

[課題番号] 2024206002

原子炉で活動するロボットに搭載する電子部品の放射線耐性強化

The enhancement of the radiation tolerance of electronic components in robots working in nuclear reactors

高倉健一郎 ^{#,A)}, 角田功 ^{A)}, 米岡将士 ^{A)},
Kenichiro TAKAKURA ^{#,A)}, Isao TSUNODA ^{A)}, Masashi YONEOKA ^{B)}
^{A)} National Institute of Technology, Kumamoto-College (Kumamoto KOSEN)

Abstract

The utilization of remote-controlled robots is imperative in operations conducted within hazardous environments, such as those characterized by radiation irradiation, where human access is restricted. In addressing this challenge, the present study evaluates the radiation tolerance of consumer-grade single-board computers (SBCs) and flash memory devices under gamma-ray irradiation. The results indicate that certain SBCs exhibit sufficient radiation tolerance, maintaining functionality even after irradiation to high radiation fluences. Of note is the finding that pSLC flash memory exhibited superior radiation tolerance compared to other memory types, maintaining data integrity even at higher fluences. The employment of consumer-grade electronic components in radiation-tolerant robots is a potential avenue for cost-effective and expeditious deployment in nuclear decommissioning and other high-radiation applications.

Keyword: single-board computer, gamma-ray irradiation, radiation tolerance

1. はじめに

福島第一原子力発電所の被災原子力プラントの廃炉作業が行われている。2011 年 3 月 11 日に発生した東日本太平洋沖地震に伴った大津波により東京電力福島第一原子力発電所では放射性物質が原子炉建屋の内外に放出されており、現在までに、複数の廃炉作業ロボットが原子炉内の状況確認を行い、成果を得ている。原子炉格納容器内部のロボットによる放射線線量調査によって約 1~100 Sv/h (平均: 10 Sv/h) という環境であることが明らかになっている[1]。今後さらに、廃炉を進めるためには、廃炉ロボットにより格納容器下に溶け落ちた核燃料と格納容器建材や建屋のコンクリート等が反応した燃料デブリの取り出しが必須となる。サンプルを回収し燃料デブリの分布構造の把握をすることが次なる課題とされている。

近年、民生品半導体素子の活用が注目されている[2,3]。民生品半導体素子は、耐放射線性を強化した専用素子に比べて広範な市場で流通しており入手性において優れているものの、放射線環境下での耐性が十分に検証されていないものが多数である。そのため、民生品半導体素子の放射線耐性を明らかにし、放射線環境下に適用可能なデバイスの選定指針を提示することが、効率的なロボット開発の促進において重要である。本研究は、迅速なロボット開発を実現するために、放射線環境用ロボットに広く利用される民生品半導体素子のシングルボードコンピュータとフラッシュメモリの放射線耐性を調査し、その実用性を検討することを目的とする。

2. 実験方法

2.1 評価試料と評価方法

本実験では、市販されているシングルボードコンピュータ及びフラッシュメモリを対象とし、それぞれのモデルタイプ及び構造別に評価試料として用い

Table1 Evaluated SBCs.

Model	SBC_1	SBC_2	SBC_3
Release date	2018/3	2019/6	2023/10
CPU Clock	1.4 GHz	1.5 GHz	2.4 GHz
RAM	1GB	4GB	4 GB
N数	7	6	1

Table2 Evaluated memories.

Memory type	Structure	Sample
μSD	SLC	2
	pSLC	52
	MLC	25
USB	UM	30

た。実験に使用したシングルボードコンピュータを発売時期、CPU 性能 (CPU クロック)、RAM 容量およびサンプル数を Table 1 に示す。照射による各種試料の耐放射線性は、照射後の各種試料の起動確認を行った。また、照射中の動作確認のため GPIO ピンからのパルス電圧出力を取得した。

実験に使用したフラッシュメモリについてはメモリタイプおよびメモリセル構造を Table 2 に示し、各試料の特性と放射線耐性の関係を評価した。

2.2 ガンマ線照射条件

評価する試料に対して、高崎量子技術基盤研究所のガンマ線照射施設を利用し、放射線耐性の評価を実施した。ガンマ線の線源として ⁶⁰Co を用いて、試料への照射を行った。放射線照射中も動作しているのか確認のために一部のシングルボードコンピュータは電源を接続させた状態で照射を行った。フラッシュメモリは一部を除き電源を接続せず照射した。

照射線量は線源から試料までの距離と時間で調整

し、各試料に対して 0.1 kGy/h、最大 3 kGy までの照射を行った。照射の際は室温かつ紙テープで固定したチャック付きポリエチレン袋に入れて照射した。

3. 実験結果

3.1 シングルボードコンピュータ

各種シングルボードコンピュータにガンマ線を照射し、その後の動作確認を行った。Table 3 に各種シングルボードコンピュータへのガンマ線照射後の動作・非動作の結果を記す。シングルボードコンピュータの起動ができたものを“○”、起動しなかったものを“×”、照射実験を実施していないものには斜線を記載している。2.2 kGy という高い放射線環境下において SBC_1 が正常に動作するとことを確認した。この結果から、SBC_1 は SBC_2 と SBC_3 よりも放射線耐性が高いことが確認できた。SBC_3、SBC_2 と SBC_1 では、基板サイズは同じだが、SBC_1 よりも SBC_2 が、SBC_2 よりも SBC_3 の方が搭載素子の集積度が上がり回路の微細化が進んでいる。一般に半導体素子の微細化が進むと、放射線の影響を強く受けることが知られている。そのため、SBC_2 と SBC_3 の内蔵メモリや電源回路、SoC に重大な影響を引き起こし、損傷を受けたと推察した。この結果、SBC_1 より集積度が高い SBC_2、SBC_3 は、放射線耐性が低下したと考えている。したがって、2.2 kGy 照射に耐えた SBC_1 は放射線環境用ロボット開発のためのシングルボードコンピュータとして最も適している。

3.2 フラッシュメモリ

照射後に起動が確認できたフラッシュメモリの割合を、SLC、pSLC、MLC 及び USB に分類し、その結果を図 8 に示す。SLC に関しては 0.72 kGy 照射後に全試料が起動不可となっている。しかし、サンプル数が 2 つと少なく、耐放射線性を定量的に評価することは困難である。一般的に SLC は耐久性が高く壊れにくいとされているが、SLC のフラッシュメモリは民生品として流通量が少なく高価であるため放射線環境用ロボット開発への適用は困難であると考ええる。一方で、pSLC は高い放射線耐性を示した。0.8 kGy 照射後において 87.5 %、1.1 kGy 照射後において 83 % が起動可能であった。pSLC は SLC と異なり、市場で比較的容易に入手可能であることから、放射線環境用ロボット開発のシングルボードコンピュータ用のストレージとして pSLC の適用が推奨できると考える。MLC に関しては、pSLC と比べて近似曲線の位置も大きく異なっており放射線耐性が低いことが明らかとなった。MLC はデータ保存方法が pSLC と異なり保存ビット数が多いため pSLC よりも耐久性が低下していると考ええる。また、USB メモリに関しては、照射したサンプルは多かったものの、0.78 kGy 以上の照射を受けた試料はすべて起動不可となった。以上の結果から、放射線環境用ロボット開発におけるストレージとしては、SLC よりも入手性が高く、MLC よりも耐放射線性に優れる pSLC が最適である。

Table3 Confirmation of activation of SBCs after gamma-ray irradiation.

	γ -ray dose [kGy]					
	0.24	0.48	0.72	1.01	2.20	3.00
SBC_1	○	○	○	○	○	/
SBC_2	○	○	○	×	/	×
SBC_3	/	/	/	×	/	/

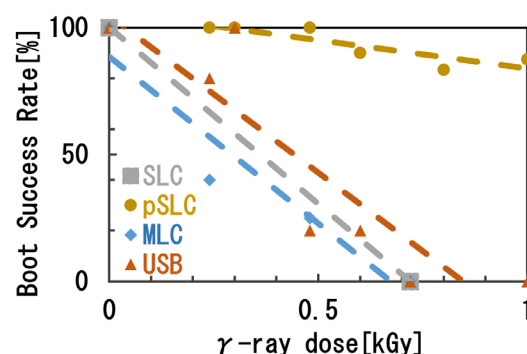


Figure1. Boot ratio of the flash memory to the dose of gamma rays.

4. 結論

本研究では、放射線環境用ロボット開発促進のために民生品半導体素子として、シングルボードコンピュータ及びフラッシュメモリの放射線耐性を評価した。その結果、以下の知見を得た。

シングルボードコンピュータの放射線耐性は集積度に依存する傾向がみられた。SBC_1 は 2.2 kGy のガンマ線照射後に起動が確認できているが、集積度の高い SBC_2 及び SBC_3 は 1.1 kGy 以上の照射量で動作不能となった。また、フラッシュメモリの放射線耐性はメモリセル構造に依存することが分かった。特に pSLC は 1.1 kGy でも高い動作率を示し、放射線環境下におけるシングルボードコンピュータのストレージとして望ましい。

参考文献

- [1] 奥住 直明, “国際廃炉研究開発機構 (IRID) における 1F 燃料デブリ調査・取り出し技術開発の状況”, IRID, p. 7, 2024
- [2] West, J. Knapp, “Radiation tolerance of a small COTS single board computer for mobile robots”, Nuclear Engineering and Technology, Volume 54, Issue 6, pp. 2198-2203, 2022
- [3] 赤石 直貴, 鳴海 智博, “小型民生用高機能イメージセンサの放射線耐性評価”, 日本機械学講演会会, No.15-83, 2015