

RE 系超電導伝導冷却コイルの開発

Development of conduction-cooled REBCO superconducting coils

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 石井 祐介(東芝)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, ISHII Yusuke (TOSHIBA)

E-mail: hiroshi17.miyazaki@toshiba.co.jp

1. はじめに

RE 系($\text{RE}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$)超電導線材は、高機械強度を持ち、また高温・高磁場中でも臨界電流特性の低下が少ないことから、これをマグネットにした場合には、小型化や冷却負荷の低減が見込まれる。また、冷凍機で冷却する伝導冷却システムでは、冷媒を用いないため取り扱いが容易であり、機器に応じて適切な運転温度を設定することが可能となる。一般に超電導マグネットを設計する際、求められる磁場を得るため、線材の機械強度、臨界電流特性に応じて、運転温度、負荷率およびコイル形状などをパラメータとしたコイル設計を行うとともに、クエンチや熱暴走に対するコイル保護の設計も不可欠である。RE 系コイルの場合、従来の低温超電導コイルに比べて高電流密度設計が可能となるが、クエンチを検出してコイルを保護することは難しく、ひとたび熱暴走してしまうと焼損する危険性が高い。電流密度を犠牲にする方法も考えられるが、小型化のメリットは無くなってしまふ。したがって、高電流密度設計を維持しながらコイル焼損を回避するためには、熱暴走させずに運転すること、言い換えれば、樹脂含浸を行うことで冷凍機から線材まで伝熱板等を介して適切な冷却パスを設け、効率的な冷却を行うことが必要不可欠である。

本研究では、RE 系超電導線材の樹脂含浸コイル化技術の確立を目的として、まず樹脂含浸シングルパンケーキコイルを試作し、この熱暴走特性が線材の通電特性から予測可能であることを示すとともに、高フープストレスが印加される磁場環境下で通電することにより、線材長手方向の高い許容応力が樹脂含浸を行っても損なわれないことを検証したので報告する。

2. 熱暴走試験用コイル諸元および伝導冷却試験

線材特性から熱暴走限界を予測するためには、コイル製作時に線材特性の劣化がないことが不可欠である。そこで、我々はまず樹脂含浸しても線材特性の劣化を起こさない巻線技術の開発を進めてきた[1]。また、熱暴走を正確に予測するための要素技術として、線材の臨界電流特性から発熱を予測する技術の開発も進めてきた[2]。本章では、線材諸元が異なる RE 系線材を用いた 2 つの含浸シングルパンケーキコイルを試作し、熱暴走開始電流を測定して、解析結果と定量的に一致すること、すなわち、線材特性を劣化させない要素コイル化技術の検証を行った。試作したコイルの諸元を Table1 に示す。#a および #b コイルともに 4 本の線材を電氣的に接続している。#a および #b コイルを Fig.1 に示す伝導冷却試験装置に組み込み、通電試験を実施した。コイル上面のみに厚さ 0.25 mm のアルミ板を取り付けて、アルミ板の先端を GM 冷凍機の 2 段冷却ステージに接続してコイルを冷却した。コイル温度は

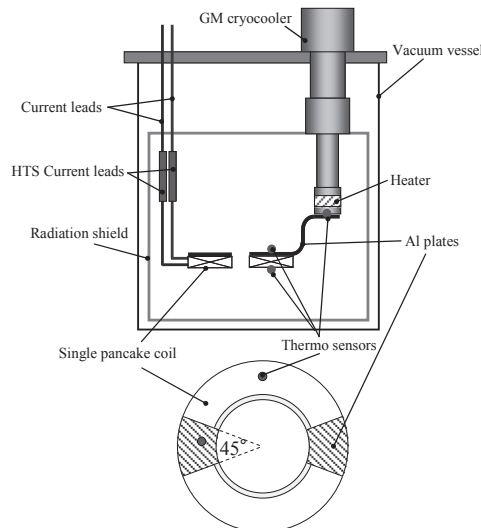


Fig.1 Schematic drawing of the test apparatus

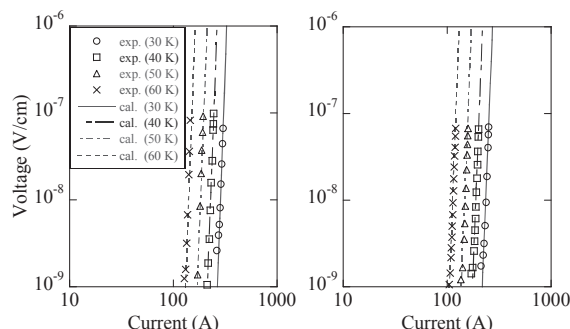


Fig.2 V-I characteristics of coil #a and coil #b from 30 to 60 K

2 段階ステージに取り付けたヒータにより制御し、設定温度は 30 K から 60 K の範囲で変えた。30 K から 60 K の各温度における電流-電圧特性の実験結果および短尺線材の臨界電流特性から計算した電流-電圧特性を Fig.2 に示す。#a および #b コイルともに 30 K から 60 K の各温度において実験結果と計算結果は定量的に一致し、試作した含浸コイルが良好な超電導特性を有していることを確認した。

3. 熱暴走試験

コイル温度を一定に保つようにヒータ出力を制御して通電試験を実施し、コイルが熱暴走する限界の電流値を測定した。試験方法は、コイル温度を一定値に制御しながら通電電流値を 0.1 A 刻みで上昇させ、コイル電圧およびコイル温度の時間変化を観測し、コイル電圧または温度の急激な上昇が確認された場合に電源を遮断する方法とした。#a コイルの 40 K における熱暴走試験の結果を Fig.3 に示す。電流値を 256 A に設定した後、コイル電圧が上昇し続け、最終的に急激な電圧上昇が観測されたため、熱暴走に至ったと判断し電流を遮断した。

次に、短尺線材の臨界電流値から計算したコイル内部発熱分布を用いて、3 次元熱解析を実施した。解析モデルは Fig.4 に示すようにコイル、樹脂層、Al 伝熱板の 3 つの領域をモデル化し、対称性を考慮して 1/4 モデルとした。境界条件と

Table1 Specification of YBCO tapes and coils

Parameter	Coil #a	Coil #b
Tape width (mm)	4.4	4
Tape thickness (mm)	0.2	0.1
Substrate	NiW	Hastelloy®
Copper stabilizer thickness (mm)	0.1	0.04
Tape length (m)	130	200
Number of turns	172	257
Inner diameter (mm)	200	200
Outer diameter (mm)	296	290

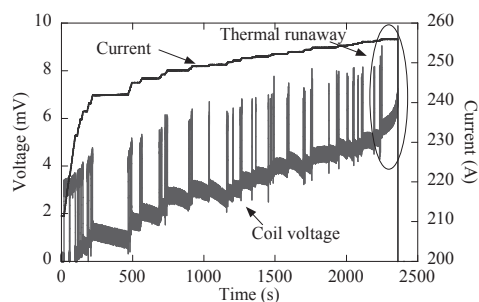


Fig.3 Time variations of the coil voltage and current at 40 K in the case of coil #a

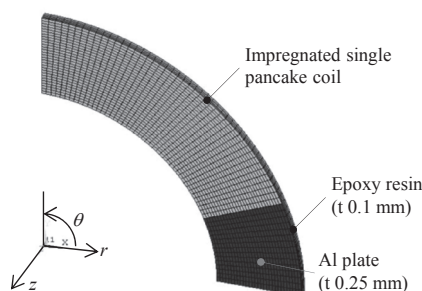


Fig.4 Thermal analysis model of a conduction-cooled single-pancake coil

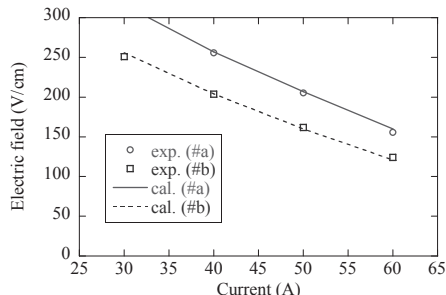


Fig.5 Temperature dependence of thermal runaway currents of both coil #a and coil #b from 30 to 60 K

して冷却板の温度を一定とし、他の表面は断熱条件とした。各要素において、要素内で発生するフラックスフロー損失に伴うジュール発熱、隣接する要素間の熱伝導を考慮して、非定常3次元伝熱解析を実施した。コイル温度を30 Kから60 Kまで10 K刻みで変化させたときの熱暴走電流の実験結果と計算結果をFig.5に示す。実験値と計算値の誤差は3%未満であり、温度領域や線材構成の違いによらず熱暴走電流を定量的に予測できることを実証した[3]。

4. フープ試験用コイル諸元

RE系線材は高い引張強度を有するが、樹脂含浸されたコイルにおいては、線材と樹脂等の絶縁物で構成されているため単純に線材の引張許容応力のみで含浸コイルの機械特性を評価することができない。そこで、2種類の含浸コイルを試作し、RE系線材の高い引張強度が樹脂含浸により損なわれていないことを検証した。試作した含浸コイル(#c および#d)の諸元をTable2に示す。REBCO層の向きの違いの影響および接続部の機械特性も併せて評価するため、Fig.6に示すように、1から3ターンまではREBCO層が内周側、4から10ターンまでは外周側を向く構造とし、巻線途中に接続部を設けた。また、巻線部に均一な電磁力を印加するため、電極および巻棒がない構造とした。

5. 磁場中通電試験

試作した含浸コイル(#c および#d)を液体ヘリウムで浸漬冷却し、4 Tのバックアップ磁場中で通電試験を実施した。試

Table2. Specifications of YBCO tapes and coils

Parameter	Coil #c	Coil #d
Tape width (mm)	4.4	4
Tape thickness (mm)	0.2	0.1
Substrate	NiW	Hastelloy®
Copper stabilizer thickness (mm)	0.1	0.04
Tape length (m)	9	9
Number of turns	10	10
Inner diameter (mm)	270	270
Outer diameter (mm)	276	273

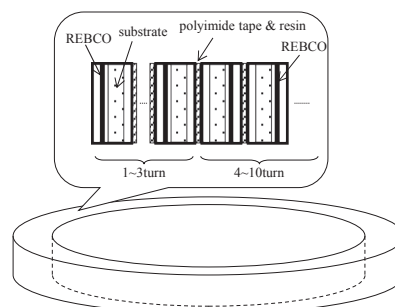


Fig.6 Schematic drawing of the hoop stress test coil

験方法は、ステップ上に電流を増加し、各電流値において1分間以上電流をホールドし、電圧発生の変異を調べた。NiW基板の線材を用いたコイル#cは586 A通電時にコイル平均電界が 10^{-7} V/cmを超えたため通電を終了した。586 A通電時に線材に印加された応力を数値解析により求めたところ、引張応力は395~406 MPaであった。一方、Hastelloy®基板の線材を用いたコイル#dは420 A通電時においてもコイル部に電圧発生は見られなかったが、試験用の口出し電極-コイル間の電圧が上昇したため試験を終了した。数値解析で400 A通電時に線材に印加された引張応力を求めたところ604~616 MPaであった。フープ試験後、含浸コイル(#c および#d)の劣化の有無を調べるため、液体窒素中での通電試験を実施した。両コイルともに、フープ試験前後でコイル発生電圧に変化はなく劣化していないことを確認した[3]。

6. まとめ

伝導冷却RE系コイルを設計可能にすることを目的とし、熱暴走特性が線材の超電導特性から予測可能であること、RE系線材の高い引張強度特性が樹脂含浸により損なわれていないことを実験と解析により検証した。

線材諸元が異なるRE系線材を用いた2つのφ300 mm級含浸コイルを用いて、伝導冷却中にてコイル初期温度を30 Kから60 Kまで変化させて通電試験を実施し、初期温度や線材構成の違いによらず熱暴走電流が誤差3%未満の精度で定量的に予測できることを検証した。また、含浸コイルを4 Tバックアップ磁場中にて通電試験を実施し、線材の引張許容応力程度の応力を印加しても含浸コイルが劣化することがなく、RE系線材の高強度特性を損なうことなく含浸コイルが製作できることを確認した。これらの成果は、RE系線材を用いた実スケール伝導冷却超電導コイルの開発にあたり、最初の重要なステップとして位置づけられる。

参考文献

1. H. Miyazaki, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 24, no. 3, 4600905, Jun. 2014.
2. S. Iwai, et al.: TEION KOGAKU vol. 48, pp. 187-195, 2013.
3. H. Miyazaki, et al.: TEION KOGAKU vol. 48, pp. 287-291, 2013.

福島における除染の進捗状況

The Progress of Decontamination in Fukushima

青木 仁（環境省 福島環境再生事務所）
AOKI Hitoshi (Ministry of the Environment)
E-mail: josen-plaza@env. go. jp



国直轄除染の進捗状況①										
対象11市町村のうち、全市町村で除染計画を策定、6市町村で全域又は一部地域において除染の作業中、田村市、楡葉町、川内村、大熊町で除染計画に基づく面的除染が終了。										
面的除染終了 宅地除染終了 除染作業中・準備中	市町村	除染対象 区域 人口（人） （概数）	除染対象 面積 （ha） （概数）	区域 見直し	除染の進捗状況 （終了以外の市町村は平成26年9月末現在）			スケジュール		避難指示 解除
					除染計画	仮置場等	同意取得	除染作業	宅地終了	
					除染計画	仮置場等	同意取得	除染作業	宅地終了	
	田村市	400	500	H24/4	H24/4	確保済み	終了	H25/6 終了	25年度（すでに終了）	H26/4
	川内村	400	500	H24/4	H24/4	確保済み	終了	H26/3 終了	25年度（すでに終了）	避難指示解除 準備区域は H26/10
	楡葉町	7,700	2,100	H24/8	H24/4	確保済み	終了	H26/3 終了	25年度（すでに終了）	未定
	大熊町	400	400	H24/1 2	H24/12	確保済み	終了	H26/3 終了	25年度（すでに終了）	未定
	葛尾村	1,400	1,700	H25/3	H24/9	約8割	ほぼ終了	作業中	26年度 （すでに終了）	27年内
	川俣町	1,200	1,600	H25/8	H24/8	約9割	ほぼ終了	作業中	26年度 （すでに終了）	27年内
	南相馬市	13,300	6,100	H24/4	H24/4	約8割	約4割	作業中	27年度	28年度
	飯館村	6,000	5,600	H24/7	H24/5	約9割	約9割	作業中	26年内	28年内
	浪江町	18,800	3,300	H25/4	H24/11	約3割	約5割	作業中	27年度	28年度
	富岡町	11,300	2,800	H25/3	H25/6	約5割	約8割	作業中	27年度	28年度
	双葉町	300	200	H25/5	H26/7	調整中	調整中	準備中	27年度	未定

注）仮置場として確保が必要な面積は、今後の精査によって変わらう。
注）終了の市町村について、未同意の方等の同意取得を実施し同意を頂いた場合は、除染を実施予定。

汚染状況重点調査地域における除染の進捗状況

子どもの生活環境を含む公共施設等は、福島県内、県外ともに約7割以上の進捗を示すなど予定した除染の終了に近づいている。その他、住宅、農地・牧草地、道路の除染についても、福島県内、県外ともに既に約6割以上が免注されているなど、着実な除染の進捗が見られる。

なお、福島県外の58市町村については、約7割の市町村において除染の措置が完了（17市町村）又は概ね完了（24市町村）している。（平成26年6月末時点）

○「汚染状況重点調査地域」として指定を受けている市町村：
（当初）104市町村 → （現在）100市町村
指定要件を満たさなくなれば、指定を解除することができる。
これまでに線量低下などの理由で4市町村が指定解除

○除染実施計画策定済み： 94市町村
（当面策定予定の市町村全て）

○計画に基づく除染等の措置完了： 17市町村
（引き続きモニタリング等を実施）

○計画に基づく除染等の措置実施中： 77市町村
各市町村の除染実施計画は、福島県内は27～28年度、それ以外は24～25年度を計画期間の終了時期とする市町村が多い

○福島県内における進捗状況（H26年8月末時点）
公共施設等：約7割 住宅：約5割 道路：約3割
福島県外における進捗状況（H26年6月末時点）
学校・保育園等：ほぼ終了 住宅：約9割 道路：約9割

汚染状況重点調査地域における除染の進捗状況

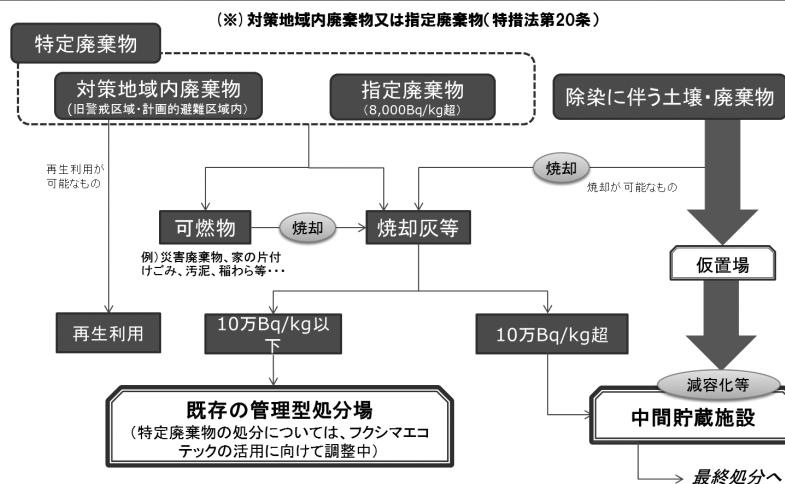
○福島県内40市町村（平成26年8月29日 福島県公表資料）
※調査時点：平成26年7月末時点 計画数・免注済・実績件数は平成26年度までの合計

	全体計画	計画数	免注済	実績
住宅（戸数）	432,082	313,063	258,018 (82.4%)	145,430 (46.5%)
公共施設（施設数）	8,364	7,982	6,567 (82.3%)	5,787 (72.5%)
道路 (km)	10,969.6	7,436	4,395 (59.1%)	2,470 (33.2%)
農地・牧草地 (ha)	34,398.4	30,309	27,279 (90.0%)	20,990 (69.3%)
生活圏森林 (ha)	4,085.3	2,911	1,881 (64.6%)	865 (29.7%)

○福島県外58市町村（平成26年8月22日 環境省公表資料）
※調査時点：平成26年6月末時点

	予定数	免注済	実績
学校・保育園等（施設数）	1,543	1,543 (100%)	1,542 (99.9%)
公園・スポーツ施設（施設数）	3,476	3,407 (98.0%)	3,398 (97.8%)
住宅（戸数・棟数）	127,752	119,478 (93.5%)	114,400 (89.5%)
その他の公共・民有施設（施設数）	4,489	3,787 (86.3%)	3,771 (84.0%)
道路 (km)	4,059	3,770 (92.9%)	3,731 (91.9%)
農地・牧草地 (ha)	1,394	1,394 (100%)	1,340 (96.1%)
森林 (ha)	289	253 (87.5%)	135 (46.7%)

放射性物質汚染対処特措法に基づく 特定廃棄物(※)及び除染土壌等の処理フロー(福島県内)



注) 特定廃棄物以外の8,000Bq/kg以下の廃棄物については、廃棄物処理法の規定を適用。(一定の範囲については特措法に基づく基準を適用。)

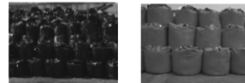
注) 中間貯蔵施設の検討に当たっては、追加的な除染など、現時点で推計が困難な分野の貯蔵も考慮。

中間貯蔵施設の計画

中間貯蔵施設では、何をどれだけ貯蔵 するのですか？

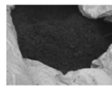
1 仮置場などに保管されている 除染に伴い発生した土壌や廃棄物

現在、県内市町村の仮置場などに保管されている、除染により取り除いた土壌や側溝の汚泥、草木、落ち葉などを貯蔵します。



2 1kgあたり10万Bq(ベクレル)を超える 放射性セシウム濃度の焼却灰など

可燃物は、原則として焼却し、量を減らした上で、焼却灰として貯蔵します。

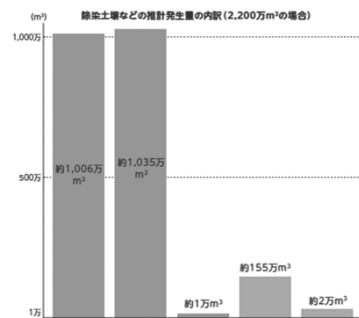


●目及び匂については、福島県内で発生したものに限ります。
●事故電力発生後、原子力発電所内で発生した廃棄物などの貯蔵は行いません。
●中間貯蔵施設内の減容化施設で発生した10万Bq/kg以下の焼却灰は中間貯蔵施設内に貯蔵します。

3 福島県内の除染土壌などの発生量は、減容化(焼却)した後で、約1,600万m³～2,200万m³と推計しています。

※約1,600万m³～2,200万m³は廃棄物(土)約12.4万m³の約1.3～1.8倍に相当

中間貯蔵施設の検討に当たっては、上記の他、追加的な除染など、現時点で推計が困難な分野の貯蔵も考慮しています。



中間貯蔵施設の配置図

用地の取得状況や除染土壌等の発生状況に応じて、段階的に整備を進めます。

<配置の基本的考え方(主な事項)>

- 施設は、貯蔵する土壌や廃棄物の放射性セシウム濃度、施設を配置する地盤の強度・高さなどを考慮して適切に配置します。
- 谷地形や台地などの自然地形を最大限に活用して、土地改変をなるべく避けて施設を設けることにより、環境負荷の低減と工期の短縮を図ります。
- 施設全体の機能性・効率性を勘案しつつ、各施設が一体的に機能するように配置します。

