

[2023206003]

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 enhancement of Electronic Components in Decommissioning Robots

高倉健一郎^{#A)}, 角田功^{A)}, 米岡将士^{A)},
Kenichiro Takakura^{#A)}, Isao Tsunoda^{A)}, Masashi Yoneoka^{A)}
^{A)} National Institute of Technology, Kumamoto College

Abstract

The radiation tolerance of a microcontroller (Raspberry Pi) required for the development of decommissioning robots was investigated. 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. We found that certain high-performance flash memories have high radiation tolerance. Investigation of the process by which flash memory becomes inoperable revealed that internal memory information is rewritten owing to irradiation, leading to limited lifetime for memory.

Keyword: Radiation Tolerance, Microcontroller, gamma-ray irradiation, Flush Memory

1. はじめに

現在、福島第一原子力発電所では、原子炉などを解体する廃炉作業が進められている。ここでいう廃炉作業とは、「福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」に基づき、汚染水対策、使用済燃料プールからの燃料取り出し、燃料デブリ取り出し、廃棄物対策などを行うことである^[1]。昨今では、原子炉格納容器内の調査や燃料取り出しの準備として堆積物の除去作業や、ALPS 処理水の海洋放出などを行っている。2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）と、それに伴う津波による原子力事故で生じた放射線物質である核燃料や、炉内に溶け落ちた燃料（燃料デブリや、燃料が混入した原子炉、格納容器、建屋の建材なども含まれる）などの調査や回収は、人体に影響を及ぼすため、人が立ち入って作業を行うことは非常に困難である。そのため、人の代わりに遠隔操作が可能な廃炉ロボットが開発され、被ばくなどの作業リスクの低減に寄与している。廃炉ロボットは作業用途と調査用途に分けられる。活用実績のある実例としては、ウォータージェットによる除染を行う”高圧水除染装置(Arounder)”や、格納容器からの漏えい状況を確認する”水上ポート”などがある^[2]。

これら廃炉ロボットには様々な半導体素子が使用され、ロボットに使用する素子には放射線への耐性が求められる。放射線が物質に当たると、その物質の性質を変えてしまうことがある。特に、電子部品などは強い放射線環境では部品の劣化や誤作動を起こしやすい。廃炉ロボットのセンサーや、カメラなどに使用される電子部品に放射線が当たり損傷を受けると、回路が動作不良に陥り廃炉作業の中断や回収が余儀なくされる。強い放射線環境下のため、人によるロボットの回収も困難になるなどの課題も予想される。最悪の場合、ロボットの回収が不可能になると、ロボット自体がデブリとして原子炉内に残されることになるという問題もある。実際に開発されているロボットには、放射線に強い部品の使用や

遮蔽の装着など対策をしているが、燃料デブリなど強い放射線を発する物質の近くでは長時間作業することは難しく、制約となっている^[3]。

開発している原子炉内探査ロボットの駆動回路制御にはマイコン（Raspberry Pi）を使用しており、起動にはフラッシュメモリ内の OS データが必要である。原子炉内探査ロボットの駆動回路制御のマイコンである Raspberry Pi と起動のために必要なフラッシュメモリの放射線耐性を明らかにし、利用できる半導体素子について調査する必要がある。

2. 実験方法

2.1 評価試料

本研究の実験で使用する Raspberry Pi 及び Raspberry Pi 起動用 microSD カードについては製品化されているものを使用する。

今回の実験に使用した microSD カードの容量はすべて 16 GB で、様々なメーカーの少し古い規格のものであることを条件として選定した。市販のメモリの規格は、記録容量や動作速度がより高機能になっている。それらの多くはメモリを大容量化するために一つのメモリセルが微細化され、電気配線が短く、立体的に構成されている。微細化により容量を増やすことができ高速動作も行えるためメモリの性能が向上する。しかし、微細化が進むと放射線の影響を受けやすいというデメリットが存在する。例えば、微細化することにより一つのデータを記憶・保持する電荷の量が減少する。また、立体化をすることによりメモリ自体の密度が増え、放射線のエネルギーに接触する可能性が高まる。そのため、最新のメモリでは放射線による電離効果の影響から電荷を与えられると不具合を引き起こす可能性が高まることが考えられる。過去の研究^[4]では、古い規格の USB フラッシュメモリの放射線耐性を評価した。結果としては、5 種類の試料のうちの 1 種類のみガンマ線照射量 0.6 kGy まで起動確認ができた。このことから、古い規格の USB フラッシュメモリには必ずしも

[2023206003]

Table 1. Variation of microSD card.

実験内での名称	メーカー	発売時期
microSD_A	SanDisk	2014/2発売
microSD_B	GREEN HOUSE	2014/11月上旬
microSD_C	GREEN HOUSE	2012/4下旬
microSD_D	BUFFALO	2013/5月上旬
microSD_E	BUFFALO	2015/7中旬
microSD_F	HIDISC	2016/10/31
microSD_G	ELECOM	2017/6下旬
microSD_H	キオクシア	2015/12/12
microSD_I	SUPER TALENT	2014/6/5
microSD_J	Transcend	2018/4発売
microSD_K	三菱ケミカルメディア	2012/5発売
microSD_L	PRINCETON	2018/4/5

Table 2. Raspberry Pi specification.

モデル	Raspberry Pi 4 Model B
発売日	2019/6/24
CPU	Broadcom BCM2711
クロック周波数	1.5GHz
RAM	8GB
消費電流	1.7A
定格電圧	DC 5V

放射線耐性が高いわけではないことが判明している。

今回の実験では、同様に放射線耐性がより高いと予想される、世代が古い規格の microSD カードを対象として選定した評価試料を表 1 に示す。また、実験で使用した Raspberry Pi の仕様を表 2 に示す^[5]。

2.2 実験方法

原子炉で発生する放射線はガンマ線、 β 線の割合が高いと考えられ^[6]、廃炉ロボットには放射線防護が容易ではないガンマ線についての耐性が求められる。ロボットが活動する環境は約 10 Gy/h と計測され、活動時間を 100 時間と仮定すると、ロボットに使用される素子には総線量 1.0 kGy 程度の耐性が要求される。

評価する試料へのガンマ線照射は、高崎量子応用研究所の ⁶⁰Co 照射施設を利用した。microSD カードには、照射線量率 0.1 kGy/h のガンマ線を室温で 0.2, 0.4, 0.7 及び 1.0 kGy 照射した。Raspberry Pi のいくつかの GPIO ピンは、任意の周波数でクロック信号を生成するためのハードウェアクロックジェネレータを内蔵しており、GPCLK と呼ばれる。GPIO 4(7 番ピン)は、GPCLK0 としても使用される。これは特定の周波数の正確なクロック信号が必要な回路やデバイスに利用でき、ロボットへの出力として適切なピンだと考える。25 番ピンは、GND ピンに割り当てられている^[7]。Raspberry Pi のピンについてはこの二つ

を使用する。Raspberry Pi には、7 番ピンから 3.3 V、25 番ピンから 0 V の二つの出力を 5 秒ごと交互に繰り返すプログラムを起動した状態で、照射線量率 0.05 kGy/h のガンマ線を 20 時間照射した。照射中の Raspberry Pi からの出力信号をメモリハイロガー LR8401 にて記録した。

2.3 評価方法

放射線照射前と照射後の試料の起動に関する確認を行った。確認方法は Raspberry Pi を使用した起動の確認である。また、microSD カード内部のデータの確認として PC に接続し、ファイルのプロパティ情報などの確認を行った。また、Raspberry Pi を使用し、「Raspberry Pi Diagnostics」を利用して内部データに関する処理の確認を速度測定にて行った。

Raspberry Pi Diagnostics は 3 種類の特性を確認している。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 秒あたり 500 回の不規則なデータ書き込み操作及び、1 秒あたり 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。

これらの数値は放射線の照射前と照射後のメモリの特性を調査することによりデータの伝送速度からメモリの動作について確認を行う。

放射線照射後の試料で、Raspberry Pi で起動可能だったものと起動不可だったものの内部データの比較を行った。比較を行うことにより、実際に Raspberry Pi の起動に必要なファイルが破損していたかどうかを確認できるのではないかと予想した。照射後の OS データは、ファイル比較ソフト「WinMerge」^[8]を用いて比較した。ソフト上で比較したいファイルやフォルダを複数選択し、比較することができる。比較に成功すると一致したファイル、異なるファイルの一覧が表示され、この結果を HTML 形式のレポートに出力することができる。

照射後の起動可能な OS データ、起動不可な OS データをそれぞれ Windows PC にコピーし、それらのデータを比較ソフト「WinMerge」を用いて確認した。

この背景としては、microSD カードの OS データを直接ソフトで比較すると、比較中の microSD カードが破損し Windows PC で読み込めなくなったことがあったため、Windows PC で照射後の microSD ファイルの OS データをコピーした後に照射前の OS データと比較した。

3. 実験結果

3.1 素子の起動

表 3 にガンマ線照射後の microSD カードの照射量及び動作の可否を示す。各 microSD カードに対して

[2023206003]

Raspberry Pi で起動確認を行った。起動が確認できたものは“○”，1分間待機しても起動が確認できなかったものは“×”，起動できなかったがランプが点灯したり，エラー画面が出力されたりと反応があったものは“△”とした。PC でファイル情報が確認できたものは緑色とした。

Raspberry Pi での起動が確認できたものは 0.2 kGy の 5 種のみだった。したがって，“古い規格のメモリは放射線耐性がある”という予想に反していたと考える。しかし，0.2 kGy まで耐性をもつメモリがあるという事実により，メモリに全く耐性が無いわけではなく，放射線量 0.2 kGy まで耐えられることがわかった。また，Raspberry Pi で起動できなかったが Windows PC で内部のデータを確認できたものもある。言い換えると，内部のデータが完全に破壊されていなくても Raspberry Pi が起動でき。ないメモリがあった。このことから，Raspberry Pi で起動でき

なかったものは，ガンマ線による影響で OS データが損傷を受けたと予想される。

3.2 データ転送速度

ガンマ線を照射した後に，Raspberry Pi での起動が確認できた 5 種類の microSD カードの中で照射前と照射後の動作の影響について調査を行った。図 1 は，起動できたそれぞれ 5 種類の microSD カードについての 0.2 kGy のガンマ線照射前後のシーケンシャル書き込み速度(Sequential Write Speed; SWS)，ランダム書き込み速度(Random Write Speed; RWS)，ランダム読み込み速度(Random Read Speed; RRS)の速度比較と変化率を示したものである。気になる違いは microSD_G のランダム書き込みの損傷度が大きいという点だけである。しかし，これは速度測定の際のばらつき範囲内におさまっており，この他の速度の変化率にはほとんど違いが見られなかった。このことから，メモリとしての性能が放射線による影響で低下したとはいえないことが分かった。

Table 3. Availability of microSD cards after gamma-ray irradiation.

	gamma-ray dose[kGy]				
	0.2	0.4	0.7	1	
microSD_A	×	×	×	×	×
microSD_B	△	△	△	×	×
microSD_C	△	△	×	×	×
microSD_D	×	×	×	×	×
microSD_E	○	△	×	×	×
microSD_F	×	×	×	×	×
microSD_G	○	×	×	×	×
microSD_H	○	△	△	△	△
microSD_I	×	×	×	×	×
microSD_J	×	×	×	×	×
microSD_K	○	×	×	△	×
microSD_L	○	×	△	△	×



Figure 1. I/O speed of microSD cards before gamma-ray irradiation and damage coefficient after irradiation.

3.3 照射後の内部データ損傷

Windows PC にて microSD 内部データを確認した。内部のデータとは Windows PC 上で確認できるファイルの更新日時やファイル名など構成情報を示すプロパティ情報のことである。起動できる microSD の OS データと，起動できない microSD の OS データを比較し，相違点としてこれらのファイルが出力されると予想した。図 2 に照射前後の OS データ（起動不可）のファイル比較の結果を示す。

照射後は，起動に必要なファイルが書き換えられていることがわかった。したがって，これらの OS データは放射線によるデータの書き換えにより，Raspberry Pi による起動ができなかったと予想される。

microSD カードが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

Before irradiation

File name	Date	Type	Size
名前	更新日時	種類	サイズ
overlays	2023/07/04 17:01	ファイルフォルダー	
issue	2022/09/22 0:34	テキストドキュメント	1 KB
config	2022/09/22 0:04	テキストドキュメント	3 KB
cmdline		テキストドキュメント	1 KB
kernel8.img	2022/08/30 10:43	Windows IsoFile	8,001 KB

After irradiation

paIt(.73L	1980/08/14 2:43	ファイルフォルダー	
癩		ファイル	131,209 KB
0	1980/01/04 8:00	ファイル	2,360,449 ...
0-700/DG	2086/10/30 10:35	/DG ファイル	1,181,847 ...
issue	2022/09/06 19:16	テキストドキュメント	1 KB
{4AD04T*9HF	2022/08/18 14:43	9HF ファイル	84,847 KB
cERnED+9E	2027/08/30 10:47	9E ファイル	531,265 KB

Figure 2. Files of USB memory before/after the γ -ray irradiation.

[2023206003]

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 microSD カード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、データの書き換えや改変が発生し、Raspberry Pi での起動が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なると考えられる。

4. 結論

今回の研究では、昨年の USB フラッシュメモリでの研究に引き続き、放射線環境下において動作するロボットに必要な半導体素子として microSD カードと Raspberry Pi の性能評価を行った。微細化が進むことでメモリあたりの電荷の量が減少し放射線の影響を強く受けやすくなっているため、対策として規格が古い microSD カードについて複数のメーカーのものを用意し評価を行った。

結論として、古い規格の microSD カードにはあまり放射線耐性がないことがわかった。起動できたメモリは 5 種類あったが、どれも 0.2 kGy までの耐性しかなく高い放射線耐性があるとはいえない結果であった。放射線照射後に Raspberry Pi の起動ができなかった microSD カードについて Windows PC を使用した内部データの確認と比較を行った。その結果、先行研究の結果と同様に、照射後のいくつかの試料はデバイスのドライバが破損したことにより microSD カードとして認識ができなくなるといった状態であることが分かった。これは、放射線による主な影響であるトータル・イオン・ドーズ効果によるものだと考えられる。照射線量が大きいと動作をしなくなるものがほとんどであった。そのため、ある一定の放射線量を超えると放射線の影響は確実に内部のデータを破損させ microSD カードの使用が不可となることがわかる。

また、今回の研究では先行研究で行っていなかった OS データの比較を行った。Windows PC で起動を確認できる試料で調査するという前提で、Raspberry Pi で起動可能な OS データと起動不可の OS データを比較し、実際に起動に必要なファイルが放射線の影響で破損しているのか確かめるために調査した。結果としては、コマンドラインやカーネルイメージのファイルの破損が確認され、予想通り実際に起動に必要なファイルが破損していることがわかった。しかし、ファイルが破損しすぎていると OS データをコピーすることができず、ソフトでの比較ができなくなるという事実もわかった。総線量が増加するにつれて破損度も増加すると予想していたが、具体的な数値やデータでの結果は得られなかった。

また、Raspberry Pi についても照射実験を行ったことで、Raspberry Pi はフラッシュメモリよりも高い放射線耐性を持っていることがわかった。しかし、今日に至っても半導体不足の影響はまだ続いており、Raspberry Pi の流通には未だ制限がかかっている。

参考文献

- [1] H.Kobayashi, et al., “リニアック技術研究会論文投稿要領”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001
- [2] <http://www.tokai.t.u-tokyo.ac.jp/kyodo/kaihoken/index.html>
- [1] 東京電力ホールディングス, 廃炉への軌跡(最終閲覧日: 2024/2/12)
<https://www.tepco.co.jp/decommission/trajectory/index-j.html?situations=&places=&year=2024>
- [2] 東京電力ホールディングス, 廃炉プロジェクト, ロボットの活用(最終閲覧日: 2024/2/12)
<https://www.tepco.co.jp/decommission/principles/technology/robot/index-j.html>
- [3] Japan Atomic Industrial Forum, 福島第一の現場でロボットが手こずってるけど、機械も放射線で壊れるの?(最終閲覧日: 2024/2/12)
<https://youtu.be/Us3x1j9LJrA?si=tVxw8m2Lgas5JOdL>
- [4] 松本健佑, “半導体素子の放射線耐性の評価”, 熊本高等専門学校, 卒業研究報告書, (2023 年 2 月)
- [5] I-O DATA, “Raspberry Pi 4 Model B (UD-RP4B シリーズ)| Raspberry Pi 4”, (最終閲覧日: 2024/2/8)
<https://www.iodata.jp/product/pc/raspberrypi/ud-rp4b/index.htm>
- [6] 環境省, 放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料, 原発事故由来の放射性物質(最終閲覧日: 2024/2/12)
<https://www.env.go.jp/chemi/rhm/r3kisoshiryo/r3kiso-02-02-04.html>
- [7] Qiita, Raspberry Pi 4 の GPIO ピン配置 (ピンマッピング) について(最終閲覧日: 2024/2/14)
- [8] WinMerge, ダウンロードサイト(最終閲覧日: 2024/2/12)