

読者の広場

「新博士誕生」 院生生活と学位論文

産業技術総合研究所

計量標準総合センター 分析計測標準研究部門

真鍋 征也

s-manabe@aist.go.jp

1. はじめに

2021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）の学位を取得することができました。新博士誕生ということで執筆の機会をいただきましたので、駄文ではありますが大学院での生活や研究内容、今後の抱負等を記したいと思います。

2. 研究室での生活

私は修士・博士の5年間を福岡県春日市にある九州大学筑紫キャンパスで過ごしました。九大の本拠である伊都キャンパスと比べると筑紫キャンパスは小さく、大学院のみが設置されており、こじんまりとしていて落ち着いた雰囲気のあるキャンパスでした。また、春日市は静かな一方で県庁所在地である福岡市の隣に位置し博多や天神へのアクセスもよく、大学院を修了し茨城に引っ越した今考えても、大変過ごしやすい環境であったと思います。

そんな環境の中で私は渡辺・金研究室に所属し、渡辺幸信教授の指導の下で研究活動に励んでおりました。私は香川高専の専攻科で学士の学位を取得し、その後大学院から九州大学に入学しました。高専では電子工学を専攻しておりましたが、高専機構主催の原子力人材育成事業の一環で加速器施設を見学する機会があり、自分もこのような大きな施設で実験をやってみたいという思いから専攻を変えてみようと思えました。そして、核データ測定や放射線起因ソフトウェアの研究、医療用RI製造等の研究を行っていた渡辺・金研究室を志望しました。入学後、私はミューオン起因ソフトウェアに関する研究テーマをいただき、研究を行っていました。特に入学直後は同じ研究グループの学生は私一人ということで気軽に研究について相談できる相手もおらず、専攻を変えたこ

とで基礎的な知識も乏しかったこともあり、苦労しながら研究や実験準備を行っていた記憶があります。その後は徐々にではありますが、研究も軌道に乗っていったことや同研究グループに多くの後輩学生が加入してくれたこともあり、大人数での加速器実験や後輩の指導など様々な経験を積むことができ、大変充実した時間を過ごすことができました。

3. ミューオン起因ソフトエラーに関する研究

簡単になりますが、私の研究内容を紹介したいと思います。詳細は文献 [1] や [2] を参照いただければと思います。博士論文は“Study of Muon-induced Single Event Upsets in SRAMs and its fundamental physical process”という題で執筆しました。本研究では、放射線の相互作用により発生する半導体素子の一過性誤動作であるソフトエラーに着目しました。ご存じの通り、我々の生活は多くの電子機器によって支えられており、特に近年では自動運転システムや医療機器等その応用先は拡大しています。その電子機器を構成する半導体素子の信頼性を脅かす主たる問題がソフトエラーという現象です。図 1 にそのソフトエラーの一種であるシングリイベントアップセット (以下、SEU) の発生過程を示します。放射線(図中では荷電粒子)がメモリーデバイスに入射しますと、電離作用によってその飛跡に沿って電子-正孔対が生成されます。この電荷の一部がドリフトや拡散の影響により記憶ノードに収集され、あるしきい値 (臨界電荷量) を超えると保持されている情報が反転(0→1 あるいは 1→0)してしまいます。現状では、地上の放射線環境において SEU の主たる発生要因は、荷電粒子を放出する核反応経由で多くの電荷をデバイスに付与できる二次宇宙線中の高エネルギー (10 MeV 以上) 中性子と言われています。しかしながら、近年ではデバイスの微細化や省電力化に伴った臨界電荷量の低下からミューオンが新たな要因として懸念されております。

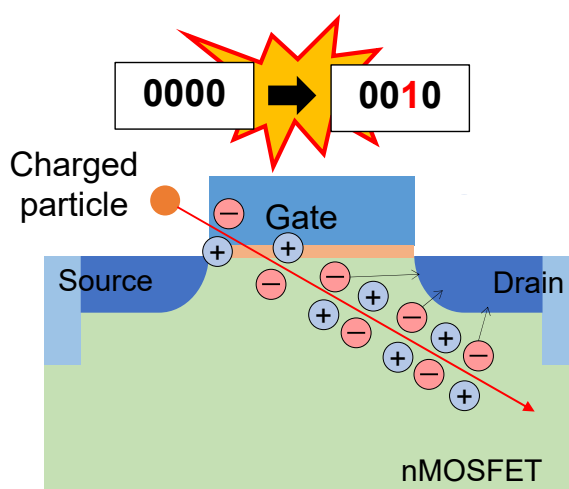
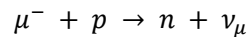


図 1 シングリイベントアップセットの発生過程

研究を開始した当時、ミューオンによるソフトエラーに関する実験は世界的にも進んでおらず、正電荷を有するミューオン(以下、正ミューオン)の SRAM 素子に対する照射試験がいくつか報告されているのみでした。一方で負電荷を有するミューオン(以下、負ミューオン)はシミュレーションにより、負ミューオン原子核捕獲反応(以下、 μNC)と呼ばれる負ミューオン特有の核反応によって正ミューオンより高い確率でソフトエラーを発生させることが予想されていました。図 2 に μNC の反応過程を示します。物質中で運動エネルギーを失い、停止直前になった負ミューオンは近傍の原子核とのクーロン相互作用によって電子のようにその原子核の軌道に束縛されます。その後 X 線を放出しながら、原子核の最近傍軌道である 1s 軌道まで遷移します。ミューオンはその質量が電子の約 200 倍あるため、原子核の非常に近傍で回転することになります。その後、一定割合のミューオンは 1s 軌道で崩壊しますが、残りのミューオン (Si で 65 %) は原子核内にある陽子と弱い相互作用により



の反応を起こし、中性子とニュートリノを発生させます。ここで、ミューオンの質量エネルギー ($\sim 105.7 \text{ MeV}/c^2$) を中性子とニュートリノで分け合い、中性子が得たエネルギーによって原子核が励起され、陽子、重陽子、アルファ粒子といったミューオン自身に比べ高い電離作用を持ったイオンが生成されます。この核反応のソフトエラーに対する影響は実験的に検証されておらず、またその反応自体の実験データも乏しいということもあり、学位論文では μNC の SEU 発生への影響を実験的に検証するとともに、反応データの測定を行いました。

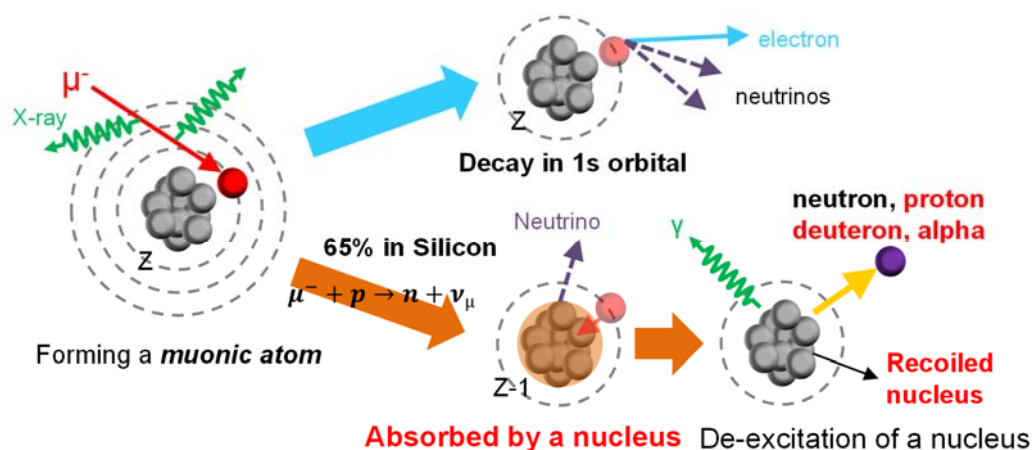


図 2 負ミューオン捕獲反応の模式図

(1) 実 SRAM デバイスに対する正負ミューオン照射試験

μ NC のソフトウェアへの影響のため、J-PARC 内にある MUSE (Muon Science Establishment) にて 65-nm 設計ルール of SRAM 素子に対して正負ミューオンの照射試験を行いました。実験では入射ミューオン運動エネルギーや SRAM の動作電圧を変更させながらミューオンの照射を行い、各条件での SEU 発生断面積の測定を行いました。その結果の一例とシミュレーションによる解析結果を図 3 に示します。図 3(a)からわかる通り正・負ミューオンによる SEU 断面積を比較すると、 μ NC から放出されるイオン放出の影響により負ミューオンは正ミューオンに比べ、3 から 5 倍ほど高いことがわかりました。またその結果を PHITS シミュレーション [3] により解析し、SEU 発生に寄与した荷電粒子種を導出すると、特に断面積がピークになる運動エネルギーでは μ NC による放出される H や He をはじめとする軽荷電粒子が重要な素過程であることが明らかになりました(図 3(b))。

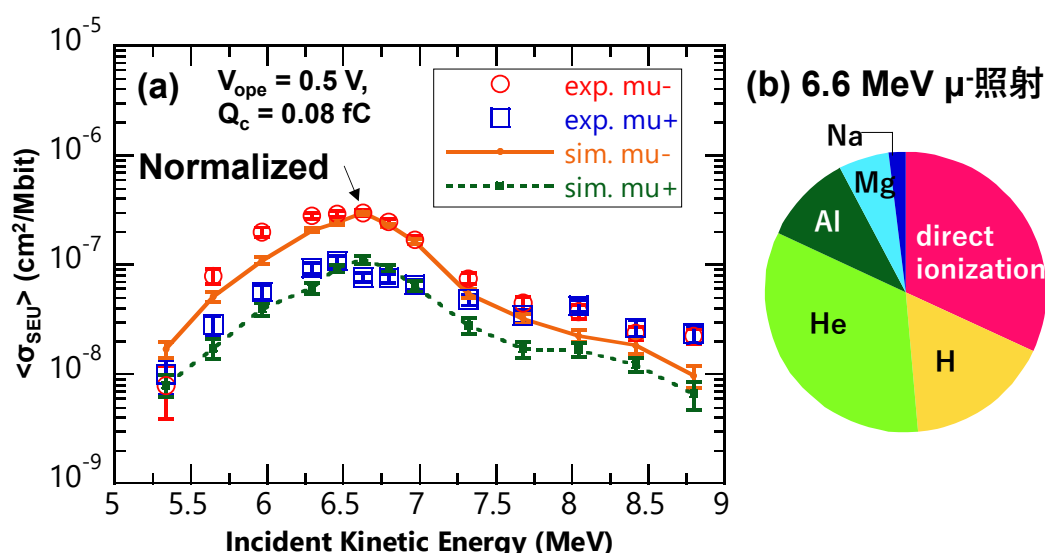


図 3 SRAM に対する(a)正負ミューオン照射試験結果と(b)シミュレーションによる解析結果

(2) 負ミューオン原子核捕獲反応から放出される荷電粒子測定

3-(1)で述べた通り負ミューオン原子核捕獲反応から放出される荷電粒子がソフトウェア評価において重要な素過程であるとなりました。しかしながら、半導体素子の主たる構成元素である Si における本反応に関する実験データは、陽子及び重陽子のスペクトルが 1970 年代に測定されたのみで、ほぼありませんでした。そこで本研究では大阪大学 RCNP にある MuSIC (Muon Science Innovative Commission) にて測定を行いました。実

験では 100 μm 厚の Si 検出器に対して負ミューオンビームを照射し、 ΔE (325 μm 厚 Si 検出器) – E (25 mm 厚 CsI 検出器) を用いて放出された荷電粒子のエネルギースペクトルの測定を行いました。その結果を図 4 に示します。先行研究と整合性あるデータ取得に成功し、実験データを低エネルギー側へ拡張しました。また、三重陽子のデータ取得に初めて成功しました。また、本実験データと PHITS シミュレーションの比較を行いました。PHITS では QMD (Quantum Molecular Dynamics) モデルと GEM (Generalized Evaporation Model) モデルを用いて μNC を模擬します。また、QMD に表面合体モデルを実装した MQMD (modified QMD) モデルも今回の比較に採用しました。図 4 に比較結果を示します。低エネルギー側では PHITS は概ねよく実験値を模擬することができていますが、高エネルギー側では過小評価になるということも明らかにでき、理論計算の改良が必要であることを示すことができました。

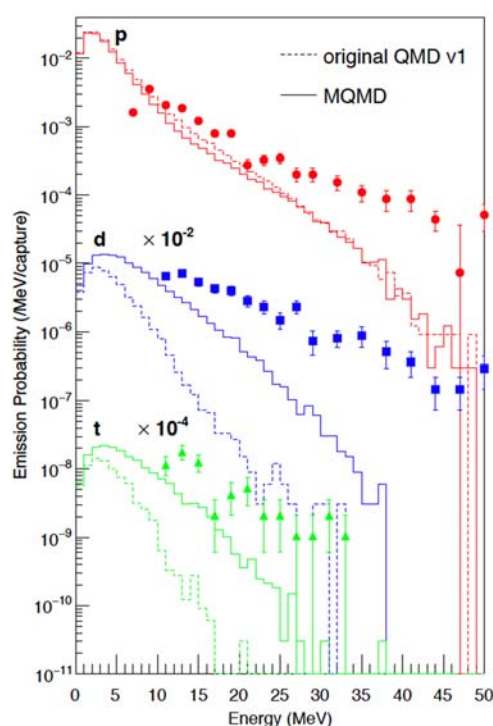


図 4 Si における負ミューオン原子核捕獲反応から放出される水素イオンのエネルギースペクトル(マーカー: 実験値、破線: QMD/GEM、実線: MQMD/GEM)

4. おわりに

2021 年 4 月より産業技術総合研究所の計量標準総合センターに職を頂き、研究者としての生活をスタートすることができました。名前通り本センターは我が国の計量標準の開発・整備を行うとともに計測技術の研究開発を行うセンターであり、私はその中の中

中性子の標準に関するグループに所属しています。当グループは、熱領域から数十 MeV までの様々な運動エネルギーを持つ中性子標準場とそれぞれのエネルギーに対する特定標準器となる検出器を有しています。中性子検出器や線源の校正や特性評価、素子や材料に対する中性子照射試験を行いたいという方や新たな中性子標準のニーズ等がある方はぜひご相談いただければと思います。また、私は中性子を用いたガン治療であるホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) 用の標準場の立ち上げに向けた研究を行っています。まだまだ知識や経験の不足を感じる場面も多いですが、精進していきたいと思っています。

最後に、大学院での研究生生活でお世話になった方々にお礼申し上げて終わりとさせていただきます。渡辺教授には五年間本当に熱心に指導していただき、心より感謝いたします。先生を目標にこれからも頑張っていきたいと思っています。また、原子核実験を基礎から熱心にご指導いただいた東大理学部の新倉助教と所属研究室の川瀬助教にお礼申し上げます。お二人のご協力で行うことのできた実験が博士修了後の職を選ぶ上で一つの大きな契機になったと考えております。また、実験に参加してくださった多くのコラボレーターの方々や研究室の先輩、同期、後輩など多くの方に支えていただきました。本当に有難うございました。

参考文献

- [1] S. Manabe et al., : “Negative and Positive Muon-Induced Single Event Upsets in 65-nm UTBB SOI SRAMs”, IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 65, No.8, pp. 1742-1749 (2018).
- [2] S. Manabe et al., : “Measurment of the energy spectra of hydrogen isotopes from nuclear muon capture in ^{nat}Si”, Proc. of 2019 Symposium on Nuclear Data, JAEA-Conf 2020-001, pp. 147-151 (2020).
- [3] T. Sato et al., : “Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS Version 3.02”, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 55, No. 6, pp. 684-690 (2018).