

氏 名 大山 隆弘

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大乙第 273 号

学位授与の日付 2022 年 3 月 24 日

学位授与の要件 学位規則第6条第2項該当

学位論文題目 高エネルギー加速器の二次粒子場の測定とその応用に関する研究

論文審査委員 主 査 波戸 芳仁

加速器科学専攻 教授

岩瀬 広

加速器科学専攻 准教授

佐波 俊哉

加速器科学専攻 教授

萩原 雅之

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

量子ビーム科学部門 次世代放射光施設整備開発

センター 基盤技術グループ グループリーダー

(様式3)

博士論文の要旨

氏 名 大山 隆弘

論文題目 高エネルギー加速器の二次粒子場の測定とその応用に関する研究

高エネルギー加速器施設内に形成される混合粒子場は、ビームロスによる中性子、陽子、光子、パイオン、ミュオン等の様々な二次粒子で構成され、そのエネルギースペクトルは加速粒子の最大エネルギーから熱エネルギー領域まで広範に分布する。高輝度・大強度ビームを目指す加速器施設では、この混合場を評価して効率良く遮蔽できること、二次粒子に直接曝される物質の放射化や電子機器の照射影響によるリスクを予測し回避できること、そして、混合場の起源であるビームロスの正確な評価手法開発が不可欠とされている。本論文は、これら課題への対処を可能とする二次粒子の実測データの取得と測定技術の高度化を目的として、以下に挙げる一連の実験的研究を述べたものである。

1つ目は、欧州原子核研究機構 (CERN)の照射施設 CHARM (Cern High energy AcceleRator Mixed field facility) で実施した二次粒子場の測定と遮蔽設計計算法の精度検証に関する研究を述べた。CHARMは Large Hadron Collider 等で使用される電子機器の耐放射線性評価に供される照射施設であり、照射室内の銅標的と 24 GeV/c 陽子ビームの相互作用で生成する二次粒子照射場を提供している。本研究では放射化法を用いて、CHARM の利用上重要な熱領域から 100 MeV 程度までの二次粒子情報を含む系統的な反応率データを取得し、CHARM 照射場の設計に用いられた FLUKA 等のモンテカルロ計算コードや簡易式との比較を通じて、実験データの有用性を示した。照射場の熱領域成分の測定には金箔放射化法を採用し、 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ 反応率と Cd 差法を用いて熱中性子束分布を導出した。この熱中性子束分布データは CHARM で初めて取得された低エネルギー成分実測値であり、当該施設での照射試験の基準となるデータとして活用できる。また、この実験値に基づいて Patterson らの熱中性子束評価に係る簡易式を検証し、式中のパラメータの値を数十 GeV の高エネルギー陽子に対して初めて得た。次に、In、Al、Nb 及び Bi 検出器を銅標的の周囲に配置して高エネルギー二次粒子放出量の角度分布を測定した。高エネルギー陽子による混合場では中性子に加えて陽子や光子等が放射化反応率に競合し、放射化法による二次粒子評価を困難にする。実験とシミュレーションの比較から、 $^{93}\text{Nb}(\gamma, n)^{92}\text{Nb}$ 反応により中性パイオンの崩壊 ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) による高エネルギー光子分布を、 $^{115}\text{In}(n, n')^{115}\text{In}$ 反応で蒸発中性子分布を、 $^{209}\text{Bi}(p, 4n)^{206}\text{Po}$ 反応で二次陽子分布を、それぞれ標的近傍の混合場において検証できることを示した。二次陽子の測定に放射化法を適用した例はこれまでに無く、本研究では $^{209}\text{Bi}(p, 4n)^{206}\text{Po}$ 反応の二次陽子検出反応としての有効性を初めて実証した。また、各放射化検出器から得た種々の反応率データに基づいて、24 GeV/c 陽子による生成二次粒子の強度と角度分布、さらに、室内における中性子の散乱・減速の過程に関する粒子輸送計算コードの予測の精度を示した。

2つ目は、J-PARC 30 GeV 陽子シンクロトロン (MR) トンネル室内の熱中性子分布プロフィール測定について述べた。MR は将来的に 1.3 MW もの他に類を見ない大強度陽子ビ

ームの実現を目指しており、これに向けた遮蔽設計や放射線管理手法検討に活用できる二次粒子実測データの取得が必要とされている。MR の大強度化の鍵は、ビームロスを入射部に局在化させること、各コリメータのビームロス許容量を均等に利用すること、にある。ここでは、空気やコンクリート壁の放射化への寄与が大きい熱中性子のトンネル内分布の解明を通じてこの両方を実験的に検証し、ビームロス評価における熱中性子計測の有効性を示した。実験では周長約 1.6 km のトンネル壁に沿って金箔検出器を配置し、約 400 kW 出力下での熱中性子分布プロファイルを IP 法と γ 線スペクトロメトリー法を併用して一度に取得した。その結果、ビームロスによる熱中性子は、入射部の計 5 台のコリメータ周辺で支配的に生成し、アーク部等では入射部と比較して 2 桁以上低いことが明確になった。また、測定値と計算値の比較から、MR ではコリメータビームロス量をコリメータ毎に概ね均等分配できていることを示した。これらから、ビームロス局在能力と各コリメータのビームロスバランスの両方を初めて実験的に検証した。さらに、熱中性子分布データに基づいて簡易式の 3 GeV 陽子に対するパラメータが数十 GeV 陽子の場合と等価であることを示し、簡易式の適用エネルギー範囲を拡張した。また、金箔と同位置の壁際の残留線量率分布と熱中性子分布は両対数上で直線関係を示し、両者の関係性の中にはコンクリート組成の違いによる影響が認められた。この結果から、ビーム停止後の残留 γ 線計測を通じて、ビーム運転中の熱中性子分布情報を簡便に読み出す手法の実現性が示唆された。また、低放射化コンクリート位置の線量率は同じ熱中性子強度下の普通コンクリート位置と比べて約 1/3 程度低いことが明らかとなり、低放射化コンクリートの熱中性子起因の残留線量低減効果を実現場で初めて確認した。

3 つ目は、SuperKEKB におけるビームロスモニター (BLM) 手法開発のための開発研究について述べた。SuperKEKB 用 BLM は人やハードウェアを防護する重要設備であり、センサー部で光子・荷電粒子を観測してビームロスを素早く検知する。しかし、その信号強度からビームロス粒子数を正確に知ることは困難とされている。これは、光子・荷電粒子が強い放出角度分布を持ち遮蔽されやすいこと、センサーの検出感度がエネルギーに依存すること、等の BLM 応答に影響する要因が複雑であるためである。本研究ではこの課題解決に向けて、空間分布の偏りが小さく、検出原理が簡単で、精度良く実測できる熱中性子の計測に基づく BLM 手法を提案し、その技術と装置の実現性を実証した。技術実証試験では、比例計数管型中性子検出器を SuperKEKB 用陽電子ビームコリメータの近傍に設置し、熱中性子の計測を通じてリング入射中及び蓄積中のビームロスの時間変化を追従できることを示した。また、中性子計数トレンドからビームロスに影響を及ぼす各種の加速器パラメータの変動を読み取れることを示した。以上の結果から、本 BLM 手法は加速器調整への応用が見込めると考え、今後の普及展開を見据えて、半導体熱中性子検出器と信号処理回路等を実装した小型で安価な BLM 試作機を開発し、SuperKEKB で動作試験を行い、ビームロス監視に適用できる見通しを得た。本手法は最近の SuperKEKB で問題化しているコリメータの放射化やこれによる被ばく線量の予測にも応用可能であり、加速器放射線防護分野への展開も期待できる。

以上の研究を通じて、高エネルギー加速器の高輝度化・大強度化に向けた課題への対応に資する実験データと知見を提供し、さらに、新しい BLM 手法の実現可能性を示した。

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 大山 隆弘

Title
論文題目 高エネルギー加速器の二次粒子場の測定とその応用に関する研究

高エネルギー加速器施設内では、ビームロスにより発生する中性子、陽子、光子、パイオン、ミュオンなど様々な二次粒子からなる混合放射線場が形成される。高輝度、大強度ビームを目指す加速器施設では、この混合放射線場を適切に評価し、放射能の生成を見積もり放射線管理に生かすこと、機器の放射線耐性に応じて適切に遮へいすること、将来の施設の廃止を見越しトンネル自体を含む物質の放射化の程度を見積もること、そしてそれらのためにビームロスを正確に評価するための手段を持つことが必要である。大山氏は、これらの課題への対処のため、二次粒子の実測データの取得と測定技術の高度化に取り組み、以下の結果と結論を得た。

- (1) CERN の CHARM と呼ばれる 24 GeV/c 陽子ビームを用いた高エネルギー放射線場の熱中性子束分布及び二次粒子の測定。大山氏はこれまで本施設であまり注目されてこなかった熱中性子束に着目し、その量と分布を明らかにした。これは、当該施設での照射試験の基準となるものである。次に、In、Al、Nb 及び Bi 検出器を同施設内の銅標的周囲に配置して二次粒子による放射能生成量を二次粒子放出角度毎に測定した。実験とシミュレーションの比較から、 $^{93}\text{Nb}(\gamma, n)^{92}\text{Nb}$ 反応により中性パイオンの崩壊 ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) による高エネルギー光子分布を、 $^{115}\text{In}(n, n')^{115}\text{In}$ 反応で蒸発中性子分布を、 $^{209}\text{Bi}(p, 4n)^{206}\text{Po}$ 反応で二次陽子分布を、それぞれ標的の近傍の混合場において検証できることを示した。二次陽子の測定に放射化法を適用した例はこれまでに無く、本研究では $^{209}\text{Bi}(p, 4n)^{206}\text{Po}$ 反応の二次陽子検出反応としての有効性を初めて実証した。また、各放射化検出器から得た種々の反応率データに基づいて、24 GeV/c 陽子による生成二次粒子の強度と角度分布、さらに、室内における中性子の散乱・減速の過程に関する粒子輸送計算コードの予測の精度を示した。
- (2) J-PARC MR トンネル内の熱中性子分布プロファイル測定。MR の大強度化の鍵は、ビームロスを入射部に局在化させること、各コリメータのビームロス許容量を均等に利用することである。ここでは、空気やコンクリート壁の放射化への寄与が大きい熱中性子のトンネル内分布の解明を通じてこの両方を実験的に検証し、ビームロス評価における熱中性子計測の有効性を示した。実験では周長約 1.6 km のトンネル壁に沿って金箔検出器を配置し、早い取り出しモードの約 450 kW 出力運転下での熱中性子分布プロファイルをイメージングプレートと γ 線スペクトロメトリー法を併用して一度に取得した。その結果、熱中性子は、入射部の計 5 台のコリメータ周辺でのビームロスにより支配的に生成し、アーク部等では入射部と比較して 2 から 3 桁以上少ないことが明確になった。また、測定値と計算値の比較から、MR ではコリメータビームロス量をコリメータ毎に概ね均等分配できていることを示した。これらから、

ビームロス局在能力と各コリメータのビームロスバランスの両方を初めて実験的に検証した

- (3) SuperKEKB におけるビームロスモニタ(BLM)開発のための開発研究。本研究では空間分布の偏りが小さく、検出原理が簡単で、精度良く実測できる熱中性子の計測に基づく BLM 手法を提案し、その技術と装置の実現性を実証した。

審査委員会では、大山氏は研究内容を明瞭かつ簡潔に発表し、質疑に対して的確に回答した。また、英語で投稿論文を執筆し掲載済みであること、国際学会において英語での発表、質疑応答を行っていることから英語の能力についても十分であると判断する。

以上により、論文の主旨及び研究内容は博士論文として妥当であり、十分な完成度であると判断し、審査委員全員一致で本審査を合格とした。