

加速器応用に向けたイットリウム系超電導コイルの熱的安定性評価

高エネルギー加速器研究機構 王 旭 東¹・土屋 清 澄²
先端技術総合研究所 藤田 真 司³・武藤 翔 吾³・飯島 康 裕⁴・直江 邦 浩⁵
新規事業推進センター 大保 雅 載⁶

Thermal Stability of Yttrium Based Superconducting Coil for Accelerator Application

S. Fujita, S. Muto, Y. Iijima, K. Naoe, M. Daibo, X. Wang, and K. Tsuchiya

イットリウム (Y) 系超電導線材は 20 K 以上の高温領域でも高い磁場中臨界電流特性を示すことから、コイルに応用することで機器の小型化や高性能化が期待できる。今回、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で検討されている加速器用の六極マグネットへの Y 系超電導コイルの適用検討として、小型の Y 系超電導コイルの熱的安定性を評価したので概要を報告する。

Yttrium(Y)-based coated conductors are expected miniaturization and higher performance of superconducting devices by applying to the coils, because of their high critical current characteristics in a high magnetic field and a high temperature region of above 20 K. As an application study of Y-based superconducting coil to a sextupole magnet for accelerator being considered by the High Energy Accelerator Research Organization (KEK), we evaluated the thermal stability of the Y-based superconducting coil.

1. ま え が き

超電導とはある温度以下で物質の電気抵抗がゼロとなる現象であり、このような性質を持った物質を超電導体と呼ぶ。電気抵抗がゼロとなる温度を臨界温度 (T_c) といい、 T_c によって低温超電導体 (LTS: Low critical Temperature Superconductor) と高温超電導体 (HTS: High critical Temperature Superconductor) に大きく分けられる。LTS は NbTi や Nb₃Sn といった材料が工業化されており、医療用 MRI (Magnetic Resonance Imaging) 等に応用されている。HTS としてはビスマス (Bi) 系超電導体: Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} (Bi2212), Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ} (Bi2223) やイットリウム (Y) 系超電導体: REBa₂Cu₃O_{7-δ} (RE123, RE: Y, Gd 等の希土類元素) といった材料が精力的に開発され、線材として市販化されている。LTS は T_c が低いことから、通常高価な液体ヘリウム (温度 4 K = -269 °C) を用いて冷却される。一方、上述の HTS 材料は安価な液体窒素 (温度 77 K = -196 °C) を用いた冷却や小型冷凍機を用いた伝導冷却での運用が可能である。HTS の中でも Y 系超電導体を用いた Y 系超電導線材は、高い機械

強度や磁場中での高い臨界電流 (I_c) を有する¹⁻³⁾ ことから、特にマグネット用コイルへの応用開発が進められている。当社では長年 Y 系超電導線材の開発を行ってきており、非常に高特性能な長尺線材が得られている⁴⁾。また、コイルへの応用のための基礎検討も行ってきた⁵⁻⁸⁾。当社製 Y 系超電導線材を約 7.2 km 使用して、蓄積エネルギー 426 kJ という世界最大級の Y 系高温超電導マグネットの開発に成功している⁹⁻¹¹⁾。

超電導マグネットを安定して運用するための課題として、クエンチ検出とクエンチ保護があげられる。クエンチとは、コイルの部分的な温度上昇等の要因でコイルの一部が超電導ではなくなり (常電導転移と呼ぶ)、これが伝播・波及することで熱暴走する現象である。LTS マグネットの場合、運転温度が低いいため比熱がきわめて小さく、 T_c と運転温度の差 (温度マージン) が小さいことから、数 mJ といった僅かな発熱でクエンチにいたる。しかしながら、常電導転移の伝播する速度 (NZPV: Normal Zone Propagation Velocity) が数十~数百 m/s と速いことから、クエンチが生じると大きなコイル電圧が発生するため、その検出は比較的容易である。HTS マグネットは LTS に比べて運転温度が高いため比熱が 2~3 桁大きく、温度マージンも大きいいため、熱的安定性はきわめて高い一方で、NZPV は数 mm ~ 数十 mm/s と桁違いに遅く、常電導転移に伴う発生電圧が小さいためクエンチ検出が難しいという問題がある。そのため、一旦クエンチが発生する

1 加速器研究施設 助教 (工学博士)
2 加速器研究施設 名誉教授 (工学博士)
3 エネルギー技術研究部
4 エネルギー技術研究部 次長 (工学博士)
5 エネルギー技術研究部 部長
6 超電導事業推進室 副室長

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
加速器	Accelerator	電子や陽子などの粒子を光の速度近くまで加速して高いエネルギーの状態を作り出す装置。KEKでは円周3 kmもの大型円形加速器（KEKB）を有しており、電子と陽電子を衝突させることで素粒子物理学等の基礎科学研究を行っている。KEKBは小林・益川理論を実証し、2008年のノーベル物理学賞の受賞に貢献した。
臨界温度	Critical temperature, T _c	超電導状態を維持できる上限の温度。
臨界電流	Critical current, I _c	超電導状態で流しうる最大の電流値を臨界電流（I _c ）といい、電流値は温度、磁場に依存する。
イットリウム系超電導線材	Y-based coated conductor	超電導層にイットリウム（Y）やカドリウム（Gd）など希土類系元素を含む酸化物超電導で、希土類系を総称してRE（Rare Earth, レアアース）系とも呼ぶ。他の高温超電導に比べて30 K以上の比較的高い温度の磁場中の臨界電流（I _c ）が高い特徴がある。
伝導冷却	Conduction-cooled	液体窒素や液体ヘリウムなど冷媒を用いずに超電導コイルと冷凍機などを熱的に接触させて冷却する方式。
クエンチ	Quench	コイルの部分的な温度上昇等の要因でコイルの一部が超電導ではなくなり（常電導転移と呼ぶ）、これが伝播・波及することで熱暴走する現象
クライオスタット	Cryostat	コイルなどを極低温に維持するために断熱層を有した真空容器のこと。
n値	n-value	超電導線の臨界電流付近のV-I特性は $V=V_c (I/I_c)^n$ （V _c ：臨界電流の電圧基準、I _c ：臨界電流）で表現される。これをn値モデルと呼び、指数をn値と呼んでいる。仮に超電導線材の一部で劣化が生じると見かけ上このn値が低くなるため、コイル製作の健全性の指標として用いられる。

と局所的な温度上昇（ホットスポット）を生じ、局所的にコイルが破損するリスクがある¹²⁾。

現在、高エネルギー加速器研究機構（KEK）ではSuperKEKBと呼ばれる電子-陽電子衝突型加速器の建設が進められており、その一部にY系超電導コイルを用いたマグネットを適用することが検討されている¹³⁻¹⁴⁾。これは、液体ヘリウムを使用しないことによる経済性と、加速ビームによるクエンチの抑制という点でメリットがあるためである。Y系超電導コイルの適用に際して、クエンチ検出・保護法の開発は不可欠である。Y系超電導線材・コイルのクエンチに関する研究はいくつか報告されているが¹⁵⁻¹⁷⁾、線材構造等によって挙動が異なるため、今回当社製Y系超電導線材を用いて小型コイルを作製し、クエンチ時の挙動を調査した¹⁸⁻¹⁹⁾ので以下に概要を報告する。

2. 加速器用特殊六極マグネット

現在、KEKで検討されているマグネットは図1に示す特殊な六極マグネットで、内側に配置されるノーマル（normal）コイルと呼ばれる6個のコイルと、外側に配置されるスキュー（skew）コイルと呼ばれる6個のコイルで構成される。このマグネットは色収差と呼ばれる、運動量の分散によるビームサイズの広がりを補正する小型マグネットで、加速粒子の衝突点から30～100 mの領域に16台分散して配置される。各コイルの諸元を表1に示す。

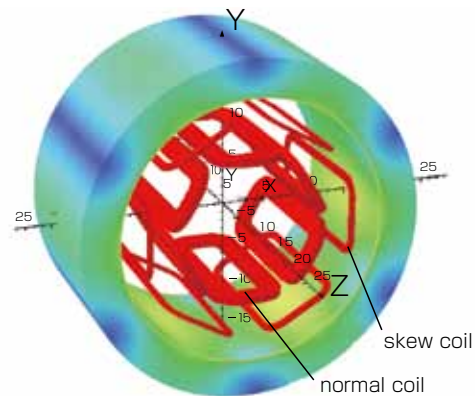


図1 特殊六極マグネット模式図
Fig. 1. Schematic view of a sextupole magnet.

表1 ノーマルコイルおよびスキューコイルの諸元
Table 1. Specifications of normal coils and skew coils.

項目	諸元
ノーマルコイル	
コイル寸法	200 mm × 83.6 mm × 9.0 mm
線材ターン数	112 × 2 ターン
インダクタンス	62.6 mH
蓄積エネルギー	2.08 kJ
運転電流	257.6 A
スキューコイル	
コイル寸法	200 mm × 94.0 mm × 4.5 mm
線材ターン数	43 ターン
インダクタンス	3.9 mH
蓄積エネルギー	0.13 kJ
運転電流	259.5 A

3. 小型コイルのクエンチ挙動

3. 1. 小型コイルの作製

コイルに使用したY系超電導線材は図2に示す寸法・構造のものである。これは特殊六極マグネットで想定されている線材構造である。この線材をφ50 mmのGFRP製巻枠に巻線し、真空含浸という手法でエポキシ樹脂含浸した。コイルの諸元を表2に示す。コイルはパンケー

キコイル2層からなり、片側の層の最内ターンにNiCrヒータとその周辺に電圧タップを取り付けている(図3)。作製したコイルは極低温冷凍機を付けたクライオスタットに入れて伝導冷却した。クライオスタットは内部に設けたヒータにより任意の温度に設定できるようにした。

3. 2. 試験回路

クエンチ検出および保護回路は、図4に示すブリッジ回路を有するクエンチ検出器による電圧検出方式を用い

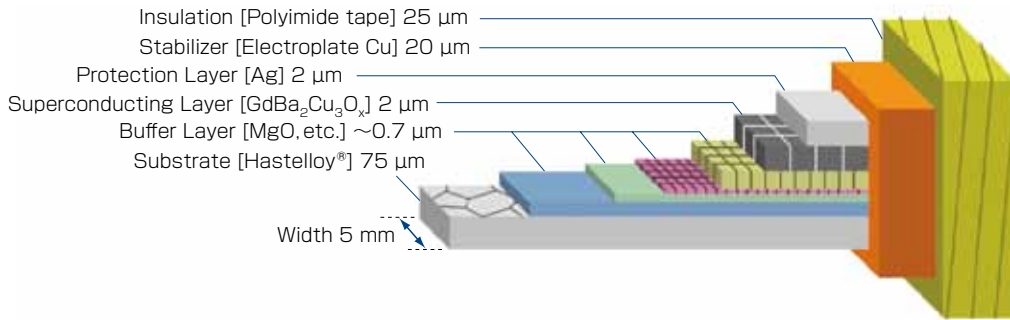


図2 Y系超電導線材模式図
Fig. 2. Schematic view of Y-based Coated Conductor.

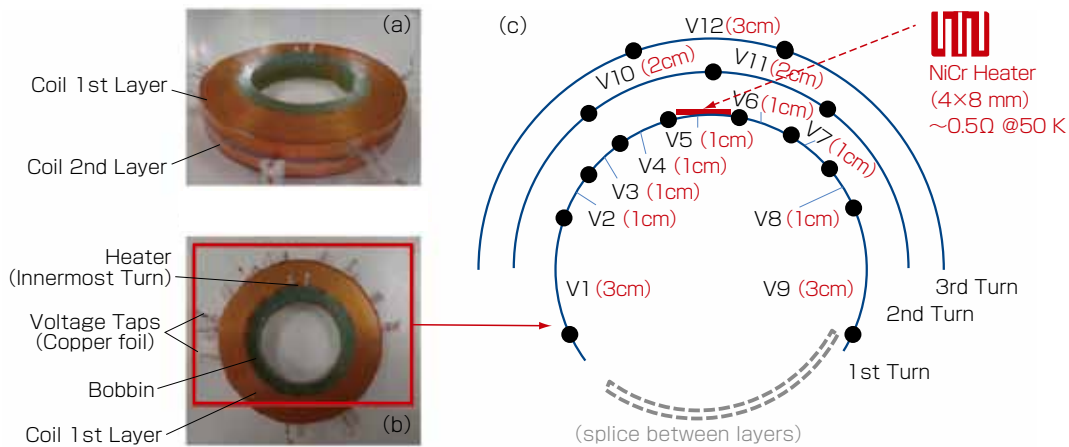


図3 試験用小型コイルの概要 (a) 外観 (側面) (b) 外観 (上面) (c) 電圧タップとヒータの配置
Fig. 3. Schematic of a small test coil, (a) photograph (side view) (b) photograph (top view) (c) location of voltage taps and a heater.

表2 試験用小型コイルの諸元
Table 2. Specifications of a small test coil.

項目	諸元
コイル内径	50 mm
コイル外径	69.7 mm
コイル高さ	11.7 mm
線材ターン数	50 × 2
使用線材長	10 m × 2
臨界電流 (77 K, self field (s. f.))	101.1 A (10 ⁻⁷ V/cm criterion)
n値 (77 K, s. f.)	30.8 (10 ⁻⁸ ~ 10 ⁻⁷ V/cm)

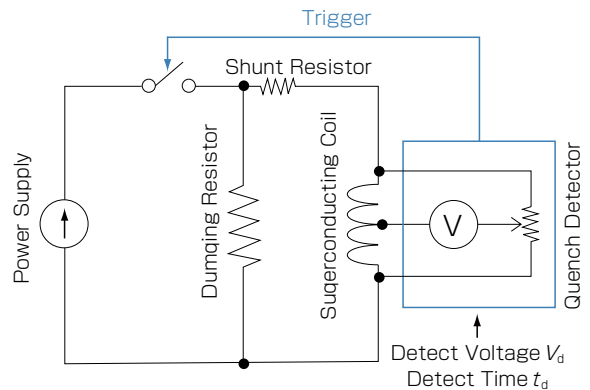


図4 クエンチ検出・保護回路
Fig. 4. Quench detect and protect circuit.

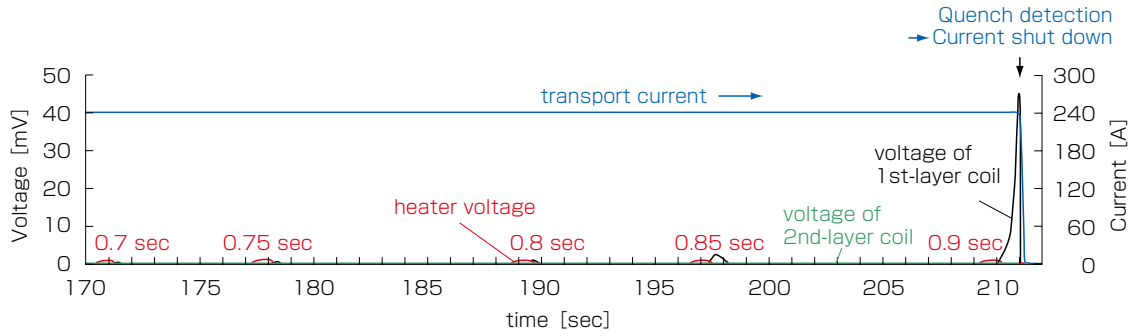


図5 ヒータによるクエンチの例
Fig. 5. An example of quench by heater.

た. この方式はクエンチ検出として最も多用されている基本的な方式で, ブリッジ回路によりコイルに生じる誘導起電圧をキャンセルすることで微小な電圧変化を検出できる. クエンチ検出器は設定した検出電圧 (V_{QD}) 以上の電圧が, 設定した検出時間 (t_{QD}) 以上続いた場合にクエンチとみなし, 遮断スイッチを開く. 遮断スイッチが開かれるとコイルは電源から切り離され, 電流はコイルに並列に接続された保護抵抗 (Dump Resistor) によって減衰する.

3. 3. 試験方法

所定温度に保たれたコイルに一定の電流 (I_t : 各温度におけるコイルの I_c との比 I_t/I_c を負荷率と呼ぶ) を流した状態でコイルの片側の層をヒータ加熱し, ヒータ出力を徐々に上げることでコイルの片側の層を強制的にクエンチさせた (図 5). この際にコイルの各電圧タップに発生した電圧の例を図 6 に示す. ヒータを取り付けた部分 (ホットスポット) で初めに電圧 (常電導領域) が発生し, その周囲に常電導領域が広がっていく. ある電圧タップ区間で 2 mV の電圧が発生してから, その隣の電圧タップ区間で 2 mV の電圧が発生するまでの時間差から NZPV を算出した. ホットスポット温度を見積もるため, あらかじめ測定した線材の電気抵抗 - 温度特性 (図 7) を用い, 発生した電圧から温度に換算した.

3. 4. 試験結果

マグネット運転は 20 ~ 50 K の温度が想定されているため, この温度領域において負荷率 0.3 ~ 0.6 で試験を行った. クエンチに必要なエネルギー (コイルがクエンチした際の投入ヒータエネルギー) は図 8 に示すように 1 ~ 5 J と LTS と比べて桁違いに大きい値である. 図 9 に NZPV の測定値を示す. 20 ~ 80 mm/s と既報の値¹⁵⁾ と同程度であり非常に遅い. 図 10 に各クエンチ検出条件でのホットスポット温度を示す. ホットスポット温度はコイル温度によらずコイル電流値に大きく依存し, 検出時間によって電流値依存性が変化することが分かった. 今回試験した $V_{QD} < 100$ mV, $t_{QD} < 100$ ms の範囲ではホットスポット温度は 250 K 以下であり, 試験後のコイル特性に劣化はみられなかったことから, この範囲ではクエンチ検出・保護が可能であると考えられる.

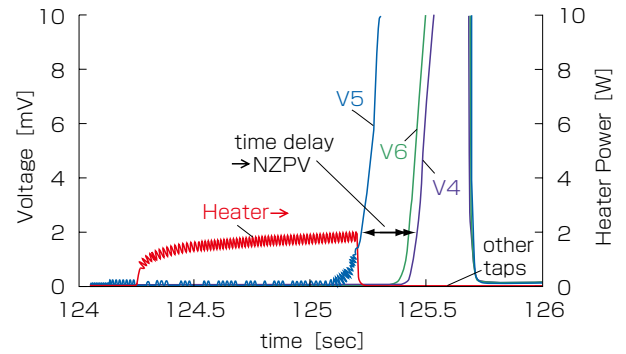


図6 クエンチ時の電圧発生例
Fig. 6. An example of quench voltage generation.

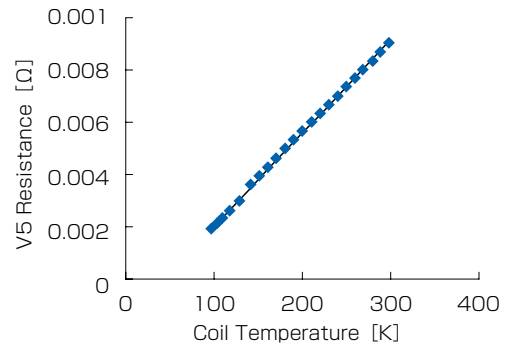


図7 V5電圧タップ部の電気抵抗 - 温度依存性
Fig. 7. Temperature dependence of electrical resistance at V5 tap.

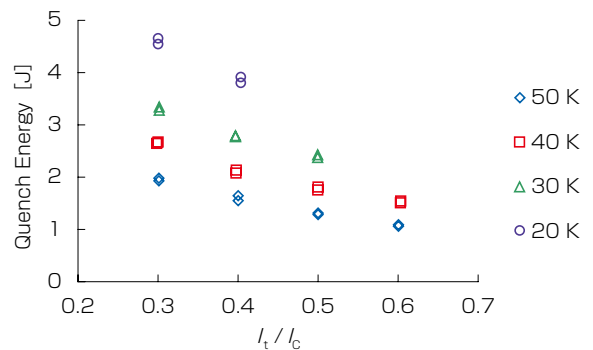


図8 50 ~ 20 Kにおけるクエンチエネルギー
Fig. 8. Quench energy at 50 ~ 20 K.

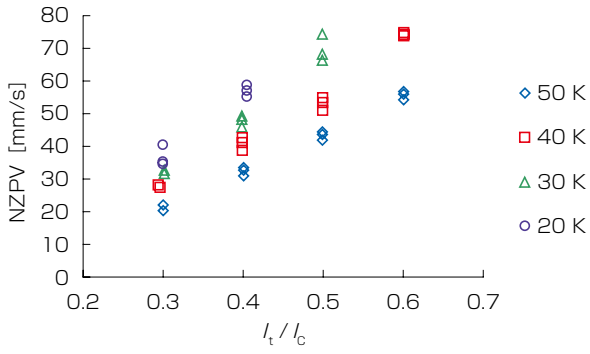


図9 50～20 Kにおける常電導伝播速度
Fig. 9. NZPV at 50～20 K.

4. 数値解析

4. 1. 解析条件

ヒータが設置された片側のコイルの最内ターンのみに電圧発生が観測されたことを考慮し、図 11 に示す上層コイルの 1 ターン目周囲をモデル化し、式 (1), (2) を用いて有限要素法により定式化した。超電導特性はn 値モデルを採用し、実測したI_cとn 値を用いた。クエンチ時の数秒間における伝導冷却の効果はほぼないとして、モデル表面を断熱境界とした。式 (1) のφはスカラーポテンシャル、σは安定化層または超電導層の導電率である。式 (2) のTは温度、Cは熱容量、kは熱伝導率、Q_jは式 (1) から求まるジュール発熱、Q_{heater}はヒータ投入熱を表す。なお、各物性値の温度依存性も考慮した。

$$\nabla \cdot \sigma(\nabla \phi) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j + Q_{heater} \dots\dots\dots (2)$$

4. 2. 解析結果

コイル温度 50 K, I_t=175 A (負荷率 0.5) でヒータ投入によりクエンチした実験と解析の結果を図 12 に示す。実験と解析はともにヒータが設置されている電圧区間 V 5 で最初に電圧上昇が始まり、隣接の電圧区間 (V 6) へ伝播していく。コイル全電圧 (V_{coil} 1) が 100 mV に達したときの V 5 の到達温度 (T 5) は実験と解析ともに約 145 K である。また、コイル温度 30, 40, 50 K でのクエンチ時の検出電圧 (40, 60, 100 mV) と検出時間 (10 ms, 50 ms, 100 ms) に対するホットスポット温度の解析結果を図 13 に示す。解析結果は傾向・絶対値ともに図 10 に示す実験結果とよく一致しており、検出電圧・検出時間に比例してホットスポット温度は大きくなるが、検出時間 10 ms では運転電流の増加に対してホットスポット温度は減少する。これは通電電流が大きいほど検出電圧に達した際のホットスポット温度が低いからである。クエンチ時のホットスポット温度は、運転温度によらず運転電流や検出電圧・検出時間によって決まることが実験と解析の両方からわかった。また、解析によりクエンチ時の電圧発生やホットスポット温度が予測可能であることが確認された。

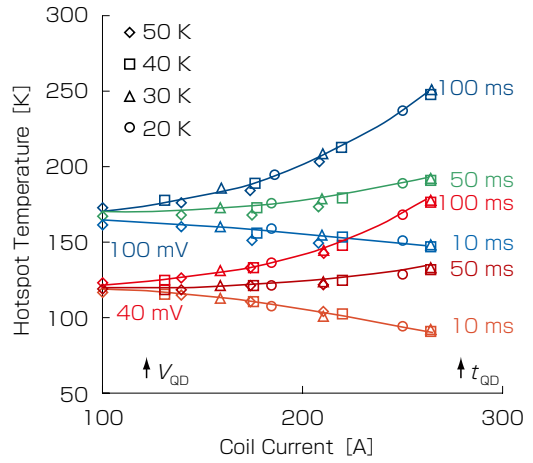


図10 各クエンチ検出条件におけるクエンチ後のホットスポット温度
Fig. 10. Hotspot temperature of the coil after quenching for certain detection conditions.

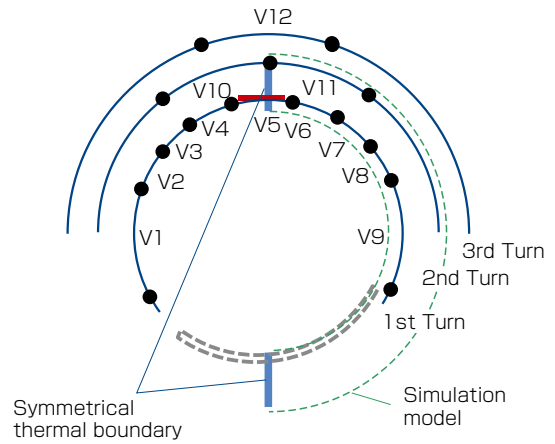


図11 解析モデル
Fig. 11. Schematic of simulation model.

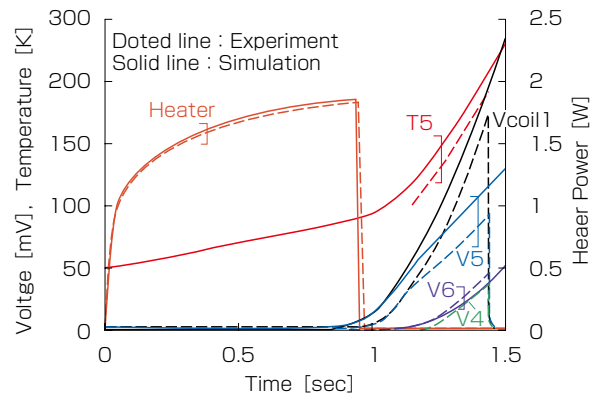


図12 クエンチ試験結果の実験と解析の比較 (コイル温度 50 K, コイル電流 175 A)
Fig. 12. Experimental and simulation results of quench test at temperature of 50 K and with coil current of 175 A.

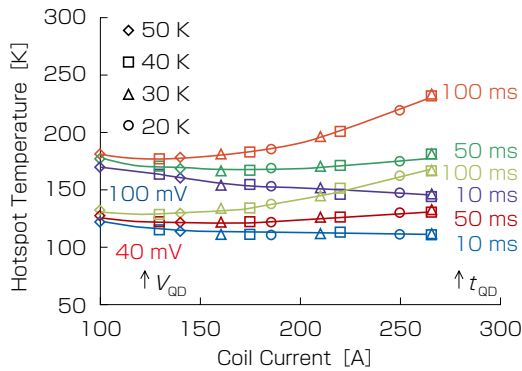


図13 各クエンチ検出条件におけるクエンチ後のホットスポット温度の解析結果

Fig. 13. Simulation results of hotspot temperature of the coil after quenching for certain detection conditions.

5. むすび

今回、KEKで検討されている特殊六極マグネットへのY系超電導コイル適用を適用するにあたり、当社製Y系超電導線材を用いて小型コイルを作製し、クエンチ時の挙動を調査した。その結果、クエンチに必要なエネルギーは数JとLTSに比べて非常に大きく、常電導伝播速度は数十mm/sと非常に遅いことを確認した。クエンチ時のホットスポットの到達温度は、あるクエンチ検出条件の範囲では室温(300 K)以下であり、コイルが劣化しないことを確認した。数値解析もあわせて実施し、解析結果が実験結果と精度よく一致することを確認した。このことから、解析によりクエンチ時の電圧発生やホットスポット温度が予測可能であり、小型のコイルであればクエンチ検出・保護が可能であることが確認された。

今後は、実機サイズのコイルを試作してクエンチ特性等を調査し、特殊六極マグネットへの適用検討を進める。また、様々な応用機器へのY系超電導線材の適用を目指し、Y系超電導コイルの開発を進めていきたい。

謝 辞

本研究は科学研究費補助金(15H03667)の助成により実施したものである。

参 考 文 献

- 1) 藤田ほか:「RE系超電導線材の特性評価－機械特性・剥離特性・磁場中臨界電流特性」, 低温工学, 第48巻4号, p.172-177, 2013
- 2) S. Fujita et al.: "In-field Critical Current Property of IBAD/PLD Coated Conductors," J. Phys.: Conf. Ser. vol. 507, 022007, 2014
- 3) S. Fujita et al.: "Characteristics of REBCO Coated Conductors for 25T Cryogen-free Superconducting Magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.25, No.3, 8400304, 2015

- 4) Y. Iijima, et al.: "Development for Mass Production of Homogeneous RE123 Coated Conductors by Hot-wall PLD Process on IBAD Template Technique," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 3, 6604104, 2015
- 6) M. Daibo, et al.: "Characteristics of Cryocooled Racetrack Magnet Fabricated using REBCO Coated Conductor," Physica C 471, pp. 1436-1439, 2011
- 7) M. Daibo, et al.: "Characteristics of Impregnated Pancake Coils Fabricated using REBCO Coated Conductors," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.22, No.3, 3900204, 2012
- 8) M. Daibo, et al.: "Evaluation of Thermal Stability of Conduction-cooled REBCO Coil with 0.3-mm-thick Stabilizer," Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, p.507-512, 2013
- 9) 大保ほか:「φ20 cm 室温ボアRE系5 T 高温超電導マグネットの開発」, 低温工学, 第48巻5号, p.226-232, 2013
- 10) 大保ほか:「φ20cm室温ボア世界最大級イットリウム系5 T 高温超電導マグネット」, フジクラ技報, 第124号, pp.37-45, 2013
- 11) M. Daibo, et al.: "Evaluation of a 426 kJ Cryocooled Magnet and a Model Magnet with REBCO Coated Conductors," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 24, No. 3, June, 2014
- 12) 石山ほか:「高温超電導コイルの安定性評価基準とクエンチ検出・保護—SMES用伝導冷却YBCOコイルを例として—」, 低温工学, 48巻4号, p141-150, 2013
- 13) K. Tsuchiya, et al.: "Development of HTS Sextupole Magnet for SuperKEKB Interaction Region," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 26, No.4, 4100904, June 2016.
- 14) 土屋ほか:「加速器用HTSマグネットの開発(4-1) -SuperKEKB衝突点色収差補正用HTS六極マグネットの設計-」, 第92回低温工学・超電導学会 講演概要集p.194, 2015
- 15) X. Wang, et al.: "Near-adiabatic Quench Experiments on Short YB2Cu3O7-d Coated Conductors," J. Appl. Phys. 101, 053904, 2007
- 16) M. Daibo, et al.: "Evaluation of Normal-zone Propagation Characteristics of REBCO Coated Conductor with Laminated Cu Tape," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.21, No.3, pp. 2428-2431, 2011
- 17) M. Daibo, et al.: "Study of Quench Behavior of REBCO Impregnated Pancake Coil with a 75-μm-thick Copper Stabilizer under Conduction-cooled Conditions," Physics Procedia 67, pp. 750-755, 2015
- 18) 藤田ほか:「加速器用HTSマグネットの開発(4-2) -REBCO含浸コイルのクエンチ特性の測定-」, 第92回低温工学・超電導学会 講演概要集p.195, 2015
- 19) 王ほか:「加速器用HTSマグネットの開発(4-3) -REBCO含浸コイルのクエンチ特性の数値解析-」, 第92回低温工学・超電導学会 講演概要集p.196, 2015