

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

### 宇宙機搭載の観測装置に用いる電子回路部の 放射線耐性評価

Evaluation of radiation tolerance of electronics parts used for  
instrument onboard spacecraft

勝瀬 陸, 吉岡 和夫, 桑原 正輝, 疋田 伶奈, 吉川 一郎

KATSUSE Riku, YOSHIOKA Kazuo, KUWABARA Masaki,  
HIKIDA Reina and YOSHIKAWA Ichiro

2020年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 目 次

概 要 .....	2
1 はじめに .....	4
2 超小型探査機搭載の極端紫外撮像装置 .....	4
3 吸収線量の見積もり .....	6
3.1 宇宙空間における放射線環境 .....	6
3.2 EQUULEUS に搭載される PHOENIX の吸収線量の見積もり .....	7
3.3 PHOENIX の吸収線量のシミュレーション結果 .....	9
4 ガンマ線照射試験 .....	11
4.1 ガンマ線照射試験 (A) : 信号増幅回路部 .....	12
4.1.1 条件 .....	12
4.1.2 試験結果 .....	13
4.2 ガンマ線照射試験 (B) : FPGA .....	16
4.2.1 条件 .....	16
4.2.2 試験結果 .....	17
5 考 察 .....	20
6 まとめ .....	20
謝 辞 .....	21
参考文献 .....	21

# 宇宙機搭載の観測装置に用いる電子回路部の 放射線耐性評価

勝瀬 陸<sup>\*1</sup>, 吉岡 和夫<sup>\*1</sup>, 桑原 正輝<sup>\*2</sup>, 疋田 伶奈<sup>\*1</sup>, 吉川 一朗<sup>\*1</sup>

## Evaluation of radiation tolerance of electronics parts used for instrument onboard spacecraft

KATSUSE Riku<sup>\*1</sup>, YOSHIOKA Kazuo<sup>\*1</sup>, KUWABARA Masaki<sup>\*2</sup>,  
HIKIDA Reina<sup>\*1</sup>, YOSHIKAWA Ichiro<sup>\*1</sup>

**Abstract:** In the space environment where the spacecraft is exposed to severe radiation, the instrument may suffer for data degradation or fatal malfunction such as the increase of dark current, upset, and change in current consumption. Recently, the university-made ultra-small spacecraft has become popular. As for the mission in this class, the cost and time for development can be reduced by using the commercial products. However, the problem is that these commercial products are thought to have no radiation tolerance. Then, estimation of the total radiation dose through the mission life, and radiation test for those parts are very important.

We are developing the extreme ultraviolet imager (PHOENIX : Plasmaspheric Helium ion Observation by Enhanced New Imager in eXtreme ultraviolet), onboard the ultra-small spacecraft (EQUULEUS), which will be launched in 2020 by NASA's SLS. The imager will observe the EUV emissions ( $\lambda=30.4$  nm) from He<sup>+</sup> in the Earth's plasmasphere from around the Earth-Moon 2<sup>nd</sup> Lagrange point. The commercial electronics parts for the analog circuit and FPGA are used for PHOENIX. The radiation tolerance for those parts must be verified. Then, we have estimated the total dose using Monte Carlo simulation (Geant4). In addition, the parts are tested under the facility for gamma-ray radiation (Cs137).

The estimated values for the total dose are around  $1 \times 10^{-2}$  krad/yr,  $3 \times 10^{-1}$  krad/hr,  $5 \times 10^{-2}$  krad/hr, and  $3 \times 10^{-1}$  krad/hr from Galactic cosmic rays, Solar flare particles, Earth's inner, and outer radiation belt particles, respectively.

EQUULEUS mission is planned to be operated for 2 years in orbit. By assuming the crossing time of the Earth's radiation belt to be 1 hour (which is feasible with respect to the normal deep-space missions), and the total duration of the direct hit of solar energetic particle event to be 1 month, the total dose for the

---

doi: 10.20637/JAXA-RR-19-004/0001

\* 2019年12月17日受付 (Received December 17, 2019)

<sup>\*1</sup> 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 (Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo)

<sup>\*2</sup> 宇宙科学研究所 宇宙航空研究開発機構

(Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

instruments are estimated to be 1.2 krad.

As a result of a radiation test, the IC used in the signal amplifying circuit and FPGA are confirmed to have a radiation resistance up to 12 and 5 krad, respectively. This means that those commercial products can be applied for the EQUULEUS mission.

For FPGA, the current consumption was increased after the total dose exceeds 12 krad. Furthermore, when the total dose exceeds 20 krad, the data error which seems to be related to bit inversion effect was observed. In addition, the annealing effect was seen by turning the power off and on again. However, an increasing trend of around 10 mA (about 10% of the normal current) was remained. This remains to be elucidated.

**Keywords:** radiation, ultra-small mission, commercial products, deep space mission

## 概 要

人工衛星や惑星探査機などに用いられる電子機器は、宇宙空間の放射線環境に曝されることで、ノイズの増加、ビット反転、消費電流の増加などの悪影響を受ける。近年、民生部品を活用することで開発にかかる費用と時間を低減し、大学の研究室規模で進める超小型探査機の開発が活発化している。しかし、このようなミッションに用いられる部品は、特に放射線耐性を考慮した設計がなされていない。そのため、装置の設計や軌道、さらにミッション期間に応じて総吸収線量を見積もり、放射線照射試験を通してその耐性を確認する必要がある。

我々は、2020 年度打ち上げ予定の超小型探査機 EQUULEUS に搭載される極端紫外撮像機 PHOENIX を開発している。PHOENIX は、地球プラズマ圏を構成するヘリウム一価イオンが太陽光共鳴散乱により発する輝線(波長 30.4 nm)を、地球一月第二ラグランジュ点近傍から準定常的に遠隔観測することで、地球周辺プラズマの大局的な動的描像を理解することを科学目的としている。

超小型探査機(6U サイズ)の枠組みにある EQUULEUS ミッションに搭載される PHOENIX には、民生品の信号増幅回路部と FPGA を用いているため、放射線耐性の確認は必須である。そこで我々は、モンテカルロ法を用いたシミュレーションツール(Geant4)によって、ミッション期間を通じた総吸収線量を見積もり、実際に試作機に対して放射線試験を行った。

シミュレーションの結果、供試体(信号増幅回路部および FPGA)の総吸収線量は銀河宇宙線、太陽フレア粒子、地球放射線帯粒子の内帯・外帯からそれぞれ約  $1 \times 10^{-2}$  krad/yr、 $3 \times 10^{-1}$  krad/hr、 $5 \times 10^{-2}$  krad/hr、 $3 \times 10^{-1}$  krad/hr と見積もられた。ミッション期間を通じた銀河宇宙線への曝露時間が 2 年間、地球放射線帯の通過時間と太陽フレア粒子への曝露時間が約 1 時間、太陽フレアのイベント数が 2 年間で 4 回としたとき、ミッション期間を通じた総吸収線量は約 2 krad である。

ガンマ線照射装置を用いた試験の結果、信号増幅回路部は 12 krad、FPGA は 5 krad までの放射線耐性が確認された。なお、FPGA は総照射量が 12 krad を越えた段階で消費電流の増加が確認された。さらに照射量が 20 krad を越えた時点では、FPGA もしくは、付随して用いられる A/D 変換素子におけるビット反転によるデータの異常が確認された。なお、電源の OFF/ON や、無通電状態を一定時間継続することでアニール効果がみられ、利得率の回復と消費電流の減少が確認された。しかし依然として、試験前と比べ約 10 mA (約 10%) 程度の増加傾向と画像出力値に変換した際に約 2,3 pixel 相当のずれが生じる利得率の変化は解消されなかった。放射線照射終了から 24 時間以上経過した際に確認された利得率の変動の原因は累積損傷等の影響の可能性も考えられるが、明確な因果関係は不明である。今後は、より詳細な利得率の変化を把握するために、細かい時間間隔での性能評価を実施する必要がある。

## 1 はじめに

我々は、2020年にNASAの新型ロケット（SLS: Space Launch System）で打ち上げられる予定の超小型探査機 EQUULEUS に搭載される極端紫外撮像機 PHOENIX（PHOENIX : Plasmaspheric Helium ion Observation by Enhanced New Imager in eXtreme ultraviolet）を開発している。PHOENIXは、ICやFPGA部に民生品を用いることで開発にかかる費用や時間を大幅に低減している。しかし、これらの部品は放射線により損傷しやすい半導体が多く用いられているにも関わらず、耐性を考慮した設計がなされていない。宇宙空間には銀河宇宙線や太陽フレア、地球放射線帯など様々な要因の放射線が満ちている。そのため、各々のミッションの軌道や運用期間に応じた総吸収線量を見積もり、放射線照射試験を通してその耐性を確認する必要がある。

本論文では、モンテカルロ法を用いたシミュレーションツール（Geant4）によって EQUULEUS ミッションにおける総吸収線量を見積もった。極端紫外望遠鏡 PHOENIX の電気回路部に用いられる素子のうち、特に放射線耐性に懸念のある信号増幅回路部（Amptek 社製 A225F、PH300）と、Actel 社製 FPGA（Field-Programmable Gate Array: ProASIC3）について、それぞれの放射線照射試験の結果を報告する。

## 2 超小型探査機搭載の極端紫外撮像装置

我々が開発している極端紫外撮像装置 PHOENIX は、開発費用と期間の削減のために、民生品の信号増幅回路部と FPGA を利用している。PHOENIX は、2020年にNASAの新型ロケット（SLS: Space Launch System）で打ち上げ予定の超小型探査機 EQUULEUS に搭載される。以下に、EQUULEUS と PHOENIX について簡単に紹介する。

### ● EQUULEUS

EQUULEUS（EQUilibrium Lunar-Earth point 6U Spacecraft）は、6Uサイズ（約10×20×30 cm）、重量14 kgのCubeSatクラスの超小型探査機である。このミッションの主な目的は、太陽—地球一月圏における軌道制御技術の実証である。質量や寸法など厳しい制約があるCubeSatながら、軌道制御技術を用いて地球—月の第二ラグランジュ点への効率的な航行を目指す。EQUULEUSには3機の科学観測機器が搭載される。本研究で扱うPHOENIXに加えて、月面衝突発光観測装置（DELPHINUS）及びダストモニタ（CLOTH）が搭載される<sup>1)</sup>。

### ● PHOENIX

PHOENIXは、包絡域6.6×6.6×10 cm、重量537.5 gという極めて小型の極端紫外撮像装置である。PHOENIXは地球のプラズマ圏を構成するヘリウム一価イオンが太陽共鳴散乱を通して発する極端紫外領域の輝線（波長30.4 nm）を、地球—月の第二ラグランジュ点から準定常的に観測

することで、プラズマ圏の動的描像を巨視的に理解することを科学目的としている。この波長帯における高効率の光学素子（鏡・フィルタ・検出器）が存在しないため、反射回数を極力少なくして集光効率を向上するという光学設計思想である（図 1）。主鏡（球面鏡）で集められた光が炭素とアルミニウム製の波長選別用薄膜フィルタを通り、MCP（Micro Channel Plate）と RAE（Resistive Anode Encoder）で構成される 2 次元位置検出器で電気信号に変換される。

MCP の入射部において光电効果により光電子を生成する。さらに光電子は電子なだれを引き起こし、最終的に約 1 pC の電子雲を生成し RAE 表面上に到達する。電子雲は、その RAE 上の位置に応じて各極（チャンネル）にそれぞれ電流として流れる。この電流を電圧に変換・増幅、及び A/D 変換して、さらに FPGA で位置演算処理することで、最終的には MCP への入射光を二次元画像として取得できる（図 2）<sup>2,3,4</sup>。

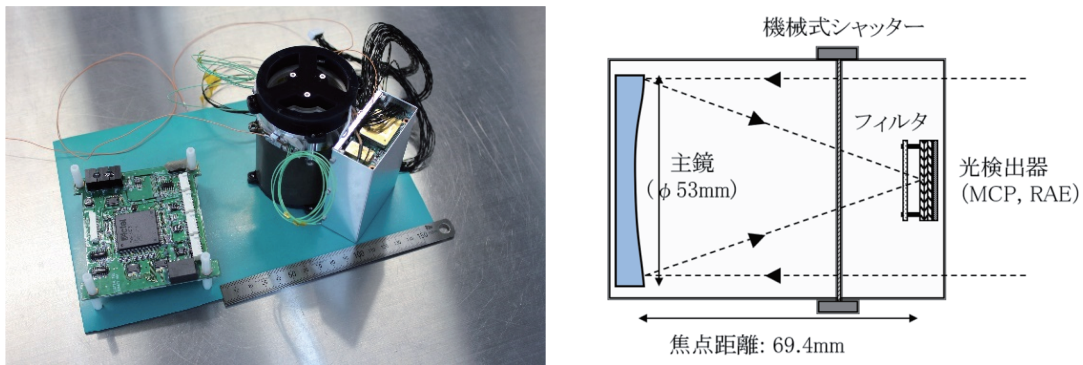


図 1. (左) : PHOENIX (FM) の鏡筒、信号増幅回路部 (A225F・PH300)、信号演算回路部 (FPGA)。黒色塗装が施された鏡筒部分に信号増幅回路部が取り付けられている。(右) : PHOENIX の光学素子の配置図

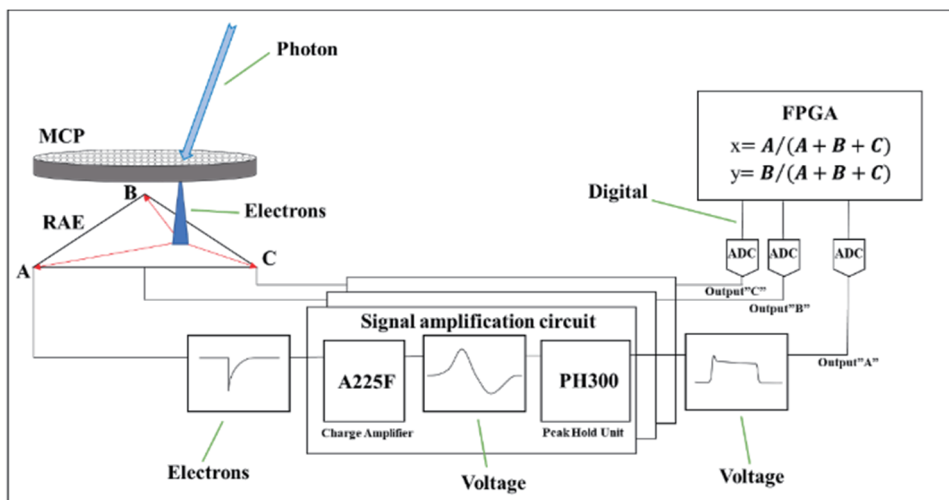


図 2. PHOENIX の観測システムのブロック図

### 3 吸収線量の見積もり

#### 3.1 宇宙空間における放射線環境

宇宙放射線には、大別して銀河宇宙線、太陽フレア粒子、および地球放射線帯由来のプラズマの3種類がある。以下でそれぞれについて簡単に紹介する。なお、図3~6と表1は、各宇宙線のフラックスと、本研究で用いた近似式を表している。

- 銀河宇宙線：超新星爆発が起源と考えられている<sup>5)</sup>。粒子の種類は主に高エネルギー（100 MeV - 100 TeV）の陽子である。全領域へ等方的、定常的に放射線を照射する。
- 太陽フレア粒子：フレアによって太陽表面から放出される高エネルギー荷電粒子（10 MeV - 220 MeV）。指向性が高い。宇宙機に甚大な影響を及ぼすような最大クラスの太陽フレアの発生は10年に1回程度と低頻度である。
- 地球放射線帯由来のプラズマ：地球磁場に捕捉された高密度・高エネルギーの陽子と電子（1 keV - 300 MeV）。内帯と外帯の二重構造となっており、内帯は陽子、外帯は電子が支配的である。

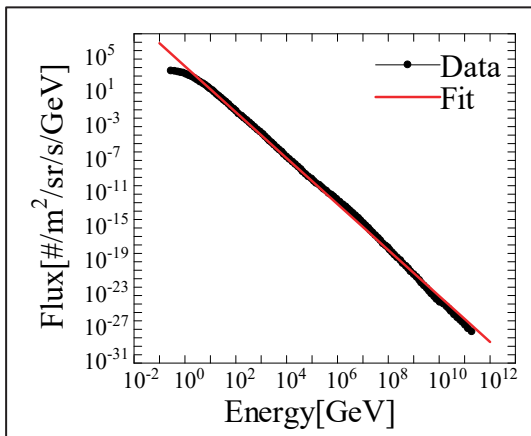


図 3. 銀河宇宙線のフラックス<sup>6)</sup>

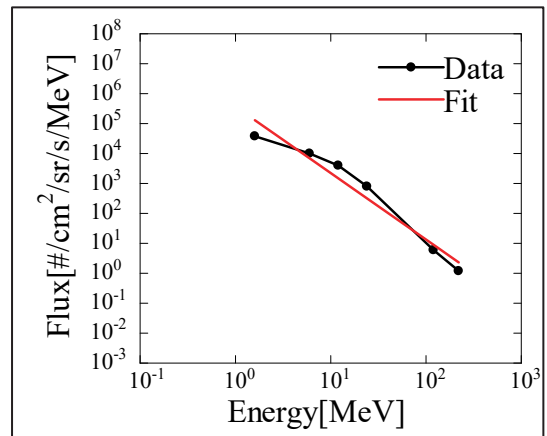


図 4. 太陽フレア粒子のフラックス<sup>7)</sup>  
過去最大クラスの太陽フレア



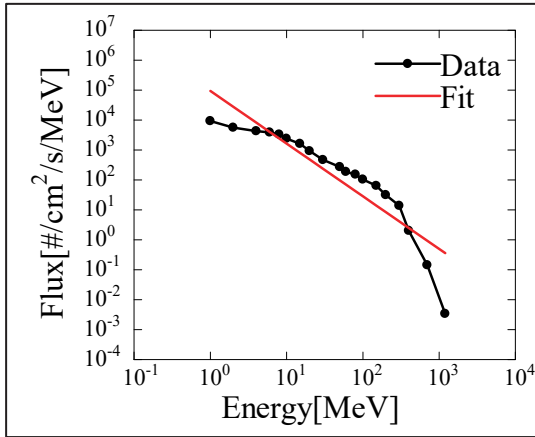


図 5. 地球放射線帯内帯の陽子のフラックス (AP9 model より導出<sup>8,9,10,11,12)</sup>)

フラックスが最大となる高度 2,000 km の赤道面上を仮定している。

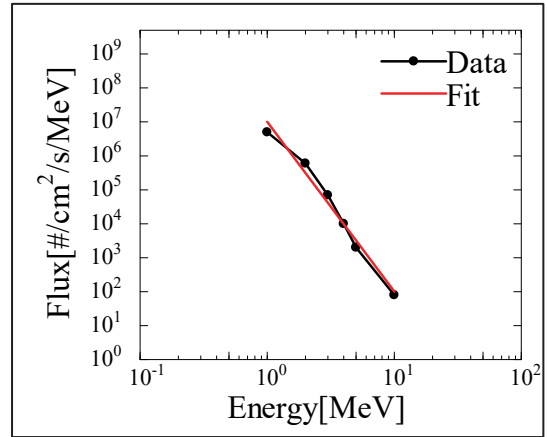


図 6. 地球放射線帯外帯の電子のフラックス (AE9 model より導出<sup>8,9,10,11,12)</sup>)

フラックスが最大となる高度 20,000 km の赤道面上を仮定している。

表 1. 宇宙放射線のフラックス (近似式)

銀河宇宙線 (陽子)	$Flux(x) = 1.4 \times 10^4 x^{-2.7} (100 \text{ MeV} \leq x \leq 100 \text{ TeV})$
太陽フレア粒子 (陽子)	$Flux(x) = 4.7 \times 10^6 x^{-2.2} (10 \text{ MeV} \leq x \leq 220 \text{ MeV})$
地球放射線帯内帯 (陽子)	$Flux(x) = 7.8 \times 10^4 x^{-1.5} (10 \text{ MeV} \leq x \leq 300 \text{ MeV})$
地球放射線帯外帯 (電子)	$Flux(x) = 8.3 \times 10^6 x^{-5.0} (1 \text{ MeV} \leq x \leq 10 \text{ MeV})$

以上で紹介した宇宙放射線が、集積回路に用いられる半導体に多量に入射すると、内部の電子が励起され、過電流やビット反転などの誤作動が生じる恐れがある。これらの対策を講じるため、まずはミッション期間における総吸収線量を見積もる必要がある。本研究では、モンテカルロ法を用いたシミュレーションツール (Geant4) によって、半導体における総吸収線量を計算した<sup>13,14,15)</sup>。

### 3.2 EQUULEUS に搭載される PHOENIX の吸収線量の見積もり

EQUULEUS に搭載される PHOENIX は、打ち上げ後、地球放射線帯を脱出するまで SLS ロケットによって輸送される。放射線外帯を通過した後に高度 25,000 km 付近でロケットから放出され、地球、月のフライバイを繰り返し、最終的に地球—月の第二ラグランジュ点への渡航を目指す。なお、計画上のミッション期間は 2 年間で予定している。

吸収線量を見積もるためには、各宇宙線のフラックスに曝露された期間を決定する必要がある。PHOENIX ミッションでは、各フラックスに曝露される期間を、

- 地球放射線帯のフラックス—1 時間
- 太陽フレア (最大クラス) のフラックス—1 時間

- 銀河宇宙線のフラックス—2年間

と仮定した。ここで最も考慮すべき事柄は、ミッション期間内の太陽フレアの発生回数である。本研究では、JAXA の規準文章を参考にして、太陽フレアイベントが発生する確率  $p$  を記述する改良型ポアソン統計（次式）を用いる<sup>16)</sup>。

$$p(n, t; N, T) = \frac{(n + N)! (t/T)^n}{n! N! (1 + t/T)^{N+n+1}}$$

この式は、時間  $T$  の間に観測されたイベントの発生頻度  $N$  に基づき、時間  $t$  の間に  $n$  回のイベントが発生する確率を表している。X クラスの太陽フレアは過去 36 年間に 40 回発生している。したがって、2 年間の運用期間における太陽フレアの発生頻度は、有意水準を 5% としたとき、4 回以下と予測される。

PHOENIX には、民生品の信号増幅回路部（Amptek 社製、A225F・PH300）と FPGA（Actel 社製、ProASIC3）が用いられている。これら民生品は 1 mm 厚の Al で出来た直方体によって遮蔽されているが、本シミュレーションでは、簡単化のために平板モデルを採用した。平板モデルでは、供試体の片方向に板状の隔壁（シールド）を配置し、隔壁が配置された方向からのみ放射線を平行入射させる。総吸収線量を見積もるための条件として、背景空間を希薄大気（真空）と定義し、その中に供試体としてケイ素（Si）、隔壁としてアルミニウム（Al）を図 7 に示すように配置した。

供試体に照射する放射線を、図 7 において左から右側方向に向けて平行入射した。本研究で用いた各パラメータを表 2 に示す。銀河宇宙線、太陽フレア粒子、地球放射線帯内帯は陽子を、地球放射線帯外帯は電子を校正粒子として定義した。

表 2. シミュレーションに用いたマスモデル

	物質	パラメタ
シミュレーション空間	真空	10 cm × 10 cm × 10 cm
供試体	ケイ素 (Si)	10 mm × 10 mm × 1 um
隔壁	アルミニウム (Al)	10 mm × 10 mm × 1 mm

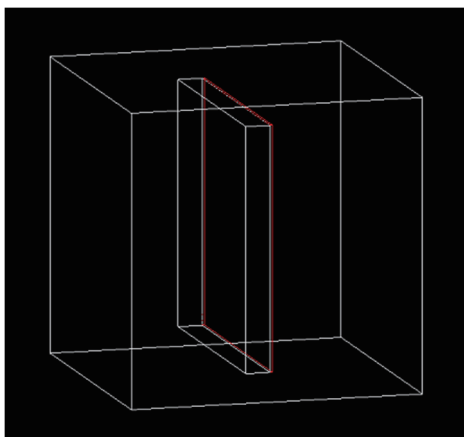


図 7. シミュレーションに用いた隔壁と供試体。立方体がシミュレーション空間全域、白い直方体が隔壁 (Al)、赤い直方体が供試体 (Si) を示す。放射線は左から右方向に入射する。

Geant4 のシミュレーションでは、表 1 の近似式のべき乗分布に従った放射線を、それぞれ 10 万発入射した際の Si における総吸収エネルギーを出力値とした。出力されたエネルギーと供試体の質量の逆数の積は、1 秒あたりの放射線の総数を  $y$  個としたとき、 $100,000/y$  秒あたりの総吸収線量に相当する。計算に用いた定数を表 3 に記す。

表 3. 吸収線量を求める際に使用した定数

Si の密度	$2.33 \text{ g/cm}^3$
Si の体積	$1.00 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$
供試体の質量	$2.33 \times 10^{-7} \text{ kg}$

### 3.3 PHOENIX の吸収線量のシミュレーション結果

シミュレーションの結果得られた供試体の吸収エネルギースペクトルを図 8~11 に示す。銀河宇宙線、太陽フレア粒子、地球放射線帯粒子の内帯・外帯の吸収線量はそれぞれ約  $1 \times 10^{-2} \text{ krad/yr}$ 、 $3 \times 10^{-1} \text{ krad/hr}$ 、 $5 \times 10^{-2} \text{ krad/hr}$ 、 $3 \times 10^{-1} \text{ krad/hr}$  と見積もられた。銀河宇宙線への曝露時間が 2 年、地球放射線帯の通過時間と太陽フレア粒子への曝露時間が 1 時間、加えて、太陽フレアの発生頻度は 4 回とし、そのすべてが探査機に直撃したと仮定すると、ミッション期間を通じた総吸収線量は約 2 krad である。

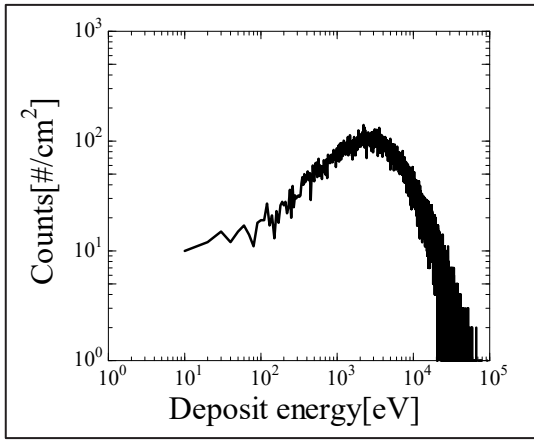


図 8. 銀河宇宙線による吸収エネルギースペクトル  
銀河宇宙線のフラックスのべき乗に沿った陽子を 10 万発入射した

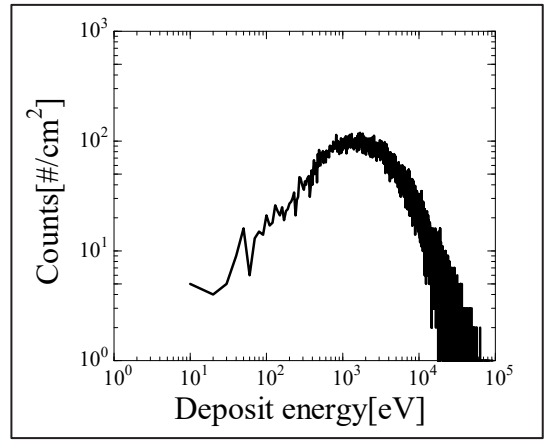


図 9. 太陽フレアによる吸収エネルギースペクトル  
太陽フレアのフラックスのべき乗に沿った陽子を 10 万発入射した

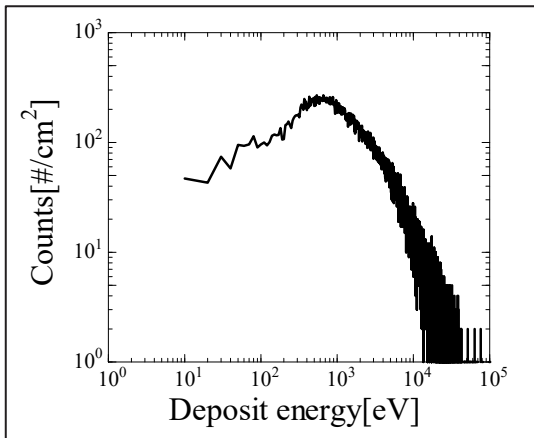


図 10. 地球放射線帯内帯による吸収エネルギースペクトル  
地球放射線帯内帯のフラックスのべき乗に沿った陽子を 10 万発入射した

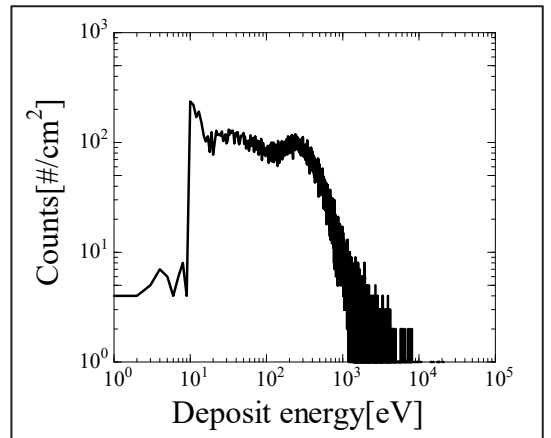


図 11. 地球放射線帯外帯による吸収エネルギースペクトル  
地球放射線帯外帯のフラックスのべき乗に沿った電子を 10 万発入射した

表 4. 各宇宙線の吸収線量の見積もり結果

	吸収線量 [krad]			
	銀河宇宙線	太陽フレア粒子	地球放射線帯内帯	地球放射線帯外帯
1 hour	$1 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-1}$
1 year	$1 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^3$	$4 \times 10^2$	$2 \times 10^3$

#### 4 ガンマ線照射試験

宇宙機に搭載された供試体は、放射線源から空間的に一様な曝露を受ける。そのため、指向性が高い陽子や電子などの粒子線を用いた放射線照射装置ではなく、比較的空間一様に放射線を照射できるガンマ線照射装置を用いた。本研究では、東京都江東区の都立産業技術研究センターの装置を利用した。なお、ガンマ線照射試験の線源は、661.7 keV のガンマ線を放出するセシウム 137 (Cs137) を用いた。単位時間あたりのガンマ線照射率は、線源と供試体との距離を変えることで調整する。

本試験は、2回に分けて行った。ガンマ線照射対象物は、信号増幅回路部（1チャンネル）とFPGAである。試験のブロックダイアグラムを図12に示す。PHOENIXのフライト品は、FPGAと信号増幅回路部が3チャンネルとも接続されるが、本試験は、1チャンネルだけ接続された状態、かつ、常に回路に通電した状態で行った（電源電圧10V、初期状態における消費電流86mA）。各試験中は照射対象物以外を6cmの鉛で遮蔽した（透過率を約0.07%にしている）。図13に本研究で利用したガンマ線照射装置の写真を示す。

供試体の性能は、回路全体の消費電流値の変化と信号増幅回路部の出力線形性をもって評価する。出力線形性の評価には、パルスジェネレータとセラミックコンデンサを組み合わせた校正装置を利用した。すなわち、供試体となる回路に1pCから10pCまでの疑似電荷パルスを1pC刻みで入力し、FPGAを介して得たそれぞれの利得率特性（12bit分解能）の再現性を評価する。なお、疑似パルスは図2に示すMCP、RAEから流れる電荷パルスと等価的なものである。

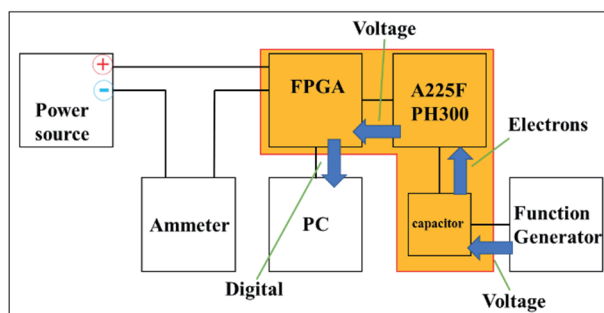


図 12. 試験中の接続環境

オレンジ色の部分がガンマ線照射装置内

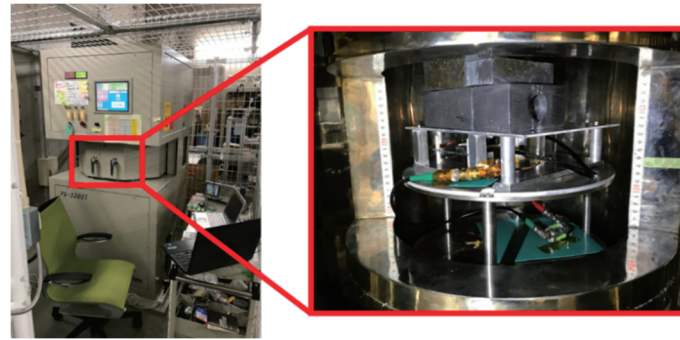


図 13. ガンマ線照射試験の様子

(左) : ガンマ線照射装置 (右) : ガンマ線照射装置内部

#### 4.1 ガンマ線照射試験 (A) : 信号増幅回路部

信号増幅回路部は RAE の各極に流れる電荷を電圧に変換して増幅し、さらに AD 変換のために波形変換（ピークホールド）する役割を果たす。図 14 に試験に供した PHOENIX 信号増幅回路部の写真を示す。これは、フライト品と全く同じ基板パターン、コーティングの物である。

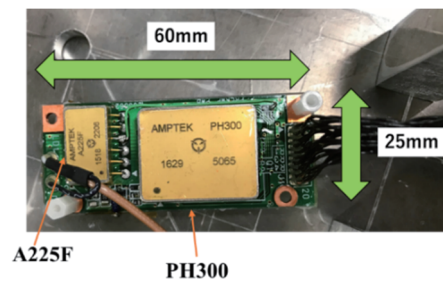


図 14. 信号増幅回路部の写真

型番 : A225F、PH300 (AMPTEK 社)

##### 4.1.1 条件

図 13 の様に、供試体を装置内部に配置することで、上側に設置されている線源からガンマ線を照射できる仕組みである。単位時間当たりの照射率は、約 13 krad/hr とした。さらに、照射を 4 回に分割し、各照射の間に性能評価の時間を設けた。なお、最終的な総照射線量は 45 krad である。本試験における総吸収線量の時間変化を図 15 に示す。

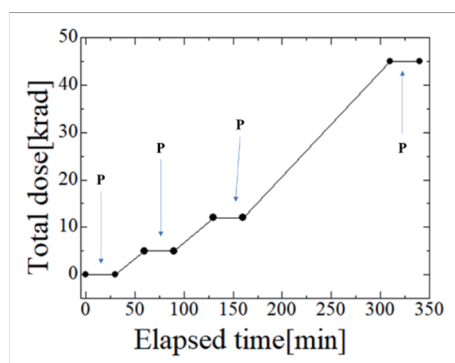


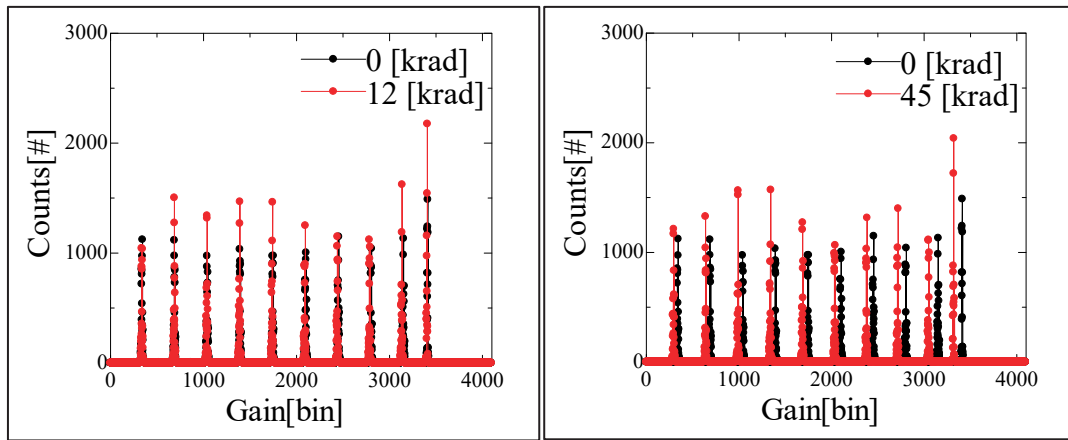
図 15. 信号増幅回路部のガンマ線照射スケジュール

P : 性能評価の実施

#### 4.1.2 試験結果

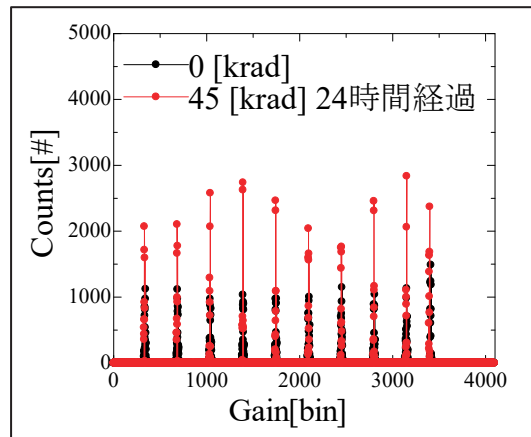
図 16 は、照射線量が 0 krad、12 krad、45 krad と 45 krad 照射終了から 24 時間経過した際の利得率特性を比較している。入力した疑似パルス (1~10 pC) を電圧に変換・増幅し、さらに AD 変換した値を横軸にとっている。なお、この値は FPGA 演算子、MCP 面における画像として出力する際に用いられる変数である。図 16 において、0 krad 照射時と 45 krad 照射時で有意な利得率特性の変化が確認された。これは、仮に 1 チャンネルだけが放射線に曝露された最悪の場合において、画像出力が約 8 pixel 相当のずれが生じることを示している。しかし、24 時間経過後に性能を評価したところ、利得率が回復していることが確認された。これはアニール効果と考えられる。表 5 は、各線量における入力電荷と利得率の関係を表している。45 krad 照射時に利得率が減少していることと、24 時間経過後に利得率が回復していることが分かる。

図 17 に、試験中の電流値の増減を示す。試験を通して、電流値の大きな変化は見られなかった。



(i)

(ii)



(iii)

図 16. 信号増幅回路部のガンマ線照射結果



表 5. 信号増幅回路部におけるそれぞれ吸収線量と各入力電荷に対応する利得率のピーク値と半値幅

		吸収線量					
		0 krad	5 krad	12 krad	45 krad	45 krad (24時間経過)	
入力電荷	1 pC	ピーク値 bin	341	340	339	296	332
		半値幅 bin	7	6	6	6	3
	2 pC	ピーク値 bin	691	690	689	643	684
		半値幅 bin	7	6	6	6	3
	3 pC	ピーク値 bin	1043	1042	1040	992	1039
		半値幅 bin	8	6	6	5	3
	4 pC	ピーク値 bin	1395	1393	1391	1341	1392
		半値幅 bin	7	6	6	6	1
	5 pC	ピーク値 bin	1748	1744	1741	1689	1744
		半値幅 bin	7	6	6	6	3
	6 pC	ピーク値 bin	2102	2096	2092	2036	2097
		半値幅 bin	8	6	7	6	3
	7 pC	ピーク値 bin	2454	2446	2442	2380	2450
		半値幅 bin	7	6	6	6	4
	8 pC	ピーク値 bin	2084	2793	2788	2716	2800
		半値幅 bin	7	6	6	6	3
	9 pC	ピーク値 bin	3153	3142	3135	3050	3151
		半値幅 bin	8	7	6	6	2
	10 pC	ピーク値 bin	3412	3408	3406	3319	3398
		半値幅 bin	5	3	4	4	3

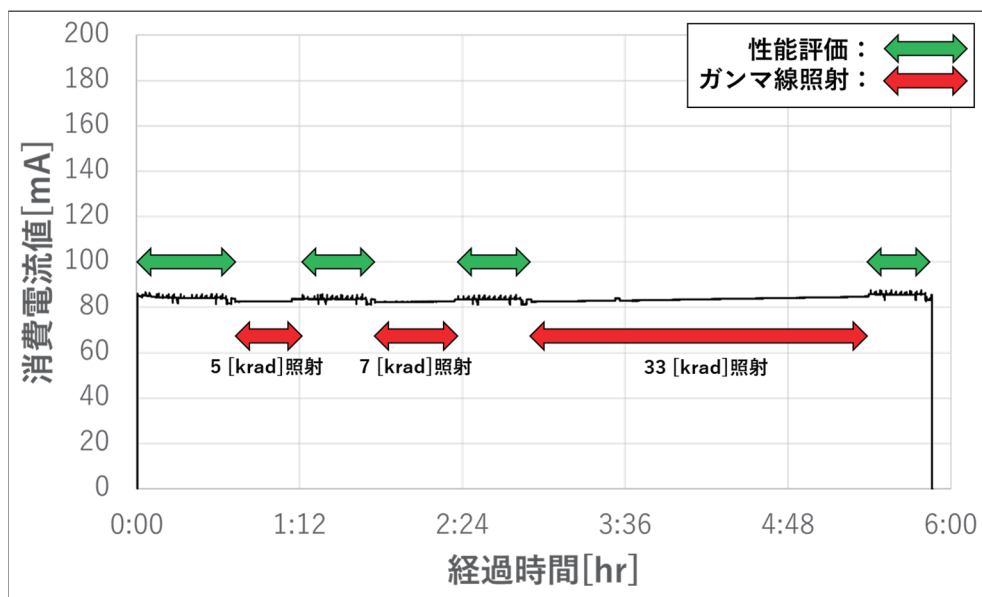


図 17. 信号増幅回路部のガンマ線照射試験時の電流値の変動

## 4.2 ガンマ線照射試験 (B) : FPGA

信号増幅回路部と同様に、FPGA 基板に対しても放射線照射試験を行った。なお、FPGA は画像出力時の演算処理とコマンド送信処理をする集積回路である。

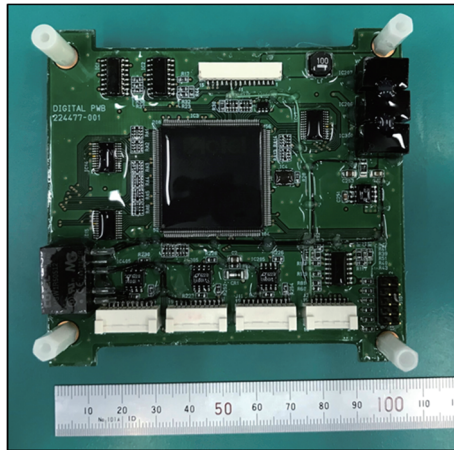


図 18. 試験に供した FPGA 基板 (Actel 社、ProASIC3)

### 4.2.1 条件

FPGA に対するガンマ線照射率は約 18 krad/hr とした。照射は 3 回に分割しており、各照射の間に性能評価の時間を設けた。試験を通しての総照射線量は 20 krad である。本試験における照射率および総吸収線量の時間変化を図 19 に示す。

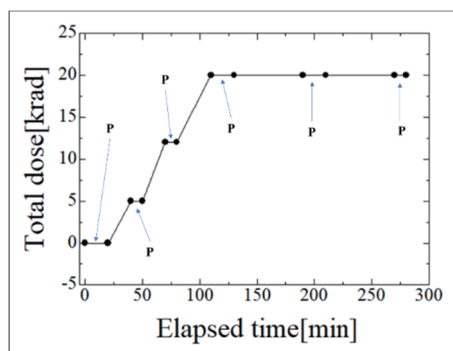


図 19. FPGA のガンマ線照射スケジュール

P : 性能評価の実施

#### 4.2.2 試験結果

図 20 は、照射線量が 0 krad、12 krad、20 krad と 20 krad 照射終了から 1, 2, 24 時間、また約 4 ヶ月経過した際の利得率特性を比較している。さらに図 21 には試験を通した消費電流値の時間変化を表している。

線量が 12 krad の際は、約 10 mA の電流値の上昇を確認したが、利得率に異常は見られなかった。20 krad 照射時は、利得率の異常と約 40 mA の電流値の上昇を確認した。しかし、TL/CM 送受信処理自体には問題が無かったため、FPGA 基板上にある A/D 変換素子に異常が発生した可能性が高い。これらの異常は、ガンマ線照射によるビット反転と過電流が原因と考えられる。20 krad 照射時から 1, 2 時間経過後は、アニール効果によって利得率が正常値へと回復したが、約 10 mA の電流値の上昇は継続していた。電源を OFF にした状態で、24 時間経過した後再度性能評価試験を行った際は、二次元出力画像において約 2, 3 pixel 相当の変動と、約 10 mA の電流値の上昇が確認された。さらに、同様に電源を OFF にした状態で、約 4 か月間経過した後評価試験を行った際は、二次元出力画像において約 2, 3 pixel 相当の変動と、約 5 mA の電流値の上昇が確認された。

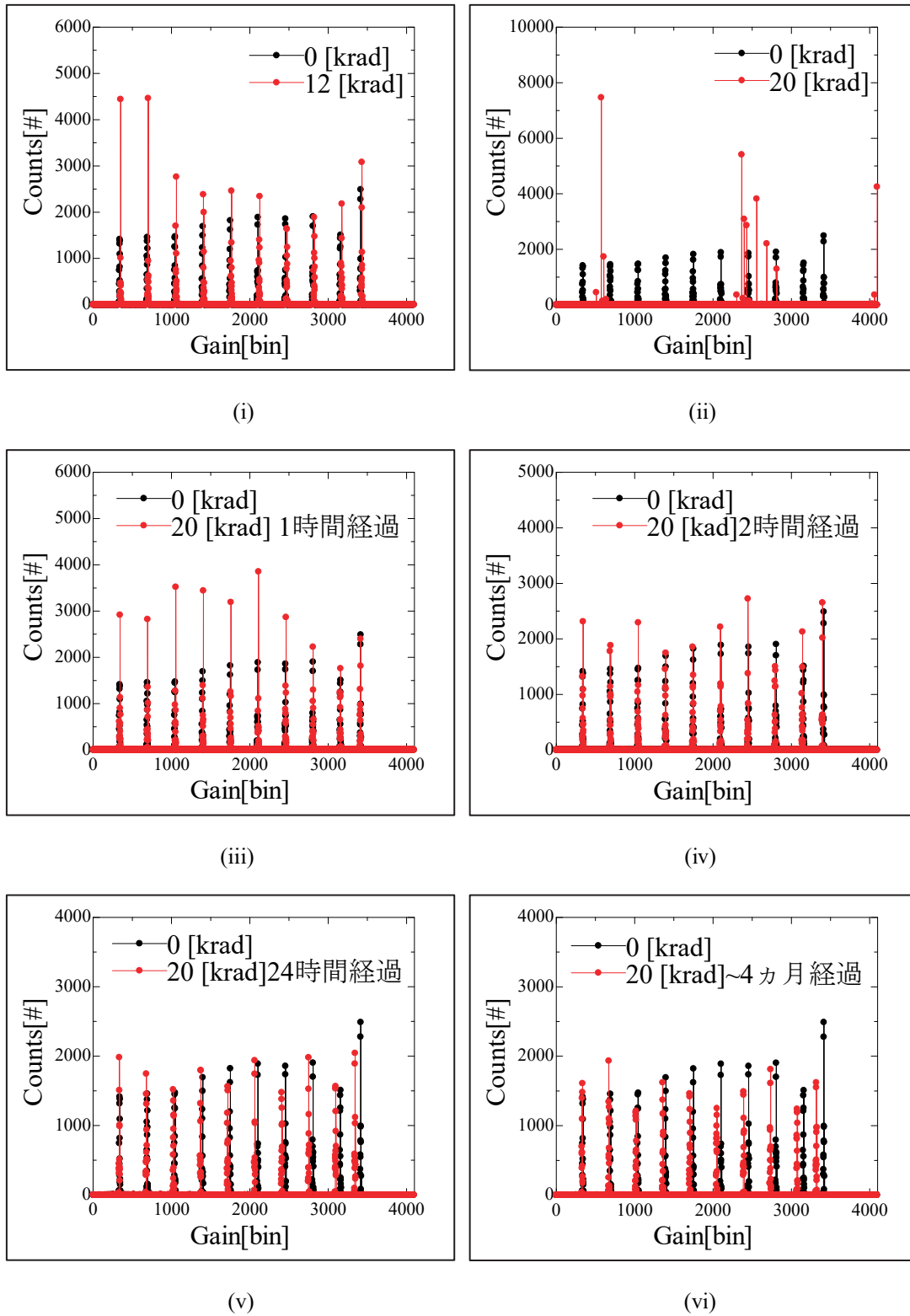


図 20. FPGA のガンマ線照射結果

表 6. FPGA におけるそれぞれ吸収線量と各入力電荷に対応する利得率のピーク値と半値幅

		吸収線量								
		0 krad	5 krad	12 krad	20 krad	20 krad (1時間経過)	20 krad (2時間経過)	20 krad (24時間経過)	20 krad (約4カ月経過)	
入力電荷	1 pC	ピーク値 bin	341	342	351	-	344	342	337	333
		半値幅 bin	4	5	1	-	4	5	4	5
	2 pC	ピーク値 bin	692	693	703	-	697	692	681	675
		半値幅 bin	4	5	1	-	5	5	4	5
	3 pC	ピーク値 bin	1045	1047	1063	-	1055	1047	1027	1019
		半値幅 bin	4	4	1	-	1	4	5	5
	4 pC	ピーク値 bin	1398	1340	1413	-	1407	1397	1374	1362
		半値幅 bin	4	4	6	-	1	5	4	5
	5 pC	ピーク値 bin	1750	1752	1767	-	1759	1747	1718	1706
		半値幅 bin	4	4	3	-	1	5	4	5
	6 pC	ピーク値 bin	2103	2106	2126	-	2111	2099	2064	2050
		半値幅 bin	3	5	4	-	1	5	4	5
	7 pC	ピーク値 bin	2456	2460	2475	-	2462	2448	2410	2393
		半値幅 bin	4	5	5	-	3	3	5	5
	8 pC	ピーク値 bin	2807	2810	2826	-	2809	2796	2753	2735
		半値幅 bin	3	5	5	-	4	5	5	4
	9 pC	ピーク値 bin	3157	3160	3175	-	3157	3143	3097	3076
		半値幅 bin	4	4	3	-	5	4	4	5
	10 pC	ピーク値 bin	3416	3421	3431	-	3414	3399	3344	3321
		半値幅 bin	2	4	1	-	3	1	4	5

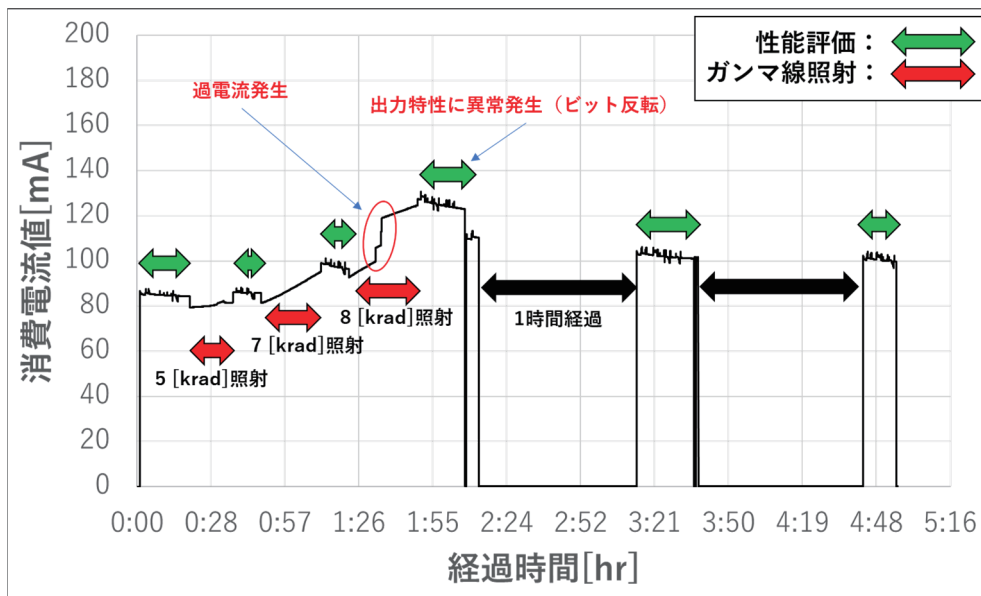


図 21. FPGA のガンマ線照射試験時の電流値の変動

## 5 考察

本研究の結果、EQUULEUS/PHOENIX に用いる信号増幅回路部（Amptek 社、A225F, PH300）と FPGA（Actel 社、ProASIC3）は、それぞれ 12 krad と 5 krad までの放射線耐性があることが確認できた。吸収線量がこれ以上の値になると利得率の変化や、消費電流値の増加が確認された。EQUULEUS のような深宇宙探査ミッションは、地球放射線帯の中にいる時間が短い（1 時間以下）ため、放射線耐性という観点では民生品で十分であることを意味する。

なお、仮にこれらの信号増幅回路部と FPGA を地球周回軌道（約 20,000 km）で用いる場合、吸収線量が  $2 \times 10^3$  krad/yr を超えるため、Al 10 mm 以上の遮蔽を設置するか、もしくはより耐性の高い部品に換装する必要がある。なお、シールドを Al 1 mm 厚から Al 10 mm 厚にすることで、吸収線量が約  $9 \times 10^{-1}$  krad/yr に減少する。この状況下であれば、約 12 年間の運用も可能である。しかし、質量コストが高くなるため、あらかじめ放射線耐性の高い部品を用いる方が、ミッションの進め方としては現実的である。同様に、極めて厳しい放射線環境を有する木星探査ミッションへの踏査機器としても、高い放射線耐性（少なくとも公称値 20 krad）のある部品を用いるべきである。

## 6 まとめ

近年、民生品の活用を通して、大学の研究室規模での超小型探査機の開発が実現している。しかし、民生品には、放射線の耐性が考慮されていないという欠点がある。

我々は、PHOENIX ミッションを題材として、使用される民生品の吸収線量の見積もりと放射線耐性の確認をした。放射線環境は、銀河宇宙線、太陽フレア粒子および地球放射線帯由来のプラズマを考えている。モンテカルロ法を用いたシミュレーションツール（Geant4）によって、放射線と供試体のエネルギー収支を求めた結果、総吸収線量は約 2 krad/yr と見積もられた。

ガンマ線照射装置を利用した試験より、信号増幅回路部と FPGA の放射線耐性を、それぞれ総吸収線量が 12 krad と 5 krad まで確認した。これ以上の吸収線量になると、ビット反転による利得率の異常や過電流による消費電流の増加が確認された。試験終了から 24 時間以上経過した際に確認された利得率の変動の原因は累積損傷等の影響の可能性も考えられるが、明確な因果関係は不明である。今後は、より詳細な利得率の変化を把握するために、細かい時間間隔での性能評価を実施する必要がある。

## 謝辞

放射線試験に協力して下さった東京都立産業技術研究センターの関口様には厚く御礼を申し上げ、感謝する次第です。

## 参考文献

- 1) Funase, R., et al., Mission to Earth–Moon Lagrange Point by a 6U CubeSat: EQUULEUS, IEEE, IEEE Aerospace & Electronics Systems Magazine, (2019), in press.
- 2) Yoshioka, K., et al., The extreme ultraviolet spectroscope for planetary science, EXCEED., Planetary and Space Science, Vol.85, (2013), pp250-260.
- 3) Yoshikawa, I., et al., Telescope of extreme ultraviolet (TEX) onboard SELENE: science from the Moon., Earth, planets and space, Vol.60, (2008), pp407-416.
- 4) 桑原正輝, et al., 超小型探査機搭載の極端紫外光観測装置 PHOENIX の開発., (2019).
- 5) Ackermann, M., et al., Detection of the characteristic pion-decay signature in supernova remnants., Science, Vol.339, (2013), pp807-811.
- 6) Cronin, J. W., et al., Cosmic rays at the energy frontier., Scientific American, Vol.276, (1997), pp44-49.
- 7) Lario, D., and R. B. Decker., The energetic storm particle event of October 20, 1989., Geophysical research letters, Vol.29, (2002).
- 8) ROTH, C., AE9/AP9/SPM radiation environment model: User's guide., Defense Technical Information Center, (2014).
- 9) GINET, G. P., et al., AE9, AP9 and SPM: New models for specifying the trapped energetic particle and space plasma environment. In: The Van Allen Probes Mission. Springer, Boston, MA, (2013), pp579-615.
- 10) JOHNSTON, W. R., et al., AE9/AP9/SPM: New models for radiation belt and space plasma specification. In: Sensors and Systems for Space Applications VII., International Society for Optics and Photonics, Vol.9085, (2014), pp908508.
- 11) Johnston, W. R., et al., Recent updates to the AE9/AP9/SPM radiation belt and space plasma specification model., IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.62, (2015), pp2760-2766.
- 12) O'Brien, T. P., et al., Changes in ae9/ap9-irene version 1.5., IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.65, (2017), pp462-466.
- 13) Agostinelli, S., et al., GEANT4—a simulation toolkit., Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol.506, (2003), pp250-303.
- 14) Allison, J., et al., Geant4 developments and applications., IEEE Transactions on nuclear

science, Vol.53, (2006), pp270-278.

- 15) Allison, J., et al., Recent developments in Geant4., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol.835, (2016), pp186-225.
- 16) 宇宙航空研究開発機構, 宇宙環境標準(JERG-2-141), (2010).
- 17) 宇宙航空研究開発機構, 耐放射線設計標準(JERG-2-143), (2008).
- 18) Kasahara, S., et al., Radiation background and dose estimates for future X-ray observations in the Jovian magnetosphere., Planetary and Space Science, Vol.75, (2013), pp129-135.



宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-19-004

JAXA Research and Development Report

宇宙機搭載の観測装置に用いる電子回路部の放射線耐性評価

Evaluation of radiation tolerance of electronics parts used for instrument onboard spacecraft

---

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 2020年3月4日

電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

