

氏名 川 畑 秋 馬

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第5号

学位授与の日付 平成4年 3月16日

学位授与の要件 数物科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 磁性鋼板における比透磁率の温度及び磁界依存性に関する研究

論文審査委員 主 査 教 授 遠 藤 有 聲
教 授 平 林 洋 美
教 授 黒 川 真 一
教 授 近 藤 健 次 郎
教 授 渡 辺 昇
教 授 山 川 達 也
助教授 新 富 孝 和

論文内容の要旨

超伝導電磁石は常伝導電磁石に比べより高い磁場を発生することができるので、高エネルギー物理学の分野では加速器やビーム輸送のための電磁石技術として重要な存在になっている。本論文は欧米において技術開発されつつある超伝導大型シンクロトロンにおける高磁場用超伝導偏双極電磁石について、汎用計算プログラムANSYS及び磁場計算プログラムPOISSONを用いて、

- (1) 磁性鋼板の配置位置による磁場特性への影響
- (2) 磁性鋼板の形状及び磁氣的飽和に関する磁場の高調波成分への影響
- (3) 4.2 Kへの冷却による熱収縮及び電磁力による磁性鋼板内の応力に関して検討を行い、次のような問題点を先ず明らかにした。

(1) 従来の超伝導電磁石の設計には2テスラ付近までの室温による実測値と飽和領域での理論値を組み合わせた磁気特性が使用されてきたが、実際に超伝導電磁石が使用される環境—液体ヘリウム温度に冷却された状態における磁場特性の測定値に基づいた設計が必要である。

(2) さらに、超伝導電磁石では電流分布によって磁場を形成するため、超伝導コイルの動きを数10ミクロン以下におさえる必要があり、常温から極低温に冷却する過程及び通電時にコイルの受ける電磁力でコイルが動かないように予め大きな応力をコイルに近接するカラー及びカラーの外側に配置される磁性鋼板製のヨークで押え込む構造にしている。このため磁性鋼板は大きな応力を受け、磁気特性が変化することが予想される。

(3) 10テスラ級の超伝導電磁石では磁性鋼板による磁束密度の増加を目指すため、磁性鋼板の飽和による影響を無視できない。そのため室温で測定できる範囲よりも高い磁界(3テスラ以上)を受けるので、広い範囲におけるB-H特性曲線の実測値が必要である。

このような問題点をふまえ、先ず超伝導電磁石が励磁中に経験する環境におけるB-H特性曲線の測定を行った。広い測定範囲を得るために、液体ヘリウム温度で強い磁界を発生させる方法として従来の銅線の代わりに超伝導1次コイルを使用することを考案し、コイル巻き付けによってトロイダル形状の磁性

鋼板試料が応力を受けないようにするためにガラス繊維強化樹脂の鞘に試料をおさめ、その外側に1次コイルを巻き付けることによって、試料が予定外の応力を受けることを避けるとともに、従来の測定法に比べ約2倍の広い範囲にわたる磁気特性の測定を可能にした。また、超伝導電磁石の通電状態で磁性鋼板に発生する応力を計算から求め、必要な応力下での磁気特性の測定法を新たに考案した。それは磁性鋼板の外側に高耐力アルミニウム合金のリングをはめ、液体ヘリウム温度に冷却することによってアルミニウム合金が収縮し、これによる圧縮応力を利用することに着目したものである。応力計算によりアルミニウムの機械的寸法を求め、10ミクロンの精度で加工することによって必要応力を与えている。このようにして作った試料を上と同じガラス繊維強化樹脂の鞘におさめ、同じ方法でB-H特性曲線の測定を行った。この新たに考案した超伝導トロイダルコイル方式を用いた測定により、

- (1) 4. 2 Kにおいて $H = 20 \text{ A/m} \sim 2.6 \text{ MA/m}$ の広い領域で磁性鋼板の透磁率の測定が可能になり、透磁率の温度及び応力依存性について系統的な測定ができた。測定により1.5テスラ付近以下では透磁率は温度とともに減少し、それ以上では増加する。最大磁束密度は4.2 Kで室温より1~2%大きな値を示す。また、 20 N/mm^2 の圧縮応力と冷却効果により透磁率の最大値が室温における値の約半分に減少することなどが明らかになった。
- (2) 4. 2 Kにおける飽和磁化領域で利用される比透磁率の理論式 $\mu_r = 1 + M_s / \mu_0 H$ が実験精度の範囲内で実測値に一致することを確認した。
- (3) 測定結果に基づき超伝導電磁石の設計計算に使用するための応力ある場合と無い場合の電磁鋼板の4. 2 KにおけるB- μ_r 特性表を求めた。

実測された磁気特性のデータを高磁場超伝導双極電磁石の磁場解析に反映させ、磁場の持つ高調波成分に与える影響について検討を行った。検討対象は2種類の異なる構造の超伝導双極電磁石-対口径双極電磁石及び単口径双極電磁石-である。その磁場解析の結果、

- (1) 磁性鋼板の中心磁場への寄与率を20%として磁性鋼板の位置を最適化した場合の極低温・応力下における透磁率減少による影響は、単口径超

伝導電磁石では6極成分に現れ、その大きさは2極成分に対して 10^{-4} の程度である。また、対口径電磁石では4極及び6極成分に影響が現れ、その大きさは2極成分に対してそれぞれ 3×10^{-5} 、 1×10^{-4} である。

(2) 磁性鋼板の中心磁場への寄与率を上げるために磁性鋼板をコイルに近接させれば、前項の影響は強く現れ温度及び応力による透磁率減少の影響は無視できない。

以上のように本論文はシンクロトロン加速器用の超伝導電磁石における磁性鋼板の磁気特性の研究を詳細に行い、この特性が磁場精度に与える影響を実際の使用環境下の条件に合わせて定量的評価を行い、高性能の磁場特性を有する超伝導電磁石の設計に重要な寄与を行ったものである。

論文の審査結果の要旨

川畑秋馬君の博士論文内容は (1)極低温における超伝導電磁石用磁性鋼の磁気特性の測定、及び (2)測定値に基づく超伝導双極電磁石の設計的研究である。

先ず、超伝導電磁石の数値的磁界解析において電磁石のヨークに実際に使用される磁性鋼の磁気特性を入力データとして与えるため、極低温におけるB-H特性曲線の測定において新しい工夫を行った。測定は磁性鋼が使用される条件下で行われる必要があるため、減磁界のないトロイダル形状の試料において目標とする高磁界を得るために1次コイルに超伝導線を使用し、超伝導電磁石のヨークに発生する大きさの機械的応力を与えるため熱収縮の異なる非磁性金属を試料外套に用いることを考案した。この方法により超伝導電磁石の設計に必要な磁界において極低温の磁気特性及びヨークに発生する応力下で極低温における磁気特性の精密測定を可能にした。この種の測定は過去にないわけではないが、加速器で考えられる超伝導電磁石に応用できるデータとしては皆無に近い。超伝導電磁石設計に利用できる初めてのデータになったという点でも意味がある。次に、超伝導双極電磁石のヨークに存在する応力の磁気特性への影響及び極低温における透磁率が室温におけるそれとは異なることを重視して、測定したデータを利用してLHC対口径双極電磁石及びRHIC単口径双極電磁石等について磁場計算を行い、高調波成分として評価を行った。応力についてはその方向と磁場の方向に関する多くのデータが必要であるが、測定した代表的な応力におけるデータで解析することによりRHIC双極電磁石のように鉄心とコイルが接近した構造の電磁石では応力の影響がやや大きくであることを示した。また、極低温における透磁率の変化でも磁場特性に影響が現れ、対口径双極電磁石で4極及び6極成分に、単口径双極電磁石では6極成分に若干変化が現れることを明らかにした。これらの効果は定性的に予測できることであるが、定量的評価を与えたということで注目に値する内容である。

以上の研究は数物科学研究科加速器科学専攻の博士論文としての内容に値し、特殊環境下での磁気特性測定方法の考案及び応力下における超伝導双極電磁石の詳細な磁場解析はこの方面の専門的な内容を持ち、総合的にも優れた研究業績であると判断した。