

# 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, 村瀬 暁  
 物材機構 竹内 孝夫, 菊池 章弘, 伴野 信哉  
 東北大・金研 西島 元, 渡辺 和雄

N. Nanato<sup>1</sup>, S. Murase<sup>1</sup>, T. Takeuchi<sup>2</sup>, A. Kikuchi<sup>2</sup>, T. Banno<sup>2</sup>, G. Nishijima<sup>3</sup>, K. Watanabe<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Okayama University

<sup>2</sup> National Institute for Materials Science

<sup>3</sup> Institute for Materials Research, Tohoku University

## 1. はじめに

超電導コイルがクエンチすると、急激な局所的な温度上昇により超電導導体の焼損・特性劣化などの激しい事故が発生する可能性があるため、クエンチした場合にはできるだけ早くクエンチを検出し、コイル内部の蓄積エネルギーを外部に引き出し、コイルの温度上昇を抑える必要がある[1]。特に現在普及しつつある冷凍機冷却マグネットにおいてはクエンチ後の温度上昇が浸漬冷却に比べてより過大となるため、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]–[8]。従来のシステムはその主要部であるクエンチ検出回路をアナログ回路にて構成していたが、これをソフトウェアで実現できれば、多機能化、メンテナンス性の向上など様々な有用性が見込まれる。そこで、NI PXI システムを用いてソフトウェアベースの検出装置を作製した。

本稿では、冷凍機冷却型低温超電導マグネットに対する本システムの有効性を検証するため、近年高磁場マグネット用として開発が進んでいる Nb<sub>3</sub>Al [9] 小型巻線を冷凍機冷却および 18T 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、そのクエンチ保護実験の結果について述べる。

## 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 3 章の実験にて適用した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、 $L$ : 自己インダクタンス、 $v_{CC}$ : Cancel Coil の 2 次巻線電圧、 $m$ : Cancel Coil の相互インダクタンス、である。

$v_{SC}$ ,  $v_{CC}$  はそれぞれ次式で表せる。

$$v_{SC} = ri + L \frac{di}{dt} \quad \dots\dots(1)$$

$$v_{CC} = m \frac{di}{dt} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、

$$k = L/m \quad \dots\dots(3)$$

となるように、 $k$  の値を調整することで以下の演算により、

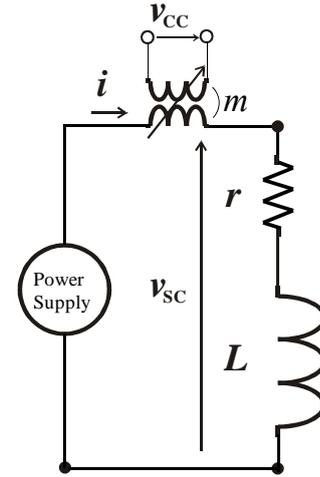


Fig. 1 A quench detection circuit based on an active power method

抵抗性電圧を得る。

$$\Delta v = v_{SC} - kv_{CC} = ri \quad \dots\dots(4)$$

抵抗性電圧は一般的にノイズの重畳により SN 比の低い信号になりやすいため、 $\Delta v$  を次式であらわされる瞬時有効電力  $P$  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。

$$P = \Delta vi = ri^2 \quad \dots\dots(5)$$

$$P'(s) = \frac{1}{1+sT_m} P(s) \quad \dots\dots(6)$$

(6)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。(5)式の演算により得られた瞬時有効電力  $P$  は、平均値が常に正である、すなわち直流抵抗成分を持っている。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、(6)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。クエンチ発生の判定はこのクエンチ発生検出信号  $P'$  を閾値  $P_{th}$  と比較することで行う。

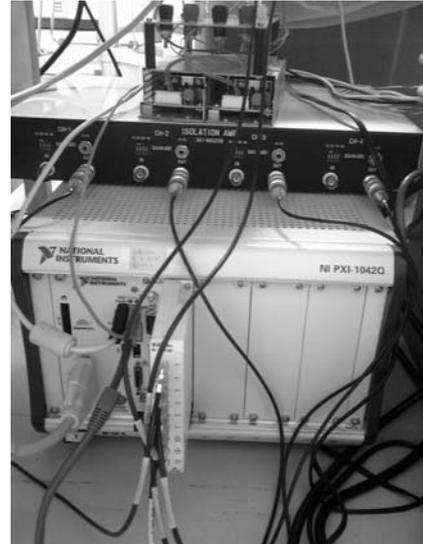
## 3. 実験概要および結果

### 3-1. 実験装置

実験対象にはサンプルコイルとして Nb<sub>3</sub>Al 小型巻線

Table 1 Specifications of Nb<sub>3</sub>Al LTS coil

Wire	
Strand Dia. (with Cu)	1.00 mm
Strand Dia. (without Cu)	0.70 mm
Number of Filament	276
Physical Filament Dia.	34 μm
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 5 K, 18 T)	139 A



(a) A picture of a PXI system

を用いた。巻線の諸元を Table 1 に示す。実験では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 ( $I_c$  以上の電流を通電することによるクエンチ) を冷却温度 5K, 印加磁場 18T のもとで行った。

Fig. 2 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(6)式の  $P$  が閾値  $P_{th}$  未満であるときには IGBT スイッチのゲート信号  $G_s$  がオンとなり、電源からコイルへ電流が供給される。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。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た。また、(6)式の時定数  $T_m$  は 15ms (カットオフ周波数: 10Hz) とした。

Fig. 3 に NI PXI システムによるソフトウェアベース保護システムの外観と制御パネルを示す。ソフトウェアにて計測・制御を行えるため、従来のアナログ回路構成のシステムに比べ、視覚的にわかりやすくかつ操作しやすい状態監視システムとなり、システムのパラメータ変更等やメンテナンスが容易なシステムとなる。

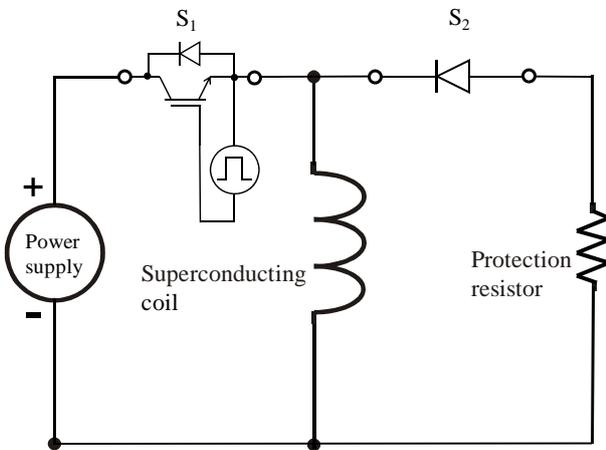
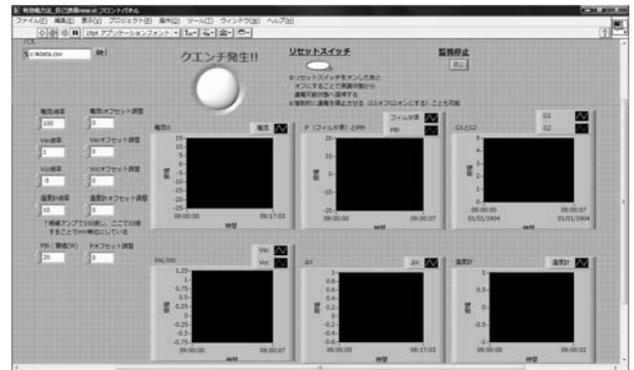


Fig. 2 A quench protection circuit

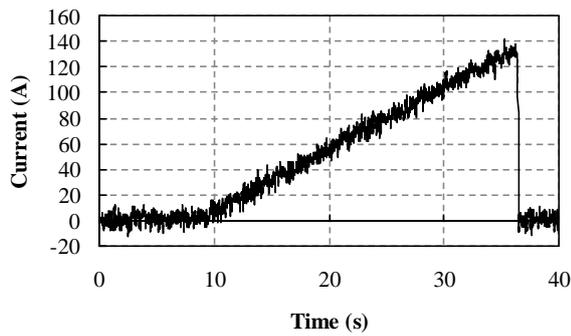


(b) Control panel

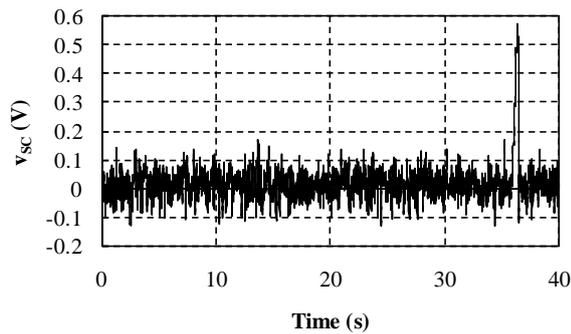
Fig. 3 Quench protection system

### 3-2. 実験結果

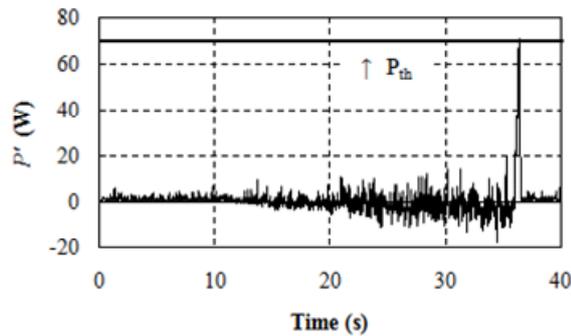
実験結果を Fig. 4 に示す。サンプルコイル初期温度は 5 K であり、18T-CSM により 18T の磁場が印加されている。同図(a)はサンプルコイルに流れる通電電流  $i$  を示している。同図(a)に示すように 5 A/s のスイープレートによりサンプルコイルの  $I_c=139$  A に到達するまで電流を流す。同図(b)はサンプルコイルの両端電圧である。通電電流が 139 A に到達したとき (36 s) に電圧が発生しており、この時点でクエンチが発生したことがわかる。同図(c)は  $P$  の波形であり、クエンチ発生と同時に立ち上がっていることがわかる。本実験では閾値  $P_{th}$  を 70 W に設定しており、同図(d)のゲート信号  $G_s$  をみると、 $P$  が  $P_{th}$  に達した瞬間オンからオフに切り替わっていることがわかり、同時に同図(a)より通電電流が遮断されていることがわかる。以上により、保護動作が正常に行われていることがわかる。なお、本実験において、サンプルコイルの最高到達温度は 40 K であった。サンプルコイルの許容温度 [10, 11] より十分低い温度に抑えられていることから、開発したソフトウェアベースのクエンチ保護システムが冷凍機冷却型低温超電導マグネットに対して有効であることが



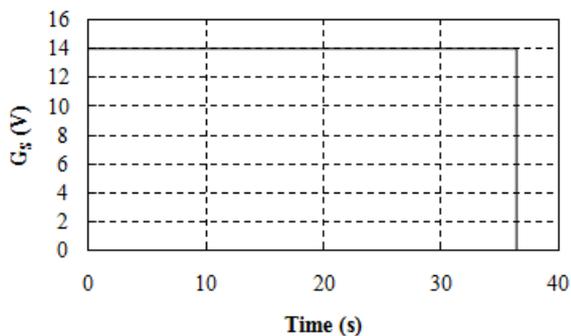
(a) Current



(b)  $v_{sc}$



(c)  $P'$



(d)  $G_s$

Fig. 4 Experimental results

示唆される。

#### 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ソフトウェアベース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。冷凍機により 5 K に冷却されかつ 18T-CSM により 18 T の磁場が印加された  $Nb_3Al$  サンプルコイルに対して臨界電流以上の過電流を通電して発生したクエンチを、十分な早さで検出および保護を行うことができることを確認した。今後は、本結果をベースに、実規模容量を有した冷凍機冷却型高磁場マグネットに有効なシステムを構築していく。

#### 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] T. Inoue, N. Nanato, K. Sasaki, S. Murase, *Physica C*, accepted
- [3] N. Nanato, Proceedings of ICEE2008, No. P-171, CD-ROM (2008)
- [4] 七戸希, 電気学会基礎・材料・共通部門誌(A 部門誌), 128 巻, 6 号(2008)386
- [5] 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
- [6] 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 巻, 11 号(2007)382
- [7] N. Nanato, Y. Tsumiyama, S.B. Kim, S. Murase, K.-C. Seong, H.-J. Kim, *Physica C*, Volumes 463-465 (2007)1281
- [8] 東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター, 平成 20 年度年次報告書, 6-6(2009)
- [9] A. Kikuchi, R. Yamada, E. Barzi, M. Lamm, T. Takeuchi, D. Turrioni, A. V. Zlobin, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 18/2(2008)1026-1030
- [10] M. N. Wilson, *Superconducting Magnets*. Oxford University Press (1983) 200-232
- [11] Y. Iwasa, *Case Studies in Superconducting Magnets, Design and Operation Issues*, Second Edition, Springer Science (2009) 467-544