

## 読者の広場

### 新博士誕生

## 院生生活と学位論文

清水建設株式会社  
技術研究所  
竹下 隼人

[takeshita.hayato@kyudai.jp](mailto:takeshita.hayato@kyudai.jp)

---

### 1. はじめに

2022年3月に九州大学大学院総合理工学府先端エネルギー理工学専攻を修了し、博士(工学)の学位を取得しました。「新博士誕生」執筆の機会を頂いたので、拙筆ながら私の研究室生活や博士論文の研究についてご紹介します。

### 2. 研究室生活

まず私の経歴について簡単に書きたいと思います。私は名古屋大学理学部物理学科で素粒子系の研究室に所属していました。4年生で研究室配属される少し前くらいに、応用に近い研究をしてみたいと思い応用系の研究について調べました。その時に、九州大学の渡辺先生の研究室で、原子核反応を使って放射性廃棄物の処理を行う「核変換」の研究が行われていることを知りました。研究室訪問をさせてもらい、渡辺研究室の研究活動について丁寧に説明して頂いたことを今でも覚えています。

九州大学は伊都キャンパスがメインキャンパスとなっていますが、総合理工学府は福岡県春日市の筑紫キャンパスにあります。最寄りのJR大野城駅から徒歩5分もかからない交通の便が非常に良いキャンパスです。JRと西鉄の駅へ歩いて行けるので、博多や天神といった繁華街に行くのに便利でした。キャンパス内は自然に恵まれていて春は桜、秋は紅葉を楽しむことができ、ご近所の方が散歩や写真撮影に来ていました。落ち着いた雰囲気気分転換に散歩するのも楽しいところです。

渡辺研究室は学生の人数が多く、博士課程の学生も多いのが特徴です。研究に関して困ったときは研究グループに関係なく相談できる先輩がいたので、議論が活発にできる研究室でした。そのため、グループが違う先輩後輩と仲良くなることもできる楽しい研

研究室だったと思います。

### 3. 博士論文の研究

次に私の研究について書きたいと思います。私の博士論文のテーマは「高強度加速器中性子源開発に関連した陽子および重陽子核データに関する研究」です。図1に示すように、中性子はエネルギーによって反応の仕方が異なるので、それぞれの反応の特徴を生かして様々な目的に利用されています。中性子を利用するためには中性子源が必要になりますが、近年では高レベル放射性廃棄物の核変換処理[1]や核融合炉材料照射試験[2]のように、高強度な中性子束が必要とされるようになってきました。そこで、より高強度な中性子源開発に必要な核データを測定することが私の博士論文のテーマです。この研究では大きく分けて2種類の核データを測定したので、それぞれについて簡単に説明したいと思います。

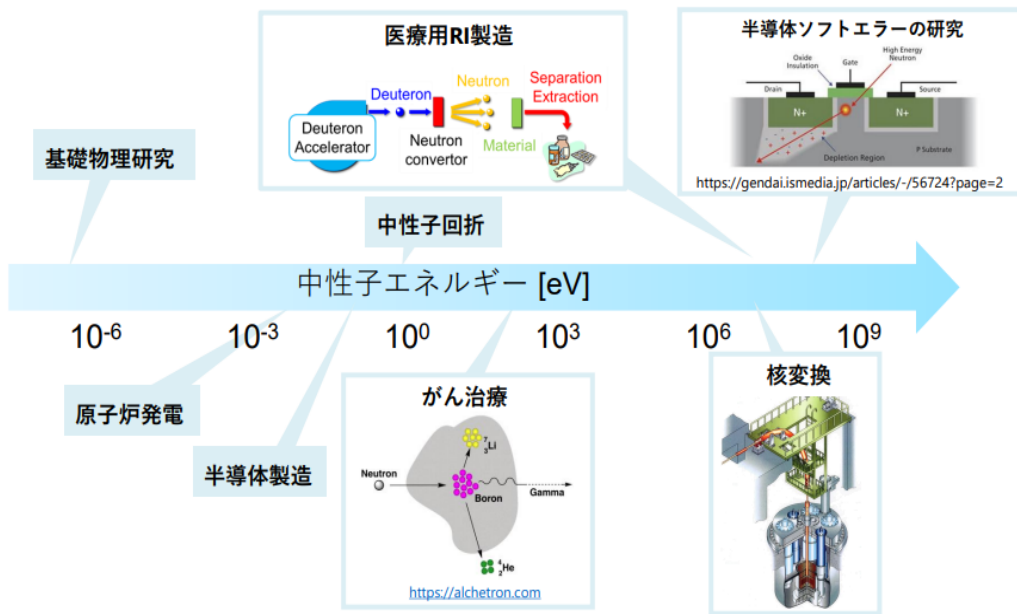


図1 中性子の応用例

#### 3.1 重陽子核データに関する研究

重陽子は陽子と中性子が結合エネルギー約 2.2 MeV と非常に弱く結合した原子核で、核反応により結合が簡単に切れてしまうという特徴を持っています。この特性を利用した高強度な重陽子加速器中性子源の開発が行われています。中性子を生成するためにはまず、加速器を使って重陽子を高エネルギー（およそ 10 MeV 以上）に加速します。加速した重陽子を Li や C といった軽い元素で構成された標的に照射することで核反応を起こし中性子を発生させます。このとき照射する重陽子ビームの強度やエネルギーを変

えることで、発生する中性子の強度やエネルギーをある程度選ぶことができるというのが重陽子加速器中性子源の特長です。重陽子加速器中性子源の開発のためには、スペックの調整や遮蔽設計の観点から、さまざまな物質に重陽子ビームが当たった際に発生する中性子のエネルギー分布や放出角度分布などのデータが必要となります。しかし、重陽子核データは不足しており、理論計算による予測値も精度が悪いことが問題でした。

そこで中山らは、重陽子入射反応専用の核反応計算コード DEURACS の開発を行いました[3]。私の研究では、核子あたり 6.7 MeV という比較的低いエネルギーにおいて DEURACS の精度検証を行うために、厚い標的からの中性子収量 (DDTTNY) の測定を行いました。実験は九州大学伊都キャンパスのタンデム加速器を使って行いました。重陽子ビームを照射する標的としては LiF, C, Si, Ni, Mo, Ta の 6 つを使用しました。

図 2 に、実験で得られた 0 度方向の中性子収量と DEURACS による理論解析の結果を示します。DEURACS は重陽子核反応を反応機構ごとに計算しており、図中には弾性分解 (EBU)、非弾性分解 (NBU)、前平衡過程 (PE) と統計崩壊過程 (SD) の各成分と、それらの合計 (SUM) を曲線で示しています。この比較から DEURACS が C (Z=6) から Ta (Z=73) までの広い原子番号の標的に対して実験値を上手く再現できることを確認しました。さらに DEURACS の計算結果を用いて重陽子核反応の理論解析を行いました。

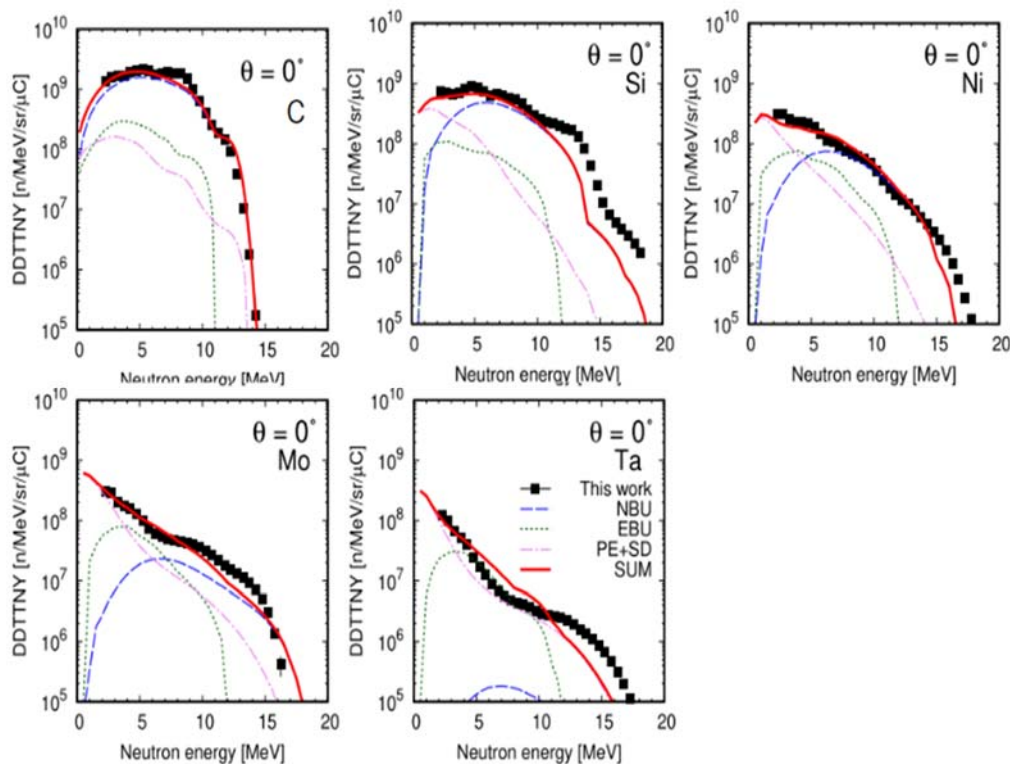


図 2 測定した中性子収量の実験値と DEURACS による理論解析の結果

### 3.2 陽子核データに関する研究

高強度な中性子源として、高エネルギー（100 MeV 程度以上）に加速した陽子を水銀や鉛などの重い元素に照射する核破砕中性子源が利用されています。また、今後は高レベル放射性廃棄物の核変換処理として加速器駆動核変換システム（ADS）を利用することが計画されています。このように高強度・高エネルギーのビームを使用する施設では、核破砕標的や陽子ビームの一部が加速器構造材に当たってしまうビームロスにより放射化が起こり、人体や機器に影響を及ぼすことが懸念されます。これまでに放射化の起こりやすさを表す放射化断面積の研究はいくつか行われていましたが（例えば[4]）、実験データどうしの不一致やデータの不確かさが大きいといった問題があります。

そこで私の研究では、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC を利用することで信頼度の高いデータの系統的測定を行いました。J-PARC は一度に照射できるビーム強度が高いことや、陽子ビームの強度を高精度に測定できるといった特長があり、実験データの不確かさを小さくすることができます。私の研究では、加速器で利用される Ni, Mn, Co, Zr の 4 標的に対して 0.4 から 3.0 GeV の陽子ビームを照射し、放射性核種の生成断面積の測定を行いました。図 3 に、取得した実験データと過去の測定結果、理論計算による予測値との比較を示しています。今回比較した理論計算は求められる精度で実験値を再現できていないことがわかりました。

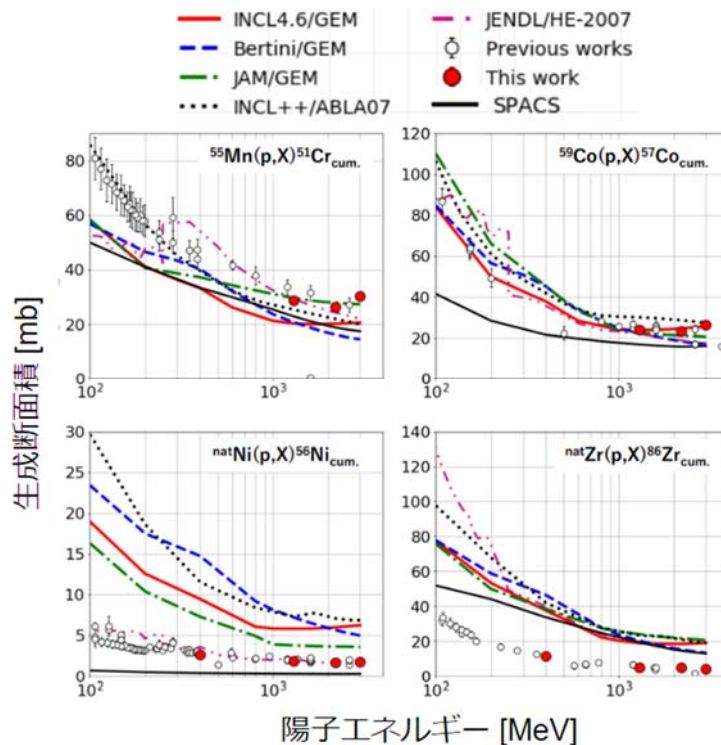


図 3 測定した放射化断面積の例と理論計算による予測値の比較

#### 4. さいごに

私は、大学院修了後は清水建設株式会社の技術研究所で放射線施設の遮蔽に関する研究や放射性廃棄物の地層処分に関する研究に従事する予定です。

大学や大学院では本当にたくさんのことを学ぶことができました。自分の専門分野のみならず、研究室メンバーの研究について議論する機会も多く、多くの研究テーマに触れる機会を持つことができました。指導教員の渡辺先生には研究についてのアドバイス以外にも研究者としての心構えについてもたくさん教わることができ、大変感謝しています。金准教授には実験に関してアドバイスを頂いたり、実験に協力して頂き、とても心強かったです。川瀬助教には原子核物理のゼミで、原子核・素粒子物理学に関する基礎から教えていただいたり、居室が同じだったこともあり研究以外の話題でもたくさんお話させていただいたので日々の研究室生活が有意義なものになったと思います。研究室のメンバーには困ったときに助けてもらったり、話に付き合ってもらい、楽しい研究室生活を送ることができました。また、博士課程ではおよそ2年間 J-PARC の方々にも大変お世話になりました。この場を借りて感謝申し上げます。J-PARC 核変換ディビジョンの前川博士には特別研究生として受け入れて頂き、困った時にたくさん助けていただきました。また、実験の解析についてアドバイスを頂き、より良い実験結果を出すことができました。明午博士には研究テーマの担当者として、J-PARC で実験をさせて頂くという貴重な機会を頂きました。また、解析や学会発表に関してたくさんアドバイスを頂きました。研究室で過ごした日々は今後の人生においても大きな糧になると思います。まだまだ未熟な私ですが、これからも精進して参りますので何卒よろしくお願ひします。

#### 参考文献

- [1] T. Sugawara et al., “Conceptual design study of beam window for accelerator-driven system with subcriticality adjustment rod,” Nucl. Eng. Des., **331**, pp. 11–23, 2018.
- [2] A. Moeslang et al., “The IFMIF test facilities design,” Fusion Eng. Des., **81**, pp. 863–871, 2006.
- [3] S. Nakayama et al., “Theoretical model analysis of (d, xn) reactions on  ${}^9\text{Be}$  and  ${}^{12}\text{C}$  at incident energies up to 50 MeV,” Phys. Rev. C **94**, 014618, 2016.
- [4] R. Michel et al., “Nuclide production by proton-induced reactions on elements ( $6 \leq Z \leq 29$ ) in the energy range from 800 to 2600 MeV,” Nucl. Instrum. Meth. B **103**, pp. 183–222, 1995.