宇宙線起因中性子による半導体ソフトエ ラー特性の全貌解明

NTT宇宙環境エネルギー研究所 岩下

下 秀徳

いわした

1. はじめに

スポットライト

2023年3月にNTTは北海道大学と共同で「世界初、中性 子が引き起こす半導体ソフトエラー特性の全貌を解明」の 報道発表をした。本発表は、宇宙線(太陽フレアや銀河か ら飛来する放射線)に起因する誤動作であるソフトエラー の原理を解明したもので、この結果を活用しソフトエラー 対策をさらに進展させることで、より安心・安全な社会イン フラの実現が可能となる。さらに、本成果をITU-Tのソフ トエラーに関する勧告へ反映することも検討している。

本稿は、本報道発表について、詳細に解説したものである。

2. 背景

高性能な電子機器が、様々な分野で私たちの暮らしを支 えている一方で、宇宙現象による「ソフトエラー」が増加し ている。宇宙から降り注ぐ宇宙線が、大気圏にある酸素 や窒素に衝突すると、中性子が発生する。この中性子が、 電子機器の半導体に衝突すると、保存されたデータが書き 換えられる現象「ソフトエラー」を引き起こし、場合によっ ては通信障害などの社会インフラに重大な影響を及ぼす可 能性がある(図1)。

NTTでは、既にこのような被害に対処するため、ソフト エラーを再現させ、その対策・評価することができるソフト エラー試験技術を確立し、NTTアドバンステクノロジ株式 会社において「ソフトエラー試験サービス」が2016年に開 始された。現在では通信分野をはじめ、様々な分野の電 子機器のソフトエラー試験が実施されており、安心・安全



■図1. ソフトエラー発生過程



な社会インフラの構築に貢献している。また、2018年には NTTが主導したソフトエラー対策・評価に関するITU-T勧 告(K.124、K.130、K.131、K.138、K.139、K.150)が制 定された。

電子機器におけるソフトエラーの対策を行うためには、 その機器ごとのソフトエラーによる故障頻度を考慮したシ ステム設計が重要となる。一方で、ソフトエラーの発生し やすさの指標であるソフトエラー断面積は、その機器に到 達する中性子が持つエネルギーにより大きく異なるため、 中性子が持つエネルギーごとのソフトエラー断面積の詳細 なデータが不可欠であった。

そのため、NTTは北海道大学、名古屋大学と共同で高 エネルギー中性子(1MeV~800MeV)領域におけるソフト エラー断面積を2020年に世界で初めて測定した^[1]。その後、 更なる研究の深化を進め、NTTと北海道大学にて今回、世 界で初めて1MeV以下でのソフトエラー断面積を解明した^[2]。 実験は、大強度陽子加速器施設(J-PARC)物質・生命科 学実験施設(MLF)に設置された中性子源特性試験装置 (NOBORU)に、NTTが開発した高速ソフトエラー検出 器を用いて測定した(J-PARC Proposal No.2022A0249)。 本稿では、ソフトエラーに関する基本的なところから、中 性子エネルギー依存のソフトエラー断面積の測定結果まで を解説する。

3. ソフトエラーの影響

情報通信を支える通信装置は年々増大する膨大な通信ト ラフィックを処理するため、大容量化・高機能化が求めら れており、それらに使われる半導体デバイスの高集積化・ 微細化も進んでいる。しかし、半導体デバイスの高集積化・ 微細化に伴いソフトエラーが発生しやすくなる。特にSRAM (Static Random Access Memory) はソフトエラーの影響 を受けやすく、微細化によりソフトエラーが増加する傾向 を示している(図2)。近年の通信装置では、通信データが パケット化され、パケットを高速に読み書きできるSRAMが 大量に使用されている。また、ユーザがデジタル回路をプ ログラムできる半導体であるFPGA (Field-Programmable Gate Array) も、近年の通信装置ではその自由度の高さか



ら必須の半導体となっている。 FPGAの多くは、SRAM方 式をベースとしているため、ソフトエラーが発生しやすく、 さらに対策が難しい半導体である。SRAM等の通常のメモ リは、誤り訂正符号とともにデータを書き込み、読み出す際 に異常データは訂正した後にデータを使用するため、訂正が できれば異常なデータによって装置が動作することはない。 しかし、FPGAは図3に示すように、CRAM (Configuration Random Access Memory) のビット情報に基づきデジタル 回路が構成される。ソフトエラーによりCRAMのビット情 報が書き換えられてしまうと、直ちにデジタル回路が変化し、 ユーザが意図しない回路となる。例えば、AND回路で設 計したものがOR回路となることや、内部配線が論理的に 切断されてしまうなどの可能性がある。CRAMにエラー検 出・訂正機能を持ったFPGAも多いが、CRAM内のデータ をシーケンシャルに読み出すため、エラー検知には数十ミ リ秒が必要で、訂正されるまでは異常な回路動作が継続す る。これは、例えばFPGAが通信機能を持っていた場合、 通信パケットを正常に処理できず、通信断が起きるという ことになる。 エラー訂正により、通信断が回復すればよい



■図3. FPGAの構造

が、一度、異常な回路動作で異常な状態遷移をすると、回 路が訂正によって正常に戻ったとしても、通信断が回復し ない可能性もある。

ソフトエラーがキャリア通信システムに発生すると、故障 解析時に事象が再現しない非再現故障が頻発する。キャ リア通信システムにおいて故障が発生した場合、通信ルー トを切り替えるなど、通信サービスへの影響を回避すると ともに、ネットワーク監視センタへ故障を示す警報を通知す る。故障箇所を交換し、システムメーカーの工場にて故障 箇所の再現試験や検査を行うが、一旦電源を落としている ため、既にソフトエラーにより書き換えられたビットは消え ており、事象の再現はできず、原因究明が長期化してしまう。 また、一部の故障モードではソフトエラーによってシステム の動作に異常が発生していても、警報を保守者へ通知する ことができず、保守者が必要な保守アクションを取ること ができないサイレント故障となる可能性がある。サイレント 故障は、ユーザからの申告によってはじめて保守者が通信 障害に気付くこともあるため、問題の長期化や重大なサー ビス品質の低下など、社会的にも大きな影響を及ぼす可能 性がある。

4. ソフトエラー断面積

ソフトエラーの影響を把握する上で特に重要となるのが、 ソフトエラーが年間何回発生するかといった、単位時間当た りの発生数を示すソフトエラー発生率である。通常の半導 体デバイスでは故障率の単位としてFIT (Failure in time: 10億時間当たりの故障数)が使われており、ソフトエラー の場合も、故障率はソフトエラー発生率と呼び、単位はFIT が用いられることが多い。ソフトエラー発生率を算出する ためには、中性子が照射された時のソフトエラーの発生し やすさの指標であるソフトエラー断面積σ(中性子が半導 体へ入射した時にソフトエラーが発生する割合)が不可欠 である。ソフトエラー断面積は中性子のエネルギー Enに 依存し、式(1)で表せる。

ここで、Φ (En) は半導体デバイスに照射された単位面 積当たりの中性子数(中性子フルエンス)で、NSEU (En) はそれら中性子によって生じたソフトエラーの発生数であ る。なお、ソフトエラー断面積は、半導体デバイスごとに 異なり、環境中の中性子や加速器で生成される中性子は、 それぞれ異なるエネルギー分布を持つ。例えば、自然界に おいても図4に示すとおり条件によって変化する^[3,4]。環境ご との中性子フラックス(単位面積・時間当たりに通過する中 性子の数)のエネルギー分布 𝕐(*En*)を考慮してソフトエ ラー発生率SER (Soft error rate)を式(2)で算出できる。

$$SER = \int_0^\infty \sigma(E_n) \psi(E_n) \, dE \, \cdots \, (2)$$

このように、ソフトエラー断面積σは、ある環境における ソフトエラー発生率を算出するためには不可欠なデータで あるが、従来はソフトエラー断面積σの中性子エネルギー 依存性の測定は困難な状況であった。そこで、我々は飛行 時間法によるソフトエラー断面積の中性子エネルギー依存 性の測定を行った。



5. 飛行時間法を用いたソフトエラー断面積測定方法

中性子のエネルギーを測定する手法として、飛行時間法 (中性子が飛行した距離と時間から速度を割り出し、エネ ルギーへ変換する手法)があるが、特に高エネルギー中性 子の飛行時間内でソフトエラーを検出するのが従来は困難 であった。20mを飛行させたときの中性子エネルギー依存 の飛行時間を図5に示す。このように、MeVオーダーの中 性子を飛行時間法で測定する場合は、ナノ秒オーダーでソ フトエラーの発生を検知する必要がある。通常、ソフトエ ラーを検知する場合、データを読み出し、誤り検査符号か らエラーの有無を検査する。 例えば高速なデータの読み書 きが可能なSRAMであっても、メモリ領域全体をシーケン シャルに読み出すと、ミリ秒オーダーの時間を要してしまう。 また、FPGAのCRAMにもビットエラー検査回路が備わっ ているものが多いが、これもデータをシーケンシャルに読 み出すため、エラー検査に数十ミリ秒オーダーの時間を要 してしまう。

そこで、我々は、第3章で解説したFPGAでは、CRAM にエラーが起きると即時に異常な回路となる現象があるこ



■図5. 20m飛行させた時の中性子エネルギーごとの飛行時間

とに着目した。この異常状態を検出する回路をFPGA内に 設置することによって、高速にソフトエラーを検出できると 考えた。この回路は、32ビットのレジスタを2つ用意し、両 方のレジスタへ250MHzのクロックごとにAll "0"→All "1" を書き込み、その2つのレジスタの値を比較することで、異 常を検知する回路を作り、その回路をFPGAの容量限界ま で大量に設置したものである。この無数にある回路の内、 どれか1つでも異常となると、異常状態と判定する。これに より、ナノ秒オーダーのソフトエラー検出を実現した。あと は通常の飛行時間法と同様、加速粒子が中性子生成ター ゲットへ照射されたタイミングを示す信号との時間差によっ て、ソフトエラーを引き起こした中性子のエネルギーを測 定することが可能となる。

6. 照射実験と測定結果

実験は、米国ロスアラモス国立研究所のLANSCE (Los Alamos Neutron Science Center) と大強度陽子加速器 施設 (J-PARC) 物質・生命科学実験施設 (MLF) に設置 された中性子源特性試験装置 (NOBORU) で実施した。そ れぞれの加速器の特性により、1MeV~800MeVは、LANSCE で測定し、1MeV以下はJ-PARCで測定を行った。照射し たデバイスは、市販の40nm、55nmの3種類のデザインルー ルのFPGAである。

FPGA 40nmと55nmのソフトエラーの飛行時間スペクトル を図6に示す。図6 (a) は20nsの時間幅で処理したもので、 J-PARCは中性子を生成するための陽子パルスが600nm間 隔のダブルパルスであるため、この影響で中性子によるソ フトエラーも2つのピークができ、それを明確に測定できて いる。図6 (b) は10µsの時間幅で処理したものである。図7 にこれらソフトエラーの飛行時間スペクトルと中性子エネル ギースペクトルから算出したFPGAのソフトエラー断面積を 示す。黒の実線はLANSCEで測定した結果で青の実線が



J-PARCで測定したFPGA 40nmの結果、緑の実線が J-PARCで測定したFPGA 55nmの結果である。このように 広いエネルギー範囲で連続的にソフトエラー断面積を測定 することができた。

7. 考察

このデータから、ソフトエラー断面積は0.1MeV付近で最 も減少する傾向がみられ、さらに、エネルギーが低くなる につれて増加していく傾向がみられる。これは、半導体中 に微量に存在するボロン10の影響と想定される。そして、 低エネルギー中性子の中でも熱中性子と呼ばれる25meV (2.5x 10⁻⁸MeV)付近のエネルギー帯の中性子のソフトエ ラー発生率が高くなっていることが分かる。この熱中性子 は、高エネルギー中性子が水、プラスチック、電子基板な どの水素が含まれる物質に入ることにより減速されて生成 されるため、周辺環境によって数が大きく変動する。例えば、 水冷で半導体を冷却している場合、この熱中性子が大きく 増加すると想定される。そのため、今回得られたデータに より、電子機器の周辺環境を考慮したソフトエラーによる 故障数のシミュレーションや、このエネルギー領域に応じ た対策などが可能となる。

8. 今後の展開

今回得られたデータにより、宇宙線起因の電子機器の誤 動作を引き起こすソフトエラーに関して、低エネルギー中 性子に対するソフトエラー断面積の特性を解明した。これ により、ソフトエラー対策・評価を行う上で最も重要となる ソフトエラー起因の故障率がより正確に算出できるように なった。ソフトエラーは、半導体を持つすべての電子機器 の誤動作を引き起こす可能性を持っており、ソフトエラー 対策・評価は、既存のICT機器や交通インフラから今後拡 大が想定されるAIによる自動制御やスマートファクトリーな ど様々な業界、事業分野で重要な役割を果たすことが期 待できる。

今後、電子機器の周辺環境を考慮したソフトエラーによ る故障数のシミュレーションや、低エネルギー領域に応じた ソフトエラー対策など、より安心・安全な社会インフラの構 築へ貢献できる。また、今回得られたデータをITU-Tのソ フトエラーに関する勧告へ反映することも予定している。

参考文献

- H. Iwashita et al., "Energy-Resolved Soft-Error Rate Measurements for 1-800 MeV Neutrons by the Timeof-Flight Technique at LANSCE," in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 67, no. 11, pp. 2363-2369
- [2] H. Iwashita et al., "Energy-Resolved SEU Cross Section From 10-meV to 800-MeV Neutrons by Time-of-Flight Measurement," in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 70, no. 3, pp. 216-221
- [3] T. Sato, Analytical Model for Estimating the Zenith Angle Dependence of Terrestrial Cosmic Ray Fluxes, PLOS ONE, 11 (8) : e0160390 (2016)
- T. Sato, Analytical model for estimating terrestrial cosmic ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world : Extension of PARMA/EXPACS, PLOS ONE, 10 (12) : e0144679. (2015)

15