

第5章 Y系線材を用いた SMES 用コイル開発

5. 1 まえがき

前章において、Y系線材の SMES コイル適用へのポテンシャルの高さを明らかにしたことから、Y系コイルの高温運転や高磁界コンパクト化により SMES の信頼性・効率向上や大容量化が可能と考える。しかしながら、Y系線材は、従来の超電導線材と全く製造プロセスや構成が異なり、基板に薄膜を積層した非対称構造であり、また、同じテープ状の Bi-2223 線材と比較しても断面のアスペクト比が極めて高いテープ状の構造をしている。このため、Y系線材特有の構造を活かす観点から線材の安定化、コイルの巻線、電極形成、樹脂含浸等の各製造プロセスについて検討し、Y系線材のコイルへの適用性について評価する必要がある。

初めに Y系線材特有の構造を活かす観点から線材の安定化、コイルの巻線、電極形成、樹脂含浸の各製造プロセスについて独自に検討し、Y系線材のコイルへの適用性について評価することでコイル化基盤技術を開発した。次に、開発したコイル化技術を基に Y系線材を用いてコイルを製作し、その各種特性を評価・検証した。

当初、Y系線材を用いたコイルの製作実績がほとんどなかったため、初めに浸漬冷却型コイルを製作し、簡便に特性評価が可能な液体窒素試験により Y系線材を用いたコイルの基本的な特性評価を実施した。その結果、 $1\text{ }\mu\text{V/cm}$ 基準での I_c に対する負荷率が 90 %を超えても安定に長時間通電が可能であることや I_c 基準電界の 100 倍を超えても短時間過負荷通電が可能であることなど、従来の金属系超電導コイルと比べ、Y系コイルは液体ヘリウム温度より高温での運転が可能であることに加え、液体窒素温度での大きな熱容量により温度安定性が高いことが確認された[1]-[2]。次に、10 T 級の高磁界・大電流が必要とな

る SMES コイルへ Y 系線材を適用することを考えた場合、前章で述べたように、Y 系線材通電特性の磁界および温度への依存性や冷凍機による冷却コストや信頼性から、20 K 温度領域が適しており、冷凍機を用いた伝導冷却が必要と考えられる。そこで、伝導冷却方式のためのコイル化技術の開発を行い、伝導冷却型コイルの製作とともに試験による評価を行った。

本章では、世界に先駆けて長尺 Y 系線材を用いて実施した SMES に必要な伝導冷却方式のコイル化技術開発、その技術を適用した Y 系コイルの開発およびその特性評価結果について述べる。

5. 2 Y 系線材のコイル化技術開発

第 4 章で Y 系線材の引張歪、曲げ歪等の基本的な機械特性について評価したように、Y 系線材は Bi 系より極めて高い特性を示す。一方で、コイル化加工プロセス等において特異な応力歪みが負荷された場合、Y 系線材特有の構造に起因する積層界面からの剥離等が懸念される。特に電極部での接続や端末処理等においては新たな技術課題が発生することもあると考えられる。そこで、コイル化技術の開発において、線材構造や伝導冷却コイル構造からの視点で巻線・絶縁・含浸・電極形成技術等の課題を検討・評価した。

5. 2. 1 コイルの巻線技術

シングルパンケーキ形状のコイルはテープ状線材の巻線に適しているが、高磁界となるコイル内周部での端子形成・接続処理が必要となり、また、損失低減や電磁力対策を図る必要がある。一方、コイル外周部のみで線材両端の端子形成・接続が可能なダブルパンケーキ形状は、これらの課題に対してコイル製作上多くのメリットを有するが、コイル最内層で線材に捻り曲げ歪が負荷されるため、その影響への配慮が不可欠となる。

Y系テープ線材を用いてコイルを製作する場合、従来の線材と異なりY系線材は低抵抗電流導入部となる超電導面が線材の片面に制約されている。このため、上記メリットに加え、両端電極がコイル最外周となるダブルパンケーキ形状は、シングルパンケーキ形状と異なり、コイル両端（両電極）での電流導入部を同一方向（超電導面側）に製作可能であるため、Y系線材のコイル化において優位である。しかしながら、ダブルパンケーキ形状では最大曲げ歪みが負荷される最内層においてY系線材に対して幅方向への曲げも同時に負荷される捻り方向への曲げ歪みとなるため、曲げ歪みによる劣化が最も懸念される部分である。このため、ダブルパンケーキ型コイル最内層の曲げ歪を模擬したY系線材の曲げ歪み特性を評価することで、Y系線材の巻線性を検証した。

(1) 捻り曲げ実験方法

最大径 ϕ 100 mm から最小径 ϕ 24 mm までのジグを用いて、図 5-1 に示す捻り曲げ用ジグを用いてダブルパンケーキコイル最内層の曲げ歪を模擬した捻り曲げ（1 ターンで線材幅方向に線材幅 10 mm 程度転位）試験を実施した。この場合、試料には線材幅広面垂直方向（以下、フラットワイズという）および線材幅方向（以下、エッジワイズという）の歪が同時に負荷されることになる。

短尺 Y 系線材の試料仕様を表 5-1 に示す。本試料は最小直径 ϕ 24 mm のジグに巻き付けるため、完全にジグ側面に沿わせる場合、線材全体の厚さ、幅から算出すると、最大 0.50 % のフラットワイズ曲げ歪とともに最大 3.5 % のエッジワイズ曲げ歪が負荷されることになる（図 5-1 参照）。しかしながら、ダブルパンケーキ型のみ可能となる、最内層巻き付けジグ面を線材捻り形状に合わせて三次元的に成型することで[3]、エッジワイズ歪を緩和することも可能であるため、実際にはやや自然に捻られる状態での歪を試料に負荷した。曲げ歪を負荷した試料は液体窒素中で浸漬冷却し、四端子法によりその I - V 特性を測定した。

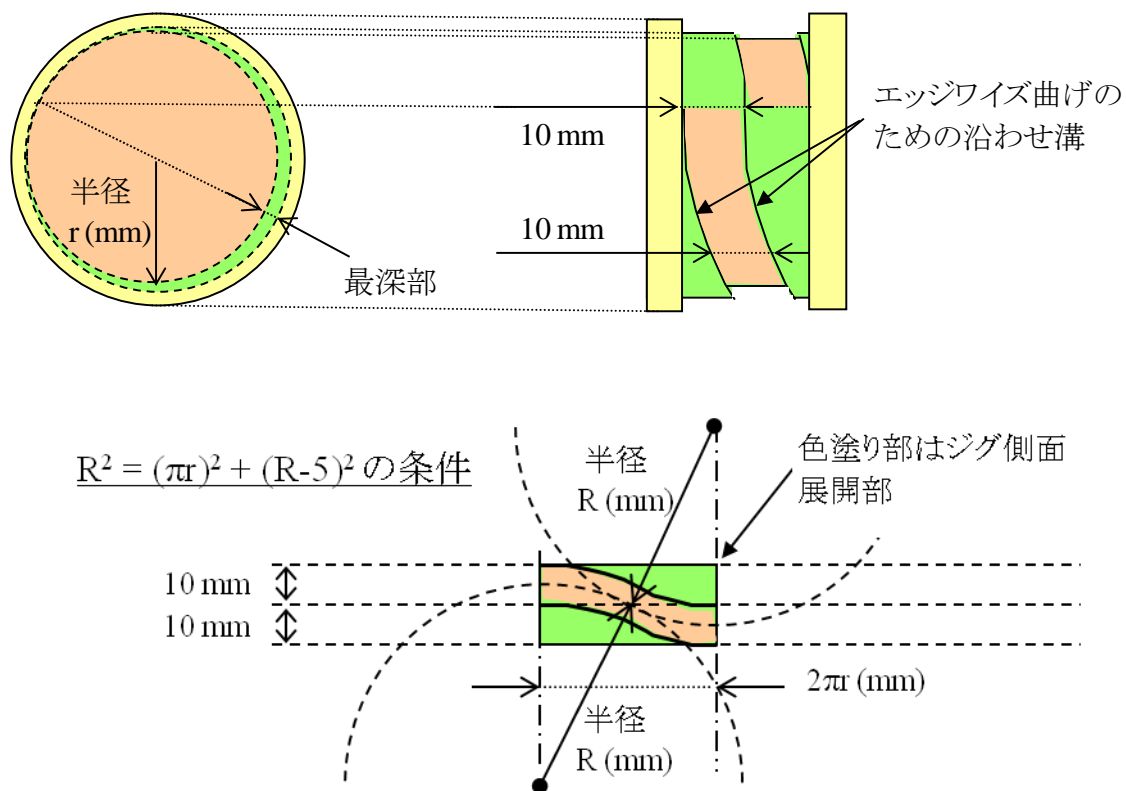


図 5-1 ダブルパンケーキ型コイル最内層の捻り曲げ歪模擬試験用ジグ
(r はフラットワイズ曲げ半径、 R はエッジワイズ曲げ半径)

表 5-1 捻り曲げ試験用 Y 系線材サンプル

線材種類	IBAD/ CVD-YBCO
線材厚さ	120 μm
線材幅	10 mm
I_c @ 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$	133 A @ 77 K, 自己磁界
n 値	40 @ 77 K, 自己磁界

(2) 捻り曲げ実験結果および考察

I - V 特性により得られた I_c の捻り曲げ依存性を図 5-2 に示す。 I_c 低下の定義を 1 %以上とした場合、劣化が敏感に表れる低電界側においても曲げ直径 ϕ 40

mm 付近まで I_c 低下が観測されなかった。このことから、同程度の小口径のダブルパンケーキ型コイルであっても同様の曲げ方法で最内層を形成することでエッジワイズ曲げ歪を低減し、 I_c 低下を抑制することができ、また、SMES 用の実規模コイル製作においては m 級の大口徑コイルとなるため、最内層における歪みの影響は無視できる。

また、図 5-2 において一般的な $1\ \mu\text{V}/\text{cm}$ 電界基準より低電界側および高電界側での電界基準でみた場合においても捻り曲げによる I_c 低下は同様の傾向であったことから、 I_c の低下は I_c の基準電界の値には依存していないことが確認された。高温超電導コイルの場合、定常状態でどの基準電界までフロー損を許容できるかは、発熱と冷却のバランスからコイルおよび冷却システムの詳細設計が必要となるが、 I_c の低下開始が基準電界に依存していないため、設計において最大電界を決定する上で、ダブルパンケーキコイル特有の最内層の捻り歪に対する考慮を不要とすることができる。

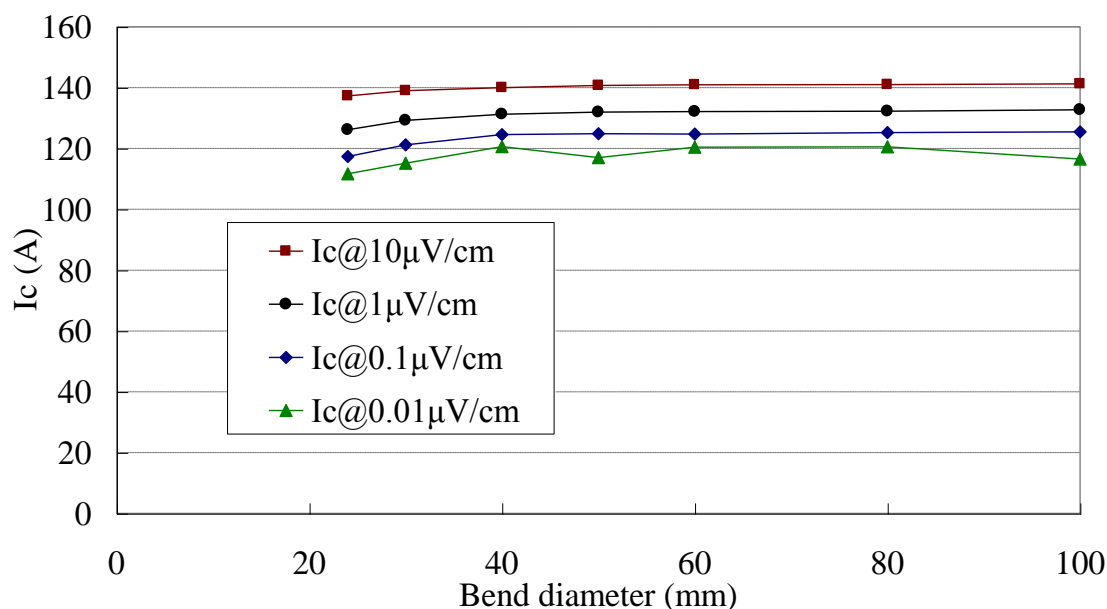


図 5-2 Y 系線材 I_c の捻り曲げ歪依存性

5. 2. 2 コイルの電極形成技術

コイルの電極形成に関しては、接続部でのジュール発熱低減のための低抵抗かつ均質な接続技術とともに、Y系線材の場合は特に剥離し易い傾向にあるため、接続部でのハンドリングミスや局所的な応力集中を避け、通電時の電磁力に耐える強固な構造が要求される。このため、電極形成において局所歪みを緩和し、かつ強固に保持できる電極構造を設計・試作した（図 5-3 参照）。

ここで、200 °Cを超える温度では Y系線材は保護層の Ag が酸素を透過しやすくなり、酸素欠落による通電特性の低下が懸念される。実験により約 200 °C のピーク温度で数分間 Y系線材を加熱した場合に I_c 低下が 1 %未満である一方

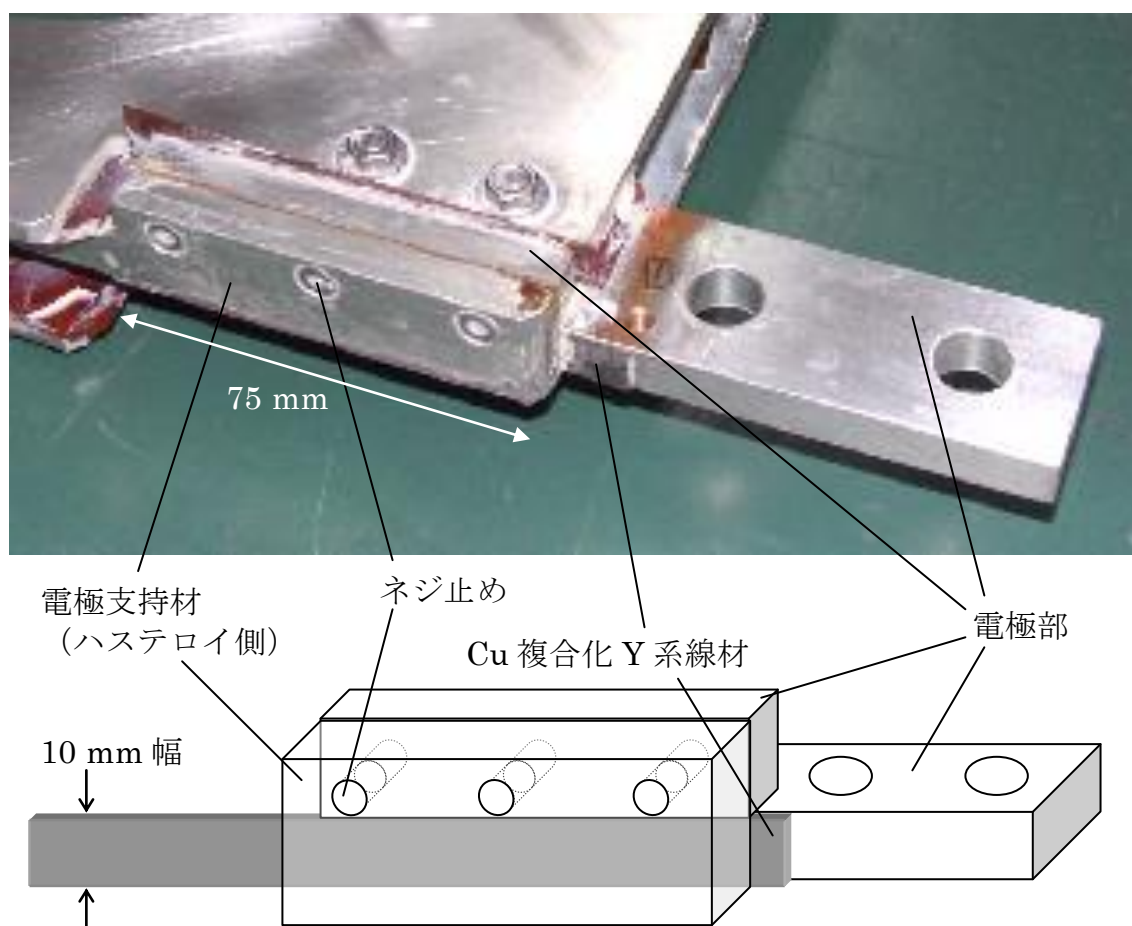


図 5-3 設計・製作した Y系線材コイル電極

で、さらに 20 °C 温度を上げた条件では I_c 低下が 10 %であることを確認した。
このため、電極でのハンダに 140 °C の低温ハンダを用いることとした。

また、損失低減や並列導体での均流化を考慮し、Cu 安定化 Y 系線材の YBCO 層側を電極の比較的長い直線部に接続し、抵抗値を評価した。短尺線材両端との接続長を 25 mm と 65 mm とした電極部を 3 対製作し、液体窒素中で測定した時のそれぞれの I - V 特性を図 5-4 に示す。この結果から、直線状での接続部形成により均質な接続抵抗が比較的容易に実現可能となるとともに、接続部長さの調整により任意の接続抵抗値が比較的容易に実現可能となると考えられる。

製作したコイルを通電した時の電極接続部の電圧測定結果を図 5-5 に示す。接続長 75 mm の電極部の抵抗は図 5-4 から予想される結果よりやや小さい $0.15 \mu\Omega$ を達成し、 $10^{-7} \Omega$ クラスの低抵抗接続電極を実現することができた。

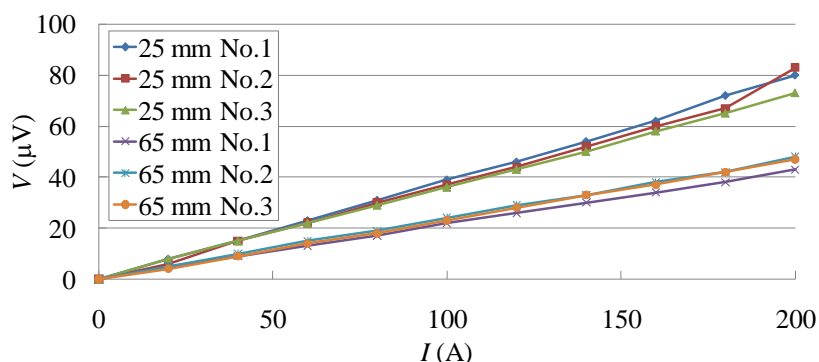


図 5-4 直線状 Cu 安定化線材を用いた電極接続部の I - V 特性

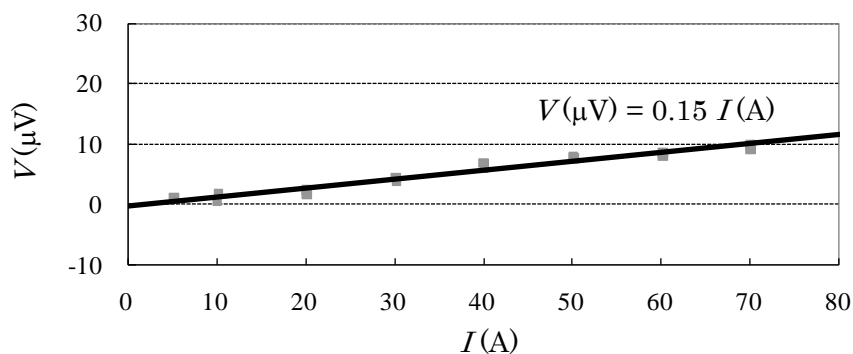
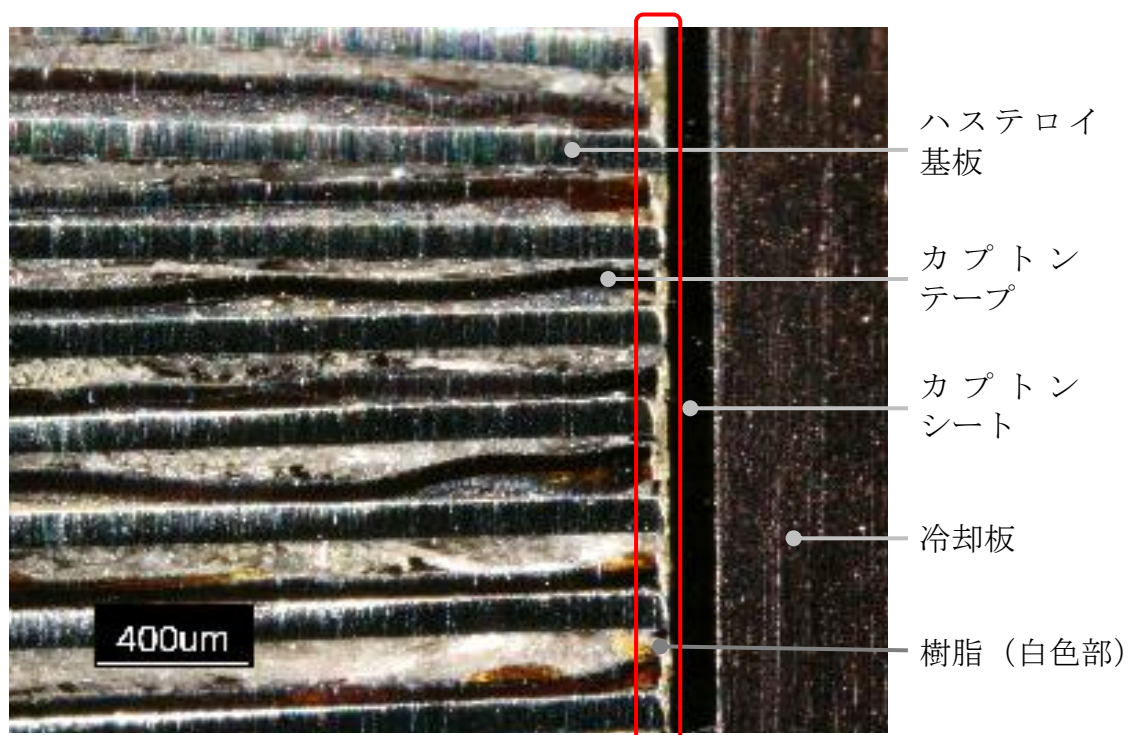


図 5-5 試作した Y 系コイル電極の通電試験結果

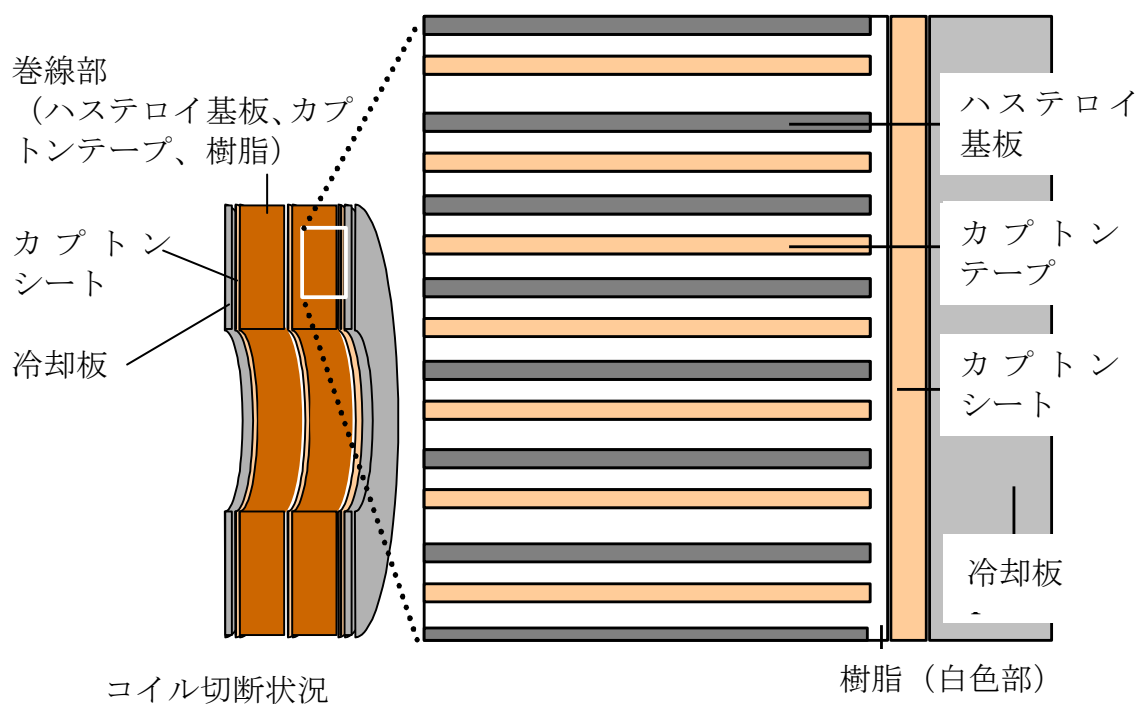
5. 2. 3 コイルの樹脂含浸技術

従来の超電導コイルの冷却には、一般的に液体ヘリウム冷媒を用いた浸漬冷却が実施されてきたため、コイル内部にスペーサを入れた冷媒の流路確保等の方法も考慮されてきた。一方、伝導冷却方式においては、基本的にコイルから冷凍機まで、少なくともコイルからコイル外部の冷却板までの伝熱経路は固体熱伝導によるため、その熱抵抗の低減に努める必要がある。特にコイル内部での熱的接触が不十分であるとコイル内部の熱排出が不十分となり伝導冷却能力が著しく低下する。伝導冷却型コイルを製作する場合、熱的接触を左右する絶縁・含浸技術は重要であるが、Y 系線材は断面形状が従来の丸型線材や楕円型線材と異なるテープ型矩形形状であるため、コイル内部へ樹脂が十分に浸透するかどうか懸念される。このため、伝導冷却板から巻線部最深部までの距離が短く、かつ、均等となるパンケーキ型を採用し、内側電極を回避するため、ダブルパンケーキ型に決定した。また、冷却板と巻線部との熱抵抗の低減には熱接触が重要となるため、樹脂含浸について検討した。

当初実施したエポキシ絶縁含浸では、断面観察結果、巻線部と冷却板の間に空隙層が含まれており、樹脂浸透が十分でないことが判明した。このため、新たな含浸樹脂の適用を検討し、樹脂浸透の改善を試みた。コイル製作において 140 °C の低温ハンダを使用可能とするため、120 °C 以下で乾燥・硬化させることができ、また、浸透度を高め、充填率を高めるため、粘度が 2 桁低く、硬化収縮の小さいエポキシ系樹脂（粘度：50 mPa・s @ 25 °C、硬化収縮率：4 %）を開発した。この樹脂を用いて、絶縁用粘着カプトンテープをハステロイ基板に貼り合わせた模擬線材を巻線したコイルを含浸し、その浸透度について調査するため、樹脂含浸後のコイル巻線部を切断し、断面を観察した。その結果を図 5-6 に示す。伝導冷却のための冷却板をコイル側面に設置しているため、最も重要となる冷却板と巻線部間の樹脂浸透度が懸念されたが、十分に浸透して



(a) 樹脂含浸コイルの切断面拡大写真



(b) 樹脂含浸コイルの切断面拡大イメージ図

図 5-6 樹脂含浸されたダブルパンケーキ型コイルの樹脂浸透状況

充填されていることが確認された（図 5-6 赤線部内側）。今回開発した樹脂は、巻線間に充填されて熱的接触が改善されたことにより、熱抵抗が低減され、伝導冷却方式においてもコイルの熱安定性に寄与すると考えられる。

5. 3 伝導冷却型 Cu 安定化コイルの開発

Y 系線材を実用線材として用いるには、高価な Ag は保護層としての役割に限定し、熱安定化層としては安価な Cu を必要な厚さ付加することが必要である。そこで、Cu テープと複合化させ、安定化させた Y 系線材を作製し、その特性を評価した。さらに、この線材を用いて、これまでに検証した絶縁・含浸・電極形成・巻線技術を反映して、伝導冷却型ダブルパンケーキコイルを製作し、伝導冷却特性を評価した。

5. 3. 1 Y 系線材の Cu 安定化技術開発

実用化コイルには、万一の場合に備えてクエンチによる焼損等を避けるため、Y 系線材に適正な安定化加工を行う必要がある。Y 系線材は従来の構造と異なる薄膜積層構造であり、これまでは、超電導層の保護の役割を果たす Ag 層を厚く超電導層の上にスパッタリングし、最低限の厚さの安定化層としての役割も兼務させることで線材を作製し、評価してきた。しかし、Y 系線材を実用線材とするには、安価な線材を目指して安定化コストを低減することが必要であり、また、応用機器に応じてはより厚い安定化層が必要となる。また、安定化後にコイル加工等を経験するため、その各プロセスにおいて引張・曲げ応力、熱履歴、ならびにコイル冷却時の熱応力、コイル通電時の電磁力等により Y 系線材に応力歪みが負荷されることに注意する必要がある[4],[5]。

Y 系線材の Ag 層表面に Ag 入り低温ハンダを用いて Cu テープと複合化した

Cu 安定化 Y 系線材を作製した。その断面拡大写真を図 5-7 に示す。また、評価に用いた Y 系線材の Cu 複合化前後の I_c の長手方向分布を図 5-8 に示す。長手方向の位置により Cu 複合化前後の I_c の変化割合に差異がみられるが、長尺線材の連続測定のため線材長手方向の位置が Cu 複合化前後で正確には一致してはいないことや、製作精度の違いにより長尺では Cu 複合化時のハンダ厚さが均一でないことによる影響と考えられる。全体としての分布傾向では一致しており、Cu 複合化により I_c が低下傾向にあることが確認できる。このことによる劣化の有無を確認するため、30 cm 長の Y 系線材を用いて Cu 複合化前後、およびハンダを溶かして Cu テープを取り外した後の各 I_c を測定、比較することで I_c 低下の原因を調査した。その結果、Cu 複合化前に 83.8 A の I_c は Cu 複合化後に 83 A となったが、Cu テープ取り外し後は 83.8 A に回復した。このことから、Cu 複合化による I_c 低下は、ハンダ融点からの常温への冷却、さらに I_c 測定時の液体窒素冷却により、線膨張係数の大きい Cu から YBCO 層に圧縮歪みが負荷されたことに起因すると考えられる。よって、Cu 複合化に起因する I_c 低下は劣化となる不可逆的な I_c 低下ではないと考えられるため、若干の低下分をコイル設計に反映すれば、Cu テープ複合化による Y 系線材の安定化技術は問題ないを考える。この方法により、Cu テープ厚さを容易に調整することが可能であるため、今後要求されるコイルの温度安定性に応じ、Cu 安定化 Y 系線材を提供することを可能とした。

5. 3. 2 Cu 安定化コイルの製作・検証

超電導コイルを電力機器に応用する際には、機器やその運転パターン等に応じた安定度が要求される。そこで、異なる厚さの Cu テープを用いて安定性の異なるコイルを製作し、その特性を評価した。

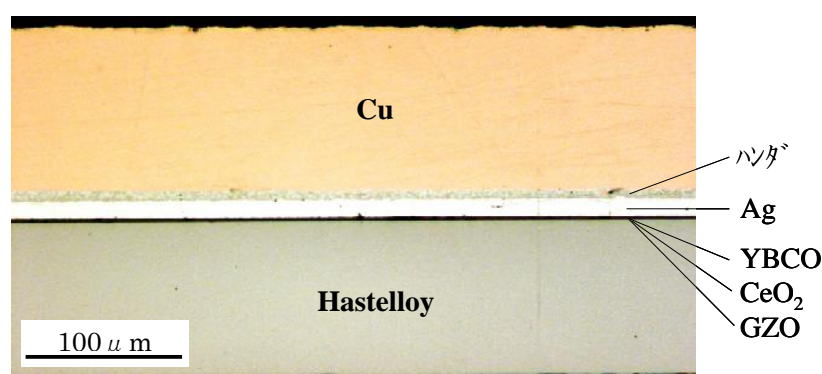


図 5-7 Cu 複合化 Y 系線材の断面拡大写真

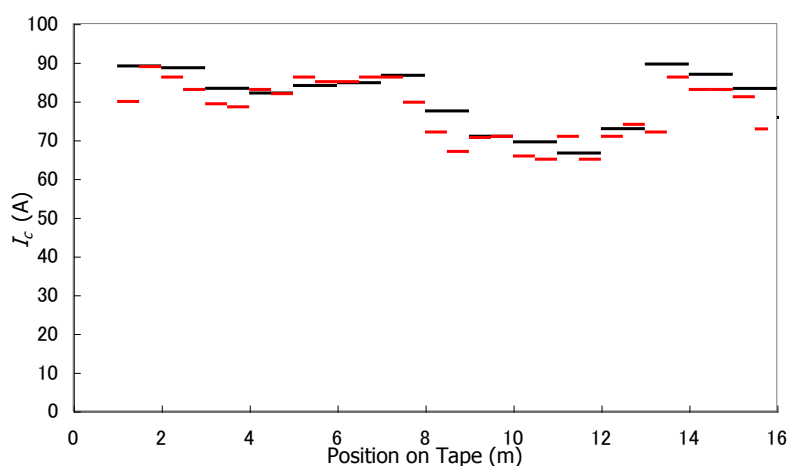


図 5-8 Y 系線材 I_c の長手方向分布（赤：Cu 複合化後、黒：Cu 複合化前）

厚さ 50, 100, 200 μm の Cu テープを線材 Ag 保護層にそれぞれハンダを用いて接合した Cu 複合化 Y 系線材 3 本を用いて、熱安定性の異なるコイル 3 個を製作した。コイル外観写真を図 5-9 に、コイル諸元を表 5-2 に示す。Cu 安定化 Y 系コイルの熱安定性を評価・検証するため、実験では 77 K 液体窒素中で短時間過通電を行い、通電時の I - V 特性を測定した。測定結果より算出した抵抗値の過渡変化を図 5-10 に示す。コイル通電電流が I_c を超過すると複合化 Cu テープ厚さ（断面積）に準じて線材の抵抗値が表れており、ハンダを用いた Cu テープ複合化による Y 系線材の温度安定化加工が問題なく実施されていることを確認した。



図 5-9 Cu 安定化コイル外観

表 5-2 Cu 安定化コイル諸元

線材種類	IBAD/ CVD-YBCO
温度安定化	Cu テープ複合化
線材厚さ（安定化効果の層を除く）	102 μm
Ag 厚さ	20 μm
ハンダ厚さ	5-30 μm
Cu 厚さ	50 μm , 100 μm , 200 μm
コイル形状	ダブルパンケーキ型
巻線部外径	151, 153, 154 mm
巻線部内径	144 mm
巻線部高さ	24 mm
巻数	上段 10 ターン、下段:10 ターン
樹脂含浸および冷却用スペーサ	無
コイル I_c @ 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$	70 A 級 @ 77 K, 自己磁界

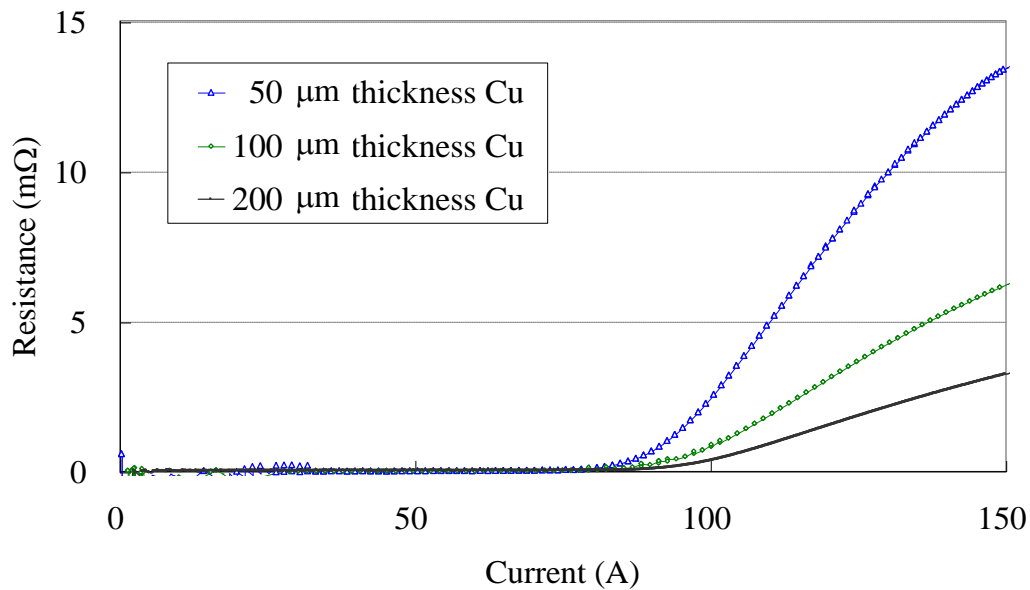


図 5-10 Cu 安定化コイル過通電時の発生抵抗

5. 3. 3 Cu 安定化コイルの伝導冷却特性評価

Cu 安定化コイルの伝導冷却特性を評価するため、「5. 3. 2 Cu 安定化コイルの伝導冷却特性評価」で検証したコイル化手法で新たにダブルパンケーキ型コイルを製作した。用いた Cu 安定化線材は図 5-8 に示した I_c 分布の 2～9.5 m 部分から 7.5 m 切り出した。コイル諸元を表 5-3 に示す。初めに含浸前後の定常時の伝導冷却特性評価を実施し、次に過渡通電時の評価を実施した。

(a) 定常時におけるコイル伝導冷却特性

非含浸コイルを用いて各温度における通電試験を実施し、コイルが安定した状態でコイルの電圧を測定し、コイル I_c の温度依存性を把握した。伝導冷却下での Y 系コイルの性能は未確認のため、 I_c の電界基準は $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ としている。試験結果から得られたコイル I_c の温度依存性を図 5-11 に示す。77 K のデータは液体窒素による浸漬冷却時の測定データであり、その他は冷凍機を用いた伝導冷却時のデータであり、コイル温度は熱電対により電極から最遠部となるコ

表 5-3 Cu 安定化コイル諸元

線材種類	IBAD/ CVD-YBCO
温度安定化	0.1 mm 厚 Cu テープ複合化
線材幅	10 mm
線材長さ	7.5 m
線材最小 I_c @ 77 K	66 A
コイル形状	ダブルパンケーキ型
巻線部外径	203 mm
巻線部内径	195 mm
巻線部高さ	24 mm
巻数	上段: 6 ターン、下段: 6 ターン
自己インダクタンス	52 μ H
冷却用スペーサ	無 (密巻)

イルの最外周表面（カプトンに接着）で計測した。77 K においては $0.1 \mu\text{V/cm}$ より 1 桁高い電界基準の $1 \mu\text{V/cm}$ まで通電したため、その時の電流値も示しているが、発熱量を許容して発生電圧を 1 桁上げても電流値が 2 倍に達しないのに対して、冷却温度を 77 K から 50 K 下げた場合、電流値が 5 倍程度増加しており、冷却による効果が大いことがコイル試験結果より確認でき、前章の SMES コイル解析結果と同様の温度特性に関する傾向が確認できた。また、最適温度領域に必要な伝導冷却方式を用いた場合、コイルは非含浸でも $0.1 \mu\text{V/cm}$ 基準の I_c までは伝導冷却により安定して通電可能であることを確認した。この結果は小型コイルによるものではあるが、大型コイルにおいても同幅線材を用いたダブルパンケーキ型を想定する場合、コイル両側面に接合する伝導冷却板からの線材までの距離が等しいため、有益な結果である。

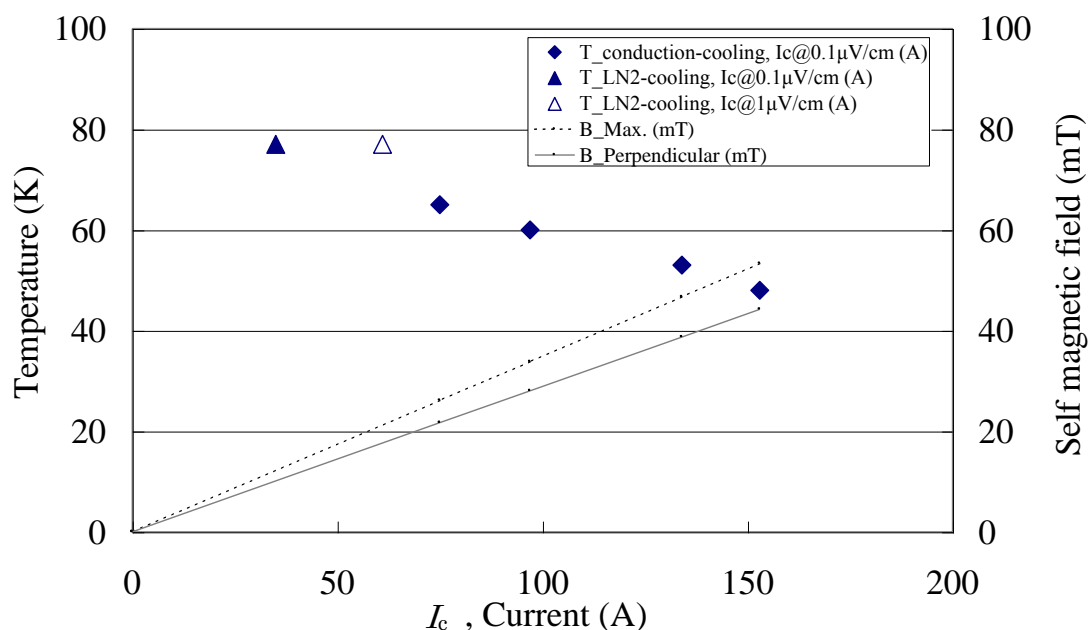


図 5-11 伝導冷却下の CVD-YBCO コイル I_c の温度依存性

次に、樹脂含浸による伝導冷却性能の向上効果を評価するため、コイル樹脂含浸の前後において伝導冷却通電試験を実施した。含浸には「5. 2. 3 コイルの樹脂含浸技術」で開発した巻線部と冷却板間への充填が実現できた樹脂を用いた。伝導冷却によりコイルを一定温度に保持後、交流損失を無視できるようにゆっくりと励磁し、10 A もしくは 20 A 間隔で一旦保持し、1 分程度で電圧が落ち着いてきた時の I - V 測定を実施した。その後、消磁においても同様の方法で I - V 測定を実施した。その時の I - V 特性を図 5-12 に示す。1 $\mu\text{V/cm}$ 基準電界となるコイル電圧は 750 μV であり、その時のコイル電流値は、53 K においても 200 A を上回ると想定されるが、低い電界では 100 A より低い電流においても電圧立ち上がりが観測された。これは、図 5-8 より長手方向の一部に低特性部分が含まれていたことから、コイルの一部の区間において低電流領域から電圧が徐々に発生しているためと考えられる。 I_c はコイル内部の位置で磁界分布に応じて異なるが、コイル化において線材長手方向の低特性部を任意に

低磁界空間に制御することは困難であり、低特性部での集中的な発熱は伝導冷却において回避すべきであるため、SMES コイル用線材には長手方向における特性の均一化が重要である。

また、図 5-12 において、コイル含浸前の一連の励磁・消磁において発生電圧のヒステリシスが明確に観測された。これはフロー損による発熱が一旦大きくなった後に電流を減少しても、排熱が十分できず、コイル内部で温度勾配が生じているためと考えられる。53 K の場合、50 K 等のデータからコイル温度は消磁時において励磁時よりも 1-2 K 程度上昇していると推測される。一方、含浸後はどの温度においても明確なヒステリシスは観測されていない。これは樹脂含浸により熱抵抗が減少し、排熱特性が向上したことにより伝導冷却型コイルの温度安定性に寄与したと考えられ、樹脂含浸が伝導冷却に有効であることを確認した。

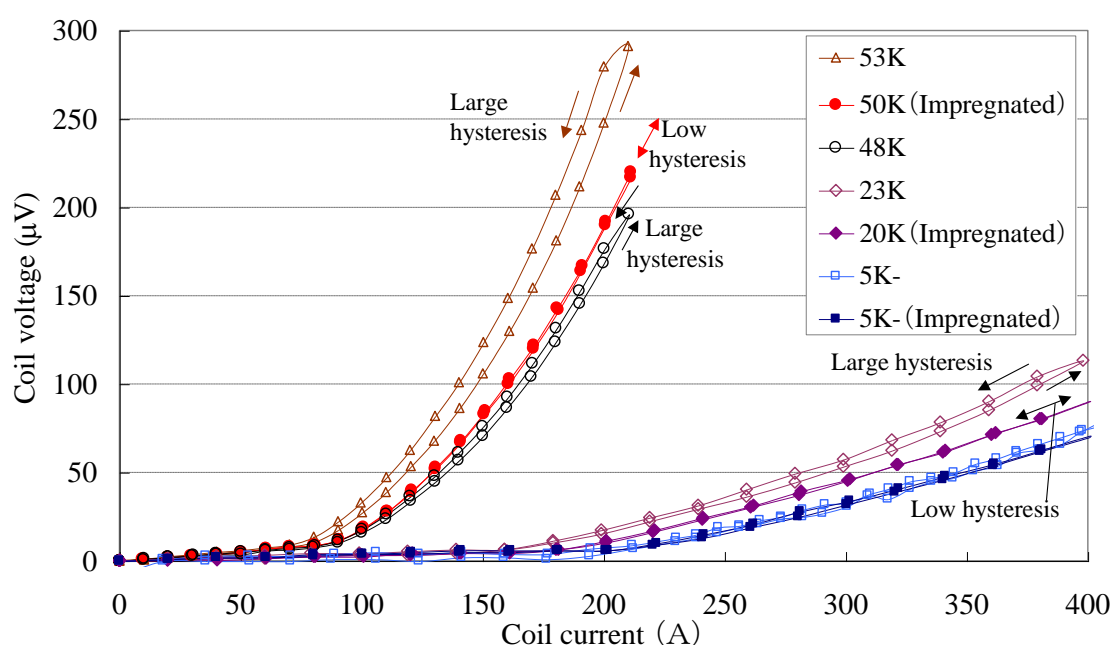


図 5-12 樹脂含浸前後の伝導冷却型コイルの通電特性

(b) 過渡通電時におけるコイル伝導冷却特性

次に、伝導冷却下において Cu 安定化 Y 系コイルの繰り返し充放電試験を実施し、コイルの熱的安定性を評価した。電源容量の制約から伝導冷却温度を 65 K としたが、 I_c の 2 倍を超えるピーク電流の三角波を連続 100 回繰り返し通電した時の試験結果を図 5-13 に示す。1 回目の発生電圧と比較し、充放電を繰り返した後の発生電圧には僅かな増加が観測されたが、これは I_c 基準電界を超える高い電圧でのフロー損失が繰り返されて徐々に蓄積し、コイル温度が僅かに上昇したためと考えられる。しかしながら、コイルの熱暴走は抑えられており、Cu 安定化 Y 系コイルの伝導冷却においても、液体ヘリウム温度より高い温度

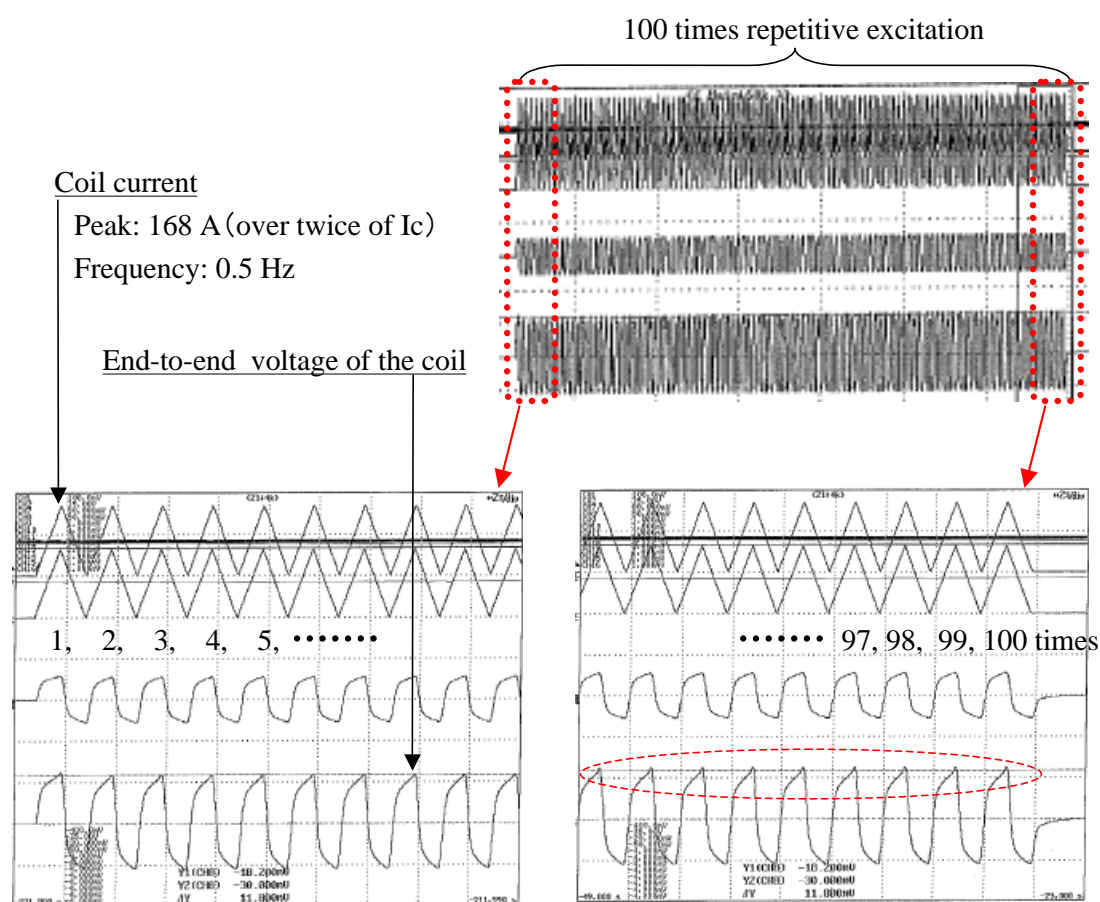


図 5-13 伝導冷却下における Cu 安定化コイルの繰り返し充放電試験結果

領域での熱容量を活かすことが実現できている。パルス運転のような用途では、定格最大電流は熱暴走電流より低く抑える必要があるが、 I_c より高く設定することも可能であり、効果的と考えられる。このため、Y系コイルの運転電流は、用途に応じた発熱特性と伝導冷却特性のバランス、設計裕度を十分に勘案して決定する必要がある。

5. 4 Y系トロイドコイルを用いた SMES 基本動作検証

これまでの Y 系コイルの製作、基本特性の評価・検証試験により Y 系線材を用いたコイルを開発してきた。ここで、電力系統制御 SMES 用途として Y 系コイルの開発を目指す場合、変換器で繰り返しスイッチングされる電流波形に対し、コイルは健全に動作し続けることが必要である。そこで、次章で述べる開発目標 SMES の最適コイル形状であるトロイド形状の小型モデルコイルを Y 系線材を用いて試作・評価するとともに、実際に充放電動作を行う SMES コイルとしての基本動作や耐久性等の検証を実施した。

5. 4. 1 小型 Y 系トロイドコイルの設計検討

これまで SMES に要求される機械特性、電気特性、熱特性等の観点から Y 系線材およびそのコイルを評価し、SMES コイルへの高い適用可能性を検証してきた。SMES コイルは高い磁界を発生するため、自己磁界による通電容量の低下や交流損失の増加を抑制することが重要であるとともに、周辺機器への磁界の影響を考慮することが必要である。SMES コイルにトロイド形状を適用した場合、漏洩磁界を低減することができるとともに、垂直磁界成分が低減されるため、通電大容量を確保し、交流損失を低減することができる。また、Y 系線材はその断面アスペクト比が非常に高く、パンケーキ型コイルに適し、トロ

イド型コイルを構成する要素コイルとなる。そこで、SMES コイルとして製作実績のないトロイド型 Y 系コイルを試作し、その製作性を含めた特性の評価・検証を実施した。

SMES 用トロイド型コイル製作に用いた 200 m 級 CVD-YBCO 線材の 77 K、自己磁界での長手方向 I_c 分布を図 5-14 に示す。当時コイル製作に入手可能な線材は長手方向に I_c のばらつきがあり、一部に通電特性の低い部分が含まれていた。まず、試作するトロイド型 SMES コイルの設計諸元を決定するため、以下の条件で設計検討を実施した。

- ・使用線材の I_c 分布は 150 A 前後でばらついているが、解析においては線材 I_c を 150 A 一定とした。
- ・コイル I_c の電界基準を 0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ とし、全長 200 m から I_c がゼロ近傍を取り除いた総長 185 m を用いたトロイドコイルの最大電圧は 1.85 mV 以下（電極接続抵抗除く）とした。
- ・線材総長 185 m から判断し、要素コイルの内径を ϕ 100 mm、分割数を最大 12 とした。
- ・トロイドコイルは SMES 充放電運転のデモ用可視化も考慮し、液体窒素での冷却とした。

図 5-15 に要素コイル数を変えた場合のトロイドコイルの I - V 特性を示し、その主要諸元を表 5-4 にまとめる。線材総長が同じたため、ソレノイド形状となる要素コイル 1 の特殊な場合を除き、要素コイル数が増加するにつれ、インダクタンスは低下するが、コイル I_c は増加している。これは要素コイル数を増加することで図 5-16 に示すように磁界の向きがコイル軸方向と平行に近づき、表 5-4 に示すように要素コイルが経験する磁界の垂直成分が低減される傾向にあり、 I_c 低下が抑制されるためと考えられる。この解析結果を参考に、より大電流通電が可能となるように要素コイル数は 12 とした。

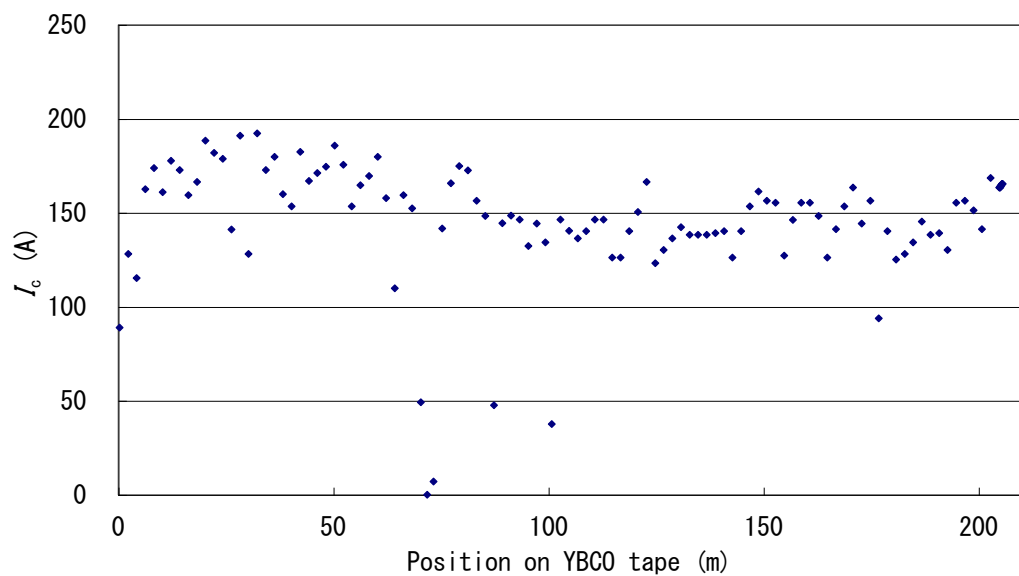


図 5-14 小型トロイド SMES コイル用 CVD-YBCO 線材の I_c 分布

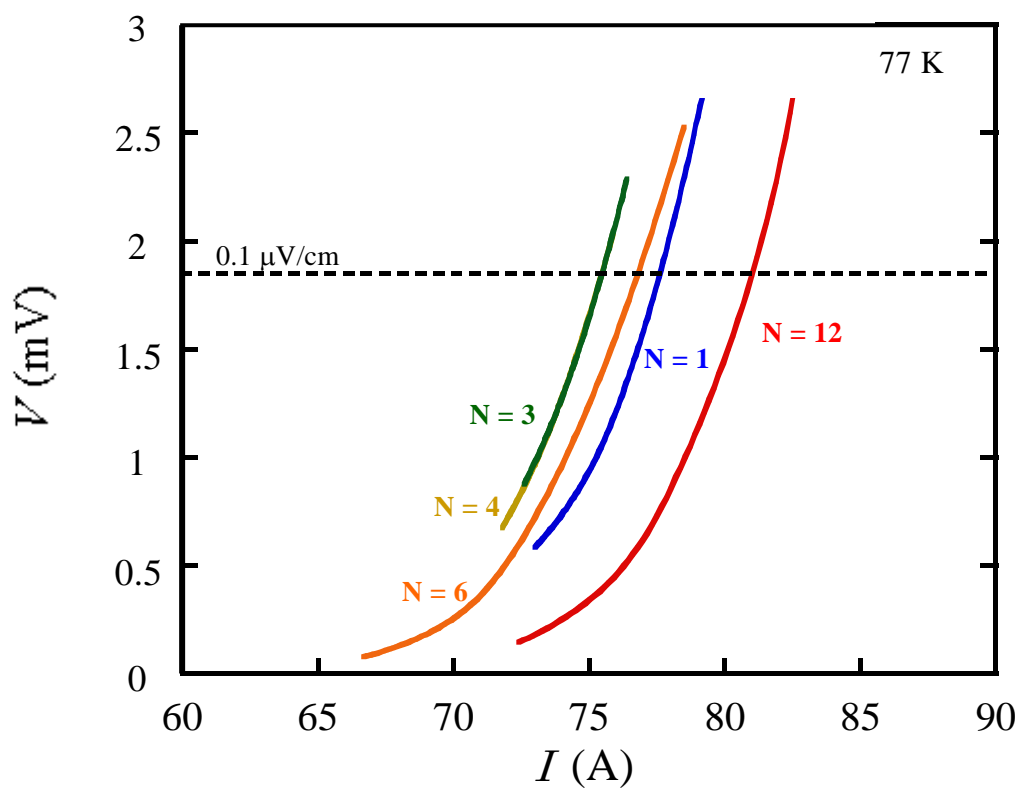
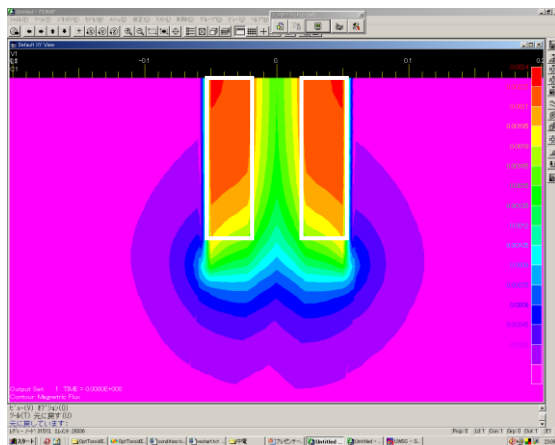


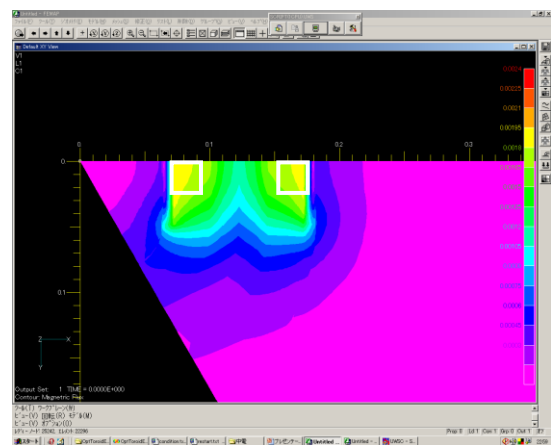
図 5-15 トロイドコイル I - V 特性の要素コイル依存性

表 5-4 要素コイル数とトロイドコイル仕様の関係

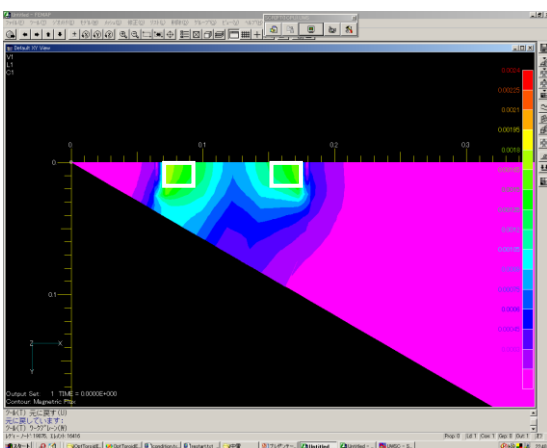
要素コイル数	インダクタンス	I_c	最大磁界	垂直磁界成分
12	5.00 mH	82 A	140 mT	57 mT
6	5.85 mH	77 A	140 mT	75 mT
4	6.66 mH	75 A	140 mT	62 mT
3	7.20 mH	75 A	150 mT	79 mT
1	9.35 mH	78 A	180 mT	71 mT



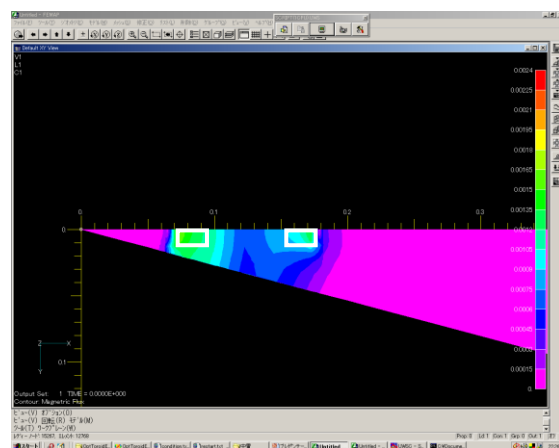
(a) 要素コイル数:1 (180°図示)



(b) 要素コイル数 : 3 (60°図示)



(c) 要素コイル数 : 6 (30°図示)



(d) 要素コイル数 : 12 (15°図示)

図 5-16 トロイド型コイルの磁界分布 (1 A 規格化表示、トロイド中心円平面上を対称性により一部角度のみ表示。白線内部がトロイドコイル部分。)

5. 4. 2 小型 Y 系トロイドコイルの製作・評価

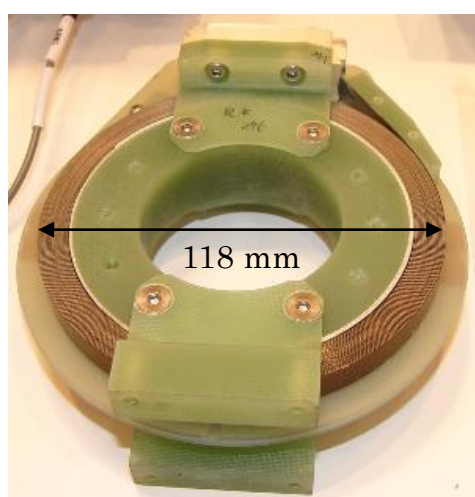
解析結果をもとに 200 m 長 Y 系線材を Cu 安定化後、切断し、小型トロイドコイルの要素コイルを 12 個製作した。コイルの諸元および製作した要素コイル・トロイドコイルの外観をそれぞれ表 5-5 および図 5-17 に示す。各要素コイルは線材 15.4m を用いてダブルパンケーキ型に 45 回巻線されたコイル 1 個から構成されている。コイル側面支持を 2 箇所限定し、また、樹脂による含浸を実施していないため、線材は液体窒素によって直接冷却可能である。

初めに各要素コイルの特性を確認するため、製作した 12 個の要素コイルを液体窒素中で浸漬冷却後、通電した。その結果を図 5-18 に示す。図 5-14 に示したように用いた長尺線材は長手方向に I_c のバラつきがあるため、 I_c が 0 付近の部分は除外したが、一部に通電特性の低い部分を含まざるを得なかったため、No.11, 12, 7, 2 のコイルには I_c がそれぞれ 38 A (線材位置 101 m), 48 A (同 87 m), 89 A (同 0 m), 94 A (同 177 m) の低特性部が含まれており、その影響が顕著に表れている。

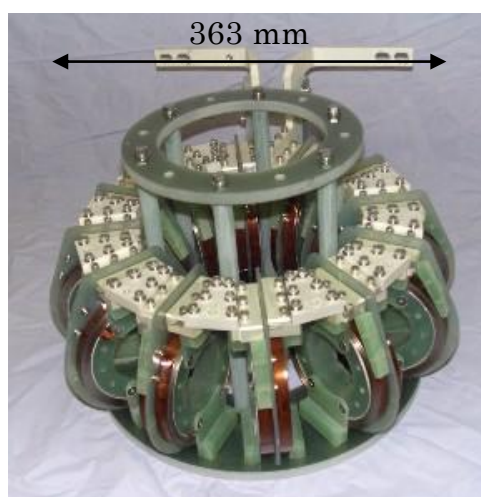
各要素コイルの I - V 特性から、 I_c の電界基準の半分の $0.5 \mu\text{V}/\text{cm}$ まで SMES 運転時に通電するとした場合、要素コイルの線材長が 15.4 m であり、各コイル電圧が $770 \mu\text{V}$ まで可能となるが、No.11 の要素コイルは 40 A 程度となり、他コイルより著しく低い電流となる。SMES 用コイルとして 12 個の要素コイルを直列に接続し、トロイド型コイルを構成した場合、No.11 のコイルで通電電流が制約され、低い電流値となる。そこで、No.11 コイルを巻き戻して低特性部の位置を特定し、その位置のパッチ補修を試みた。補修においては、2 本の線材同士の端部接続では機械強度が 1/2 程度に低下するため[6]、線材強度への影響がないように、長尺線材の低特性部に新たに約 1 m の Y 系線材をハンダ接続した (図 5-19 参照)。なお、この補修方法は要求される接続抵抗値やコイル形状等を勘案して自由に接続長を決定できるなどの特長も有する。

表 5-5 小型 SMES 用トロイド型 Y 系コイル諸元

線材種類	0.1 mm Cu テープ複合化 CVD-YBCO
線材単長	15.4 m
線材幅	10 mm
要素コイル	
コイル構成	ダブルパンケーキコイル 1 積層
巻数	45 (22.5 + 22.5) ターン
内径	φ 100 mm
外径	φ 118 mm
軸長	24 mm
トロイドコイル	
要素コイル数	12 個
線材総長	185 m
総巻数	540
トロイド中心径	φ 245 mm
インダクタンス	5.2 mH



(a) Y 系トロイド要素コイル
(ダブルパンケーキ型)



(b) Y 系トロイドコイル
(12 要素コイル構成)

図 5-17 Y 系線材を用いて製作した SMES 用トロイドコイル

補修した線材でNo.11のコイルとして再度巻線し、通電した結果は、補修前の結果と一緒に図 5-18 に示している。補修されたNo.11 コイルの発生電圧が大幅に低減されているが、これは、低特性部において輸送電流を補修線材側へバイパスさせることにより抵抗の発生が抑制され、コイル通電特性を大幅に向上することが実現できたためと考えられる。また、懸念されたコイル巻線時の曲げ応力や冷却・通電時の熱応力に対しても剥離等による特性劣化は観測されなかったことから、補修技術が有益であることを確認した。

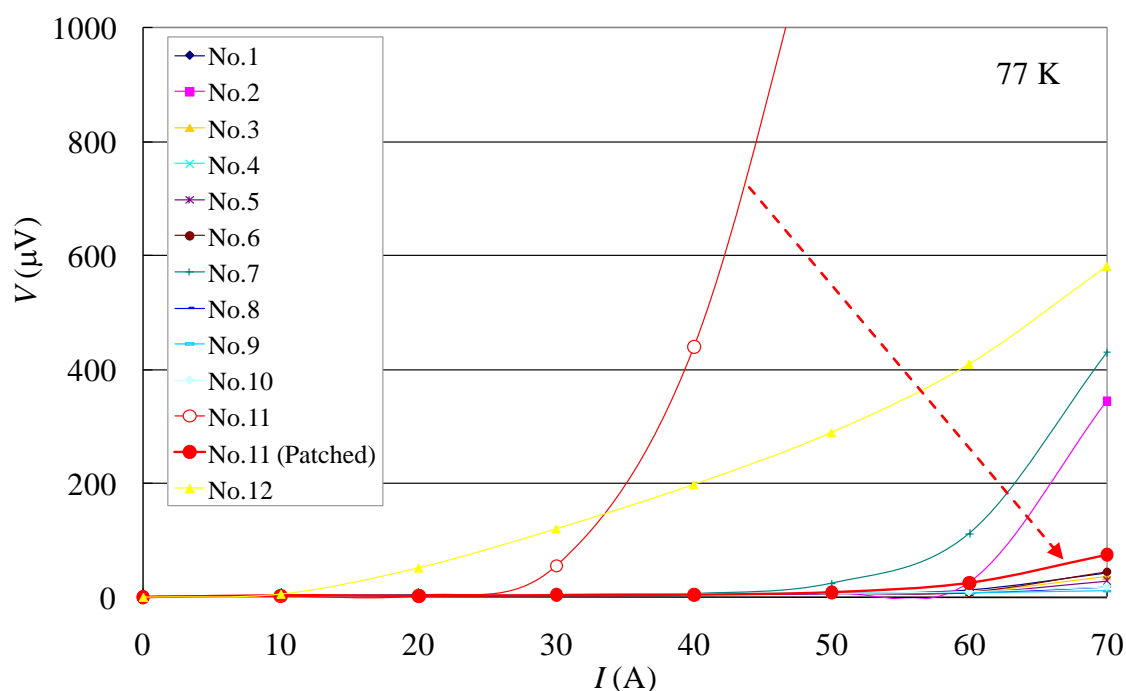


図 5-18 Y系トロイド各要素コイルの I - V 特性 (No.11 は補修前後)

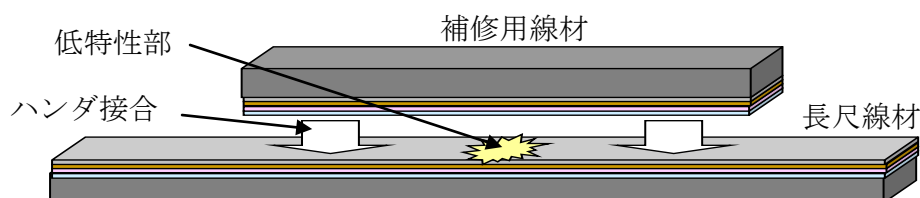


図 5-19 Y系線材の低特性部の補修方法例

補修後、要素コイル 12 個を用いてトロイド型コイルを組み立てた。要素コイル間は Cu ブロックで電極同士を接続し、12 要素コイルを直列に接続し、小型トロイドコイルを構成している。トロイドコイルを液体窒素中で通電した時のコイル全体の I - V 特性を図 5-20 に青で示す。また、線材の I_c からトロイドコイルの I - V 特性を計算した結果（電極部電圧除く）も同図に赤と緑で示している。計算結果の赤線は、 I_c がコイル製作に用いた線材 I_c の平均的な値である 150 A で長手方向に均一とした場合で、緑線は、 I_c を長手方向のばらつきを考慮して標準偏差 σ を仮に 0.15 と設定した場合である。

計算結果の比較において、0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準電界での I_c は、ばらつきを考慮した標準偏差 $\sigma = 0.15$ の場合が実測値に近い値となっている。ただし、低電界側では $\sigma = 0.15$ の場合でも実測値との差異が大きいが、これは実測値が電極部の抵抗を含むことと線材 I_c に他より突出して低い部分が数か所含まれていたことに起因すると考えられる。今後、このような特異な部分がなくなり、線材 I_c がある程度のバンド幅に改善されれば、設計時にコイル特性を予測することも可能と考えられる。なお、線材長手方向の I_c のばらつきに起因すると考えられる今回のトロイドコイルの低い特性は、線材通電特性が均質になれば約 25 % I_c が増加すると想定される。

最後に、SMES に最適な 20 K 温度領域において、均質な線材を用いたトロイドコイルを励磁した場合の I - V 特性を 77 K の場合と同様に計算した結果を図 5-21 に示す。77 K の場合と比較し、線材 I_c は 10 倍に増加し、820 A の通電が可能であり、貯蔵エネルギーは今回の 11 kJ から 1.7 kJ へ 100 倍以上増加すると推定される。

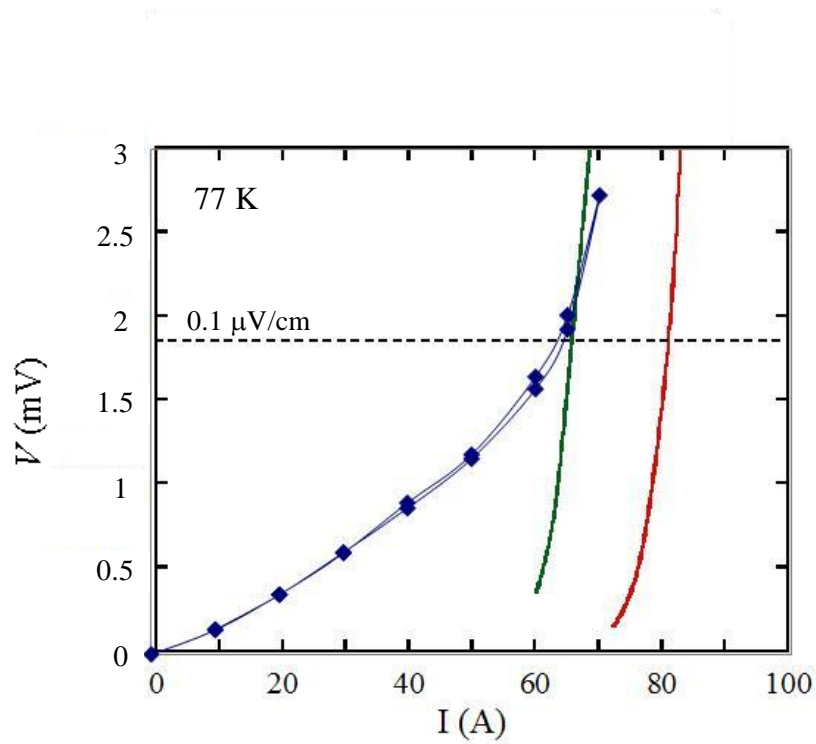


図 5-20 Y系トロイドコイルの I - V 特性（青：測定値、赤： $I_c = 150$ A[長手方向均質]の計算値、緑： $I_c = 150 \pm 45$ A [長手方向 $\sigma = 0.15$]の計算値）

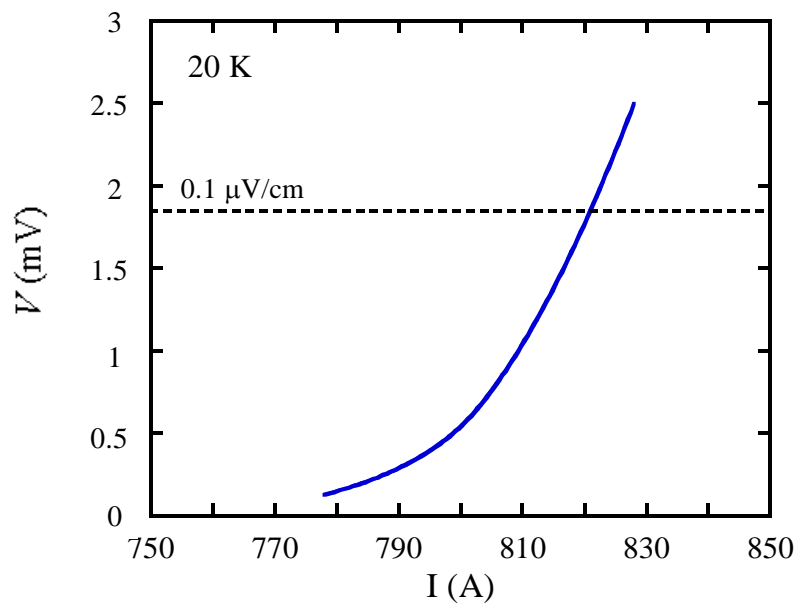


図 5-21 トロイドコイル 20K 冷却時の I - V 特性（均質線材を用いた計算結果）

5. 4. 3 Y系 SMES 小型モデルシステムの検証

Y系コイルを電力系統制御用 SMES として用いる場合、コイルは繰り返される充放電に対して健全に動作し続けることが必要である。そこで、Y系線材を用いて製作したトロイドコイル（前述の表 5-5、図 5-17 参照）の SMES 充放電基本動作に対する諸特性を検証する目的で、図 5-22 に示すように、Y系 SMES 小型モデルを構成した。SMES 回路は、安価で簡易に製作できるよう電源側・負荷側ともに直流回路で構成し、変換器を不要とした。また、変換器チョッパ回路として小型 MOS-FET を 96 個並列に接続し、電圧一定制御が可能な低抵抗短絡スイッチを製作した。一連の SMES 充放電動作は、以下のとおりである。

- ① SMES 充電：充電 SW(スイッチ)をオン、直流電源からコイルに充電
- ② SMES 待機：低抵抗短絡 SW をオン、充電 SW をオフ、コイルにループ電流を流し、エネルギー貯蔵
- ③ SMES 放電：低抵抗短絡 SW をオフ、一定電圧で負荷(LED 表示器)へ貯蔵エネルギーを放電

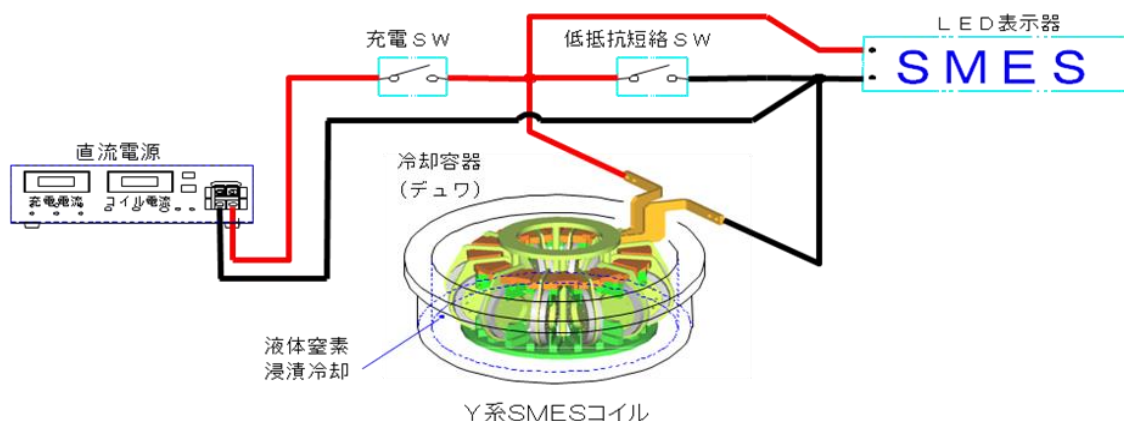


図 5-22 小型トロイドコイルを用いた Y 系 SMES モデルの主回路構成図

実際に SMES 充放電の一連の動作を実施した時の電流・電圧波形を図 5-23 に示す。使用した Y 系線材量が少なく、また窒素温度では大電流が流せないため、貯蔵エネルギーは小さいが、一連の充電、貯蔵、放電の動作が実現され、Y 系トロイドコイルが SMES として健全に動作することが検証された。

今回製作した Y 系 SMES 小型モデルシステムは、図 5-24 に示すように、SMES 基本動作の検証用として繰り返し実用的な取り扱いが実施されてきた。このため、繰り返し充放電に加え、ヒートサイクルや運送時の車両振動等、自ずと実用的な耐久的要素を経験したと考えられる。そこで、Y 系トロイドコイルの耐久性を評価するため、コイルの I - V 特性を測定し、製作時の I - V 特性と比較した。図 5-25 にコイル製作時および 1 年以上経過後のコイル I - V 特性の測定結果を示す。今回 50 A まで通電したが、経年、繰り返し使用による顕著な劣化は観測されなかった。なお、これまでに数回の通常運送、10 回以上の室温から液体窒素温度へのヒートサイクル、数 1000 回以上の繰り返し充放電動作を経験しているが、現在も健全に動作することを確認している。

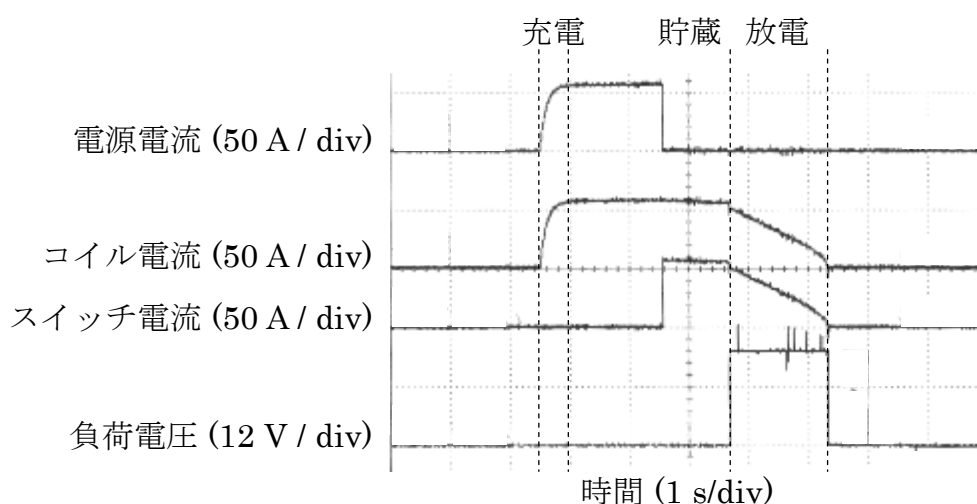


図 5-23 Y 系線材を用いた小型トロイド SMES モデルの充放電動作試験結果



図 5-24 トロイド型 Y 系 SMES モデルの充放電繰り返し運転状況

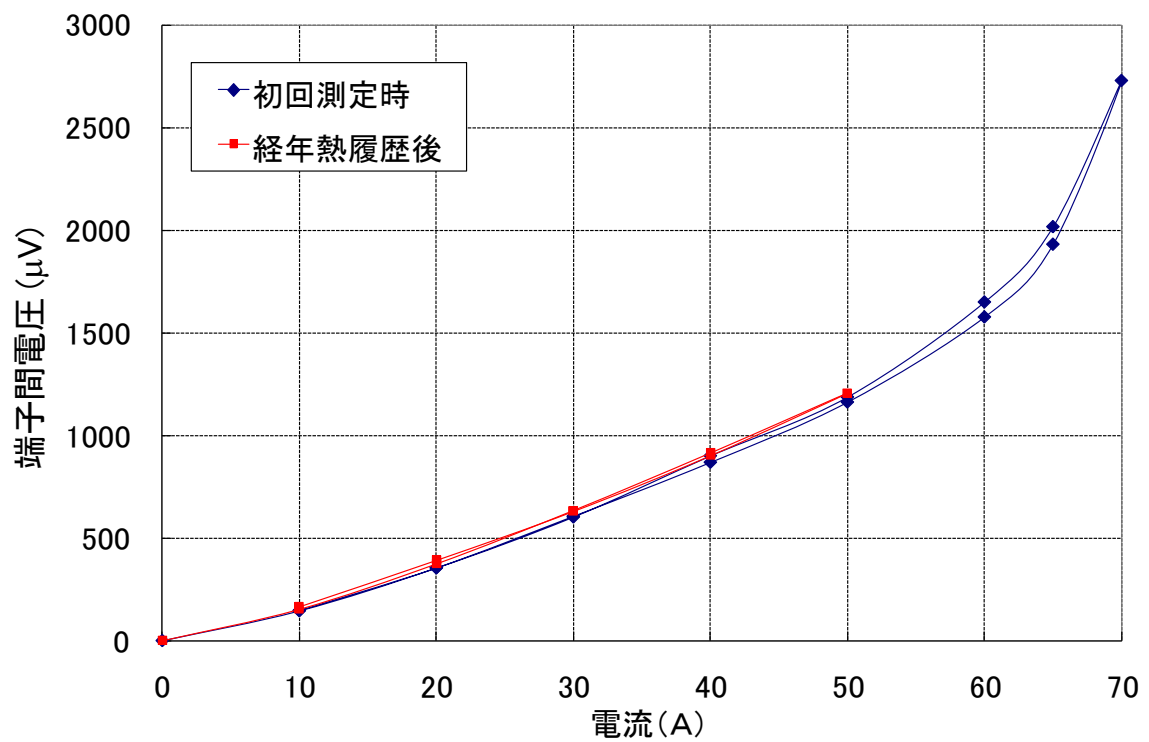


図 5-25 経年、繰り返し使用前後のトロイド型 Y 系コイルの I - V 特性

5. 5 結論

Y 系線材の構造を活かしたコイル化基盤技術を開発するとともに、各種 Cu 安定化 Y 系コイルを製作し、SMES 基本動作、耐久性等を検証することで、Y 系コイルの SMES への適用実現性を実証した。それらの結果を要約すると、下記のとおりである。

(1) 断面アスペクト比や片面導通等の薄膜積層構造を考慮し、以下のとおり Y 系線材のコイル化技術を決定した。

- ・巻線方法として、製作性に優れ、線材両端電極を損失や電磁応力の低減が容易なコイル外径側に配置でき、また、エッジワイズ歪みが緩和でき、伝導冷却に重要な巻線全長に亘り均等に低熱抵抗構造が容易となるダブルパンケーキ巻きを選定した。
- ・電極形成方法として、応力が集中する電極での線材の積層構造の剥離を抑制し、接触抵抗値を接続長で容易に制御できる形状とした。
- ・樹脂含浸方法として、巻線間の熱抵抗が高く、浸透が困難な矩形断面であることから、コイル両面の線材エッジ部と冷却板との接触を高める浸透度の高い樹脂を開発し、適用した。

(2) 上記コイル化技術および Cu テープ複合化技術により、伝導冷却型 Y 系コイルを製作・評価し、以下の試験検証結果が得られた。

- ・Cu 厚さに応じてコイル過通電時の線材抵抗を制御できることを実証した。
- ・樹脂含浸により、伝導冷却コイルの排熱特性が向上することを実証した。
- ・ I_c の 2 倍を超える短時間過負荷通電の繰り返し伝導冷却型 Y 系コイルで可能であることを実証した。

(3) Y 系線材を用いた小型トロイドコイルを製作し、充放電試験による SMES 基本動作検証に加え、車両輸送、ヒートサイクル等の実運用的取り扱いを長期間に数多く経験したが、耐久性に問題なく、健全に動作し続けること

を実証した。

- (4) I_c 特性にばらつきのある線材に補修を実施した結果、コイル特性が改善され、補修技術が有益であることを確認した。

第5章の参考文献

- [1] K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, H. Matsuo, G. Nishijima, S. Awaji, K. Watanabe, M. Ishizuka, M. Hamada: “High Field and High Temperature Characteristics of Small Test Coil Using CVD-YBCO Tape for SMES,” *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 17, No. 2, pp. 2220-2223, 2007.
- [2] T. Hase, M. Hamada, R. Hirose, Y. Nagahama, K. Shikimachi, S. Nagaya: “Fabrication Test of YBCO Coil and Multi-tape conductor,” *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 17, No. 2, pp. 2216-2219, 2007.
- [3] 知的財産権（特許）、発明者：濱田衛、長屋重夫、平野直樹、式町浩二、名称：超電導コイル、出願番号：特願 2008-54018、出願日：2008 年 3 月 4 日
- [4] 式町浩二、鹿島直二、渡部智則、長屋重夫、八木正史、向山晋一、和泉輝郎、中尾公一、塩原融：「銅安定化CVD-YBCO線材の機械特性」、第75回低温工学・超電導学会講演概要集、p. 184, 2006.
- [5] 式町浩二、鹿島直二、渡部智則、長屋重夫、八木正史、向山晋一、和泉輝郎、中尾公一、塩原融：「コイル応用のための銅複合化CVD-YBCO線材の曲げ歪特性評価」、第76回低温工学・超電導学会講演概要集、p. 154, 2007.
- [6] M. Sugano, T. Nakamura, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya: “Stress tolerance and fracture mechanism of solder joint of YBCO coated conductor,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 17, pp. 3067-3070, 2007.

