

課題名(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. 本課題の研究の背景、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。ビーム強度はすべての核種において 1 puA (6.2×10^{12} particle per second) を施設の目標としている。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、装置への放射線損傷および放射線による熱負荷、ビーム停止後も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て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・放射線輸送計算コード PHITS を用い、大規模並列計算を行う。加速器および遮蔽などを計算モデル空間内に再現し、ビーム照射による核反応や放射線の広がりをシミュレーション計算する。2020 年度は、リニアック棟大照射室への新ビームライン建設に必要な放射線遮蔽の設計検討を行った。

近年、がん細胞に対する α 線を用いた放射線治療のた

めに、アスタチン 211(半減期 7.2 時間)の利用が有力視されている。この医療研究のために大強度ビームを用いたアスタチン 211 の生成を目指している。

大強度ビームにより 1 時間あたり kSv を超える放射線が発生するため、効果の高い遮蔽が必要である。リニアック棟大照射室に遮蔽を配置できるスペースには限りがあり、地下室もあるため床面の耐荷重以下の重さで、かつ法令に定められた放射線管理区域境界における許容線量率以下になるように、PHITS を用いて遮蔽設計を行った。

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。状況に合わせて適切な遮蔽物質を選択し、くりかえし計算評価を行い、最適化を行った。

3. 結果

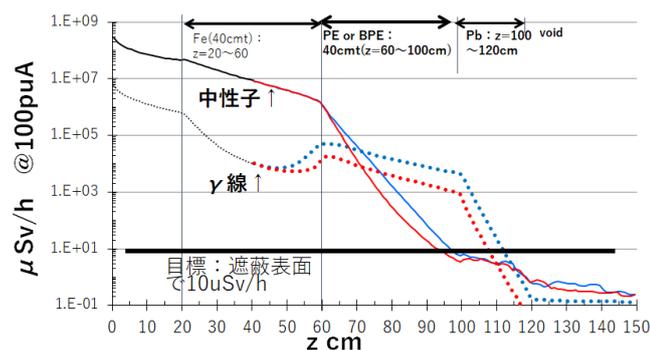


図1 単純な遮蔽体型による遮蔽基礎設計

図1に PHITS を用いた遮蔽の基礎設計の結果を示す。Z = 0 cm に標的を配置し、リニアック加速器からエネルギー 7 MeV/u、強度 100puA の α ビームを照射し、放射線が発生させる。縦軸は放射線量率を示す。遮蔽効果の目標を、遮蔽表面で線量率 10 μ Sv/h とする。透過性の高い放射線は中性子とガンマ線であり、可能な限りコンパクトかつ軽量の遮蔽になるように最適化した。

Z = 20 cm 以下は実験装置のスペースであり、遮蔽はな

い。Z = 20-60 cm において、厚さ 40 cm の鉄を配置した。比較的高いエネルギーの中性子と鉄原子核との散乱確率が高く、中性子エネルギーを減少させる役割がある。鉄内での中性子線量率減少はゆるやかだが、その外部に低エネルギー中性子の遮蔽効果が高いポリエチレン(PE)もしくは重量比 10%のホウ素入りポリエチレン(BPE)を配置することにより、中性子線量率を大きく低減することができ、遮蔽の小型化につながる。

一方、PE に低エネルギー中性子が入った場合、PE 内の水素原子核と中性子の核反応により、2.2 MeV のガンマ線を生成する。図 1 の Z = 60 cm 付近でガンマ線量率が高くなっており、PE 内で中性子よりもガンマ線の線量率の方が高くなる。ガンマ線の遮蔽効果が高い鉛を外部に配置することにより、目標線量率まで減衰させる事は可能だが、鉛は密度が 11.3 g/cm³と高く、遮蔽の最外部に配置した場合は体積も増え、全体の重量に大きく影響する。

そこで、PE の内側 10cm だけを BPE に変更した。ホウ素原子核が低エネルギー中性子を捕獲する核反応を起こし、水素原子核からのガンマ線の生成を低減できる。これにより、重量のある鉛の厚さを約 10cm から 5cm まで削減でき、遮蔽の軽量化につながる。

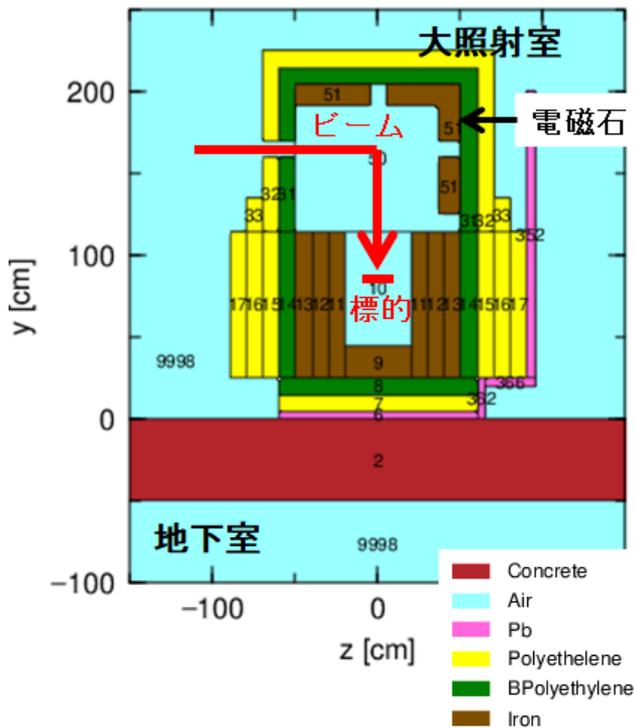


図 2 リニアック棟大照射室に設置した遮蔽の横断面

この結果に基づき、リニアック棟大照射室の現場に合わせた 3 次元遮蔽のテスト計算結果を示す。図 2 に大照射室に標的および遮蔽を配置した PHITS モデル空間図を示す。厚さ 50 cm のコンクリート床の上に遮蔽一式を設置した。ビームは水平方向から入射するが、電磁石により 90 度曲がり、上からビスマス標的に入射する。横方向に鉄 30 cm、BPE 10 cm、PE 30 cm を配置した。地下室内の線量率を下げるため、標的下部にも遮蔽を設置している。上部は電磁石の鉄を遮蔽と兼ねており、複雑な構造になっている。

図 3 に、シミュレーション計算結果を示す。色と等高線により線量率の高さを示している。遮蔽表面において、ある程度の線量率まで低減できている事が確認できた。

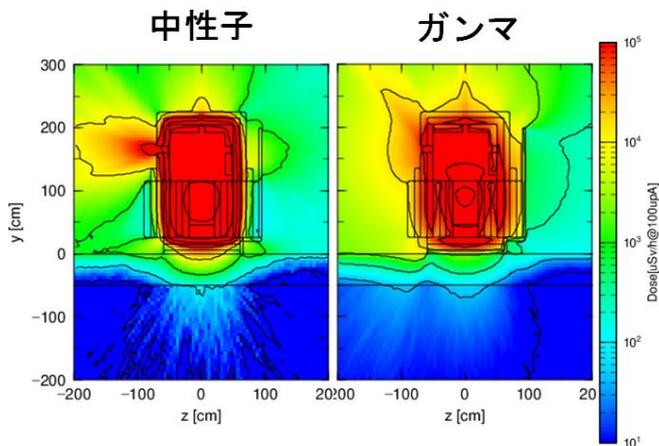


図 3 遮蔽のテスト計算結果

4. まとめ

大規模並列計算を用いた放射線輸送モンテカルトコード PHITS を用いて、リニアック棟の新ビームライン建設のための遮蔽設計を行った。小型でかつ軽量になるように基礎設計はできたが、詳細な 3 次元設計はテスト計算までを行った。

5. 今後の計画・展望

図 3 に示したテスト計算結果では、線量率の低減が不十分である。建物の遮蔽壁も合わせて管理区域境界の法令限度の線量率 2.5 μSv/h まで低減できるように計算評価により設計を進める。