネットでは、技術課題が、まだ十分に抽出されていません。漠然と LTS マグネットのアナロジーでよいのではないかと考えていることが多いと思います。本当に REBCO マグネットにも、LTS の技術体系がそのまま適用できるのでしょうか？私達のラボでは、小型の REBCO マグネット（数 cm 位の小さなもの）を数多く製作し、評価試験を通じて知見を積み上げてきました。その結果、REBCO マグネットの技術課題は、LTS マグネットとは大きく異なることが分かってきました。結果をまとめて表 1 に示します。表の上部の 4 つの技術課題について、簡単に説明してみます。

表 1　超電導マグネット技術

| LTS マグネット | REBCOマグネット |
|---|---|
| • 安定化<br>• クエンチ保護<br>• 交流ロス<br>• 超伝導接続<br><br>• 構造解析<br>• 電磁解析<br>• 冷却 | • マグネットの特性劣化<br>• 熱暴走とマグネット保護<br>• 遮蔽電流磁場と交流ロス<br>• 超伝導接続<br><br>• 構造解析<br>• 電磁解析<br>• 冷却 |

(1) マグネットの特性劣化

LTS マグネットではクエンチへの安定化が最大の課題です。クエンチは、主として「電磁力による線材の動き」などの機械的擾乱（入熱）により生じます。REBCO マグネットは温度マージンが


© ISTEC 2012 All rights reserved.

大きいので、「電磁力による線材の動き」の様な小さな入熱ではクエンチに至ることはありません。

一方、REBCO マグネットでは、機械的要因による特性劣化が大きな課題です。REBCO 線材は、図 1 の様にハステロイ、バッファー層、REBCO 層、銅安定化材などからなる多層構造であるために、機械的強度が強い異方性を示します[3)]。例えば、長手方向（軸方向）の引っ張り強度はハステロイのために～1 GPa と非常に高いのですが、横方向には強度が 1/10~1/100（10-100 MPa）に低下します。この方向の力により多層構造が剥離するからです。REBCO 線材は、図 1 の様に、銅安定化材とハステロイが、「REBCO 層＋バッファー層」という脆い接着剤で接着された構成として考えることができます。接着面の端部にこじ開け力（劈開力 (cleavage) や引きはがし力 (peel)、図 1）を加えると、端部に横引っ張り応力が集中して少ない力で部分剥離します。剥離と共に応力集中部が横に移動し、部分剥離が進行します。この結果、驚くほど低い応力（たとえば 1 MPa！）で接着面全体が剥離します[4)]。剥離の進展と共に、REBCO 層が徐々に破壊されるので超電導特性が劣化してしまいます。劣化部は数 cm 長しかないのが普通ですが、これが常伝導電圧を発生しマグネット特性を劣化させます。

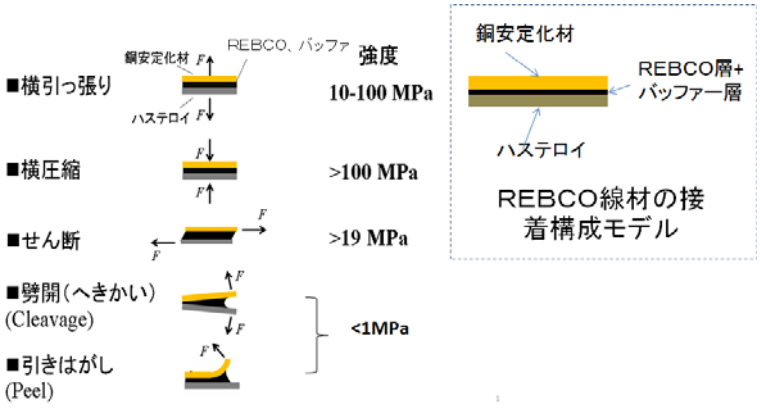


図 1　YBCO コート線材の接着構成も出ると基本応用モード

このように、REBCO 線材の機械的な強度の異方性は 3 桁の幅に及ぶので、有利な方向に力が加わる場合には極めて強靭ですが、不利な方向に力が加わると非常に脆い性質を示します。従って、マグネットの製造・冷却や通電の過程で、この種の不利な方向に力が加わらないようにすることが非常に重要です。

(2) 熱暴走とマグネット保護

剥離による特性劣化がまったくない健全な REBCO マグネットでは、不可逆的な熱暴走（クエンチ）は生じません。しかし、機械的な要因で線材に部分的な剥離が生じると、通電中に劣化部に発熱が生じ周囲の線材を加熱します（図 2）。電流が低い間は、温度は電流に対して可逆的でコントロール可能ですが、ある限界電流を超えると不可逆的に温度が急上昇して熱暴走に至ります[5)]。REBCO マグネットで熱暴走が生じるのは、n 値が大きく、線材温度が current sharing 温度を超えると、臨界電流密度と温度上昇の間に強いフィード

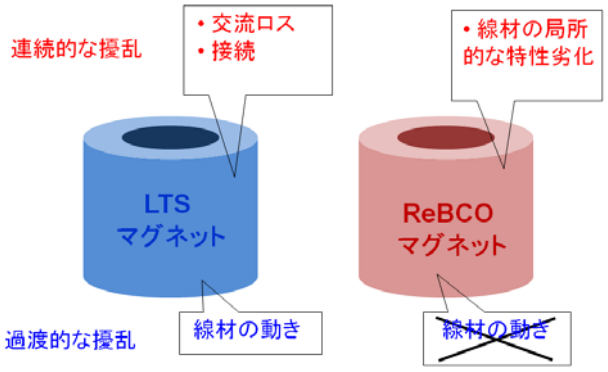


図 2　熱暴走要因の比較


© ISTEC 2012 All rights reserved.

バックが生じるからです。

REBCO マグネットの最大の利点は、線材の高強度を利用したマグネットの高電流密度化にあります。ところが、機械的な要因でマグネットの一部が特性劣化すると、マグネット運転中に熱暴走が生じます。温度上昇は高電流密度ほど急激ですから、高電流密度運転中に熱暴走すると瞬間的に REBCO マグネットが焼損することになります。NIMS の松本氏らが、この種の熱暴走によるマグネット損傷を報告しています[6)]。これまで REBCO マグネットの熱暴走は注目されてきませんでしたが、安全な高電流密度運転のためには、熱暴走のメカニズムの解明と、温度上昇の低減手法の開発が非常に重要です。

(3) 遮蔽電流磁場と交流ロス

REBCO マグネットでは、数 mm 幅の平坦な超電導層が径方向磁場に対向しているので、REBCO 層に磁場を遮蔽する遮蔽電流が生じます[7), 8)]。遮蔽電流は径方向磁場が大きいマグネットの両端部に集中し、マグネット中心に逆向きの磁場を作ります（図 3）。LTS マグネットでも遮蔽電流磁場が生じますが[9)]、マグネット軸方向磁場を遮蔽するので、遮蔽電流磁場はマグネット磁場と同じ方向を向きます。LTS 線材では超電導フィラメントが数十ミクロンですが、REBCO マグネットでは REBCO 層の幅が数 mm あるので、遮蔽電流磁場は LTS マグネットより数桁大きくなります。この遮蔽電流磁場により、(イ) マグネット磁場のヒステリシス、(ロ) 中心磁場の減少（<10 %）、(ハ) 遮蔽電流磁場の時間的な変動など色々な現象が現れます。

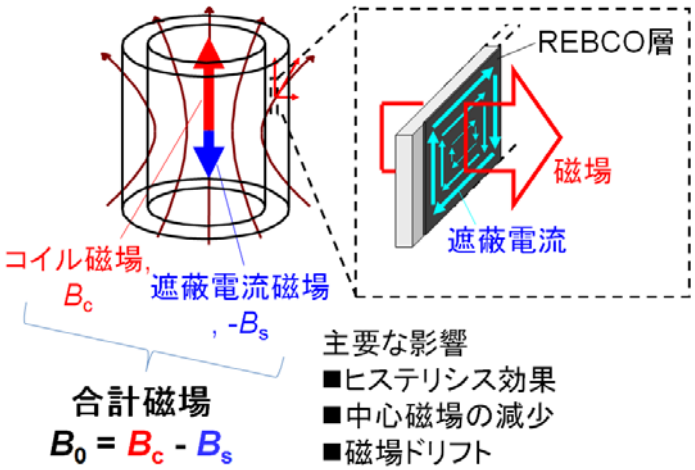


図 3　遮蔽電流による磁場

遮蔽電流は中心磁場に影響を与えるだけではなく、励磁時や消磁時に線材の交流ロスを生じます。交流ロスは LTS マグネットより数桁大きい値ですから、注意が必要です。

(4) 超電導接続

図 4 の様に、NMR や MRI では永久電流モードでマグネットを運転します。このためには、(a) 高い n 値を持つ超電導線材と、(b) 線材間の超電導接続（$<10^{-12}$ Ω）が必要です。REBCO 線材は n 値が高いので(a) は容易にクリアできますが、(b) は容易ではありません。LTS 線材の代表的な超電導接続法として、「線材を半田槽で加熱することでマトリクスを除去すると共に、超電導フィラメントを半田メッキしてから、線材同士を接続する」方法があります[10)]。REBCO マグネットにこの手法を適用するには、REBCO 面に半田メッキする必要がありますが、現時点ではこの種の技術のめどは立っていません。更に、REBCO と金属を直接接

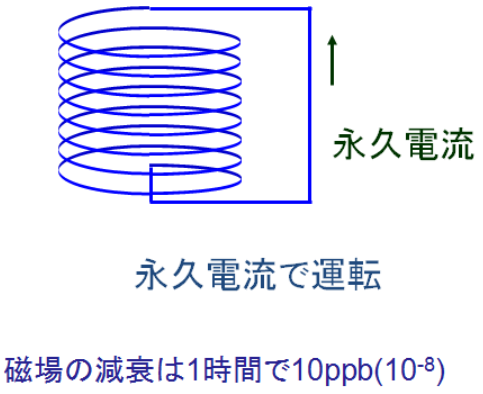


図 4　NMR に必要な永久電流モード


© ISTEC 2012 All rights reserved.

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

触させると、REBCO の酸素原子が金属側に吸収され、REBCO 側の酸素原子が減少するために REBCO 表面抵抗が増加するという報告もあります[11)]。いずれにしても、現時点では $10^{-8}$ Ω程度が技術の限界であり、NMR や MRI で要求されるレベルの永久電流の実現は不可能な状態です。

## 2. まとめ

以上、私たちのラボでの経験に基づき、REBCO マグネットの技術課題をまとめました。次回以降は、このうちのいくつかの技術課題について、実際のデータをベースに述べたいと思います。

参考文献：

1. Martin N. Wison, Superconducting Magets, Clarendon Press Oxford (1983).
2. Yukikazu Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, Springer (2009).
3. D. C. van der Laan, J. W. Ekin, C.C. Clickner, T. C. Stauffer, “Delamination strength of YBCO coated conductors under transverse tensile stress”, Supercond. Sci. Technol., 20, 765-770(2007).
4. Y. Yanagisawa, H. Nakagome, T. Takematsu, T. Takao, N. Sato, M. Takahashi, and H. Maeda, “Remarkable weakness against cleavage stress for YBCO-coated conductors and its effect on the YBCO coil performance”, Physica C 471, 480-485 (2011).
5. Y. Yanagisawa, E. Okuyama, H. Nakagome, T. Takematsu,T. Takao, M. Hamada, S. Matsumoto, T. Kiyoshi, A Takizawa, M. Takahashi and H. Maeda1, “The mechanism of thermal runaway due to continuous local disturbances in the YBCO-coated conductor coil winding ”, Supercond. Sci. Technol. 25, 075014 (10pp) (2012).
6. S. Matsumoto, S. Choi, T. Kiyoshi, A. Otsuka, M. Hamada, H. Maeda, Y. Yanagisawa, H. Nakagome and H. Suematsu, “REBCO layer-wound coil tests under electromagnetic forces in an external magnetic field of up to17.2 T”, IEEE Trans. Appl. Supercond. in press(2012).
7. Y. Koyama, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, M. Hamada, T. Kiyoshi, M. Takahashi and H. Maeda, ”Towards beyond 1GHz NMR: mechanism of the long term drift of screening current-induced magnetic field in a Bi-2223 coil, Physica C, 469, 694-701 (2009).
8. Yoshinori Yanagisawa, Hideki Nakagome, Davide Uglietti, Tsukasa Kiyoshi, Ruixin Hu, Takuya Takematsu, Tomoaki Takao, Masato Takahashi, and Hideaki Maeda, “Effect of YBCO-Coil Shape on the Screening Current-Induced Magnetic Field Intensity”, IEEE Trans. Appl. Supercond., 20, 744-747 (2010).
9. L. Cesnak and J. Kokavec, “Magnetic field stability of superconducting magnets”, Cryogenics, 107-110 (1977).
10. T. Fukuzaki, H. Maeda, S. Matsumoto, S. Yokoyama and T. Kiyoshi, “Study of Joint resistance in $Nb_3Al$-NbTi Superconducting Joint for High Field NMR”, IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 17, p1435-1437(2007).
11. Katsutoshi Oka and Takeo Irie, Jap. J. Appl. Phys., 31, 2689-2691 (1992).

超電導 Web21 トップページ


© ISTEC 2012 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2012 年 10 月 1 日発行
公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-5717

【隔月連載記事】

# 超電導マグネット開発のこれまでとこれから（その 5）

独立行政法人 理化学研究所
生命分子システム基盤研究領域 NMR 装置技術研究チーム
施設長　前田秀明
千葉大学工学研究科　柳澤吉紀

今回は、前報で述べた REBCO マグネットの技術課題の内で、世界的に問題になっているマグネットの特性劣化について解説します。

## 1. マグネット特性劣化の要因

前報で述べたように、REBCO 線材は薄膜や金属基板を組み合わせた多層構造をもっているので、機械的強度に著しい異方性が生じます。長手方向などの線材に有利なモードの外力には極めて強靭ですが、横引っ張り力や劈開力（cleavage 力）などの線材に不利なモードの力には脆く、多層構造がいとも簡単に剥離して壊れてしまいます。異方性は何と 3 桁の幅に達します。この異方性が原因で、エポキシ樹脂で含浸した REBCO コイルに顕著な特性劣化が生じて問題になっています。

特性劣化の例を図 1 に示します。これは直径 3cm の小さな YBCO コイルを、①非含浸、②パラフィン含浸、③エポキシ含浸の 3 種類の製法で製作し、液体窒素中で通電して特性を比較したものです[1)]。非含浸コイルやパラフィン含浸コイルには特性劣化がありません。一方、コイルをエポキシで含浸すると、特性が顕著に劣化します。この実験では電磁力は無視できるので、特性劣化は熱応力によるものです。非含浸コイルでは、線材同士がくっついておらず冷却中に横方向の引っ張り応力が生じないので特性劣化が起こりません。一方、パラフィンは熱応力ですぐに壊れるので、冷却により生じる横引っ張り力や劈開力（cleavage 力）が小さなレベルにとどまり、含浸コイルの特性劣化は現れません。パラフィンの様な柔らかいポリマーで含浸する手法は、MRI や NMR などのコイルでは広く使われていますが、この手法により REBCO コイルの特性劣化を抑制できることが明らかです。この観点から、パラフィン含浸は REBCO コイルで多く使用されるようになってきました。

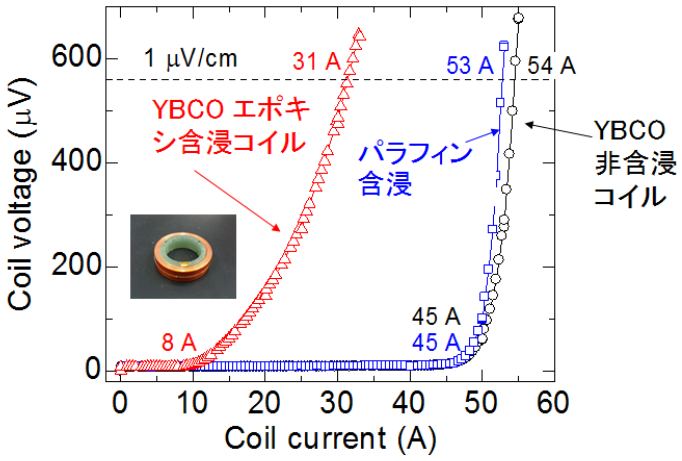


図 1 非含浸、パラフィン含浸、エポキシ含浸による特性比較

エポキシは強靭なポリマーなので、冷却時にも壊れにくい性質を持ちます。逆に言うと、エポキシが頑張りすぎるので、横引っ張り力や劈開力（cleavage 力）などの不利なモードの力が冷却中に線材に加わることで線材が壊れて劣化してしまいます。2010 年に米国で開催された Applied Superconductivity Conference で我々が図 1 の成果を発表した時には、口頭発表の後に「自分の所


© ISTEC 2012 All rights reserved.

でも同じような劣化が生じて困っている」という人が大勢集まってきて驚きました。何となく変だなと思っている人たちが沢山いたところに、私たちの発表が火をつけた形になったのでしょうね。なお、同じ学会で東芝からも同様の劣化現象に関する発表がありました[2)]。

図 2 は、エポキシ含浸 REBCO コイルの特性劣化の要因をさらに具体的に示すものです。コイルを劣化層まで巻き戻して図 2(a) の電圧タップを取り付け、励磁電圧を計測した結果を図 2(b) に示します。$V_2$～$V_4$[3)] に顕著な特性劣化、$V_1$、$V_5$ にわずかな特性劣化が見られますが、$V_6$ には特性劣化がありません。線材の銅/銀層をエッチングで除去した劣化層の写真を図 2(c) に示します。黒色は YBCO 膜、紫色は YBCO 層が剥離して露出したバッファー層です。特性が顕著に劣化した $V_4$ には大きな剥離が発生しており、形状から見て剥離は線材上端から下端に伝播しています。特性にわずかな劣化が見られた $V_5$ では、線材上端に小さな剥離のスポットが生じています。特性劣化のなかった $V_6$ には剥離がありません。もし剥離が線材横方向の引っ張り応力によるならば、剥離は線材の中央面に生じるはずです。一方、劈開力（cleavage 力）によるなら、線材の上端または下端から剥離が始まるでしょう。それ故、剥離は劈開力（cleavage 力）により生じている事が明らかです[3)]。

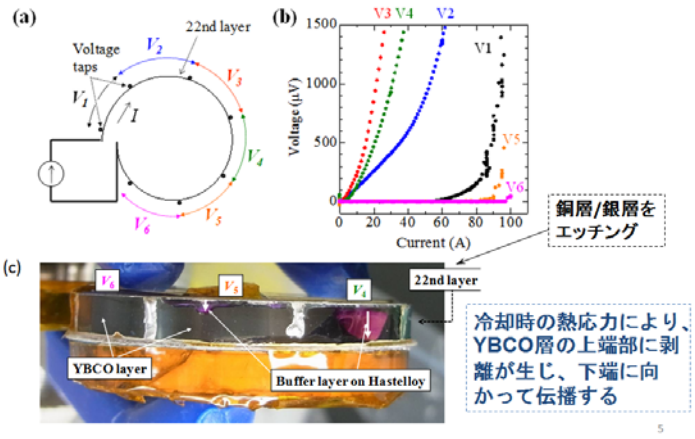


図 2 コイル劣化部の YBCO 層の状態

図 3 は冷却時の図 1 のコイルの変形図と径方向の熱応力（横方向応力に対応）の等応力線図です。巻き枠や層間にあるエポキシ樹脂の大きな熱収縮により、コイル上下端部に径方向応力(横方向応力)が集中しています（オレンジ色で表示）。この図から、劈開力（cleavage 力）が生じていることが明らかです。劈開力は線材端部に集中するので、これが剥離を起こし、それが下側に向かって伝播して特性劣化に至るわけです。

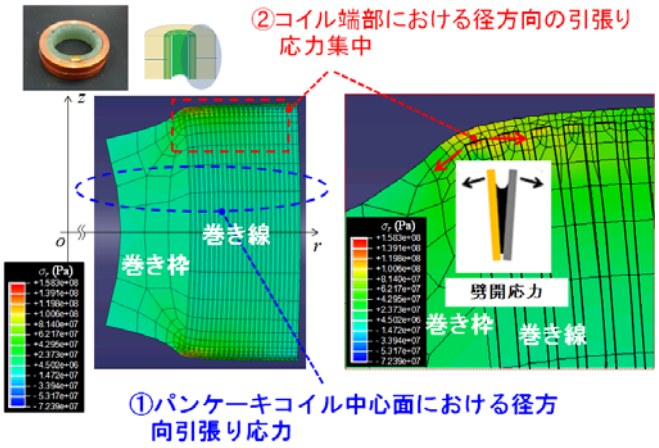


図 3 コイルの熱応力による変形図と径方向応力分布

## 2. 特性劣化の抑制方法

以上の様に、①非含浸や柔らかいポリマーで含浸すれば REBCO コイルは劣化しないこと、②エポキシの様な硬い樹脂で含浸すると特性劣化が生じること、③この特性劣化は冷却時の熱応力による劈開力（cleavage 力）であること、などが明らかになりました。最近では、これに基づいて、非含浸方式や柔らかいポリマーで含浸する製法を採用する例が増えています。LTS コイルの場合、クエンチを防止したり、線材フープ応力を低減させたり、非円形コイルの成形や剛性向上を助けるためにコイルをエポキシで含浸することがあります。REBCO コイルでは温度マージンが大きいのでクエンチの心配はありませんし、線材の長手方向の強度が高いのでフープ応力の問題も無視できま


© ISTEC 2012 All rights reserved.

す。従って、円形コイルの場合には、あえてエポキシで含浸する必要はありません。ところが、リニアや加速器で用いられる非円形コイルでは、コイルの成形や剛性の関係で、エポキシで含浸する方が望ましいことが多くあります。このためには、エポキシ含浸しても REBCO コイルの特性が劣化しない手法の開発が必要です。

図 4 は、このような要求を満たすために開発したポリイミド絶縁皮膜を表面に電着した REBCO 線材です[4)]。ポリイミドのコロイドの中に線材を通し、両者に電圧を加えることで線材の表面にポリイミド粒子を電着させてから乾燥させます。線材の中央面で約 20 μm、端部で約 30 μm の厚みです。

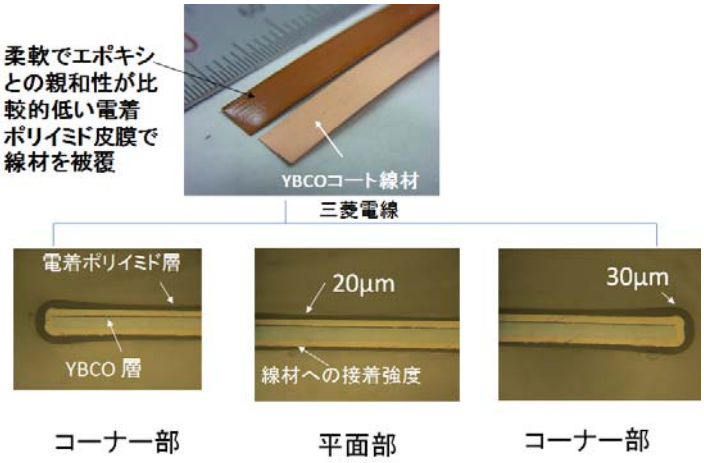


図 4 ポリイミド皮膜処理した YBCO 線材

図 5 に、この線材を用いて巻いたコイルの通電特性を示します。驚くべきことに、あれだけ劣化が止まなかったエポキシ含浸方式でも、この線材をコイルに巻けば特性劣化がまったく生じていないことが分かります。一見関係のなさそうな線材の絶縁皮膜処理がエポキシ含浸による特性劣化を抑制する機能を持つのは不思議です。これは、冷却によりコイルの上端部に生じる劈開力（cleavage 力）がポリイミド絶縁皮膜の塑性変形で吸収され、結果として線材に加わる劈開力（cleavage 力）が低くなり特性劣化が抑制されるのではないかと推測しています。

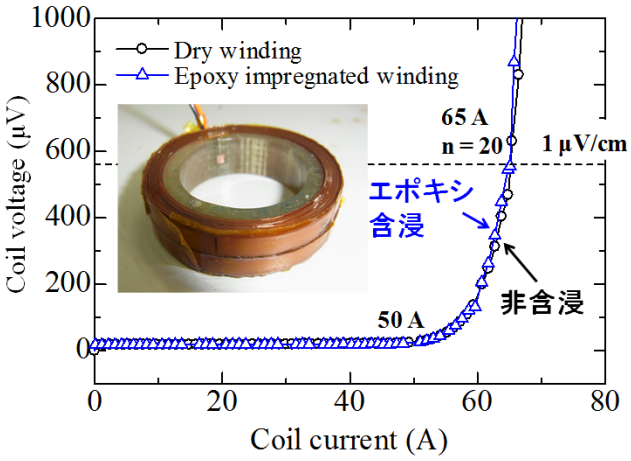


図 5 ポリイミド皮膜処理した YBCO 線材を用いたコイルの特性

図 6 にこれまで得られた REBCO コイルの劣化特性に関する知見をまとめました。非含浸や柔らかいポリマーで含浸すれば劣化は生じません。柔らかいポリマーとしては、パラフィン、ワックス、グリスなど何でも可能です。エポキシで含浸する場合でも、ポリイミドなどで絶縁皮膜された線材を用いれば劣化は抑制できます。最近、米国の高磁場研究所の Trociewitz らは[5)]、REBCO 線材を熱収縮チューブに収めコイルに巻いてからエポキシで含浸すれば、エポキシと線材が分離（mechanical decouple）されて引っ張り応力が伝わらなくなり、線材に加わる横引っ張り応力が消えてコイル特性の劣化がなくなることを示しました。エポキシ樹脂に対する対策としてこの mechanical decoupling の考え方も重要です。線材に剥離剤を塗ってコイルに巻きエポキシで含浸する手法も同じような decoupling 効果を生みますから有効であると思います。以上の様に、現在では REBCO マグネットの特性劣化の要因とそれに対する対策が少しずつ明らかになってきました。REBCO マグネットでエポキシ含浸方式が復活する日も遠くないと思います。


© ISTEC 2012 All rights reserved.

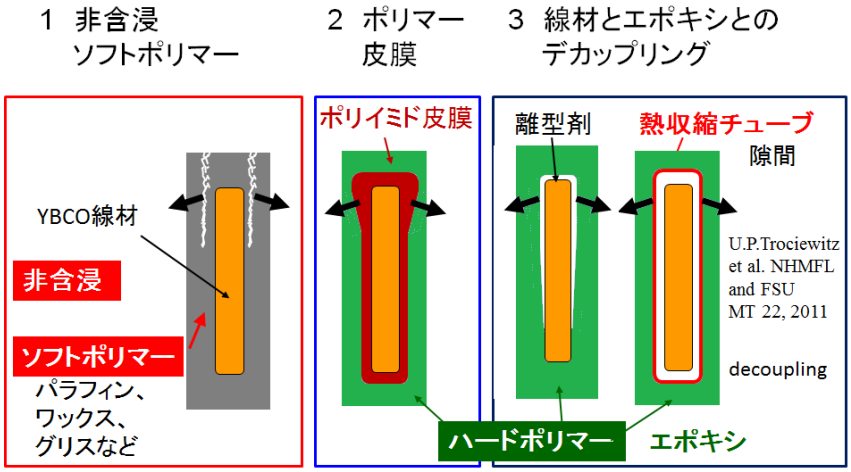


図 6 REBCO コイルの劣化要因と対策のまとめ

ところで、図 4 の絶縁皮膜 REBCO 線材ですが、絶縁厚みを低減し、コイルにおける線材の占積率を向上させる上で非常に有効です。REBCO コイルの大きな欠点は、REBCO 線材が 100 μm から 150 μm と非常に薄いので、絶縁の厚みを極めて薄くしなければ、コイル巻線に占める線材の占積率が極端に悪くなってしまうことです。例えば 25 μm 厚のカプトンテープのダブルラップ巻きを用いると、それだけで占積率が 50 %以下になってしまいます。これでは高電流密度でコンパクトなコイルを実現することが困難になります。図 4 の絶縁皮膜線材を用いれば絶縁厚が薄くても絶縁能力が高いので、コイルにした場合に 70~80 %の線材占積率を得ることが可能です。皮膜がついているので線材の扱いも容易で、エポキシ含浸にも安定であるなど多くのメリットがあるので、今後 LTS におけるホルマール被覆線材の様に、含浸方式、非含浸方式を問わず、幅広く REBCO マグネットに使用されていくのではないかと考えています。

## 3. まとめ

我々の研究室の最近の成果を中心にして、REBCO コイルの劣化現象のメカニズムと対策をまとめました。エポキシ含浸による REBCO コイルの劣化現象を 2 年前に初めて発表した時には学会から衝撃を持って受けとめられましたが、その後の研究を通じて基本的なメカニズムと対策が明らかになってきています。今後は、様々な形状のマグネットに適用することで、信頼性が高く特性劣化のない REBCO マグネットを製作する技術が徐々に確立していくものと考えています。

## 参考文献

1. T. Takematsu, R. Hu, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, D. Uglietti, T. Kiyoshi, M. Takahashi, and H. Maeda, Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation, Physica C, 470, 674–677 (2010).
2. H. Miyazaki, S. Iwai, T. Tosaka, K. Tasaki, S. Hanai, M. Urata, S. Ioka, and Y. Ishii, Thermal stability of conduction-cooled YBCO pancake coil, IEEE Trans Appl. Supercond. 21, 2453-2457(2011).
3. Y. Yanagisawa, H. Nakagome, T. Takematsu, T. Takao, N. Sato, M. Takahashi, and H. Maeda, Remarkable weakness against cleavage stress for YBCO-coated conductors and its effect on the YBCO coil performance, Physica C 471, 480-485 (2011).


© ISTEC 2012 All rights reserved.

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

4. Y. Yanagisawa, K. Sato, R. Piao, H. Nakagome, T. Takematsu, T. Takao, H. Kamibayashi, M. Takahashi, and H. Maeda, Removal of degradation in the performance of epoxy impregnated YBCO-coated conductor double pancake, by using an YBCO-coated conductor insulated by polyimide electro-deposition, Physica C 476, 19-22(2012)
5. U. Trociewitz, M. Dalban-Canassy, D. Hilton, J. Jiang, E. Hellstrom, P. Noyes, Y. Viouchkov, H. Weijers, D. Larbalestier, 35.4T field generated using a layer wound superconducting coil made of (RE)Ba2Cu3O7x coated conductor, Appl. Phys. Lett. 99, 202506(2011)

超電導 Web21 トップページ


© ISTEC 2012 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2012 年 12 月 10 日発行
公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-5717

【隔月連載記事】

# 超電導マグネット開発のこれまでとこれから（その 6）

独立行政法人 理化学研究所
生命分子システム基盤研究領域 NMR 装置技術研究チーム
施設長　前田秀明
千葉大学工学研究科　柳澤吉紀

今回は熱暴走（クエンチ）が生じた場合の REBCO コイルの保護について述べることにします。

## 1. REBCO コイルの保護

超電導コイルの保護技術とは熱暴走（クエンチ）が起きた時にコイルを無事に帰還させる技術です。具体的には、過剰な昇温（<150~200 K）、熱応力、高電圧などによる損傷からコイルを保護する必要があります。コイルの電流密度が高く、冷却が不十分で安定性が悪い場合、クエンチ部分の温度は急激に上昇しますが、同時に常電導領域が急速に拡大して内部抵抗がどんどん増加するので、コイル電流が急激に減衰時して温度上昇は抑制されます。一方、コイルの電流密度が低く冷却が十分で安定性がよい場合には、クエンチ部分の温度上昇はゆっくりですが、常電導部分は伝播しにくいホットスポットになるので、コイル電流を外部抵抗で十分早く減衰させてコイルを保護することが必要になります[1)]。

REBCO コイルは安定性が良いので熱暴走しても常電導領域はホットスポットを作ります。そのため、熱暴走が生じた場合、外部回路で電流を減衰させるには数秒から数十秒の時間が必要になります。しかし、REBCO コイルは数百 A/mm$^2$ の高電流密度で利用しますから、熱暴走が発生すると極めて短い時間（数十～数百ミリ秒）で 150~200 K まで上昇するので、回路的な電流減衰ではまったく追いつかないことになります。このために、REBCO コイルでは熱暴走発生時のコイル保護技術が問題になります。以下、具体的に説明していきます。

## 2. 熱暴走とは?

BSCCO コイルでは、励磁中に熱暴走が生じることはほとんどありません。n 値が小さいので、熱暴走の原因になる「温度上昇と臨界電流密度低下の強いフィードバック」が起こりにくいからです。一方、REBCO コイルでは熱暴走が生じます。熱暴走が生じると、コイルは損傷を受けることがあります。図 1 に物質・材料研究機構の松本等が報告している REBCO コイル励磁中に生じた熱暴走信号と、焼損の例を示します。[(2)] 熱暴走はコイル臨界電流より低い電流で生じています。熱暴走は、あまり注目されてはいませんが、実は REBCO コイルの抱える大きな技術課題の一つです。

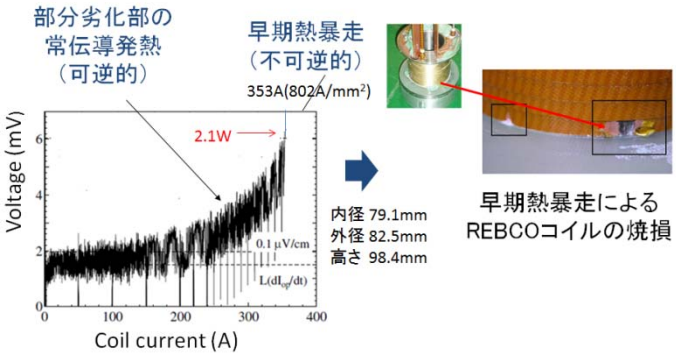


図 1　REBCO コイルの熱暴走の例（4.2 K で 10 T の磁場中）


© ISTEC 2012 All rights reserved.

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-5717

高温超電導の一種である REBCO コイルは、熱的に安定で、熱暴走を起こしにくいはずなのに、なぜ熱暴走が生じ、焼損に至るのでしょうか。

## 3. 熱暴走の発生メカニズムと対策

### 3.1 熱暴走の発生メカニズム

熱暴走は、図 2 に示す 2 つのケースに分けることができます。ケース 1 は、REBCO 線材の通電特性の劣化がない場合です。この場合には、コイル臨界電流（この例では 98 A）の約 130 %を超えると熱暴走が生じます。逆に言うとそれまでは熱暴走しないので、安定であるともいえます。臨界電流を越えると常電導発熱が大きくなり熱暴走に至ります。私たちはこの種の熱暴走を「自然クエンチによる熱暴走」と呼んでいます。コイル運転電流はコイル臨界電流より小さいので、このようなケースは現実には存在しないと思われるかもしれませんが、低温超電導（LTS）外層コイルと REBCO 内層コイルを組み合わせたコイルの場合、LTS コイルがクエンチすると電磁誘導で REBCO コイルの電流が増加し、コイル臨界電流を越えることが起こります[3)]。この場合、いったん電流が増加してから熱暴走が発生するので、温度上昇や熱応力でコイル損傷が生じ易くなります。

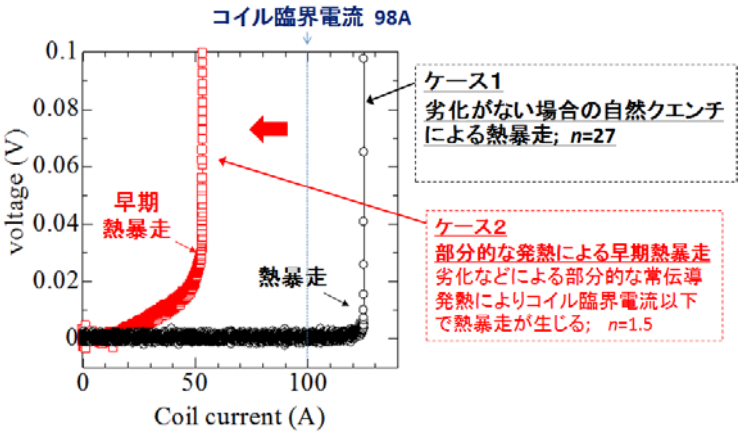


図 2　2 種類の熱暴走

ケース 2 は REBCO 線材の一部に通電特性の劣化がある場合です。線材の劣化の要因は、第 5 回目の解説で述べたエポキシ含浸による線材剥離や[4)]コイル製作過程における線材のキンクなどです。この場合、コイル臨界電流より低い電流で熱暴走が発生します。私たちはこの種の熱暴走を早期熱暴走と呼んでいます。

5 層のパンケーキの第 3 層を人為的に劣化させてポリマー含浸したコイルの、77K における励磁結果を図 3 に示します[5)]。コイル臨界電流（98 A）の 54 %の電流で早期熱暴走が発生しています。第 3 層には早くから劣化による発熱がみられますが、劣化層は n 値が低いので自発的な熱暴走が生じにくく、加熱された健全な隣接する第 2 層から熱暴走が生じます。熱暴走開始時の発熱量は 1.5W です。含浸コイルの場合、1 W が熱暴走

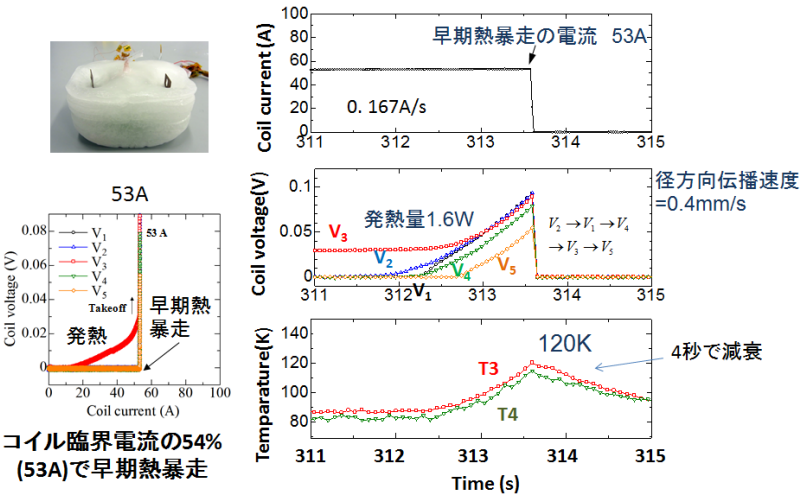


図 3　ケース 2 の熱暴走の実験例


© ISTEC 2012 All rights reserved.

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-5717

の目安になるようです。

図 4 に、含浸コイルと非含浸コイルにおける熱暴走発生の電流を示します。 (a)は劣化部の n 値が 1.5、(b)は 2.4 の場合の早期熱暴走（ケース 2）、(c)は自然クエンチによる熱暴走（ケース 1）です。非含浸（赤いゾーン）の場合、液体窒素で直接冷却するので発熱が効率よく冷却され、熱暴走電流がコイル臨界電流付近にまで増加します。このように、冷媒による直接冷却は熱暴走を抑制する上で有効です。熱暴走発生時の発熱は約 5W で、含浸コイルの 3 倍の発熱まで熱暴走が生じないことが分かります。(b)の場合、含浸コイルでも熱暴走電流はコイル臨界電流近くまで増加します。即ち、早期熱暴走電流は劣化レベルに依存します。劣化の無い場合(c)、コイル臨界電流の 130%まで熱暴走は生じていません。

図 1 の松本氏のコイルの熱暴走では [2)]、劣化部の n 値が約 1.5（4.2 K）、熱暴走直前の発熱が 2.1 W、熱暴走電流は臨界電流の約 50 %など、我々の結果とよく対応しています。

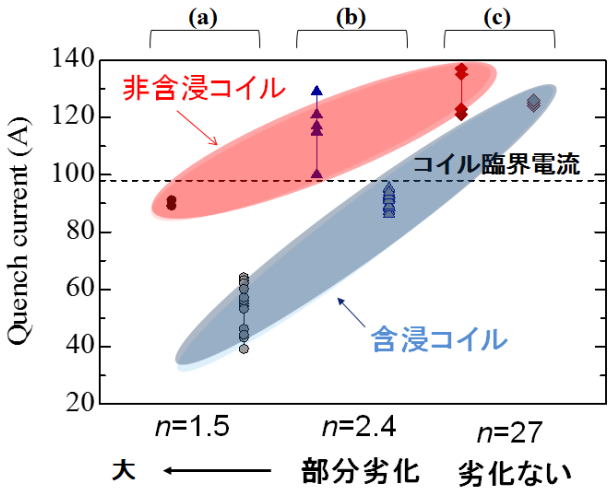


図 4　含浸の有無と熱暴走電流（77 K）

### 3.2 早期熱暴走の抑制法

ケース 2 の早期熱暴走を抑制するには、まず何と言っても REBCO 線材の劣化を防止することが大切です。これについては既に第 5 回に詳しく述べました。次に、冷媒による直接冷却で冷却能力を向上させることも有効です。最近我々は、10 μm のポリイミド絶縁皮膜を電着した線材で、熱暴走の発生が抑制されることを示しました [3)]。もう少し positive な方法として我々が提案しているのがサーマルグリッド法です [3)]。 高熱伝導性の金属をパンケーキ間のスペーサとして使用して径方向の熱伝導を向上させる方法です。

以上、早期熱暴走の発生を抑制するためには、（イ）線材の通電特性の劣化を防ぐ、（ロ）劣化部の発熱を効率よく冷却する、という 2 つの原則に尽きることが分かります。

## 4. 熱暴走による温度上昇

### 4.1 温度上昇の特徴

上記の 5 層パンケーキについて早期熱暴走による温度上昇を数値解析で求めた結果を図 5 に示します（n=2.4）。線材は SuperPower 社の標準品（40 ミクロンの安定化銅）を想定しています。図 5(a)は 77 K の場合ですが、74 A で早期熱暴走が発生します。これは線材電流密度で 185 A/mm$^2$、銅安定化材の電流密度で 463 A/mm$^2$ です。300 K まで温度が上昇するのに約 1 秒、安定化材の融点


© ISTEC 2012 All rights reserved.

に到達するまで 2.6 秒かかります。この電流密度は LTS コイルでも珍しくはありませんが、LTS コイルの場合には常電導伝播速度が速く電流が急速に減衰する（例えば 1 秒以下）ので、温度が過剰に上昇することはありません。一方、REBCO コイルでは常電導部がホットスポットになるので、外部回路で電流を減衰させてコイルを保護する必要があります。コイルが小さくインダクタンスが小さいうちはよいですが、大きなコイルになると電流減衰が間に合わなくなります。

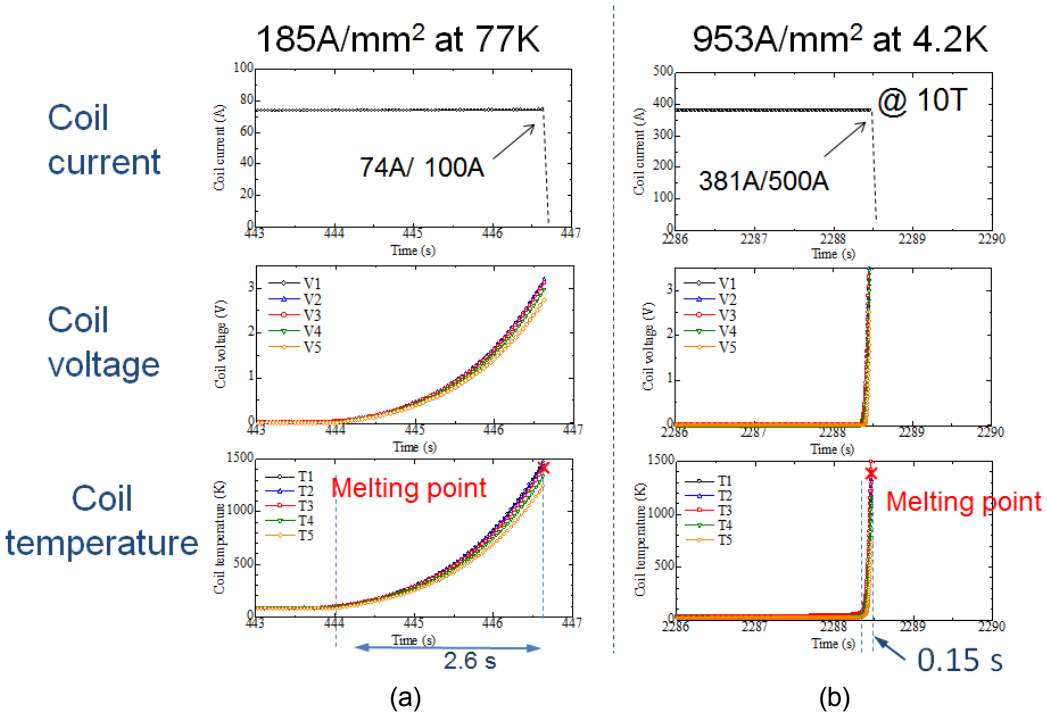


図 5　熱暴走後の温度上昇の解析値。
(a)77 K の場合は 74 A で早期熱暴走が生じる、 (b)4.2 K で 10 T のバックアップ磁場がある場合は 381 A で早期熱暴走が生じる。

図（b）は 4.2 K の場合です。10 T のバックアップ磁場を想定していますが、381 A で早期熱暴走が発生しています。線材電流密度が 953A/mm$^2$ と極めて高く、300K に昇温するまでに 0.1 秒、融点に到達するまでに 0.15 秒と短時間で危機的な状況に至ります。よほど小さなコイルでなければ、回路的な電流減衰に頼る保護方法ではとても間に合いません。

### 4.2 温度上昇の抑制

このように、運転温度が低く運転電流密度が高くなるほど、また REBCO コイルが大きいほど、標準線材を用いたのでは温度上昇が急峻すぎて対応できなくなります。当然ですが、一つの有効な方法は、標準線材より安定化銅を厚くすることです。ただし、電流密度はこれに伴い減少するので、REBCO コイルの利点を打ち消すことになります。今後、REBCO コイルが大型化するに従って、コイル保護はますますシビアになるので、新しいアイデアが強く求められています。

最近 MIT のグループが絶縁なしの巻き線を用いることで、熱暴走による温度上昇を低いレベルに抑制できることを提案していますが [6)]、これは斬新なアイデアです。また、上記のサーマルグリッド法 [3)] もこの様な方向を向いています。


© ISTEC 2012 All rights reserved.

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

**5.** まとめ

REBCO コイルに熱暴走が発生すると、ホットスポットになるので、外部保護抵抗にコイルエネルギーをダンプする形で保護します。ところが、この手法では、大型化、高電流密度化するほど電流減衰が温度上昇に追い付けなくなりコイルの保護が困難になります。今、熱暴走によるコイル温度上昇を効果的に防ぐ新しいアイデアが強く求められています。

参考文献：

1) M. N. Wilson, Superconducting magnets, Clarendon Press Oxford, 1983.
2) S. Matsumoto, T. Kiyoshi, A. Otsuka, M. Hamada, H. Maeda, Y. Yanagisawa, H. Nakagome and H. Suematsu, Generation of 24T at 4.2K using a layer-wound GdBCO insert coil with Nb3Sn and Nb-Ti coils, Supercond. Sci. Technol. 25 025017(2012).
3) Y. Yanagisawa, T. Fukuda, K. Sato, H. Nakagome, T. Takao, H. Kamibayashi, M. Takahashi, and H. Maeda, Use of a Thermal Grid Method to Increase Thermal Runaway Current and Suppress Overheating for YBCO Pancake Coils Operated at 77 K, submitted to ASC 2012, Oregon.
4) T. Takematsu, R. Hu, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, D. Uglietti, T. Kiyoshi, M. Takahashi, and H. Maeda, Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation, Physica C, 470, 674–677 (2010).
5) Y. Yanagisawa, E. Okuyama, H. Nakagome, T. Takemastu, T. Takao, M. Hamada, S. Matsumoto, T. Kiyoshi, A. Takizawa, and H. Maeda, The mechanism of thermal runaway due to continuous local disturbances in the YBCO-coated conductor coil winding, Supercond. Sci. Technol. 25, 075014 (2012).
6) S. Hahn, D. K. Park, J. Bascunan, and Y. Iwasa, HTS pancake coils without turn-to-turn insulation, IEEE Appl. Supercond., 21, 3, 1592-1595(2011).

超電導 Web21 トップページ


© ISTEC 2012 All rights reserved.

2013 年 1 月 4 日発行

超電導 Web21

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283

【隔月連載記事】

# 超電導マグネット開発のこれまでとこれから（その 7）

独立行政法人 理化学研究所
生命分子システム基盤研究領域 NMR 装置技術研究チーム
施設長　前田秀明

千葉大学大学院工学研究科　柳澤吉紀

今回は、REBCO コイルの磁場強度や磁場の時間的な変動に大きな影響を与える遮蔽電流が作る磁場について述べることにします。

## 1. REBCO コイルにおける遮蔽電流磁場とは?

REBCO 線材はテープ形状をしています。線材は幅数ミリメートル、厚み 1 ミクロンの REBCO 超電導層を持ちます。REBCO 線材で巻いたコイル（REBCO コイル）に電流を流すと、コイルの内部に磁場が発生し、この磁場が REBCO 超電導層に加わります。磁場はコイルの軸方向（すなわち垂直向き）成分と径方向（すなわち横向き）成分に分けることができます。径方向（横向き）成分は REBCO 超電導層に垂直に印加されます。超電導体は磁場の変化を嫌うので、この磁場を打ち消すように、REBCO 超電導層に遮蔽電流と呼ばれる電流が誘導されます（図 1）。この遮蔽電流は REBCO コイルに付加的な磁場を発生させます。これを遮蔽電流磁場と呼びます。遮蔽電流磁場によって、(1)中心磁場強度がヒステリシスを持ち磁場強度が減少する、(2)中心磁場が時間的にドリフトする、(3)磁場の分布が歪むなどの影響が生じます。精密な磁場が要求される装置では、遮蔽電流磁場の影響は無視できないものになります。反対に、一定の磁場が出ればよいような機器では、遮蔽電流の影響は無視できるとも言えます。

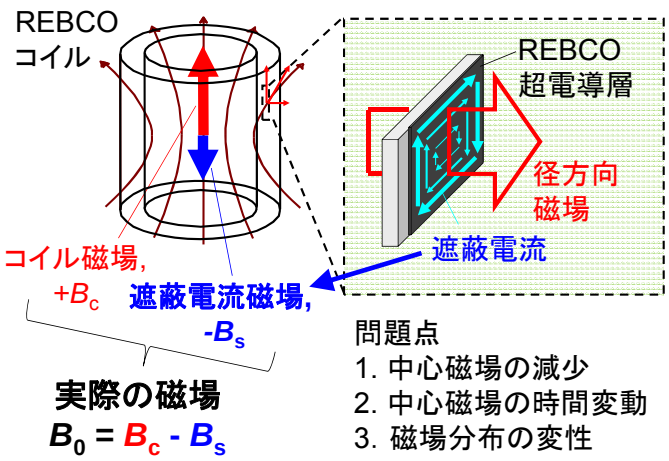


図 1. REBCO コイルに発生する遮蔽電流磁場

実は、遮蔽電流磁場は、1970 年代に開発された $Nb_3Sn$ 拡散テープコイルの時代から問題になっていました。この種のコイルでは、遮蔽電流がフラックスジャンプによるクエンチを引き起こします。このクエンチを防ぐために、ツイストした極細多芯線材が開発されたことは、第 1 回目の解説で述べた通りです。皮肉なことに、現代の技術の精華である REBCO コイルにおいて、再び同じ問題に遭遇したわけです。高温超電導コイルの遮蔽電流磁場は NIFS の Henmi ら [1)]や、MIT の Hahn ら [2)]などにより報告されました。我々の研究室でも、2009 年から遮蔽電流磁場の系統的な研究を行っています [3)]。

なお、低温超電導コイルでも、超電導フィラメントの内部を遮蔽する電流が流れ、これがヒステリシス・ロスを作ります。一般に低温超電導コイルでは遮蔽電流磁場の影響は微小ですが、精密な磁場計測装置を用いれば、ヒステリシスや磁場ドリフトを計測できます。但し、この現象が問題に


© ISTEC 2013 All rights reserved.

なるのは NMR や MRI に限られています。

## 2. 遮蔽電流磁場による現象

### 2.1 中心磁場の減少とヒステリシス

通常、超電導コイルの磁場は、コイル設計をしたときの計算値と、実験で求めた測定値がよく一致します。しかしながら REBCO コイルでは、遮蔽電流磁場のせいで計算値と実験値が一致しなくなってしまいます。実は遮蔽電流磁場は、設計した中心磁場と反対向きに発生するので、実際に REBCO コイルを製作して電流を流すと、中心磁場の値が設計値より遮蔽電流磁場分だけ小さな値になってしまうわけです[4)]。

同じ理由からコイルの磁場は励磁と消磁でヒステリシスを示しますが、これについては後の章で紹介します。

### 2.2 中心磁場の時間変動

超電導体は電気抵抗がゼロですから、いったん遮蔽電流が発生するとずっと流れ続けます。しかし、実際には、遮蔽電流はフラックスフローにより長い時間をかけて少しずつ減っていきます。これは負の遮蔽電流磁場が減少することに対応するので、結果として REBCO コイルの中心磁場が時間とともに正の方向にドリフトします[3)]。

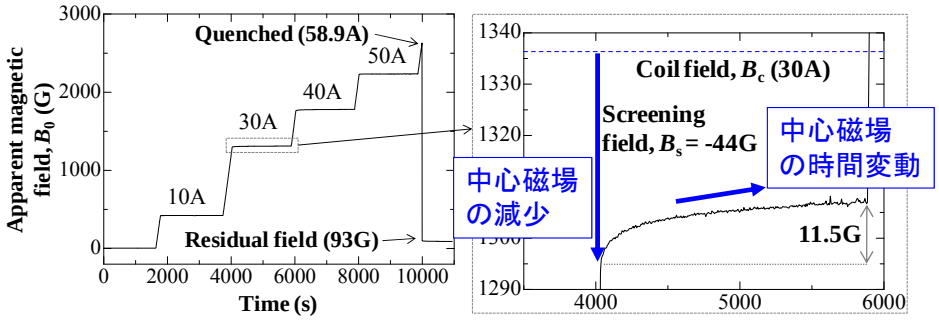


図 2. REBCO コイルにおける中心磁場の時間変動

### 2.3 磁場の空間的な分布の乱れ

また、遮蔽電流磁場はコイル中心近傍の磁場の空間的な分布（または均一度）を乱します。つまり、空間的に均一な磁場を発生させるようにあらかじめコイルの精密な設計を行っても、遮蔽電流磁場が加わることによってこれが歪んでしまいます。エラー磁場が補正しにくい高次成分の場合、大きな問題になります。これらの問題は、時間的に安定かつ空間的に均一な精密磁場が必要とされる NMR、MRI、加速器などの装置では重大な問題になるので、基本的な検討と対策が必要です。

## 3. どのように遮蔽電流磁場に対処するのでしょうか?

遮蔽電流磁場は、REBCO 線材の中の平板な超電導層が原因で起こる物理現象であるため、その発生自体を防ぐことは出来ません。しかし、コイルに流す電流の操作を工夫することで、その影響を低減することができます。この種の手法には電流掃引逆転法[5)]やデマグネタイゼーション法（減磁法）といったものがあります[6)]。また、REBCO 超電導層の長手方向に溝を作ることで、遮蔽電流磁場を 1 桁小さくできます。更に、予め装置に生じる遮蔽電流磁場を数値解析で正確にシミュレ


© ISTEC 2013 All rights reserved.

ーションできれば、遮蔽電流磁場の影響を織り込んだ設計を行うことができます。この意味で、遮蔽電流磁場についての数値解析法の確立は重要です。以下に、中心磁場の時間変動を抑える方法である電流掃引逆転法[3]と、遮蔽電流磁場の数値解析技術について述べます。

### 3.1 中心磁場の時間変動の抑制法：電流掃引逆転法

REBCO コイルを励磁する場合、いったん運転電流以上に電流を増加してから運転電流まで減らすことで、中心磁場の時間変動を抑制できます。これを電流掃引逆転法と呼びます[5]。例を図 3 に示します。通常の励磁方法では、REBCO コイルの中心磁場の値が時間と共に増加していますが（下の方のカーブ）、数%の電流掃引逆転をした場合には、中心磁場の変動が起こらず時間的に安定な磁場が得られています（上の方のカーブ）。これは、電流掃引逆転を行うことで、REBCO 面の上下端に磁束侵入に対するバリアが形成され、結果としてフラックスフローの進展が抑制されるので、遮蔽電流の時間変化が減少し、磁場が安定になるからです。

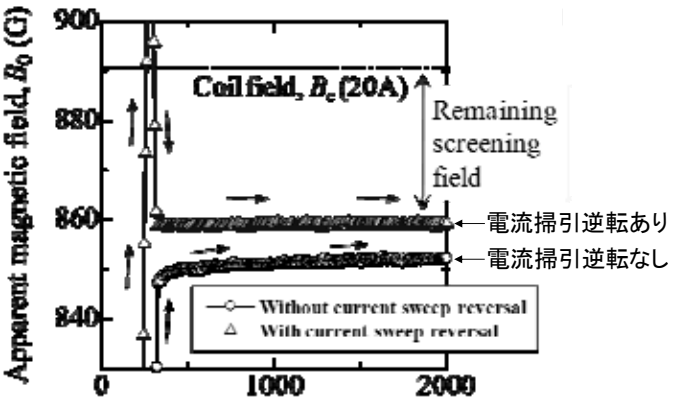


図 3. 電流掃引逆転による磁場変動の抑制

NMR や MRI の低温超電導磁石では、電流掃引逆転法は広く用いられており「オーバーシュート」とか「オーバーフィールド」と呼ばれています。低温超電導の超電導フィラメントは数十 μm と REBCO 線材の幅より 2 桁以上小さいので、REBCO よりずっと小さい電流逆転（0.1-0.2 %）で磁場が安定になります。おもしろいことに、低温超電導コイルでは電流逆転をしない場合、図 3 とは逆に、磁場は時間に対して負のドリフト（減少）を示します。これは軸方向の磁場を遮蔽するための遮蔽電流磁場が支配的であるためです。

### 3.1 遮蔽電流磁場の数値解析技術

遮蔽電流磁場の発生は超電導体に特有の現象ですが、電磁気学におけるマクスウェル方程式と高温超電導体に特有の電界-電流密度特性を組み合わせることで正確な数値解析を行うことができます。遮蔽電流磁場の数値解析手法には有限要素法を用いた厳密な手法[7]や、超電導薄板モデルを用いた比較的簡易な手法などがあります。ここでは筆者らの開発した、超電導薄板モデルを用いた手法による解析[4]の例をみてみます。図 4(a) に小型の REBCO コイルの中心磁場を測定した結果を示します（実線）。磁場には先ほど述べたヒステリシス効果が現れていますが、これが遮蔽電流磁場による影響です。図 4(b) ではこのうち遮蔽電流磁場の成分だけを抜き出してプロットしています（実線）。どちらの図にも数値解析により求めた結果を破線で示しており、実験結果と数値解析結果がよく一致していることがわかります。

この数値解析手法を用いて検討した結果の一例を図 5 に示します。これは、REBCO コイルがどのような形状の場合に、コイル中心における遮蔽電流磁場が大きくなるかを解析したものです。REBCO コイルが薄肉ソレノイド形状の場合やディスク形状の場合には遮蔽電流磁場の値が小さくなりますが、コイル体積を最小にできる最適化形状の場合に、遮蔽電流磁場も大きくなることが分かります。このように数値解析技術を用いれば、コイルを製作しなくても遮蔽電流磁場がどれくらい発生するのかを事前に知ることができます。この技術により、遮蔽電流磁場を考慮した装置設計が可能になります。今後、この種の解析技術はさらに進歩していくと思います。


© ISTEC 2013 All rights reserved.

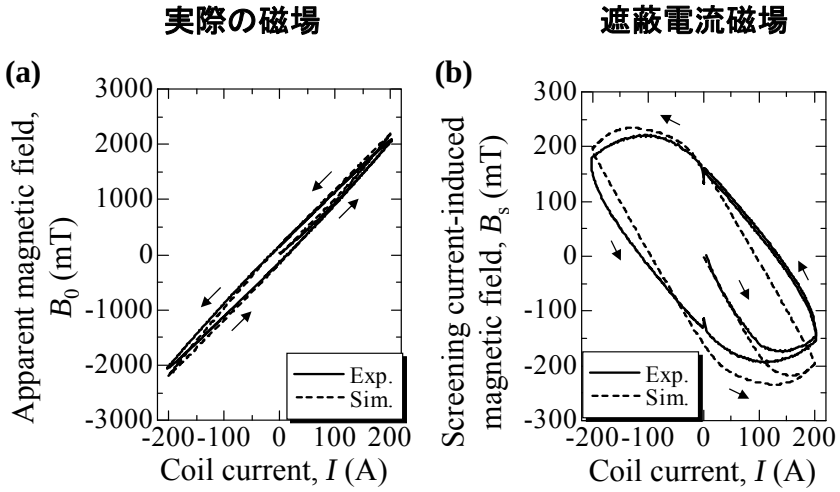


図 4. REBCO コイルにおける遮蔽電流磁場の実験値（実線）と数値解析値（破線）の比較

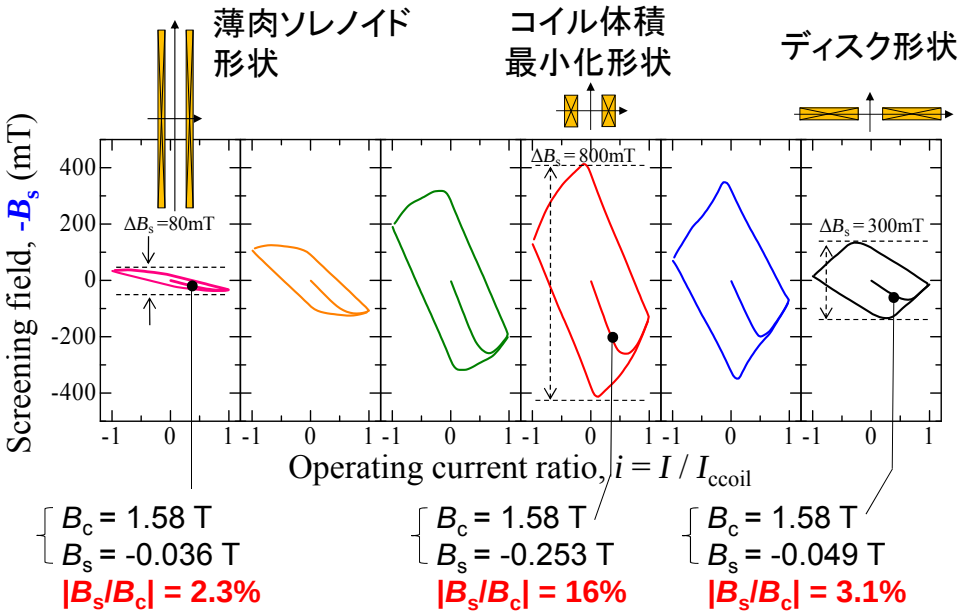


図 5. REBCO コイルの形状と遮蔽電流磁場のヒステリシスの大きさの関係

## 4. まとめ

今回述べたように、REBCO コイルの遮蔽電流磁場については基本的なメカニズムの解明や、数値解析技術などが確立してきています。今後はこれらの知見を活かして、実際の装置における遮蔽電流磁場の影響とその対策を進めていくことが重要です。

これまで、「超電導技術のこれまでとこれから」と題して、超電導の発見の時代から現代の REBCO コイルの開発までを 7 回にわたり解説してきました。REBCO コイルの開発は、NbTi や $Nb_3Sn$ の様な低温超電導コイルでいえば 1970 年代にあたる技術の段階にあります。このころに NbTi や


© ISTEC 2013 All rights reserved.

$Nb_3Sn$ などの低温超電導線材が商品化され、極細多芯線化やクエンチに対する安定化などの新しいコンセプトによるマグネット技術が作られると共に、各種の超電導機器実現にむけた色々な技術開発が花開きました。

このような歴史を振り返れば、REBCO コイルについても、今は基礎技術の構築にじっくりと取り組み、オリジナルなアイデアをたくさん出してしっかりと REBCO コイル技術の基礎を固めることが重要です。さらに、それに基づき色々な応用に取り組み、REBCO コイル技術のすそ野を広げていくことも重要です。今回の解説がこのような REBCO コイル技術の今後の進展の参考になるならば、望外の喜びです。

参考文献：

1) T. Hemmi, N. Yanagi, G. Bansai, K. Seo, K. Takahashi, T. Mito, Electromagnetic behavior of HTS coils in persistent current operation, Fusion Engineering Design 81, 2463-2466 (2006).
2) S. Hahn, J. Bascunan, W. Kim, E.S. Bobrov, H. Lee, Y. Iwasa, Field Mapping, NMR Lineshape, and Screening Currents Induced Field Analyses for Homogeneity Improvement in LTS/HTS NMR Magnets, IEEE Trans. Appl. Supercond. 18, 856-859 (2008).
3) Y. Koyama, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, M. Hamada, T. Kiyoshi, M. Takahashi and H. Maeda, Towards beyond 1GHz NMR: mechanism of the lonh term drift of screening current-induced magnetic field in a Bi-2223 coil, Physica C 469, 694-701 (2009).
4) Y. Yanagisawa, H. Nakagome, D. Uglietti, T. Kiyoshi, R. Hu, T. Takematsu, T. Takao, M. Takahashi, and H. Maeda, Effect of YBCO-Coil Shape on the Screening Current-Induced Magnetic Field Intensity, IEEE Transaction on Applied Superconductivity 20, 744-747 (2010).
5) Y. Yanagisawa, H. Nakagome, Y. Koyama, R. Hu, T. Takao, M. Hamada, T. Kiyoshi, M. Takahashi, and H. Maeda, Effect of current sweep reversal on the magnetic field stability for a Bi-2223 superconducting solenoid, Physica C 469,1996–1999 (2009).
6) Y. Yanagisawa, Y. Kominato, H. Nakagome, T. Fukuda, T. Takematsu, T. Takao, M. Takahashi, and H. Maeda, Effect of coil current sweep cycle and temperature change cycle on the screening current-induced magnetic field for YBCO-coated conductor coils, Advances in Cryogenic Engineering 57, 1373-1380 (2012).
7) N. Amemiya and K. Akachi, Magnetic field generated by shielding current in high $T_c$ superconducting coils for NMR magnets, Supercond. Sci. Technol. 21 095001 (2008)

超電導 Web21 トップページ


© ISTEC 2013 All rights reserved.