

放射線工学部会セッション

環境放射線と半導体デバイスのソフトウェア

Soft errors in semiconductor devices due to environmental radiation

北海道大学における中性子ソフトウェア研究の現状

Recent research activities for neutron-induced soft errors in Hokkaido University

*佐藤 博隆¹, 岩下 秀徳², 木内 笠^{1,2}¹北海道大学, ²NTT 宇宙環境エネルギー研究所

北海道大学大学院工学研究院の 32 MeV 電子線形加速器駆動パルス中性子源「HUNS」では、宇宙線中性子に起因する半導体利用電子機器“システム”のソフトウェアに関する対策試験を 2012 年度より行っている。宇宙線中性子は一次宇宙線である主に陽子などの高エネルギー粒子により発生して地上に降り注いでいる二次宇宙線であり、そのエネルギーは meV から GeV に渡る。高速中性子も含まれているため、地上の建物の中に設置されている電子機器に入射し得る。高速中性子は閾値核反応や核破砕反応といった荷電粒子生成反応を引き起こすため、電子機器内でビット反転 (SEU) が起こり得る。このビット反転により一時的なメモリエラーが起り、電子機器の誤動作が起こり得る。これをソフトウェアと呼び、半導体メーカーなどで対策が急務となっている。また、半導体から構成される電子機器“システム”のレベルの観点からも対策が求められている。多数の電子機器システムを運用するためシステムレベルではソフトウェアの発生頻度が高い情報通信ネットワークの分野において、中性子ソフトウェア対策試験に関する国際標準 (ITU-T) が 2018 年に制定されている。このような背景から、HUNS における“システム”レベル試験が活発となっている。

高強度の高速中性子を電子機器システムに照射することで、自然界に比べ多くのソフトウェアを引き起こすことができる。これをソフトウェア加速試験と呼び、ソフトウェア対策の実確認と、自然界でのエラーレートの推定の二つの観点から重要となっている。HUNS におけるソフトウェア加速試験の大きな特長は、直径 250 mm の大面積ビームラインを 3 本同時使用することができることであり、“システム”レベルソフトウェア加速試験に向いている[1]。また、高強度すぎる中性子ビーム照射は電子機器システム内のあちこちでソフトウェアが生じ、ソフトウェア評価実験を継続することが困難である。しかし、HUNS の高速中性子束は線源から 6 m の位置で 10^5 n/cm²/s 以下程度なので、実験継続性の高い適度な高強度ビームであると言える。

一方、HUNS の中性子エネルギースペクトルは地上における宇宙線中性子のエネルギースペクトルとは形状が異なるため、中性子束の比から単純に自然界におけるエラーレートの推定を行うことはできない。そこでまず、超高速ソフトウェア検知回路を実装した三種類の FPGA を用いて、LANSCE において 1~800 MeV の中性子に関するエネルギー高分解能な SEU 断面積の絶対値を世界で初めて実測した[2]。そして、これら FPGA のソフトウェアレートを HUNS ならびに住重アテックスの 18 MeV 陽子サイクロトロン中性子源で測定した。また、既知の SEU 断面積と PHITS で計算した各中性子施設の中性子エネルギースペクトルを用いて、ソフトウェアレートを計算した。その結果、ソフトウェアレートの測定値と計算値は数十%の範囲内で一致した。一方、1 MeV 以下の SEU 断面積を LANSCE では実測できなかったため、計算値が過小評価されている傾向も確認された。以上のように、計算された中性子エネルギースペクトルの妥当性を確認したため、この情報を基に自然界に対する HUNS のソフトウェア加速係数を求めた所、1100 万倍程度と見積もられた[3]。このように、中性子エネルギー依存の SEU 断面積を実測できたことにより、自然界とは異なる中性子エネルギースペクトル形状を持つ HUNS のソフトウェア加速係数を見積もることができた。

[1] H. Iwashita, H. Sato *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **64** (2017) 689-696.[2] H. Iwashita, G. Funatsu, H. Sato, T. Kamiyama *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **67** (2020) 2363-2369.

[3] R. Kiuchi and H. Iwashita, Private communication, 28th February 2022 and 19th July 2022.

*Hirofumi Sato¹, Hidenori Iwashita² and Ryu Kiuchi^{1,2}¹Hokkaido Univ., ²NTT Space Environment & Energy Lab.