

# 内部磁気圏探査用高エネルギー電子検出器の 高計数環境下での性能評価

玉田 幸広<sup>\*1</sup> 高島 健<sup>\*2</sup> 三谷 烈史<sup>\*2</sup> 三宅 亙<sup>\*3</sup>

## Evaluation of High-Energy Electron Detectors for Probing the Inner Magnetosphere under High-Counting Condition

by

Yukihiro TAMADA<sup>\*1</sup>, Takeshi TAKASHIMA<sup>\*2</sup>, Takefumi MITANI<sup>\*2</sup> and Wataru MIYAKE<sup>\*3</sup>

(Received on Sep. 26, 2012)

### Abstract

An ERG (Energization and Radiation in Geospace) satellite will be launched to study the acceleration processes of energetic particles in the radiation belt surrounding the earth. It is very important to reveal the acceleration process of high-energy particles for both science and the application to space weather forecast. Drastic increases of high-energy electrons in the radiation belt is sometimes observed during a geomagnetic storm. When a large magnetic storm occurs, energetic electron count rates may exceed flux limits expected in the nominal design and large number of incident electrons leading to detection loss. The purpose of this study is to demonstrate that the count rate range of a single detector on board ERG satellite can be expanded by means of reading circuit operations to decrease an area of detection. In our ground experiment, we also found an unexpected result that count peaks shift to the higher energy side under high counting conditions.

**Keywords:** Radiation Belt, ERG Satellite, SSSD (Single-sided Strip Silicon Detector)

## 1. 緒言

地球周辺の内部磁気圏(<地球半径の 10 倍)は、そこにある粒子の密度やエネルギーによって、地球を中心としたドーナツ状の放射線帯、プラズマ圏、リングカレントなどの領域に分けられる。放射線帯、プラズマ圏、リングカレントには数 eV から 10MeV までと 6 桁以上異なるエネルギー幅を持つプラズマが共存している<sup>1)</sup>。内部磁気圏内の放射線帯では、地磁気嵐に伴い非常に高いエネルギーを持つ粒子が生成されることが過去の衛星観測結果から確認されている<sup>2)</sup>。

衛星と地上観測により、放射線帯粒子の加速変動機構の解明を目指す Energization and Radiation in Geospace (ERG)プロジェクトが計画されている。この計画では、直接的な粒子間衝突以外のエネルギー交換を主眼に研究するため、粒子・電磁場・プラズマ波動の統合観測を 2015 年打ち上げ予定の ERG 衛星で行う。地球での加速変動機構を解明することは、今後、木星などの天体磁気圏の高エネルギー現象の研究につながる。また、内部磁気圏には気象衛星、通信衛星、GPS 衛星など多くの人工衛星が運用されており、高エネルギー粒子によるシングルイベントや深部帯電現象などが原因とされる人工衛星、宇宙

機の故障が起こっている<sup>3)</sup>。ERG 衛星による統合観測は、これらの軽減や回避などの減災にもつながると期待されている。

上記のような 6 桁以上のエネルギーレンジを 1 台の電子計測器でカバーすることは、現在の技術では不可能である。そのため、ERG 衛星ではエネルギー範囲を分割して 4 台の電子計測器を搭載する。本稿では、これらのうち高エネルギー(数十 keV~1MeV)の電子検出器(HEP-e)に関して、その検出器システムを紹介するとともに、以下に述べる高計数環境下での実験を行った結果を報告する。この HEP-e では、水星磁気圏探査機(MMO: Mercury Magnetospheric Orbiter)用に開発された電子検出器や読み出し回路などの技術が使われている<sup>4)</sup>。大きな磁気嵐が発生し、放射線帯の高エネルギー電子フラックスが HEP-e の基本設計を超えた場合、電子計測データの計数は飽和する事態が起こりえる。こういった高計数環境下でも、HEP-e の検出器の有感面積を読み出し回路の設定変更だけで減らし、精度の良い計数が得られることを実証するのが、本研究の目的である。

## 2. 実験装置・手順

### 2. 1 高エネルギー電子検出器(HEP-e)の概要

ERG 衛星に搭載する HEP-e は片面ストリップ型半導

\*1 工学研究科 航空宇宙学専攻 修士課程

\*2 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

\*3 工学部 航空宇宙学科 航空宇宙学科専攻 教授

体検出器(SSSD)を使用している。半導体検出器は生成されるキャリアが多く、エネルギー分解能に優れている利点がある。HEP-eのSSSDは160本のストリップ状の読み込み電極を持っており、ストリップの幅は、 $200\mu\text{m}$ 、間隔は $100\mu\text{m}$ である。このようなストリップ構造にすることで、入射電子の一次元位置分解能が得られ、また検出器を取めるケースのコリメータと組み合わせれば、入射電子の到来角度分解能が得られることになる。Fig.1にこの実験で使用したSSSDの写真を示す。

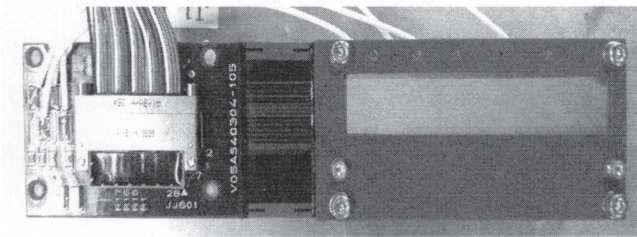


Fig.1 Single-sided Si Strip Detector.(SSSD. Strip width= $200\mu\text{m}$ , Strip distance= $100\mu\text{m}$ ).

SSSDによる高エネルギー電子の計測原理をFig.2に示す。電子をキャリアとするn型半導体と正孔をキャリアとするp型半導体を結合させるとpn接合ダイオードができる。各ストリップ電極(Al)はp型半導体に接続されている。入射した電子のエネルギーを $E_{in}$ として半導体の電離エネルギーを $W$ とすると、生じる電子・正孔対の数は以下の式(1)で表される<sup>9)</sup>。

$$n = E_{in} / W \quad (1)$$

印加した電圧により、電子と正孔をそれぞれ電極に収集し、電荷信号として読み込む。即ち、発生する電荷量を測定すれば入射する電子のエネルギーを知ることができる。

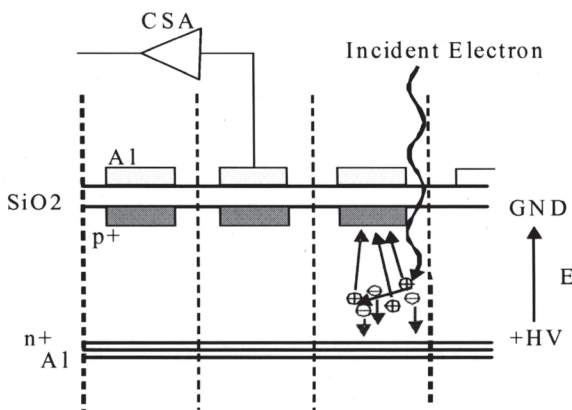


Fig.2 The detector interaction with incident electron.

電荷信号を処理するために、各ストリップ電極にはCSA(電荷有感型前置増幅器)とshaping amplifier(波形整形回路)が接続されており、ISAS/Stanford/IDEASが水星磁気圏の高エネルギー粒子検出器用に開発したVA32TAに収められている。VA32TAは32chの電荷信号処理を行

うことが可能なASIC(Application Specific Integrated Circuit)であり、これを5つ用いることにより160本のストリップそれぞれからの電荷信号を独立して処理することが可能である。Fig.1ではSSSDの裏側にVA32TAが取り付けられている。

VA32TAはVApertとTApertで構成される。電子がSSSDに入射し、印加した電圧により電極に集められた電荷をVApertでは電圧に換え増幅する。さらに波高分析のための立ち上がりの遅い波形に整形する。一方、TApertでは波高分析のトリガー信号発生のための速い波形に整形する。このトリガーによって作られたホールド信号により、VApertの波形がちょうど最大値になるところで全32ストリップの波形がホールドされ、各ストリップの波高を出力する。

検出器には、検出器本体によるもの、または読み出し回路によるdeadtimeがある。このSSSDシステムのdeadtimeは $100\mu\text{s}$ を越えると見込まれる。読み出し回路において信号をホールドし、全32ストリップの波高を読み出す時間(deadtime)内では、次に入射してきた電子イベントを測定できず、数え落しの要因となる。

TApertでは個々のストリップについて、トリガーを生成する/しない設定(enable/disable)が行える。disableに設定されたストリップでは粒子が入射しても反応しないので、検出器の有感面積を実効的に減らすことになる。Fig.3にSSSDのストリップを減らす模式図を示す。実験で使う放射線源とそこから出る放射線、その先に長方形でストリップ構造をもった検出器をそれぞれ表している。左側では全ストリップをenableしており、全ストリップで計測を行う。一方、右側では斜線のストリップがdisableとなり、計測をしなくなる。読み出し回路の設定変更で計測する面積を実効的に減らすことになり、入射粒子を減少させることができる。これを用いて目的である非常に高いフラックス環境下での計測を検証する。

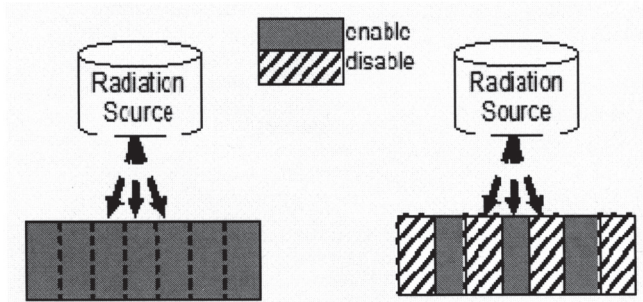


Fig.3 Schematic images of sensitivity area control.

## 2. 2 実験装置・手順

高計数環境下を想定するために放射線源は4つ使用する。Table 1に使用した放射線源とそれらが放出する放射線をまとめた。その中で評価の基準に用いたのが、放射線源①の624keVのエネルギーを持つ電子である。これに放射線源②③④から出る $\gamma$ 線を加えることで高計数環境を模擬する。放射線源②は同じ $^{137}\text{Cs}$ だが、プラスチックパッケージ加工により624keVの電子は放出されな

いようにしてある。

Table 1 Used radiation sources.

Radiation Source	① <sup>137</sup> Cs(e <sup>-</sup> )	② <sup>137</sup> Cs	③ <sup>133</sup> Ba	④ <sup>241</sup> Am
Main Radiations	Gamma Ray 32keV Electron 624keV	Gamma Ray 32keV	Gamma Ray 30~34keV	Gamma Ray 60keV

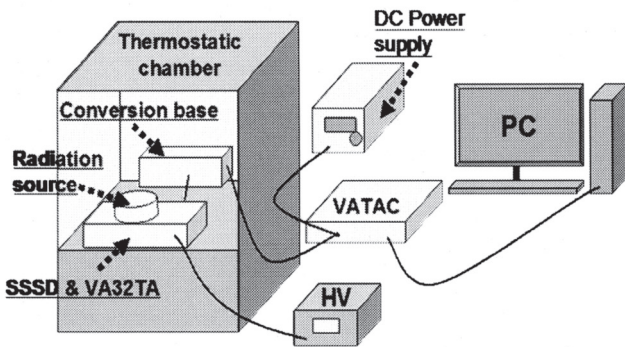


Fig.4 Schematic of the experiment set-up.

実験装置概要図を Fig.4 に示す。Fig.4 内にある VATAC は VA32TA の制御、読み出しを行う装置である。Conversion base は、VA32TA からのアナログ出力の AD 変換を行っている。また HV は、高圧電源を示している。実験の流れとしては、恒温槽内に検出器をおき、その検出器の上に放射線源を置いてデータを取得する。このとき放射線源を検出器にじかに置き、放射線源に付いているコリメータにより照射されるのはストリップ 12ch (3.5 mm)程度となる。

照射された ch から得られたデータは、Fig.5 のようなエネルギースペクトルで表される。Fig.5 は、線源①単体での実験結果である。波高値の計測結果をエネルギーの channel ごとに分けて積算したものである。0 keV のピークは、上記したように 1 つのイベントが起きると全 32ch の波高が読み出され、エネルギー付与されていない状態の値が計測されてカウントされたものである。また Fig.5 中に表記はないが、8500 ch 付近にあるピークは Table 1 で示した 32 keV の  $\gamma$  線によるものである。

Fig.6 には、624 keV の電子ピーク付近のエネルギースペクトルを拡大して示す。実線がフィッティングを示しており、点が元のデータである。このピークの場合は、テイルが低エネルギー側に伸びているためフィッティングが難しく、低エネルギー側の半分までをガウス関数、そこからのテイルの部分を変な関数でフィッティングしている。このガウス関数の広がりエネルギー分解能に相当する。このピークから単位時間当たりの 624 keV の電子数を求める。ピークのフィッティングによって得られた標準偏差  $\sigma$  とピークの最大値 H から、式(2)を用いてピークの面積を求める。つまり 624 keV のエネルギーを持つ電子数  $N_e$  が算出できる。

$$N_e = \sigma \cdot H \sqrt{2\pi} \quad (2)$$

さらに照射された各ストリップと電子数 [cps] をプロットしたグラフに、測定回数誤差として誤差の伝播を考慮し、式(3)を用いて Fig.6 のデータにはエラーバーをつけている<sup>6)</sup>。

$$\sqrt{N_e} = N_e \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\sigma}}{\sigma}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sqrt{H}}{H}\right)^2 \cdot 2\pi} \quad (3)$$

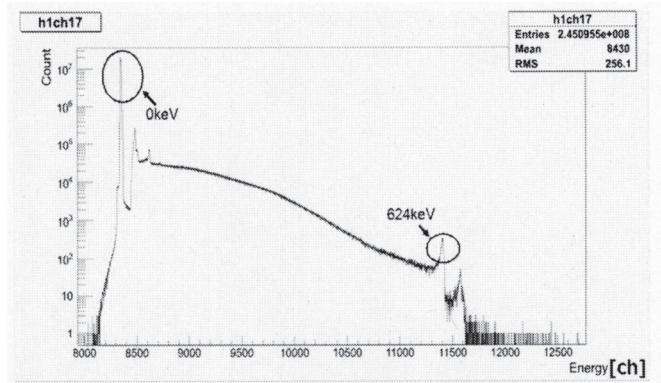


Fig.5 An example of energy spectrum. Energy in the abscissa is expressed by channel number.

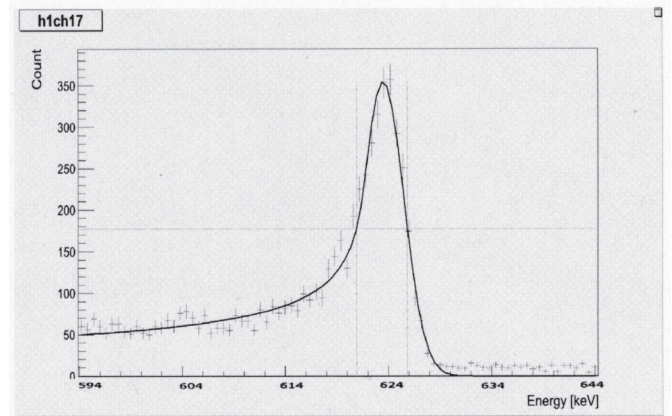


Fig.6 Expansion of the energy spectrum around the peak of 624 keV. The abscissa is in energy [keV].

### 3. 実験結果と考察

実験は 4 回行った。2 回の放射線源①だけを使用し、フラックスが低い環境を想定した実験と、4 つの放射線源をすべて用いてフラックスが高い環境を想定した実験を 2 回行った。Table 2 に各実験の使用放射線源、enable ストリップ数、全 enable ストリップで合計した入射率 (Rate) [Hz]、測定時間 [day] を示す。ここで入射率とは、単位時間当たりの、入射粒子によって起きた全イベント数である。

Fig.7 は、実験 1 と他実験を比較しており、上から順に

実験 2, 3, 4 の単位時間当たりの電子数 [cps]と比較している。各実験でデータ取得時間が異なるため、測定時間 T [s]で電子数を割った単位時間当たりの電子数 [cps: count per sec]を求めて比較を行う。横軸は放射線が当たる付近のストリップのチャンネル番号を表している。

Table 2 Conditions of the 4 experiments.

Experiment Num.	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4
Radiation Source	①	①②③④	①	①②③④
Used Strips	32	32	16	16
Rate of incident Particles[Hz]	500	990	312	573
Exposure time	about 2days	about 4days	about 5days	about 5days

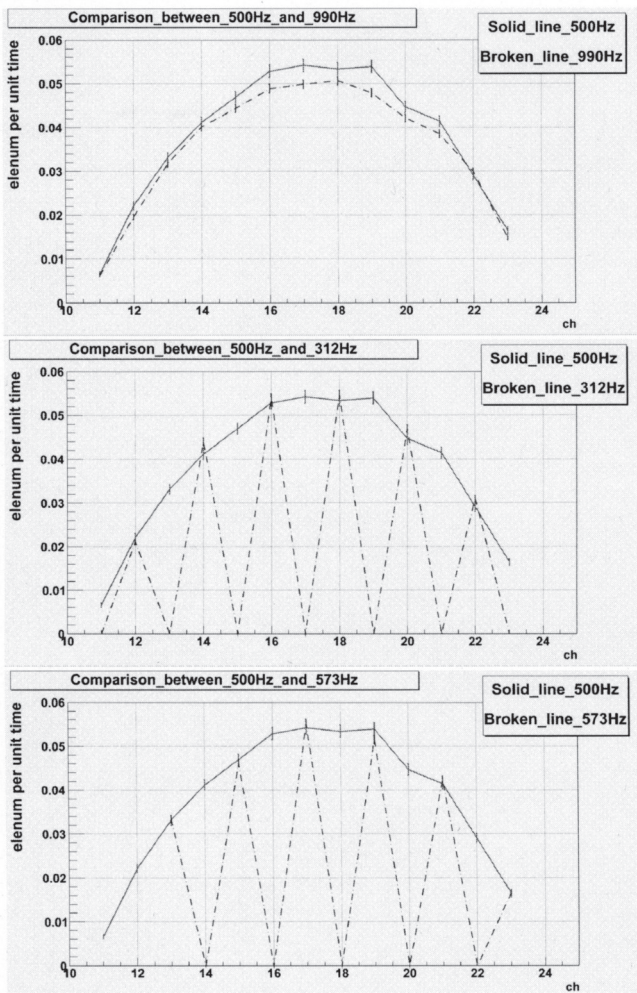


Fig.7 Electron count per unit time from several strip channels.

まずはじめに、enable ストリップ数を変えずに、放射線源だけを増やして高計数にした場合を見てみる。上のグラフでは、実験 1 が実線で、実験 2 が破線で表している。入射率が 990Hz に増大した結果、単位時間当たりの電子数 [cps] が各チャンネルで下がっており、数え落と

していることを示している。これは増やした放射線源から低エネルギーのγ線が入射することで、それらを読み込んでいる間の読み出し回路の deadtime によるものである。この SSSD システムの deadtime は 100 μs を超えると見込まれており、およそ 1kHz あたりから数え落としが現れ始めるのは妥当な結果といえる。

次に Fig.7 の中央グラフでは実験 1 と同じ放射線源を用いた実験 3 を比較している。enable ストリップ数を半分にしたただけなので、単位時間当たりの電子数 [cps] は変わらないはずである。有感面積を半分に減らすことで、入射率は 200 Hz 低下したが、各 ch で電子数 [cps] が変わらず、エラーバーの範囲で同じ値を示していることがわかる。入射率が 500 Hz では数え落としがないことが確認できる。

下のグラフでは、放射線源は実験 2 と同じで高計数環境であるが、有感面積を半分にしたことで入射率が 573 Hz までに低下し、電子数 [cps] はエラーバーの範囲で実験 1 と等しい計数が各チャンネルで得られた。これらの結果は、enable ストリップ数を減らすことで検出粒子数を減少させ、数え落としを防ぐことができたことが分かる。

さらに実験 1 と他実験のエネルギースペクトルのピークを比較してみた。比較した結果、enable ストリップ数と入射率に関係なく放射線源を増やした実験では、624keV を表しているピークがわずかに高エネルギー側にずれる傾向が見られた。Fig.8 は、例として実験 1 と 4 のスペクトルを重ね合わせたもので、点線が実験 1、実線が実験 4 を表している。実験 4 のピークが高エネルギー側にずれていることが見て取れる。同じ 624keV の電子を測定しているため、ピーク位置がずれることはないはずである。

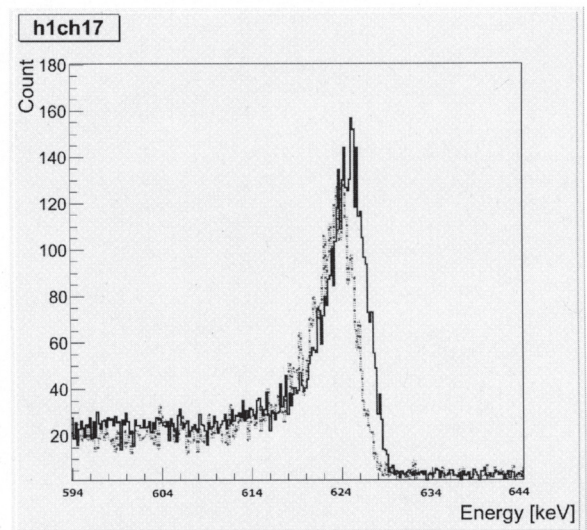


Fig.8 Detailed energy spectrum around 624 keV peak for Exp. 1 (dotted line) and Exp.4 (solid line).

Table 3 に、実験 1 の 0 keV、624 keV ピークを他実験の各エネルギーピーク位置を比較して、その差を示した。0 keV peak 位置は、この SSSD システムの波高バイアスを表すと考えられ、これを差し引いて正確なエネルギー

値を求めた.0 keV peak 位置は, 各比較を見ても約 0.2~0.4 keV であった. それに対して 624 keV peak の差では, 実験 2 のピークが平均 1.2 keV 高エネルギー側にずれている. また実験 4 でも同様に約 1.4keV 差があった. しかし実験 3 の比較では, 624 keV ピークの差は約 0.2 keV であった. これらの結果から, 実験 1 と 4 ではともに入射率 500 Hz 台であり, 放射線源を増やすことで高エネルギー側にピークがずれていることになる.

高計数環境を模擬するために使用した低エネルギーの γ線が 624 keV の電子と同じストリップ, または隣り合うストリップ間に入射する split イベントにより, 高エネルギー側にピークがずれる可能性が考えられる. 隣り合うストリップ間に放射線が入射することで, 2つのストリップでエネルギーの共有が起こり得る.

Table 3 Comparison between Exp. 1 and 2, 3 and 4.

ch	Exp.2		Exp.3		Exp.4	
	0keV peak[keV]	624keV peak[keV]	0keV peak[keV]	624keV peak[keV]	0keV peak[keV]	624keV peak[keV]
12	0.42	1.21	0.17	0.16		
13	0.46	1.13			0.26	1.31
14	0.48	1.11	0.17	0.19		
15	0.49	1.21			0.29	1.44
16	0.48	1.27	0.20	0.23		
17	0.45	1.21			0.26	1.25
18	0.39	1.23	0.18	0.14		
19	0.42	1.32			0.21	1.55
20	0.41	1.07	0.11	0.25		
21	0.41	1.40			0.21	1.52
22	0.45	1.01	0.18	0.19		
23	0.37	1.19			0.18	1.58

#### 4. 結言

ERG 衛星搭載の高エネルギー電子計測器 HEP-e に使用される SSSD システムについて, 放射線源を用いて高計数環境下における模擬評価実験を行った. その結果, およそ 500 Hz は全ストリップを使用しても, 数え落しがなく計測が出来たが, 900Hz を超えると数え落しが生じ始めた. しかし, この高計数環境下においても, SSSD の使用するストリップ数を制限して読み出し回路の負担を軽減することで, 正確な計数が可能となることを確認した.

一方, 放射線源を増やすと入射率に関係なく 624keV ピークは高エネルギー側にずれる傾向が見られた. これは split イベントの多発によるものと考えられる.

#### 参考文献

- 1) K. Shiokawa, et al. : ERG- A small-satellite mission to investigate the dynamics of the inner magnetosphere, *Adv. Space Res.*, 38,pp.1861-1869 (2006).
- 2) G. D. Reeves, et al. : Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1529 (2003).
- 3) S. Watari, Impacts of space storms on technology and space weather forecast, *J. Plasma Fusion Res.*, 82, 739 (2006).
- 4) Y. Saito, et al. : Scientific objectives and instrumentation of Mercury Plasma Particle Experiment(MPPE) onboard MMO, *Planetary and Space Science*, 58, pp.182-200 (2010).
- 5) 佃正晃 : 放射線計測のエレクトロニクス, 岩波書店 (1969).
- 6) Glenn F.Knoll : 放射線計測ハンドブック第3版, 日刊工業新聞社 (2001).