

エネルギー可変中性子発生ターゲットの基礎的設計

PRELIMINARY DESIGN STUDY OF A VARIABLE ENERGY NEUTRON GENERATION TARGET

宮原 信幸^{#,A)}, 片桐 健^{A)}, 北條 悟^{A)}, 涌井 崇志^{A)}, 野田 章^{A)}

Nobuyuki Miyahara^{#,A)}, Ken Katagiri^{A)}, Satoru Hojyo^{A)}, Takashi, Wakui^{A)}, Akira Noda^{A)}

^{A)} QST National Institute of Radiological Sciences

Abstract

Neutron beam is one of a powerful tool for a material science analysis, an industrial imaging and medical applications. A neutron target is usually designed to generate mono-energetic beam; therefore, operators are needed to exchange the target for specific neutron energy generation. These target exchange operation is time consuming and following an unpreferable radiation exposure. The authors suggest preliminary design study of a variable energy neutron generation target, in this paper.

1. はじめに

中性子ビームは、材料科学における分析、工業的な中性子イメージングならびに医療用 RI 製剤、BNCT (ホウ素中性子捕獲療法) 等への応用に広く用いられている。当該中性子ターゲットにおいては主に単色エネルギーを利用する設計のものが多く見受けられ、中性子エネルギーの変更にあたってはターゲットその物を交換する必要があるものがほとんどで、ターゲット自身ならびにターゲットステーションの放射減衰を待つために数週間の休止期間を置いたのち、ターゲット交換を行い中性子ビームのエネルギーや Dose rate を確認し、再びビーム提供を行うため、放射減衰のための休止—ターゲット交換—ビーム確認に月のオーダーを要する場合も珍しくない。

本報では、新規に着想したオンデマンド可変エネルギー中性子発生のためのターゲットの基礎的な技術検討を紹介する。

2. 可変エネルギー中性子発生ターゲット

可変エネルギー中性子発生ターゲットの概観を Fig. 1 に示す。本ターゲットは楔状の Be ターゲット、銅製の水冷ジャケットから構成される。Be ターゲットの底面寸法は 100×100 mm であり、実際に製作する場合の工作精度ならびに熱応力等を勘案して、断面形状は最も薄い部分(楔の先端)は 1 mm、厚い部分(楔の終端)は 7 mm とした。このターゲットは O リングを用いたシール構造で冷却水ジャケットに接合され、ロウ付けは行わない。冷却水ジャケットは無酸素銅を想定し、内部に 90×90×8 mm の冷却水を内包し、当該冷却水は内径 8 mm の冷却水配管から 1 m/sec の流速で 20°C の冷却水が供給される。

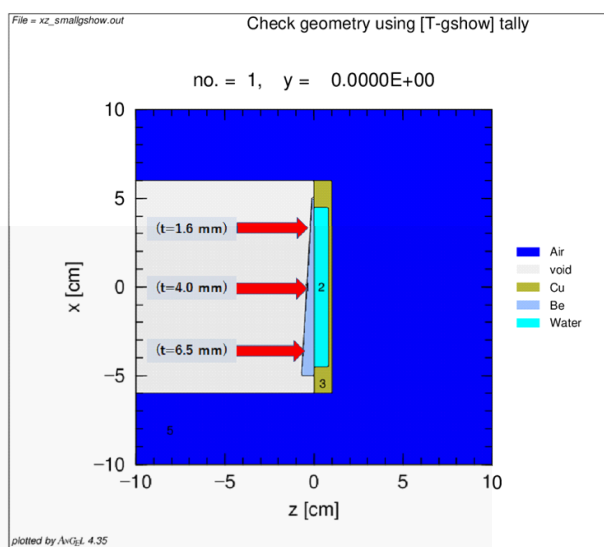


Figure 1: Variable energy neutron generation target (PHITS model).

3. エネルギー可変ターゲットの中性子発生シミュレーション

3.1 PHITS コード

PHITS は、物質中における粒子の輸送や崩壊を、核反応モデルや核データライブラリを用いて模擬する、3-D モンテカルロ計算コードである[1]。本稿における計算では、PHITS Ver. 2.88 コードを使用した。

20 MeV 以下の中性子輸送については、Event generator mode Ver.2 を使用した。

[#] miyahara.nobuyuki@qst.go.jp

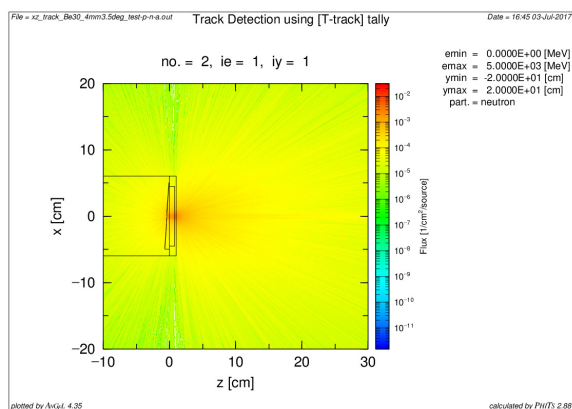


Figure 2: Variable energy neutron generation target (t=4.0 mm).

ターゲットに照射する粒子としては **deuteron** を用いエネルギーは 10~60 MeV の範囲とした。また、ターゲットの楔状の形状を生かすために、楔の中心軸上中央(等価板厚=4 mm 相当)ならびにその前後 4 cm の位置(1.6 mm ならびに 6.5 mm 相当)に直径 10 mm のビームスポットで照射するシミュレーションを行った。Figure 2 に等価板厚=4 mm 相当での照射シミュレーションにおける中性子トラックを示す。

3.2 中性子エネルギースペクトル

30 MeV deuteron をエネルギー可変ターゲットに照射した場合の中性子エネルギースペクトルシミュレーション結果を Fig. 3 に示す。約 10 MeV 程度のピークエネルギーの範囲ではターゲットの厚さとともに中性子フラックスは数倍増加する。一方、keV 程度のエネルギー範囲ではターゲットの平均板厚の増加とともに中性子のフラックスは急激に増加し 1.6 mm から 4.0 mm の板厚範囲で約 10 倍、1.6 mm から 6.5 mm の場合には約 100 倍増加する。また、板厚が厚い場合には低エネルギー側に移行する際のフラックスの低下は緩やかとなる。

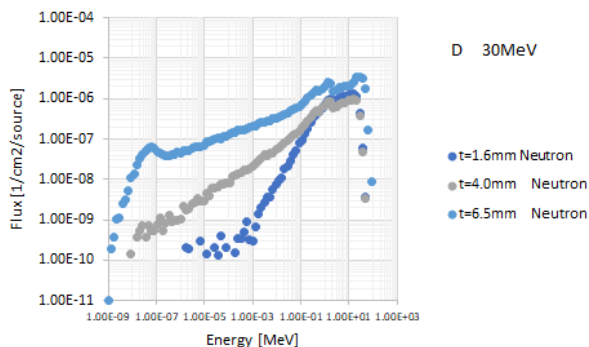


Figure 3: Neutron energy spectrum (PHITS: 30 MeV).

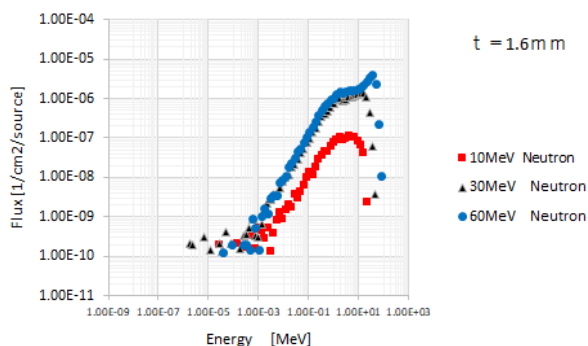


Figure 4: Neutron energy spectrum (PHITS: t=1.6 mm).

Figure 4 から 6 にそれぞれの平均ターゲット厚さにおいて照射エネルギーを変化させた中性子スペクトルを示す。各照射エネルギーともにターゲット厚の増加とともに低エネルギー側のテイルが上昇しており、単色に近いエネルギースペクトルから白色に近いエネルギースペクトルへと変化している。

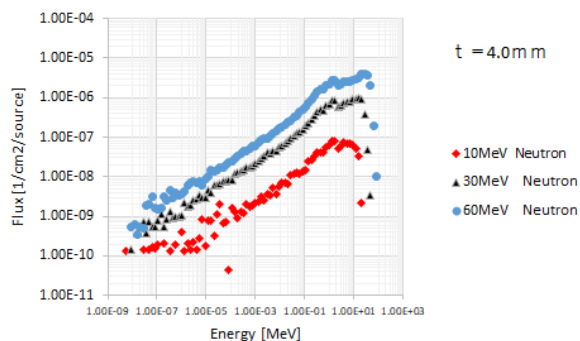


Figure 5: Neutron energy spectrum (PHITS: t=4.0 mm).

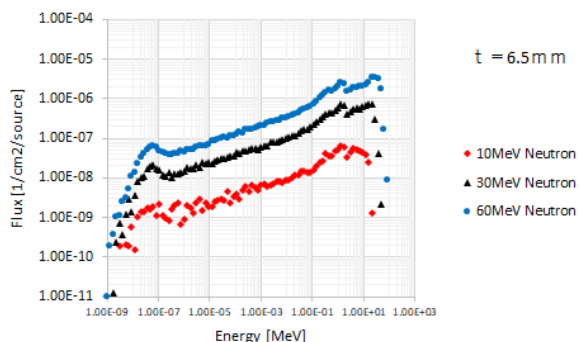


Figure 6: Neutron energy spectrum (PHITS: t=6.5 mm).

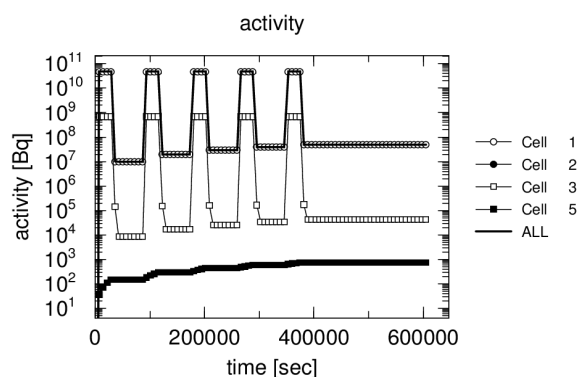


Figure 7: Neutron energy spectrum (PHITS: d 10 MeV).
[Cell 1: Be target, Cell 2: Cooling water, Cell 3: Cu jacket, Cell 5: Air]

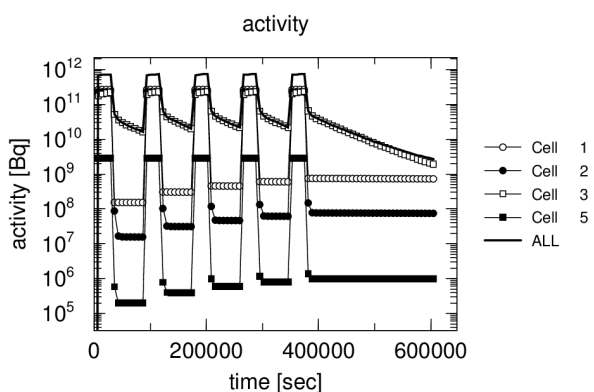


Figure 8: Neutron energy spectrum (PHITS: d 30 MeV).
[Cell 1: Be target, Cell 2: Cooling water, Cell 3: Cu jacket, Cell 5: Air]

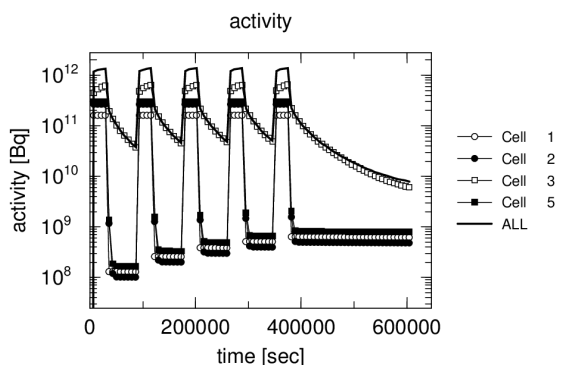


Figure 9: Neutron energy spectrum (PHITS: d 60 MeV).
[Cell 1: Be target, Cell 2: Cooling water, Cell 3: Cu jacket, Cell 5: Air]

3.3 ターゲットの放射化

Figure 7~9 にそれぞれのエネルギーでターゲット照射 ($t=4.0$ mm)を行った場合の放射化とその時間変化を示す。ターゲット照射は 8 時間照射 16 時間休止を 5 サイクル繰り返しその後 48 時間クールダウンを行うパターンとしてシミュレーションを行った。

10 MeV 照射の場合には、放射化はほとんどが Be ターゲットの寄与によるものであるが 30 MeV 照射では Be ターゲットと冷却水銅ジャケットの放射化のレベルはほぼ同一となる。60 MeV 照射の場合には、冷却水銅ジャケットの放射化が Be ターゲットを上まわり、残留放射能としては銅由来の RI が主たるものとなる。

4. 結論

4.1 エネルギー可変ターゲットの中性子発生

deuteron をエネルギー可変ターゲットに照射した場合、約 10 MeV 程度のピークエネルギーの範囲ではターゲットの厚さとともに中性子フラックスは数倍増加する。一方、keV 程度のエネルギー範囲ではターゲットの平均板厚の増加とともに中性子のフラックスは急激に増加し 1.6 mm から 4.0 mm の板厚範囲で約 10 倍、1.6 mm から 6.5 mm の場合には約 100 倍増加する。また、板厚が厚い場合には低エネルギー側に移行する際のフラックスの低下は緩やかとなる。

現状では基礎的検討に過ぎないが、ターゲットウエッジ角度や平均厚さとともに照射エネルギーを適切に選択することにより、より単色に近いあるいは白色に近い中性子スペクトル照射野の提供が可能になるものと考えられる。

4.2 ターゲットの放射化の問題

10 MeV 照射の場合には、放射化はほとんどが Be ターゲットの寄与によるものであるが 30 MeV 照射では Be ターゲットと冷却水銅ジャケットの放射化のレベルはほぼ同一となる。60 MeV 照射の場合には、冷却水銅ジャケットの放射化が Be ターゲットを上まわり、残留放射能としては銅由来の RI が主たるものとなる。

今回は基礎的検討であるため比較的低コストである無酸素銅を水冷ジャケットとして検討対象として取り上げたが、バナジウム合金等のより低放射化材料を対象とすることにより更なる放射化の低減が見込まれる。

参考文献

- [1] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013).