

氏 名 YAO, MU-LEE

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2397 号

学位授与の日付 2023 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 Research of Copper Thermal Spray Coating for Mitigating
Electron Cloud Effect

論文審査委員 主 査 本田 融
加速器科学専攻 教授
谷本 育律
加速器科学専攻 教授
阿部 哲郎
加速器科学専攻 准教授
石橋 拓弥
加速器科学専攻 准教授
柴田 恭
加速器科学専攻 教授
神谷 潤一郎
日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門
J-PARC センター 研究主幹
末次 祐介
KEK 加速器科学支援センター シニアフェロー

(Form 3)

Summary of Doctoral Thesis

Name in full

YAO, MU-LEE

Title

Research of Copper Thermal Spray Coating for Mitigating Electron Cloud Effect

The electron cloud effect (ECE) has posed serious challenges in recent high-intensity proton and positron rings. An aluminum beam pipe coated with copper thermal spray film (T.S. coating), which had a low secondary electron yield (SEY), was developed to suppress electron clouds in accelerators. After an electron exposure of $\approx 1 \times 10^{-1} \text{ C/mm}^2$ at an energy of 350 eV, the lowest δ_{max} (the maximum SEY within scanning) reached ~ 0.7 .

The roughness parameters and surface composition were measured to clarify the key factors affecting SEY. In addition, to check the applicability of T.S. coating in accelerators, its outgassing rate, adhesive strength, impedance and dust generation rate were measured as a reference.

Finally, an aluminum beam pipe with a T.S. coating was produced and installed in the positron ring of SuperKEKB to measure the electron density around the beam. The measured electron densities were compared with those obtained from other beam pipes with different inner surfaces, and also investigated using a simulation code.

The results show that the outgassing rate and adhesive strength of T.S. coating were acceptable. However, the amount of dust and impedance were not inconsiderable. The measured electron densities of the T.S.-coated beam pipe was comparable with that of the TiN-coated beam pipe even under the influence of the uncoated aluminum screen. Therefore, the T.S. coating can be considered as a candidate technology for reducing ECE, while there are still room for improvement. This study can provide a new and useful information for researchers in this field in developing a low-SEY coating on beam pipes.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 YAO, MU-LEE

Title
論文題目 Research of Copper Thermal Spray Coating for Mitigating Electron Cloud
Effect

SuperKEKB をはじめとする陽電子や陽子など正電荷ビームを蓄積する大強度加速器では電子雲効果の抑制が目標性能を達成するために避けて通れない重要課題となる。本研究では、その電子雲抑制に寄与する新しい技術として「銅溶射コーティング」に着目し、銅溶射コーティングを施した金属表面が非常に低い二次電子放出率を示し、電子雲抑制に効果的であることを世界で初めて実証した。さらに加速器ビームダクトとしての実用化を見据えて、電子雲抑制効果の高い溶射パラメータを探索し、長尺なビームダクト内面へのコーティングを実現するとともに、銅溶射膜の持つ様々な物理特性を実験的に明らかにして、ほぼ実用化が可能な段階まで開発研究を進めたことが、本研究の大きな成果である。

加速器ビームパイプ内に発生する電子雲の密度を低減させるためには、ビームパイプ内面の二次電子放出率の値を 1 以下のできるだけ小さい値にすることが効果的である。Yao 氏は様々な条件で銅溶射コーティング表面を製作し、安定して 1 を大きく下回る良好な二次電子放出率が得られることを実験的に明らかにした。また、二次電子放出率と溶射時の基板表面温度の関係を詳しく調べ、基板温度を低く保つと低エネルギーの一次電子に対する二次電子放出率が小さくなることを発見した。SuperKEKB のような加速器ではビームダクト内壁に衝突する一次電子はほとんどが 1 keV 以下の低いエネルギーを持つことが知られており、溶射時の基板表面温度の制御によって、例えば 300eV の一次電子に対する二次電子放出率を 0.5 まで低下させることに成功し、電子雲抑制手段として他の手法を上回る効果的な特性を持った表面が得られる可能性を示した。

銅溶射コーティング膜について密着力、ダスト発生率、インピーダンス測定（高周波での表面抵抗率測定）、ガス放出速度測定を行い、密着力やガス放出速度は加速器ビームダクトとして充分実用可能なレベルであることを実証した。一方インピーダンスについては使用状況によっては問題となりうる値を計測しており、これを改善するための手段として溶射時の銅粒子の大きさの最適化などを提案している。

Yao 氏は、銅溶射コーティングを施した SuperKEKB 陽電子リング用ビームパイプを製作し、実際の加速器を用いた性能評価試験を行った。その結果、銅溶射ビームパイプ内で発生する電子雲密度は、SuperKEKB などこれまでの加速器で電子雲効果抑制手段として用いられている「窒化チタンコーティング」や「溝付き表面」と同程度であり、本研究で開発された銅溶射コーティングが十分な電子雲抑制効果を有していることがビーム試験においても確認された。

また二次電子放出率と表面粗さや表面形状の関係を数値シミュレーション手法によって研究し、単純で規則的な表面形状を仮定した場合、表面粗さと二次電子放出率に逆相関

の関係があることを見出した。一方で電子顕微鏡観察によって溶射コーティング表面には微細で複雑な表面形状が観測されている。溶射コーティング表面が示す二次電子放出率とその特異なエネルギー依存性は、単純で規則的な表面形状を仮定したシミュレーションでは再現が難しいことがわかった。

Yao 氏のこれらの研究結果は、従来採用されてきた他の手法と比較しても銅溶射コーティングが電子雲低減に特別に効果的であることを世界で初めて示したものであり、本研究は重要かつ価値のあるものであると認められる。本博士論文の一部は既に 1 報の学術論文として真空科学分野を代表する査読付き国際誌に発表されており、その内容は国際的にも高い水準を満たしていると評価された。

本博士論文は英語で書かれており、審査会での発表や質疑応答はすべて英語で行われた。また、これまでいくつかの国内外の学会で発表が行われているが、発表と質疑応答、並びにプロシーディングスの作成は全て英語で行われている。更に、普段から研究に関する議論は全て英語が用いられており、Yao 氏は国際的な研究活動を行うのに十分な英語能力を有すると判断される。

以上のことから、Yao 氏の博士論文の本審査を合格とすることを全会一致で決定した。