

負ミュオンを用いた iBNCT 中性子生成標的のベリリウム厚測定手法の検討

STUDY FOR A BERYLLIUM-THICKNESS MEASUREMENT METHOD OF THE iBNCT NEUTRON-GENERATION TARGET USING NEGATIVE MUONS

佐藤将春^{#, A)}, 栗原俊一^{A)}, 小林仁^{A)}, 杉村高志^{A)}, 内藤富士雄^{A)}, 熊田博明^{B)}, 田中進^{B)},
名倉信明^{B)}, 大場俊幸^{C)}

Masaharu Sato^{#, A)}, Toshikazu Kurihara^{A)}, Hitoshi Kobayashi^{A)}, Takashi Sugimura^{A)}, Fujio Naito^{A)},
Hiroaki Kumada^{B)}, Susumu Tanaka^{B)}, Nobuaki Nagura^{B)}, Toshiyuki Ohba^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} University of Tsukuba

^{C)} Nippon Advanced Technology Co., Ltd

Abstract

An accelerator-based BNCT (boron neutron capture therapy) has been recently studied by many activities. In BNCT, a neutron-generation target is a quite important component because an intense neutron flux more than 10^9 n/cm²/sec is required to complete a medical treatment within a certainly short time. In the Ibaraki BNCT (iBNCT) project, an accelerator is consisted of a 3-MeV RFQ and an 8-MeV DTL based on J-PARC linac techniques. As for a neutron-generation target, beryllium is adopted by the ⁹Be(p, n) reaction with the incident proton energy of 8 MeV. The target has three-layer structure fabricated by a hot isostatic pressing (HIP) method; 0.5 mm-thick beryllium which is slightly shorter than the 8-MeV proton range in the beryllium, 0.5 mm-thick palladium selected due to a durability against blistering, and 10 mm-thick copper for water cooling. The thickness of the beryllium must be well controlled because the shortage of the thickness directly reduces the yield of neutrons, meanwhile excess of the thickness results in damages by stopped protons by blistering. Despite the importance, its thickness has not been confirmed yet because it is not realistic to measure the thickness with a destructive way in term of the construction cost of the target, so that non-destructive measurement of the thickness is desirable. In this contribution, we will report a study for a feasibility of beryllium thickness measurement with negative muons in non-destructive way.

1. はじめに

ホウ素中性子捕捉療法 (Boron neutron capture therapy, BNCT) は長年、原子炉を用いた臨床研究が行われてきており、その高い治療効果が認められている。しかし原子炉を用いた治療では一般的な医療手段として普及するには法律の規制上様々な困難が生じ、その有用性にも関わらず臨床研究の域を出ていない。近年、中性子源として原子炉を用いる手法から、加速器を用いた中性子生成による手法へと移行する事により、BNCT を一般的ながん治療の一手法へと確立しようとする試みが行われ、様々な計画が国内外で進行中である。2010年に発足した、いばらき BNCT (iBNCT) 計画では、KEK、筑波大学、茨城県及び民間企業からなる産学官連携プロジェクトであり、J-PARC で実績のある RFQ 及び DTL を加速器構成として採用している[1]。マルチカスプ ECR イオン源から引き出された 50 keV の陽子は RFQ によって 3 MeV、後段の DTL によって 8 MeV まで加速されベリリウム標的に照射される。⁹Be(p, n)によって生成された高速中性子をモデレータによって熱外中性子領域まで減速の後、治療に用いる事を目的としている。現在、iBNCT 加速管は標的直前での平均電流値 1.4 mA での安定運転を実現し、治験へ向けた非臨床試験を開始すべく準備を進めている[2, 3]。

一般的に BNCT を行う際、望ましいとされている熱外

中性子束の目安として国際原子力機関(IAEA)が定めた指針[4]に 0.5 eV ~ 10 keV のエネルギー領域において 10^9 n/cm²/sec という値があり、それを生成するための大きな陽子ビーム強度が必要である。そのため、中性子生成標的は BNCT における重要な構成要素の一つであると言える。現行の様々な BNCT 計画における中性子生成標的はリチウムもしくはベリリウムに二分されるが、iBNCT 計画では、装置全体を病院内に設置する事を目指しているため、取り扱いの安全性を考慮してその安定性からベリリウムを採用している。また入射陽子エネルギーを 8 MeV と低く設定する事によって周囲への放射化の低減および必要なモデレータ・コリメータの構成をコンパクトにしているのが特徴である。

iBNCT 計画で採用した 8 MeV という低い陽子エネルギーでは ⁹Be(p, n)によって中性子を生成できるベリリウムの厚さが自ずと薄くなる。iBNCT 標的の詳細は次節で述べるが、そのような薄い膜厚を加工の難しいベリリウムで正確に製作する事は高い技術が要求され、仮に製作の過程で大幅にその厚さを失うような事があれば、生成中性子量の低減につながる。一方、iBNCT 標的の形状から製作されたベリリウム標的の厚さを実測し確認する事は難しく未だなされていない。そこで本稿では負ミュオンを使用して非破壊的に iBNCT 標的の実効的なベリリウムの厚さの測定可能性に関しての検討を行ったのでその結果に関して報告する。

[#] masaharu.sato@kek.jp

2. iBNCT 中性子生成標的

加速器ベース BNCT における重要な課題は如何に効率的に中性子を生成できる陽子エネルギー及び中性子生成標的の組み合わせを選定する事にある。前述したように、iBNCT 計画では中性子生成標的としてベリウムを採用している。Figure 1 にベリウム標的の外観写真を示す。標的は陽子ビーム入射方向に対して三層構造となっており、陽子入射側の第一層目に 0.5 mm 厚のベリウムがある[5]。 ${}^9\text{Be}(p, n)$ 反応によって中性子を生成する際、エネルギー 8 MeV で入射した陽子はベリウム内で中性子を生成しながら、エネルギー損失によりそのエネルギーを失い、上記の反応閾値以下にエネルギーが下回るとそれ以上は中性子生成に寄与しない。更に、最終的に陽子が静止した場合、ブリストリングと呼ばれる静止した陽子の物質内での水素ガス化によって標的に損傷を与えるため、陽子をベリウム層内に静止させる事は好ましくない。Figure 2 に 8 MeV 陽子のベリウム厚さと透過エネルギーの関係を示す。エネルギー 8 MeV の陽子のベリウム中での飛程はおよそ 0.54 mm である。そのため iBNCT 標的ベリウム層の厚さをその飛程よりわずかに小さくし、0.5 mm に設計している。ベリウムの下流側にはブリストリング耐性のある水素吸蔵合金の一つであるパラジウムを採用し、標的に入射した陽子はほぼすべてこのパラジウム層に静止する。パラジウム層の下流には水冷用の溝を持つ銅がある。各層は熱間等方圧加圧法(Hot Isostatic Pressing, HIP)による拡散接合によって成型されている。HIP の製作工程に関してここでは詳細に述べないが、製作後のベリウム層の厚さに関しては、三層構造の接合面が直接観測できる形状になっていないため、厚さが正しく 0.5 mm に製作されているか実測する事は出来ない。また実測可能な熱外中性子収量から逆算する事は、 ${}^9\text{Be}(p, n)$ 反応における生成断面積に不定性がある事、更にモデレータで中性子を減速させる時に中性子量が大きく変わる事から、精度の面で難しい。一方、同様の工程で実機標的を複数台製作し、その一つを破断して実測する事は標的の製作コストの観点から現実的ではない。そのため非破壊的なベリウムの厚さの測定が望ましいが、従来から行われている超音波法や X 線法などを iBNCT 標的に適用する場合、三層構造で

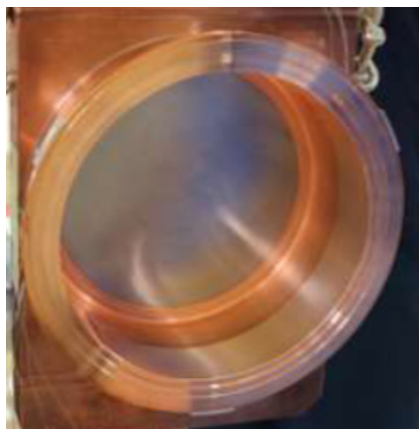


Figure 1: Photograph of three-layer neutron-generation target for the iBNCT project.

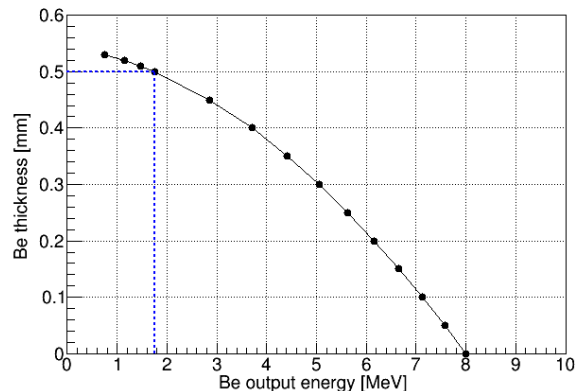


Figure 2: Correlation plot between beryllium thickness and output energy of 8 MeV proton calculated by GEANT4[6].

あることや、ベリウム厚が 0.5 mm と非常に薄いことからそれらの手法を利用して測定することは困難である。そこで J-PARC や RCNP で利用可能な負ミュオンビームを用いて非破壊的に iBNCT 標的のベリウムの厚さの測定する可能性に関して次節以降でその手法を述べる。

3. 負ミュオンを用いた標的ベリウム厚さ測定手法

3.1 負ミュオン源

本検討では負ミュオンを iBNCT 標的非破壊的な測定に利用するが、現在負ミュオンが利用できる施設は国内では J-PARC MLF ミュオン研究施設 (MUSE) や RCNP MuSIC、国外では英国ラザフォードアップルトン研究所 (RAL) やスイスポールシェラー研究所 (PSI) 等がある。負ミュオンを用いて標的厚を測定するには主に二種類の測定方法が考えられ、次節以降にその測定手法を述べる。

3.2 ミュオン原子 X 線測定

負ミュオン物質に入射した場合、そのエネルギーを失い静止する直前で近傍の原子の電子と置き換わり原子状態 (ミュオン原子) を形成する。その主量子数 n におけるエネルギー準位は $E_n = -(m_\mu e^4 Z^2) / (8\epsilon^2 h^2 n^2)$ で表される。ここで m_μ はミュオン質量、 e は電荷、 Z は原子番号、 ϵ_0 は真空の誘電率、 h はプランク定数である。ミュオン原子形成直後の初期状態の主量子数はミュオンと電子の質量の比から決定され $n \sim 14$ の高励起状態であり、軌道に捕獲されたミュオンは基底状態へと即座に脱励起し、その過程で特性 X 線を放出する。負ミュオンの質量が電子よりおよそ 200 倍重いことから、準位間の遷移エネルギーは通常の電子のそれと比べ 200 倍大きく、これによって電子による X 線分光の特性 X 線分析が難しいベリウムといった軽い核においてもミュオン原子 X 線分光は有用である。Table 1 にミュオンベリウム ($\mu\text{-Be}$) 原子及びミュオンパラジウム ($\mu\text{-Pd}$) 原子の遷移エネルギーを示す。 $\mu\text{-Be}$ 原子の基底状態に遷移する $K\alpha$ ($2p \rightarrow 1s$) X 線エネルギーは 33.4 keV であり、一方 $\mu\text{-Pd}$ 原子で近いエネルギーを持つ遷移としてブント系列 ($6h \rightarrow 5g$ 等) やハンフリース系列 ($7i \rightarrow 6h$ 等) の遷移 X 線がある。

Table 1: Transition Energies of μ -Be and μ -Pd X-rays

Element	Transition	Energy [keV]
Be	$2p - 1s$	33.4
	$3p - 1s$	39.6
Pd	$5h - 4f$	134.5
	$6h - 5g$	73.5
	$7i - 6h$	44.0

それら単色のエネルギーを持つ遷移 X 線を測定する事によって、負ミュオンを iBNCT 標的に入射した場合、ミュオン原子特性 X 線収量からミュオンがベリリウム、パラジウムどちらに静止したかの比率を知ることができる。ベリリウム内でのエネルギー損失のため、ベリリウム厚さと静止比率に相関があり、入射運動量を変えて静止比率を調べる事でベリリウムの厚さを推定できる。Figure 3 は負ミュオンビームの運動量分布を標準偏差 3%の正規分布と仮定し、異なる運動量で iBNCT 標的に打ち込んだ場合のミュオン静止分布を GEANT4 でシミュレーションを行った結果である。横軸がビーム軸方向のミュオン静止分布であり、原点はベリリウム表面にとってあり、0.5 mm の位置がベリリウムとパラジウムの境界面に相当する。分布が境界面で不連続になるのはベリリウムとパラジウムの密度が各々 1.85 g/cm³ と 12.03 g/cm³ と大きく異なる為である。ミュオン運動量を適切に選べば中心運動量を $\pm 5\%$ 程度変える事で静止比率をベリリウムパラジウム境界面で大きく変える事ができる事が分かる。一方静止ミュオン当たりの特性 X 線の放出確率は核種、遷移により固有の値がありそれらすべてが正確に測定されている訳ではない。X 線収量から静止ミュオン数の分布に正確に導出するにはそれらの詳細な値が必要となるが、利用可能な文献値は限られている。その為、遷移の静止ミュオン当たりの収量を実測するか、厚さが既知のベリリウムとパラジウムを合わせた参照となるべき試料を用いて X 線収量を実測し、それと比較するなどが正確な厚さの導出には必要となる。次に大まかな X 線収量とシグナル・ノイズ比の見積もりを行う。J-PARC の繰り返し 25 Hz のパルスミュオン源を想定した場合、25 MeV/c 付近での負ミュオン強度をおよそ 1×10^6 /MW とし、RCS500 kW 運転かつ運動量分散を向上させるためスリットを狭めた場合のミュオン強度が $\sim 1/100$ となった場合、 5×10^3 /s 程度のミュオン強度となりパルス当たり 200/pulse となる[7]。一方、ゲルマニウム検出器のアンプのシェーピング時間から 1 パルスあたり 1 カウントしか取れない事が X 線のカウントレートを制限するが、10 分間の測定でも 15000 カウントになる。これには白色ノイズなども含まれるが、 μ -Be 原子 X 線 ($2p \rightarrow 1s$) 及び μ -Pd 原子 X 線 ($6h \rightarrow 5g$) の検出器エネルギー分解能を 0.8 %, 0.5 % (FWHM) と仮定し、これらが全体のカウントに対し 1 % 程度、残りを全て 500 keV 以下の白色ノイズと仮定する。その場合の Fig. 3 の各運動量でのシグナル・ノイズ(S/N)比を Fig. 3 の差込図で示す。静止する割合が小さいと当然ピークは観測できないが、およそ半分が各層に静止した場合にどちらも

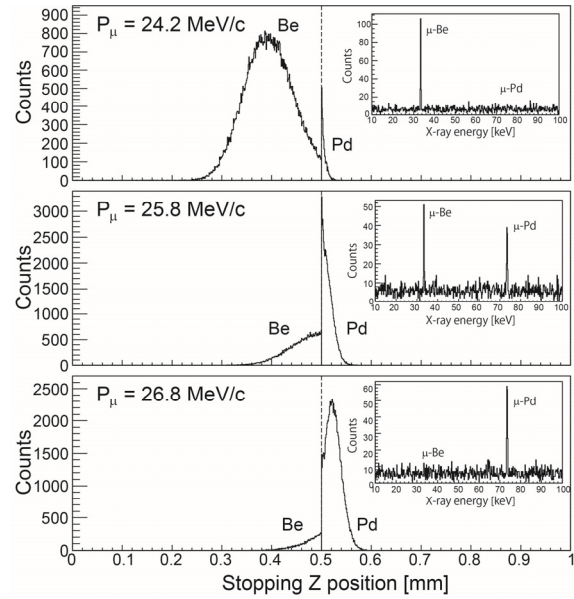


Figure 3: Stopping distribution of negative muons inside the iBNCT target with different momenta by GEANT4 simulation. The origin of abscissa is defined as the surface of the beryllium layer, so 0.5 mm indicates the boundary of the beryllium and palladium layers. Inset figures are Monte-Carlo simulation for X-ray signal-to-noise ratio.

十分な S/N 比でピーク同定できる。実際の S/N 比は実測でしか確かめられないが、10 分程度の測定を運動量を変えて収量を確認することでおおまかなベリリウム厚さを推定することが出来、X 線測定によるベリリウム厚さ測定は有限なビームタイムで実行可能と思われる。

3.3 ミュオン崩壊電子時間測定

前述とは別の手法としてミュオン崩壊によって生じる電子の時間測定に関しても本節で検討する。ミュオンが静止した後、前述の通り原子状態を形成・脱励起した後、負ミュオンは基底状態に遷移する。基底状態に到達した負ミュオンは二つの競合過程が存在し、ひとつは原子軌道上での崩壊 ($\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$) であり、真空中での崩壊 (寿命 2.172 μ s) に原子軌道上での補正因子 (Hoff factor) を考慮した寿命により崩壊する。それに加え、原子核による吸収過程 (μ 捕獲、 $\mu^- + p \rightarrow \nu_\mu + n$) があり、この捕獲反応は Z^4 の依存性があり、ミュオン水素原子等軽い核ではほとんど起こらない一方、重い元素では反応率は飛躍的に増大し、崩壊に比べ桁以上に大きい反応率で起こる。Table 2 にベリリウム、パラジウムとともに典型的な元素における原子核捕獲率及び基底状態での負ミュオンの寿命を示す。ベリリウムの場合、原子核捕獲率は非常に小さくほぼ真空中の寿命と同程度とみなせる一方、パラジウムの場合には原子核捕獲率が高いため、基底状態のミュオンは捕獲反応によって消失し見かけ上の寿命が 96 ns とベリリウムに比べおよそ 1/23 倍に短くなる。iBNCT 標的では軽い核と比較的重い核であるベリリウムとパラジウムの特殊な構造であるため、この寿命の違いをベリリウムの厚さの導出に利用する。

Table 2: Total capture rate and mean lifetime of negative muons in representative materials taken from [8, 9] and references therein.

Element	Capture rate[/s]	Mean lifetime [ns]
H	0.450×10^3	2197
Be	6.1×10^3	2168
C	37.9×10^3	2028
Al	705×10^3	864
Pd	10.0×10^6	96

特性 X 線の場合と同様に、ミュオン運動量を変える事によってベリリウムとパラジウムに止まる静止比率を変える事ができる。ミュオン崩壊からの電子の時間スペクトルを測定し、その崩壊曲線は、ベリリウム、パラジウムの崩壊定数の違いにより二つ成分を持つ。Figure 4 に Fig. 2 で示した 3 つの運動量条件における崩壊電子時間スペクトルを示す。運動量の違いによって大きく異なる事が分かる。ベリリウムに静止した割合は 1 マイクロ秒以降など、遅い時間成分をフィッティングすればその静止数を見積もる事ができる。崩壊電子の測定は一般的に粒子検出で使用されるプラスチックシンチレーターと光電子増倍管 (PMT) を組み合わせた手法が考えられ、プラスチックシンチレーターの時間分解能はおおよそ 1 ナノ秒である事からパルスミュオン源を用いて測定する場合に、マルチヒット TDC を使用すれば、1 パルス当たり複数事象を取得する事ができる。Figure 4 の統計は検出器のアクセプタンスを 8 % とし、測定時間を 10 分としたもので、十分に測定可能であると考えられる。

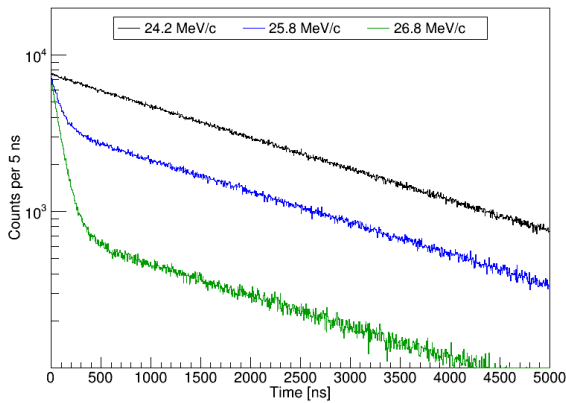


Figure 4: Simulated timing spectra of decay electrons with different muon momenta.

4. 負ミュオンビームを用いた検証

4.1 J-PARC MLF MUSE D2 エリアにおける測定

本検討の検証に際し J-PARC ミュオン研究施設 MUSE 三宅康弘教授に iBNCT 標的のモックアップを用いて X 線測定の機会を頂けた。ミュオンビームライングループの

方々の協力の下 MUSE D2 ラインに於いてミュオングループ所有の低エネルギーゲルマニウム検出器 (MIRION Technology, Inc., GL0110) により iBNCT 標的のモックアップをビームフォーカルプレーンに設置しオンラインで X 線スペクトルを確認しながらミュオン運動量を変えて測定を行った。Figure 5 に GL0110 にて得られたエネルギースペクトルを示す。図中、上下各々が運動量 23.7 MeV/c 及び、25.5 MeV/c の場合であり、ミュオン運動量の違いにより μ -Be 原子ライマン系列 (K_{α} , K_{β}) X 線及び μ -Pd 原子の (7i-6h)、(6h-5g) 遷移等の特性 X 線の観測数が増えている事が分かる。以下でミュオン運動量を変えて得られた X 線観測数からベリリウム厚さを導出する。まずゲルマニウム検出器の検出効率のエネルギー依存性を考慮する必要があるが、今回使用した GL0110

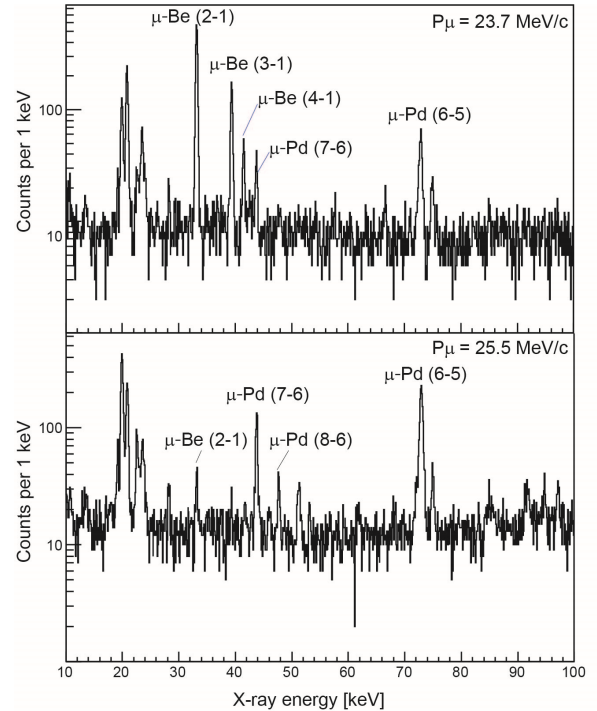


Figure 5: Typical energy spectra with negative muon momenta of 23.7 MeV/c (top) and 25.5 MeV/c (bottom), respectively. The ratio of the muonic-beryllium and -palladium X-rays drastically changes with respect to muon momentum.

では X 線エネルギー 20-100 keV の領域ではほぼ一定 [10] であるため、 μ -Be 原子の 33.4 keV と μ -Pd 原子の 73.5 keV の検出効率のエネルギー依存性は無視できる。幾何学的なアクセプタンスを含めた検出効率を ϵ 、静止ミュオン当たりの X 線放出確率を $\eta_{\mu Be}$ 、 $\eta_{\mu Pd}$ 、標的入射ミュオン数 N_{μ} 、それがベリリウム層中に静止する割合を R とすれば、 μ -Be 原子及び μ -Pd 原子 X 線収量 ($N_{\mu Be}$, $N_{\mu Pd}$) は各々 $N_{\mu Be} = N_{\mu} \cdot R \cdot \epsilon \cdot \eta_{\mu Be}$ 、 $N_{\mu Pd} = N_{\mu} \cdot (1 - R) \cdot \epsilon \cdot \eta_{\mu Pd}$ で表される。X 線放出確率の比率を $r_X = \eta_{\mu Be} / \eta_{\mu Pd}$ と定義すると、ベリリウム層中の静止割合は $R = N_{\mu Be} / (N_{\mu Be} + N_{\mu Pd} r_X)$ となる。今回の測定結果から導出した R を Fig. 6 に示す。図中、丸のプロットが X 線強度比 r_X を 1 と仮定した場合の結果である。誤差棒は各々 $r_X = 0.5, 2$ とした場合の値の変化量を示している。更に

ベリリウム厚さの導出の為 GEANT4 シミュレーションを行った。入射ミュオンの運動量分布を標準偏差 3% の正規分布と仮定し、ミュオンビームが標的までに通過する物質質量としてビームライン窓材に使用されているカプトン 50 μm 及びヘリウムバッグ中の 1 気圧ヘリウム 10 cm を考慮した。Figure 6 中の点線が各々ベリリウム層の厚さを 0.5, 0.4, 0.3, 0.2 mm と変えて行ったシミュレーション結果である。今回のモックアップ標的を用いた測定ではプレリミナリーな結果ではあるが、ベリリウム厚さは 0.4 mm に近い結果が得られた。この結果が HIP による製作の精度によるのか、あるいはミュオン運動量の絶対値の精度を含めた測定による系統誤差に起因するのかが現在精査中である。

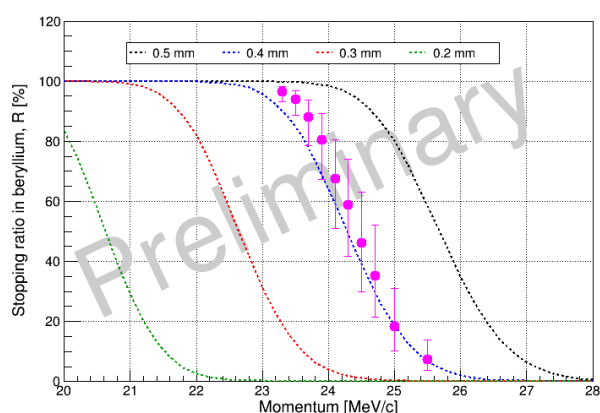


Figure 6: Preliminary result of the muon stopping ratio inside the beryllium layer assuming same X-ray emission probabilities for $\mu\text{-Be}$ ($2p\text{-}1s$) and $\mu\text{-Pd}$ ($6h\text{-}5g$) X-rays. Error bars show the deviation of the results with different X-ray emission probability of $\mu\text{-Be}:\mu\text{-Pd} = 2:1$ and $1:2$, respectively. Dotted lines represent GEANT4 simulation results with different beryllium thickness.

最後にベリリウム厚さが 0.4 mm の場合と 0.5 mm の場合で中性子収量を比較する。通常の原子核反応の場合、標的の出入口での反応生成断面積が一定という近似の元で反応による生成量は標的厚さに比例するが、iBNCT 標的の場合、前述の通り入射陽子のエネルギーが低く、標的中でのエネルギー損失が生成量に大きく寄与しその計算は単純ではない。0.4 mm 厚のベリリウムを透過した場合その透過後のエネルギーは Fig. 2 からおよそ 3.7 MeV である。過去に厚いベリリウム標的に陽子を入射した際の中性子生成量の導出した文献[11]によれば、3.7 MeV 程度のエネルギーの陽子が入射した場合、中性子生成率はおよそ 7×10^{-5} /proton 程度である。厚さが 0.4 mm の場合この分の中性子が生成されない事になるが、一方 8 MeV で 0.5 mm 厚に入射した場合は 2×10^{-3} /proton になり、0.4 mm 厚であった場合の生成量は 0.5 mm 厚であった場合の 3-4 % 程度の減少に過ぎない。そのため仮に今回の測定の結果が示す通り厚さが 0.4 mm 厚であった場合としても中性子生成量はほとんど変わらず同程度であるとみなす事が出来、iBNCT 中性子生成標的として性能上の問題はないと考える。

5. まとめ

iBNCT 計画では RFQ 及び DTL の加速管構成により 8 MeV まで陽子を加速しベリリウム標的を用いた ${}^9\text{Be}(p, n)$ によって中性子を生成することで加速器ベースの BNCT の実現を目指している。中性子生成標的としてベリリウムを採用し、プリスタリング、冷却を考慮し、パラジウム、銅かならなる三層構造をしており HIP による拡散接合により製作している。接合後のベリリウム層の厚さは標的製作後確認されていなかったが、本研究によりその実測可能性を検討し、負ミュオンを用いて非破壊に検証できる事がわかった。また、J-PARC MUSE D2 にて X 線測定により iBNCT 標的モックアップを用いて厚さ測定を行った。プレリミナリーな結果では厚さは 0.4 mm 程度である。これが製作精度によるものなのか測定精度によるもののかは今後精査していくが iBNCT 計画遂行の上で中性子生成量に問題は無い。

謝辞

J-PARC MLF ミュオン D2 のおける測定に際し、KEK ミュオン科学研究系三宅康博教授、竹下聡史博士、反保元伸博士、大阪大学二宮和彦博士に実験準備から測定にわたり、多大なるご尽力を頂きました。この場をお借りしてお礼申し上げます。また、本研究の検討を進めるにあたり理化学研究所の石田勝彦博士、神田聡太郎博士、Ma Yue 博士に貴重な議論をさせて頂きました事をお礼申し上げます。

参考文献

- [1] H. Kumada *et al.*, “Project for the development of the linac based BNCT facility in University of Tsukuba”, Applied Radiation and Isotopes, 88, pp. 211-215, 2014.
- [2] M. Sato *et al.*, “iBNCT 加速器の現状報告”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society Japan, Nagaoka, Aug. 1-3, 2018, pp. 1350-1354.
- [3] T. Sugimura *et al.*, “iBNCT 加速器の現状報告 2019”, in these proceedings.
- [4] IAEA TEC-DOC-1223, “Current status of neutron capture therapy”.
- [5] H. Kumada *et al.*, “Development of beryllium-based neutron target system with three-layer structure for accelerator-based neutron source for boron neutron capture therapy”, Applied Radiation and Isotopes, 106 (2015) pp. 78-83.
- [6] GEANT4 Collaboration (S. Agostinelli *et al.*), “GEANT4: A Simulation toolkit” Nucl. Instrum. Meth. A506 (2003) pp. 250-303; <https://geant4.web.cern.ch>
- [7] M. Tampo *et al.*, “Beam Commissioning of D-line After Replacing Superconducting Solenoid”, KEK-MSL report, 2016, pp. 9, and Y. Miyake, private communication.
- [8] T. Suzuki *et al.*, “Total nuclear capture rates for negative muons”, Physical Review C35 (1987) pp. 2212-2224.
- [9] D.F. Measday *et al.*, “The nuclear physics of muon capture”, Physics Report 354 (2001) pp. 243-409.
- [10] MIRION Technologies, Inc., germanium detector GL0110; <https://www.mirion.com/products/germanium-detectors>
- [11] Gerald J. Hine and Gordon L. Brownell, “Radiation dosimetry”, Academic Press, 1956.