

読者の広場

研究室だより

九州大学大学院総合理工学研究院 粒子線物理工学研究室「渡辺研究室」

九州大学
大学院総合理工学研究院エネルギー科学部門
川瀬 頌一郎
shkawase@kyudai.jp

1. はじめに

九州大学大学院総合理工学研究院粒子線物理工学研究室（以下、渡辺研）では、加速器ビームや宇宙線など、さまざまな粒子線に関わる研究を行っています。長年にわたり本研究室を率いてこられた渡辺幸信教授は2026年3月末で定年退職される予定です。また、渡辺教授（当時准教授）が『核データニュース』に研究室だよりを寄稿されたのは2009年のことで^[1]、それから16年が経ちました。本稿ではその間のすべての成果を追うことはできませんが、当時の話題がどのように発展してきたのかを中心にご紹介したいと思います。

2. 研究室の紹介

渡辺研は九州大学筑紫地区に拠点を置いています。筑紫地区は、九州大学のメインキャンパスとしてよく知られる伊都地区に比べると一般にはあまり認知度が高くありませんが¹、福岡市のベッドタウンである福岡県春日市に所在し、JR 鹿児島本線大野城駅がキャンパスの目前にあります。大野城駅から博多駅までは急行でわずか2駅10分程であり、福岡市中心部や福岡空港へのアクセスも良好です。それでいて周辺環境は騒がしくなく、後述する融合基礎工学科の学生が筑紫地区で本格的に講義を受け始めるのは学部3年からということもあり、伊都地区に比べると落ち着いた雰囲気のカンパスとなっていま

¹ 2010年および2019年には九州大学筑紫地区で核データ研究会を開催したこともあり、核データ関係者には特異的に認知率が高いかもしれません。

す。

現在の研究室メンバーは、渡辺教授と筆者（川瀬）、事務補佐員の古賀さんに加え、学生は学部4年生1名、修士課程4名(+1名)、博士課程1名が在籍しています(図1)。ここで(+1名)とあるのは、連携研究室であるQST 榊研の学生がM1前期の間は当研究室に籍を置いているためです。



図1 2025年度研究室メンバー（九州大学筑紫地区の桜並木の前で、渡辺教授：後列左から3番目、筆者：後列左から1番目

なお、九州大学では教員は「研究院」、学生は「学府」という異なる組織に所属することになっており、教員と学生の共著論文執筆の際に **Affiliation** 表記をどうするかいつも頭を悩ませます。さらに近年では学部組織の改組もあり、以前は工学部エネルギー科学科の学生を受け入れていましたが、現在は総合理工学府への進学を主とした新学科「融合基礎工学科」が新設され[2]、その卒業生を主に大学院へ受け入れています。こうして **Affiliation** 表記は一層複雑化し、論文執筆のたびに議論の種となっています。

渡辺教授はこの融合基礎工学科の初代学科長として奔走されただけでなく、九州・沖縄地区の9つの高専と連携して教育内容の高度化を図る「高専連携教育プログラム」[3]の実現に尽力されてきました。当研究室にも多くの高専出身学生が在籍し、その優秀さが研究活動を大きく支えてきました。こうした経験を踏まえ、渡辺教授は教育と研究の両面から次世代人材の育成に力を注がれていたことが強く印象に残っています。

3. 研究内容

閑話休題、ここからは本題である研究の内容についてご紹介したいと思います。図 2 に渡辺研のウェブサイト（2025 年 9 月 1 日現在）にある研究内容図を引用します。図からも分かる通り、渡辺研の研究内容は「現代物理」（特に、ミクロな原子核・原子スケールの物理）を根本として、その成果を先端理工学分野へと実らせることを目標としてきました。以下では、現在特に注力している研究内容をご紹介します。



図 2 当研究室の研究分野

3.1 核データ研究

筆者から見て、渡辺研で最も根幹となる研究はやはり核データ研究です。

その中でも特に大きな成果として挙げられるのは前回の記事でもテーマの一つとして挙げられている重陽子核データの開発でしょう。重陽子は陽子と中性子が弱く結合した系であるため反応過程が複雑で、幅広い応用に資する信頼できる核データの整備は長年の課題でした。渡辺研は九州大学のタンデム加速器や大阪大学 RCNP サイクロトロン加速器を用いた実験と、理論モデル開発・数値シミュレーションの両面から研究を推進してきました。こうした課題解決に向けた取り組みは、内閣府 ImPACT 藤田プログラム「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」[4]においても重要テーマとして位置づけられ、渡辺研もその一翼を担いました。その成果は重陽子入射反応計算システム DEURACS[5]の構築につながり、さらに JENDL 重陽子反応サブライブラリ JENDL/DEU-2020[6]として当研究室 OB である中山梓介さん(日本原子力研究開発機構)

の手により結実しました。JENDL/DEU-2020 (DEURACS)の二重微分断面積(DDX)の再現度の高さを示す図を文献[6]より引用して図3に示します。 $^{nat}\text{Li}(d,xn)$ のDDXが角度依存性も含め非常によく再現されていることがわかります。

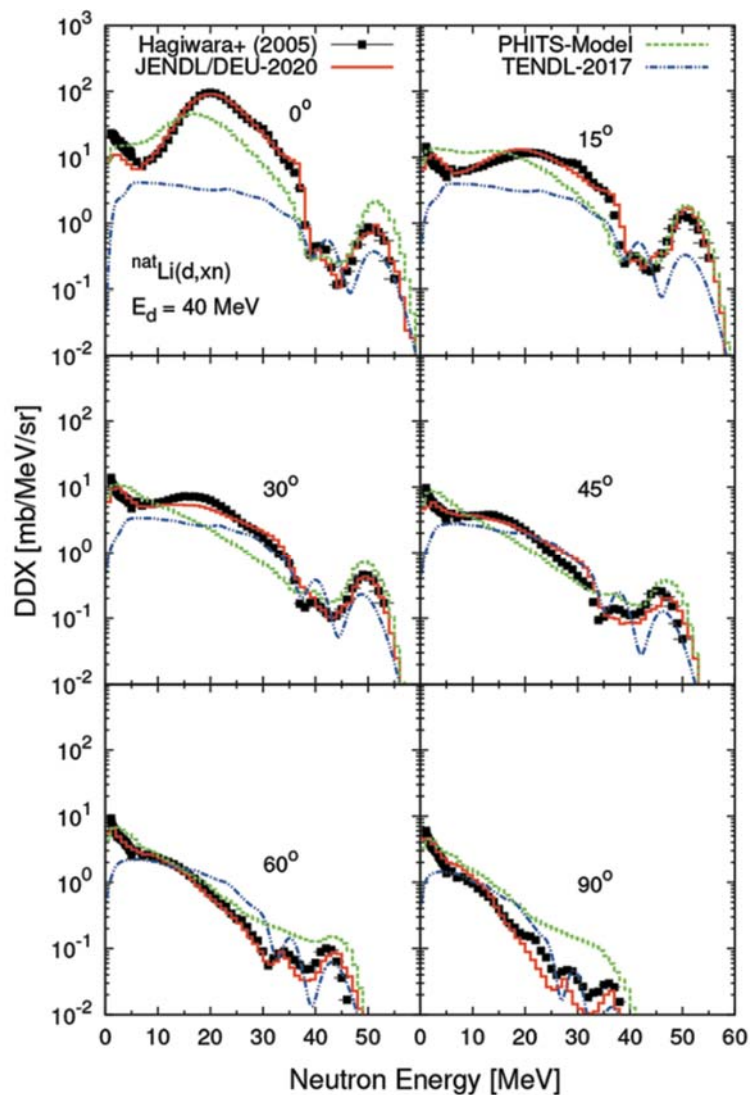


図3 40 MeVにおける $^{nat}\text{Li}(d,xn)$ 反応の二重微分断面積(DDX)計算の実験値および従来モデルとの比較 (文献[6]より転載、© 2021 Shinsuke Nakayama et al., CC BY-NC-ND 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

このライブラリは放射線遮蔽や核変換システムの検討、医療応用等に活用されており、渡辺研の代表的成果の一つと言えます。さらに現在では本研究の発展研究として九州大学理学研究科・緒方研究室と共同で(p,pd), (d,nx)といった最先端の核物理実験プローブや中性子生成に用いられる反応を対象とした理論モデルの研究が展開されています。

また同じ ImPACT プログラムの枠組みの中で、理化学研究所 RI ビームファクトリー

における逆運動学法を用いた陽子・重陽子入射核破碎反応による生成同位体測定実験にも研究室をあげて取り組みました。この成果は JENDL LLFP 核変換断面積ファイル JENDL/ImPACT2018 [7]に取り入れられています。理学出身の筆者が初めて核データ業界に関わったテーマとして、また、現在に繋がる理学と工学のコラボレーションの端緒として、個人的にとっても思い出がある研究です。

3.2 半導体デバイスにおけるソフトウェア研究

半導体デバイスにおけるソフトウェアとは、放射線が半導体デバイスに入射した際に発生する電荷が引き起こす誤動作のことです。その一つとして、メモリ中のビット情報が反転してしまうシングルイベントアップセット(SEU)が知られています。このような現象は、情報化社会がさらに高度化していくに当たり、その信頼性に深刻な影響を及ぼしうるものです。

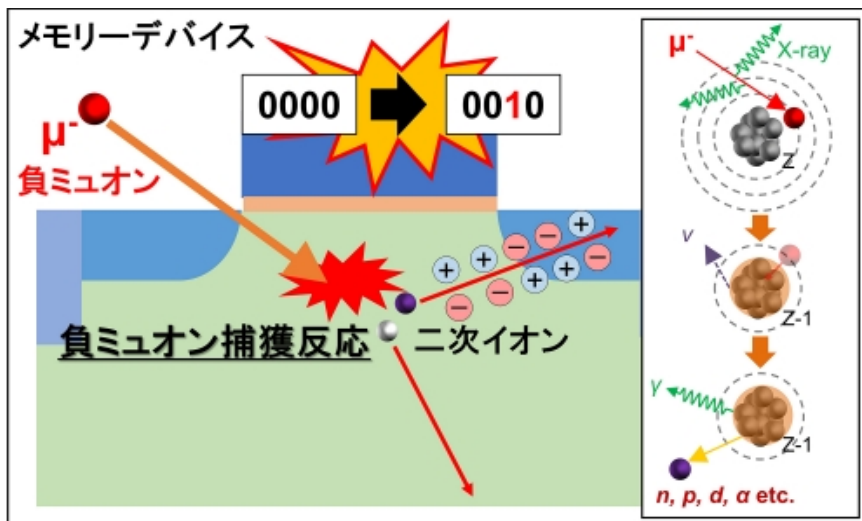


図 4 半導体デバイスに入射した負ミュオンに起因するソフトウェア発生過程の模式図

前回の研究室だより[1]では、宇宙線中性子起因のソフトウェア研究が紹介されていました。中性子が半導体デバイスに入射すると、半導体デバイス中の原子核と核反応を起こし、陽子などの二次荷電粒子が発生することでデバイス内に過渡電流が発生し、ソフトウェアが発生します。当時は開発段階であった PHITS コードと汎用 3 次元デバイスシミュレータ ENEXSS の統合システムは、その後渡辺研 OB で現 JAEA の安部晋一郎氏により PHYSERD[8]として完成しています。核反応過程から電荷の付与・収集過程に至るまで予測精度の高い計算モデルを取り入れることで、ソフトウェア発生時の物理過程を詳

細に解析できるようになりました²。

現在はこの流れをさらに発展させ、宇宙線ミュオンによるソフトエラー研究へと展開しています。宇宙線ミュオンは中性子と異なり電荷を持ちますが、その電離作用は小さいため、従来あまり問題視されていませんでした。

渡辺研では、大阪大学情報学研究科の橋本昌宜教授（現・京都大学）のグループと共同で、J-PARC MLF MUSE ミュオン施設において SRAM デバイスへのミュオン照射によるソフトエラー測定実験[10, 11]を実施しました。その結果、正ミュオン照射に比べて負ミュオン照射の場合にソフトエラー率が顕著に増加することが明らかになりました（図 5）。これは、負ミュオンがデバイス中に停止した後に発生するミュオン原子核捕獲反応によって二次的に発生する陽子や反跳残留核がエネルギーを付与し、デバイス中に電荷が生成することが原因と考えられています。一方、正ミュオンは原子核捕獲反応を引き起こさないため、このような効果は生じません。

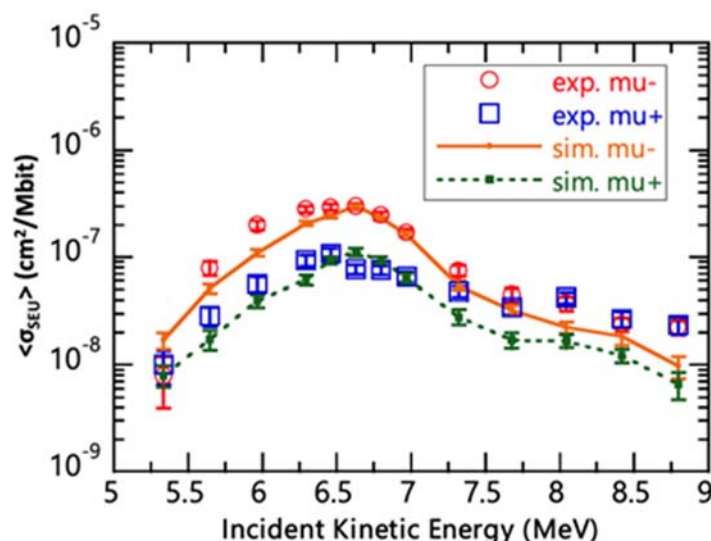


図 5 65-nm UTBB-SOI SRAM デバイスに対するミュオン照射ソフトエラー率の入射ミュオンエネルギー依存性（文献[12]より転載）

先進的な構造を持つ半導体デバイス（たとえばナノシート、GAA (Gate-All-Around)や CFET (Complementary FET)) に対しても、この影響をシミュレーションで定量的に評価できることが求められますが、そのためには2つの課題がありました：

- (i) デバイス中で停止しうる低運動量の宇宙線ミュオンのフラックス実測データが存在しないこと
- (ii) 半導体シリコンにおけるミュオン原子核捕獲反応で発生する二次荷電粒子のエネルギースペクトルの実験データが不足していること

² 詳細については安部氏ご自身による日本語の解説記事[9]がありますのでぜひご参照ください。

渡辺研ではこれらの課題に対応するため、それぞれ実測データの取得に取り組んできており、近日中の成果公表を目指しています。これらの成果を通じ、先端半導体デバイスにおける宇宙線ミュオン起因ソフトウェア率の高精度評価に貢献していきます。

3.3 ミューオン核データ

これまで紹介してきたソフトウェア研究からのスピアウトとして、渡辺研ではミュオン核反応の研究にも取り組んでいます。筆者はミュオン核データを、核データ研究の適用範囲を大きく広げる潜在性を持つ「次世代の核データ」と位置づけています。ミュオン核反応に関しては1980年代までは各国で実験測定研究が行われていましたが、その後は研究が途絶し、専門の研究グループも世界的に姿を消しました。しかし近年、ソフトウェア研究をはじめ、カミオカンデなどにおけるニュートリノ観測でのバックグラウンド評価、宇宙線生成放射性核種を用いた地層年代評価、ミュオン加速器施設での放射線安全対策など多様な応用研究の中でその重要性が再認識されつつあります。

ミュオン核反応は基礎物理としても非常に興味深い対象です[13]。負ミュオンが物質中に停止すると、原子核の電場に捕らわれてミュオン原子を形成し、速やかに μX 線を放出して0s軌道に遷移します。このとき、原子核系にとって“異物”であるミュオンの波動関数はパウリの排他律の影響を受けずに原子核内部まで浸透し、弱い相互作用を介してミュオン原子核捕獲反応が生じます。原子核内部での波動関数の重なりが反応に直接関与する点で、通常の核反応とは性質を大きく異にしています。さらに、ミュオンが約106 MeVという大きな質量を持つため、そのエネルギーが原子核の励起エネルギーに転化され、極めて高い励起状態を生成することも特徴です。加えて、核子対にミュオンが捕獲される中間子交換電流（MEC: meson exchange current）[14]と呼ばれるエキゾチックな過程が顕著に寄与して高励起状態を作り出す点も、他の核反応には見られないユニークな特徴といえます。

こうした流れを受け、JENDL委員会核データ専門部会においても「ミュオン核データWG」が今年度より始動しており、今後の体系的な核データ整備が期待されます³。

前節で紹介したように、渡辺研では既にシリコン原子核におけるミュオン原子核捕獲反応からの放出荷電粒子測定を実施しました。今後は半導体デバイスにおいて配線層に用いられる銅や、軽核や魔法数近傍核など原子核物理学的に特別な意義を持つ核種に対象を広げ、その反応メカニズムや原子核構造との関連性について解明を進めていきたいと考えています。

³ ミューオン核データの詳細については、理研・新倉氏による当誌記事[15]をご参照ください。

4. おわりに

これまで、前回の研究室だより[1]以降の進展を主に紹介してきました。筆者自身、16年前からの着実な研究の積み重ねを振り返り、その重みを改めて実感しております。本稿では紙幅の都合上全ての研究成果をご紹介することはできませんでしたが、歴代の学生や国内外の共同研究者の皆様のご尽力により多くの成果が積み重ねられてきたことにこの場を借りて深く感謝申し上げます。筆者自身も渡辺研究室の成果を少しでも引き継ぎ、今後さらなる発展へと繋げられるよう尽力していく所存です。

なお、渡辺教授の定年退職にあたり、最終講義および記念パーティーを2026年3月10日にそれぞれ筑紫地区と博多周辺で予定しております。翌日からは原子力学会2026年春の年会在熊本で開催されます。関係者の皆様にはぜひ福岡にお立ち寄りいただき、本行事にも合わせてご参加いただければ幸いです。

参考文献

- [1] 渡辺幸信：「九大・総理工における核データ関連研究の展開 ―原子核物理・核データの新たな応用分野を模索して―」、核データニュース, No. 92, 56 (2009)
- [2] 九州大学工学部融合基礎工学科 <https://www.ieng.kyushu-u.ac.jp/>
- [3] 九州大学工学部附属高専連携教育推進センター <https://konected.kyushu-u.ac.jp/>
- [4] 内閣府 ImPACT 藤田プログラム「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」 https://www.jst.go.jp/impact/hp_fjt/
- [5] S. Nakayama et al., Phys. Rev. C **94**, 014618 (2016).
- [6] S. Nakayama et al., J. Nucl. Sci. Technol. **58** (7), 805-821 (2021). <https://doi.org/10.1080/00223131.2020.1870010>.
- [7] S. Kunieda et al., J. Nucl. Sci. Technol. **56**(12), 1073-1091 (2019).
- [8] S. Abe et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **59**(4), 965-970 (2012); S. Abe et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **61**(4), 1806-1812 (2014).
- [9] 安部晋一郎、日本原子力学会雑誌 **65**(5) 52-56 (2023).
- [10] W. Liao et al, IEEE Trans. Nucl. Sci. **65**(8), 1734-1741 (2018).
- [11] S. Manabe et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **65**(8), 1742-1749 (2018).
- [12] 真鍋征也、九州大学大学院総合理工学研究院 博士論文 (2021).
- [13] D.F. Measday, Phys. Rep. **354**, 243-409 (2001).
- [14] M. Lifshitz and P. Singer, Nucl. Phys. A **476**, 684-700 (1988).
- [15] 新倉潤：「将来の核データ ―次世代 JENDL に向けて― (2) ミューオン核データ」、核データニュース, No. 139, 13 (2024).