

小型衛星搭載機器における民生電子部品の耐放射線性評価

Evaluation of radiation tolerance of COTS device for Small Satellite

富田 一正¹⁾ 原田 次郎¹⁾ 中尾 哲也¹⁾ 明石 健二¹⁾
大島 武²⁾ 佐藤 真一郎²⁾

Kazumasa TOMITA, Jiro HARADA, Tetsuya NAKAO, Kenji AKASHI

Takeshi OHSHIMA, Shinichiro SATO

¹⁾株式会社エイ・イー・エス ²⁾量子科学技術研究開発機構

(概要)

2021年度は、試料として Field-Programmable Gate Array (以下、FPGA という。)を選定し、重粒子線照射試験(以下、試験とする)を実施し、シングルイベント(SEE: Single Event Effect)耐性の確認を行った。選定した試料は小型人工衛星及びその関連機器の開発のため、宇宙環境で使用することを目的として選定した民生電子部品である。試験を実施した試料について、試験結果を報告する。

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

近年、小型人工衛星の開発が盛んになり、衛星搭載機器の低コスト化、小型化及び高機能化が要求されている。これらの要求を満たすため、民生電子部品の使用が望まれている。しかしながら、一般的に民生電子部品は宇宙環境下での使用を考慮して設計されておらず、耐放射線性は不明である。そこで、民生電子部品の宇宙環境における動作状況、劣化状況を放射線試験により確認し、宇宙への適合性を把握する必要がある。

放射線の電子部品への影響は、トータルドーズ(TID: Total Ionization Dose)とシングルイベント効果(SEE: Single Event Effect)の2パターンに大きく分けられる。TIDは β 線、 γ 線、陽子線により発生する電子部品の性能劣化である。SEEは重粒子、陽子の入射により引き起こされる機能障害である。

本研究において、民生電子部品の使用を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る。一方、SEEは1度の発生で電子部品そのものや周辺回路を破壊する可能性がある。本研究は、様々な民生電子部品の試験を行い、宇宙環境における耐放射線性の評価を行うことを目的としている。

2. 実施方法

試験は、AVF サイクロトロンリアルタイムビームモニター照射チャンバーにてカクテルビーム(本試験ではマシンタイムとの兼ね合いでクリプトンのみ照射)を使用し、照射を実施した。

SEE発生頻度は、試験により得られた反転断面積、LET(Linear Energy Transfer)閾値とCREME96(Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics (1996 Revision))を用いて計算した軌道上の粒子フラックスより算出した。発生頻度の算出はSEEの発生状況により、②の手法を適用した。

① ワイブル関数によるフィッティングを行う解析:

ワイブル関数によりLETと反転断面積の関係を求め、軌道上の粒子フラックスから発生頻度を算出する。

② ワースト解析:

SEEが発生しなかった場合は、SEEが1回発生したと仮定し反転断面積を求め、軌道上の粒子フラックスから発生頻度を算出する。

本研究で民生電子部品の使用を想定している小型人工衛星の軌道条件は、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、民生電子部品の耐放射線性を評価した。

表 1 に本年度実施した試験の試料を示す。

表 1 試料一覧 (2021 年度)

試料	用途	主な仕様	照射線種	測定項目	試料数
FPGA	コンポーネントの信号処理装置として使用	プロセス：完全空乏型 SOI ロジックセル：39K IO：LVTTTL、LVDS 等対応 電源電圧：1.0、1.8、3.3V 等 内部 PLL 周波数：450MHz パッケージ：72pin QFN 動作温度範囲：0~+85°C	Kr	SEL (Single Event Latch-up) SEU (Single Event Upset) 異常動作	1

本試験では、SEL、SEU 及び異常動作の測定を実施した。測定項目の詳細を以下に示す。

(a) SEL

ビーム照射中に試料の消費電流をモニタすることで、SEL の発生を測定した。SEL 判定閾値は、試験前に測定した通常動作時の消費電流の 2 倍とし、照射中の消費電流が閾値以上に増加した場合に SEL 発生と判断し、発生回数をカウントした。また、SEL が発生した場合は、試料の電源をリセットし、正常復帰が可能か確認することとした。

(b) SEU

SRAM、ゲート（シフトレジスタ）の状態を PC へ出力し、SEU を計測する。SEU 状態が継続する場合は、電源をリセットし、正常復帰が可能か確認することとした。

(c) 異常動作

ビーム照射中に動作状態にした試料からの出力等をモニタすることで、異常動作の発生を測定した。出力等が正常でない状態になった場合、または SEL に該当しない状態となった場合を異常動作と判断し、発生回数をカウントした。また、異常動作が発生した場合は、試料の電源をリセットし、正常復帰が可能か確認することとした。

3. 結果及び考察、今後の展開等

クリプトンの照射において、SEL、SEU、異常動作は発生しなかった。そのため、ワースト解析として、SEE 発生 LET 閾値はクリプトンの LET である 34.0 以上とし、2 項②の手法にて SEE 発生頻度を算出した。表 2 及び表 3 に算出した SEE 発生頻度を示す。その結果、SEL、SEU 及び異常動作の発生頻度は、想定している 1 年という運用期間に対して低く、十分な耐放射線性を有することが確認できた。

表 2 FPGA SEL 及び異常動作の SEE 発生頻度

試料	測定項目	LET 閾値 [MeV/mg/cm ²]	飽和反転 断面積 [cm ²]	軌道上粒子 積分フラックス [particles/cm ² /year]	SEE 発生頻度 [event/year]
FPGA	SEL	> 34	8.29E-07	7.30E-03	< 6.05E-09
	異常動作	> 34	8.29E-07	7.30E-03	< 6.05E-09

表 3 FPGA SEU の SEE 発生頻度

試料	測定項目	評価対象	LET 閾値 [MeV/mg/cm ²]	飽和反転 断面積 [cm ²]	軌道上粒子 積分フラックス [particles/cm ² /year]	SEE 発生頻度 [event/year]
FPGA	SEU	SRAM	> 34	1.58E-12	7.30E-03	< 1.15E-14
		ゲート (シフトレジスタ)	> 34	2.63E-10	7.30E-03	< 1.92E-12

最後に、今回の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、本試験の結果が部品自体の性能・機能の優劣を示すものではないということを付記しておく。