

冷凍機冷却型低温超電導マグネットのクエンチ保護システムの開発 Development of a Quench Protection System for a cryocooler cooled LTS magnet

岡山大・工 七戸 希, 井上 貴裕, 村瀬 暁
 東北大・金研 西島 元, 渡辺 和雄
 N. Nanato¹, T. Inoue¹, S. Murase¹, G. Nishijima² and K. Watanabe²
¹ Faculty of Engineering, Okayama University
² Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

超電導マグネットがクエンチすると、過大な局所的な温度上昇などにより導体の損傷などの厳しい事故が発生する可能性がある[1]。そのため、クエンチが発生した場合には速やかに通電電流を遮断し、蓄積エネルギーを外部に引き出すことで温度上昇を抑制する必要がある。特に液体ヘリウムフリーの冷凍機冷却型超電導マグネットではクエンチ後の温度上昇が液体ヘリウム浸漬冷却の場合と比べて過大となるため、クエンチ保護に対してさらなる早期・確実性が求められる。

著者らはこれまでに有効電力法によるクエンチ保護システムを提案し、その有効性を確認してきた[2]-[6]。しかしながら、冷凍機冷却下における検討および実用レベルの容量を持ったマグネットに対する検討が必要であった。

そこで、本稿では、冷凍機冷却型低温超電導マグネットの有効電力法に基づくクエンチ保護システムを開発することを目的として、近年高磁場マグネット用として開発が進んでいる Nb₃Al [7] 小型巻線を冷凍機冷却および 13T の磁場を印加することで冷凍機冷却型マグネットを模擬し、そのクエンチ保護を行う実験を実施し、その結果により、提案法の有効性を検討した。

2. 有効電力法

有効電力法とは、クエンチ時にマグネットに発生した瞬時有効電力を誘導電圧およびノイズに干渉されず検出する方法であり、その原理を以下に示す。

Fig. 1 に 2 層にグレーディングされた超電導マグネットの有効電力法に基づくクエンチ検出回路を示す。同図において、 v_{SC} : 超電導マグネットの両端電圧、 i : 通電電流、 r : クエンチ発生後の巻線抵抗、 L : 自己インダクタ

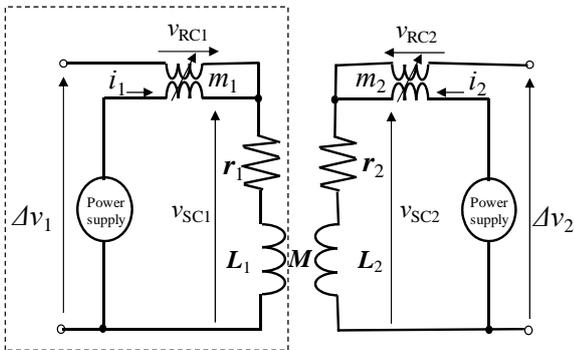


Fig. 1 Quench detection circuits for 2-layer magnets based on an active power method

ンス、 v_{RC} : Rogowski Coil の 2 次巻線電圧、 m : Rogowski Coil の相互インダクタンス、 M : 2 層マグネットの相互インダクタンスであり、添え字 1, 2 はそれぞれマグネットの外層と内層を示している。以降、外層コイルのクエンチを検出することを前提に説明を行う。

v_{SC1} , v_{RC1} はそれぞれ次式で表せる。

$$v_{SC1} = r i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad \dots\dots(1)$$

$$v_{RC1} = m_1 \frac{di_1}{dt} \quad \dots\dots(2)$$

ここで $L_1 = m_1$ となるように、 m_1 の値を調整することで次式が得られる。

$$\Delta v_1 = v_{SC1} - v_{RC1} = r_1 i_1 + M \frac{di_2}{dt} \quad \dots\dots(3)$$

また、

$$v_{RC2} = m_2 \frac{di_2}{dt} \quad \dots\dots(4)$$

より、以下の演算により、抵抗性電圧を得る。

$$\Delta v_1' = \Delta v_1 - k v_{RC2} = r_1 i_1, \quad k = \frac{M}{m_2} \quad \dots\dots(5)$$

抵抗性電圧は一般的にノイズの重量により SN 比の低い信号になりやすいため、 $\Delta v_1'$ を次式であらわされる瞬時有効電力 P_1 に変換し、フィルタ処理を行うことでノイズの除去を行う。

$$P_1 = \Delta v_1' i_1 = r_1 i_1^2 \quad \dots\dots(6)$$

$$P_1'(s) = \frac{1}{1 + sT_m} P_1(s) \quad \dots\dots(7)$$

(7)式は T_m を時定数とした 1 次の LPF (Low Pass Filter) をラプラス変換にて示している。(6)式の演算により得られた瞬時有効電力 P_1 は、平均値が常に正である、すなわち直流抵抗性成分を持っている。この直流成分はフィルタ処理しても減衰することはないが、電磁的ノイズ (高調波ノイズ) は除去されるため、(7) 式のように LPF という簡易的な方法を用いて高い SN 比を持った抵抗性の信号を得ることができる。クエンチ発生判定はこのクエンチ発生検出信号 P_1' を閾値 P_{th1} と比較することで行う。内層コイルのクエンチ検出の場合、(1)-(7)式の添え字の“1”と“2”が入れ替わるのみで同様の理論で可能である。

以上により有効電力法にて自己誘導および相互誘導電圧、さらにノイズを抑制し、クエンチ発生に伴う抵抗性信号のみを早期・確実に検出することができる。

なお、後述の実験では単層巻線を対象としているため、Fig. 1 の左半分の点線で囲まれた回路により有効電力法を実現している(単相の場合、(1)-(7)式において $M=0$ とすればよい)。

3. 実験概要および結果

3-1. 実験装置

実験対象にはサンプルコイルとして Nb_3Al 小型巻線を用いた。巻線の諸元を Table 1 に、外観を Fig. 2 に示す。実験では、局所的熱擾乱によるクエンチを模擬したヒータによるクエンチと励磁中のトレーニング過程などによるクエンチを模擬した過電流試験(I_c 以上の電流を通电することによるクエンチ)を行った。ヒータ試験ではサンプルコイルに負荷率 90%程度 of 電流を通电している状態で、Fig. 2 に示す熱擾乱投入用のヒータにより、パルス熱擾乱を与えた。また、温度センサを取り付け、クエンチ保護前後における巻線の温度を観測した。サンプルコイルの冷却は前述のように冷凍機冷却である。

Fig. 3 にクエンチ保護回路を示す。サンプルコイルが超電導状態にあるとき、すなわち(7)式の P が閾値 P_{th} 未満であるときには IGBT スwitch のゲート信号 G_s がオンとなり、電源からコイルへ電流が供給される(i_1 のループ)。クエンチ検出時には G_s がオフとなり、コイルへの通電電流が遮断され、磁気エネルギーが保護抵抗にて回収される(i_2 のループ)。なお、クエンチ判定に用いる閾値 P_{th} の決め方は、実験が安全に行える範囲で任意に設定し

Table 1 Specifications of Nb_3Al LTS coil

Wire	
Strand Dia. (with Cu)	1.00 mm
Strand Dia. (without Cu)	0.70 mm
Number of Filament	222
Physical Filament Dia.	38 μ m
Cu/non-Cu ratio	1.0
Filament Barrier	Tantalum
Central Core of Filament	Tantalum
Central Dummy Filament	Tantalum
Most-Outsider Matrix	Niobium
Coil	
Diameter	36.0 mm
Number of turns	3
Critical current (at 9 K, 13 T)	97.8 A

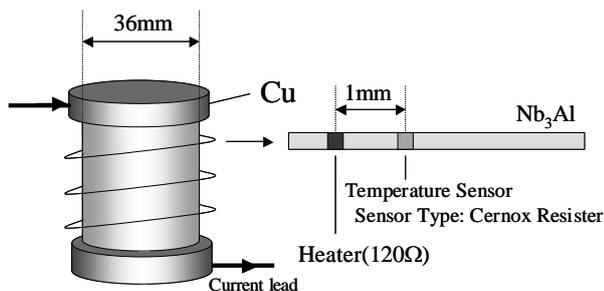


Fig.2 Nb_3Al LTS coil

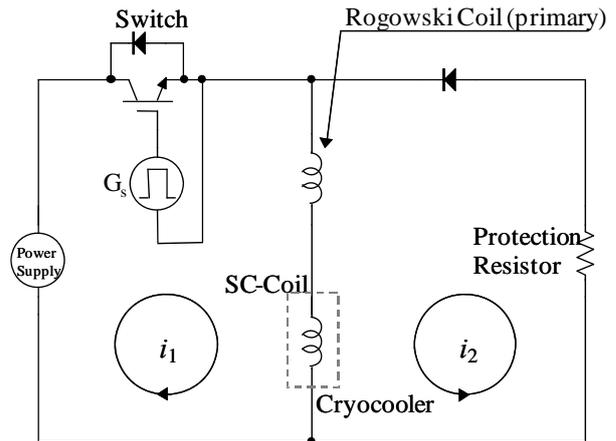


Fig. 3 A quench protection circuit

た。また、(7)式の時定数 T_m は 15ms (カットオフ周波数: 10Hz) とした。すべての実験において、高磁場マグネットを想定して 13T の磁場を印加させている。

3-2. 実験結果

ヒータ試験の結果を Fig. 4 に示す。サンプルコイル初期温度は 9 K である。同図(a)はサンプルコイルに流れる通電電流 i を示している。同図(a)に示すように 90 A (負荷率: 92%) の電流を通电している状態で、同図(b)に示すパルス電圧 (パルス幅: 0.8 ms, ピーク値: 8.0 V, 熱量: 0.47 mJ) によりヒータに通电することで局所的熱擾乱を与える。するとコイルはクエンチに至り、抵抗性電圧 Δv が観測されるはずであるが同図(c)に示すように、発生した Δv がノイズと比べて小さく、同図(c)にて確認することはできない。しかし、同図(d)に示すように有効電力信号 P はクエンチの発生に伴って上昇し、 P が閾値 P_{th} (2.5W, 任意に設定) に達した瞬間に同図(e)のゲート信号 G_s が切り替わり、同図(a)の i が遮断されていることがわかる。この保護動作により同図(f)に示すサンプルコイルの温度 T は 5K 程度の上昇に抑えられている[8]。これらのことから、有効電力法によりクエンチの発生を非常に高感度で検出し、巻線が保護されたということが言える。

次に過電流試験の結果を Fig. 5 に示す。サンプルコイル初期温度はヒータ試験と同様の 9K である。同図(a)のように臨界電流(97.8 A)を超えるまでサンプルコイルの通電電流を増加させていきクエンチさせる。同図(b)に示す P より、通電電流 i がコイルの臨界電流を超えた直後にクエンチが発生し、それを検出できていることがわかる。同図(c)より P が閾値 P_{th} (2.5W, ヒータ試験と同値) に達した瞬間にゲート信号 G_s が切り替わり、同図(a)の i が遮断されて保護動作が行われていることがわかる。同図(d)にサンプルコイルの温度を示すが、その温度上昇は 6.5 K 程度に抑えられている[8]。

Fig. 6 に閾値とコイルの温度上昇の関係を示す。これらの結果は、過電流試験においてコイルの初期温度 9K, 印加磁場 13 T の条件で P_{th} を変化させていった場合の

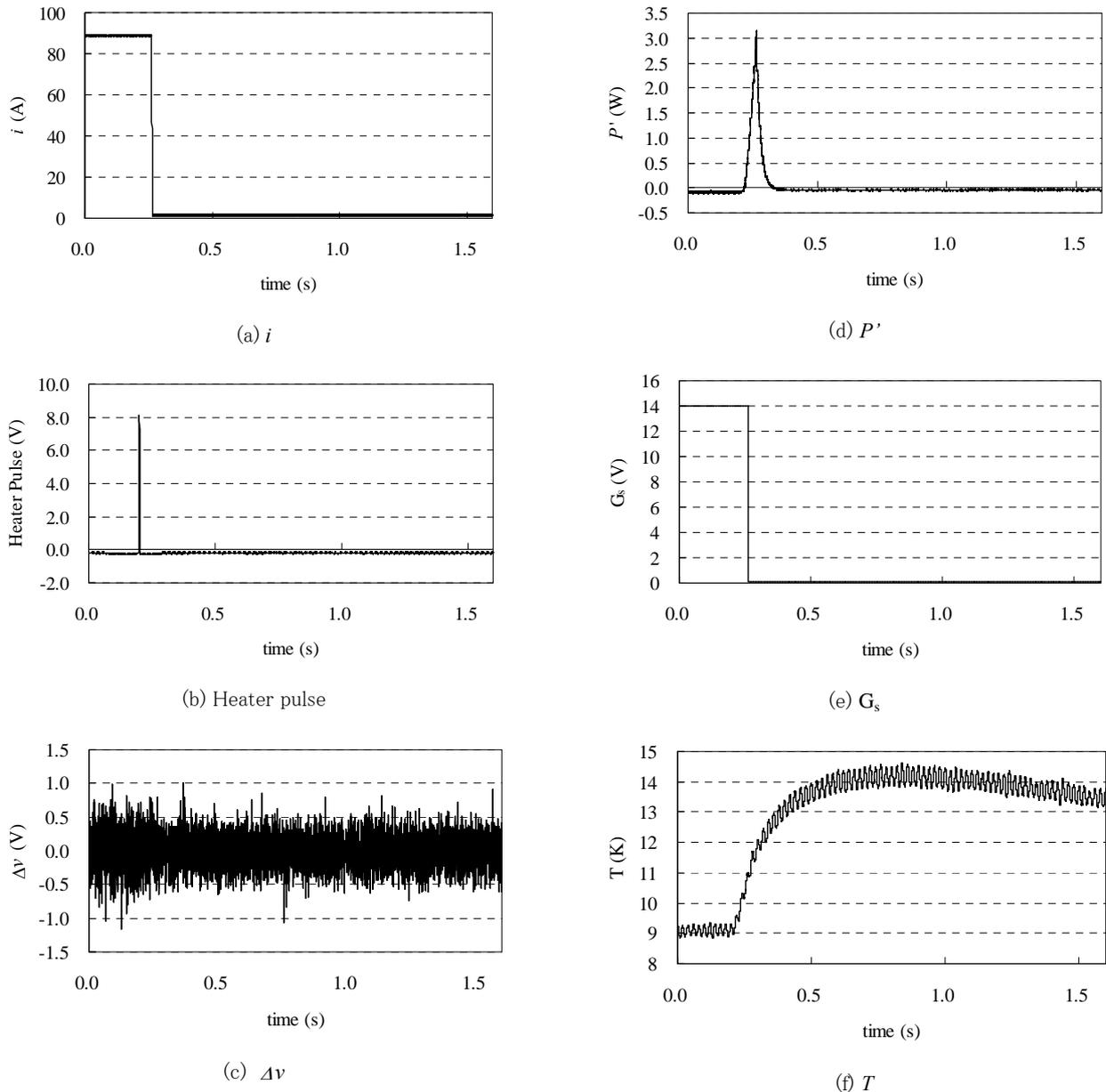


Fig. 4 Experimental results for a heater test

サンプルコイルの温度上昇をまとめたものである。同図から、閾値を下げて検出感度を高くすることで、線形に上昇温度を低くすることができ、かつその上昇温度を非常に小さくできることがわかる[8]。また、 P' の SN 比が高いため、閾値を小さく設定できることがわかる。これらのことから、冷凍機冷却下で使用される低温超電導マグネットなどのように、クエンチに対する安定性が低いマグネットに対しても、閾値を低く設定することで安全な保護が可能であると期待できる。

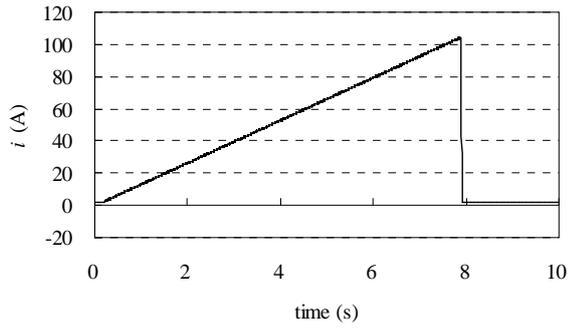
4. まとめ

本稿では、有効電力法に基づく超電導マグネットのクエンチ保護システムについて、冷凍機冷却型低温超電導マグネットに対する有効性を検討した。試験対象の

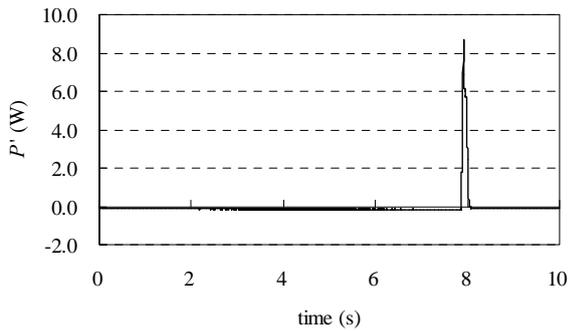
Nb_3Al サンプルコイルに対して冷凍機冷却および 13T の磁場中にてノイズおよび誘導電圧に干渉されず高い感度でクエンチを検出でき、十分な早さで保護を行う（十分に低い上昇温度に抑制する）ことができた。これらより、本システムは冷凍機冷却型高磁場マグネットのようなクエンチ後の温度上昇が過大になりうるマグネットに対してその有効性が期待できると言える。

参考文献

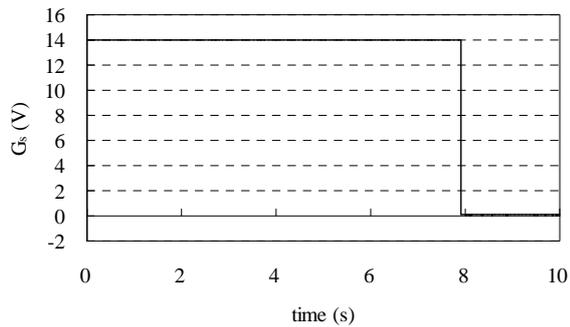
- [1] 低温工学協会, 超伝導・低温工学ハンドブック, オーム社(1993)600,603
- [2] N. Nanato, Proceedings of ICEE2008, No. P-171, CD-ROM (2008)
- [3] 七戸希, 電気学会基礎・材料・共通部門誌(A 部門



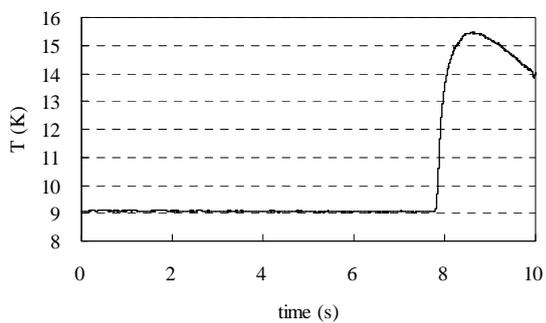
(a) i



(b) P'



(c) G_s



(d) T

Fig. 5 Experimental results for an over-current test

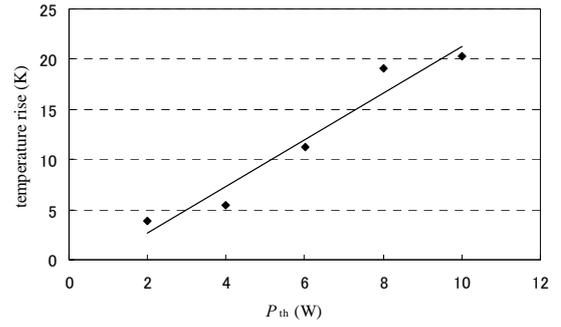


Fig. 6 Threshold P_{th} vs. temperature rise

誌), 128 卷, 6 号(2008)386

[4] K. Takeuchi, N. Nanato, S. Murase, S.B. Kim, G. Nishijima, K. Watanabe, T. Takeuchi, N. Banno and A. Kikuchi, Cryogenics, Vol. 48/3-4(2008)148

[5] 竹内和哉, 七戸希, 村瀬暁, 金錫範, 西島元, 渡辺和雄, 竹内孝夫, 伴野信哉, 菊池章弘, 低温工学, 42 卷, 11 号(2007)382

[6] N. Nanato, Y. Tsumiyama, S.B. Kim, S. Murase, K.-C. Seong, H.-J. Kim, Physica C, Volumes 463-465 (2007)1281

[7] K. Tachikawa, Fusion Engineering and Design 81 (2006) 2401

[8] 岩熊成卓, 船木和夫, 山藤馨, 低温工学, 25 卷, 3 号(1990)172