

「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

山口 雄司

yamaguchi.yuji@jaca.go.jp

1. はじめに

今年(2020年)の3月、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)の学位を取得することができました。新博士誕生ということで私の学位論文を紹介する機会をいただきましたので、大学院での研究生生活や研究成果について書いてみようと思います。

2. 研究生生活

私の研究生生活の拠点は、今年の原子力学会秋の大会の開催が予定されている伊都キャンパス(図1)でした。伊都キャンパスは福岡市の西側に位置していて、福岡空港から電車とバスで1時間くらいの所にあります。大学に入学した当時はキャンパスの移転期間中で、すでに工学部は伊都キャンパスに移転していましたので9年間を伊都で過ごしました。個人的にキャンパス周りはまだまだ田舎で不便だと思いますが、そのかわりキャンパス内には新しい図書館や研究棟が増えました。新図書館の中を全部見て回れなかったのは残念ですが、移転完了を見届けられたのは貴重な経験でした。

研究テーマは、数十 MeV 陽子入射の核反応により生成する陽子のエネルギー・角度二重微分断面積(DDX)に関する研究で、とくに生成陽子エネルギー30 MeV 以下の障壁エネルギー領域に着目して博士論文にまとめました。私の研究は魚住裕介先生のご指導のもと、核内カスケード(INC)モデルと一般化蒸発モデル(GEM)からなる2段階モデルを用いて陽子入射陽子生成反応を説明することを目標に始めましたが、まもなく放出エネルギー2~3 MeV 以上の生成陽子の新しい実験データを取得する必要に迫られました。そういうわけで実験データを取得するための検出器を作製してDDXデータを取得することになりま



図1 移転が完了した伊都キャンパスの航空写真[1]。手前は文系，奥は理系の地区。

した。

開発した検出器の立面図を図2に示します。詳細は文献[2]に記載されていますのでここでは概要を述べたいと思います。この検出器はブラッグカーブカウンター(BCC)，シリコン半導体検出器(SSD)，BGOシンチレータで構成されています。BCCはグリッド付きの気体電離箱で、電子 α イオン対分布を反映したアノード信号の波形から検出粒子の電荷 Z とエネルギー E を決定できるという2~3 MeV陽子の測定に有利な特長をもちます。この特長はもともと重イオンの測定に有利と考えられ利用されていました。

検出器の作製では当時 BCC を使って重イオン測定をされていた高エネルギー加速器研究機構(KEK)の佐波俊哉先生にご指導いただきました。後に KEK の特別共同利用研究員として DDX 測定でもご指導いただきましたが、実験準備や滞在中の生活面でも佐波先生には大変お世話になりました。図3は今年の3月に KEK で撮った記念写真です。検出器を作製したのは修士課程でのことでした。当時、製図は学部の講義で、電子工作は中学校の技術の授業で経験した程度で、はじめは戸惑うことばかりでした。設計ソフト CAD ももちろん使ったことはありませんでしたが、設計に楽しさを覚えて気づけば CAD を使えるようになり、後のビーム実験に必要な物品も毎年設計していました。KEK での検出器の組み立ては1週間におよびました。特にはんだづけには苦勞しました。当時の実験ノートの記録によると、市販のプリアンプをケースから外して検出器に設置・結線するのに1日費やしたようで、ノートを見返しながら成長を感じています。

博士後期課程では KEK の身分を得て DDX データの測定を始めました。とはいえ、普段は九大で可能な限り核反応模型の研究を進めていて、つくばに居住しない特殊な形式

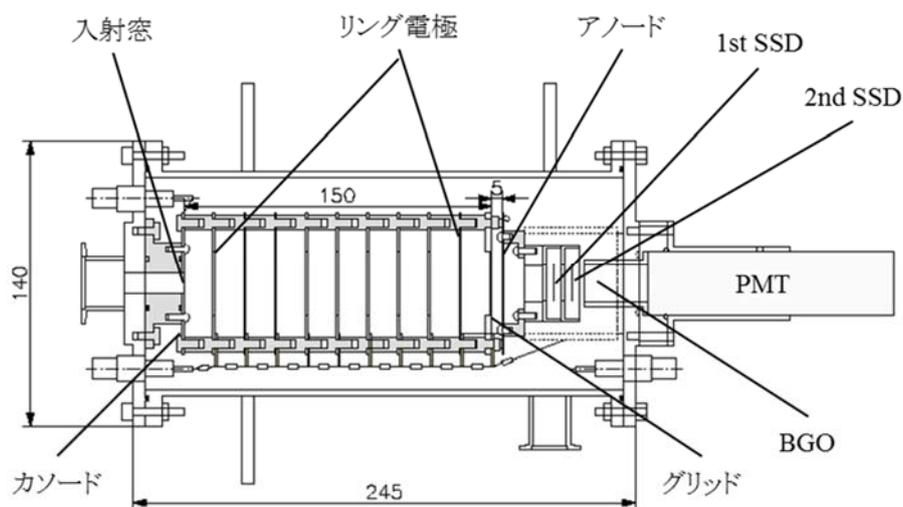


図2 開発した検出器の立面図

をとっていました。データの測定は上期と下期それぞれ2日ほどのマシンタイムで実施されるので、テレビ会議で佐波先生に助言をいただきながら準備を進め、マシンタイムの1,2週前にKEKで検出器等の調整をして測定に臨んでいました。測定を始める当初、1年、長くとも2年でデータの取得を終える想定でしたが、装置の不具合や測定上の問題に直面して結局取得を終えたのは3年目の10月でした。振り返るとだいぶぎりぎりの状況ですが、実験のおもしろさだけでなく厳しさも知ることができるよい経験だったと思います。



図3 2020年3月KEKで佐波先生と記念撮影

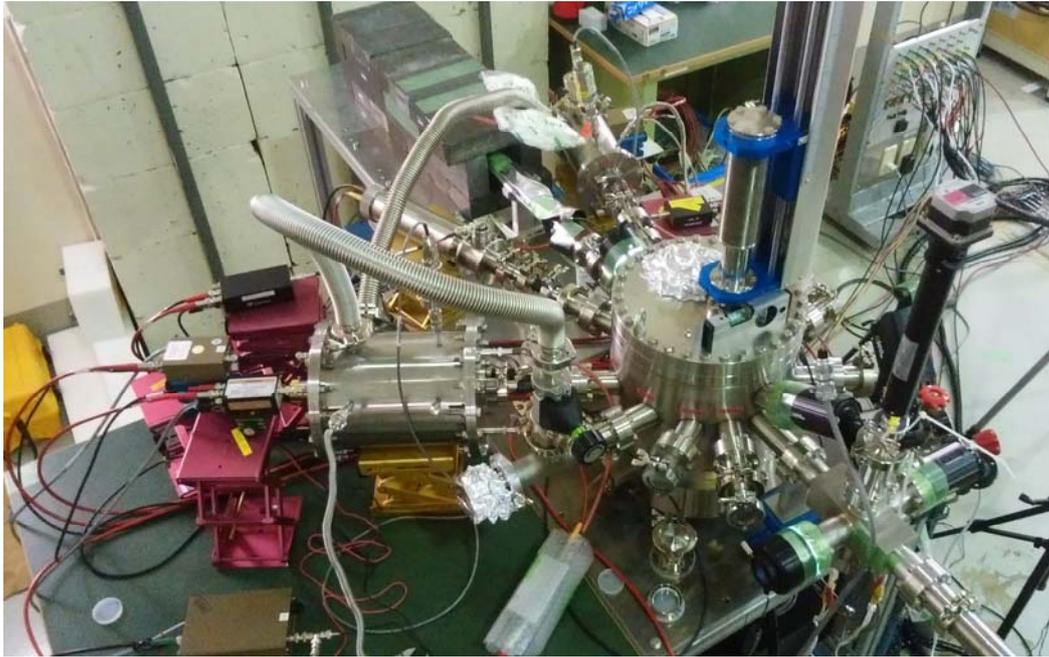


図4 実験体系

測定には放射線医学総合研究所のサイクロトロン施設を利用していました。図4に実験体系の写真を示します。体系は写真の右下でサイクロトロンと接続されており、陽子ビームは真空散乱槽内の薄膜標的を通過して写真上部の鉛ブロックで囲まれたビームダンプ部で吸収されます。入射エネルギー E_p には40, 70 MeVを選び、標的には軽い核の炭素から重い核の金までを用いました。

3. 研究成果

測定データの一部として $E_p = 70$ MeVにおける 60° でのエネルギースペクトルを図5に示します。標的核が重くなると10 MeV以下に現れる山の高さが低くなり、最大値をとるエネルギーが高くなるようすを示した例です。傾向を明確にするためにAg, Ta標的のデータを0.7倍してあります。このような傾向はクーロン障壁の増大による陽子放出の抑制によるものと考えています。

核内カスケード(INC)モデルの改良の一例として $E_p = 61.7$ MeV, ^{209}Bi 標的に対する 30° でのエネルギースペクトルを図6に示します。障壁透過の記述を導入して30 MeV以下の障壁エネルギー領域を説明した例です。INCモデルではもともとクーロン障壁をこえる陽子の放出が許されていました(Original)が、先行研究で遠心力障壁も考慮されて準古典近似に基づく障壁透過確率が導入されました(WKB)。学位論文では透過確率を陽子入射と中性子入射の反応断面積の比で表せることを示し、障壁エネルギー領域スペクトルの正確な説明を与えました(Present)。詳細については文献[3]をご参照ください。

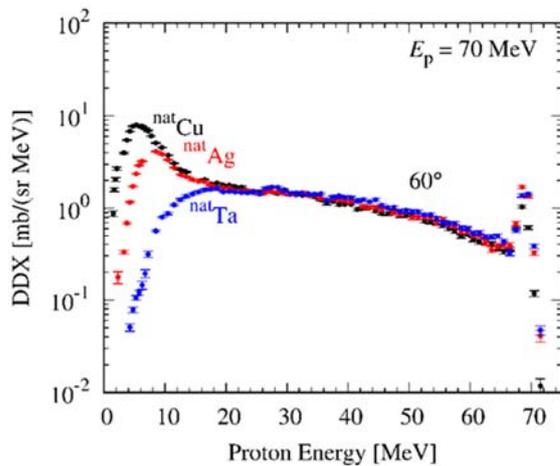


図 5 陽子のエネルギースペクトル(60°)。黒点、赤点、青点はそれぞれ銅、銀、タンタル標的に対する測定データ

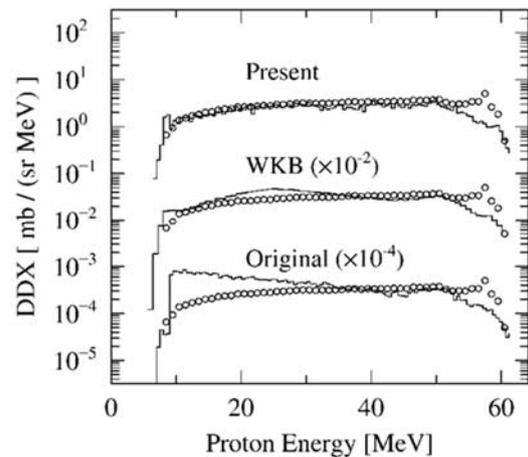


図 6 ^{209}Bi 標的に対する陽子のエネルギースペクトル(30°)。白丸は実験データ [4], 実線は INC + GEM による計算。

4. おわりに

最後になりましたが、学位論文の研究を進めるにあたりご指導いただいた魚住先生、佐波先生、学会等で議論いただいた皆様、放医研や KEK の職員・先生方に深く感謝いたします。

これからは原子力機構の職員として業務を遂行しつつ自身の研究も進めていきたいと思っておりますが、学生の頃に身につけたことを活かしながら博士号に恥じないよう自己研鑽に努めていこうと思っております。

参考文献

- [1]九州大学 Photo archives, <https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/internal/photos/view/3>
- [2] Y. Yamaguchi et al.: “Low-energy-threshold detector for measuring proton spectra at several tens of MeV using Bragg curve spectroscopy”, Nucl. Instr. and Meth. A vol.953, 163158 (2020).
- [3] Y. Yamaguchi et al.: “Barrier transmission for proton emission during the intranuclear cascade process”, Phys. Rev. C vol.100, 034617 (2019).
- [4] F. E. Bertrand, R. W. Peelle: “Complete hydrogen and helium particle spectra from 30- to 60-MeV proton bombardment of nuclei with $A = 12$ to 209 and comparison with the intranuclear cascade model”, Phys. Rev. C vol.8, pp.1045-1064 (1973).