

「新博士誕生」私の学位論文と院生生活雑感

North Carolina State Univ. (元九大)

Postdoctoral Researcher, Nuclear Reactor Program

Department of Nuclear Engineering

李 恩智

elee23@ncsu.edu

1. はじめに

私は、2014年4月より九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻に所属し、2019年9月に工学博士学位を取得しました。現在は、ポスドク研究員として North Carolina State 大学に勤務しています。

学部時代より研究者になることを目指し、深く学びたいと考え、大強度・高エネルギー加速器研究の先進国である日本の大学へ進学する事を決断しました。この5年半の留学で、知見が広がり、私の夢に一步近づいたと思います。石橋研究室(2014~2016年)や前畑研究室(2016~2019年)に所属していた5年半は研究や実験のみならず、日本での楽しい日常生活の経験をすることが出来ました。

今回は、熱心に取り組んだ研究や院生生活などをまとめるとともに、アメリカの暮らしを含めて現在の研究活動の概要を紹介してみたいと思います。まず最初に、1. 博士学位論文のトピックについてお話したいと思います。博論は、放射線物理計測の立場から高エネルギー中性子の安全利用を確保する研究の一環として、高エネルギー中性子の遮蔽設計および評価の高度化を目指しました。過去に発表された関連論文の調査を行い、解決すべき問題を抽出するとともに、遮蔽体中の中性子の挙動を再現するための放射線解析シミュレーションの精度検証向上に関する研究成果を取り纏めたものです。続いて、2. 院生生活の中で感じた「あれこれ」を述べます。最後には、3. 現在の研究活動の概要と4. 終わりを記したいと思います。

2. 博士学位論文のトピック

2.1 高エネルギー加速器の遮蔽設計のためのコンクリートと鋼鉄の中性子減衰に関する研究

高エネルギー放射線照射場では異なるエネルギーの様々な種類の放射線が存在する。特に、高エネルギーの非荷電粒子 ($E > 20 \text{ MeV}$ の中性子) は遮蔽体を通過しやすいため [1]、中性

子の遮蔽設計及び線量評価が重要である。高エネルギー加速器施設の安全設計のためには、ビームの衝突点付近で核反応によって生成された高エネルギー中性子のエネルギースペクトルや全中性子発生量のデータが必須となる。世界では既に、放射線の生成、相互作用の物理モデルと粒子輸送を扱うための様々なシミュレーションが使用されている。しかし、シミュレーションによって中性子発生量や放射線量が異なるためにシミュレーションの予測精度検証が必要である。GeV を超えるエネルギー領域での高エネルギー粒子ビームとの核反応で生成される数十 MeV 以上の中性子エネルギースペクトルの利用可能なデータは非常に少なく、エネルギーが高くなるほどシミュレーションの精度が下がり、例えば遮蔽体厚さの評価の誤差が増加する傾向にある。[2] これにできるだけ近いエネルギー領域の粒子ビームを用いて実験値を収集し、計算シミュレーションの検証を行っていく必要がある。

スイスの欧州原子核研究機構 (CERN) の CERN High energy AcceleRator Mixed field facility (CHARM) 施設は、24 GeV/c 陽子と固体標的を用いて高エネルギー混合放射線場を形成し、放射線防護に関する研究及び機器の放射線耐性などを評価する施設である。ビームラインと遮蔽構造が比較的単純で、遮蔽ブロックの厚さによってエネルギーと強度分布を調節が出来るため、様々な条件での高エネルギー中性子の遮蔽や迷路における中性子エネルギースペクトルが得られる。本研究では、有機液体シンチレータ NE213 のアンフォールディング法で解析して中性子エネルギースペクトル計測法と大規模遮蔽実験体系に置ける中性子輸送シミュレーション手法を構築し、コンクリートと鋼鉄を通過した中性子のエネルギースペクトルと減衰長の実験値を整備した。これらの実験値は、高エネルギー加速器施設における放射線安全設計に関する基礎データとして、加速器施設の放射線安全設計や長寿命放射性廃棄物の低減化技術開発に利用される粒子輸送シミュレーションの精度評価に用いられる。更に、二次粒子生成核モデルの精度検証にも重要な役割を果たせる。

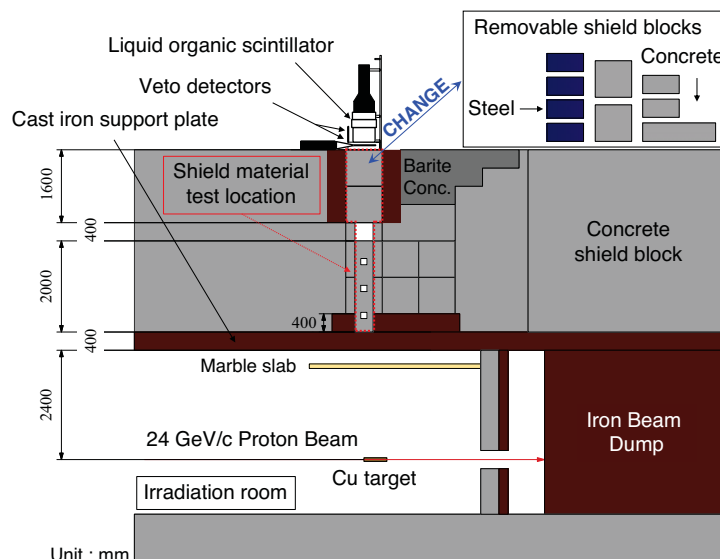


図 1 CHARM ビームラインの縦断面図

図 1 に本研究で実施するビームラインの縦断面図を示す。CERN の East Hall にある CHARM ビームラインで数回の予備実験を行い、データの取得のためのビーム条件、遮蔽の変更など

を行い、実験環境を整えた。加速器からの 24 GeV/c の陽子ビームが図左より入射し、照射室内の ϕ 8 cm、50 cm 長の銅ターゲットを照射する。ターゲットでの核反応により生成した二次粒子、特に中性子は照射室内に放出され、エネルギーの高いものは周辺のコンクリートを透過する。ターゲットの上部は 10 cm の大理石、40 cm の鋼製の板があり、その上は箔放射化実験用コンクリートブロック、透過実験用コンクリート・鋼鉄ブロックになっている。これらのブロックはクレーンで容易に移動できるようになっており、内部に設置した放射化試料を短時間で取り出し測定に供することができた。透過実験では、ターゲット上部 6.8 m 位置に有機液体シンチレータ NE213 を設置し、透過実験用のコンクリートと鋼鉄を入れ替え、鉄 40 cm 厚みに加え、コンクリート 0 cm から 360 cm (※ 80 cm は 2 つのケースで測定を行った)、鋼鉄 0 cm から 80 cm の厚さまでの測定を行った。銅ターゲットで生成された中性子をビーム軸から 90 度上方向において、ターゲットから直接到達する中性子を測定するとともに、部分的にコンクリートブロックを入れて、透過厚さごとの中性子のエネルギースペクトルを eV から GeV までの範囲で測定した。これらの測定値をアンフォールディング法による中性子のエネルギースペクトルを得られた。

図 2 に測定で得られた中性子のエネルギースペクトルの実験値と計算値の比較結果を示す。図を見ると厚みにより中性子の量が減っていることと、スペクトルの形状が変化していることがよくわかる。図中の線は参考のための簡易体系でのシミュレーションの結果であるが、実験の傾向は再現しているものの差異が見られることがわかる。このことからシミュレーションを改善する必要があることがわかる。

この実験データは、高エネルギー中性子の物質内での挙動を記述し、その影響を評価するための基盤データとなりうるもので、放射線工学上有用である。今後の放射線防護と遮蔽の分野にとって意義があり、電力、エネルギー関係分野への波及効果が大きく期待される。

3. 院生生活雑感

院生生活の話をいたしますとまず最初にこれまでお世話になった多くの先生方、研究室の先輩・後輩の皆様へ深く感謝いたします。時には辛い研究生活を最後までやり遂げることが出来たのは、皆様のおかげです。

この 5 年半を振り返ると、本当に色々な経験をすることが出来た。研究生、TA・RA、学会活動、研究活動、飲み会とそれぞれ内容は異なるが、取り組んでいる際は大変だった分、充実した期間でした。どれも私なりに手を抜くことなく全力で取り組んだという気持ちはある。

研究室に配属になった院生として一番印象に残ったことは、わからないことは周りの人に聞き、周りの人も答えることで考えが整理されていくことである。お互いに良く響き合うことが可能であることを実感できた。うちの研究室では、通常週 3 回 (2 回のスポレーショングループのゼミと 1 回の研究室全員のゼミ) のゼミを通じ、実験結果の物理現象の解析は勿論、過去に発表された関連論文の調査を行い、新たなアイデアを産み出すことが出来た。

思い出の中で特筆すべきことに、世界の様々な人と研究経験を共有するためイタリアの国際核データスクールに参加し、ポスター発表をしたことがある。この研究集会の発表は一つの会場で行われ、多数の研究者と学生の前で発表できるチャンスであった。初国際集会を行えたのは嬉しいことではあったが、負担も大きく感じられた。この負担を乗り越え、無事に

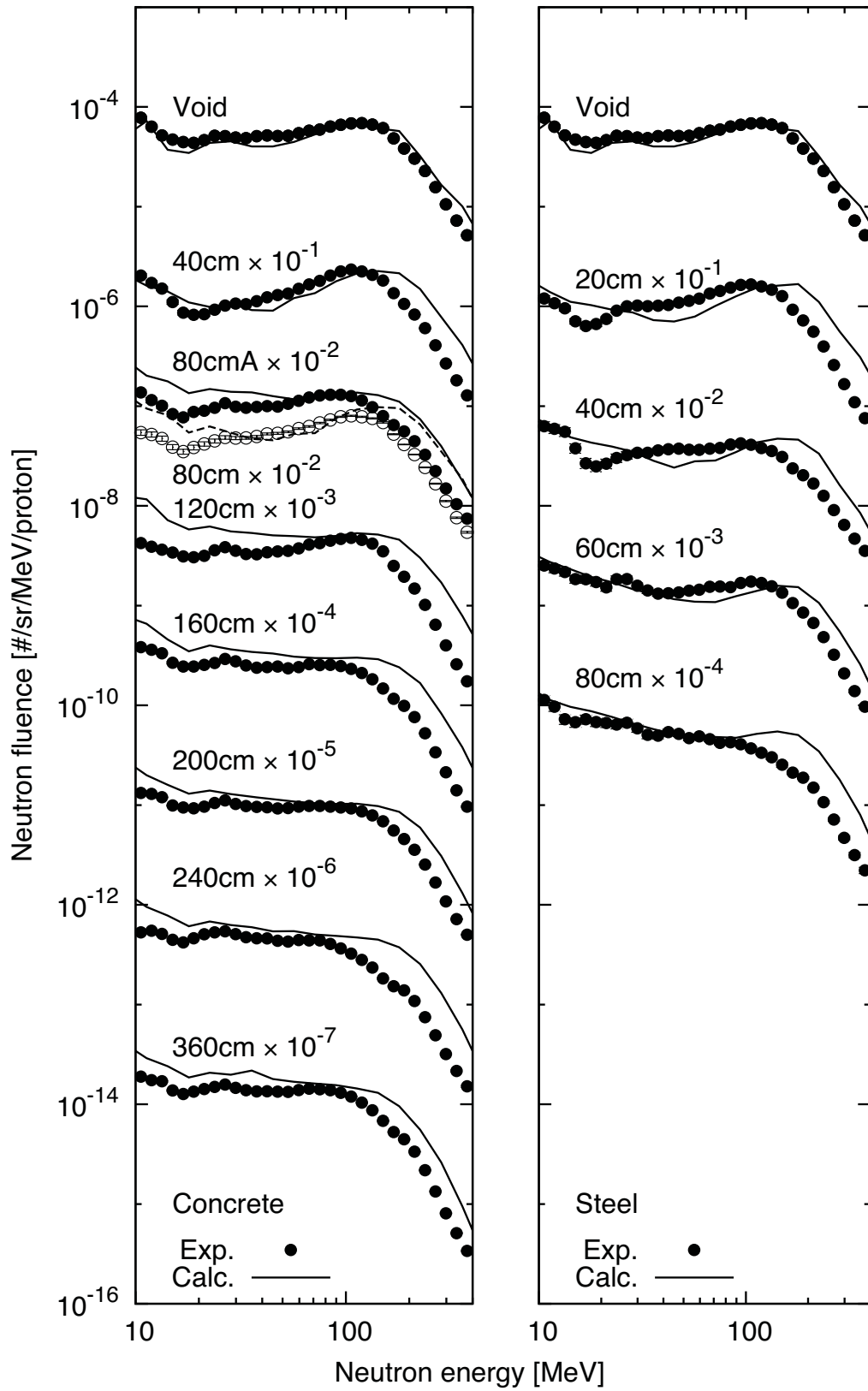


図2 測定で得られた中性子のエネルギースペクトルの実験値と計算値の比較結果

発表を終えてからは自分のプレゼンテーションに自信を持つようになった。それから発表に挑むとき、常に自信を持って堂々と発表できるようになり、研究者としての大事な一步を踏み出すことが出来た。国も研究分野も異なる人達と意見を交わすことで大きなモチベーションを得ることができ、各国の皆様の非常に研究熱心な姿勢と知的好奇心は私の研究意欲をかきたててくれた。この経験は核データニュース No.113 (2016) に報告した。

国際交流としては、スイスの欧州原子核研究機構 (CERN) との共同研究実験に参加することが出来た。「写真 1」(研究代表者：高エネルギー加速器研究機構 佐波俊哉 教授) 海外の方とも積極的に交流し、多くの時間を共有し大儀な実験に取り組んだことは忘れないと思う。



「写真 1」 食堂の庭から見えるモンブラン (左) FY16 に参加したメンバーとのモンブランの展望台での集合写真 (右)

一人の生徒に対して、あたたかいご指導を頂いた高エネルギー加速器研究機構の佐波俊哉教授、萩原雅之准教授、大山隆弘技師、長畔誠司技師、清水建設の中尾徳晶博士、広島大学の梶本剛助教、京都大学の八島浩助教、産業総合研究所の松本哲郎主任研究員、増田明彦主任研究員に心から感謝する。研究面だけでなく日常生活においても多くの御助力を頂いた。日々の楽しさは、CERN 食堂の外のテーブルに陣取って日本からの研究者方と真っ白なモンブラン山 (4807 m) を眺めながらビールを傾けたことだった。今でもまぶたに浮かぶ。



「写真 2」 日韓核データサマースクールでの記念写真

また、4 回の日韓核データサマースクール参加した。「写真 2」ポスター発表を行って優

秀ポスター賞を受賞しており、原子力学会の他学生や韓国の学生と交流する良い機会を持った。交流には、飲み会がやはり役に立つもので、皆さん大いに盛り上がって楽しいお時間になった。



「写真3」 HIMACでの共同利用実験の集合写真(左) スポレーシヨングループの後輩たちとの飲み会(右)

他の実験では、韓国の成均館大学と明知大学から実験依頼を受けて放射線医学総合研究所(HIMAC)での共同利用実験に参加したり「写真3(左)」、後輩の手伝いで理化学研究所での実験に参加して実験や解析方法などの研究指導を任されたこともある。特に実験に関しては、九大の執行先生から多大な御指導を頂いた。放射線・原子力工学に対して単なる知識ではなく、先生本人の豊富な研究経験に基づく研究者としての姿勢、特にどこまでも探求する姿勢には感嘆した。共に研究を行い、様々なことにご協力頂いたスポレーシヨングループの皆様には感謝する。一緒に飲み会も出来て、研究の枠を超えていろいろと話ができたこともあり、本当に楽しかった。「写真3(右)」

その他にも、原子力学会に参加して口頭発表を行うことで研究者の方々から多くの指摘を頂き、非常に勉強になった。指導教員の手伝いでオープンキャンパス「写真4(左)」や LTD 国際学会での通訳のアルバイト「写真4(右)」の経験もあり、本当に楽しい院生生活を過ごすことが出来た。



「写真4」 オープンキャンパスでの指導教員の手伝い(左) LTD 国際学会での通訳のアルバイトでの記念写真(右)

4. 現在の研究活動の概要

今住んでいる North Carolina の Raleigh 「写真 5」はアメリカで賑やかな都市ではなく田舎の雰囲気のある静かな都市であるが、物価は安く治安も良いところで住みやすい都市である。渡米後すぐに、新型コロナウイルスが世界で猛威を振るってアメリカは大変な時期が続いている。在宅勤務を実施してから、いつの間にか2カ月近くになる。1日も早く普通の日常が戻るように祈る。



「写真 5」 NCSU の名物 Bell tower (左) NCSU の学生会館 talley union (右)

原子炉の核分裂中性子は、原子炉内において核分裂によって放出される中性子として、平均 2 MeV 程度の高いエネルギーをもつが、この高速中性子は減速材との弾性散乱あるいは原子核的な非弾性散乱により次第にエネルギーを失い、熱エネルギーにまで減速される。もし熱エネルギー領域において中性子の吸収がなければ、その領域にまで減速された中性子は絶対温度 T で規定される Maxwell 分布をもつ減速材との衝突によるエネルギーによって熱平衡に到達し、同じ温度での Maxwell 分布を示す。従って、原子炉減速材における中性子の減速と熱平衡への到達を正しく求めることが極めて重要な課題である。[3][4]

中性子の速度を遅くする減速材として黒鉛 (Graphite) は、世界で初めての原子炉 Chicago Pile-1 [5] で用いられた物質である。このため、大量の純粋黒鉛ブロックが製造された。純度を高めるのは、中性子の吸収 (損失) を少なくするためである。黒鉛は中性子の吸収断面積が少なく、放射線に強く、耐熱性に優れ、熱を良く伝えるなど炉心構造材としても極めて優れた性質を持っている。従って、黒鉛は Generation IV; Very High Temperature Reactor (VHTR)、Advanced High Temperature Reactor (AHTR) [6][7][8] を含む様々な原子炉の概念に適している。

前述のとおり、減速材における中性子の減速と熱平衡を正確な理解は、将来の熱炉システムの安全利用に重要な役割を果たす。この過程を、減速材で中性子減速時間法 (Neutron slowing down time technique) より測定し、理論データと比較する。この方法は、熱化学動を含む減速材内の中性子の相互作用を理解するために不可欠なベンチマーク技術として、減速材で減速する中性子のエネルギーと、そのエネルギーに到達するのに要する時間との基本的な結合に

基づいる。中性子が一旦熱エネルギーに到達すると、減速材と中性子の相互作用は熱中性子散乱法 (Thermal neutron scattering law, TSL) によって記述される。これは、減速材の構造的および力学的情報を含む。計算シミュレーションでは、減速過程における中性子の平均エネルギー $\bar{E}(t)$ が得られる。中性子の平均エネルギー $\bar{E}(t)$ は、

$$\bar{E}(t) = \int_E E \cdot \psi(E, t) dE, \quad (1)$$

ここで、 $\psi(E, t)$ は時間に依存する中性子エネルギースペクトルであり、正規化される。式(1)により、時間-エネルギーの相関関係を数値的に確立し、ベンチマークの指針として用いることができる。[9] 今まで一般的な減速材での様々な実験が行われてきた。しかし、これらの結果は、現在の中性子減速時間法のと大きく異なることがわかった。[6][10] この方法を適用した試みは、A.I.Hawari [6] によって言及された。

本研究の目的は、上記を踏まえて、黒鉛の中性子減速と熱平衡に関する理解を深め、熱中性子散乱ライブラリをベンチマークすることである。

5. おわりに

九大での研究を進めるにあたり、多くの方から御助力および御指導を頂きました。中でも、研究の機会を与えてくださり、その遂行にあたって多大な御指導を頂きました九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門 石橋健二 教授、執行信寛 助教授、前畑京介 准教授、伊豫本直子 准教授、高エネルギー加速器研究機構 佐波俊哉 教授に深く感謝します。近くで研究に取り組む姿をみながら、研究者として大切な事柄を多く学ばせて頂きました。これらのことを今後の研究生活にも活かしていきたいと思えます。院生生活を最後までやり遂げることが出来たのは周囲の大勢の方達の存在や良縁に恵まれたからに他なりません。

研究室の生活で私は、他人に配慮し他人の意見を受け入れられるオープンマインドを学びました。正直なところ、研究をつづけるうちに、私だけのこだわりができて、他の人の意見を受け入れない態度を少しは持っていました。各自に与えられた力量はすべて違いますが、明らかなことは団結すればもっと偉大になるということです。私もより主導的・積極的な心で他人に配慮し、他人の意見を受け入れられるオープンマインドを維持するように常に自分自身を治めるつもりです。

そろそろ締めますが、この5年半で得られた有形無形の財産を有効に使い、さらに上を目指していきたいと思えます。今を踏み台とし、ジャンプできたらよいと思えます。地道に頑張りたいと思えます。「謙虚に、ひたむきに、感謝の気持ちで」を忘れないようにします。今まで支えてくださった大勢の先生方やお世話になった研究室のメンバーに恩返しをするためにも今後も精進を続けたいと決意を新たにしました。皆様と元気に再びお会い出来ますように。

参考文献

[1] N. Nakao et al.: Nucl. Instrum. Meth., **B266**, 93 (2008).

[2] H. Hirayama et al.: Proc. SATIF-13, NEA/NSC/R2, 274 (2018).

- [3] Lamarsh, John R. Introduction to nuclear reactor theory, Addison-Wesley, 1966.
- [4] Sébastien P. Chabod, Neutron slowing-down in matter, Nucl. Instrum. Meth. Res. **A669**, 32 (2012).
- [5] E. Fermi, The Development of the first chain reaction pile, Proceedings of the American Philosophy Society 90, 20 (1946).
- [6] A. I. Hawari, B. W. Wehring, Observation of neutron thermalization in graphite using the slowing-down-time technique, No. JAEA-CONF-2014-003, 2015.
- [7] A. I. Hawari, J. L. Wormald, C. A. Manring, Testing of Graphite Thermal Neutron Scattering Law Data in Support of TREAT Neutronic Analysis, Transactions 115 (1), 1401 (2016).
- [8] T. Zhou, Benchmarking Thermal Neutron Scattering in Graphite, Ph.D. dissertation, North Carolina State University 2006.
- [9] A. I. Hawari, et al, Monte Carlo Assessment of Time Dependent Spectral Indexes for Benchmarking Neutron Transport in Iron, Proc. of ISRD, Brussels Belgium, 2002.
- [10] Y. Kaneko, R. Kurokawa, F. Akino, et al., Journal of Nuclear Science and Technology, 4 (4), 177 (1967).