

# カリフォルニウム 252 を用いた超小型衛星向けの放射線試験に関する研究

## 1.背景

現在、大学やベンチャー企業が超小型衛星を盛んに開発している。これは、超小型衛星の開発が低コストと短納期という長所を持つためである。この超小型衛星の長所を支えているのが民生部品の利用である。しかし、民生部品は宇宙環境、放射線、振動、熱などへの耐性が不明である。そのため、民生部品の宇宙環境に対する信頼度が衛星の信頼度に直結してしまう。宇宙環境への信頼度を上げるため、民生部品の環境試験が必要である。本研究では、数ある環境試験の中でも放射線試験について述べる。

従来の放射線試験は、加速器を利用していたため、時間とコストがかかり、試験方法も複雑であった。そこで、本試験では、カリフォルニウム 252 (以下、Cf-252) を利用することで、放射線試験の試験時間とコストを下げようと試みている。Cf-252 は、放射性同位体であり、核分裂により放射線を放出しているため、大掛かりな施設を必要とせず、取り扱いも容易である。

## 2.研究目的

衛星に起きる放射線異常の中でも、最も致命的なものとして Single-Event-Latchup (以下、SEL) が挙げられる。これは IC の寄生サイリスタに放射線が照射されることで、回路内に過電流が発生し、動作が停止する現象である。

本論文では、Cf-252 を用いた試験と実際の軌道上での SEL 発生具合を比較していった。照射サンプルには、H8 マイコンの HD64F36057 を使用した。HD64F36057 は 2012 年 5 月に打ち上げられた超小型衛星鳳龍式号に搭載された物と同じマイコンである。鳳龍式号は 2015 年 2 月 13 日現在までに軌道上で 8 回 SEL によると思われる故障が起きている。これらの結果から Cf-252 による放射線と実際の宇宙環境との相関を調べていき、超小型衛星に適した放射線試験法を導くことが本研究の目的である。

## 3.試験装置

本試験は、京都大学原子炉実験所にある Cf-252 用チャンバー(図 3-1)を利用して行った。

Cf-252 は低軌道における SEL 発生率の主な原因である陽子ではなく、重イオンを放出しており、宇宙環境と単純に比較できない問題がある。また、放射線の LET (Linear Energy Transfer) も  $35\sim 45[\text{MeV}/\text{cm}^2/\text{mg}]$  の狭い範囲にあり、各 LET に対する SEL の発生断面積を求めることができない。しかしながら、陽子線を照射する加速器に比べ遥かに小さな試験装置で済み、取り扱いも容易であるという利点をもつ。また、

従来の研究により加速器による陽子線と同じ効果の SEL を起こせることがわかっている。

Cf-252 試験チャンバーは、図 3-1, 3-2 のようになっており、線源を取り付けたステージを照射対象まで移動させるようになっている。線源と対象までの距離を変えることにより、重イオン線のフラックスを調節することができる。

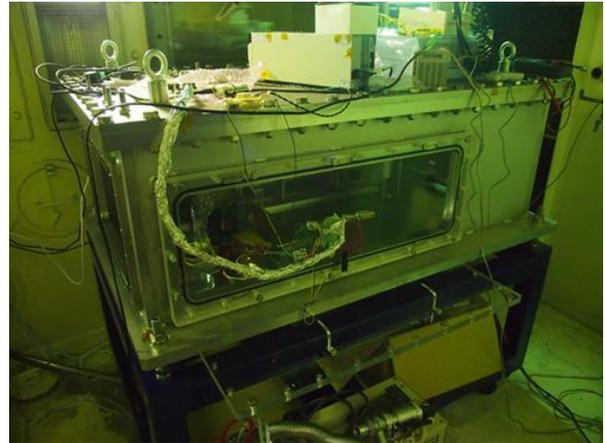


図 3-1. Cf-252 用チャンバー外観

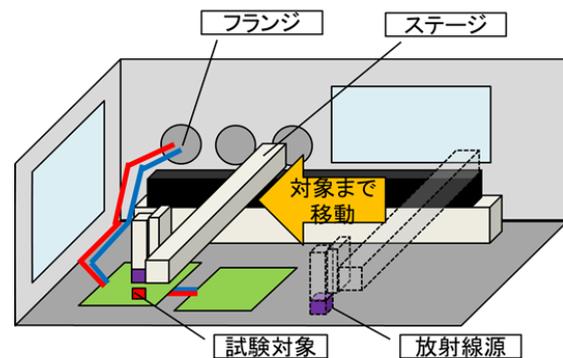


図 3-2. Cf-252 試験チャンバー概要

## 4.試験方法

Cf-252 は放射性同位体であるため、試験を行う時期により重イオンの放出量が変わる。そのため試験では HD64F36057 と Cf-252 との距離を変える事で照射量を調整して行き、様々な照射量での SEL の発生時間を求めていった。以下に試験手順を示す。

1. 図 4-1 のようにセッティングを行う
2. 消費電流を測るため計測プログラムを実行する
3. 線源を HD64F36057 の上に移動する
4. HD64F36057 に電力を供給する
5. 4.の状態を 0 秒として時間を計測し、SEL が発生するまで待つ
6. SEL が発生したら、発生までにかかった時間を記録する
7. 基板の電源を再起動することで SEL から復帰したことを確認する

8. 4~7. の手順を繰り返す

電流値はサンプルに直列に繋がれた計測用の回路より求めた。これらの試験を Cf-252 と HD64F36057 との間の距離を 1,2,3[cm] の 3 つの状態、それぞれ 100 回ずつ SEL を起こしていった。

また、これら Cf-252 による放射線試験の結果を鳳龍式号の軌道上での運用結果と比較していった。

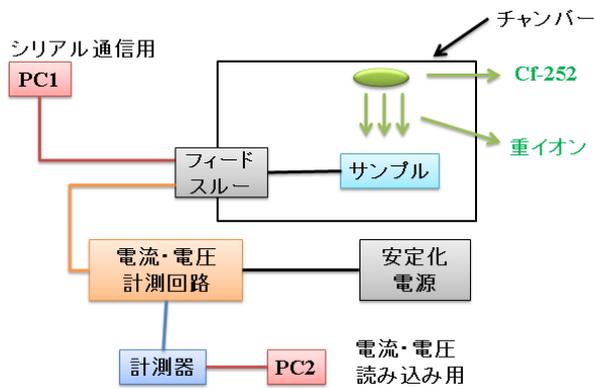


図 4-1. 試験システム

5. 試験結果

5-1. Cf-252 放射線試験結果

3 つの試験条件での、それぞれの SEL 平均発生時間と HD64F36057 への重イオンのフラックス、及び SEL 発生断面積を表 5-1 に示す。この時、線源から全方位への重イオン放出量は 784[ions/sec]であり、HD64F36057 内部チップの面積を 0.2[cm<sup>2</sup>]として、フラックスを計算した。

断面積は SEL の発生しやすさを示す値で、以下の式で表される。

$$\text{断面積} = 1 / (\text{平均発生時間} \times \text{照射量}) [\text{cm}^2/\text{ions}]$$

表 5-1. 3 つの照射条件での SEL 発生結果

	1[cm]	2[cm]	3[cm]
平均発生時間 [sec]	19.3	42.2	86.3
照射量 [ions / (sec・cm <sup>2</sup> )]	6.2	2.5	1.2
断面積 [cm <sup>2</sup> /ions]	8.4×10 <sup>-3</sup>	9.5×10 <sup>-3</sup>	9.7×10 <sup>-3</sup>

5-2. 鳳龍式号の運用結果

次に、鳳龍式号の運用結果について説明する。鳳龍式号には HD64F36057 が 2 つ搭載されており、常に衛星の全システムを管理している。これまでの運用(2014 年 12 月時点)において、計 8 回の SEL 発生が確認されている。軌道上での SEL 発生までの時間を表 5-2 に示す。

表 5-2. 軌道上での SEL 発生までの時間

故障回数	H8①	H8②
1 回目	18 日	43 日
2 回目	697 日	152 日

3 回目	162 日	11 日
4 回目	2 日	19 日

これらの結果から、SEL 発生に要する平均の発生時間は 155 日である。

6. 考察

鳳龍式号の軌道上での 2012 年 5 月から 2014 年 12 月までの間で、20MeV 以上のエネルギーを持つ陽子を WEB 上の宇宙環境情報システムサイトである SPENVIS を用いて計算したところ、平均フラックスは 68.7[protons/cm<sup>2</sup>/sec]であった。これらを用いて、軌道上での SEL 発生までの平均時間 155 日を使って計算したところ、発生断面積は 1.1×10<sup>-9</sup>[cm<sup>2</sup>/protons]となった。これにより、Cf-252 で得られた断面積 8.4~9.7×10<sup>-3</sup>[cm<sup>2</sup>/ions]という値は、低軌道上での 1.1×10<sup>-9</sup>[cm<sup>2</sup>/protons]に相当すると見積もることが出来た。

次に、実験結果をもとに Cf-252 における適切な試験数について統計学的に考える必要がある。そのため、まずは SEL の発生時間がどのような確率分布の事象であるかを調べる必要がある。

実験結果から、発生する時間の長さに規則性は無くランダムな現象に思えたため、ポアソン分布である可能性について考えてみる。図 6-1 に距離が 1cm の時の、照射開始から SEL が発生するまでの確率分布を示す。横軸に SEL が発生するまでの時間、縦軸にその時間における SEL が発生する確率を対数で示した。図中の赤線はポアソン過程を示しており、以下の式によって表される。

$$\text{確率分布 } P(t) = \exp(-\lambda t)$$

λ は平均発生時間の逆数である。

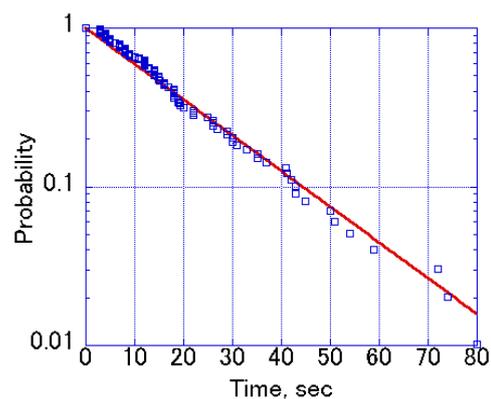


図 6-1. 時間経過に対する SEL が発生しない確率

図 6-1 の結果から、SEL までの発生時間はポアソン分布の現象であると思われる。

7. 総括

本研究により Cf-252 と極軌道上との断面積の比較を行う事が出来た。これにより Cf-252 の試験から軌道上での生存期間をおおよそ見積もることが可能である。

また、SEL 発生までの時間がポアソン分布の事象であることがわかった。発生分布をポアソン分布とすることで要求される試験数の見積もりが可能になる。