

**ミュオン起因ソフトエラー評価基盤技術：
実測とシミュレーションに基づく将来予測**
Muon-induced soft error evaluation platform:
future prediction based on measurement and simulation

課題番号：19H05664

橋本 昌宜 (HASHIMOTO Masanori)

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

地上に降り注ぐ二次宇宙線粒子によって生じる一過性の誤動作（ソフトエラー）が集積システムの信頼性を決める最大要因となっている。本研究では、集積システムの信頼性確保に向けて、ミュオン起因のソフトエラーを正しく理解・評価する技術を世界に先駆けて確立し、将来デバイスの信頼性動向を明らかにするとともに、将来の集積システムの信頼性確保に貢献する。

研究分野：集積システム

キーワード：ソフトエラー、ミュオン、集積システム、VLSI、信頼性

1. 研究開始当初の背景

ソフトエラーは集積デバイスが放射線に曝された際に生じる一過性の誤動作や故障である。近年の集積デバイスでは中性子がソフトエラーの主要因を占めると言われてきた。一方、従来中性子のみを考慮した集積システム設計では、予期しない信頼性不良が多発する可能性がある。ミュオン起因ソフトエラー評価技術の構築、対策技術の蓄積が集積システムの信頼性確保に向けて急務である。

2. 研究の目的

本研究では、集積システムの信頼性確保に向けて、ミュオン起因のソフトエラーを正しく理解・評価する技術を世界に先駆けて確立し、将来デバイスの信頼性動向を明らかにする。宇宙線ミュオンが集積システムの故障を引き起こす最大の要因となるかを世界に先駆けて見極めることが研究目的である。基礎物理現象の把握と実測結果の再現性検証によりシミュレーション技術の精度を格段に高め、将来の集積システムの信頼性確保に貢献する。

3. 研究の方法

正確に将来動向を見極めるため、ミュオン・シリコン間の核反応基礎データを取得するとともに、最先端メモリデバイスのソフトエラー実測データを蓄積する。これらのデータを基に物理現象を正確に再現するシミュレーション技術を確認する。開発したシミュレーション技術を公開することで、ミュオン起因ソフトエラー対策を加速させる。

4. これまでの成果

将来予測に適用可能な信頼性の高いシミュレーション体系を構築するため、4つの課題に分けて研究を進めている。

課題1: ミュオンと原子核の反応を実験により取得し、シミュレータ開発に必要な基礎物理データの取得を目指している。

地上（建屋内、地下・トンネル等を含む）における単位時間・面積当たりの入射ミュオン強度及びエネルギー・角度分布測定に用いる可動式の低エネルギーミュオン計測システムの設計・開発を行った。

本研究に先立ち大阪大学核物理研究センター(RCNP)にて実施していた予備実験結果から、放出陽子及び重陽子のエネルギー分布データを導出した。ソフトエラー率のシミュレーション精度向上に不可欠な負ミュオン捕獲反応過程の基礎データのさらなる拡充を目指し、測定可能なエネルギー領域の拡張およびソフトエラー発生に大きな影響を与えると予想される放出 α 粒子のエネルギー分布取得（世界初）を目標とした新規実験の研究計画と測定装置の設計を行った。

英国RAL-ISIS研究所での実験実施に向けた検出器の開発を行なった。タンデム加速器にて検出器の性能試験を行った。nTDシリコン検出器の波形解析により、水素同位体イオンおよび α 粒子の弁別が可能であることを実証した。

課題2: 最先端デバイスを用いたソフトエラー評価実験を実施して、エラー率の測定とソフトエラー発生メカニズムの分析に必要な物理現象の把握に取り組んでいる。

入射ミューオンの時刻と位置、エネルギー、ビット反転位置を突き合わせた世界初の測定を実現するため、高速にエラー発生がスキランでき、発生したエラーの情報をチップ外部に出力可能な専用チップを 55nm プロセスで設計・試作した。168ns ごとにすべてのビットのエラー発生がチェックできるため、負ミューオンによる直接電離効果で発生したエラーと、負ミューオン捕獲反応で発生したエラーを 90%程度の割合で分離観測可能であることをシミュレーションにより確認した。12nm FinFET テクノロジーの SRAM チップを設計・試作し、動作確認した。36 チップ(計 1G ビット)を搭載した評価ボードを含む測定環境を構築した。IoT で利用が続くプレーナテクノロジーを評価するため 28nm チップの設計も進めている。

物体認識を含むいくつかのアプリケーションを実行している GPU に中性子を照射し、発生する DUE(ハングやクラッシュ)を分析した。仕様や存在が不明の内部回路が多く、DUE の要因となっており、照射実験以外でそのエラー率の見積もりが困難であることが分かった。また、実行するアプリケーションやコア数によるエラー率の違いを観測し、多様なアプリケーションに対してエラー率見積もりが可能なモデル化手法が必要であることが分かった。

課題 3: 原子核物理、放射線物理、デバイス物理にまたがるマルチ物理シミュレーション技術を開発している。

シリコン標的に対する負ミューオン原子核捕獲反応から放出される陽子、重陽子、三重陽子生成について、PHITS(放射線シミュレータ)による計算値と課題 1-2 で得られた測定値および先行研究の測定値との比較を行った。従来の量子分子動力学モデルを用いた計算結果は重陽子および三重陽子の生成量を大幅に過小評価しており、これに伴い陽子-重陽子生成比について実験値を大幅に過大評価する結果となった。そこで、重陽子および三重陽子生成の過小評価の改善を目的としていくつか検討を行ったところ、高エネルギー放出の過小評価が改善される知見を得た。

課題 4: 将来の集積デバイスのソフトエラー耐性を評価し、情報システムの信頼性予測を提供することを目的としている。

SOI-FinFET と、将来導入が予想されるナノシート FET の構造をデバイスシミュレータ上で構築し、それぞれの電気特性を求めた。さらに、それぞれに 2 次イオンを入射させたときドレイン電極に流れる過渡電流を解析し、微細素子の構造パラメータがシミュレーション結果に与える影響について考察した。

5. 今後の計画

開発している低エネルギーミューオン計測システムを用いて実環境における宇宙線ミューオンの特性を観測し世界初データを取得する。負ミューオンの原子核捕獲反応で発生する放出 α 粒子のエネルギー分布取得(世界初)を実施する。最先端 SRAM のソフトエラー率データの取得、詳細なエラーイベントデータを取得する。これらの測定データを用いて、物理に基づいたシミュレーションの高度化と妥当性を検証する。FinFET の次のナノシート FET を中心に将来のソフトエラー動向を明らかにし、情報システムの高信頼化に貢献する。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. W. Liao, M. Hashimoto, S. Manabe, Y. Watanabe, S. Abe, M. Tampo, S. Takeshita, and Y. Miyake, "Impact of the Angle of Incidence on Negative Muon-Induced SEU Cross Sections of 65-nm Bulk and FDSOI SRAMs," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 67, no. 7, pp. 1566 - 1572, July 2020.
2. T. Mahara, S. Manabe, Y. Watanabe, W. Liao, M. Hashimoto, T. Y. Saito, M. Niikura, K. Ninomiya, D. Tomono, and A. Sato, "Irradiation Test of 65 nm Bulk SRAMs with DC Muon Beam at RCNP MuSIC Facility," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 67, no 7, pp. 1555 - 1559, July 2020.
3. J. Kuroda, S. Manabe, Y. Watanabe, K. Ito, W. Liao, M. Hashimoto, S. Abe, M. Harada, K. Oikawa, and Y. Miyake, "Measurement of Single-Event Upsets in 65-nm SRAMs under Irradiation of Spallation Neutrons at J-PARC MLF," *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 67, no. 7, pp. 1599 - 1605, July 2020.
4. M. Hashimoto and W. Liao, "Soft Error and Its Countermeasures in Terrestrial Environment," *Proc. ASP-DAC*, 招待講演, Jan. 2020.
5. S. Kamei, A. Sato, S. Kawase, T. Kin, M. Saitsu, R. Takahashi, and Y. Watanabe, "Development of A Measurement System for Low Energy Cosmic Muon with Charge Identification Feature," *Proc. 22nd Cross Straits Symposium on Energy and Environmental Science and Technology*, 2020.
6. W. Liao, K. Ito, Y. Mitsuyama, and M. Hashimoto, "Characterizing Energetic Dependence of Low-Energy Neutron-Induced MCUs in 65 nm Bulk SRAMs," *Proc. IRPS*, April 2020.

7. ホームページ等

<http://www-ise1.ist.osaka-u.ac.jp/>