



# 次世代X線撮像分光器XRPIXの陽子線損傷および損傷部分究明実験

鎌田敬吾,

幸村孝由, 萩野浩一, 小木曾拓, 大野顕司, 根岸康介, 笹木彬礼, 鈴木雄太, 萩谷幸平, 吉木知 (東京理科大学),  
鶴剛, 田中孝明, 内田裕之, 松村英晃, 立花克裕, 林秀輝, 原田颯大 (京都大学),  
武田彩希, 森浩二, 西岡祐介, 武林伸明, 横山聖真, 福田昂平 (宮崎大学),  
新井康夫, 三好敏喜, 岸本俊二, 倉知郁生 (KEK), 濱野毅 (放医研), 他SOIPIXグループ

## Abstract

我々は、次世代X線天文衛星への搭載を目指すSOIピクセル検出器「XRPIX」の開発を行っている。SOI (Silicon On Insulator) 技術を用いることで、センサー部分と読み出し回路部分の一体化をはかり、X線が入射したピクセルのみを読み出すイベントトリガー機能が可能となる。この機能を用いてXRPIXは従来のCCD検出器と同等のエネルギー分解能と位置分解能を保持しつつ、数 $\mu$ sの高い時間分解能を実現を目指している。

地球磁場により捕捉された高エネルギー陽子などの宇宙線が、衛星に搭載するX線半導体検出器に照射することで、エネルギー分解能などのX線に対する検出器の性能が劣化する。我々が開発しているXRPIXも半導体素子であるため、放射線量に対して、どの程度性能が劣化するのか定量的に評価することは、開発で重要な課題である。そこで我々は、放射線医学総合研究所の重粒子線加速器を用いて、表面照射型のXRPIX2bの放射線照射実験を行った。照射した陽子のエネルギーは6 MeVで、軌道上で3.5年に相当する量の陽子を、素子の表面から照射した。その結果、起動上3.5年相当の損傷後のエネルギー分解能は0.5%程度劣化し、ゲインが0.2%上昇したことも分かった。また、4000radまで損傷が進むとエネルギー分解能は10.6%悪化、ゲインが0.7%まで増加と、性能に大きな変化が現れることも判明し、回路の特定経路の出力を確認したところ、SFがばらつきを増加させているということも判明した。

## XRPIX

XRPIXはSOI技術を用いてX線天文衛星用に開発された、CMOSイメージセンサーである。従来のX線天文衛星の半導体検出器はCCDであったが、その時間分解能が問題視されてきた。XRPIXはCCDと同等のエネルギー分解能を保持しつつ、トリガー情報出力により、 $\sim 10\mu$ sの高い時間分解能の実現を目指している。

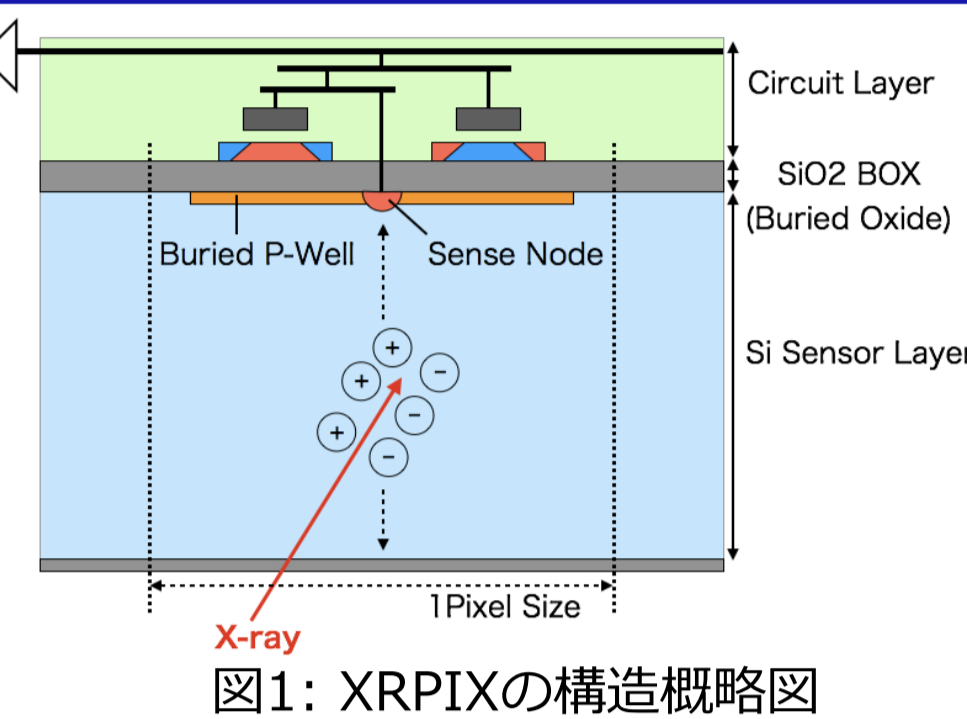


図1: XRPIXの構造概略図

## 半導体検出器の放射線損傷

従来のX線天文衛星より半導体検出器を軌道上にて運用すると、宇宙線の影響で性能が時間に伴い悪化していくことが判明している。

この原因としては、格子欠陥やTotal Ionizing Dose (TID) が考えられている。XRPIXも同様の損傷が考えられるため、影響評価、損傷原因解明が要求される。

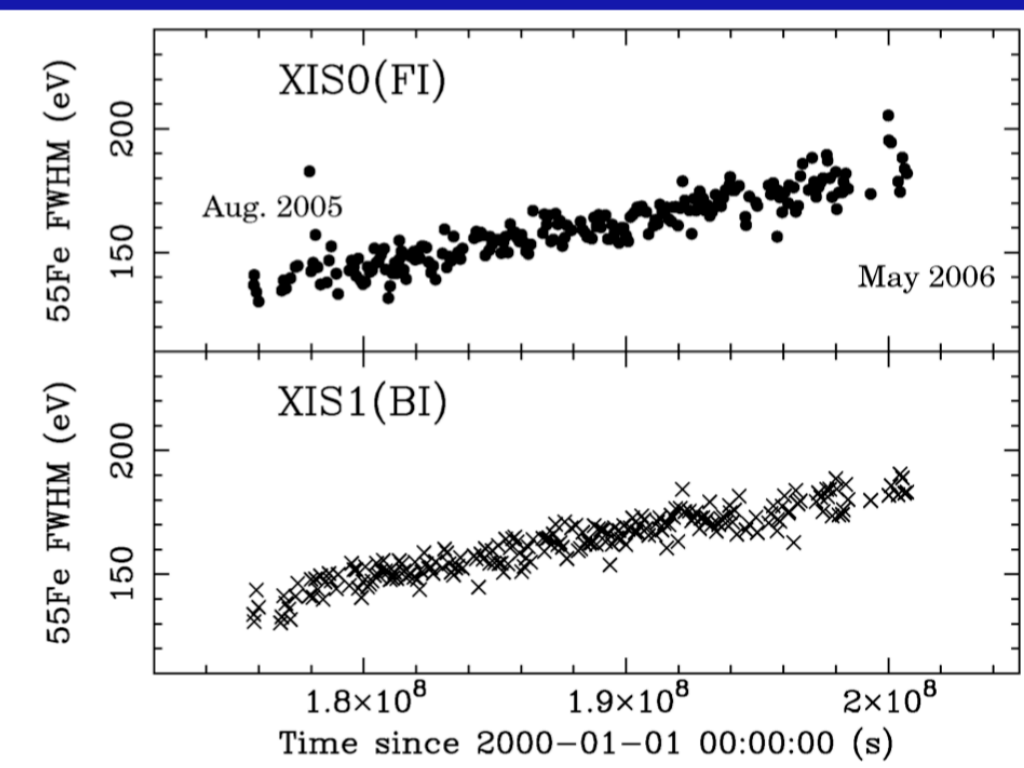


図2: XISの軌道上でのFWHM経時間変化

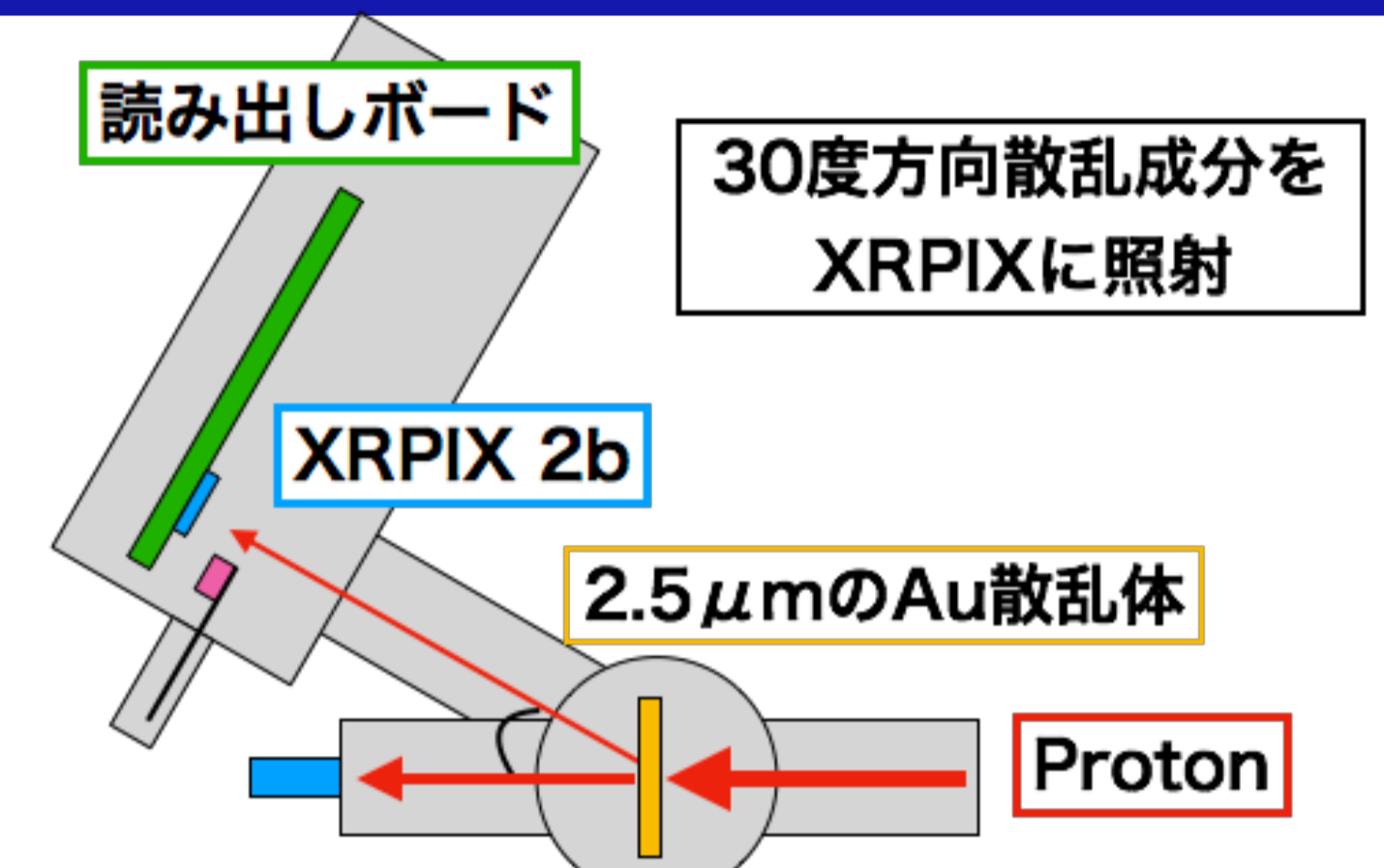
## 放射線耐性評価実験

そこでXRPIXに対して陽子線照射を行い、放射線損傷の影響を評価した。以下に評価した素子や実験条件をまとめる。

表: 評価用素子

素子	XRPIX 2b FZ
空乏層厚	500 $\mu$ m
ピクセルサイズ	30 $\mu$ m $\times$ 30 $\mu$ m
ピクセル数	144 $\times$ 144 個
比抵抗	5.0 k $\Omega$ ·cm

Protonは素子を貫通していないが、回路層側から照射して損傷させることで、センサー層、回路層の両方を損傷させている。



Proton照射条件

場所	放医研 HIMAC
Proton エネルギー	6 MeV
照射中バックバイアス	150 V
Integration Time	100 $\mu$ s
回路層側から照射	

## 実験結果

軌道上にて3年運用可能というのが、一つの目標値であった。そこで軌道上3.5年相当の410rad、さらに激しく損傷が進んだ場合の4000radという、2つの着眼点から報告する。特に記載がなければ、以下の条件での測定結果である。

バックバイアス	250 V
Integration Time	100 $\mu$ s

### エネルギースペクトル

性能評価は $^{109}\text{Cd}$ のX線を素子の回路側から照射して行った。Single Pixel Event のエネルギースペクトル 170Ch のピークが $^{109}\text{Cd}$ のAgKaの特性X線である。

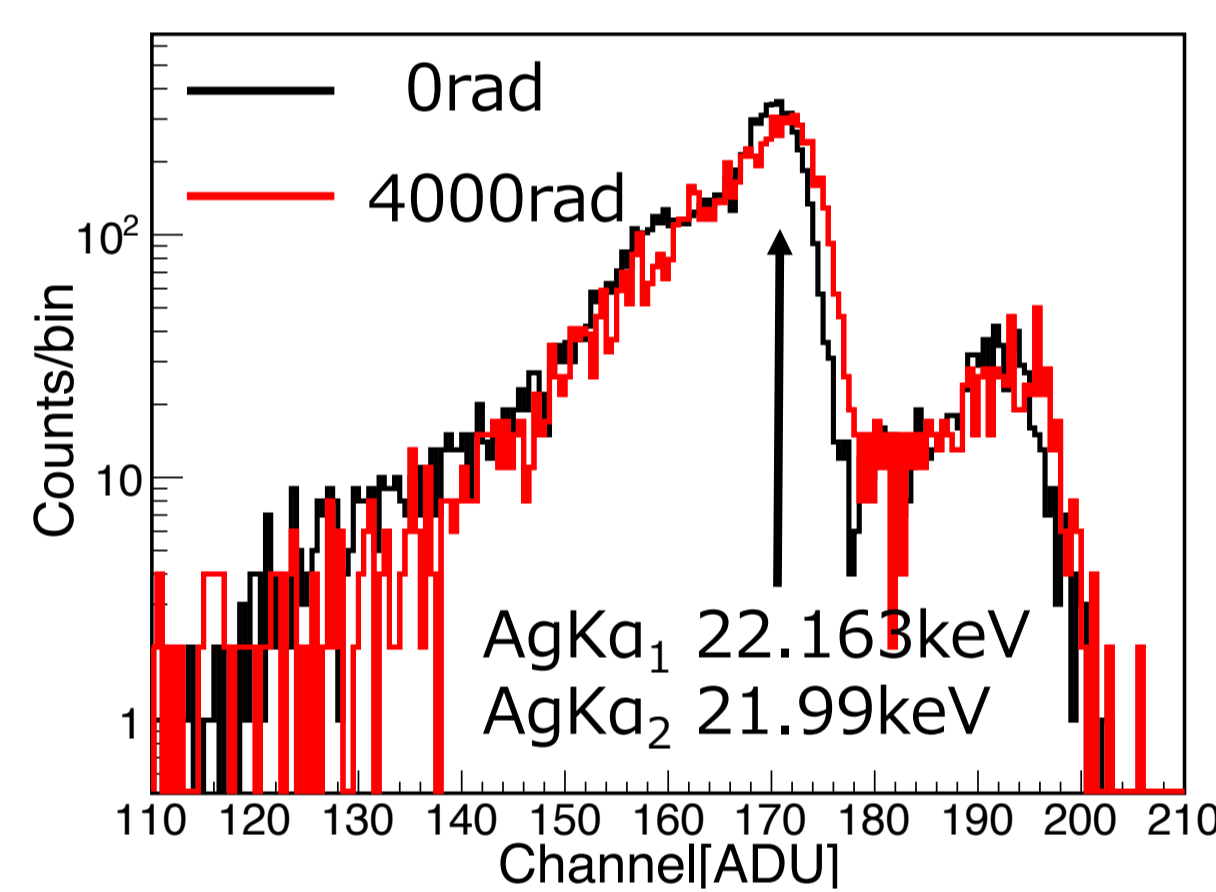


図6: Vbb 250V でのエネルギースペクトル

### Bad Pixel数

X線を照射していない時の出力が、全ピクセル平均から $3\sigma$ 以上離れたピクセル。4000radまでは1~2%程度でほとんど変化が見られないが、10000rad以降、急激に増加している。4000rad以降は損傷によりペDESTALの揺らぎが大きくBadPixelの選定が行えないため、一部評価からのぞいている。

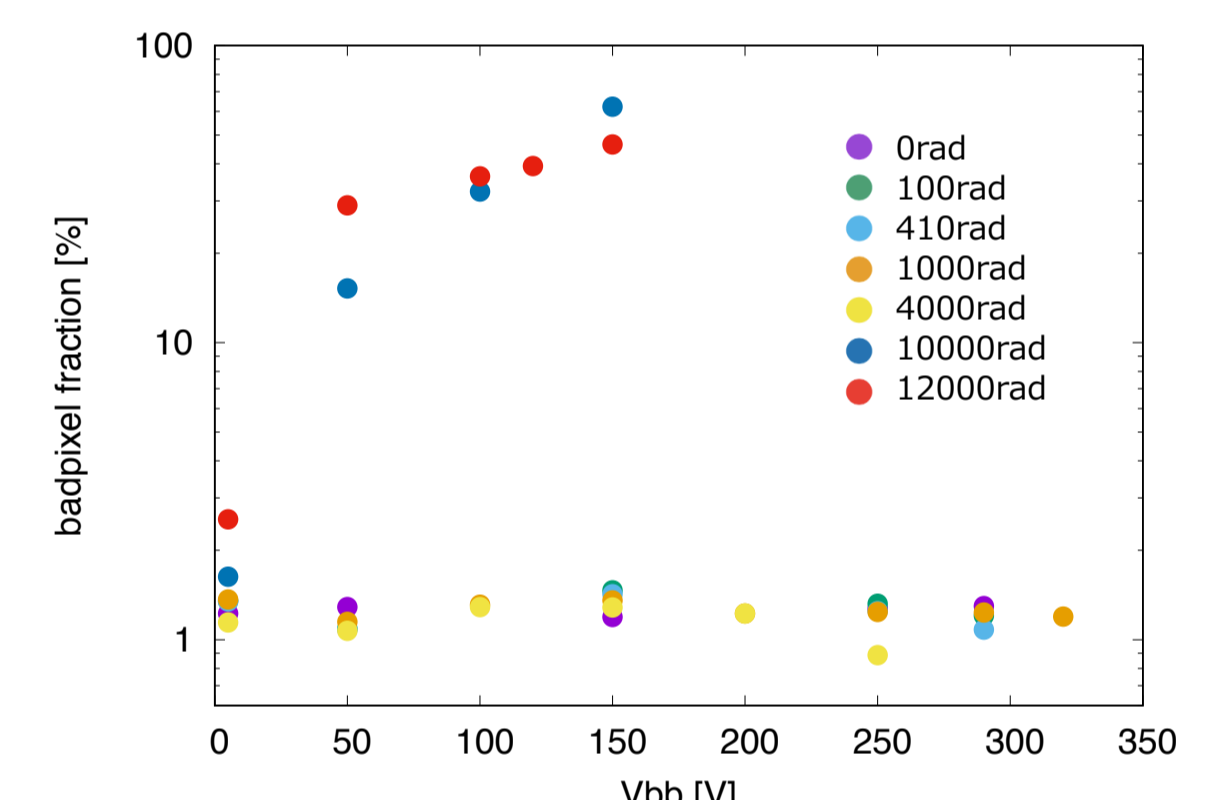


図7: 全ピクセルに対するBadPixelの割合

### リーク電流

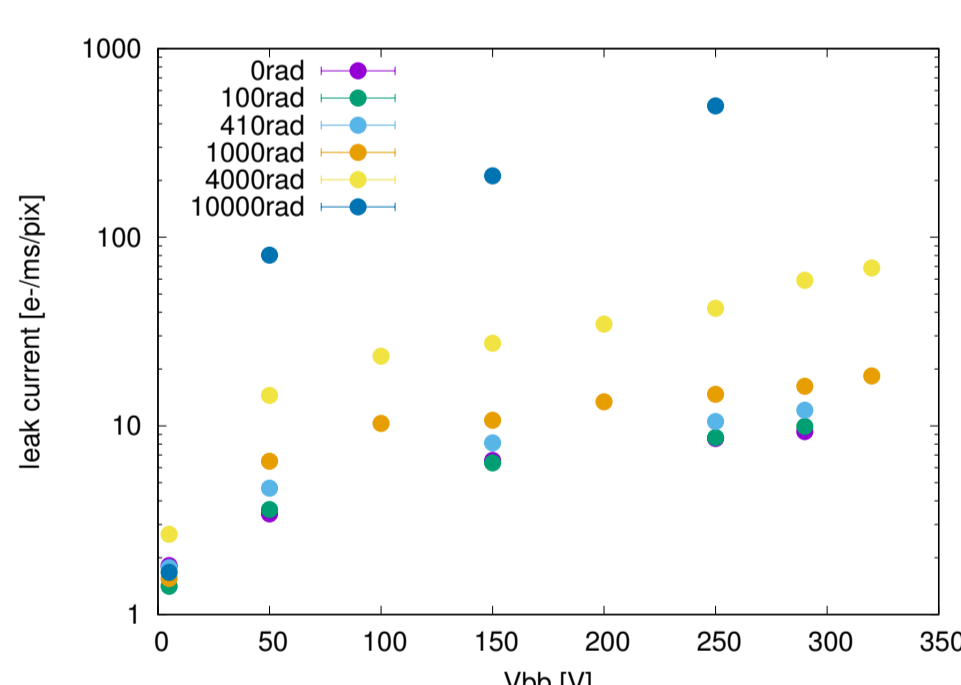


図10: 照射量ごとのI-V特性

リーク電流は410radで損傷前に対して1.2倍程度、4000radから急激に増加し、5倍近くまで増加している。また、4000rad以降は傾きが大きくなっていることも確認できる。

ゲインはVbb 250Vに着目すると、410radでは0.2%しか増加していない。4000radでようやく有意な差が見えるが0.7%の増加でしかない。

### ゲイン

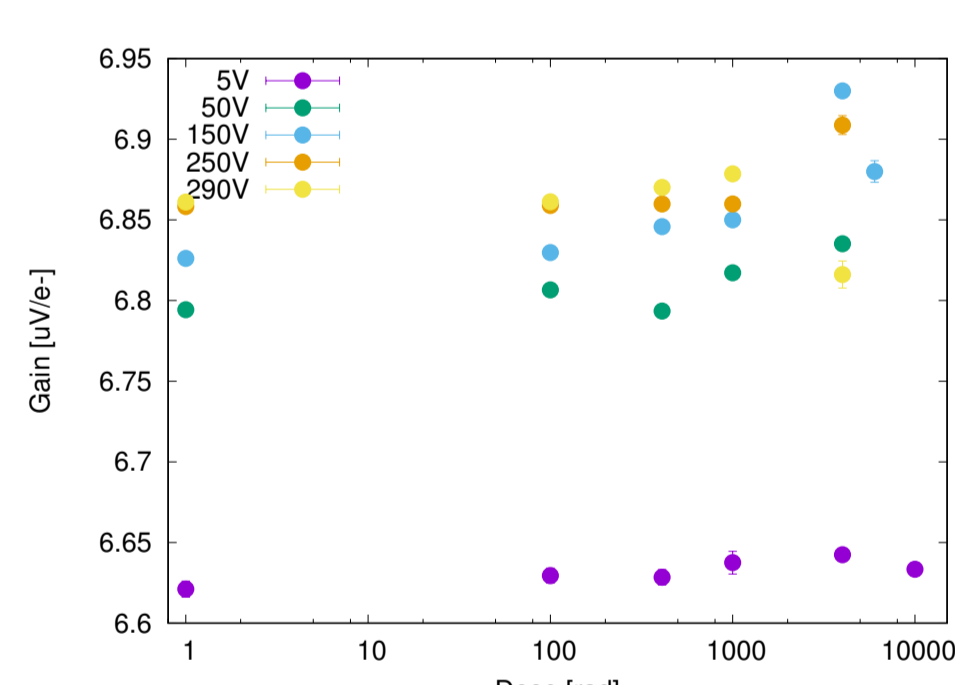


図8: 損傷量によるゲインの変化

### ノイズ切り分け

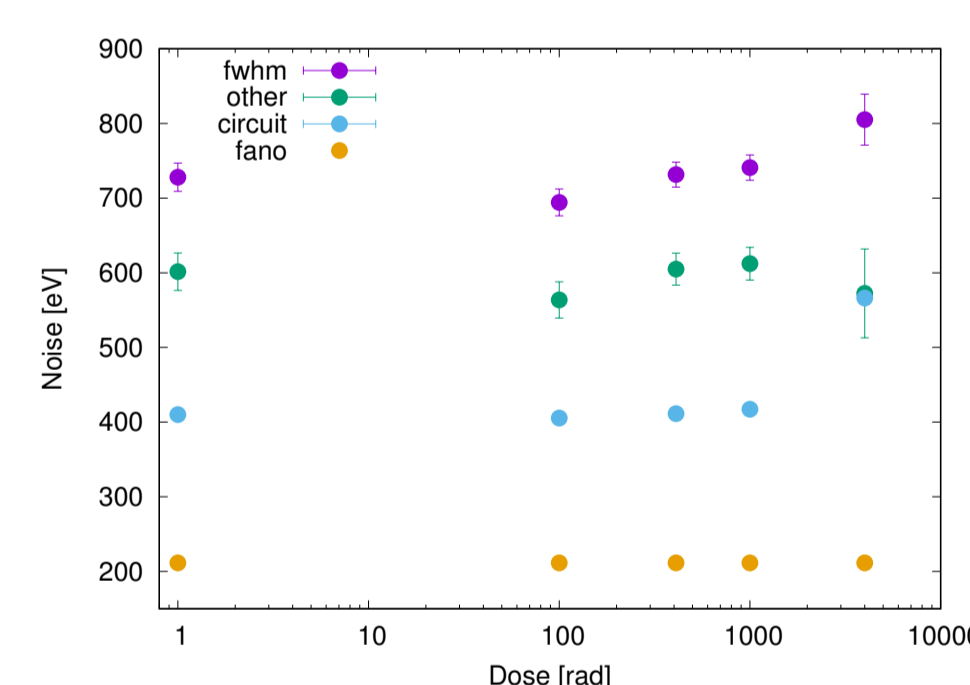


図11: 損傷量による各種ノイズの変化

次の式を用いてノイズの切り分けを行った。

$$\text{FWHM}^2 = \sigma_{\text{Readout}}^2 + \sigma_{\text{Fano}}^2$$

$$\sigma_{\text{Readout}}^2 = \sigma_{\text{leakcurrent}}^2 + \sigma_{\text{circuit}}^2$$

しかし、実際にはこれでFWHMを再現できなかったので other という成分を入れたので次のようになる。

$$\text{FWHM}^2 = \sigma_{\text{leakcurrent}}^2 + \sigma_{\text{circuit}}^2 + \sigma_{\text{Fano}}^2 + \sigma_{\text{other}}^2$$

これで切り分けを行ったのが左の図である。これを見ると損傷によるエネルギー分解能の悪化は回路部分が原因ということがわかる。

そこで左下の図のような、任意の電圧を回路の一部だけ通過させ出力がルートで変化するか確認をした。複数のルートからの出力を比較することで、回路のノイズを増加させている部分を特定することができる。

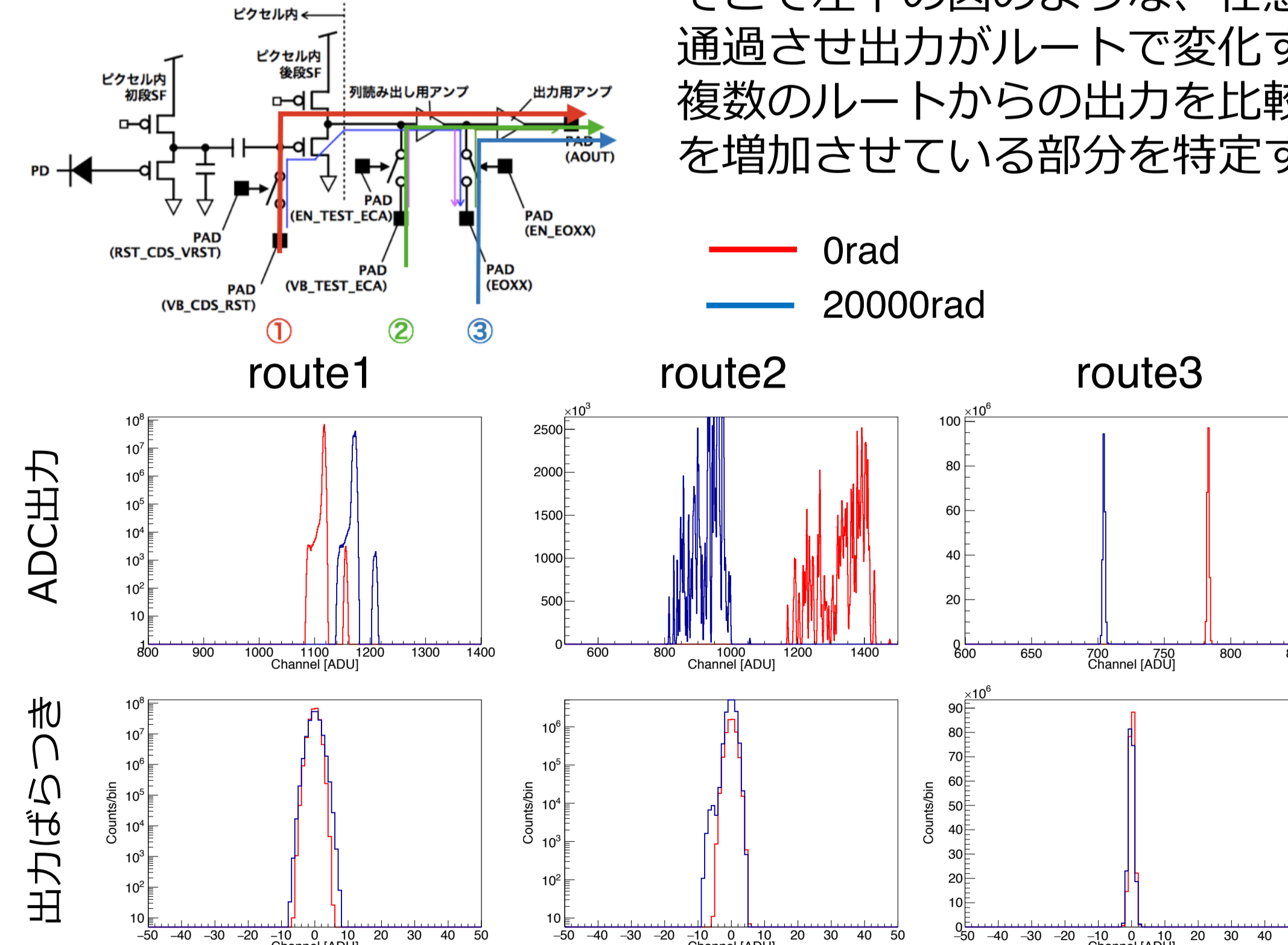


図12: XRPIX回路図とADCの出力およびばらつき

ルート2,3では、損傷後に出力レベルが低くなっている。出力のばらつきに着目すると、ルート1では損傷によってばらつきが1.6倍にも増加しているが、ルート2以降の出力に損傷によるばらつきの変化が見られなかった。これらの結果より、SFの損傷がばらつきを増加させていると判明した。また、最後段のアンプが出力レベルを下げていることもわかった。

### エネルギー分解能

$^{109}\text{Cd}$ のAgKa1 (22.163keV)のピークのFWHMで評価

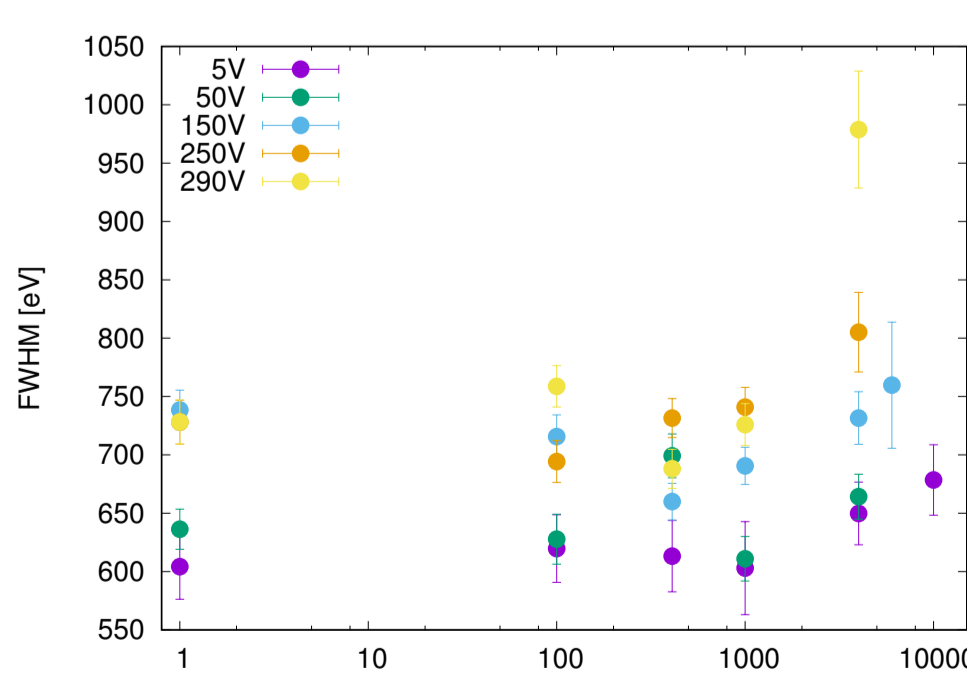


図9: 損傷量によるエネルギー分解能の変化

FWHMも410radでは不確かさも考慮すると最大で5.5%(Vbb 250V)は悪化しているが、有意な差ではなく、4000radでようやく増加の傾向が確認できる。損傷によるエネルギー分解能の悪化は、リーク電流の増加によるものではなく、回路ノイズの増加が原因と判明した。

## まとめ

- 軌道上で3.5年に相当する410radでは、ゲイン、エネルギー分解能といったXRPIX2bの性能に有意な差は見られなかった。
- 4000rad (軌道上40年相当)まで損傷すると、リーク電流やエネルギー分解能に明確な変化が確認できた。
- 損傷によるXRPIXのノイズ増加は回路ノイズ増加が原因であることが判明した。
- 回路ごとの出力を確認したところ、ばらつきの増加はSFで、出力の低下は最後段のアンプで生じていることが確認された。