

課題名(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. 本課題の研究の背景、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倍程度の不確定性がある。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ーを用いて、統計量の増加および計算回数を増やす必要がある。

我々のチームでは、物質構造研究に重要な冷中性子に関して、冷中性子源モデレーター開発を先端光学素子開発チームおよび J-PARC センターと協力して行っており、今年度は主に、独自関数および RANS 体系を組み込んだ計算を行い、RANS に今後設置するための冷中性子源システムの中性子減速材(モデレーター)であるポリエチレンプレモデレーターとメシチレンの最適な厚さの組み合わせや、モデレーター周辺の反射体構造などを最適化し、効率良く冷中性子を得るための計算を行った。

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

本課題では、シミュレーションコード PHITS [T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol. Vol.50, pp.913-932 (2013)] を用いて、中性子工学施設実験ホールに設置されている、理研小型中性子源システム RANS(陽子線形加速器、ターゲットステーション、標的システムなど)および中性子工学施設実験ホールを体系として組み込み、7MeV 陽子とベリリウム標的による中性子の発生源として独自関数 [Y. Wakabayashi et al., Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 55, pp. 859-867 (2018)] を組み込んだ放射線輸送計算を行っている。図1は PHITS に体系として組み込んだ RANS ターゲットステーションである。図1に色分けされているように、RANS ターゲットステーションは、

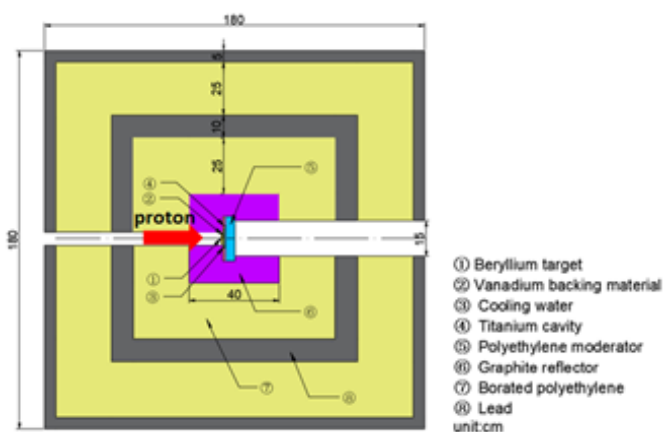


図1: RANS ターゲットステーション

①ベリリウム標的、②バナジウムバックリング、③冷却水、④チタン製キャビティ、⑤ポリエチレンモデレーター(減速材)、⑥グラファイト反射体、⑦ボロン入りポリエチレン(BPE と略す)、⑧鉛から成っている。また前方に 15x15cm² 開口の中性子取出し口がある。

ベリリウム標的で生成された中性子は、バナジウムバックリング、冷却水、チタンキャビティを通り、ポリエチレンモデレーターにより減速される。角度分布はあるが、中性子は四方八方に放出されるので、カーボン反射体は、それら中性子を反射させることで、前方にある中性子取出し口へ集めるものである。BPEと鉛は、中性子取出し口以外から中性子およびガンマ線を出さないための遮蔽体である。

この RANS ターゲットステーションおよび独自関数を組み込んだ計算の例として、減速材に 4cm ポリエチレンモデレーターを使った場合の、ベリリウム標的から 3メートル位置で得られる中性子エネルギースペクトルを図2に示した。このように RANS で得られる中性子は、高速中性子領域と熱中性子領域、両方のピークを持つ。このバランスやピーク位置などを、ベリリウム標的後に設置するモデレーターを変えることにより、変えることが可能である。

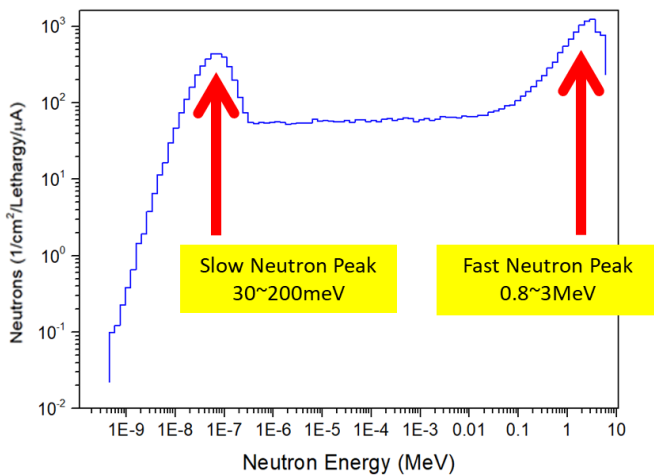


図2：独自関数および PHITS 計算により得た、ベリリウム標的から 3メートル離れた位置での RANS 中性子スペクトル

今年度は主に、RANS に設置する冷中性子源モデレーター、反射体、ターゲットステーション遮蔽を最適化し、熱中性子領域(10~100meV)よりエネルギーの低い冷中性子(0.1~10meV)を効率よく得るための計算を行った。RANSでは、冷中性子を得るための冷中性子源モデレーターとして、ポリエチレン製のプレモデレーター(前段減速材)で予め減

速させ、その直後に 20K に冷やしたメシチレン(1,3,5-トリメチルベンゼン、化学式:C₉H₁₂)を使用する方式を採用している。

3.1 プレモデレータおよびメシチレン厚さの最適化

ポリエチレン製プレモデレーター(以下、PE)とメシチレンの厚さを決定するため、ベリリウム標的から 2m の位置での冷中性子と熱中性子強度を、PE 厚さとメシチレンの厚さをパラメーターとして計算した。

図3に、PE の厚さを 0~6cm(1cm 刻み)、メシチレンの厚さを 0~6cm(0.5cm 刻み)で計算した、0.1~10meV の冷中性

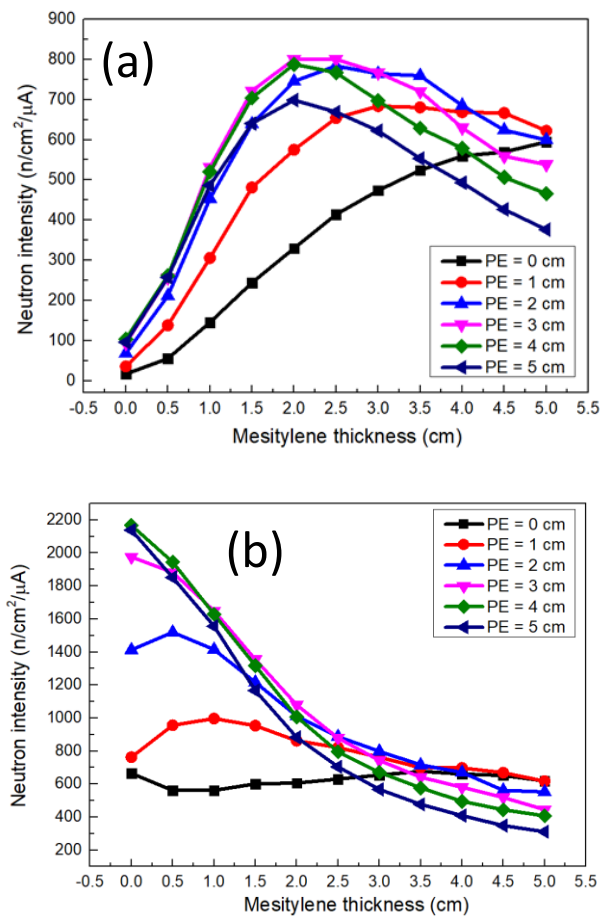


図3：それぞれの PE 厚さにおけるメシチレン厚さと中性子強度の相関図。(a)0.1~10meV の冷中性子強度。(b)10~100meV の熱中性子強度。

子強度(図 3(a))と、10~100meV の熱中性子強度(図3(b))を示した。最適化計算で得られた冷中性子強度は、PE 厚さ 3cm、メシチレン厚さ 2cm で、8x10² neutrons/cm²/s/μA であり、これは RANS 従来の厚さ 4cmPE を用いた場合の計算値の約 7.3 倍にあたる。一方、この PE とメシチレンの組み合わせでは、メシチレンによる減速が大きいため、熱中性子強度は、従来の約 0.6 倍となる

3.2 グラファイト反射体の最適化

RANS では中性子の反射体として、40cm x 40cm x 40cm のグラファイト(C)を用いている。反射体としてグラファイト以外にも、水(H₂O)やベリリウム(Be)、酸化ベリリウム(BeO)が挙げられるため、さらに冷中性子を増やす反射体としてどの物質が適しているか、C、H₂O、Be、BeO に関して、その形状をパラメーターとして計算し、比較した。パラメーターは図4のように3軸(原点はベリリウム標的の中心)の長さを用い、X軸を陽子ビーム入射方向の長さ20cm + T₁、Y軸を陽子ビーム入射方向の長さ20cm + T₁、Z軸を陽子ビーム入射方向の長さ20cm + T₂とした。図5はそれぞれの物質を反射体として場合のベリリウム標的から2m位置での冷中性子の強度であり、図5(a)はT₁が、図5(b)はT₂がパラメーターであり、それぞれ0~20cm(2.5cm刻み)で計算を行った。

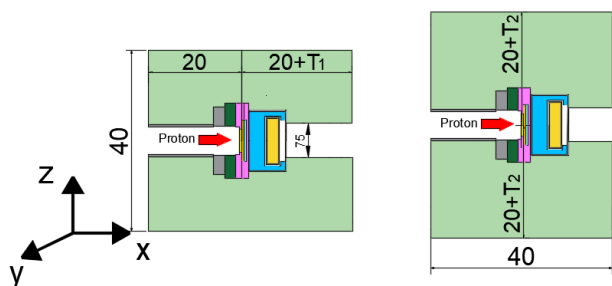


図4：物質(C、H₂O、Be、BeO)と形状の最適化に用いるパラメーターT₁とT₂。それぞれ0~20cm(2.5cm刻み)の間で計算を行った。

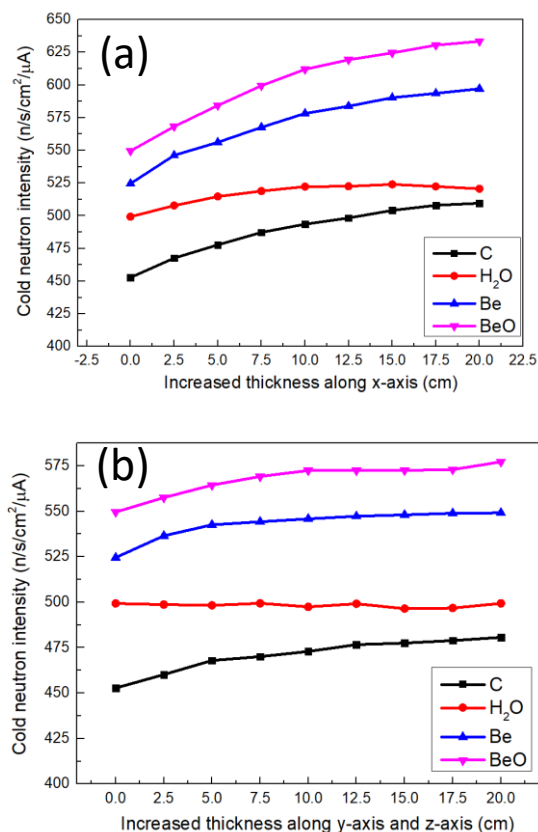


図5：独自関数およびPHITS計算により得た、ベリリウム標的から3メートル離れた位置でのRANS中性子スペクトル

行するY軸とZ軸方向の長さ20cm + T₂とした。図5はそれぞれの物質を反射体として場合のベリリウム標的から2m位置での冷中性子の強度であり、図5(a)はT₁が、図5(b)はT₂がパラメーターであり、それぞれ0~20cm(2.5cm刻み)で計算を行った。

結果として、冷中性子強度は、BeO > Be > H₂O > Cの順で高かった。しかしながら、Beは値段が高く毒性もある、BeOはかなり毒性が高く、両物質とも扱い辛い。H₂Oは軽く安価だが液体のため、容器が必要となる。従って、RANSにおいては引き続き、安価で扱い易いグラファイトを使用する。最終的に、T₁ = 15cm、T₂ = 5cm、つまり、現在のRANSグラファイトより、ビーム軸方向に15cm、ビーム軸と直行軸方向に5cm加えた形状を適用し、その際の冷中性子強度はそれぞれ11%と3%上昇する。将来的には、冷中性子強度が少なくとも25%上昇するBeやBeOを反射体として採用する可能性があるかもしれない。

3.3 RANS ターゲットステーションの再設計

今までのRANSターゲットステーション(以下、旧TS)の構造は、図1や図6(a)に示すように、グラファイトの外側は、BPE→鉛→BPE→鉛となっている。しかしながら、ボロンは低エネルギー中性子に対して大きな吸収断面積を有して

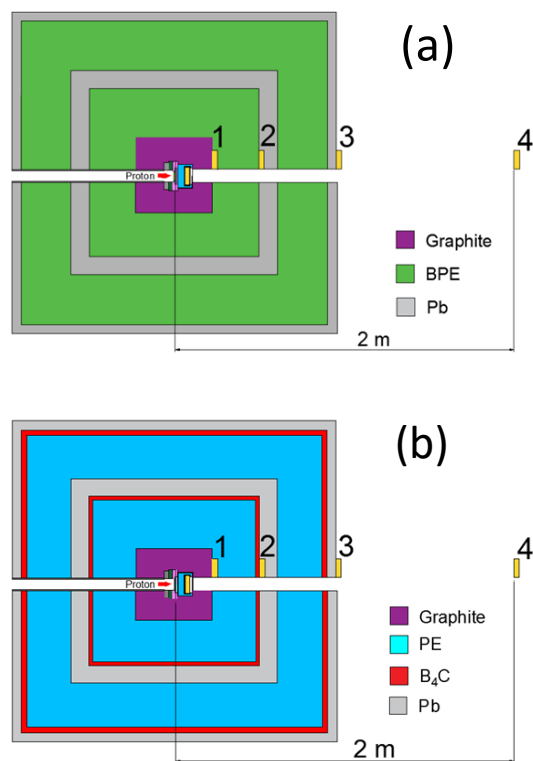


図6：計算に用いたターゲットステーション構造と検出器位置(中性子強度の計算箇所)。(a)旧TSの場合。(b)新TSの場合。

いるので、BPE の中では内側(モデレーター方向)への反射が PE の場合に比べて、あまり期待できない。

そこで、これまで 25cm 厚であった BPE 層を、24.5cm 厚の PE と 0.5cm 厚の B₄C ゴム(ボロンゴム)に置き換えることで、内側へ反射する中性子を増やしつつ、減速された外側への中性子はボロンゴムで吸収することで、中性子取出し口からの中性子強度が上昇し、また、実験ホール内の線量の減少が期待できる。(この BPE を PE とボロンゴムに入れ替えた RANS ターゲットステーションを以下、新 TS と呼ぶ。)

この置き換えによる効果を見積もるため、図6(a)や(b)に示すように、中性子強度を計算するための検出器をターゲットステーション内の1(グラファイト表面)、2(1層目の BPE 表面(a)、ボロンゴム表面(b))、3(2層目の鉛表面)、および、4(Be 標的から 2m 位置)を設置し、計算を行った。

結果として得られた、旧 TS と新 TS の検出器 1~3 での中性子エネルギースペクトルを図7に示す。旧 TS と新 TS では、例えば、赤点線(旧 TS)と青点線(新 TS)に見られるように、新 TS は旧 TS に比べ、低エネルギー領域が増え、高エネルギー領域が減少していることがわかる。検出器3の位置での中性子線量は旧 TS と新 TS で、それぞれ $5.43 \times 10^3 \mu\text{Sv/h}$ と $4.24 \times 10^3 \mu\text{Sv/h}$ 、ガンマ線線量はそれぞれ $45.4 \mu\text{Sv/h}$ と $65.5 \mu\text{Sv/h}$ となった。

検出器4の位置での冷中性子と熱中性子強度は、新 TS では旧 TS に比べ、それぞれ 8.4%と 38.7%増加した。また 1MeV の高速中性子は 25%減少した。したがって、新 TS は低エネルギー中性子を増やしつつ、全線量は TS 外において 24%ほど減少し、放射線安全の点からも良い改造となるであろう。

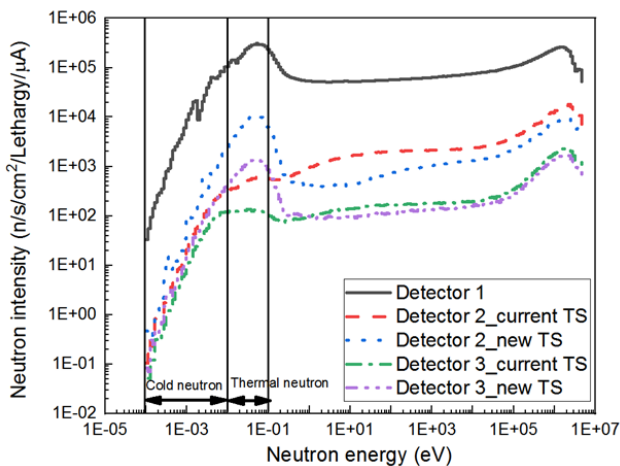


図7：旧 TS と新 TS の検出器 1~3 における中性子エネルギースペクトルの比較

3.4 RANS ターゲットステーションの再設計による収量まとめ
前節までに行った冷中性子強度の最適化の項目を表1にまとめた。さらに最適化の試みとして、Case0 と Case3 に

表1：最適化の項目まとめ。左列から、Case No.、モデレーターの種類、グラファイト反射体の3次元サイズ(cm)、グラファイト反射体の外側の遮蔽構造、中性子ビーム取出し口の大きさ(cm)

Cases	Moderator (material, size)	Graphite reflector size (T ₁ ×T ₂ ×T ₃)	Target shielding structure	Neutron beam opening size
Case 0	4 cm PE	40 × 40 × 40	BPE/Pb/ BPE/Pb	7.5 x 7.5
Case 1	3 cm PE, 2cm mesitylene	40 × 40 × 40	BPE/Pb/ BPE/Pb	7.5 x 7.5
Case 2	3 cm PE, 2cm mesitylene	55 × 50 × 50	BPE/Pb/ BPE/Pb	7.5 x 7.5
Case 3	3 cm PE, 2cm mesitylene	55 × 50 × 50	PE/B ₄ C/Pb/PE/B ₄ C/Pb	7.5 x 7.5
Case 0'	4 cm PE	40 × 40 × 40	BPE/Pb/ BPE/Pb	15 x 15
Case 3'	3 cm PE, 2cm mesitylene	55 × 50 × 50	PE/B ₄ C/Pb/PE/B ₄ C/Pb	15 x 15
Case 4	3 cm PE, 2cm mesitylene	55 × 40 × 60	PE/B ₄ C/Pb/BPE/Pb	15 x 15

に関して、Case0' と Case3' として、中性子ビーム取出し口の大きさも従来の 7.5x7.5cm²から 15x15cm²にした場合の計算も行った。また、Case4 は、現時点で実際に RASN ターゲットステーションに施すことが可能な値であり、今年度において施工・改良中である。

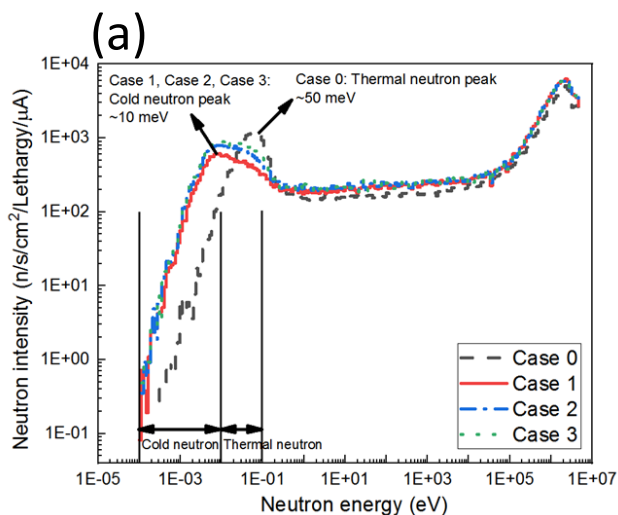
Case0~3 に関して、Be 標的から 2m 位置での中性子エネルギースペクトルを図7(a)に示した。冷中性子源モデレーターではない従来の 4cm 厚さ PE の Case1 に関して、約 50meV にピークがあることが分かる。Case1~3 の冷中性子源モデレーターの場合は、約 10meV にピークがシフトし、冷中性子領域が増えていることが分かる。

図7(b)に、Case 毎の 0.1~10meV 範囲の冷中性子強度をプロットした。前節までに施した最適化による Case3 に関して、最も冷中性子強度があることがわかり、従来の 4cm 厚さ PE に比べ、約 12 倍になっている。また、中性子ビーム取出し口を広げる事で、さらに 15.4 倍と増える事がわかる。再設計を施すための製作コスト・時間などを考慮して、実際には Case4 の改良を行っているが、従来の 12.6 倍と十分な増加が期待できることがわかった。

図 7(b)と同様に、図7(c)に、Case 毎の 10~100meV の熱中性子強度のプロットを示した。従来の中性子ビーム取出し口 7.5x7.5cm² の場合は、熱中性子強度に関しては冷中性子に減速されることで減少、もしくは、同等でゲインはないが、15x15cm² にすることで、熱中性子の増加も期待でき

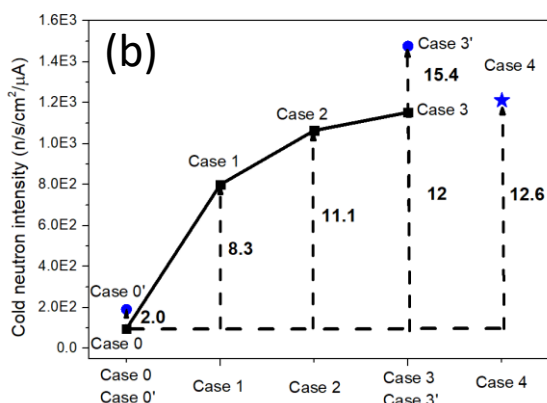
ることがわかった。

理想的には、Case3' が最適であるが、今年度行っている Case4 の改良であっても十分に冷中性子強度の増加が期待されるため、今後、Case4 のターゲットステーション改造、および、冷中性子源開発を進め、実験的に検証を行う予定である。



4. まとめ

RANS 開発のため、独自関数、RANS ターゲットステーションを取り入れ、シミュレーションコードとして PHITS を用いて、RANS に設置する冷中性子源モデレーターを用いた冷中性子強度の最適化に必要な計算を行い、プリモデレーターとメシチレンの厚さの最適な組み合わせ、および、新たなグラファイト反射体形状を決定し、また、ターゲットステーションに用いている BPE 層を、PE+ボロンゴムへ置き換える新たなターゲットステーション構造を決定した。これらにより、従来の 4cm ポリエチレンモデレーターと RANS ターゲットステーション構造に比べ、約 15.4 倍の冷中性子強度を得られると期待されることがわかった。また最適化に関して、構造上の問題など実際に施す事が可能な範囲でターゲットステーションの改造を行っており、その場合は約 12.6 倍の冷中性子強度が得られることが期待される。



5. 今後の計画・展望

昨年度から今年度末にかけて製作した冷中性子源モデレーター、および、新たなターゲットステーション構造による、今回得た計算結果の実験的検証を行い、更なる改良・改善のため、計算にフィードバックする。また、前方に多い高速中性子によるバックグラウンドを低減するための、斜め取出し口の製作も用意しており、引き続き PHITS を用いた遮蔽体、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、独自関数の精度の向上および RANS 開発を進める。

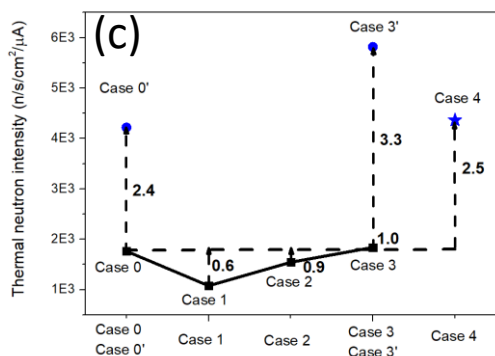


図 8 : (a) Case0~4 における Be 標的から 2m 位置での中性子エネルギースペクトル。0.1~10meV の冷中性子強度。(b) Case0~4、Case0'、Case3'における Be 標的から 2m 位置での冷中性子 (0.1~10meV 領域) 強度。(c) Case0~4、Case0'、Case3'における Be 標的から 2m 位置での熱中性子 (10~100meV 領域) 強度。

2020 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

Ma, Baolong, et al. "Optimization of a slab geometry type cold neutron moderator for RIKEN accelerator-driven compact neutron source." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment (2021):165079. doi: 10.1016/j.nima.2021.165079