

[22050]

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

Radiation tolerance reinforcement of electronic components mounted on robots that operate in nuclear reactors

高倉健一郎 ^{#A)}, 米岡将士 ^{A)}, 角田功 ^{A)},

Kenichiro Takakura ^{#A)}, Masashi Yoneoka ^{A)}, Isao Tsunoda ^{B)}

^{A)} National Institute of Technology (KOSEN), Kumamoto College

Abstract

The radiation tolerance of a microcontroller (Raspberry Pi) required for the development of a decommissioning robots was investigated. We found that the flash memory needed to boot the microcontroller had particularly low-radiation tolerance, significantly reducing the operation duration of the microcontroller in a radiation environment. In particular, the flash memory with higher integration had lower radiation tolerance. Investigation of the process by which flash memory becomes inoperable revealed that internal memory information is rewritten due to irradiation, and that this is the limiting factor in the memory lifetime.

Keyword: Radiation tolerance, Raspberry Pi, flash memory, gamma-ray irradiation, total ionization dose (TID)

1. はじめに

電子機器は半導体をはじめとする種々の素子を構成要素としており、素子の高い信頼性が機器開発の根幹を担っている。しかし、高い放射線環境である宇宙空間や原子炉、加速器内部では半導体をはじめ素子特性が劣化するため、民生品では想定しない放射線耐性を考慮した開発が必要とされてきた。現在、日本が総力をあげて取り組んでいる福島第1原子力発電所(1F)の廃炉作業では、燃料格納容器内へロボットが侵入し、炉内の状況確認に成功するなど着実に成果を得ている[1]。核燃料の殆どは溶融して格納容器底部に落下し、容器やさらにその下のコンクリートなどと反応している(燃料デブリ)と推測されており、廃炉作業を進めるためには、燃料デブリの取出しが重要な作業であり、ロボットが放射線量の高い燃料デブリに近づいてサンプル取得・分析することが次なる課題とされている[2]。1F事故後初期の格納容器内部調査で74 Sv/hの空間線量率が計測されたことから、格納容器下部の溶融燃料近傍は1~10 kSv/hという高線量率になると懸念され、ロボットに搭載される電子機器には30 k~300 kGyもの集積照射線量が課されていた。ロボットや電子機器を放射線から遮蔽することは有効な解決策のひとつであるが、機器の小型化・軽量化が求められる利用施設での機器開発指針には反する。したがって、電子素子・回路の放射線耐性強化が重要であると考え

る。半導体をはじめとする電子素子の放射線損傷に関する研究は、著者が継続的に取り組んでおり、原子炉や高エネルギー粒子加速器、宇宙空間など放射線環境における電子素子の放射線耐性強化を図り、素子利用の制限を緩和する上で意義がある。宇宙など、特殊環境下での半導体素子利用には、放射線耐性を強化した、専用の素子が使われており、それに伴って長い開発期間と高い開発費が必要となる。しかしながら、廃炉ロボット開発では目前の課題解決のた

めに速やかに開発を進めることが求められ、民生品の中から電子部品選定が行われている[3]。そのため、使用される電子素子の放射線耐性の調査が並行して行われているが、系統的な評価を行っている例は少なく、開発者の知見に頼りながら開発が進められることがある。ロボット開発にはマイコンなどが利用されており、マイコンは、ロボット制御の主要部品の一つであるが、電子部品が集約された機器であり、放射線の影響を大きく受ける[4]。しかしながら、放射線環境下におけるマイコンの動作不良を解明することは困難であるものの、動作し得る放射線量の特定や劣化過程を知ることは、廃炉ロボット開発の一助になると考える。

そこで、本研究では、ロボット開発に利用されるマイコンとして、Raspberry Piを選び、放射線耐性の調査することを目的として研究を実施した。研究を進める過程で、後述する通り、マイコン本体よりも、付随するメモリの損傷により、マイコンの動作不能に陥る可能性がある。そこで、種々メモリの放射線耐性を重点的に検証することとした。フラッシュメモリは電界効果トランジスタ(FET)を基本構造としているため、個々の記憶素子の放射線耐性について研究されている例は多い[5-8]。FETに放射線が照射されると、ドレイン漏れ電流が増加し、閾値電圧が変化することが指摘されている。これらが原因でフラッシュメモリが動作不良に陥ると考えられており、ガンマ線照射時には数krad(SiO₂) (=数kGy)以上の照射により顕著な影響が表れることが報告されている[5-7]。したがって、Raspberry Pi本体に加えて、フラッシュメモリの放射線耐性を調査することにした。

2. 実験方法

2.1 ラズベリーパイ

ラズベリーパイは表1に記すスペックの機器を選定した。放射線照射と動作確認を繰り返すと実験効

[2 2 0 5 0]

Table. 1 Performance of Raspberry Pi.

Model	<i>Raspberry Pi 3 B+</i>
Released year	2018
CPU	BCM2837
Clock	1.2 GHz
RAM	1 GB

率が悪い。そのため、同種のラズベリーパイを 6 台用意して、2 台ずつに分け、各々異なる照射量のガンマ線を照射することにした。

2.2 フラッシュメモリ

フラッシュメモリの記録容量は年々向上している。これは、データの保存方法や集積化方法が高度化しているためである。したがって、メモリ素子構造の違いにより放射線耐性が異なると予想される。そこで、フラッシュメモリの記録容量の種類に対して放射線照射損傷を調査する。

ラズベリーパイは、通常 micro SD カードに保存した起動プログラムを利用して動作させる。フラッシュメモリのメモリセル構造は、記録容量に応じて single-level cell (SLC), multi-level cell (MLC), triple-level cell (TLC), 3D NAND などがある。SLC は一つのメモリセルに 0 と 1 の 2 つのデータを記憶できるのに対して、MLC では 4 つ、TLC では 8 つのデータ記録が可能である。3D NAND は、メモリセルを積層化してさらに記録密度を向上させている。今回、表 2 に記す 7 種類の micro SD カードを用意して、それぞれの放射線耐性を評価した。表 2 に用意した micro SD の規格をまとめた。フラッシュメモリは、照射量ごとに個別に準備して、照射前後の各々の動作を確認した。

Table. 2 Flash memories used experiment.

Micro SD	Capacities/type	Micro SD	Capacities/type
SD1	16GB/SLC	SD5	16GB/USB2.0
SD2	16GB/pSLC	SD5	64GB/MLC
SD3	16GB/MLC	SD6	64GB/TLC
SD4	16GB/MLC		

pSLC is a flash memory with MLC structure used as SLC mode.

2.3 ガンマ線照射

それぞれの機器への放射線照射は、高崎量子応用研究所の ^{60}Co 照射施設を利用した。 ^{60}Co より放出されるガンマ線を機器に照射した。ラズベリーパイは使用時と同じ状況にするために、電源を接続し、OS を起動させた状態で照射を行った。フラッシュメモリは、電源と接続せず照射した。

照射線量率および照射量は Co60 線源から機器ま

での距離と照射時間で調整し、ラズベリーパイは 0.24 kGy から 2.20 kGy まで、フラッシュメモリは 0.24 kGy から 1.05 kGy までの範囲で、室温でガンマ線を照射した。照射量について、現在、原子炉格納容器内部やタービン建屋などでの放射線量は 1 - 100 Sv/h (平均 10 Sv/h) とされており、ロボットが 100 時間活動するには、1 kSv の耐放射線性が求められることになる。ガンマ線照射量に換算すると 1 Sv = 1 Gy として、1 kGy である。

照射による機器の耐放射線性は、照射後の各種機器の動作確認を行うことで実施した。照射後も動作が確認できた機器と動作不能に陥った機器を区別した。また、動作が確認できたフラッシュメモリは、ラズベリーパイとのデータ転送速度を照射前後で比較した。シーケンシャル書き込みとランダム読み込み、ランダム書き込みの 3 種類である。これらはメモリに対して 10 MB/s の連続したデータの書き込み速度、1 秒当たり 500 回の不規則なデータ書き込み操作及び、1 秒当たり 1500 回の不規則なデータの読み込み操作の速度テストの 3 種類の速度の測定を行っている。測定した速度の結果はシーケンシャル書き込みが b/s (1 秒あたりに転送できるデータの量) で表される。また、ランダム書き込み、ランダム読み込みについては IOPS (input/output per second) で表され、これは 1 秒間に実行可能な回数を示している。

3. 結果と考察

まず、Raspberry Pi への放射線照射による影響を調査した。照射後に Raspberry Pi の軌道を確認した。低照射量(0.24 kGy)より少しずつ照射量を増やしたが、最大照射量の 2.20 kGy までの軌道を確認することができた。つまり、Raspberry Pi 自体は、高い放射線耐性を持っていることが確認できた。今後、さらに高照射量まで実験を進めることで限界照射量を探る必要がある。

次に、フラッシュメモリの耐放射線性について議論する。表 3 に、micro SD へのガンマ線照射後の動作・非動作を確認した結果を記す。Raspberry Pi が起

Table. 3 Flash memories operation after γ -ray irradiation.

Devices	γ ray dose [kGy]					
	0.24	0.30	0.48	0.60	0.72	1.05
SD1	○	-	○	-	○	-
SD2	○	-	○	-	×	-
SD3	○	-	○	-	×	-
SD4	○	-	×	-	×	-
SD5	○	-	×	-	×	-
SD6	○	-	×	-	×	-
SD7	×	-	×	-	×	-

The symbol "x" is do not worked, and "o" is worked after γ -ray irradiation, and "-" is do not irradiate γ -ray.

[22050]

動できたフラッシュメモリには”○”を、起動できなかったフラッシュメモリには”×”を記載している。照射量が高くなるにつれて、起動できないメモリの割合が増えている。マイコン本体は1 kGy以上のガンマ線照射への耐性を有していたが、OSを起動するフラッシュメモリが先に動作不能に陥る結果となった。Raspberry Piをロボット操作用マイコンとして使用するためには、高耐放射線性を有するフラッシュメモリを探す必要がある。

メモリごとの放射線耐性を比較すると、micro SDカードでは、SD7(3D NAND)やSD4-SD6(MLC, TLC)など集積度を高めたフラッシュメモリは比較的低いガンマ線照射により動作不能となっているが、SD1(SLC)は、0.72 kGyまで動作しており、これ以上のガンマ線照射でも耐える可能性がある。micro SDでは、メモリ構造の違いによりめいかに放射線耐性が異なることが分かった。つまり、単一セルへの書き込み情報が少ない構造ほど放射線耐性が高くなっている。メモリの集積化により放射線耐性が低くなることが判明した。特にメモリセルが積層化された3D NAND構造(SD7)では、放射線照射による影響を

受けやすいことが分かった。

図2に放射線照射前後の、USB Dのデータ転送速度を比較した。照射後に、若干速度が低下しているようにも見えるが、その差はほとんどない。したがって、入出力に関連する回路部分での放射線の影響はほとんどないといえる。

3. まとめ

以上のことから、USBフラッシュメモリによるRaspberry Pi起動について放射線の影響を受けていることがわかった。起動状況及び内部データの状況から判断するに、主に受けている放射線の影響はトータル・イオン・ドーズ効果であると考えられる。トータル・イオン・ドーズ効果によりフラッシュメモリ内部に電荷が蓄積されるとリーク電流が流れる。これによってメモリに保持されている電荷が失われる。データの配列の一部がトータル・イオン・ドーズ効果によって変化してしまい、データが正しく読み取れなくなり文字化けが発生し、起動不可となっていると考えられる。この影響は放射線の照射線量が多いほど強く、顕著に表れている。

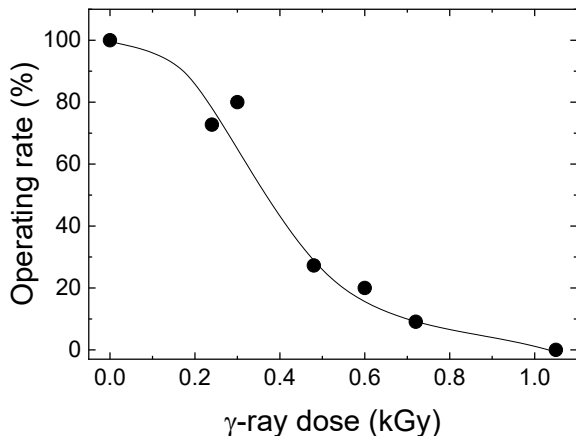


Fig. 1. Operating rate of the flash memories after the γ -ray irradiation.

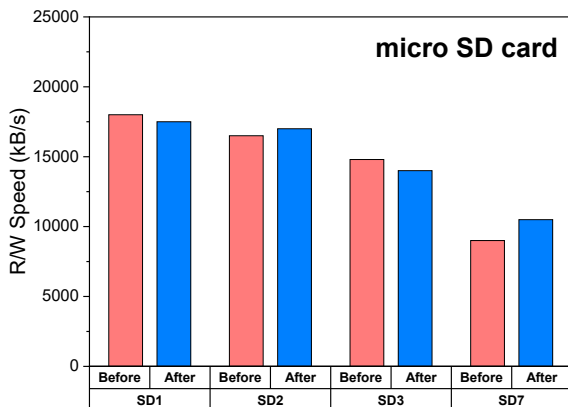


Fig. 2 Sequential write speed of micro SD cards before and after the γ -ray irradiation.

参考文献

- [1] Edditional Office, “Development of Disaster Management Robots for Use in Investigating Nuclear Accidents,” Journal of Disaster Research, Vol.3, No.4, pp. 305-306, August 2008.
- [2] Tomoharu Doi, Mitsuyoshi Shimaoka, Shigekazu Suzuki, “Creative Robot Contests for Decommissioning as Conceived by College of Technology or KOSEN Educators,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.34, No.3, pp.498-508, June 2022.
- [3] Kenjiro Obara, Satoshi Kakudate, Kiyoshi Oka, Akira Ito, Toshiaki Yagi and Yosuke Morita, “Development of Radiation Hardness Components for ITER Remote Maintenance,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.10, No.2, pp.121-132, April 1998.
- [4] Andrew West, Jordan Knapp, Barry Lennox, Steve Walters, Stephen Watts, “Radiation tolerance of a small COTS single board computer for mobile robots,” Nuclear Engineering and Technology, Vol.54, pp. 2198-2203, December 2022.
- [5] Zhangli Liu, Zhiyuan Hu, Zhengxuan Zhang, Hua Shao, Ming Chen, Dawei Bi, Bingxu Nig, Ru Wang, Shichang Zou, “Total ionizing dose effects in high voltage devices for flash memory,” Nuclear Instruments and Methods in Physiscs Research B, Vol.268, pp.3498-3503, September 2010.
- [6] Zhangli Liu Zhiyuan Hu, Zhengxuan Zhang, Hua Shao, Ming Chen, Dawei Bi, Bingxu Ning, Shichang Zou, “Comparison of TID response in core, input/output and high voltage transistors for flash memory,” Microelectronics Reliability, Vol.51, pp.1148-1151, March 2011.
- [7] Bingxu Ning, Zhengxuan Zhang, Zhangli Liu, Zhiyuan Hu, Ming Chen, Dawei Bi, Shichang Zou, “Radiation-induced shallow trench isolation leakage in 180-nm flsh memory technology,” Microelectronics Reliability, Vol.52, pp.130-136, August 2011.
- [8] Sandhya Chandrashekhar, Helmut Puchner, Jun Mitani, Satoshi Shinozaki, Mohamed Sardi, David Hoffman, “Radiation induced soft erros in 16 nm floating gate SLC NAND flash memory,” Microelectronics Reliavility, Vol.108, p.113631 (8 pages), March 2020.