

新博士誕生

私の学位論文と院生生活雑感

日本原子力研究開発機構

J-PARC センター

杉原 健太

sugihara.kenta10@jaea.go.jp

1. はじめに

2022年3月に九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻の博士後期課程を修了し、博士(工学)の学位を取得しました。今回は新博士誕生ということで、私の学位論文や院生生活を紹介する機会を頂いたので、大学院での研究内容や生活について書かせていただきます。

2. 研究生活

私は学部から修士課程を通して九州大学伊都キャンパスに常駐していました。伊都キャンパスは博多駅からバスで約1時間程度かかる田舎で、生活に不便なところが多々ありました。もちろん、少しずつ発展中で現在は当時と比べて暮らしやすくなっていると思います。私が研究室に配属された2016年では、石橋健二教授、前畑京介准教授、伊豫本直子准教授、執行信寛助教らの下で、ニュートリノ計測、シミュレーションを用いた細胞領域の線量評価、 γ 線・X線を優れたエネルギー分解能で測定するための極低温動作型検出器の開発、原子核反応からの生成中性子数の測定、などの研究が行われていました。現在は、石橋教授が退官され、前畑准教授が他大学への栄転となり、渡辺賢一教授が加わり、新たにホウ素中性子捕捉療法のための検出器開発・中性子測定が行われています。

私は執行信寛助教の下で、学部から修士課程を通して原子核反応からの生成中性子数の測定の研究をしていました。実験は、理化学研究所RIビームファクトリーで行っていました。大学4年では、1ヶ月以上の期間をかけて準備をした結果、不幸にも実験前日に加速器の故障により実験が中止になりました。その連絡を受けた時に、非常にガッカリしたのを今でも覚えています。幸運にもこの時流れた実験は、修士1年の6月に行うことができましたが、一番最初に加速器施設での実験の厳しさを理解することができたのは非常によい経験でした。マシンタイムは12時間とそれほど長いわけではなかったのですが、初めての実験で右も左もよくわかっていない中、非常に疲れたのを今でも覚えています。この実験以外にも48時

間や72時間のマシンタイムで実験をしたのですが、一番疲れたのは一番最初の実験でした。大学の研究室では、主に実験データの解析や実験データと比較するシミュレーション計算をしていました。解析に必要なプログラムの作成などを含めてデスクワークが主でした。

博士後期課程においては、理化学研究所の大学院生リサーチ・アソシエイトに採用していただき、理化学研究所和光地区の仁科加速器科学研究センター安全業務室に所属していました。安全業務室は、仁科加速器科学研究センター・RI ビームファクトリーの放射線管理を担っている部署です。業務については、安全業務室室長田中鐘信博士と相談をし、放射線管理の中でも研究成果になる、生成中性子の線源項測定を通した高精度な加速器施設の遮蔽設計に主に従事することになりました。原子力規制委員会からの使用許可獲得のための管理区域境界での放射線線量率の計算や、世界最大強度の新ビームラインの遮蔽設計に携わりました。また私に余裕がある時でしたが、RI ビームファクトリーのインターロック検査などの放射線管理業務にも従事しました。RI ビームファクトリーは管理区域が非常に広く、加速器運転時の作業者の安全を担保するために、加速器の運転前に非常に大きなアラームが鳴ります。そのアラームを音源近くで一日中聞き続けるので、家に帰った後もアラームが耳の中で鳴り続けていたことを、他の加速器施設のアラームを聞くと今でも思い出します。安全業務室以外にも、理研小型中性子源での、放射化法・中性子線量計を用いた生成中性子数測定、コリメータ作成という研究にも従事させていただきました。

和光市での生活についてですが、和光市はベッドタウンで公共交通機関も発達しており、暮らしやすかったです。加えて、池袋まで電車で約20分と遊びに行くのも容易です。残念なことに、私の博士後期課程2年時からCOVID-19による影響を受けて東京の方に遊びに行くことは全くなかったのですが…。行きたかったところに行けていないのもったいないことをしたな、と今でも後悔しています。

とはいえ、九大・理研と複数の大学・研究所に在籍させていただき、様々な先生・研究者の方々と共に研究をしたのは非常に良い経験だったと思います。

3. 研究結果

研究テーマは、加速器からの荷電粒子をターゲットに照射して、原子核反応で発生する中性子数の測定を通した高精度な遮蔽設計についてです。実測したデータをもとに、仁科センターで建設予定のアスタチン製造用の世界最大強度の新ビームラインの高精度な遮蔽設計を行いました。加えて、中性子を用いたインフラの非破壊検査技術開発を目指している理研小型中性子源(RANS-II[1])における放射化法・中性子線量計を用いた中性子生成量の測定や遮蔽設計を行いました。

遮蔽設計の概念図を図1に示します。近年、計算機の性能向上に伴って、PHITS[2]などのシミュレーション計算を用いて遮蔽設計が行われています。この際に、最も重要となるのが図1における中性子発生の部分です。中性子発生は理論に基づいた原子核反応モデルで計算されるのですが、計算モデルは種々のエネルギーや入射粒子・ターゲットの全ての組み合わせに対して、現実を再現しているかどうかはわかりません。そのため、実験データとの比較によるベンチマークを取得する必要があります。もし実験データがなければ、放射線管理区域内の作業者や近隣住民の法定量を超える被ばくを防ぐために、安全係数の過剰見積もりが

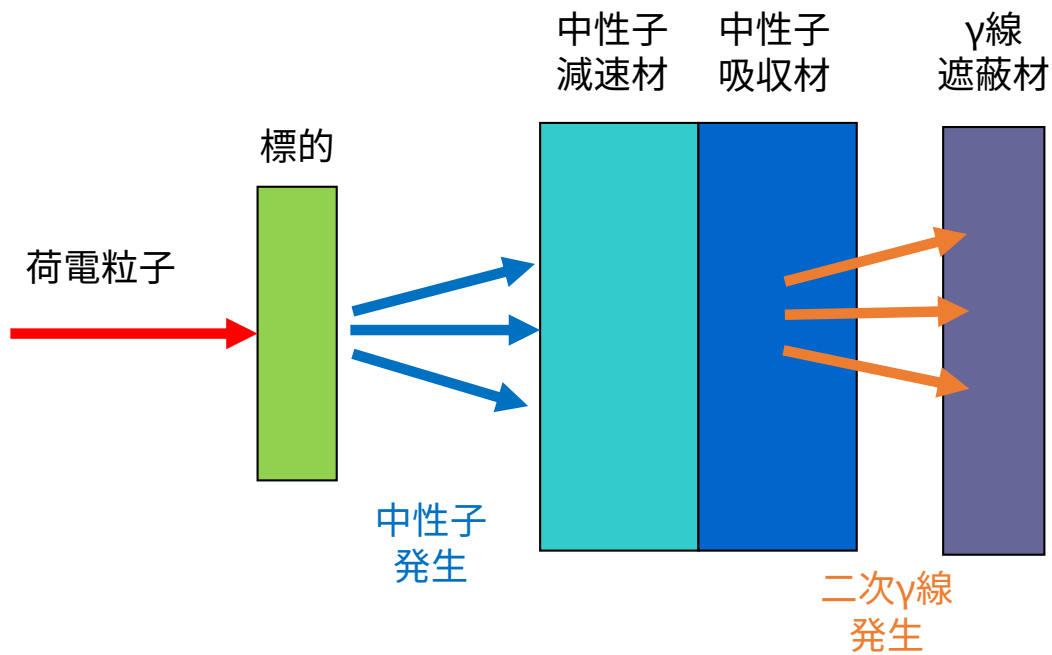


図 1 遮蔽設計の概念図

必要で、過剰な遮蔽体のサイズとなり、コスト面からも好ましくありません。そのため、ベンチマーク取得のための実験を行うことが非常に重要です。

ここでは、アスタチン製造ビームラインに関する研究について代表して紹介させていただきます。RI 内用療法のための α 線放出核種として ^{211}At に注目が集まっています。理研では 7.2 MeV/u α イオンを ^{209}Bi ターゲットに照射して、 $^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$ 反応によりアスタチンを作るための新ビームラインの建設が計画されています。原子核反応モデルはもともと数百 MeV/u の入射エネルギーの原子核反応を模擬するために作られたものなので、入射エネルギーが 7.2 MeV/u と低い、アスタチン製造ビームラインの遮蔽設計に利用可能か疑問がありました。そこで、過去の実測例も存在していなかったため、理研仁科センターの AVF サイクロトロンで我々のグループで測定しました [3]。我々の実験データと PHITS に組み込まれている核内カスケードモデル (INCL[4]) と量子分子動力学 (JQMD[5]) を用いた 2 つの計算結果との比較を図 2 に示します。赤色の三角が実験データ、青色の実線が INCL、黒の点線が JQMD の計算結果を示しています。この図から、図 1 における「中性子発生」をより再現しているのは INCL 結果だとわかりました。INCL モデルが実験結果を約 30% 過小評価していることになるのですが、最初にしたように、低エネルギー領域でのシミュレーションの予測精度は低く、これだけの良い精度で実験データを再現できるのか、と驚いたのが素直な感想です。これは INCL モデルが低エネルギー入射条件でも使用可能になるような改良を加えているからで、核反応モデルの考察に関しても学位論文には含めています。

次に、新ビームラインの遮蔽設計についてです。アスタチン製造ビームラインの遮蔽設計では、遮蔽材設置位置の耐荷重とスペースの狭さが問題になりました。図 2 に示すように、計画している核反応では最大で約 15 MeV の中性子が放出されるので、まずは鉄との非弾性散乱を用いて中性子を減速します。そして、約 10 MeV 以下になれば、水素配合物質である

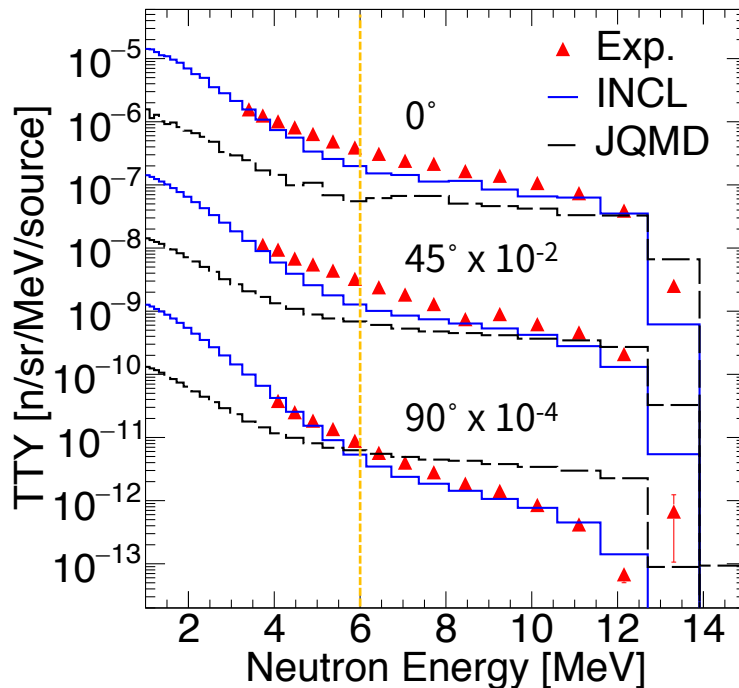


図 2.7.2 MeV/u α イオンと ^{209}Bi ターゲットの反応による生成中性子数の比較

ポリエチレンを用いて中性子を熱領域まで減速・吸収させます。この際、遮蔽材（水素と鉄）と中性子との反応で二次 γ 線が発生します。 γ 線は、原子番号の大きな元素で遮蔽するので鉛を用います。しかし、 γ 線線量率を管理区域境界における法令値まで下げようとする、鉛の量が多くなりすぎて、耐荷重を満たさなくなりました。そのため、遮蔽材の構成を見直す必要が出てきて、ホウ素を用いて水素・鉄との反応で発生する高エネルギー γ 線を減らすことを計画しました。それにより、 γ 線の発生量を抑えることができ、かつ少ない鉛の量でも γ 線線量率を十分に下げることが可能になり、法令値を満たすことができました。最終的には、図3のような体系になりました。図3では、y軸が高さ方向に相当しています。入射 α ビームはマグネットで 90° 方向に曲げられ、上から下に打ち下ろすような形で ^{209}Bi と衝突します。発生した高エネルギー中性子を鉄で減速させて、その後、ホウ素配合ポリエチレンや普通のポリエチレンを用いて中性子を減速・吸収し、また鉛で γ 線線量率を下げています。

4. おわりに

最後になりましたが、学位論文をまとめるにあたって研究から論文の推敲にわたってお世話になった九大執行信寛助教、九大渡辺賢一教授、理研田中鐘信博士、理研池田裕二郎博士をはじめ、大学の先生方、理研の研究者の方々に深く感謝いたします。

学位論文を通して携わった研究を、今後の研究のみならず放射線管理業務に活かしたいと思います。

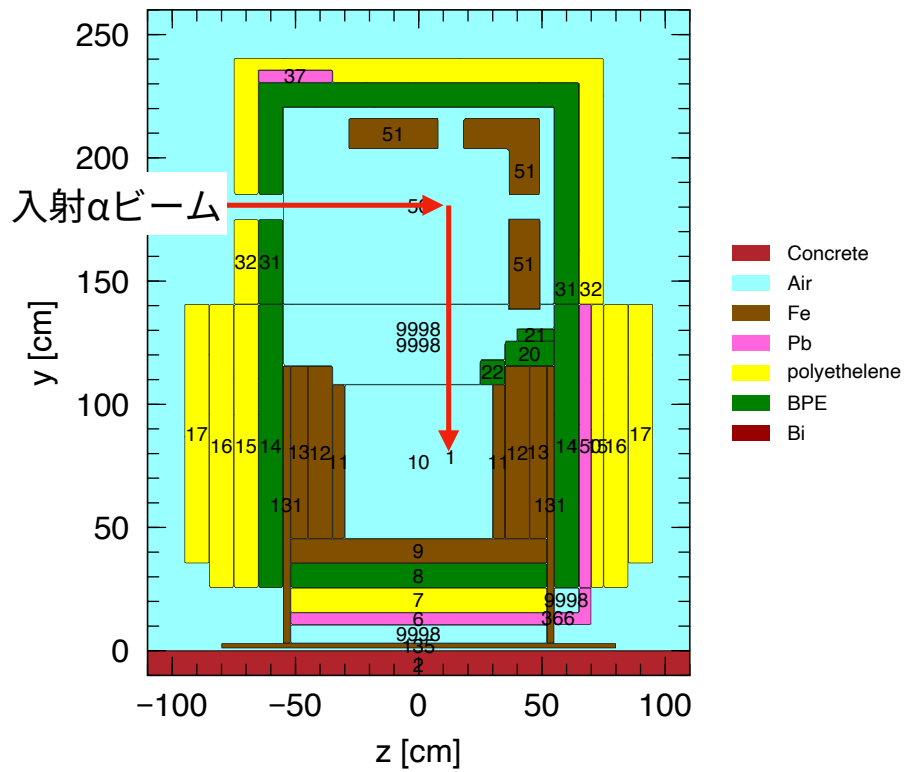


図3 アスタチン製造ビームラインの遮蔽材体系

参考文献

- [1] T. Kobayashi *et al.*: Nucl. Instr. Meth., A994 (2021) pp. 1-6.
- [2] T. Sato, *et al.*: J. Nucl. Sci. Technol., 55 (2018), 684.
- [3] K. Sugihara, *et al.*, Nucl. Instr. Meth., A470 (2020) pp. 15-20.
- [4] A. Boudard, *et al.*: Phys. Rev., C87 (2013), 014606.
- [5] K. Niita, *et al.*: Phys. Rev., C52 (1995) 2620.