

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

前田 高広¹⁾ 垣見 征孝¹⁾ 佐々木 直樹¹⁾ 熊谷 秀則¹⁾ 宮田 浩旭¹⁾ 山田 守¹⁾
大島 武²⁾ 平尾 敏雄²⁾ 小野田 忍²⁾

Takahiro MAEDA, Yukitaka KAKIMI, Naoki SASAKI, Hidenori KUMAGAI, Hiroaki MIYATA, Mamoru YAMADA

Takeshi OHSHIMA, Toshio HIRAO, Shinobu ONODA

¹⁾株式会社エイ・イー・エス ²⁾日本原子力研究開発機構

平成 23 年度は、メモリ(強誘電体メモリ、フラッシュメモリ)、P-ch FET(Field Effect Transistor)、レギュレータについて重粒子線照射試験を実施し、SEE (Single Event Effect) 耐性について調べた。いずれの供試体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。重粒子線照射試験の評価項目としてメモリは SEL (Single Event Latch-up) と SEU (Single Event Upset)、FET は SEGR (Single Event Gate Rupture)、レギュレータは SEL と電圧変動等の異常動作について行った。その結果、メモリ、FET は、小型人工衛星への搭載を想定した場合、SEE に対して耐性を持つことがわかった。一方、レギュレータの重粒子線照射試験では SET (Single Event Transient) が確認された。軌道上での発生回数を推測した結果、その発生回数は衛星運用上無視できないことが予想されるため、再度評価試験を行う必要があると考えている。

キーワード：宇宙環境, 民生電子部品, 重粒子, シングルイベント

1. 目的

小型人工衛星(質量 100kg 以下)の開発現場では、大型衛星に比べ、短期間での開発が行え、より先進的なミッションを実現できるという小型人工衛星の利点を最大限に活かすため、民生電子部品の使用が切望されている。しかしながら、民生電子部品を使用するためには、宇宙環境における動作状況、劣化状況を把握し、宇宙環境への適合性を把握する必要がある。このような理由から、本研究は、小型人工衛星での使用を想定した民生電子部品に対して重粒子線照射試験を行い、民生電子部品の宇宙放射線環境に対する SEE (Single Event Effect) 耐性データを取得するとともに、民生電子部品を宇宙放射線環境で使用するための方法の確立を目的としている。

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。供試体となる電子部品は、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。放射線耐性の評価は、照射試験より得られた SEE 発生断面積と CREME2009 を用いて計算した軌道上での放射線環境より、シングルイベント発生頻度を算出し評価を行っている。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 23 年度に照射を行った供試体と評価項目を表 1 に示す。いずれの供試体も小型人工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。メモリ(強誘電体メモリ、フラッシュメモリ)の照射試験は SEL (Single Event Latch-up) の検出を行うため、照射中に消費電流のモニタを行った。さらに SEU (Single Event Upset) の検出のため、外部 PC からメモリの読み出しを行った。FET (Field Effect Transistor) に関しては、 V_{ds} (ソースドレイン間電圧)と V_g (ゲート電圧)を印加した状態で照射を行いゲートに流れる電流のモニタを行った。さらに照射後、ゲート電流の増加がみられた FET の抵抗値測定を行い、SEGR (Single Event Gate Rupture)を確認した。レギュレータに関しては、メモリと同様 SEL を検出するために消費電流のモニタを行った。また、照射中にレギュレータ出力電圧のモニタを行い、電圧変動等の異常動作の確認を行った。

表 1 供試体及び評価項目

供試体	概要	評価項目
メモリ A (A 社)	シリアル強誘電体メモリ	SEL, SEU
メモリ B (B 社)	シリアルフラッシュメモリ	
FET (C 社)	P-ch パワーMOSFET	SEGR
レギュレータ (D 社)	マイクロパワー、低ノイズ、 低損失レギュレータ	SEL, 異常動作

3. 結果及び考察

平成 23 年度は、メモリ、FET、レギュレータについて重粒子線照射試験を実施し、SEE (Single Event Effect) 耐性を調べた。以下に結果を示す。

① メモリ試験結果

メモリの重粒子線照射試験結果を表 2 に示す。SEE 耐性は、Weibull 関数を用いて反転断面積と LET (Linear Energy Transfer) の関係を推定し、CREME2009 より導出した軌道上での放射線環境から各イベントの発生確率を算出し評価した。その結果、SEL の発生確率は、メモリ A は 2.6×10^{-5} [event/year]、メモリ B は 1.7×10^{-2} [event/year] であった。また、メモリ A、B ともに SEU は観測されなかった。これより、小型人工衛星の一般的な運用期間 1 年程度の間には予想される SEE の発生回数は 1 回未満であった。また、照射中に SEL の発生により消費電流増加が確認されたが、電源のリセットにより、動作が復帰することを確認した。

以上のことから、重粒子線照射試験を実施したメモリ A、B は小型人工衛星での使用を想定した場合、SEE に対して耐性を持つと判断した。

表 2 メモリ重粒子線照射試験結果

		LET 閾値 [MeV/mg/cm ²]	反転断面積 [cm ²]	発生確率 [event/year]
SEL	メモリ A	5.9	7.7×10^{-7}	2.6×10^{-5}
	メモリ B	5.9	5.2×10^{-4}	1.7×10^{-2}
SEU	メモリ A	>34.0	8.4×10^{-7}	$<3.0 \times 10^{-11}$
	メモリ B	>34.0	1.4×10^{-5}	$<4.8 \times 10^{-7}$

② FET 試験結果

FET の重粒子線照射試験結果を表 3 に示す。SEE 耐性は①と同様の発生確率算出方法により算出し評価した。その結果、印加電圧の V_{ds} が最大定格の 55 [V]、V_g が 16~20 [V] において SEGR の発生確率は 0.16~0.19 [event/year] であった。一方、V_{ds} を 55 [V] から 35 [V] に下げ、V_g (ゲート電圧) が 12~20 [V] での SEGR の発生確率は 3.7×10^{-8} [event/year] であった。

以上のことから、今回重粒子線照射試験を実施した FET は小型人工衛星での使用を想定した場合、最大定格電圧の 63 [%] 以下で使用することで、最大定格電圧で使用した場合に比べ SEGR の発生を 10⁷ 分の 1 程度に抑えられることがわかった。また、SEGR が起きた場合、ゲートソース間に大電流が流れるため、周辺回路保護対策としてゲート側に保護抵抗を入れる必要があると考えられる。

表 3 FET 重粒子線照射試験結果

供試体印加電圧 [V] ※		LET 閾値 [MeV/mg/cm ²]	反転断面積 [cm ²]	発生確率 [event/year]
Vds:55	Vg:20	14.0	4.9×10^{-3}	0.16
	Vg:16	14.0	6.1×10^{-3}	0.19
	Vg:14	14.0	4.1×10^{-4}	0.01
	Vg:12	14.0	7.9×10^{-4}	0.01
Vds:35	Vg:20	>34.0	$<5.1 \times 10^{-6}$	$<3.7 \times 10^{-8}$
	Vg:12	>34.0	$<5.1 \times 10^{-6}$	$<3.7 \times 10^{-8}$

※最大定格 Vds:55[V]、Vg:20[V]

③ レギュレータ試験結果

レギュレータの重粒子線照射試験ではSELは観測されなかった。また、各線種の照射前後での出力電圧に変動はなかった。しかし ²⁰Ne⁴⁺、⁴⁰Ar⁸⁺、⁸⁴Kr¹⁷⁺照射中、図 1に示すようなSET (Single Event Transient) がレギュレータ出力電圧に複数回確認された。試験系のサンプリング周期が遅く実際の発生回数特定できなかったが、本試験コンフィグレーションで確認されたイベントが、データロガーのサンプリングとSETが偶然同時に発生した時に検出されたイベントであることから、試験で得たイベント数とデータロガーのサンプリング周期より、実際に発生しているであろうSET発生回数を推測した。その結果、SET発生確率は軌道上での運用を想定した場合 1.2×10^2 [event/year]であった。

以上より、今回重粒子線照射試験を実施したレギュレータは小型人工衛星での使用を想定した場合、SELに関しては耐性を持つことがわかった。しかしながら、SETに関しては、本試験コンフィグレーションでは十分な評価ができていないことと推測した発生回数が運用上無視できない頻度であるため、今後、再評価方法および対策について検討が必要であると考えている。

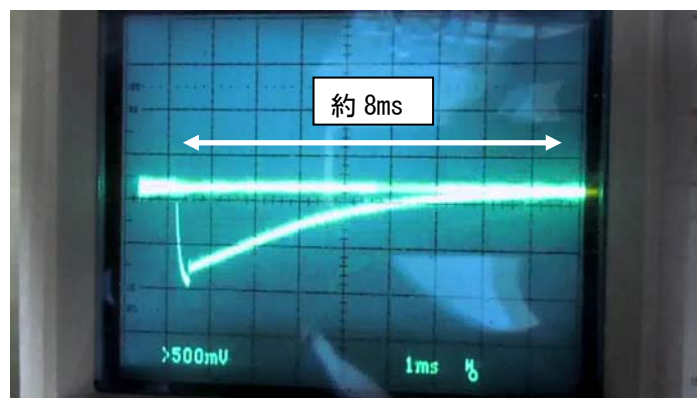


図 1 SET モニタ写真

表 4 レギュレータ重粒子線照射試験結果

		LET 閾値 [MeV/mg/cm ²]	反転断面積 [cm ²]	発生確率 [event/year]
SET	レギュレータ A	3.0	8.3×10^{-3}	83.1
	レギュレータ B	3.0	5.1×10^{-3}	1.1×10^2
	レギュレータ C	3.0	8.5×10^{-3}	1.2×10^2
	レギュレータ D	3.0	5.5×10^{-3}	1.2×10^2

④ 考察

メモリ、FET、レギュレータについて重粒子線照射試験を実施し、SEE 耐性を調べた。その結果、メモリは、小型衛星の一般的な運用期間（1 年程度）に対し、予想される SEE の発生頻度は 1 回未満であった。また、SEL 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 2 種類のメモリは、小型衛星への搭載を想定した場合、耐性を持つと判断できる。FET は、照射中のゲート電流の増加の確認と照射後の抵抗値測定より SEGR の発生を確認した。その発生確率については、最大定格で 0.16~0.19[event/year]、最大定格の 63[%]で 3.7×10^{-8} [event/year]であることから、最大定格電圧の 63[%]以下で使用することで、SEGR の発生確率を最大定格で使用した場合の 10^7 分の 1 程度に抑えることができることがわかった。また、SEGR が発生した場合、ゲートソース間に大電流が流れるため、周辺回路保護対策としてゲート側に保護抵抗を入れる必要があると考えられる。レギュレータは、SEL および電圧変動は観測されなかったが、 $^{20}\text{Ne}^{4+}$ 、 $^{40}\text{Ar}^{8+}$ 、 $^{84}\text{Kr}^{17+}$ 照射時に SET の発生を確認した。SET 発生確率の評価では試験系のサンプリング速度から、全イベントをとらえることはできなかつたため、本試験系で確認されたイベント数と、試験系のサンプリング速度から SET の発生回数を推測し発生確率を算出した。その結果、発生確率は 1.2×10^2 [event/year]であり、運用上無視できないことが予想されるため、今後、再評価及びその対策について検討を行いたい。

最後に、供試体に使用した民生電子部品は、宇宙環境での使用を想定して作られたものではないため、この結果が部品の優劣を表すものではないということを付記しておく。

4. 引用(参照)文献等

垣見征孝 他 (2011) 「民生電子部品の宇宙環境における耐放射線性の研究」『第 6 回高崎量子応用研究シンポジウム 要旨集』135 頁