

プロジェクト名(タイトル):

理研小型中性子源 RANS の開発のための独自関数および核データライブラリーを用いた 中性子発生計算

利用者氏名:

○若林 泰生(1)、Ma Baolong(1)

理研における所属研究室名:

(1)光量子工学研究センター 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

メガ電子ボルト(数~100MeV)エネルギー陽子線核反応を利用した小型中性子源の開発において、入射核および標的核の組み合わせによる原子核反応を用いた中性子発生プロセスは、ターゲット減速材反射材デザイン、遮蔽見積りや試料への中性子照射、検出器開発などに関わる一番重要な部分である。特に、我々のチームが進めているインフラ検査技術のための理研小型中性子源RANSだけでなく、例えば医療関係などの中性子源を製作していくにあたり、中性子発生量および角度分布・エネルギー分布の見積もりは、遮蔽量や形状など中性子源の大きさや製作費に直結するため、精度が高くなければならないにも関わらず、核データが不足しており、世界的に加速器中性子源発生や遮蔽計算には数倍から10倍程度の不確実性がある。我々は、中性子発生に関して独自関数の開発を行っており、精度を高めるため、統計量の増加や既存の核データライブラリーとの比較・検討を行っている。

独自関数を用いた RANS 開発のための放射線輸送計算を中心としたモンテカルロシミュレーションによる遮蔽体、ビームラインなどを含めた大規模設置が必要であり、通常の PC では数か月以上の時間を要する。独自関数の精度を高め、非破壊検査技術開発など、世界に先駆ける結果を得る研究開発を実施するため、スーパーコンピュータを用いて、統計量の増加および計算回数を増やす必要がある。

今年度は主に、独自関数を RANS 体系に組み込み、将来的な RANS アップグレードに向け、遮蔽体外のバックグラウンド中性子とガンマ線による周辺線量の低減(低線量化)、および、遮蔽体総重量の低減(軽量化)を目指した、複層遮蔽構造に関する計算を行った。

2. 具体的な利用内容、計算方法

GEANT4 や MCNP、PHITS などのモンテカルロシミュレーションコードを必要な計算に応じて使い分け、RANS 開発の

ため、陽子とベリリウム標的による中性子発生部分に独自関数を組み込んだ上記モンテカルロシミュレーションによる遮蔽体やターゲットステーション、線形加速器などビームラインを含めた大規模設置による放射線輸送シミュレーションを行う。

3. 結果

今年度は、モンテカルロシミュレーションコード MCNP に、図1に示す独自関数を基にした RANS 中性子スペクトルを入力し、低線量化、および、軽量化に向けた、複層遮蔽構造の最適化計算を行った。

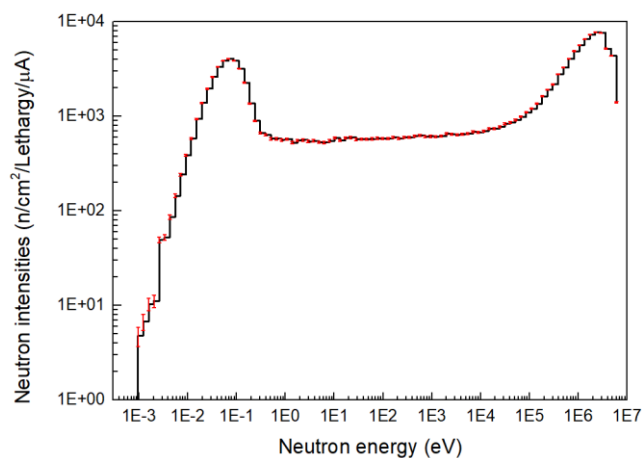


図 1: 計算を行うために入力した中性子スペクトル。誤差棒(赤線)は MCNP による計算における統計誤差。

計算を行った遮蔽構造の例として、図2に、3層構造(PE/B₄C/Pb)と、6層構造(PE/B₄C/Pb/PE/B₄C/Pb)を示した。PE はポリエチレン、B₄C は炭化ホウ素、Pb は鉛を示す。各遮蔽材の厚さ(PE/B₄C/Pb : t₁, t₂, t₃ と、PE/B₄C/Pb/PE/B₄C/Pb : t₁, t₂, t₃, t₄, t₅, t₆)をパラメータとして、図2中の”Tally”の位置における、中性子とガンマ線の全線量と、遮蔽体重量が最小となるように最適化する。

ここで、遮蔽構造のトータルの厚さは、3層構造(t₁+t₂+t₃)と6層構造(t₁+t₂+t₃+t₄+t₅+t₆)とも、20cm と一定とした。遮蔽材の中性子ビーム入射側の面積は、25x25cm²である。

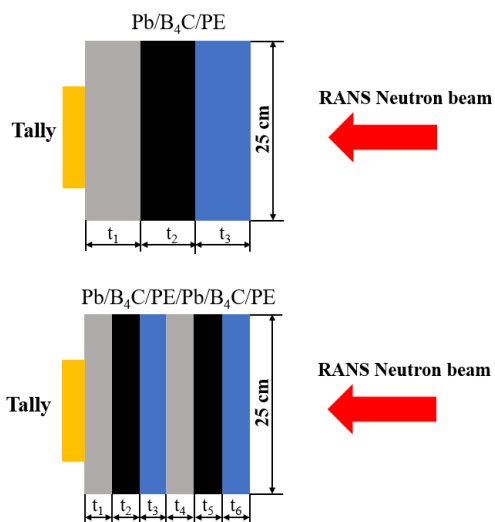


図2:最適化計算に用いた、3層および6層の複層遮蔽構造。 $t_1 \sim t_6$ は、それぞれの遮蔽材の厚さ。中性子ビーム入射面の遮蔽材サイズは、 $25 \times 25 \text{cm}^2$ 。

図3は、図2に示した PE/B4C/Pb (3層構造)と PE/B4C/Pb/PE/B4C/Pb (6層構造)を用いた場合の計算で得られた、線量比と密度の相関図である。X 軸は、tally 位置における、遮蔽材がある場合の中性子とガンマ線の全線量を、遮蔽材が無い場合の線量で割った線量比 (Dose rate ratio) である。Y 軸は遮蔽材密度を示す。上述したように、遮蔽構造の厚さと面積は一定であるので、密度は重量と同等である。

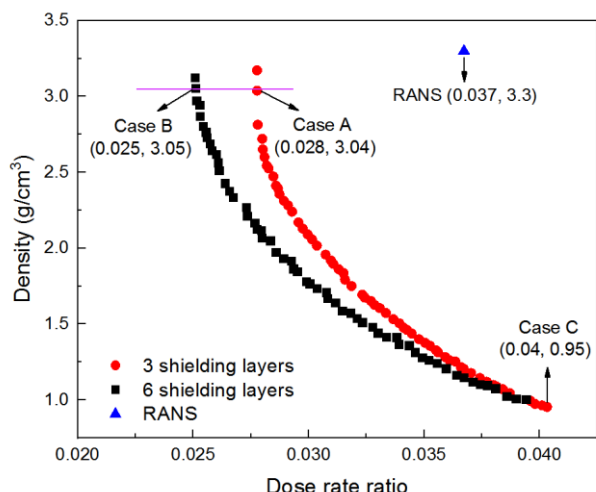


図3:線量比と遮蔽材密度の相関図。赤点は3層構造 (PE/B₄C/Pb) を、黒点は6層構造 (PE/B₄C/Pb/PE/B₄C/Pb)の計算結果を示す。

結果として、遮蔽材密度が同じであれば、6層構造は、3層構造よりも、遮蔽効果が高いことが分かった。つまり、線

量を同程度低減するために、6層構造は3層構造よりも軽くすることが可能である。

今後、図3中に示す、CaseA、CaseB、CaseCの遮蔽材を用い、計算の信頼性を検証するため、RANSで実験を行う予定である。

4. まとめ

RANS開発のため、独自関数をRANSターゲットステーションに取り入れ、シミュレーションコードとしてMCNPを用いて、RANSの遮蔽構造の最適化に関して必要な計算を行った。今年度においては、3層構造と6層構造を用いて、線量計算を行い、厚さを一定とした場合、3層構造に比べ6層構造の方が、線量を低減可能であることが分かった。

5. 今後の計画・展望

RANSを用いて、今回得た計算結果の実験的検証を行い、計算にフィードバックする。引き続きモンテカルロシミュレーションを用いた遮蔽構造、ビームラインなどを含めた大規模設置による独自関数を用いた中性子発生シミュレーションを行い、RANSの中性子施設としての更なる改良・改善のため、独自関数の精度の向上およびRANS開発を進める。

2021 年度 利用研究成果リスト

【ポスター発表】

Ma, Baolong, et al., “Experimental verifications for a multi-objective shielding design method on RANS”, UCANS9 international symposium, Saitam Japan (Online), 29th March (2022) will be presented.