

(報道発表資料)

2023.3.16

日本電信電話株式会社  
 国立大学法人北海道大学

## 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 ～全電子機器に起こりうる、宇宙線起因の誤動作対策による安全な社会インフラの構築～

日本電信電話株式会社(本社:東京都千代田区、代表取締役社長:島田 明、以下「NTT」)、および国立大学法人北海道大学(北海道札幌市、総長:寶金 清博、以下「北海道大学」)は共同で、中性子のもつエネルギーごとの半導体ソフトエラー\*1 発生率\*2 を今までは測定がされていなかった10 meV～1 MeV の低エネルギー領域において、“連続的な”データとして実測することに成功し、その全貌を世界で初めて明らかにしました(図 1)。

現在の社会インフラを支える電子機器においては、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対策が不可欠です。中性子エネルギーごとのソフトエラー発生率の解明は、その対策を行う上で最も重要なものです。今後は、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、より安全・安心な社会インフラの実現が可能となります。

本成果は米国東部時間 2023 年 3 月 15 日に IEEE Transactions on Nuclear Science にて公開されました\*3。

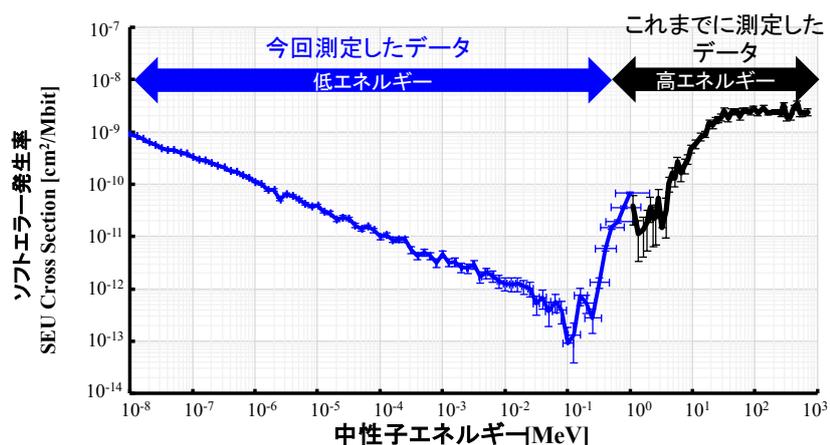
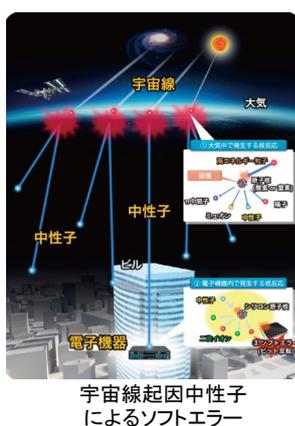


図 1. 低エネルギー中性子のソフトエラー発生率

### 1. 背景

高性能な電子機器が、さまざま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」が増加しています。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、中性子が発生します。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変

わる現象「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およぼす可能性があります(図 2)。

NTTでは、すで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ー株式会社において「ソフトエラー試験サービス」が2016年に開始されました\*4。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・安全な社会インフラの構築に貢献しております。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勧告が制定されました\*5。

電子機器におけるソフトエラーの対策を行うためには、その機器毎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ります。一方で、ソフトエラーの故障頻度は、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、ソフトエラー発生率のエネルギー依存性(中性子が持つエネルギーごとのソフトエラー発生率)の詳細なデータが不可欠でした。

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(1 MeV~800 MeV)領域におけるソフトエラー発生率を2020年に世界で初めて測定しました\*6。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1 MeV以下でのソフトエラー発生率を解明しました。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ました(J-PARC Proposal No.2022A0249)。

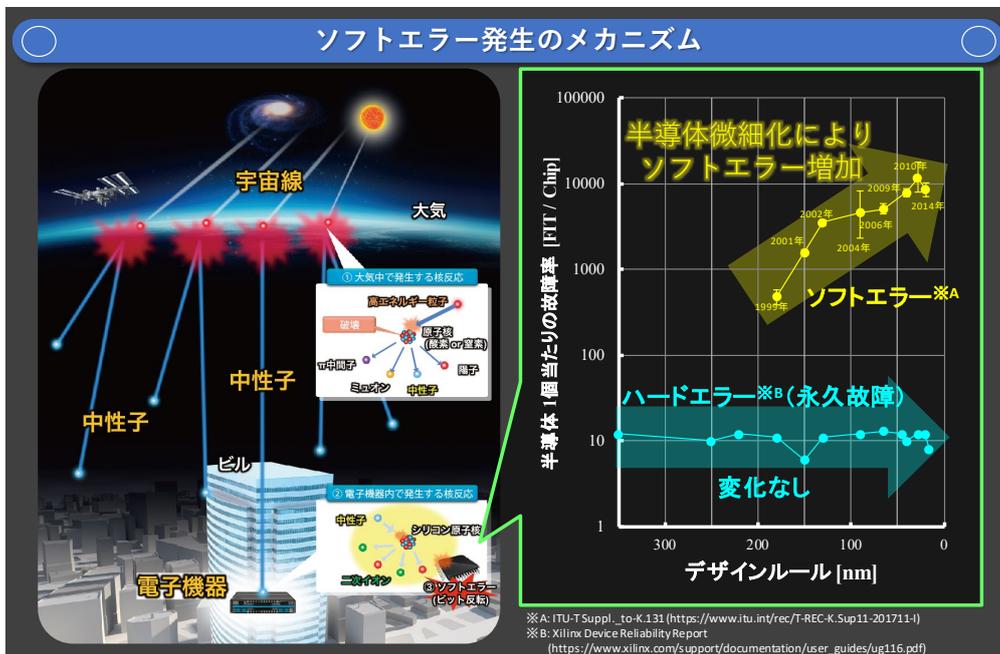


図 2 ソフトエラー発生メカニズム

## 2. 研究の成果

本成果より、ソフトエラー発生率は、0.1 MeV 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あることを解明しました。また、FPGA\*7 のエネルギーごとのソフトエラー発生率を連続的に高分解能で実測することができました(図 3)。

これにより、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ります。

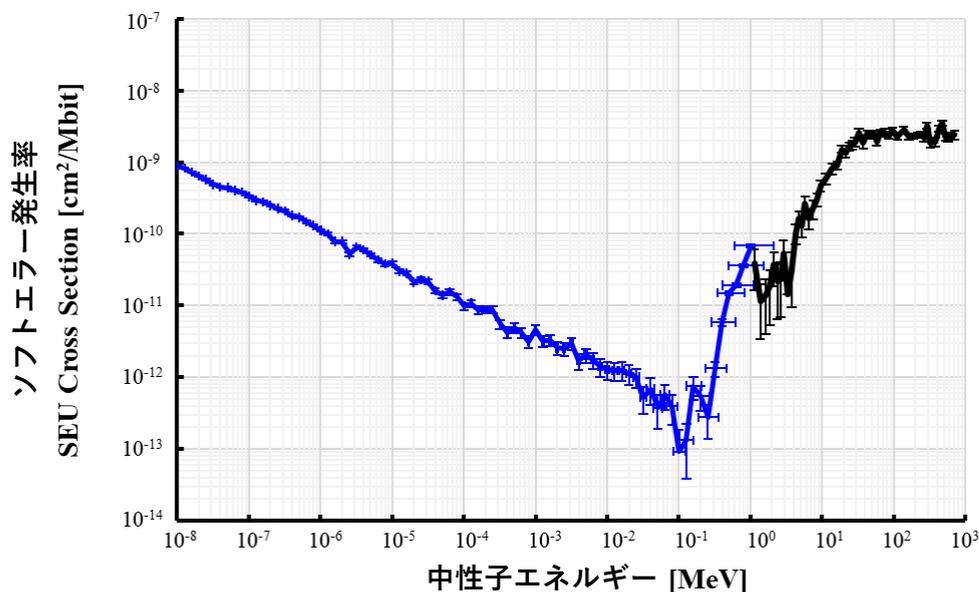


図3 今回測定した中性子エネルギー毎のソフトエラー発生率  
 (青線が今回測定した結果、黒線が2020年に発表した結果)

### 3. 各機関の役割

NTT: 研究全体とりまとめ。FPGA 回路考案及び高速ソフトエラー検出器の設計製作。また、飛行時間法を用いた測定。

北海道大学: 照射される中性子の強度について金箔放射化法<sup>\*8</sup>により評価。

### 4. 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発生率の特性を解明しました。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りました。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ます。

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に貢献していきます。また、将来的にはこれまでの研究成果を宇宙空間における宇宙線対策へ応用することで、宇宙統合コンピューティング・ネットワーク<sup>\*9</sup>の実現に寄与するとともに、人類の宇宙進出へも貢献していきます。

#### 【参考】本研究における分析手法

本研究では、1 MeV 以下の低エネルギー中性子によって発生するソフトエラーを2020年に発表した高速ソフトエラー検出器を用いて飛行時間法で測定しました。飛行時間法とは、中性子のある

一定の距離飛行させた時の時間を測定することで、速度を算出し、運動エネルギーへ変換する方法です。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ウェア検出器を用いて測定しました(J-PARC Proposal No.2022A0249)。また、この施設で照射される中性子の強度は北海道大学が金箔放射化法により評価しました。この実験では、FPGA のエネルギーごとのソフトウェア発生率を連続的に高分解能で実測することができました

このデータから、ソフトウェア発生率は、0.1 MeV 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ます。これは、半導体中に微量に存在するボロン 10 の影響と想定しています。そして、低エネルギー中性子の中でも熱中性子<sup>\*10</sup>と呼ばれる 25 meV( $2.5 \times 10^{-8}$  MeV) 付近のエネルギー帯の中性子のソフトウェア発生率が高くなっていることがわかります。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します(図4)。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ます。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ウェア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ります。

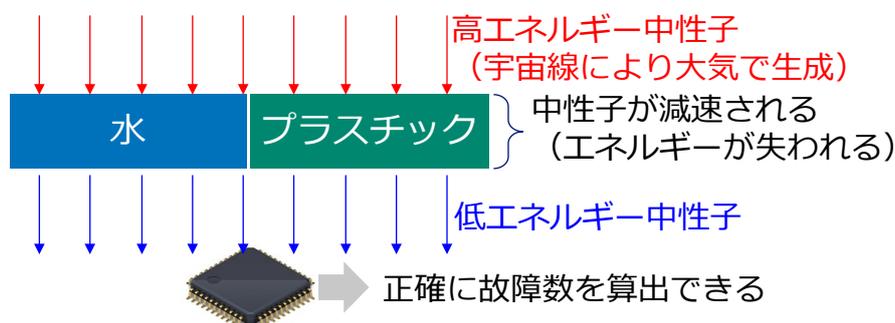


図4 熱中性子の生成過程

### <用語解説>

\*1 ソフトエラー:

永久的にデバイスが故障してしまうハードエラーとは異なり、デバイスの再起動やデータの上書きによって回復する一時的な故障のこと。

\*2 ソフトエラー発生率:

ここでは、単位面積あたり1個の中性子がソフトウェアを引き起こす確率のことを言う。専門的には SEU(Single Event Upset)クロスセクションと定義される。もしくは、単位時間当たりにソフトウェアが発生する確率と定義される場合もある。

\*3 掲載誌:IEEE Transactions on Nuclear Science

論文タイトル:Energy-resolved SEU cross section from 10-meV to-800 MeV neutrons by time-of-flight measurement

DOI: [10.1109/TNS.2023.3245142](https://doi.org/10.1109/TNS.2023.3245142)



\*4 NTT ニュースリリース「宇宙線に起因する電子機器の誤動作「ソフトエラー」を再現させる「ソフトエラー試験サービス」を開始」(2016年12月19日)

<https://group.ntt.jp/newsrelease/2016/12/19/161219a.html>

\*5 NTT ニュースリリース「通信装置のソフトエラー対策、ITU-T 国際標準制定」(2018年11月22日)

<https://group.ntt.jp/newsrelease/2018/11/22/181122a.html>

\*6 NTT ニュースリリース「世界で初めて半導体ソフトエラーを引き起こす中性子のエネルギー特性を測定」(2020年11月25日)

<https://group.ntt.jp/newsrelease/2020/11/25/201125a.html>

\*7 FPGA:

ユーザーが現場(Field)で論理回路をプログラミングできるデバイス。

\*8 金箔放射化法:

金箔に中性子線を照射した際に生成される放射性的 Au-198 からのガンマ線を測定することによって、照射された中性子の数を算出する手法。

\*9 NTT R&D Website 「宇宙統合コンピューティング・ネットワークの取り組み概要」

[https://www.rd.ntt/research/JN202210\\_19855.html](https://www.rd.ntt/research/JN202210_19855.html)

\*10 熱中性子:

25 meV 付近のエネルギーの中性子のこと。中性子が物質中で散乱を繰り返すと、その物質の原子の持っている熱運動エネルギーと平均的に等しくなるので、「熱」中性子と呼ばれる。

■本件に関する報道機関からのお問い合わせ先

日本電信電話株式会社

情報ネットワーク総合研究所 広報担当

nttrd-pr@ml.ntt.com

国立大学法人北海道大学

<1>研究内容に関するお問い合わせ

北海道大学大学院工学研究院 応用量子科学部門

准教授 佐藤 博隆(さとう ひろたか)

TEL:011-706-6679 Email:h.sato@eng.hokudai.ac.jp

教授 加美山 隆(かみやま たかし)

TEL:011-706-6651 Email:takashik@eng.hokudai.ac.jp

<2>報道に関するお問い合わせ

北海道大学 社会共創部 広報課 広報・渉外担当

TEL:011-706-2610 Email:jp-press@general.hokudai.ac.jp