

外95-39

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

振動伝達特性に基づく超電導マグネットの
監視に関する研究

申請者

二ノ宮 晃

AKIRA NINOMIYA

1995年12月

本研究は、“超電導技術の電力機器への応用”の中の1テーマである“超電導マグネットの監視”の新たなる検査方法に関するものである。

超電導状態は、磁場、温度、電流の3つが臨界値以内でなければ維持できない。従って、超電導マグネットに不可欠な条件は、超電導状態が常電導状態に変化する時（これを「クエンチ」と言う）の変化過程をいち早く検出することである。クエンチ検出法は、常電導転移時の抵抗発生に伴う電圧により検出する方法（電圧検出法）が一般的である。しかし、これはクエンチにより常電導部が発生して初めてわかるものであって、クエンチ以前の状態変化は検出できない。また、電磁ノイズの影響も経験する。そこで、電圧検出法以外の方法でクエンチ検出が可能な方法を開発することが必要と考えた。また、クエンチ検出のみならずマグネットの励磁過程を的確に判断し、より早くマグネットの異常を検出すること、および長期運用を考慮したとき、マグネットの構造的変化により性能の変化が検出可能となる新しい監視法の確立を目的に本研究に着手した。

未知の構造体の特性を把握するときに、その物体をハンマで叩いて、そのときの反射音あるいは透過音を聞いて検査する手法（打診法）がある。これは、音の強弱、あるいは音色（周波数）の変化を聞いて判断するものである。本論文で提案する検査方法では、超電導マグネットを一つの構造体とみなし、ハンマで叩くかわりに一対のアコースティック・エミッション用のセンサ（AEセンサ）を利用して、一方を送信用、他方を受信用として使用する。このとき、送信信号には超音波信号を用い、これを超電導マグネット内に入射させ、伝播してきた信号をもう一方のAEセンサで受信して、送・受信間の音響的振動伝達特性を周波数領域で検討し、マグネットの状態を判断するものである。以下にその概要について述べる。

第1章では、クエンチ検出法に関して従来より実施されている方法と本論文で提案する検査手法の違いについて明らかにするとともに、本研究の背景および全体構成について概説している。

第2章では、超電導マグネットの特性を提案検査手法を用いて定量的に評価するために、弾性体モデルを用いた解析を行っている。これは、超電導マグネットを一つの粘弾性体と考え、力入力に対する変位応答としての振動問題について考察したものである。具体的には、構造体材料定数である減衰値および剛性値が変化したときの特性について検討している。これより、有効な定量的評価法を導き出している。

第3章では、本検査方法が超電導マグネット内部の温度上昇に伴う変化およびクエンチ検出に有効であることを見極めるために、送信信号に正弦波信号を用いて検討している。これにより、クエンチ発生以前の局所的な温度上昇による振動伝達特性の変化を検出することができ、本検査方法の有効性を確認している。しかしなが

ら、複合構造体とみなせる超電導マグネットは、多くの音響的共振周波数が存在し、周波数値の設定に関する問題点が生じている。

第4章では、前章で問題となった周波数値の設定に関する対応策として、送信信号に帯域のある信号（疑似白色雑音）を用いて、送・受信間の信号をデジタル信号処理して検討している。はじめに検討した項目は、含浸超電導マグネットを用いた単一周波数の特性と白色雑音の特性との比較である。これより、両者の特性がほぼ一致することを確認している。そこで、つぎにこの白色雑音を用いた準定常的な超電導マグネットの特性について検討している。検討事項は、電流値をパラメータにとり、各電流値での音響的振動伝達特性と同一電流値でマグネット内のヒータにより温度上昇（クエンチしない範囲）をさせたときの特性の違いについてである。尚、ここでは定常的なマグネットの構造的な特性変化を検討するために、送・受信信号は平均化処理をしている。これにより、臨界温度以内の温度上昇によるマグネットの構造的変化が検出可能となり、電流値が異なることによっても、この構造的変化が生ずることを確認している。

さらに、この章では、含浸材料の特性について検討している。すなわち、含浸超電導マグネットの構成要素であるエポキシ系有機材料に着目し、温度上昇による特性変化が、材料定数の何に起因して生ずるのかを調べるために、解析と実験の両者より検討している。解析には有限要素法を適応している。その結果、含浸材料に割れが発生しなくても、数Kの温度上昇により含浸材料のヤング率が変化すると、その構造的な特性が変化することを明らかにしている。そして、この特性変化が本検査方法により検出可能であることを確認している。

第5章では、電流上昇時などの構造的には非定常状態と考えられる場合の振動伝達特性について、含浸超電導マグネットを用いて検討している。この電流変化状態あるいはマグネット内部の局所的な温度上昇状態では、マグネットは構造的に一定状態にあるとはみなせない。従って、送・受信信号は、平均化処理できない。この点を考慮して、非定常時の特性については、構造的変化をさせる以前に平均化処理を行って送・受信間の相関性を考慮した特性を求めておき、それをその後の変化過程に利用して検討している。

検討事項は、一定電流通電状態でマグネット内部をヒータ加熱により強制的にクエンチさせたときの特性と一定掃引速度で励磁してクエンチしたときの二項目である。これらを定量的に評価した結果、前者から、加熱前の電流一定状態では、振動伝達特性はほぼ一定の特性であり、クエンチ発生後大きく変化することを確認している。また後者から、電流上昇時におけるマグネットの構造的な特性変化および励磁途中に発生したAE波を的確に検出できることが示されている。さらに、クエンチ

発生前約10秒より、マグネットの構成要素である減衰値の増加と剛性値の低下に伴う構造的な特性変化も検出している。これは、クエンチに至る危険な状態を観測していることになり、クエンチの早期検出につながる信号として利用できる。

第6章では、非含浸超電導マグネットを対象とした検討を行っている。この種のマグネットは、一般に含浸の困難な大型で複雑な構造のものに多い。従って、このタイプは単一構造体とみなせないため、クエンチ検出およびその原因となるマグネットの特性変化を本検査方法により如何に検出するかが重要な課題となる。

検討事項の一つは、クエンチ時の超電導マグネットの特性変化に対する振動伝達特性の変化である。これについて、小型の非含浸超電導マグネットを用いて、一定電流下でのヒータ加熱によるクエンチ特性より検討している。これより、加熱部の温度変化に追従した振動伝達特性の変化が検出でき、非含浸超電導マグネットにも本検査方法が有効であることを確認している。

そこで、大型の非含浸超電導マグネットへの適応を検討するために、核融合用モデルコイルを対象として、その励磁過程におけるマグネットの特性変化について検討している。これより、通電電流がある値を越える時点より、振動伝達特性の共振周波数値が低下しはじめること、クエンチ時にその周波数値が大きく低下することを確認している。この共振周波数値の変化は、マグネットの構成要素である剛性値の変化によるものである。磁場が大きくなると、これを経験している導体には大きな電磁力が加わる。従って、このような環境下では、マグネット全体としての剛性値、減衰値などの変化に注意する必要がある。特に、剛性値が減ると超電導導体は動きやすくなり、導体が動くと導体同士あるいは導体とそれ以外の構造物との間で摩擦発熱による温度上昇が発生し、これによりマグネットの構成要素である減衰値が増加する。従って、これらの変化が的確に検出できるとマグネットの早期クエンチ検出が可能となる。そして、これらマグネット内の構造材料特性の変化は、マグネットを長期運用する際にも有効な情報を与えるものと考えられる。

さらにここでは、超電導マグネットから発生するAE波についても検討している。その結果、クエンチ時にAE波の周波数特性が発生前と比べて異なること、AEセンサの取り付け位置により発生するAE波が異なることなどを確認している。

第7章では、本研究により得られた知見を総括し、まとめとしている。

本論文の検査方法は、超電導マグネット内部に電圧タップや計測素子を配置することなく、外部に一对のAEセンサを設けることで内部状態を判断する一つの非破壊検査法である。従って、超電導マグネットに悪影響をおよぼすことはほとんど無い。数種類の超電導マグネットを用いて検討した結果、本検査方法が、超電導マグネットの監視法として有効であると考えられる。