

プロジェクト名(タイトル): 仁科加速器科学研究センターの放射線安全評価

利用者氏名: ○田中 鐘信(1)、吉田 光一(2)、奥野 広樹(3)、赤塩 敦子(1)、杉原 健太(1)、小林 知洋(4)
理研における所属研究室名:

- (1) 仁科加速器研究センター 安全業務室
- (2) 仁科加速器科学研究センター RIビーム分離生成装置チーム
- (3) 仁科加速器研究センター 加速器基板研究部
- (4) 光量子光学研究センター 中性子ビーム技術開発チーム

1. 本プロジェクトの研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

仁科加速器科学研究センターでは、RIBF 加速器施設を含め、多数の加速器を運用している。水素からウランに至る幅広い核種の重イオンビームを、核子あたり 350MeV のエネルギーまで加速できる。また、エネルギーの高くない AVF サイクロトロン等を用いて放射性同位元素(RI)の生成も行っており、こちらも大強度ビームを使用する。これらのビームを用いた様々な核反応から、天然には存在しない放射性同位元素を生成し、原子核物理学や核化学などの様々な実験を行う。

RIBF は現在世界最高のビーム強度であり、標的などとの核反応から大量の放射線を生成する。このため、高放射線量率、装置への放射線損傷および放射線による熱負荷、ビーム停止後に放射化に伴う強い残留放射線による作業員の被ばくリスクなど、様々な放射線影響が起こる。核反応により発生する放射線は、さらに 2 次 3 次の核反応を周辺物質と連続的に起こし、放射線の種類、エネルギーなど様々に変化する。そのため経験則のみから放射線影響を評価する事は難しい。よって、モンテカルロシミュレーションを用いて予測を行い、現実の測定と組み合わせる放射線影響の評価を行う。この結果に基づき、放射線が引き起こす問題の原因究明、法令を遵守するための放射線遮蔽設計、装置の寿命や熱負荷の予想と対策、作業員の被ばく低減方法の考案など様々な対応を行う。

2. 具体的な利用内容、計算方法

核反応や放射線輸送についてモンテカルロ計算を行う PHITS コードを用い、大規模並列計算により放射線影響評価を行う。計算モデル空間に、加速器からのビームを照射する標的や周辺の遮蔽を設置し、核反応による放射線の影響範囲、影響度合いを評価する。2021 年度は、リニアック棟大照射室に建設する①RI 製造ビームラインの遮蔽詳細設計、②仁科記念棟 AVF 室での大強度ビーム実験の

安全評価を行った。

① RI 製造ビームラインの遮蔽詳細設計

α 放射線を利用した癌治療研究において、アスタチン 211(半減期 7.2 時間)の利用が各地で計画されている。この研究のため、大強度ビームによるアスタチン 211 製造を可能とするビームライン建設を行う。大強度ビームにより、標的の直近は一時間当たり 100 Sv を超える放射線が発生するが、管理区域境界において法令限度である一時間当たり 2.6 μ Sv まで低減する遮蔽を PHITS を用いて設計する。

建設を行うリニアック棟大照射室のスペースには限りがあり、床面の耐荷重も弱い状況で設置可能な遮蔽を考案する。中性子などの放射線は、遮蔽内で核反応を起こし 2 次粒子を発生させるなど、粒子の種類やエネルギーが変わりながら減衰する。小型かつ軽量で能力の高い遮蔽を設計するために、遮蔽物質として鉄、ポリエチレン、ホウ素入りポリエチレン、鉛などを遮蔽の目的に応じて複合的に組み合わせ、くりかえし計算評価を行い、最適化を行った。

前年度に遮蔽の概念設計までは終えており、本年度は詳細設計を行った。遮蔽重量は 10 トンあるが、重量を支える筐体は放射線遮蔽上は隙間となる。さらに内部の装置に必要な配線配管を通す穴、リニアック棟の建物自身の遮蔽壁やその他建設上の問題も考慮した精細な 3 次元モデル空間を PHITS 上で構築し、放射線影響評価を行った。

② 大強度ビーム実験に対する簡易遮蔽の評価

AVF 加速器室における既存のビームラインに対し、これまでよりもエネルギーの高い大強度ビーム照射が必要な実験が計画された。核反応によりこれまでよりエネルギーの高い中性子放射線が放出されるため、周辺装置への放射線損傷を低減するために追加遮蔽が必要となる。照射される実験装置は部屋のクレーンが届かない端部にあり、コンクリートなどを用いた重量物の追加遮蔽は使用できない。人の手で持ち運べる量の遮蔽材で十分に放射線量を低減可能か、PHITS を用いて評価を行った。

3. 結果

① RI 製造ビームラインの遮蔽詳細設計

図 1 に、リニアック棟大照射室の上断面図を示す。PHITS 計算により標的から発生する放射線量分布を表している。色で線量率を表すが、表示上の最大線量率は赤で示す $10^5 \mu\text{Sv/h}$ 、最小値は青で示す $0.1 \mu\text{Sv/h}$ である。図中左部にビームを照射する標的と取り囲む全幅 2 m 四方の遮蔽を配置している。遮蔽内部は、線量分布が赤色で示された高線量になっている。標的周辺の遮蔽と、大照射室の遮蔽壁を合わせて、図中に示す最も近接する管理区域境界において、標的で核反応により発生する中性子の線量が $2.6 \mu\text{Sv/h}$ 以下まで低減されている。ただし、中性子と遮蔽材との 2 次反応で発生する γ 線の遮蔽が必要であり、密度の高い鉛が必要となる。床の耐荷重を考慮して鉛使用量が最小量になるよう設計し、中性子と γ 線の合計線量率は $1.3 \mu\text{Sv/h}$ となった。

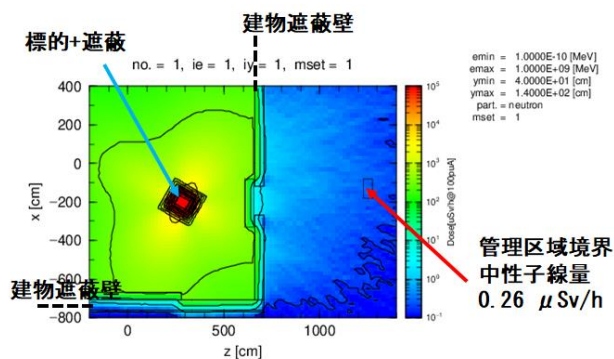


図 1 大照射室と管理区域境界の線量率分布

② 大強度ビーム実験に対する簡易遮蔽の評価

既存の実験では重陽子ビームのエネルギーが最大 12 MeV/u に対し、今回計画された実験では 15 MeV/u をベリリウム標的に照射する。核反応により発生する中性子のエネルギーはビームエネルギーに近く、線量率もエネルギーと共に上昇する。その一方で中性子遮蔽に広く使われるポリエチレンの遮蔽能力は 10 MeV 以上では下がるため、中性子エネルギー減少効果の高い鉄などと組み合わせた複合遮蔽も念頭に PHITS 計算を用いて検討した。結果として、手で持てる重量のポリエチレンブロックを積み上げ、標的方向に厚さ 30cm 、横方向に厚さ 15cm 、斜め方向に 10cm の遮蔽で、既存の実験と同程度まで周辺線量率を低減し実験を実施することができた。

4. まとめ

核反応・放射線輸送コード PHITS を用いて、加速器実験において核反応により発生する放射線の遮蔽を設計した。リニアック棟の新ビームライン建設のために、実際に建設する装置や建物の構造を 3 次元的に評価し、管理区域境界の放射線量率を法令限度以下に低減する遮蔽を詳細設計した。

5. 今後の計画・展望

引き続き仁科加速器科学研究センターの放射線安全上の課題に対し、放射線影響評価を続ける。