

氏 名 Yao Lu

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2350 号

学位授与の日付 2022 年 9 月 28 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 Development of pulsed multipole magnet for beam injection
in light source

論文審査委員 主 査 増澤 美佳
加速器科学専攻 教授
三増 俊広
加速器科学専攻 教授
宮島 司
加速器科学専攻 准教授
高木 宏之
加速器科学専攻 准教授
満田 史織
加速器科学専攻 准教授
高嶋 圭史
名古屋大学 シンクロトロン光研究センター 教授

(Form 3)

Summary of Doctoral Thesis

Name in full Yao Lu

Title Development of pulsed multipole magnet for beam injection in light source

Nowadays, top-up injection has been a standard operation mode in most light sources, which allows a constant current in electron storage ring. However, the convention bump injection system cannot suppress the stored beam oscillation completely and usually consists of three or four kickers. To improve the performance of light source, a novel injection scheme has been proposed, which has a possibility to realize a transparent injection and inject the beam by only one multipole pulsed magnet. The objective of this research was dedicated to studying and developing the pulsed multipole magnet used for beam injection.

The injection system of one pulsed multipole magnet can be very compact and easy to be controlled. Owing to the nature of the multipole magnet, the perturbation on stored beam is expected to be very small. KEK Photon Factory (KEK-PF) first proposed and examined this injection scheme. A pulsed quadrupole magnet was installed at Photon Factory Advanced ring (PF-AR) and injected the beam successfully. However, there was a problem about the beam size oscillation. It is because that the quadrupole magnet cannot provide a nearly zero field region around the center. Then a Pulsed Sextupole Magnet (PSM) with a circular aperture was installed in PF ring to overcome the problem. The beam was also injected successfully. The problem of the stored beam size oscillation disappeared. The horizontal stored oscillation amplitude observed in the experiment was 570 μm . Although the result is smaller compared with the oscillation amplitude in the bump injection (850 μm), the oscillation amplitude is larger than our expectation. It is supposed that an irregular magnetic field was present at the center of the PSM because of the eddy current effect of the magnet.

To investigate the issue in the PSM injection and develop the pulsed multipole magnet injection with new pulsed magnet, a precise pulsed magnetic field mapping is required. A compact pick-up probe has been developed for measuring a pulsed magnetic field with a 3.2 mm \times 5.8 mm coil. The probe operates on a subtraction method to reduce the electromagnetic noise in the transmission line. The DC magnetic field of the PSM was also measured with a Hall probe for comparison. In the measurement, a magnetic field signal with an amplitude of 2.2×10^{-4} T was measured clearly, and the longitudinal field structure that contained the magnetic field generated by the eddy current effect was observed, which explains the oscillation of the stored beam oscillation in the PSM injection. It is also found that the eddy current effects of the circular titanium coating are negligible inside the PSM.

Based on the study above, it is concluded that air-core pulsed magnet is a better candidate for the application in next generation light source. The Ceramics Chamber with integrated Pulsed Magnet (CCiPM) has been developed as a fast air-core dipole kicker. The CCiPM has three main parts: the ceramic, coil, and flange. The coil whose length is 300 mm is embedded in the ceramic to keep a vacuum environment. The ceramic and coil are integrated as an air-core magnet, which is also a ceramic vacuum chamber. If the current flow directions in the conductors are same, and the angle between the midplane ($y=0$ mm) and the radius (the line connected by the center of the ceramic and center of the conductor) is 45° from a cross section view, an octupole magnetic field can be generated. An octupole CCiPM with a 40 mm bore diameter was designed for the beam injection at PF ring. The initial prototype of the CCiPM had a problem of the high inductance ($11.15 \mu\text{H}$). If the current is 3000 A that is same with the designed current of the PSM, the peak voltage can reach 90 kV. The main reason is the inductance of the long cable for changing the current flow direction in the initial model. To solve the issue, a new design was proposed and examined by the simulation. Four additional conductors were placed on the ceramic chamber. Therefore, the long cable with high inductance was not necessary anymore. Then OPERA was used to evaluate the magnetic field and optimize the busbar structure that can produce undesirable magnetic field at the center. If the current is 3000 A, the integrated magnetic field at center is less than $10.0 \mu\text{T}\cdot\text{m}$, and the off-axis ($x=15$ mm, $y=0$ mm) integrated field is $11.1 \text{ mT}\cdot\text{m}$ in the simulation. As for the internal coating of the CCiPM, it is a circular comb-shaped coating to suppress the eddy current effect. The attenuation of the magnetic field is less than 1% of the initial magnetic field.

The prototype of the octupole CCiPM was fabricated carefully. The inductance is only $1.45 \mu\text{H}$. The necessary peak voltage becomes 13 kV that can be supplied by a pulsed power source. To examine the mechanical performance, an offline test bench was constructed. The vacuum extraction and baking were performed to check whether the CCiPM could be installed in the ring. Because there is a difference between the thermal expansion coefficients of the ceramic and copper, a heating cycle baking can be applied to check whether there will be a problem of stress concentration in an accelerator operation. In the heating cycle baking, the temperature of the CCiPM rose to 120°C and was cooled down to room temperature in every 8 hours. There was no leakage during the heating cycle baking. The vacuum reached 1.0×10^{-7} Pa in the end. In the current excitation test, the peak current of the new prototype reached 2800 A. Based on the test results, the CCiPM is allowed to be installed in the ring. The magnetic field measurement was also conducted. In the DC magnetic field measurement, the off-axis kick effect is almost consistent with the simulation. As for the pulsed magnetic field measurement, the noise increased compared with that in the PSM measurement, because the CCiPM is an air-core pulsed magnet. A clear pulsed magnetic field signal was not detected. However, the measurement result proved that the magnetic field of the CCiPM

at the center is smaller than that of the PSM. The integrated pulsed magnetic field within error at the center is about one-third of the result of the PSM. To measure the pulsed magnetic field precisely, the signal to noise ratio of the measurement circuit should be improved later.

The octupole CCI_{PM} has been installed in the PF ring. There was no leakage during the operation of the ring. Because of the beam heat load, the temperature of the chamber increased but was less than 60 °C in a multi-bunch operation. The current excitation test was conducted with the presence of the stored beam, and the electrical discharge did not occur. The beam injection experiment will be taken in the future.

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 Yao LuTitle
論文題目 Development of pulsed multipole magnet for beam injection in light source

本研究は、次世代放射光源への適用可能性を見据えた電子ビームのトップアップ入射技術の開発を目的とし、新たなパルス多極電磁石を用いた入射キッカーの開発を主題としている。KEK-PF ではパルス多極入射の先駆けとしてパルス 4 極、6 極電磁石の開発を行った実績があり、Lu 氏はそれらの課題と改善策を洗い出すことにより新たに磁場次数を増加させた 8 極型の空芯コイルを用いた入射キッカーの開発とその最適化に取り組んだ。

Lu 氏は、研究テーマの起点である鉄芯型パルス多極入射の問題点が鉄芯の生み出す渦電流磁場にあると推測し、磁石中心のゼロ磁場領域のこの不整磁場がトップアップ入射時に磁石中心を通過する蓄積ビームの摂動を引き起こすことを解明した。Lu 氏はこの解明に、パルス磁場計測の主流であった強い信号強度を得られるロングコイルを用いた長手方向の積分磁場型計測でなく、 $3.2\text{mm} \times 5.8\text{mm}$ 角の長手方向の微分型計測が可能な超小型ピックアッププローブを開発し導入した。そもそも信号強度が低いプローブを使いゼロ磁場領域の S/N 比の向上が難しい測定で、磁石中心での不整磁場の長手方向の磁場分布構造をマッピング解析により明らかにしたことが世界的に重要である。極めて高周波ノイズの高い測定環境下で達成したパルス磁場分解能は $2.2 \times 10^{-4}\text{T}$ である。この成果がまとめられたものが現在 *Review of Scientific Instrument (RSI)* ジャーナル に投稿された。また、これらの測定結果とともに渦電流磁場のシミュレーション解析との比較から、パルス電磁石で必須となるセラミックダクト形状と磁場次数がダクト内面コーティング上の渦電流の抑制と相関があり、円形ダクトと 8 極磁場の組み合わせがコーティング面積を広く実装させても渦電流抑制できることを証明した。

更に Lu 氏は、これら準備研究を踏まえて、この旧来の鉄芯型パルス多極電磁石の磁場中心における不整磁場の問題点を解決してより入射技術を高度化するために、新たな空芯型パルス磁石構造であるセラミックステンパー一体型パルスマグネット (Ceramics Chamber with integrated Pulsed Magnet: CCiPM) を 8 極型として適用する研究を進めた。Lu 氏は、まず 2 極型 CCiPM を PF におけるビーム試験路を使って実ビーム試験による測定と磁場測定の結果を比較することで、4 本の導体コイルで 2 極磁場、4 極磁場キックを与えられることを示し、セラミックステンパー一体型パルスマグネットの性能とその展開性を実証した。同時に磁場シミュレーションで 4 コイルのみで平行電流を流すことで原理的にビーム入射に必要となる 8 極型磁場も生成することが可能であることを明らかにした。8 極型 CCiPM の開発途上では、平行電流による磁場生成ではインダクタンスの増加により 90kV 以上の印加電圧が必要になることに気づき、外に大きく広がる磁場を閉じ込め、電流導入端を 1 カ所に集約する補助コイルを導入することを提案した。その結果、

11 μ H あったインダクタンスを 1.45 μ H にまで低減することができ、必要とする電圧は 13kV まで下げられた。補助コイルにより磁場強度を増強する副次効果も得ることにも成功し、高速性と強磁場出力の 2 つの要素を同時に満たすパラメーターを取得することが出来た。

これは本件課題の最も特筆すべき結果で、加速器装置として具体化するうえで現実的な装備で必要性能を達成する極めて重要な改善となっている。更に、旧来型パルス電磁石のマッピング測定で明らかにされた電流導入ブスバーが磁場の対称性を崩し磁石中心のゼロ磁場領域を乱す問題についても、空芯型でも同様の事象が起こることを予見し、早くに磁場の対称性を維持するブスバー構造の最適化を進めた。これによる不整磁場はシミュレーション上でも、実機による磁場測定評価でも蓄積ビームを無摂動で入射するのに十分なほど低く抑えられていることが証明されている。空芯型コイルでもセラミックス内面へのコーティングは必須であるため、先の研究による知見が生かされて、渦電流を抑制する櫛歯型コーティングをビームインピーダンスが出来るだけ下がるようコーティング面覆率を向上させ実装することを提案した。これらすべての開発要素が実機製作で実現され、Lu 氏は最終的に耐久性能試験や磁場性能試験を通じて、PF リングにインストール可能な 8 極型 CCiPM の開発に成功した。実機は PF リングにインストールが実際になされビームコミッションが問題なく進んでいる。次世代光源加速器に適用可能となる優れた入射キッカーを簡潔な構造で実現したことで、世界に普及する光源加速器への展開が容易に望まれる可能性があることや、放射光源ユーザーにとって重要な要求の光フラックスと光軸の安定性の補償が、開発されたキッカーによるトップアップ入射で同時に実現可能であることが示されたことは、放射光科学の進歩にとって重要な価値ある研究と言える。

審査会では、Lu 氏は英語で膨大な研究成果よりエッセンスを分かりやすく簡潔に発表を行い、自身の研究の重要性と独自性を強調し発表を行った。審査委員からの質疑応答にも明瞭な回答を用意し、研究への十分な説明準備がなされていた。本研究に関連した対外的な発表では、国内の加速器学会で 2 回の発表、ビーム物理研究会若手の会や国際学会 IPAC2021 での発表と精力的に成果を発信し、プロシーディングを英語でまとめている。口頭発表での英語での対応及び英語での論文の作成は今後、Lu 氏が国際環境下でも十分な研究遂行能力があることを実証している。

論文の主題と研究内容は博士論文としての水準に到達する十分なものであり、その論文の完成度も十分に高いと判断できる。審査委員全員一致で本審査を合格とする。