

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007 ～ 2008
 課題番号：19740158
 研究課題名（和文） 次世代加速器用超伝導磁石への応用を目指した超伝導線材のクエンチ伝搬特性の研究
 研究課題名（英文） Study of quench propagation characteristics of superconducting strands for next generation accelerator magnets
 研究代表者
 佐々木 憲一（SASAKI KENICHI）
 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・助教
 研究者番号：70322831

研究成果の概要： 次世代加速器用超伝導磁石のクエンチ保護解析を目的として、Nb3Sn, Nb3Al 超伝導線材の安定性評価および汎用クエンチソフトの開発を行った。試作線材の安定性評価について、測定用装置の設計・製作を行い、装置としての動作を確認した。汎用クエンチ解析ソフトの開発について、解析モデルのデータ入力部の簡素化および解析結果の3次元モデル表示化プログラムを開発した。解析ソフトをホームページ上でダウンロードできるようにプログラムおよびホームページの整備を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	0	1,500,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	240,000	2,540,000

研究分野：超伝導工学、低温工学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理

キーワード：化合物系超伝導体 クエンチシミュレーション 超伝導磁石安定性

1. 研究開始当初の背景

高エネルギーハドロン加速器にとって、高磁場磁石は必要不可欠な要素であり、常により高磁場を目指した開発が続けられている。1994年12月に建設を開始したLHC (Large Hadron Collider) では7 TeV のエネルギーまで陽子を加速するために多数の高精度、高磁場超伝導磁石が必要とされている。我が国においては高エネルギー加速器研究機構において、衝突点近傍で粒子ビームサイズを細く絞る事で反応効率を高めるための強収束超伝導四極磁石の開発が行われ、平成16年度までに実機20台の製作が完了し、平成2

0年にはビームを出して試運転が行われる予定である。

このような順調な進展を受け、CERN（欧州原子核研究機構）ではLHCのアップ・グレード（Super LHC計画）の検討が始まった。この計画では、衝突点近傍に12～17Tの高磁場磁石が必要となる。超伝導線の材料として現在最も有望視されているのが、化合物系の超伝導線材、すなわちNb3Sn線材およびNb3Al線材である。Nb3Sn線材については欧米主導で開発が進んでおり、現在は1m長の短尺モデル磁石の開発が行われている。

我々はNb3Sn線材よりも遥かに機械的歪

みに強い Nb3Al 線材に着目し、平成 17～19 年度の科学研究費補助金・特定領域研究において、12T 以上の高磁場磁石の製作を目指して、急加熱急冷法という新プロセスにて製作された線材の高電流密度化および長尺化について研究開発を行っている。しかしこれらの線材開発の研究においては、性能向上に主眼をおいており、実仕様磁石を製作した際の安定性評価については後回しとなっている。

一方、超伝導線材を用いて磁石を製作する際の主な設計項目としては、電磁・機械設計の他に超伝導磁石特有の問題であるクエンチ（超伝導状態から常伝導状態への転移）に対する磁石の保護がある。超伝導磁石においては、一瞬で全領域がクエンチするのではなく、まず一部分でクエンチが起こり、そこで発生した熱が周囲に伝導する事でクエンチが伝搬していく。問題となるのは最初にクエンチした部分の温度上昇による磁石の焼損である。焼損を防ぐための基本的な保護方法は、クエンチによる磁石電圧の上昇を検出した後、即座に電源を遮断し、外部抵抗および磁石の常伝導抵抗により磁石中の電流を速やかに減衰させる方法である。ここで重要な要素となるのはクエンチ伝搬速度である。常伝導状態における超伝導体の抵抗値は非常に高いため、常伝導領域の速やかな拡大は回路全体の抵抗上昇を促し、電流減衰を早める事ができる。特にインダクタンスの大きな磁石システムの場合は重要である。なぜなら対地絶縁を確保するために磁石電圧を低く抑えなければならず、外部抵抗値を無制限に大きくする事が出来ないからである。

高速なクエンチ伝搬速度を実現する方法はいくつかあり、高純度アルミを利用した熱伝搬の促進や、保護ヒーターによる磁石の強制加熱などがあげられる。設計段階でどの方法が最も適切かを判断するためには数値解析に頼らざるを得ず、より安全で最適な保護システムの確立には、より信頼性の高いクエンチ解析が必要となる。これまでに世界中で様々な磁石システムが設計・製作されているが、基本的には設計するシステム毎にシミュレーションソフトが開発・解析が行われており、開発コストや時間がかかってしまうという問題がある。

申請者はこれまでに、高い汎用性を目指したクエンチ解析コードを独自に開発、茨城県東海村に建設中の大強度陽子加速器のビームラインで使用される超伝導磁石のクエンチ解析に応用し、保護ヒーター適用の必要性およびヒーターの取付け位置などを評価した。しかしこの解析において、解析結果とモデル磁石の実験結果との間に若干の誤差があり、それは主に印加磁場が低く、線材性能に余裕のある領域でのクエンチ伝搬速度が解析において精度よく再現できていないこ

とが原因であった。

2. 研究の目的

以上の背景のもとに、本研究の目的を以下の2点とした。

一つ目は超伝導磁石の汎用クエンチ解析ソフトの開発である。申請者がこれまでに開発した解析コードを発展させ、超伝導磁石システムの汎用クエンチ保護解析ソフトとして一般に公開する事を目的とする。解析したいモデルのデータ入力部分を可能な限り簡素化し、直感的に操作できるような GUI プログラム群を開発、出力部分については様々な形状をした磁石に対応できるように改善する。また、本コードの数値計算部分では差分法による熱伝搬計算を行っているが、この計算方法では精度を上げるために分割を細かくすると膨大な計算時間がかかってしまう。そこでアダプティブメッシュ法の適用を検討する。これは細分化が必要な常伝導・超伝導境界領域においては分割を細かく、それ以外は分割を大きくして計算を行う方法である。

二つ目は Nb3Al および Nb3Sn 超伝導線材のクエンチに対する安定性の評価である。これまでに製作された様々な断面形状を持った Nb3Al・Nb3Sn 超伝導線のクエンチ伝搬速度および最小クエンチエネルギー MQE (超伝導線がクエンチするために必要な最小のエネルギー) を、通電電流値や外部磁場、冷却条件を変化させて測定、評価する。特に解析コード開発への応用を考え、10T 以下の磁場中で臨界電流より低い電流値におけるクエンチ伝搬速度等を測定する。また、超伝導フィラメント径やフィラメント間隔およびマトリックス比などの、線材断面構成との相関を調査し、今後新しく開発・製造される線材の設計指針を得るための基礎データとする。

3. 研究の方法

(1) 汎用クエンチ解析ソフトの開発

これまでに開発した解析コードでは、数値計算の核となる部分は C++ 言語、データ入力・出力部の GUI インターフェースについては JAVA 言語を用いて開発を行ってきた。本研究においてはこれを発展させる形で、解析コードを3つのパート（データ入力部、数値計算部、データ出力部）にわけ、それぞれについて以下のように開発を進める。

まず、データ入力部について、入力ファイルの形式を EXCEL の様な市販の表計算ソフトでも製作できるように簡素化する。また、入力したデータに誤りが無いかを視覚的に確認できるような GUI を開発する。

数値計算部について、アダプティブメッシュ法の適用を検討する。メッシュ分割の仕方

について、分割条件とメッシュ寸法との関係を明らかにし、計算精度を落とさずに計算時間を短縮できるような条件について検討する。

データ出力部について、これまでのコードでは一層構造で単純に展開できるような磁石しか表示できないため、多層構造の磁石やヘリカル磁石等の複雑な磁石でも表示できるように GUI を改良する。さらにユーザーが必要とする詳細データの確認や抽出が出来るような機能を追加する。

(2)Nb3Al・Nb3Sn 線材の安定性測定

Nb3Al または Nb3Sn における 10 T 以下のクエンチ伝搬速度および最小クエンチエネルギー(MQE)を測定する。外部磁場を印加する磁石には 10 T まで励磁可能な既設の冷凍機冷却ソレノイドを使用する。サンプル冷却用のクライオスタットについて、設計・開発を行う。図 1 に実験装置の概略図を示す。サンプルに流す電流は、線径φ1mm 程度・10 T において約 1000 A、7 T 付近では 1500 A 以上になるため、既存の 875 A・5 V 電源を並列接続したものを準備する。ソレノイド中心部長さ約 20 cm の均一磁場領域にサンプルをおき、試料端部に取付けた入熱効率の高いカーボンペーストヒーター]を用いて MQE およびクエンチ伝搬速度を測定する。サンプルには、これまで製作したフィラメント間のスペースが 3.0~7.6 μm と異なる Nb3Al 線材を用い、線材の構成パラメータとクエンチ伝搬速度の関係性を調べる。

冷却条件が異なる場合の MQE とクエンチ伝搬速度も測定する。線材が液体ヘリウムに直接接触する状態の他、周囲をエポキシで覆うことで断熱状態を模擬して比較する。また、ガラス繊維テープまたはセラミック繊維テープにエポキシを含浸させて固め状態に

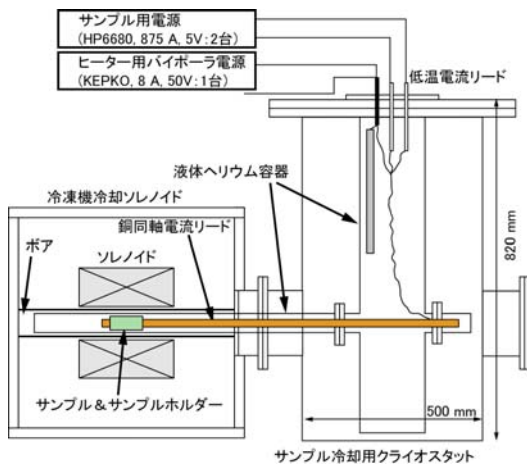


図 1 装置概略図

し、実際に製作されている超伝導磁石と同じような冷却条件についても測定、評価を行う。

4. 研究成果

(1)汎用クエンチ解析ソフトの開発

解析モデルのデータ入力部について、エクセルなど、表形式に対応したソフトでデータ入力できるように入力フォーマットを整理、簡素化を行った。

また、解析結果の表示について、これまででは 2 次元投影図のみの表示だったのに対し、複雑な形状をした超伝導磁石での結果表示にも対応するため、3 次元モデル表示を可能とするプログラムを開発した。図 2 に表示例として、J-PARC 複合磁場型超伝導磁石のコイル解析例を示す。上図がクエンチ前、下図がクエンチ伝搬途中の温度分布を表す。3 次元表示とする事で複雑な形状にも対応でき、また、一目で計算結果が把握できる。

計算部について、十分な精度でクエンチ伝搬の数値解析解を求めるためには 1 mm 以下のメッシュに分割する必要があることが分かった。この結果から、超伝導と常伝導の境界でメッシュ寸法が 1 mm、それ以外では 2 mm 以上の任意の寸法に自動的にモデルを再構成する部分を開発中である。このときの問題点として、3 次元的に熱的接触がある場合にはメッシュ寸法を変更する条件が複雑になってしまい、その条件判断にかなりの時間

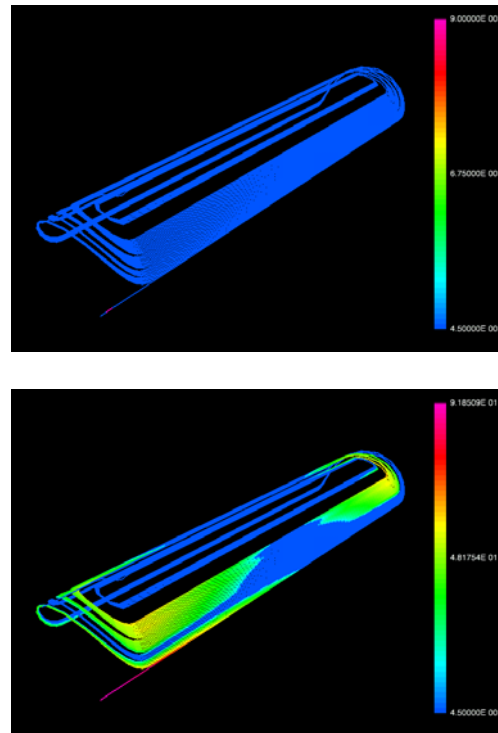


図 2 計算結果の 3 次元表示例

がかかってしまう事が明らかになった。どのような条件が最適なのかを検討中である。

ホームページでの一般公開を目的として、現在余分なコードを削除し、ダウンロード可能なように改良を行っており、WEB上のホームページ(<http://cry3-dts2.kek.jp/~mals/>)の整備も進めている。

(2)Nb3Al・Nb3Sn 線材の安定性測定

まず既存の外部磁場印加装置に取り付けられるようなサンプル冷却用クライオスタットを製作した。既存磁石が横型であり、サンプルをクライオスタットの横面から挿入するため、図1に示すように真空容器およびヘリウム容器の横側に大きなフランジを設けた。図3に磁石、サンプル用クライオスタット、磁石制御ラックおよびサンプル電源の設置写真を示す。クライオスタットのヘリウムリーク試験を行い、漏れがない事を確認した。

次にサンプルホルダーおよび銅同軸電流リードを設計、製作した。磁石ボアに挿入されているサンプル用のパイプは直径約45.5 mm程度しかなく、そのような狭い空間に1000 A以上の大電流を流すため、同軸状の銅電流リードを採用した。この電流リードは同時にボビン形状のサンプルホルダーを固定する治具としての役割を果たし、さらにボビンの脱着が容易となるように、ボルト一本で着脱可能となるように構造を工夫した。図4に製作サンプルホルダーを示す。

まず手始めとして、7 T以上での通電電流がNb3Alより遥かに小さくてすむ、NbTi線材で実験装置の試運転を行うように準備を進めている。

交付期間中における申請者の職務が予想を上回った期間が長く、また、鉄製品の市場価格上昇による購入計画の変更などにより、当初計画の全てを達成する事は困難であったが、装置の設計製作は完了し、測定用のNb3Alサンプルは入手済みである事から、実験・測定に必要な物は全て揃っている。今後早々に試験を重ねていき、データを蓄積し、



図3 装置外観



図4 サンプルホルダー

様々な試験条件で比較・評価する事で、申請者および協力研究者が世界に先駆けて行っているNb3Al磁石開発のための基礎データを得る事ができ、磁石としての開発期間の短縮などに役立つ事が出来ると考える。

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)

[学会発表] (計2件)

① 佐々木憲一、Nb3Al加速器用高磁場超伝導磁石の開発、2008年度秋季超電導・低温工学学会、2008年11月14日、高知

② T. Okamura, Test Results of Superconducting Magnets for the J-PARC Neutrino Beam Line, Applied Super-conductivity Conference 2008, 20 Aug. 2008, Chicago.

[その他]

ホームページ等

<http://cry3-aps2.kek.jp/~mals/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 憲一 (SASAKI KENICHI)

高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・助教

研究者番号：70322831