

## 民生電子部品の宇宙環境における耐放射線性の研究

Research of the radiation tolerance in space environment of COTS devices

明石 健二<sup>1)</sup> 富田 一正<sup>1)</sup> 垣見 征孝<sup>1)</sup> 掛橋 廉晴<sup>1)</sup> 前田 高広<sup>1)</sup>

大島 武<sup>2)</sup> 小野田 忍<sup>2)</sup> 牧野 高紘<sup>2)</sup>

Kenji AKASHI, Kazumasa TOMITA, Yukitaka KAKIMI, Yasuharu KAKEHASHI, Takahiro MAEDA

Takeshi OHSHIMA, Shinobu ONODA, Takahiro MAKINO

<sup>1)</sup>株式会社エイ・イー・エス <sup>2)</sup>日本原子力研究開発機構

小型人工衛星の開発において、民生電子部品の使用が望まれている。そこで弊社では民生電子部品の宇宙環境における動作状況を重粒子線照射試験により把握し、電子部品の宇宙への適合性を検証している。平成 24 年度はマルチプレクサ及び MCU (Micro Control Unit)、MOS-FET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)、DAC (Digital to Analog Converter)、ADC (Analog to Digital Converter)、RS422 ドライバについて重粒子線照射試験を行い、SEE (Single Event Effect) 耐性を検証した。試験の結果、どの試料も想定している運用期間、軌道条件において、十分な放射線耐性を持つことが分かった。試験を実施した各試料について測定項目、結果を報告する。

キーワード：民生電子部品、小型人工衛星、重粒子、シングルイベント

### 1. 目的

小型人工衛星の開発において、民生電子部品の使用が望まれている。これは、宇宙環境で使用することを前提として開発された宇宙用電子部品と比べ、民生電子部品が小型、高性能、省電力、低コスト、短納期であることが理由に挙げられる。しかし、民生電子部品は放射線環境下で使用することを想定していないため、部品の使用にはリスクが伴う。放射線の電子部品への影響は、大きくトータルドーズ (TID: Total Ionization Dose) とシングルイベント (SEE: Single Event Effect) に分けられる。TID は  $\beta$  線、 $\gamma$  線、陽子線により発生する部品の性能劣化である。また、SEE は重粒子の入射により引き起こされる機能障害である。

本研究で想定している小型人工衛星は運用期間が 1 年と短いため、TID による影響は少ないと考えられる。しかし SEE は 1 度の発生で部品そのものや周辺回路を破壊する可能性がある。そこで本研究は、様々な民生電子部品の重粒子線照射試験を行い、宇宙環境への適合性評価を行うことを目的としている。

### 2. 方法

重粒子線照射試験は、AVFサイクロトロン No. 12 散乱ビーム照射試験装置 第 4 重イオン室にて実施した。使用した線種は、 $^{15}\text{N}^{3+}$ 、 $^{20}\text{Ne}^{4+}$ 、 $^{40}\text{Ar}^{8+}$ 、 $^{84}\text{Kr}^{17+}$  である。試料となる電子部品は、予めパッケージをデキャップしておき、内部の半導体素子を露出させている。SEE 発生頻度は、照射試験により得られた反転断面積、LET 閾値と CREME96 (Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics (1996 Revision)) を用いて計算した軌道上放射線分布より算出している。その際、SEE の発生状況により以下の手法で発生頻度を算出している。

①ワイブル関数を用いた解析：ワイブル関数により LET (Linear Energy Transfer) と反転断面積の関係を求め、軌道上の放射線分布から発生頻度を算出する。

②ワースト解析：SEE の発生した線種の次に LET の大きい線種で 1 回 SEE が発生したと仮定し反転断面積を求め、軌道上の放射線分布から発生頻度を算出する。全線種で SEE が発生しなかった場合は最も LET の大きい Kr で 1 回 SEE が発生したと仮定する。

本研究で想定している軌道条件は、高度 700km、軌道傾斜角 98 度、衛星構体は 2mm 厚アルミニウム、運用期間 1 年である。算出した SEE 発生頻度と想定運用期間を比較し、部品の放射線耐性を評価している。

表 1 に本年度試験を実施した試料を示す。

表 1 試料一覧 (平成 24 年度)

No.	試料	概要	評価項目	試料数
1	マルチプレクサ	CMOS アナログ マルチプレクサ	SEL (Single Event Latch-up) 動作異常	3
2	MCU	8bit マイクロ コントローラ	SEL、SEU (Single Event Upset) 動作異常	1
3	MOS-FET	P-ch パワーMOS-FET	SEGR (Single Event Gate Rupture)	3
4	DAC	16bitDA コンバータ	SEL、アナログ出力異常	2
5	ADC	16bitAD コンバータ	SEL、シリアル出力異常	2
6	RS422 ドライバ	RS422 ドライバ	SEL、シリアル出力異常	2

各試料の概要と測定項目を以下に示す。

(1) マルチプレクサ

マルチプレクサは 8ch 切り替えが可能であり、ch の指定は 3 つのデジタル入力で行う。動作異常を検出するため、各 ch に異なる電圧を入力し、ch を切り替えて各 ch の出力電圧を測定した。また、SEL を検出するため消費電流を測定した。

(2) MCU

MCU は 8bit のマイクロコントローラであり、32kbyte の Flash ROM と 2kbyte の RAM を内蔵している。試験では RAM での SEU 検出のために照射中の RAM 状態を監視し、Flash ROM での SEU 検出のために照射前後で ROM 内容を比較した。また、試験全体を通して SEL 検出のための消費電流測定と上記以外の異常の監視を行った。

(3) MOS-FET

試験を行った FET は大電力を扱うことのできる P-ch パワーMOS-FET である。試験時はドレイン-ソース間電圧を定格値の 63%とし、SEGR 検出のためにゲート電流を測定した。本試料は N、Ar、Kr の 3 線種のみ照射した。

(4) DAC

試料は 16bit の DA コンバータであり、試験時は一定電圧を出力するようデジタル入力を行い、その際のアナログ出力を監視した。また、SEL 検出のために消費電流を測定した。本試料は Ne、Ar、Kr の 3 線種のみ照射した。

(5) ADC

試料は 16bit の AD コンバータであり、試験時は一定電圧を入力し、その際のデジタル出力を監視した。また SEL 検出のために消費電流を測定した。本試料は Ne、Ar、Kr の 3 線種のみ照射した。

(6) RS422 ドライバ

試料は RS422 通信用ドライバであり、送信受信の両機能を有する。試験時は SEU 検出のために RS422 通信を行い、シリアル出力を監視した。また SEL 検出のために消費電流を測定した。本試料は Ne、Ar、Kr の 3 線種のみ照射した。

### 3. 結果及び考察

各試料の試験結果を以下に示す。

(1) マルチプレクサ

マルチプレクサの照射試験結果を表 2 に示す。表中の LET 閾値は、照射角度を基板面に対し、45[deg]とすることで、照射 LET を高めた値である。

- SEL

全線種で SEL は発生しなかったため、ワースト解析により発生頻度を算出した。

- 動作異常

全線種で動作異常は発生しなかったため、ワースト解析により発生頻度を算出した。

表 2 マルチプレクサ照射試験結果

項目	LET 閾値 [MeV/mg/cm <sup>2</sup> ]	反転断面積 [cm <sup>2</sup> ]	SEE 発生頻度 [event/year]
SEL	48.0	$7.90 \times 10^{-7}$	$2.78 \times 10^{-11}$
動作異常	48.0	$7.90 \times 10^{-7}$	$2.78 \times 10^{-11}$

## (2) MCU

MCU の照射試験結果を表 3 に示す。

- SEL  
Ar、Kr の照射において SEL が発生し、消費電流が増加した。2 線種で SEL が発生したため、ワースト解析にて SEL 発生頻度を算出した。
- SEU (内蔵 RAM)  
全ての線種において SEU が発生した。発生頻度はワイブル関数により算出した。
- SEU (FlashROM)  
試験の結果、Ne の照射において SEU が発生した。発生頻度はワイブル関数により算出した。
- 動作異常  
Ne、Ar、Kr の照射において動作異常が発生した。発生頻度はワイブル関数により算出した。

表 3 MCU 照射試験結果

項目	LET 閾値 [MeV/mg/cm <sup>2</sup> ]	反転断面積 [cm <sup>2</sup> ]	SEE 発生頻度 [event/year]
SEL	5.9	$3.32 \times 10^{-3}$	$1.24 \times 10^{-2}$
SEU@内蔵 RAM	0.5	$5.31 \times 10^{-4}$	$2.84 \times 10^{-2}$
SEU@FlashROM	3.0	$1.66 \times 10^{-4}$	$2.40 \times 10^{-4}$
動作異常	3.0	$4.98 \times 10^{-4}$	$7.44 \times 10^{-3}$

## (3) MOS-FET

MOS-FET の照射試験結果を表 4 に示す。照射線種は N、Ar、Kr の 3 線種である。

- SEGR  
Kr の照射において SEGR が発生した。ワースト解析を行い、発生頻度を算出した。

表 4 MOS-FET 照射試験結果

項目	LET 閾値 [MeV/mg/cm <sup>2</sup> ]	反転断面積 [cm <sup>2</sup> ]	SEE 発生頻度 [event/year]
SEGR	14.0	$3.55 \times 10^{-4}$	$1.94 \times 10^{-3}$

## (4) DAC

DAC の照射試験結果を表 5 に示す。照射線種は Ne、Ar、Kr の 3 線種である。

- SEL  
全線種で SEL は発生しなかったため、ワースト解析により発生頻度を算出した。
- アナログ出力異常  
全線種においてアナログ出力異常が確認された。ワイブル関数により発生頻度を算出した。

表 5 DAC 照射試験結果

項目	LET 閾値 [MeV/mg/cm <sup>2</sup> ]	反転断面積 [cm <sup>2</sup> ]	SEE 発生頻度 [event/year]
SEL	34.0	$8.74 \times 10^{-4}$	$1.49 \times 10^{-9}$
アナログ出力異常	3.0	$5.12 \times 10^{-6}$	$3.40 \times 10^{-1}$

## (5) ADC

ADCの照射試験結果を表6に示す。照射線種はNe、Ar、Krの3線種である。

- SEL  
Krの照射においてSELが確認された。ワースト解析により発生頻度を算出した。
- シリアル出力異常  
全線種で出力異常は発生しなかったため、ワースト解析により発生頻度を算出した。

表6 ADC照射試験結果

項目	LET 閾値 [MeV/mg/cm <sup>2</sup> ]	反転断面積 [cm <sup>2</sup> ]	SEE 発生頻度 [event/year]
SEL	14.0	$5.24 \times 10^{-6}$	$3.70 \times 10^{-5}$
シリアル出力異常	34.0	$8.74 \times 10^{-4}$	$1.46 \times 10^{-9}$

## (6) RS422 ドライバ

RS422 ドライバの照射試験結果を表7に示す。照射線種はNe、Ar、Krの3線種である。

- SEL  
全ての線種においてSELは発生しなかった。そこで、ワースト解析により発生頻度を算出した。
- シリアル出力異常  
全ての線種においてシリアル出力異常は発生しなかった。そこで、ワースト解析により発生頻度を算出した。

表7 RS422 ドライバ照射試験結果

項目	LET 閾値 [MeV/mg/cm <sup>2</sup> ]	反転断面積 [cm <sup>2</sup> ]	SEE 発生頻度 [event/year]
SEL	34.0	$8.74 \times 10^{-4}$	$1.46 \times 10^{-9}$
シリアル出力異常	34.0	$8.74 \times 10^{-4}$	$1.46 \times 10^{-9}$

以上の通り、本年度試験を実施した試料について、小型人工衛星での使用を想定した場合、SEE発生頻度は想定する運用期間に対して小さく、十分な耐放射線性を有することが確認された。

本年度試験を行った部品の一部は弊社で開発中の小型人工衛星にて使用される。今後も民生電子部品の耐放射線性を検証し、人工衛星開発のリソース削減、信頼性の確保に貢献したい。

最後に試料である民生電子部品は、宇宙環境での使用を想定して製造されたものではないため、この結果が部品の優劣を示すものではないということを付記しておく。