

研究種目：若手研究 (B)  
研究期間：2007～2008  
課題番号：19760277  
研究課題名 (和文) 超電導コイルの状態観測システムの開発  
研究課題名 (英文) DEVELOPMENT OF A QUENCH PROTECTION SYSTEM FOR SUPERCONDUCTING COILS  
研究代表者  
七戸 希 (NANATO NOZOMU)  
岡山大学・大学院自然科学研究科・助教  
研究者番号：80362953

研究成果の概要：超電導コイルがクエンチすると、過大な局所的な温度上昇による超電導導体の特性劣化・焼損などの厳しい事故が発生する可能性があるため、コイルが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、コイルの磁気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ことのできるシステムが必要である。本研究では、研究代表者が提案しているクエンチ保護法である有効電力法およびAE 信号の時間周波数可視化法をクエンチ検出および保護システムとして確立し、その有効性を確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	0	2,100,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	390,000	3,790,000

研究分野：電気電子工学，超電導工学  
科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：超電導コイル，クエンチ保護，有効電力法，AE，ウェーブレット変換

## 1. 研究開始当初の背景

近年、超電導特性および機械加工性に優れた超電導線材の作製が可能になってきており、仕様に即した超電導電力機器の実現が期待されている。しかしながら、その実現のためには、いくつかの問題点を解決する必要がある、そのひとつがクエンチ保護対策である。電力機器として超電導体を使用するほとんどの場

合、超電導体はコイル形状で使用され、数100A以上の電流を通電する。したがって、超電導巻線は常に強大な電磁力にさらされ、その電磁力による機械的応力を受け、巻線の一部が常電導転移（発生した常電導部分が伝播・拡大し続け、超電導状態にリカバリーしない状態をクエンチという）し、巻線に過大な局所的な温度上昇が生じ、巻線が劣化する、あるいは

は焼損などの厳しい事故が起こる場合もある。したがって、超電導コイルを実用化させるためには、クエンチを早期・確実に検出し、通電電流遮断および蓄積磁気エネルギーの回収をして温度上昇を未然に防止するシステムが必要とされている。小型コイルであれば、電圧計測線や熱電対を複数取り付け、電圧・温度を観測することによりクエンチまたは局所的な温度上昇を検出することは比較的容易であるが、実用レベルの大型コイルでは、印加もしくは発生する電圧が大きいため、計測線の取り付けや引き回しにより（超電導線の絶縁被覆を取り除くことや電氣的接触部位が生じることにより）巻線の絶縁特性が低下し、かえって信頼性を損ねてしまうため、クエンチ発生の観測が困難である。国内外を通じて有効な方法は未だ開発されておらず、その方法の確立は急務である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、超電導コイルの状態を常時観測し、クエンチが発生したときには適切な保護措置をとることのできるシステムの開発である。研究代表者はこれまでに、そのシステムの基盤技術として、「有効電力法」と「AE信号の時間周波数可視化法」を提案してきた。前者は、クエンチ時にコイル内にて発生する瞬時有効電力を検出する方法であり、電気信号（抵抗性信号）検出に基づいた非接触型の検出方法であるため、巻線の絶縁特性を低下させることなく、かつクエンチ発生に即応し、時間遅れなく検出が可能である。さらに、ノイズにも強く、簡易な演算回路で実現可能であることから、コストパフォーマンスにも優れている。後者は、常電導転移に伴う温度上昇をAE信号として検出する方法であり、AE信号測定に使用するAEセンサは電氣的に非接触で使用可能であるため、巻線の

絶縁特性を低下させることはない。また、一般的にAE信号はノイズに干渉されやすく、ノイズとの分離が困難なことが多いが、本方法ではウェーブレット変換を用いた時間周波数可視化により、ダイナミックスペクトラムとしてAE信号とノイズを分離可能である。

本研究では、まずは、個々の方法に基づいたシステムを確立し、それらの有効性を立証した後、両方法を組み合わせ、瞬時有効電力とAE信号の両面からコイルの状態を観測できるシステムとして完成させる。

## 3. 研究の方法

2007年度では有効電力法とAE信号の時間周波数可視化法をクエンチ検出システムとして確立することを目標とした。その方法として、有効電力法については、瞬時有効電力の算出過程で使用するキャンセルコイルの設計・作製、瞬時有効電力の計算およびフィルタリングを行う回路の設計・作製を行い、高温超電導コイルにて原理検証を行った。AE信号の時間周波数可視化法については、超電導コイルにて生じるAE信号の周波数帯域に対して感度が高いセンサとアンプの設計・作製、ウェーブレット変換を行うための演算処理装置の設計・作製を行い、有効電力法と同様に原理検証を高温超電導コイルにて行った。

2008年度では、クエンチ保護回路を構築し、2007年度に確立させた両方法をクエンチ保護システムとして確立させることを目標とした。そのために、保護回路にて使用するIGBTを用いた双方向スイッチの作製とそのゲート信号を制御する回路の作製を行い、構築されたシステムを用いて高温超電導コイルおよび低温超電導コイルにてクエンチ保護試験を行った。

## 4. 研究成果

- (1) 冷凍機冷却型高温超電導コイルにて有効電力法によるクエンチ保護実験を行

った。高温超電導コイルは低温超電導コイルに比べて運転温度を高くできることから熱的安定性が高くなり、冷却コストを抑制することができるため、その応用が期待されているが、その材料特性により、常電導転移が低温超電導コイルより局所的になりやすい。そのため、過大な温度上昇が生じやすく、発生する抵抗性電圧も小さくなりやすいため、より早期の検出が必要でありかつ微小信号を精度よく検出する必要がある。さらに、冷凍機の冷却能力は冷媒に比べて低いいため、クエンチ時の温度上昇が大きくなることから、これによっても早期検出が要求される。本実験はこれらの問題に対する有効電力法の有効性を検証するための実験である。実験結果より、冷凍機冷却された Bi2223 高温超電導コイルの局所的な常電導転移を精度よくかつ早期に検出することができた。

- (2) 冷凍機冷却型低温超電導コイルにて有効電力法によるクエンチ保護実験を行った。本実験は、冷凍機冷却型高磁場超電導マグネットに対する有効電力法の有効性を検証するために、高磁場マグネット用線材として開発が進んでいる Nb<sub>3</sub>Al 超電導線を巻線としたコイルを実験対象とし、冷凍機冷却型高磁場マグネットを想定して、冷凍機冷却かつ 13T の高磁場を印加した環境において実験を行った。その結果、初期温度 8K に冷却されたコイルのクエンチ後の最高到達温度を 20K 程度以下（冷凍機冷却型低温超電導コイルの保護に対して十分に低い温度）に抑制することができた。
- (3) グレーディングされた複数のコイルによって構成された超電導コイルに対して有効電力法が適用できるように改善

を施し、液体窒素浸漬冷却された 2 層超電導コイルにて保護実験を行った。特に高磁場超電導マグネットではコイルをグレーディング構成にする場合が多いが、各コイルが互いに磁気結合するため、それによって発生する相互誘導電圧がクエンチの誤判定を引き起こすことが問題になることがある。そこで、有効電力法をその相互誘導電圧に干渉されないように改善を施し、その効果を液体窒素浸漬冷却された 2 層の Bi2223 高温超電導コイルにて検討した。その結果、マグネットの励磁・減磁を想定したスイーププレートによる通電や交流電流通電などの通電電流波形によらず相互誘導電圧の干渉を十分に抑制し、クエンチ後のコイルの最高到達温度を 130K 程度以下（液体窒素浸漬冷却された高温超電導コイルの保護に対して十分に低い温度）に抑制することができた。

- (4) 有効電力法に基づく瞬時有効電力算出回路および保護回路スイッチ制御回路のソフトウェア化を行った。アナログ回路ベースのシステムは高速演算が行える反面、回路定数の変更が容易ではなく、経年劣化によるパフォーマンスの低下の懸念がある。そこで、これらの問題に対処するためにソフトウェアベースの保護システムを試作した。演算速度の高速化など改善の余地はまだあるものの、液体窒素浸漬冷却の Bi2223 高温超電導コイルの保護を実現することができ、一定の成果が得られたと言える。
- (5) AE 信号の時間周波数可視化法にて Bi2223 高温超電導コイルおよび YBCO 高温超電導コイルの局所的な温度上昇検出実験を行った。(1)で述べたように、高温超電導コイルは低温超電導コイルよ

りも局所的な温度上昇の検出に対する必要性が高い。特にYBCO 高温超電導線はその構造からBi2223 高温超電導線よりも常電導転移時の発生抵抗が大きく、その分ジュール発熱と温度上昇が大きくなるため、その検出に対する正確性と即応性が高く求められる。そこで、本方法の原理検証および有効性をまずはBi2223 コイルにて確認し、次いでYBCOコイルにて実験を行った。その結果、両コイルにて局所的な温度上昇の検出に成功した。以上により、両方法による保護システムが確立できたとと言える。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① N. Nanato, Quench protection system based on an active power method for the magnetically coupled superconducting coils, Proceedings of ICEE2008, 査読有, No. P-171, CD-ROM (2008)
- ② 七戸 希, 有効電力法による超電導コイルのクエンチ保護システム—相互誘導電圧除去による特性改善法—, 電気学会基礎・材料・共通部門誌 (A 部門誌), 査読有, 128 巻, 6 号, pp. 386-392 (2008)
- ③ K. Takeuchi, N. Nanato, et al. (全9名, 2 番目), Fundamental studies for the application of quench protection systems based on an active power method for cryocooled LTS coils, Cryogenics, 査読有, Vol. 48/3-4, pp. 148-153 (2008)
- ④ 竹内 和哉, 七戸 希, 他 (全9名, 2 番目), 冷凍機冷却低温超電導コイルへの有効電力法に基づくクエンチ保護シス

テム適用に関する基礎的検討, 低温工学, 査読有, 42 巻, 11 号, pp. 382-388 (2007)

- ⑤ N. Nanato, Y. Tsumiyama, et al. (全6名, 1 番目), Development of quench protection system for HTS coils by active power method, Physica C, 査読有, Volumes 463-465, pp. 1281-1284 (2007)

[学会発表] (計 7 件)

- ① 井上 貴裕, 有効電力法による交流超電導コイル保護システム, 2008年度秋季低温工学・超電導学会, No. 2P-p35, 2008. 11. 13, 高知文化プラザ かるぼーと
- ② N. Nanato, Detection of temperature rise in YBCO coil by time-frequency visualization of AE signals, International Symposium on Superconductivity 2008, October 27 - 29, 2008, Tsukuba, Japan
- ③ N. Nanato, Quench protection system based on an active power method for the magnetically coupled superconducting coils, International Conference on Electrical Engineering 2008, July 6 - 10, 2008, Okinawa, Japan
- ④ 七戸 希, AE信号の時間周波数可視化による高温超電導巻線の局所的な温度上昇検出, 2008年度春季低温工学・超電導学会, No. 1P-p17, 2008. 5. 26, 明星大学
- ⑤ 井上 貴裕, 有効電力法による磁気結合した超電導コイルの保護システム開発, 2008年度春季低温工学・超電導学会, No. 1P-p16, 2008. 5. 26, 明星大学
- ⑥ 佐野 勇人, DAQシステムを用いた有効電力法による高温超電導コイル保護システムの開発, 2008年電気学会全国大会, No. 5-141, 2008. 3. 19-21, 福岡工業大学
- ⑦ 竹内 和哉, 有効電力法による超電導コイ

ル保護システムの開発 - 相互誘導電圧  
除去による特性改善 -, 2007年度秋季低  
温工学・超電導学会, No. 1P-p25,  
2007. 11. 20, 宮城県民会館

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

七戸 希 (NANATO NOZOMU)

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号 : 80362953