

粒子加速器による中性子生成と遮蔽に関する研究

杉原, 健太

<https://hdl.handle.net/2324/4784608>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 杉原 健太

論 文 名 : 粒子加速器による中性子生成と遮蔽に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

粒子加速器の応用が原子核物理学に加え工学、医学分野に広がっている。粒子加速器の設置には、加速粒子と物質の相互作用で発生する中性子及びガンマ線も含めた遮蔽を考慮する必要がある。遮蔽設計に 3 次元モンテカルロ放射線輸送コード PHITS 等が利用されている。しかし、計算の確かさの検証には限界があり、実際の施設では遮蔽に余裕を持たせて大型化している。遮蔽の小型化には、発生する中性子の振る舞いを表す線源項の信頼性の向上に加え、発生した中性子を減速し吸収する遮蔽構造の最適化が必要となる。

本研究では、数 MeV/u から数百 MeV/u の加速粒子と物質との相互作用で発生する中性子線源項の評価及び遮蔽構造の小型化のために必須となる 1 MeV 以下の中性子遮蔽の方法論に関する検討を行うことを目的として、理化学研究所（理研）で進行中の加速器施設の開発・高機能化の計画を実例として、遮蔽構造の詳細検討を進めた。対象の加速器施設は 3 施設である。一つ目は、コンクリート内部状態の非破壊観察技術の開発を目的とした、2.49 MeV の陽子とリチウムの核反応で中性子を発生させる加速器駆動小型中性子源 RANS-II である。二つ目は、様々な未知 RI の性質探求を志向した RI ビームファクトリー（RIBF）での 345 MeV/u のウランビームの大強度化計画である。最後に、RI 内用療法のための大強度アルファ線ビームを用いたアスタチン製造ビームラインの計画である。これらの検討のために、実験を元に中性子線源項の検証、遮蔽計算の精度検証を行った。本論文は 6 章構成になっている。

第 1 章では、本研究の背景と目的について述べた。

第 2 章では、RANS-II 施設における 1 MeV 以下の中性子の遮蔽と中性子線源項測定について言及した。この中性子照射場では、イメージング実験の際に中性子束の広がりによるバックグラウンド成分を無視できない問題があった。そこで中性子束の広がりを抑制するためのコリメータ設計を PHITS と評価済み核データを用いて行い、30 mm 径空洞のホウ素配合ポリエチレンコリメータにより中性子バックグラウンド成分を実験者が要求する 1%以下に抑制した。またこの施設では陽子ビームエネルギーや照射位置の不定性という問題を抱えていた。確認のために、インジウムの非弾性散乱反応による放射化反応率測定と中性子線量計による線量率測定を行った。計算と実験の比較をすると 2 倍程度の差が見られた。そこで、シミュレーションに陽子ビームエネルギーの分布と照射位置の分布等を取り入れたところ、実験と計算の比較で最大 1.6 倍程度の一致の差になった。本測定により陽子ビームモニタ開発の必要性を示した。

第 3 章では、345 MeV/u のウランビームと銅の核反応で発生する中性子線源項の測定について述べた。RIBF でのウランビーム大強度化に向けた遮蔽計算に適した中性子線源項の実測値はなく、測定が望まれている。そこで 345 MeV/u のウランビームを銅に入射し発生する中性子エネルギースペクトルを飛行時間法により放出角 0°、45°、90°にて測定した。実測値を計算結果と比較した結果、

重イオン反応においてクーロン場からの励起による光分解反応の実装で計算の予測精度を向上可能と判断した。また 0°方向では、計算が実験を 20%過小評価することがわかった。加えて地下に建設された RIBF の遮蔽の最適化に必要な 90°方向の計算と実験の比較を行った結果、計算は実験を 70%過小評価することがわかった。本測定により、PHITS 計算による遮蔽設計の際に必要な余裕度を見出した。

第 4 章では、第 5 章で行う RI 内用療法用のアスタチン製造ビームラインの遮蔽設計に必要な 7.2 MeV/u のアルファ線ビームをビスマスに入射して発生する中性子線源項を第 3 章と同様の手法で測定した。このエネルギー領域は、核反応モデルの予測精度が低いことが知られているので中性子線源項の測定が重要である。この実測値を PHITS 内の核反応モデルと比較した結果 30%程度の過小評価を示した。本測定により、PHITS 計算による遮蔽設計の際には、この差を考慮した設計を行う必要があると示した。

第 5 章では、第 2 章の中性子場の遮蔽と、第 4 章の中性子線源項の測定をもとにアスタチン製造ビームラインの小型軽量の遮蔽設計を行った。10 MeV 以上の中性子減速用の鉄、それ以下の中性子減速用のポリエチレン (PE)、また熱エネルギー成分の減少用のホウ素配合 PE (BPE)、ガンマ線遮蔽用の鉛から成る複合材料を用いた。中性子と鉄や PE の反応で発生する二次ガンマ線を遮蔽するために、単純に鉛を増加させるだけでは遮蔽材設置予定場所におけるサイズと耐荷重の厳しい制限を満足できなかったため、BPE を適切に配置して高エネルギー二次ガンマ線発生量を減らすことで、小型軽量の遮蔽でガンマ線線量率を低減させることに成功した。

第 6 章では、本研究の総括を行うとともに、今後の課題について言及した。

〔作成要領〕

1. 用紙はA4判上質紙を使用すること。
2. 原則として、文字サイズ10.5ポイントとする。
3. 左右2センチ，上下2.5センチ程度をあげ，ページ数は記入しないこと。
4. 要旨は2,000字程度にまとめること。
(英文の場合は，2ページ以内にまとめること。)
5. 図表・図式等は随意に使用のこと。
6. ワードプロ浄書すること（手書きする場合は楷書体）。
この様式で提出された書類は，「九州大学博士学位論文内容の要旨及び審査結果の要旨」
の原稿として写真印刷するので，鮮明な原稿をクリップ止めで提出すること。