

氏 名 杉田 圭

学位記番号 総研大甲第 800 号

学位授与の日付 平成 16 年 9 月 30 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 6 条第 1 項該当

学位論文題目 **Field Quality Change of Superconducting Accelerator
Magnets due to Re-magnetization of Superconductor**

論文審査委員 主 査 教授 黒川 眞一
助教授 荻津 透
教授 山本 明
教授 土屋 清澄
教授 光延 信二 (高エネルギー加速器研
究機構)
教授 住吉 文夫 (鹿児島大学)

Superconducting accelerator magnets are fundamental components of high-energy particle accelerators. Very high field quality and stability of the magnets are required in order to operate the accelerator with minimizing beam instability and beam loss. Particularly, time-varying field quality during a period of the beam injection is an important subject to be understood. A possible reason of the time-varying magnetic field is the change of the superconductor magnetization due to local magnetic field change induced by redistribution of imbalance current in superconducting cables. In order to clarify and to evaluate the mechanism, experimental studies and their evaluations with computer simulations were performed.

Magnetic field measurements of the superconducting quadrupole magnets (MQXAs) developed by KEK for the CERN/LHC insertion regions were carried out. The measurements at the beam injection current were performed by using a set of rotating harmonic coils after pre-excitations of the magnet. The periodic patterns of the magnetic field along the magnet axis, of which pattern length is equal to the cable twist pitch, was observed. The amplitude of the periodic pattern was decreased with time. The average field over the even number of the wave-length of the periodic pattern corresponding to the effective field quality, was also changed with time. It was thought that the decrease of amplitude is caused by equalization of imbalance currents in cables, and the change of average is caused by re-magnetization of superconducting filament. From the measurements of 18 magnets, it was clarified that the behaviors of the amplitude and the average indicate strong dependences on the pre-excitation.

A change of superconductor magnetization due to external field change was experimentally evaluated. By using a vibration sample magnetometer (VSM), the magnetization of superconductor used in the LHC magnets was measured. The behavior of re-magnetization of filaments induced by the external magnetic field with arbitrary direction was clarified.

In order to evaluate the mechanism of time-varying magnetic field, a simulation program was developed. At first, the numerical model of re-magnetization was developed. In this model, persistent current, which flowed in a superconductor filament, was assigned as "nested cosine theta current distribution" in coaxial shell as division of filament. Magnetization behavior calculated by cosine theta model indicated good agreement with results measured by VSM. As the next step, a numerical model of imbalance currents was developed. The imbalance currents were ascribed as zigzag currents given randomly. The amplitude of periodic pattern induced by the zigzag currents was evaluated by means of Monte Carlo simulation. To reproduce the measured periodic pattern amplitudes, current imbalance with a level of hundred amperes was required in calculation.

A 3-dimensinal full coils model based on the LHC magnet was developed as extension of above programs. Imbalance currents in cables were assigned as zigzag current models on each cable position. Magnetic field in the magnet bore induced by the zigzag currents was computed, and a sinusoidal field pattern along the longitudinal axis was given. The local magnetic field at the strand in the coils was also calculated. Magnetization change of the superconductor filament

in the coils, due to the local magnetic field change induced by zigzag current change, were computed by using the cosine theta model. Finally, the magnetic field in the bore induced by each magnetization of superconductor filaments in the coils was calculated. The simulation reproduced the magnetic field change in the magnet bore, by assuming the change of the zigzag currents which was needed to induce the periodic pattern consistent with measured results. It has been understood that magnetization change due to local magnetic field change induced by imbalance current redistribution causes the time-varying magnetic field during a period of beam injection in accelerator operation.

In conclusion, the field measurement of the magnets showed the strong dependencies on periodic pattern amplitude and the average field to the pre-excitation history. The computation model for superconductor magnetization by cosine theta distribution was developed, and the calculation agreed with the VSM measurements. The simulation for the imbalance currents in the cables has shown the periodic pattern similar to the hat observed in the measurement. It has been understood that the simulation combining the magnetization and the imbalance currents has shown that the magnetization change due to the local field change induced by the decay of the imbalance currents are in good agreement with that observed in the measurement.

論文審査結果の要旨

杉田圭氏の論文は、加速器の入射時のように、低磁場に超伝導電磁石を長時間保ったときに見られる、磁場の高次成分が変化する、いわゆる Decay とよばれる現象が何によって引き起こされるかを明らかにしようとするものである。この論文において、杉田氏は、この変化が、(1)超伝導ケーブルを構成する各ストランドが同一の電流を運んでいるわけではなく不均一であること、(2)ストランド間に電流の不均一性が時間とともに弱くなることにより、ストランドを構成するフィラメントの磁化が変化すること、そして、(3)この磁化の変化が多極成分の変化をもたらすこと、を実験および計算機シミュレーションによって明らかにした。

陽子またはイオンを高いエネルギーまで加速する加速器を作るためには、高磁場を発生することができる超伝導電磁石を用いることが必須である。このような加速器においては、入射エネルギーは最終エネルギーに比べて数%にすぎず、入射時には数 KG という低磁場で超伝導電磁石を運転しなければならない。また、加速前に加速器中に十分な粒子数を蓄積するためには、数 10 分の間、このような低磁場の状態に超伝導電磁石を保たなければならない。上に述べた Decay により、この間に起こる磁場の多極成分の変化が加速器の光学系を変化させるため、この問題は、超伝導加速器における最も重要な問題の一つであり、原因を解明することは問題の解決への大きな一歩となる。

杉田氏は、高エネルギー加速器研究機構が製作した LHC 用の最終収束 4 極電磁石 18 台を磁場測定することにより、(1)LHC の入射エネルギーに対応する低磁場において、多極磁場成分が、磁石の長手方向に周期的に変化し、変化の周期は、使用しているケーブルのストランドの撚りピッチに一致すること、そして、(2)この周期的に変化する多極磁場の変化の振幅および中心値が次第に減少していくことを示した。杉田氏は、周期が撚りピッチに一致することにより、多極磁場の発生は、ストランド間の電流の不均一性にに基づき、また、振幅と中心値の変化は、この不均一性が弱くなることにともない、始めは方向が揃っていたフィラメントの磁化がばらつくことによるものであるという仮説を立てた。

このような仮説を検証すべく、杉田氏は、この超伝導電磁石に用いられている超伝導ケーブルの外部磁場による磁化変化を、磁化測定器を用いて測定し、この結果を、杉田氏が考案した超伝導線の内部に流れる電流が多層の $\cos \theta$ 分布を持つとしたモデル (Nested Cost Model) が実験と良い一致を得ることを示し、まず、このモデルの妥当性を確認した。次いで、このモデルを実際の電磁石に適用することにより、多極成分の変化が、ストランド間に電流の不均一性が弱くなりことによるフィラメントの磁化が次第に不揃いになることにより説明できることを明確に示した。Nested $\cos \theta$ Model を考案することにより、計算時間が大幅に短縮されたため、モデルの実際の電磁石への適用において、3次元計算を行ったことが特筆できる。

杉田氏の研究成果は、超伝導電磁石の低磁場における多極成分の変化の原因を明らかにしており、今後のさらなる研究の端緒となる重要なものであり、審査員全員が一致して、杉田氏の論文は博士論文の値すると判定した。