民生用 16 bit-MPU の宇宙放射線試験*

石 川 智 浩^{*1}, 佐 鳥 新^{*2}
三 橋 龍 一^{*3}, 豊 田 国 昭^{*4}

The Radiation Test of a Commercial 16 bit-MPU

Tomohiro ISHIKAWA^{*5}, Shin SATORI,
Ryuichi MITSUHASHI and Kuniaki TOYODA^{*5} Hokkaido Institute of Technology,
7-15-4-1 Maeda, Teine-ku, Sapporo-shi, Hokkaido, 006-8585 Japan

The radiation test of a commercial 16 bit-MPU was conducted for the application to the onboard computers of small satellites. This MPU is commercially available and equipped with flash EEPROM, SRAM (4 kbyte), A/D-D/A converter, serial communication interface and peripheral I/O functions. To predict the error rate by the radiation in space environment, a preliminary test was conducted using a Californium-252 radio isotope source at National Space Development Agency of Japan (NASDA), and the tolerance of the MPU was confirmed. As a next step, a radiation test using a large accelerator was conducted at Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), and the error rates of SEU (Single Event Upset) and SEL (Single Event Latch-up) were evaluated precisely. The calculated result by CREME software showed relatively low rates of SEU and SEL in the space environment of the orbit at an altitude of 450 km.

Key Words: Space Engineering, MPU, Radiation Test, Microsatellite

1. 結 言

近年、次世代の人工衛星として質量 50kg 以下の超小型衛星が注目されており、アメリカを中心にベンチャー企業や大学で研究開発が行われている。日本では、大学機関を中心に CubeSat と呼ばれる辺長 10cm の立方体形状の人工衛星を製作し、ロケットによる打ち上げを計画している。大学で小さな人工衛星を製作する機運は世界的に高まっており、これらの衛星は教育目的に止まることなく、例えばアメリカ空軍研究所では大学の衛星に先進機器を搭載して軌道上実証試験に利用したケースのように、簡便なテストベッドとしての利用法も注目されている⁽¹⁾。同様の構想は、著者らの提案や新宇宙機関のオープンラボ構想にも見られる⁽²⁾。小型衛星は軽量であるため、静止衛星などの大型衛星に比べて打ち上げ費用が格段に安くなり、従来 5 年であった開発期間（構想段階を含めれば 10 年）も 2 年以内に短縮されるので、先進的な技術開発を大胆にかつ

積極的に反映できる。また、ビジネスの見地からも初期投資回収のリスクを軽減できるため、新たな市場を開拓できる期待も持たれている。

これまで大学が開発した超小型衛星は比較的単機能であったが、今後はより高度な利用法が望まれている。著者らは、超小型衛星の利用法の一つとして、大型衛星（母船）の事故時に母船から分離して軌道上から故障した衛星の画像を送り続ける超小型のカメラ衛星を提案し、2000 年 7 月にその試作機を完成させた⁽³⁾。また、NASA-Goddard 宇宙センターでは複数の小型衛星によるフォーメーション・フライト（編隊飛行技術）の研究を進めている大学に対して研究資金を支給している⁽¹⁾。

超小型カメラ衛星やフォーメーション・フライトでは、画像処理を利用した航法制御技術が必要となるが、この技術は次世代の衛星利用法として重要なだけでなく、学術的にも発展が期待される分野である。このような新たな技術を構築するためには高機能な MPU (Micro processing Unit) が必要となるが、軌道上では宇宙放射線の影響のために、記録情報の損傷 (Single Event Upset : SEU) や素子破壊 (Single Event Latch up : SEL) を引き起こすことが知られている (シングルイベント現象)。SEU は、SRAM (Static Random Access

* 原稿受付 2002 年 10 月 17 日。

^{*1} 正員、東京都立航空工業高等専門学校電子工学科 (〒116-8523 東京都荒川区南千住 8-52-1)。^{*2} 北海道工業大学電気電子工学科 (〒006-8585 札幌市手稲区前田 7 条 15-4-1)。^{*3} 北海道工業大学情報デザイン学科。^{*4} 北海道工業大学機械システム工学科。

E-mail: r00101@hit.ac.jp

Memory)などの記憶素子に放射線が入射することにより、記憶していた情報がビット反転してしまう現象であり、SEL は、半導体素子が放射線の影響により過大電流が発生してしまう現象である。

既存の宇宙用 MPU は非常に高価かつ長納期のため、小型衛星の開発の利点を大きく欠いてしまうので、著者らは 1998 年～2001 年の宇宙開発事業団との共同研究「MDS (Mission Demonstration test Satellite) 研究ミッション」で民生用 MPU の放射線試験を行い、宇宙環境での利用の可能性を検討した。本研究では、民生用 16bit-MPU の宇宙放射線試験の試験方法、試験結果および衛星軌道上でのエラー発生頻度予測評価結果について述べる。

表 1 に、本試験で使用した MPU の仕様を示す。この MPU (図 1) は一般に市販され、大学・高専などの教育機関で普及し、入手性に優れている。また、内部周辺機器として、SRAM(4kbyte)、A/D-D/A 変換器、通信用インターフェース、I/O 機能が備わっているなど、前述の超小型カメラ衛星での使用条件を満足していることから選択した。現在市販されている MPU の大半は、CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 構造の内蔵 SRAM を搭載しており、本 MPU もこの構造である。CMOS 構造のメモリは、一般に SEU の影響を受けやすい構造であることが過去の研究からも知られており、本 MPU の内蔵 SRAM も SEU の発生が懸念される。また、SEL に関しても、MPU の素子構造 (寄生サイリスタなど) から放射線の影響を受ける可能性があるため、宇宙環境での発生確率を予測する必要がある。

2. MPU の宇宙放射線耐性の評価手順

最近の民生用半導体部品の放射線影響に関する研究調査では、MPU の場合は、SEU と SEL の地上試験をすることで宇宙環境での発生確率を予測している。本研究もこの方法に従って評価を行うこととした。

本研究で設定した MPU の宇宙放射線耐性の評価手順を図 2 に示す。試験は、Californium-252(以下、 Cf_{252} とする) 放射線試験と重イオン放射線試験の 2 段階で行った。 Cf_{252} 試験では、MPU 選定のための初期的な放射線耐性評価試験として行い、重イオン放射線試験で、選定された MPU の詳細な放射線耐性調査を行った。最終的に、Naval Research Laboratory が作成した宇宙環境におけるエラー発生確率を予測するための解析ソフト CREME (Cosmic Ray Effects on Micro Electronics) ⁽⁴⁾ に、試験データを代入し、実際の衛星軌道上でのシングルイベントの発生確率を算出した。

Table 1. MPU performance

	Hitachi H8-3048
Power voltage [V]	5±5%
Power current [mA]	50 (Typical)
Clock frequency [MHz]	16
Package type	QFP 100pin
On-chip SRAM capacity [byte]	4096

Fig. 1 Test sample (H8/3048)

Fig. 2 Flowchart for estimate of SEE (single event effect)

3. 放射線同位元素 Cf_{252} による放射線耐性評価

3-1 SEU および SEL 試験 宇宙開発事業団の電子機器・部品試験棟のシングルイベント評価室にて、 Cf_{252} を用いた本 MPU の SEU および SEL の試験を実施した。この Cf_{252} 試験場では、放射線エネルギー付与率である LET (Linear Energy Transfer) 値が 20 ~ 40 MeV/(mg/cm²) と広く分布した形で照射され、飛程は短い。試験作業が容易であることから、放射線耐性に対する大雑把な選別には適した試験といえる。本試験では特別な評価基準はないため、既存の宇宙用 SRAM および宇宙用 MPU の放射線試験結果と本試験による結果を比較することで本 MPU の可否を決定した。

試験では、MPU パッケージによる放射線影響の依存性をなくすため、MPU 上部のパッケージを取り除いて、MPU 内部のウェハー基板部を露出させた(デキャップ)。これにより精度よくシングルイベントを測定することができ、かつ短時間での試験ができる⁽⁵⁾。また、SEU と SEL 現象は発生メカニズムや頻度は違うが、SEU のみを観測していても SEL は発生するので、同一の試験で SEU と SEL を同時に観察することができる。

図 3 に Cf_{252} 試験の SEU 測定方法を示す。まず、予め MPU 内蔵 SRAM へ指定した数字を記憶させ、一定時間放射線に曝す。その後 SRAM の情報をパソコンで読み込み、SEU の発生頻度を測定した。SEU は、上記のデキャップ作業により、早い周期で発生することが予測されたため、SRAM 書き込みから読み込みまでの時間を 18 秒とし、それを数回繰り返した。SRAM への書き込み情報は全て“0x00”(1 byte 分、16 進数表記)とした(以下、このことを SRAM 初期化とする)。

図 4 に Cf_{252} 試験の SEL 測定方法を示す。SEL 検出は、MPU 電源端子にデジタルマルチメータを並列接続して、目視により電流の変化を観察し、同時にプロッターに電流値を記録した。SEL 発生時の判定基準となる閾値電流は、MPU 電気的特性の定常電流の 2 倍である 100mA とした(設定基準は文献(6)に準拠)。SEL 発生後は、MPU に過大電流が流れて発熱し、完全に機能停止に陥る。通常このような状態になった場合は、電源を再投入することでしか MPU 機能の復帰ができない。そのため、SEL 検出後 2 秒以内に必ず電源を OFF にし、冷却期間として 4 秒放置してから電源を ON にした。図 5 に測定機器の構成を示す。

3-2 試験結果 表 2 に SEU と SEL の試験条件を示す。表 3 に SEU 試験結果、表 4 に SEL 試験の結果を示す。試験結果から、SEU は測定時間 222 秒で

Fig. 3 SEU flow chart

Fig. 4 SEL flow chart

52 回、SEL は測定時間 7200 秒で 2 回確認した。この結果を宇宙用半導体素子の場合と比較するため、式 (1) より SEU と SEL の反転断面積 σ を求めた。

$$\sigma = \frac{A}{T \times b \times f} \quad (1)$$

ここで、

σ : 反転断面積 [cm²/bit]

A : SEU 発生個数 [times]

T : 測定時間 [second]

b : 対象ビット数 [bit]

f : フルエンスレート [times/sec/cm²]

である。この反転断面積は、一般に試験デバイスの放射線耐性を評価する指標となっている。

SEU の反転断面積を比較すると、本 MPU の内蔵 SRAM は 2.38×10^{-7} cm²/bit であった。表 3 に挙げた既存の宇宙用 SRAM は 1.05×10^{-7} cm²/bit であり、数値上 2 倍近い差があるが桁違いにかけ離れてはいない。この

Fig. 5 Experimental set ups of the measurement system for SEU and SEL tests (in case of Cf_{252})

ことから本 MPU の SEU 耐性についてさらに厳密に調査する必要があると考えられる。SEL についても同様に反転断面積を比較すると、本 MPU は $9.30 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{bit}$ 、宇宙用 MPU は、 $8.53 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{bit}$ であり、これも反転断面積に大きな差はない。SEL 発生時の電流変化は、2 件の SEL とともに 140mA の大電流が発生することが確認された。本 MPU の定常電流である 50mA から SEL に達するまでの電流の変化は、非常に緩やかで 2 秒であった。また、SEL 発生後に電源を OFF にし、冷却時間を置いたあと、電源を ON することにより MPU 機能が復旧することも確認された。試験後に MPU の I/O 端子の電気的動作チェックをしたが、異常はなかった。

以上から、本 MPU の Cf_{252} 放射線の影響は、既存の宇宙用素子と比較して、SEU および SEL 発生確率にかけ離れた大きな差はなく、本 MPU の放射線耐性に関して厳密に計測する必要性が確かめられた。また、本 MPU が放射線の影響によりどのような影響を受けるかをモニタすることができた。

4. 重イオン照射による MPU の放射線試験

4-1 SEU および SEL 試験 Cf_{252} 試験による初期評価を得た後、さらに厳密に本 MPU の評価を行うため、重イオン照射によるシングレイベント試験を行った。本試験の特徴は、 Cf_{252} 試験でできなかった指定 LET 値での反転断面積が求められることである。これにより、半導体デバイスの LET に対する飽和反転断面積が精度よく求められる。試験では、高崎原子力研究所のイオ

Table 2. Cf_{252} test condition

Temperature in vacuum chamber [$^{\circ}\text{C}$]	23
Vacuum level [Torr]	$<10^{-5}$
Distance of MPU and Cf_{252} [cm]	1.12
Cf_{252} -flux-rate [times / (cm^2/sec)]	30
Current threshold (for SEL) [mA]	100
SRAM data pattern (for SEU)	0x00

Table 3. Summary of SEU test (Cf_{252})

	H8/3048(SRAM) 4kbyte	Space-SRAM 128kbyte
Test time [s]	222	120
SRAM capacity [bit]	32768	1048576
LET [MeV/(mg/cm ²)]	20~40	23
Flux-rate [times / (sec/cm ²)]	30	87
SEU [times]	52	299
Cross-Section [cm ² /bit]	2.38×10^{-7}	1.05×10^{-7}

Table 4. Summary of SEL test (Cf_{252})

	H8/3048	Space-MPU
Test time [second]	7200	14400
Flux-rate [times / (sec/cm ²)]	30	22
SEL [times/hour]	2	3
Cross-Section [cm ² /bit]	9.30×10^6	8.53×10^6

ン照射研究施設の AVF(Azimuthally Varying Field)サイクロトロン重イオンビームコース HE2 ポートに設置されたデバイス試験用照射部(散乱ビーム照射試験装置)を使用した(図 6)。重粒子イオン種には、カクテルイオンビーム 3 種 ($^{20}\text{Ne}^{6+}$, $^{40}\text{Ar}^{8+}$, $^{84}\text{Kr}^{20+}$) を選択した。ビーム特性の詳細を表 5 に示す。照射粒子のフルエンス率は半導体検出器(SSD: Silicon Surface barrier Detector)を用いて高精度に測定された。また、本装置にはデバイスに対してイオンビームを均一に照射するイオンビーム均一化装置が装備されている。

本試験の目的は、各 LET 値での MPU の SEU と SEL を測定し、そのデータを元に反転断面積を算出し、LET 対反転断面積のグラフを作成することである。このグラフより、本 MPU の飽和反転断面積、感応領域や閾値 LET、臨界電荷量などが求められ、最終的に、CREME を用いて、任意の軌道上の人工衛星に搭載された MPU のエラー発生率を予測することができる。本試験は、 Cf_{252} 試験と同様に、試験デバイスのデキャップ、デバイスの試験前動作確認、試験治具の作成を行い、SEU 測定用プログラム、SEL 自動検出装置、緊急用 SEL 手動電源スイッチを用いた。電気的試験条件は、メーカー指定の絶対電気定格に合わせた。

重イオン試験の SEU と SEL 測定方法は Cf_{252} 試験と同様である。測定装置の構成を図 7 に示す。照射条件は、文献(6)の電離放射線影響に関する試験および解析方法に準拠して設定した。本試験では、上記の試験条件に加えて、SRAM の全アドレスエリアの記憶情報として"0x00"と"0xff"の場合の 2 種類のパターンを用い、記憶情報による放射線耐性に差が生じるかを調査した。

また MPU の工場製造ロット違いを考慮して、製造ラインによる MPU の放射線耐性の差の有無も調査した。

4・2 試験結果 重イオン放射線試験の SEU 測定結果(代表値)を表 6, 7 に示す。MPU 内蔵 SRAM では、LET 値が高いほど、SEU が多く発生していることがわかる。特に注目すべきことは、表 7 の記憶情報が"0xff"の場合には SEU の発生が"0x00"に比べ非常に少ないことである。この原因として MPU への重イオン照射位置ずれの懸念があったが、後の調査で位置ずれ

Fig. 6 Radiation test chamber

Table 5. Ion beam energy spectrum

Ion	Energy [MeV]	LET [MeV/(mg/cm ²)]
$^{20}\text{Ne}^{6+}$	75	5.9
$^{40}\text{Ar}^{8+}$	150	14
$^{84}\text{Kr}^{20+}$	322	34

Fig.7 Experimental set ups of the measurement system for SEU and SEL tests (in case of Heavy Ion beam)

Table 6. Experimental results of SEU test (in case of Heavy ion beam irradiation) (Case: SRAM all data =0x00)

ION	LET [MeV/(mg/cm ²)]	Flux-rate [times / (sec/cm ²)]	Time [second]	SEU [times]	Cross-Section [cm ² /bit]
²⁰ Ne ⁶⁺	4.68	6469	155	3	9.13×10^{-11}
⁴⁰ Ar ⁸⁺	14.2	1400	30	103	7.48×10^{-8}
⁴⁰ Ar ⁸⁺	14.2	936	45	115	8.33×10^{-7}
⁴⁰ Ar ⁸⁺	14.2	936	60	93	5.05×10^{-8}
⁴⁰ Ar ⁸⁺	14.2	963	49	147	9.51×10^{-8}
⁸⁴ Kr ²⁰⁺	33.9	10.4	42	158	1.10×10^{-5}

Table 7. Experimental results of SEU test (in case of Heavy ion beam irradiation) (Case : SRAM all data =0xff)

ION	LET [MeV/(mg/cm ²)]	Flux-rate [times / (sec/cm ²)]	Time [second]	SEU [times]	Cross-Section [cm ² /bit]
²⁰ Ne ⁶⁺	4.68	4737	60	0	1.07×10^{-10}
²⁰ Ne ⁶⁺	4.68	7344	60	0	6.93×10^{-11}
²⁰ Ne ⁶⁺	4.68	16841	61	0	2.97×10^{-11}
⁴⁰ Ar ⁸⁺	14.2	1628	60	1	3.12×10^{-10}
⁴⁰ Ar ⁸⁺	14.2	5413	184	0	3.06×10^{-11}
⁸⁴ Kr ²⁰⁺	33.9	947	60	0	5.37×10^{-10}
⁸⁴ Kr ²⁰⁺	33.9	4532	106	0	6.35×10^{-11}

Table 8. Experimental results of SEL test (in case of Heavy ion beam irradiation)

ION	LET [MeV/(mg/cm ²)]	Flux-rate [times / (sec/cm ²)]	Time [second]	SEL [times]	Cross-Section [cm ² /bit]
²⁰ Ne ⁶⁺	4.68	16841	60	0	9.89×10^{-10}
⁴⁰ Ar ⁸⁺	14.2	5413	184	0	1.00×10^{-6}
⁸⁴ Kr ²⁰⁺	33.9	964	60	1	1.73×10^{-5}
⁸⁴ Kr ²⁰⁺	33.9	4532	112	11	2.17×10^{-5}

は検出されず、また高 LET 値時に SEL が発生していることから正しく照射されていることを確認した。これにより、実際の衛星ミッション運用の際には、SRAM へ記憶する情報を可能な限り“0xff”に近い形で記録することで、宇宙環境でも SEU 発生率を抑制させることができる（例として、ソフトウェアによる機器のスイッチングとして“0x00”か“0x01”で情報を指示する場合、“0xff”か“0xfe”として指示する）。

ロット違いの MPU については、本試験で LET 値が最も小さい²⁰Ne⁶⁺の場合でも SEL が多発し、SEU の測定が不能な状態に陥った。その後も高 LET のもとで試験を行ったが、常時発生する SEL 現象のため、SEU 測定はできなかった。これは比較的差の出た例かもしれないが、本 MPU には、ロット違いによる放射線耐性の違いがあることが明らかとなった。

記憶情報パターンやロット違いによる放射線耐性の違いについては、本研究に限らず他研究の記憶素子でも同じ現象が多数報告されており、記憶情報が“0xff”の

ほうが、比較的 SEU の発生は抑えられ、ロット違いによるシングルイベント耐性の違いは存在することが確認されている。本論文では、この事例に関して具体的に述べないが、記憶情報パターンの違いによる SEU 発生頻度差の原因として、SRAM の CMOS 回路構造上の理由が挙げられており、ロット違いに関しては、工場製造ライン個々の精度の違いが原因であること、などが報告されている⁽⁵⁾。

SEL 測定結果（代表値）を表 8 に示す。²⁰Ne⁶⁺、⁴⁰Ar⁸⁺での SEL 発生は検出されなかったが、⁸⁴Kr²⁰⁺から SEL が頻繁に発生している。SEL 発生時の電流値は、Cf₂₅₂試験時と同様であった。また、SEL 過電流耐久試験として、SEL 発生時から 5 秒放置して電源カットする実験を行ったが、同工程を 10 数回行っても、素子の破損は見られなかったことから、SEL 発生による過大電流に対して比較的強いことがわかった。

4-3 宇宙環境におけるSEUとSELの発生率予測解析

析 CREME 解析ソフトを用いて、宇宙環境におけるSEUとSELの発生率予測解析を行った。SEU解析の試験データにはSEUの発生が多かった表6の“0x00”データを選んだ。SEL解析に使用した試験データは表8である。これをもとにLET-反転断面積グラフを作成し、CREMEへ代入するWeibull曲線特性パラメータを取得した。Weibullは離散点の曲線の当てはめ方法として、信頼性工学では機器寿命の解析などによく用いられる手法である。図8、9は、式(2)でフィッティングしたLET-反転断面積特性曲線グラフである。

$$\sigma = \sigma_0 \times \exp \left\{ 1 - \exp \left(-1 \times \frac{L - L_0}{W} \right)^S \right\} \quad (2)$$

ここで、

σ : 反転断面積 [cm^2/bit]

σ_0 : 飽和反転断面積 [cm^2/bit]

L : 実行 LET [$\text{MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$]

L_0 : 閾値 LET [$\text{MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$]

W : 形状パラメータ [$\text{MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$]

S : 指数パラメータ

である。SEUとSELの曲線パラメータを表9に示す。

次に、CREMEに代入する宇宙放射線に関わる環境条件について述べる。著者らが研究開発している超小型カメラ衛星のミッションでは、軌道要素は国際宇宙ステーションと同様で、ミッション期間は1ヵ月間を予定している。このことから、表10にあるType-1~4の条件で解析した。解析条件は太陽活動、地磁気気候の2つであり、それぞれのCREMEの解析結果を示す。Type-1の条件が、4つのTypeの中で最も宇宙環境の放射線量が高い場合である。

SEU解析の結果、環境条件が最も悪い場合であるType-1でも、本MPU1個あたりのSEUの発生確率は、 3.93×10^{-3} SEU/device/day (8.48ヵ月に1回程度)であることが予測された。この程度の発生頻度であれば主要データを数箇所に記憶分散することで(冗長構成)、SEUによるデータエラーを修正させることが可能である。

SELについては、 $^{20}\text{Ne}^{6+}$ 、 $^{40}\text{Ar}^{8+}$ に対する試験(表8)でSELが検出されなかったが、たとえLET値が低くても、宇宙環境では稀に多量の粒子個数の照射が一度に暴露される場合があるなど、決してSEL発生確率はゼロにはならない。このことから、 $^{20}\text{Ne}^{6+}$ ではSELが0.001回、 $^{40}\text{Ar}^{8+}$ でのSELが1回生じたと仮定して、反転断面

Fig.8 SEU cross section of the MPU-SRAM as a function of LET

Fig.9 SEL cross section of the MPU as a function of LET

積を再計算した。この解析の結果、環境条件が最も悪い条件で、本MPU1個あたりのSELの発生は、 2.80×10^{-6} SEL/device/day (11,904ヵ月に1回程度)であることが予測された。この結果から、本ミッション期間中のSELの発生は非常に低いものと予測できる。またType-1からType-4に変化するにつれて、SEUとSELの発生確率が非常に低くなっており、表10の場合分けでも最大約5.5倍の差が生じることが明らかになった。このことから、ミッション運用時期をType-4に合わせる事が可能であれば、ミッションの成功率が向上すると考えられる。上記の結果より、予定された宇宙軌道におけるSEUとSELの発生確率は、宇宙環境における実用面で、本ミッション仕様に満足した放射線耐性を持っていることが明らかになった。

Table 9. Weibull fitting parameters

Weibull Fitting data	Parameter (SEU)	Parameter (SEL)
Limiting or plateau cross-section [cm^2/bit]	1.10×10^{-6}	2.11×10^{-5}
Threshold LET [$\text{MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$]	1.36	2.54
Width parameter [$\text{MeV}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$]	21.76	24.84
Dimensionless exponent	5	4

Table 10. Estimation of SEU and SEL rates (International Space Station (ISS) orbit is assumed)

Case	Type -1	Type -2	Type -3	Type -4
Magnetic weather condition	Stormy	Quiet	Stormy	Quiet
Solar quiet condition	Min	Min	Max	Max
Atomic number of lightest	1	1	1	1
Atomic number (heaviest)	92	92	92	92
Shield thickness [cm]	0.2	0.2	0.2	0.2
SEU-rate [SEU/device/day]	3.93×10^{-3}	2.22×10^{-3}	9.92×10^{-4}	7.06×10^{-4}
SEL-rate [SEL/device/day]	2.80×10^{-6}	1.81×10^{-6}	9.95×10^{-7}	7.98×10^{-7}

5. 結 論

本研究では、民生用半導体部品である 16bit-MPU の宇宙転用化として、放射線同位元素 Cf_{252} の照射試験および重イオン放射線試験を実施した。本 MPU は解析ソフト CREME により宇宙環境におけるエラー発生確率のシミュレーションを行った。解析の結果、本 MPU は放射線が最も強い時期 Type -1 の条件で、SEU は 8.48 ヶ月に 1 回程度、SEL は 11904 ヶ月に 1 回程度の頻度で発生することが明らかになった。これにより、本 MPU は民生半導体部品でありながら、宇宙空間でも十分に実用に耐えうる放射線耐性があることを示した。

文 献

- (1) 中須賀真一・松永三郎, CanSat 計画一日米大学による手作り衛星への挑戦, 日本航空宇宙学会誌, 第 48 巻 第 562 号, (2000), 589-596.
- (2) 宇宙開発事業団, 先導的期間プログラムのコンセプト-宇宙への「しきい」を下げる-, 宇宙開発委員会報告, (2002).
- (3) Satori, S., Takezawa, S., Mitsuhashi, R., Nagata, A., Ishikawa, T., Nakasuka, S. and Okamoto, H., Development of Nanosatellite for Mothership -Daughtership Experiment by Japanese Universities, The journal of space technology and science, vol.16 no.1, (2000), 19-26.
- (4) Naval Research Laboratory, Homepage: <http://crsp3.nrl.navy.mil/creme96/>, (1996).
- (5) 宇宙開発事業団, 宇宙用太陽電池・半導体素子の耐放射線性の研究 第二編半導体デバイス, 共同研究成果報告書, (1999).
- (6) NASA, Space Station Ionizing Radiation Environment Effects Test and Analysis Techniques, SSP30513B, (1994).
- (7) Tsuzuranuki, R., Chiba, K., Makihara, A., Kuboyama, S. and Matsuda, S., A Comprehensive SEU Test Method for Microprocessors, Proceedings of the 4th international workshop on radiation effects on semiconductor devices for space application, (2000), 109-112.
- (8) Velezco, R., Karoui, S. and Chapuis, SEU Testing of 32-bit microprocessors, IEEE Radiation Effects Data Workshop Record, (1992), 16-20.