

## 民生電子部品の宇宙環境における耐放射線性の研究

Examination of resistance to radiation of public welfare electronic parts

垣見 征孝<sup>1)</sup> 佐々木 直樹<sup>1)</sup> 足立 数馬<sup>1)</sup> 前田 高広<sup>1)</sup> 山田 栄彰<sup>1)</sup> 後藤 洋司<sup>1)</sup>  
大島 武<sup>2)</sup> 平尾 敏雄<sup>2)</sup> 小野田 忍<sup>2)</sup>

Yukitaka KAKIMI, Naoki SASAKI, Kazuma ADACHI, Takahiro MAEDA, Shigeaki YAMADA, Yoji GOTO

Takeshi OHSHIMA, Toshio HIRAO, Shinobu ONODA

<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

平成 22 年度は、MPU、スイッチング電源コントローラについて照射試験を実施し、SEE (Single Event Effect) に関して耐性を調べた。いずれの試料も小型衛星及びその関連機器の開発に向け選定した民生電子部品である。評価は、MPU については、SEL、SEU、ハングアップ等の動作異常について行い、スイッチング電源コントローラについては、SEL 及び電源コントロール性能について評価を行った。その結果、MPU は、小型衛星への搭載を想定した場合、SEE に対し十分な耐性を持つことがわかった。スイッチング電源コントローラに関しては、放射線の照射により、瞬間的に電源コントロールが失われることがあるとわかった。また、トータルドーズ効果により、内蔵されているリファレンス電源の電圧の低下を観測した。低下の割合は、およそ 2.7 ~ 6.8 [mV/Gy] であった。

キーワード : 民生電子部品、重粒子、放射線試験、シングルイベント

### 1. 目的

近年、大学、研究機関、民間企業等を中心に小型人工衛星の研究開発が盛んになってきている。小型衛星を利用することの利点は、大型衛星に比べ、短期間、低コストで開発を行えるため、より先進的で挑戦的なミッションを実現できるということであり、この利点を最大限に生かすために、民生電子部品の利用が切望されている。そこで我々は、民生電子部品の宇宙環境における動作状況、劣化状況を重粒子照射試験により把握し、民生電子部品の宇宙環境への適合性を探ることを目的としている。

### 2. 方法

照射試験は、AVF サイクロトロン 散乱ビーム照射試験装置を用いて実施した。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した状態としている。発生頻度の算出には、CREME96 を用いた。想定している軌道条件は、高度 700km、衛星構体は 2mm 厚アルミニウム、運用期間 1 年である。平成 22 年度に照射を行った試料と評価項目を表 1 に示す。いずれの試料も小型衛星及びその関連機器の開発に向け選定した民生電子部品である。照射中は、各試料とも SEL の検出のために消費電流をモニタした。さらに MPU に関しては、内部レジスタ及び ROM の情報を外部 PC によりモニタし SEU の検出を行った。スイッチング電源コントローラについては、試料を用いて DCDC 降圧電源回路を構成し、電源コントロール性能の評価のため出力電圧及び電圧制御へのフィードバックとなる内蔵リファレンス電源電圧のモニタを行った。

表 1 試料及び評価項目

試料	仕様	評価項目
MPU①	RISC 32bitMPU	SEL, SEU, 動作異常
MPU②	MCS-51 互換 8bit MPU	
スイッチング電源 コントローラ	降圧, 昇圧, 負圧電源コントロール機能 スイッチング周期 20~800[KHz]	SEL, 電源コントロール性能

### 3. 研究成果

平成 22 年度は、MPU、スイッチング電源コントローラについて照射試験を実施し、SEE に関して耐性を調べた。以下に結果を示す。

#### ① MPU 照射試験結果

照射試験結果を表 2 に示す。評価は、Weibull 関数を用いて断面積と LET の関係を推定し CREME96 により算出した軌道上での放射線量から各イベントの発生確率を算出した。その結果、SEE の発生確率は最大で  $9 \times 10^{-2}$  [event/year] であった。よって、小型衛星の一般的な運用期間 1~2 年の間に予想される SEE の発生回数は 1 回未満である。また、照射中に SEL や動作異常の発生により MPU が動作不能となる状態が確認されたが、いずれの場合も電源のリセットにより、動作が回復することを照射試験にて実証した。

以上のことから、今回照射試験を実施した MPU は小型衛星での使用を想定した場合、SEE に対し十分な耐性を持つと判断する。

表 2 MPU 照射試験結果

		LET threshold [MeV/mg/cm <sup>2</sup> ]	Saturated cross section [cm <sup>2</sup> ]	Probability [event/year]
SEL	MPU①	5.6	$4.3 \times 10^{-3}$	$9 \times 10^{-2}$
	MPU②	5.9	$1.8 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-3}$
SEU@Register	MPU①	3.0	$3.5 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$
	MPU②	1.2	$1.3 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-2}$
SEU@ROM	MPU①	> 34.0	$< 2 \times 10^{-5}$	$< 7 \times 10^{-8}$
	MPU②	> 34.0	$< 9 \times 10^{-6}$	$< 4 \times 10^{-8}$
Hung-Up	MPU①	4.5	$4.4 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-3}$
	MPU②	3.0	$4.0 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-3}$

#### ② スwitchング電源コントローラ照射試験結果

スイッチング電源コントローラの照射試験では SEL は観測されなかったが、電源コントロール性能に関して以下の影響が現れた。

##### a. 電源電圧出力の異常

Kr の照射において、試験回路として製作した DCDC 降圧電源回路の出力電圧が瞬間的に、0[V] となる異常を確認した。Kr 照射時の出力電圧の様子を図 1 に示す。また、図 1 と同時刻の内蔵リファレンス

電圧及び消費電流の様子を図 2 に示す。出力が 0[V]となっているのは 1.0~1.5[sec]の間で、その後、電圧値は自動的に復帰した。試験時の電源コントローラのスイッチング周期は 150[KHz]であるが、スイッチング周期に対し動作異常の継続時間は非常に長い。この間電源コントローラのスイッチングは OFF 状態であると考えられるが、これは電源コントローラ内のロジック回路の瞬間的なロジックの反転によるものとは考えにくい。

一方、図 2 に示すように、出力電圧とリファレンス電圧及び消費電流を比較すると、出力電圧に異常が生じると同時に内蔵リファレンス電圧値、消費電流値に著しい上昇が起きていることがわかる。

以上のことから、出力電圧異常は電内蔵リファレンス電源電圧の急激な上昇により電圧制御へのフィードバックに問題が生じているためと考える。

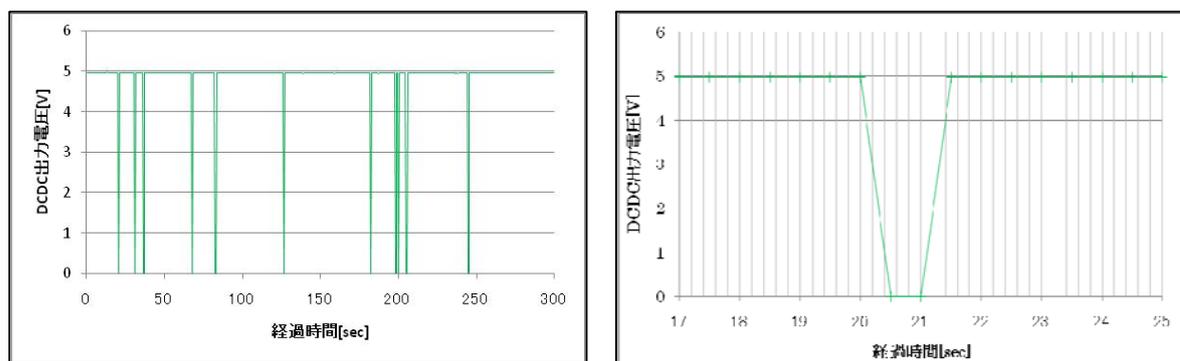


図 1 出力電圧異常（右図は拡大図）

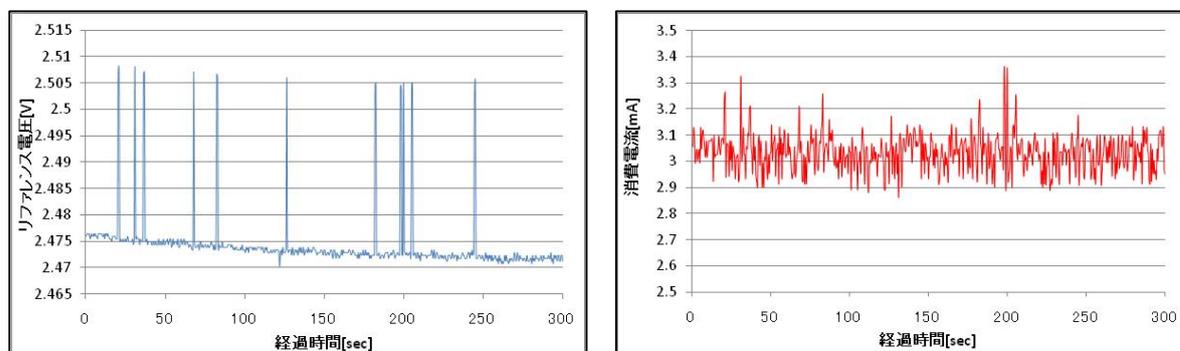


図 2 出力電圧異常時の内蔵リファレンス電圧値（左図）及び消費電流値（右図）

b. 内蔵リファレンス電源電圧の降下

本照射試験で照射を行った全線種に対し、内蔵リファレンス電圧の低下を確認した。低下の様子を図 3 に示す。吸収線量については、デバイスのサイズ、材質（Si を仮定）、照射時間及びデバイスに照射された粒子のエネルギーが全てデバイスで吸収されたと仮定して算出した。

表 3 に各線種の電圧低下率をまとめた。線種による依存性は明らかではないが、電圧低下率は  $2.7 \times 10^{-2} \sim 6.8 \times 10^{-2}$  [mV/rad(si)]であった。電圧低下の原因は、図 3 に示すように電圧低下の様子が吸収線量に対し線形性を持つことから素子内部に欠損が生じるトータルドーズ効果または変移損傷によるものであると考える。

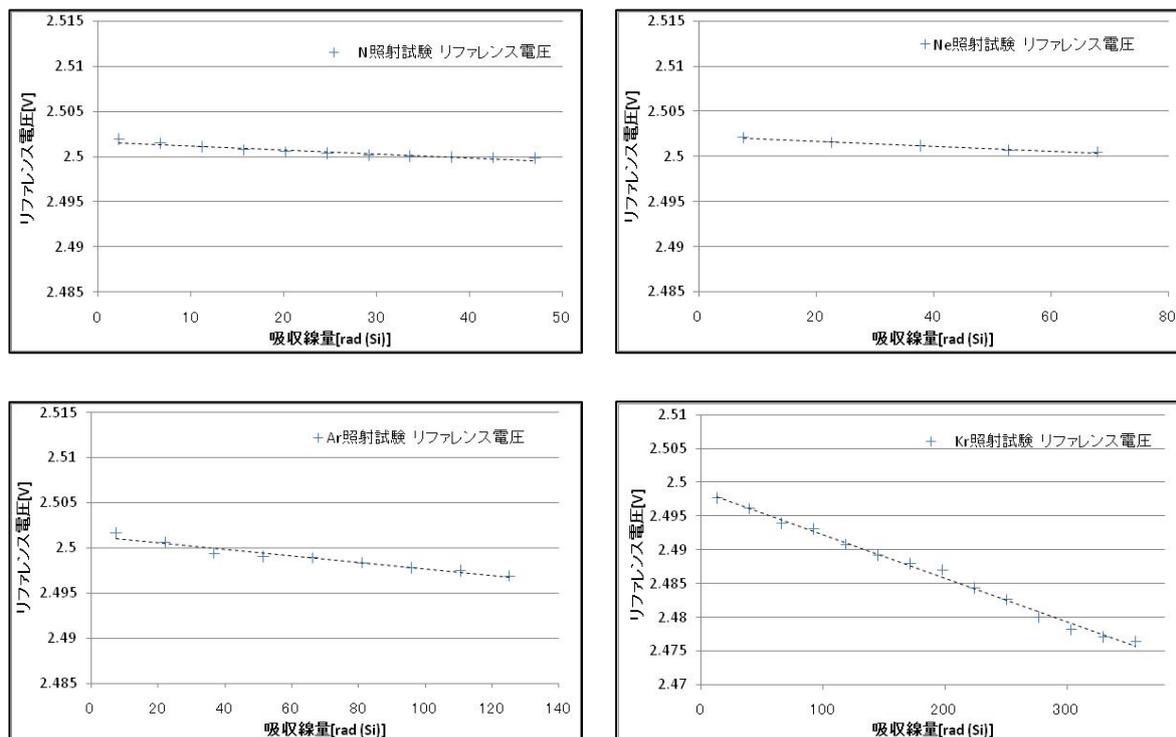


図 3 内蔵リファレンス電源 照射による電圧降下の様子  
(左上 : N 照射 右上 : Ne 照射 左下 : Ar 照射 右下 : Kr 照射)

表 3 各線種に対する電圧降下率

線種	エネルギー [MeV]	LET [MeV/cm <sup>2</sup> /mg]	飛程 [um]	電圧降下率 [mV/rad(Si)]
N	56	3.0	54	$4.4 \times 10^{-2}$
Ne	75	5.9	41	$2.7 \times 10^{-2}$
Ar	150	14.0	36	$4.1 \times 10^{-2}$
Kr	322	34.0	38	$6.8 \times 10^{-2}$

#### 4. 結論・考察

MPU、スイッチング電源コントローラについて照射試験を実施し、SEE に関して耐性を調べた。その結果、MPU は、小型衛星の一般的な運用期間（1～2 年）に対し、予想される SEE の発生頻度は 1 回未満である。また、SEL やハングアップ等の動作異常が発生した場合でも、電源のリセットにより、問題なく動作を回復することが実証された。従って、今回試験を行った MPU は、小型衛星への搭載を想定した場合、十分な耐性を持つことと判断できる。一方、スイッチング電源コントローラについては、SEL の発生は確認されなかったが、Kr 照射時に電源コントロールに異常が発生した。また、照射を行った全線種に対し内蔵リファレンス電源の電圧降下を確認した。いずれの現象もリファレンス電源に起因する現象と推定されるため、実際の使用にあたっては別途、放射線耐性の強いリファレンス電源を用いることで、軌道上環境中での動作を安定させることができると考えている。