

氏名(本籍)	^{おぎ} 荻 ^つ 津 ^{とある} 透 (千葉県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第980号
学位授与年月日	平成6年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
審査研究科	工学研究科
学位論文題目	Influence of Cable Eddy Currents on the Magnetic Field of Superconducting Particle Accelerator Magnets (超伝導粒子加速器電磁石の磁場に対する導体渦電流の影響)
主査	筑波大学教授 理学博士 森 茂 樹
副査	筑波大学助教授 理学博士 浅野 侑 三
副査	筑波大学教授 理学博士 田 崎 明
副査	筑波大学教授 理学博士 吉 崎 亮 造
副査	高エネルギー物理学研究所教授 理学博士 新 富 孝 和

論 文 の 要 旨

本論文は昨年まで米国テキサス州で建設が進められていた SSC (Superconducting Super Collider, 超伝導超大型衝突型加速器) の主リングと高エネルギーブースター加速器に使用される超伝導電磁石のクエンチ特性に関するものである。SSC は粒子の質量や対称性の破れの由来, クォークの構造といった問題を探り, 宇宙と物質と力の根源を究明しようとする加速器として, 計画され建設が進められていた。不運にも, 昨年10月, 経済上の理由から米国下院が計画の中止を決定したことは, 科学にとって大変悲しい出来事であった。SSC は重心系エネルギーが40 TeV (20 TeV \times 20 TeV) の陽子・陽子衝突型加速器で, 約10000個の超伝導電磁石からなる。本研究では, 口径5 cm, 全長15 m の2極電磁石の試作機の励磁試験のデータに基づいて, モデル計算によって, クエンチ特性の解明をおこなっている。

SSC のような円形加速器に使用される超伝導電磁石は, 励磁電流を粒子の加速に伴い上昇させる必要がある。この運転電流の上昇は電磁石の中の磁場分布を歪ませる様々な現象を超伝導線材内部に引き起こす, 線材内部に流れる渦電流は, 電流上昇率が大きい場合には, 非常に重要な現象を起こす。SSC 用超伝導2極電磁石は4つの鞍形状のコイルからなり, 電流分布は良く知られたコサイン・セータ (cosine-theta) 分布をもつ, 導体は超伝導撚り線で作られており, ラザフォード (Rutherford) 型と呼ばれる, 平らな2層の超伝導線である。超伝導撚り線は, 直径6 μ m の Nb (47%) Ti (53%) フィラメント約6000本がフィラメント間距離1 μ m で銅合金と一体となっている。加速器運転中の温度は

4.35 Kで、電流は635Aから6500Aまで上げられ、6.6テスラの2極磁場を作り、ビーム・エネルギー20Tevの衝突モードに入る。主リングの励磁速度は4 A/sである。

(高エネルギー・ブースターでは、励磁速度が70A/sで渦電流の問題が極めて重要になる。)

加速器の超伝導電磁石では、磁場分布は基本的に電流分布、即ち導体の幾何学的配列によって決定されるので、対称性から原理上現われない磁場の多極成分が多いが、製作工程の多少のエラーや、外部構造の鉄の飽和の影響、更に渦電流の影響によって望ましくない多極成分が生じる。これらの磁場は主成分に比較して 10^{-4} のオーダーであるが、励磁中には細心の注意が必要とされる。例えば、2極電磁石には対称性から6極成分は許されるが、4極スキュー成分は対称性から許されない項であるが、電磁石によっては励磁中に相当現われる。また、この4極スキュー成分は大きなヒステリシスを持つことが多く、渦電流は主な原因となっていると推察される。

FNAL(フェルミ研)/GD(General Dynamics社)によって製作された長さ15mの2極電磁石試作機4台に対して、クエンチ電流の励磁速度依存性と交流損の測定が行なわれた。クエンチ電流は励磁速度25A/sまでほぼ一定で約7200A程度あるが、それ以上の励磁速度ではクエンチ電流は放物線を描くように急激に減少し、極端な場合200A/sで約2000Aまで減少した。交流損の測定は500Aと5000Aの間で行なわれ、16から64J/(A/s)/Cycleの渦電流損が得られた。クエンチ電流の励磁速度依存性が最も強かった電磁石に最も大きな渦電流損が観測された。この渦電流は素線間渦電流である可能性が高いと考えられる。また、多極成分の位置依存性を調べるため、短い3個のコイルを磁石の長さ方向3箇所において、4極と6極成分などを測定した。ヒステリシス中は励磁速度に比例し、しかも磁石内の位置によっても不均一であることが観測された。このような不均一性が素線内渦電流によって起こる可能性は小さく、素線間渦電流によって引き起こされたと考えるのがより自然である。

本研究では、2極電磁石試作機で観測された異常な渦電流損及び磁場分布の原因を解明する計算モデルの開発をおこなった。この計算モデルを用いた解析の結果、渦電流損及び磁場分布異常は、線材素線の接触抵抗を分流して流れる素線間渦電流が原因となっていることが判明した。また磁場分布異常を説明するために必要な素線間接触抵抗は場所によってかなり大きく変化し、接触抵抗が低いために渦電流が集中しクエンチ電流の減少が他の位置より大きくなるような場所があることが解かった。速い励磁でのクエンチ起点の同定が、クエンチによる磁場擾乱検出という新しい手法を用いて行われ、その結果同定されたクエンチ起点は磁場分布異常から求められた渦電流の集中が起こる場所と一致することが確認された。これらの解析及び実験結果は低い素線間抵抗が原因となる過剰な導体内渦電流の存在を強く示唆するものである。

審 査 の 要 旨

著者は高エネルギー物理学研究所、低温部の助手として主に超伝導加速機電磁石の開発研究に取り組んでいる。その一つのプロジェクトとしてこの約3年間SSC研に出張してSSCの主リング及び高エネルギー・ブースター用の超伝導2極電磁石の開発研究を行ってきた。SSC研では超伝導電磁石測

定部に所属して、試験用電磁石の磁場測定やクエンチ特性の研究などで活躍してきた。本研究は加速器用の超伝導電磁石で最も重要と考えられる励磁速度とクエンチ電流の関係、及び渦電流によると考えられる4極と6極のヒステリシスの巾が電磁石の位置に強く依存している実験結果から、この渦電流は素線内渦電流ではなく、素線間渦電流であることを結論している。これらのことを説明するため、計算モデルの開発を行ない、モデルを用いた解析の結果、渦電流損及び磁場分布異常は線材素線間の接触抵抗を分流して流れる素線間渦電流が原因となっていることを解明した。これらの結果は今後の超伝導加速器電磁石の開発に大変重要で、大きな貢献と言える。

よって、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。