

宇宙線のミュオンと中性子が引き起こす 半導体ソフトエラーの違いを解明

環境放射線に対する効果的な評価・対策技術の構築に向けて

【研究成果のポイント】

- 複数の量子ビーム^{※1}を活用し、宇宙線^{※2}による半導体デバイスのソフトエラー^{※3}の包括的な評価を実現
- 宇宙線のミュオン^{※4}と中性子^{※5}が引き起こすソフトエラーが、異なる特徴を持つことを実験的に解明
- 社会基盤を支える信頼性の高い半導体デバイスの開発に向け、評価・対策技術構築への展開を期待

【概要】

株式会社ソシオネクストは、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所、京都大学複合原子力科学研究所、大阪大学大学院情報科学研究科と協力し、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 物質・生命科学実験施設 (MLF) ミュオン科学実験施設 (MUSE)^{※6} の負および正ミュオンビーム、京都大学 研究用原子炉 (KUR) の熱中性子^{※5} ビーム、大阪大学 核物理研究センター (RCNP) の高エネルギー中性子^{※5} ビームをそれぞれ半導体デバイスに照射することにより、ミュオンと中性子が引き起こすソフトエラーの特徴が異なることを実験的に初めて明らかにしました。今回、複数の量子ビームを用いることにより、環境放射線に含まれる宇宙線由来のミュオン・中性子の影響を包括的に測定することを実現しました。本成果は、環境放射線によるソフトエラーに対する効果的な評価・対策技術の構築に発展すると考えられます。これにより、将来のスマートシティ^{※7}や Mobility as a Service (MaaS)^{※8}の社会基盤を支える、安心・安全で信頼できる半導体デバイスの創出につながることを期待されます。

本研究成果は、2021年5月21日に「IEEE Transactions on Nuclear Science」のオンライン版に掲載されました。

また、本研究の一部は、「国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (OPERA)」の助成を受けて実施されました。

【研究の背景】

スマートシティや MaaS の実現に向け、5G や AI、自動運転などの新しいデジタル技術の社会実装が進められています。これらの技術は、数多くの電子機器によって支えられており、その中では半導体デバイスが常に電子情報を処理しています。この半導体デバイスは、微細化・低電圧化を中心とした技術進歩により、高性能化・低消費電力化が進められてきました。一方で、微細化・低電圧化の結果、半導体デバイス内の電子情報が放射線によって書き換わってしまう現象であるソフトエラーが発生しやすくなり、環境放射線によるソフトエラーの問題が深刻化することが危惧されています。

社会基盤となるデジタル技術を安全・安心なものとするため、それを支える半導体デバイスについて、環境放射線によるソフトエラーを適切に評価し、その影響を理解して対策することが求められています。従来、ソフトエラーを引き起こす環境放射線として、宇宙線由来の中性子が問題視されてきました。一方、微細化・低電圧化が進んだ半導体デバイスにおいては、同じく宇宙線由来のミュオンによるソフトエラーが懸念され始めています。このミュオンは、地上に降り注ぐ宇宙線全体の約 4 分の 3 を占め、中性子よりも大きな問題になる可能性も指摘されています。しかし、ミュオンが引き起こすソフトエラーについての評価報告例は非常に少ない状況です。特に、中性子が引き起こすソフトエラーとの違いが分かっておらず、ミュオンと中性子の影響の総合的な評価が困難でした。

【本研究の成果】

本研究では、宇宙線由来のミュオン・中性子それぞれが引き起こすソフトエラーの違いを理解するため、ミュオンおよび中性子を半導体デバイスに照射する実験により、比較評価を行いました。宇宙線由来のミュオンには負ミュオン・正ミュオンの 2 種類、中性子には高エネルギー中性子・熱中性子の 2 種類が存在します。本実験では、J-PARC MLF MUSE の負および正ミュオンビーム、大阪大学 RCNP の高エネルギー中性子ビーム、京都大学 KUR の熱中性子ビームを使用し、環境放射線の影響を包括的に評価することを実現しました。照射実験に用いた半導体デバイスは、20nm CMOS プロセス^{※9} で製造された SRAM^{※10} です。動作させた状態の SRAM に各量子ビームを照射し、各粒子が引き起こす SRAM のソフトエラー（保持データの反転）について、エラー発生確率および複数ビットエラー^{※11} 発生の傾向を解析しました。

SRAM の照射実験による評価の結果、ソフトエラー発生確率・複数ビットエラー発生割合の電源電圧依存性（図 1）および複数ビットエラーパターンの特徴について、ミュオンと中性子に明確な違いがあることが明らかになりました。これまで、負ミュオン・正ミュオン・高エネルギー中性子・熱中性子の 4 粒子間でこのような違いをとらえた実験例はなく、今回の研究成果は世界で初めてのものです。本研究では特に、負ミュオン特有の捕獲反応^{※12} によって引き起こされる複数ビットエラーが、高エネルギー中性子の核破碎反応^{※13}、熱中性子の捕獲反応^{※14} によって引き起こされるものと異なる特徴を持つことが示されました。観測された複数ビットエラー発生およびエラーパターンの傾向から、この特徴差は、それぞれの核反応によって生成される二次イオン^{※15} の特性が異なることに由来していることが強く示唆されました。

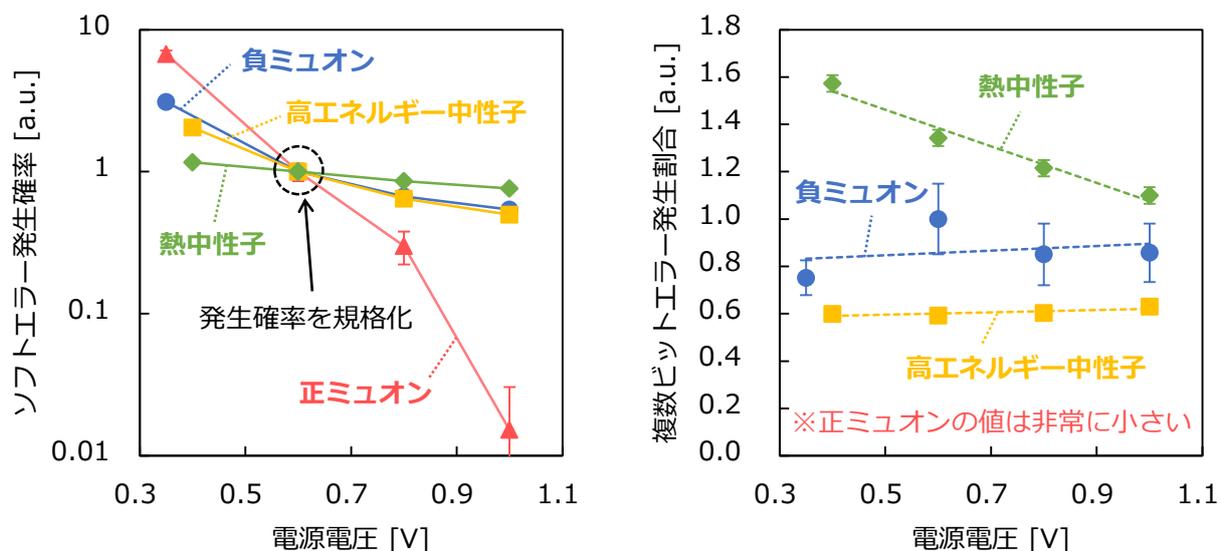


図 1 ソフトエラー発生確率 (左) と複数ビットエラー発生割合 (右) の電源電圧依存性。正ミュオンのソフトエラー発生確率は、中性子に比べて電源電圧依存性が急峻であることが分かります。また、負ミュオンの複数ビットエラー発生割合は、高エネルギー中性子と熱中性子の中間程度であることが分かります。なお、負ミュオン・正ミュオンの実験は、ソフトエラー発生確率が最大となるエネルギー条件 (ミュオンの照射効果の影響が大きい条件) で実施されました。

【今後の展開】

本研究成果は、ミュオンを含めた環境放射線に対する効果的なソフトエラー対策技術の開発につながります。例えば、電源電圧依存性に基づいて半導体デバイスの低電圧動作における影響評価を行い、複数ビットエラーの特徴に基づいて対策方法を適切に選択することが可能です。特に、環境中のミュオンと中性子の割合は場所によって異なることが知られており、今回明らかになったミュオンと中性子の影響差は、半導体デバイスの使用場所を考慮した最適なソフトエラー対策設計につながるものです。また、今回の包括的な実験結果は、数値シミュレーションによる評価技術の進歩にもつながります。このような展開により、微細化・低電圧化がさらに進んでいく次世代の半導体デバイスにおいても、ソフトエラーの問題解決に向けた研究開発が推進されます。

スマートシティや MaaS が実現される将来の社会では、生活基盤の信頼性を膨大な数の半導体デバイスに委ねることになるため、環境放射線によるソフトエラーに対する評価・対策がより一層重要になると予想されます。このような社会に向け、本研究のような量子ビームを活用したソフトエラー評価を継続・発展させることにより、安心・安全で信頼できる半導体デバイスの創出が期待されます。

【論文情報】

タイトル： Muon-Induced Single-Event Upsets in 20-nm SRAMs: Comparative Characterization with Neutrons and Alpha Particles

著者名： 加藤 貴志¹、反保 元伸²、竹下 聡史²、田中 浩基³、松山 英也¹、橋本 昌宜⁴、三宅 康博²

¹株式会社ソシオネクスト 信頼性技術部

²高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 ミュオン科学研究系/ J-PARC

³京都大学 複合原子力科学研究所

⁴大阪大学大学院 情報科学研究科

雑誌名： IEEE Transactions on Nuclear Science

DOI： <https://doi.org/10.1109/TNS.2021.3082559>

記載されている会社名、製品名などの固有名詞は、各社の商標または登録商標です。プレスリリースに記載された内容は発表日現在のもので、その後予告なしに変更されることがあります。あらかじめご了承ください。

【用語説明】

- ※1 量子ビーム：ミュオン、中性子、陽子などの粒の性質と波の性質を併せ持つビーム。加速器や原子炉などの施設で人工的に生成されます。強度、エネルギー、ビーム形状などが制御され、基礎研究から産業まで幅広い分野で利用されています。
- ※2 宇宙線：宇宙空間を飛び回る高エネルギーの粒子、およびそれが地球の大気に衝突して二次的に発生する粒子線の総称。前者は一次宇宙線、後者は二次宇宙線と呼ばれます。地表に到達する二次宇宙線には中性子、ミュオン、電子、光子などが含まれ、ミュオンは中性子の約3倍の量があります。
- ※3 ソフトエラー：半導体デバイスに放射線が入射することにより生じる一過性のエラー。物理的な破壊による恒久的な故障（ハードエラー）とは異なり、電子データの再書き込みや、リセットなどの操作で正常な動作に復旧させることができます。ソフトエラーによる誤動作の防止には、冗長回路やエラー訂正回路などが使用されます。
- ※4 ミュオン：電子と同じレプトンに属する素粒子。ミューオンやミュー粒子とも呼ばれます。電子と同じ電荷量を持ち、質量は電子の約200倍です。電荷が正と負の2種類のミュオンが存在し、それぞれ正ミュオン、負ミュオンと呼ばれます。
- ※5 中性子：原子核を構成する電荷を持たない粒子。地上には、数 meV～数 GeV の幅広い運動エネルギーを持った中性子が存在します。この中で、熱エネルギー程度の低い運動エネルギー（常温では 25meV 程度）を持つものを熱中性子、数 MeV 以上の高い運動エネルギーを持つものを高エネルギー中性子と呼びます。
- ※6 大強度陽子加速器施設（J-PARC）物質・生命科学実験施設（MLF）ミュオン科学実験施設（MUSE）：J-PARC は茨城県東海村にある加速器施設で、世界最高レベルの強度の陽子ビームを利用して、素粒子・原子核物理学、物質・生命科学などさまざまな分野の先端研究が行われています。J-PARC 内の物質・生命科学実験施設 MLF に、世界最高強度のミュオンビームを発生させることができ

るミュオン科学実験施設 MUSE があります。

- ※7 スマートシティ：「ICT等の新技術を活用しつつ、マネジメント（計画、整備、管理・運営等）の高度化により、都市や地域の抱える諸課題の解決を行い、また新たな価値を創出し続ける、持続可能な都市や地域」と定義される概念。
- ※8 Mobility as a Service：ICTを活用し、すべての交通手段による移動を一つのサービスとして統合し、シームレスにつなぐ新しい移動の概念。
- ※9 20nm CMOS プロセス：n型トランジスタとp型トランジスタを相補的に組み合わせて集積回路を製造する工程。“20nm”は製造工程の微細さを表しています。
- ※10 SRAM：Static Random Access Memoryの略称。半導体メモリの一種で、高速動作が可能という特徴を持ちます。
- ※11 複数ビットエラー：SRAM等のメモリにおいて、複数ビットの保持データが同時に反転するエラー。複数ビットエラーは、エラー訂正回路による修復が困難な場合があります。
- ※12 負ミュオンの捕獲反応：負ミュオンが原子核に捕獲される反応。負ミュオンが物質に入射し、その中で停止すると、負ミュオンが原子核のまわりに束縛されたミュオン原子が形成されます。その後、負ミュオンは一定の確率で原子核に捕獲され、その結果、励起した原子核から二次粒子が放出されます。その中には、陽子やアルファ粒子などの2次イオンが含まれており、ソフトエラーの原因となります。
- ※13 高エネルギー中性子の核破砕反応：高エネルギー中性子が物質中の原子核に衝突し、原子核が破壊され、多数の二次粒子が放出される核反応。二次粒子の中には、陽子やアルファ粒子などの二次イオンが含まれており、ソフトエラーの原因となります。
- ※14 熱中性子の捕獲反応：熱中性子が原子核に捕獲される核反応。ホウ素の同位体であるホウ素10は、熱中性子を捕獲しやすく、その結果、アルファ粒子とリチウムイオンの二次イオンが放出されます。そのため、半導体中にホウ素10が多く含まれる場合、熱中性子によるソフトエラーが起きやすくなります。
- ※15 二次イオン：弾性散乱や核反応によって生成される荷電粒子。電離作用によって半導体中に電子正孔対を生成し、その結果生じる電氣的ノイズがソフトエラーを引き起こします。