

氏 名 谷 教夫

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 843 号

学位授与の日付 平成 17 年 3 月 24 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 速い繰り返しシンクロトロン電磁石の研究

論文審査員	主査	教授	佐藤 皓（高エネルギー加速器 研究機構）
		教授	佐藤 康太郎
		教授	小林 仁
		教授	高山 健
		教授	齊藤 芳男
		助教授	安達 利一
		助教授	江川 一美（高エネルギー加 速器研究機構）

3GeV 陽子シンクロトロンは、25Hz の速い繰り返しで励磁されるために、鉄心、端板、コイル導体といった電磁石を構成するものに渦電流が流れる。また、大口径の電磁石であることから、通常の電磁石と比べて、漏れ磁場が大きく、この漏れ磁場によっても周辺に配置される金属機器にも電磁石の磁場によって渦電流が発生する。このため、渦電流による磁極端部の発熱と大きな漏れ磁場が重要となる。電源方式は、インダクタンスとコンデンサから構成される共振ネットワークによる励磁回路で励磁される。従来、速い繰り返しシンクロトロンにおいては、偏向電磁石と四極電磁石の2種類の電磁石が1つの励磁回路で励磁されていた。この場合、トラッキングは保障されるが、加速器の収束パラメータが固定されてしまうため、チューンが固定されてしまう。一方、3GeV 陽子シンクロトロンではチューンナビリティが要求されており、偏向電磁石と7種類の四極電磁石を個別励磁することが必要となるため、複数の電磁石間トラッキングが重要となる。このような性能を要求される電磁石は現在、世界的に見ても存在しない。そこで本研究では、速い繰り返し電磁石の設計において問題となる点を上で述べた観点から検討し、その最適化を図る手法を確立し実機を製作した。また、実機の磁場測定の結果から磁場がビームに与える影響について評価した。

独立した8系統の共振回路を用いて電磁石間のトラッキングを行うには、磁場の時間波形の歪みを極力小さくし、共振回路を負荷とした場合難しい波形制御を極力さけるようにすることが重要である。そのため、KEK-PS ブースター電磁石の実績から、インダクタンスと磁場の飽和を目標値1%以内とする電磁石断面形状の最適化に取り組んだ。電磁鋼板は、交流損を抑える目的で低鉄損、電源制御の観点から線形性の良い電磁石が必要であるため高透磁率の電磁鋼板を選定した。電磁鋼板は、実際使用する25Hzの周波数で磁気特性を測定し、磁場計算に用いた。最適化は、二次元磁場解析コードPOISSONを用いて行った。また、インダクタンスの評価については三次元静磁場解析コードTOSCAを用いて行った。

電磁石用コイル導体としては、一般的に冷却水チャンネルのある無酸素銅（ホローコンダクタ）が広く使われている。しかし、速い繰り返しで励磁されるコイルでは、発熱を低減させることが重要となる。従って、これまで交流損失抑制の目的でKEKにおいて試作されたアルミストランド線導体を用いることとした。アルミストランド線導体の有効性を確認するために、ホローコンダクタとの電力損計算の比較を同一断面で行った。ジュール損は、直流損・交流損共に銅よりもアルミの方が、比抵抗が大きいため損失が大きくなる。しかし、渦電流損では細い素線の撚り線構造をもつストランド線の方が、ホローコンダクタと比べて小さくなり、総電力損も低減できる。この評価により、アルミストランド線がコイルの発熱低減に有効であることがわかった。このコイル導体を実機のシンクロトロン電磁石に全面的に採用するのは世界で初めての提案である。

ストランド線導体は、冷却水配管の外側に複数の細いアルミニウム素線を拠った構造である。冷却水配管にステンレスを用いたのは、腐食・浸食を防止するためである。また、導体には絶縁処理をし、素線間と導体間にも樹脂を含浸させる構造とした。これにより、コイルの発熱を低減するコイル導体となる。実際、冷却水配管の外側にアルミ素線を直接より合わせて角型に成形すると、素線が偏りと冷却水配管が変形した

状態となった。この対策として、樹脂製のガイド線を冷却水配管に4本沿わせて、その外側にアルミ線をより合わせることによって防止することを発案した。また、樹脂を用いたことにより、交流損を計算で30%低減できることが分かった。含浸に用いるポリイミド樹脂は、エポキシ樹脂と比べ粘性が高いため、従来の真空含浸では素線間や導体間への浸透性が悪く、空乏層が多く発生していた。導体間に空乏層があると放射線によりNO_xが発生し、絶縁材料を劣化させる。また、熱伝導が悪くなるため冷却水の除熱効率が低下する。そのため、含浸効率を高める手法の確立に取り組んだ。その結果、含浸時の樹脂温度を制御することで樹脂の粘性を弱め、真空・加圧サイクルを用いることで浸透性を高めることに成功し、粘性の高いポリイミド樹脂の含浸技術を初めて確立した。さらに、実機試験で冷却水除熱効率を確認し、設計値を満足できる見通しを得た。

電磁石の磁極端部においては、渦電流による磁極端部の発熱と不正磁場（渦電流磁場）の抑制が重要となる。特に、電磁石端板に発生する渦電流については、三次元動磁場解析を用いた発熱評価を行うと解析に非常に時間を要するため効率的に発熱抑制する構造を見出すことが困難であった。そのため、端部での渦電流効果について、Maxwell方程式に基づく定式化を行い、薄板に対する二次元近似の方程式を導いた。この方程式を差分化し、数値計算により渦電流分布を求めた。その結果を基に、プロトタイプ偏向電磁石の端板における渦電流による発熱低減のためのスリット形状を設計し、その効果を実際に測定した。計算で得られた渦電流から電力損を求め、Stafan-Boltzmannの式から求めた平均温度を実際に測定した端板の温度分布と比較した。その結果、矛盾しない結果を得ることができた。また、同じモデルを用いて渦電流による磁場を計算し、実測値と良い精度で合っていることを示した。このことにより、二次元モデルの端板スリット設計に対する有効性を示した。

以上の研究成果により実機電磁石の製作に取り組み、先行機として偏向電磁石と四極電磁石を完成させた。複数の電磁石間のトラッキングを実現するためには、磁場の時間波形の歪みを極力小さくことが重要であるが、実際の電磁石においては高調波が混入することでビームに対する収束力が時間変化することは避けられない。そのため、磁場測定データを基に、電磁石の磁場の時間依存性からトラッキングを評価した。トラッキングエラーを低減させるために、偏向電磁石と四極電磁石の磁場波形から、直流成分に対する交流基本成分の比を求めた。偏向電磁石の磁場成分比を基準に、四極電磁石の磁場成分比を若干ずらすことでトラッキングエラーを低減できる可能性を示した。これにより、電源で行うべき高調波制御の度合いを小さくすることができ、制御の難しさを補うことができる。

論文の審査結果の要旨

本論文はJ-PARC 3GeV 速い繰り返しシンクロトロン用の電磁石（偏向電磁石、四極電磁石）の設計、製作、磁場測定等を行い、またその結果に基づいて加速ビームへの影響について考察したものである。

本論文において特徴的なことは、シンクロトロンが速い繰り返し（25Hz）であり、かつ大口径が必要とされる条件について、如何にそこから派生する問題点をクリアにし、かつ解決するかの課題に取り組んだことである。

すなわち、速い繰り返しによる渦電流の効果による発熱と、大口径であることから大型コイルの設計と磁石端部で磁石形状の設計が重要な課題である。

谷氏は、渦電流効果対策としてより発熱の少ないアルミストランド線を用いて大型コイルを製作する技術開発を行った。耐放射線性にはすぐれているが、含浸の困難なポリイミド樹脂をその温度管理と液量管理を行うことにより十分ならしめる手法を開発、製造メーカーの指導にあたった。

電磁石形状設計にあたっては端部形状を最適化する計算コードを開発し、モデル磁石によりその有効性を確認し、実際の3GeV電磁石の設計・製作において端部に最適なスリットを切り、渦電流による発熱を予測通りに低減させることに成功した。

さらに、渦電流が生起する磁場への影響を測定に基づいて解析し、ビームへの影響を考察した。

本論文により、大強度かつ速い繰り返しシンクロトロン用の電磁石の設計・製作への指針を初めて与え、加速器科学への重要な貢献をしたものと評価できる。

さらに、予備審査において指摘された課題についても、本審査において十分な説明がされ、また1月28日に行われた公開発表会においても的確・明快な質疑応答がなされた。

よって、博士論文として十分な内容であると評価し本審査合格とする。

なお、本審査は1月26日に、審査委員7人中6人の出席で行われた。欠席した委員からは事前に意見書が送られて来ており、審査会中にその意見についての評価も行い、合とした。公開発表会での質疑応答の状況も伝えた上で、合格に同意、署名された。