

# 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

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

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

Takahiro MAEDA, Kazumasa TOMITA, Yasuharu KAKEHASHI, Kenji AKASHI

Takeshi OHSHIMA, Shinobu ONODA, Takahiro MAKINO

<sup>1)</sup> 株式会社 エイ・イー・エス <sup>2)</sup> 量子科学技術研究開発機構

## (概要)

平成 28 年度は試料として DC/DC コンバータ、PLL シンセサイザ及び直交変調器を選定し、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。選定した試料はいずれも、小型人工衛星及びその関連機器の開発に向け、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。試験を実施した各試料について測定項目、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 $\beta$ 線、 $\gamma$ 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。そこで本研究は、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 No.12 散乱ビーム照射試験装置 第4重イオン室にてカクテルビーム(N、Ne、Ar、Krの4線種)を使用し、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放射線分布より算出した。発生頻度の算出はSEEの発生状況により以下の手法のどちらかを適用した。

- 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に本年度試験を実施した試料を示す。

表 1 試料一覧（平成 28 年度）

No.	試料	主要仕様	照射線種	評価項目	試料数
1	DC/DC コンバータ	入力電圧:3.4~65[V] 出力電流:2.0[A]	N、Ne、 Ar、Kr	SEL (Single Event Latch-up)、 異常動作	2
2	PLL シンセサイザ	電源電圧:3.2~3.6[V] 周波数:1~8[GHz]	N、Ne、 Ar、Kr	SEL、SEU (Single Event Upset) 異常動作	2
3	直交変調器	電源電圧:2.7~5.5[V] 出力周波数:800M~2.5G[Hz]	N、Ne、 Ar、Kr	SEL、異常動作	2

各試料の概要と測定項目を以下に示す。

(1) DC/DC コンバータ

DC/DC コンバータは、コンポーネント内で任意の電圧を生成する際に使用する。本試験では、SEL、異常動作の確認を実施した。観測内容の詳細を以下に示す。

(a) SEL

ビーム照射中の DC/DC 消費電流をモニタすることで SEL の発生を測定した。消費電流が以下に示す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、同時に DC/DC の電源リセットにより正常復帰が可能か確認を行った。

DC/DC の SEL 判定閾値は、通常動作時消費電流の 2 倍とした。SEL 判定閾値は、試験前に通常動作消費電流を測定し決定した。

- SEL 判定閾値：8.0[mA]

(b) 異常動作

異常動作は、照射中に各供試体を動作させておき、供試体からの出力電圧をモニタすることにより測定した。異常動作発生状態が継続する場合は、電源リセットにより正常復帰が可能か確認を行った。

(2) PLL シンセサイザ

PLL シンセサイザは、コンポーネント内で任意の周波数の信号を生成する際に使用される。本試験では SEL、SEU、異常動作の確認を実施した。観測内容の詳細を以下に示す。

(a) SEL

ビーム照射中の PLL シンセサイザ消費電流をモニタすることで SEL の発生を測定した。消費電流が以下に示す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、同時に PLL シンセサイザの電源リセットにより正常復帰が可能か確認を行った。

PLL シンセサイザの SEL 判定閾値は、通常動作時消費電流の 2 倍とした。SEL 判定閾値は、試験前に通常動作消費電流を測定し決定した。

- SEL 判定閾値：3.3V 系 22[mA]  
5.0V 系 3[mA]

(b) SEU

SEU の発生は、照射中に各供試体を動作させておき、供試体からの出力をモニタし測定した。PLL シンセサイザの SEU 判定条件を以下に示す。SEU 発生状態が継続する場合は、電源リセットにより正常復帰が可能か確認を行った。

- SEU 判定条件：設定周波数と異なる周波数でロックし出力され、その状態が継続する。

(c) 異常動作

異常動作の発生は、照射中に各供試体を動作させておき、供試体からの出力をモニタし測定した。異常動作発生状態が継続する場合は、電源リセットにより正常復帰が可能か確認を

行った。想定される異常動作を以下に示す。

●想定される異常動作

PLL シンセサイザから出力される周波数をモニタし異常動作を測定する。想定される異常動作は以下が挙げられる。

- ・ 特定周波数でロックしない状態
- ・ Lock Detect の出力異常状態
- ・ SEL/SEU に該当しない状態

(3) 直交変調器

直交変調器は、コンポーネント内で IQ 変調を行う際に使用される。本試験では SEL、異常動作の確認を実施した。観測内容の詳細を以下に示す。

(a) SEL

ビーム照射中の直交変調器の消費電流をモニタすることで SEL の発生を測定した。消費電流が以下に示す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、同時に直交変調器の電源リセットにより正常復帰が可能か確認を行った。

直交変調器の SEL 判定閾値は、通常動作時消費電流の 2 倍とする。SEL 判定閾値は、試験前に通常動作消費電流を測定し決定した。

- SEL 判定閾値：90[mA]

(b) 異常動作

異常動作は、照射中に各供試体を動作させておき、供試体からの出力をモニタすることにより測定した。異常動作発生状態が継続する場合は、電源リセットにより正常復帰が可能か確認を行った。想定される異常動作を以下に示す。

●想定される異常動作

直交変調器から出力される信号のスペクトルをモニタし異常動作を測定する。想定される異常動作は以下が挙げられる。

- ・ 信号が全く出力されない状態
- ・ 変調機能が動作せず、搬送波のみが出力される状態

3. 結果及び考察、今後の展開等

各試料の試験結果を以下に示す。

(1) DC/DC コンバータ

試験の結果、全ての線種で SEL は発生しなかったが、Kr 照射時に異常動作(出力電圧異常)が発生した。異常動作は電源リセットを行っても、正常に復帰することがなかった。試験結果から解析を行い、SEE、異常動作の発生頻度を算出した。表 2 に DC/DC コンバータの試験結果を示す。

表 2 DC/DC コンバータ 試験結果

確認項目	No	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	1	34.0	8.18E-07	1.02E-09
	2			
異常動作	1	14.0	2.22E-05	1.21E-04
	2		1.09E-05	5.90E-05

(2) PLL シンセサイザ

試験の結果、全ての線種で SEL は発生しなかったが、Kr 照射時に SEU、Ar、Kr 照射時に異常動作が発生した。異常動作は、「設定周波数とは異なる周波数に収束し、Lock Detect が Unlock となる」、

「周波数は正しいが、Lock Detect が Unlock となる」、「Lock Detect が安定せず、Lock と Unlock の状態をふらつく」、「PLL シンセサイザの消費電流が増減する」、といった事象が確認された。異常動作は電源リセットを行うことで、正常に復帰することを確認した。試験結果から解析を行い、SEE、SEU、異常動作の発生頻度を算出した。表 3 に PLL シンセサイザの試験結果を示す。

表 3 PLL シンセサイザ 試験結果

確認項目	No	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	1	34.0	9.01E-07	6.57E-09
	2			
SEU	1	14.0	2.70E-06	8.69E-05
	2	34.0	9.01E-07	6.57E-09
異常動作	1	5.9	1.26E-05	3.44E-03
	2			

## (3) 直交変調器

試験の結果、全ての線種で SEL、異常動作は発生しなかった。表 4 に直交変調器の試験結果を示す。

表 4 直交変調器 試験結果

確認項目	No	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	1	34.0	9.01E-07	6.57E-09
	2			
異常動作	1	34.0	9.01E-07	6.57E-09
	2			

以上の通り、DC/DC コンバータ、PLL シンセサイザ及び直交変調器について重粒子線照射試験を実施した。その結果、DC/DC コンバータは SEL の発生は見られなかったが、異常動作の発生が見られた。PLL シンセサイザは、SEL の発生は見られなかったが、SEU、異常動作の発生が見られた。直交変調器は、SEL、異常動作の発生は見られなかった。PLL シンセサイザの SEU 及び異常動作が発生した場合でも電源リセットにより問題なく動作が回復することを確認した。しかし、DC/DC コンバータの異常動作については、電源リセットを行っても復帰することはなかった。

試験の結果から、試料の使用を想定している軌道条件における SEE 及び異常動作の発生頻度を算出した。算出結果より、今回実施した全ての試料の SEE、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小さく、十分な耐放射線性を有することが確認できた。しかし、DC/DC コンバータの異常動作については、電源リセットを行っても復帰することはなかったため、耐放射線性を有しないと判断した。

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、本試験の結果が部品自身の性能・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。