



W116a

# 次期X線天文衛星ASTRO-H搭載 硬X線撮像用シリコン検出器の 放射線耐性評価

○林 克洋(広島大)

朴 寅春, 上野 一誠, 西野 翔, 安田 創, 大杉 節, 深沢 泰司, 水野 恒史, 高橋 弘充,  
大野 雅功, 遠藤 暁 (広島大), 田島 宏康 (名古屋大), 田中 孝明 (KIPAC/Stanford),  
国分 紀秀, 渡辺 伸, 太田 方之, 高橋 忠幸 (ISAS), 中澤 知洋 (東大), 内堀 幸夫,  
北村 尚 (放医研), ほか HXI/SGD チーム



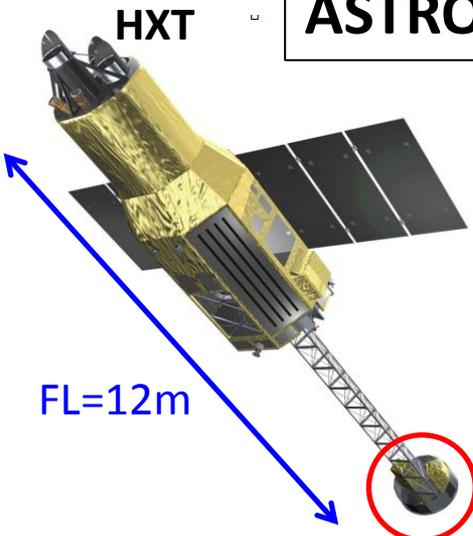
# ASTRO-H/HXI

**ASTRO-H**

- ◆ 日本の次期X線天文衛星 (2014年打ち上げ予定)
- ◆ 4つの検出器を搭載

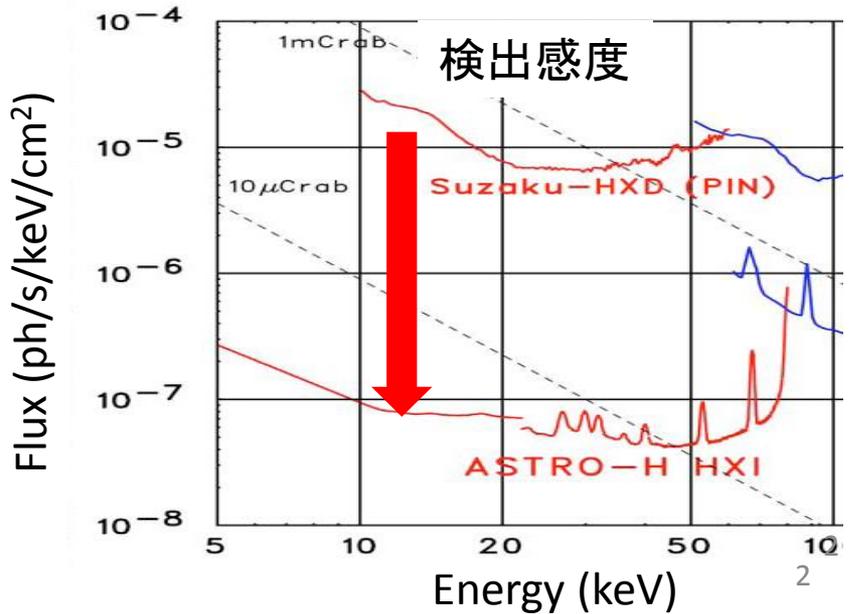
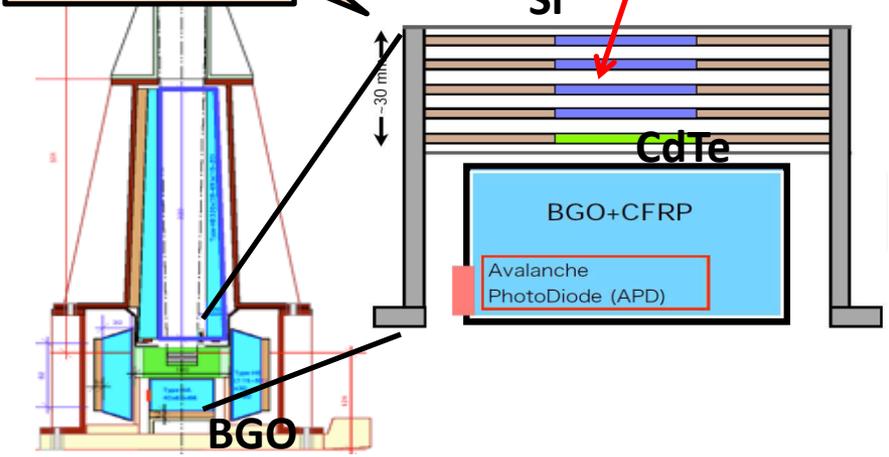
SXS (軟X線分光器) SXI (軟X線撮像検出器)  
**HXI (硬X線撮像検出器)** SGD (軟γ線検出器)

- 硬X線望遠鏡 (HXT) の集光による 5-80 keVでのイメージング観測
- Si両面ストリップ型検出器 (x4枚)、CdTe両面ストリップ型検出器 (1枚) を層状に重ねた、高感度ハイブリッド検出
- BGOアクティブシールドによる 高いバックグラウンド除去率



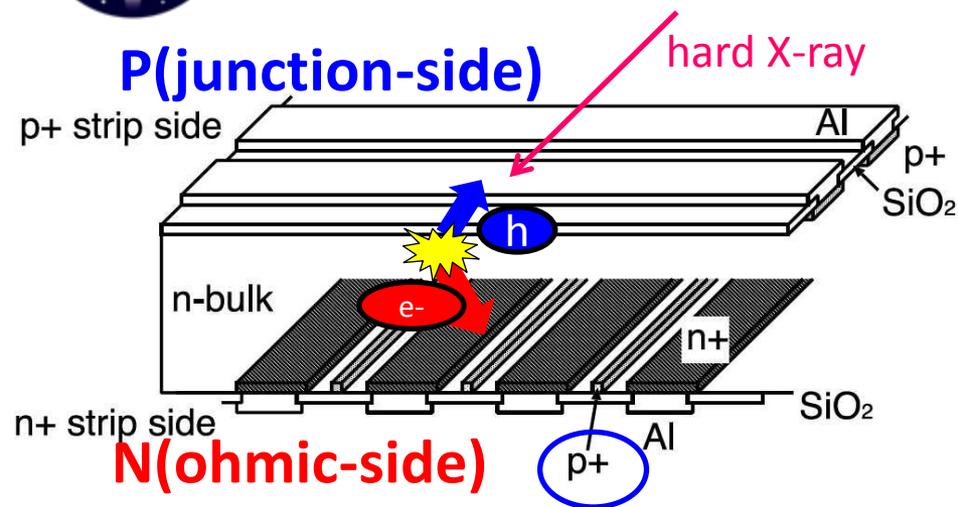
W117a  
(萩野講演)

**HXI**





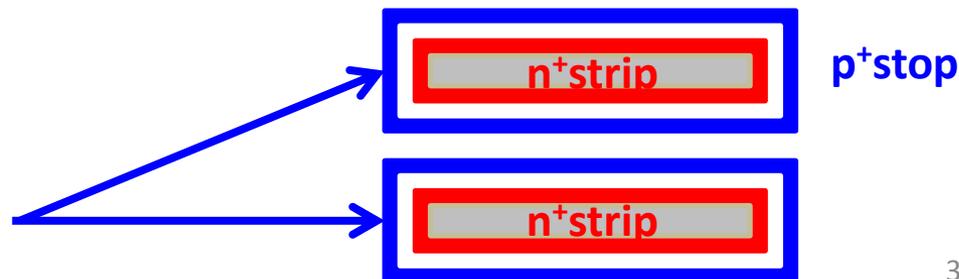
# 両面シリコンストリップ検出器 (DSSD)



• n型のバルクに p+strip、n+ strip が直交するように埋め込まれている

• 入射X線により電子・ホール対が発生  
 → P側でホール、N側で電子を収集  
 → エネルギー、検出位置情報を得る

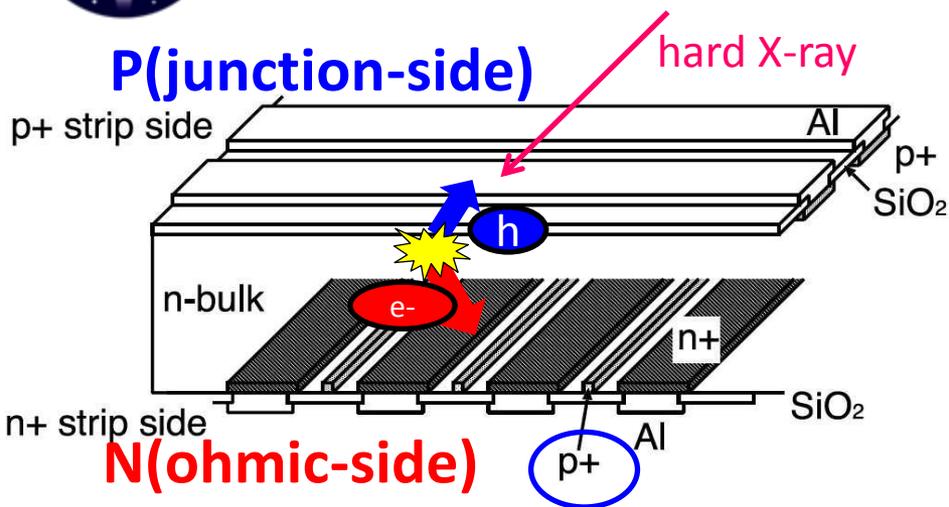
• n+strip はp+stop で周りを囲むことで個々のストリップを孤立化



Specifications	
Size	3.4 x 3.4 cm <sup>2</sup>
Strip pitch	250 μm
Strip width	150 μm
Thickness	500 μm
Number of strips	128
Strip capacitance	<10pF
Leakage current	<0.04 nA/strip @-20°C
Bias voltage	300V
Energy resolution	<2 keV @60keV (FWHM) with ASIC



# 両面シリコンストリップ検出器 (DSSD)

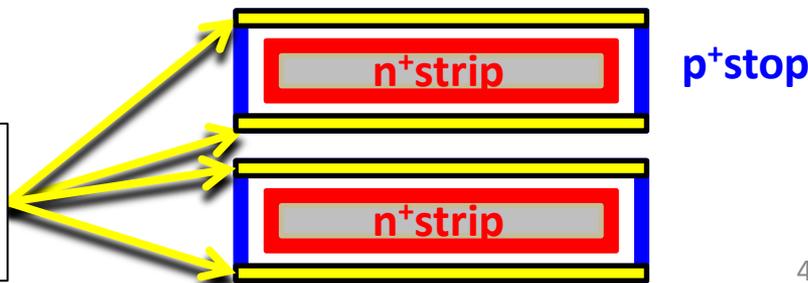


- n型のバルクに p+strip、n+ strip が直交するように埋め込まれている

- 入射X線により電子・ホール対が発生  
 → **P側でホール**、**N側で電子**を収集  
 → エネルギー、検出位置情報を得る

- FM品 : N-side の p+stop に Al電極を埋め込む  
 → **抵抗によるジョンソンノイズを低減**

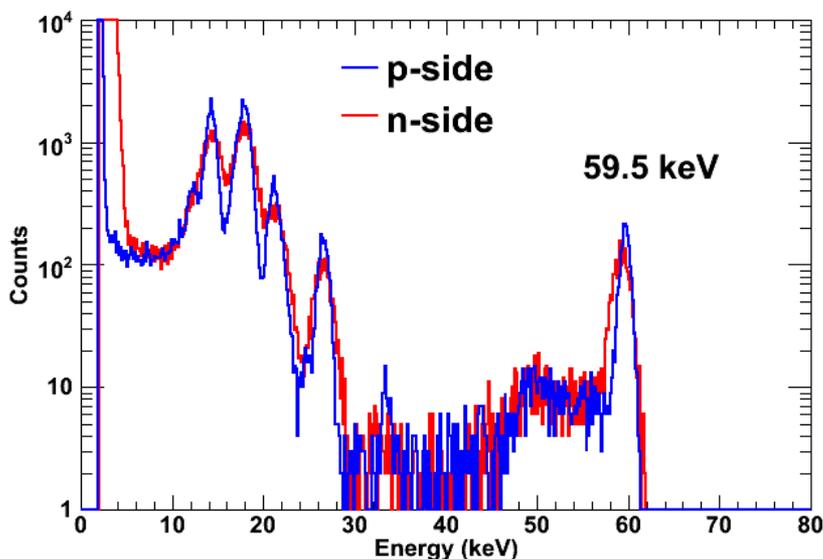
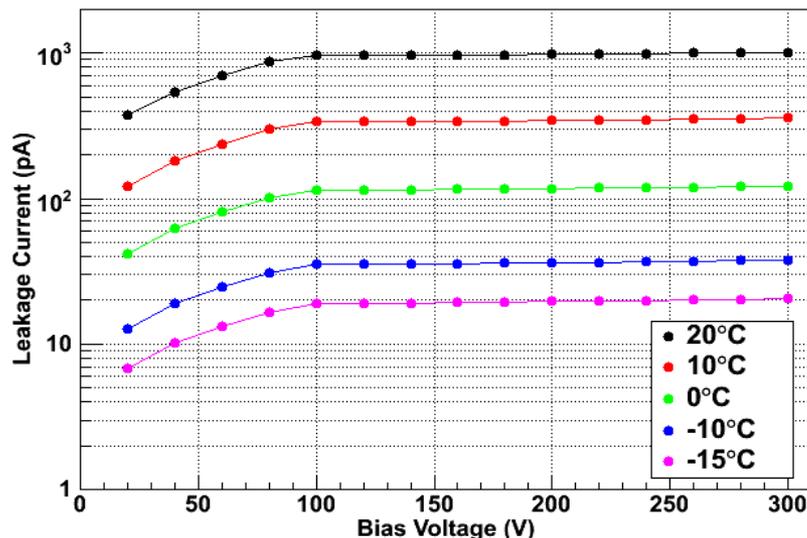
Specifications	
Size	3.4 x 3.4 cm <sup>2</sup>
Strip pitch	250 μm
Strip width	150 μm
Thickness	500 μm
Number of strips	128
Strip capacitance	<10pF
Leakage current	<0.04 nA/strip @-20°C
Bias voltage	300V
Energy resolution	<2 keV @60keV (FWHM) with ASIC





# DSSD(FM品)の基礎特性評価

Bias Voltage vs. Leakage Current, P-Ch99



- 暗電流のバイアス依存性

20pA/strip @-15°C

※要求値: <70 pA/strip@-15°C

- ブレイクダウン電圧

>500V

※完全空乏化電圧: 300V

- <sup>241</sup>Am 照射時のスペクトル (-15 °C)

※1ch読み出し用プリアンプを用いて測定

## エネルギー分解能 @59.5 keV (FWHM)

P-side

1.23(+/-0.04, stat) keV

N-side

1.8 (+/-0.1, stat) keV

N-side p<sup>+</sup>stop の構造改変 → N-side のエネルギー分解能が ~3.5 keV から ~2 keV まで向上

→ 暗電流、エネルギー分解能の要求性能を満たす



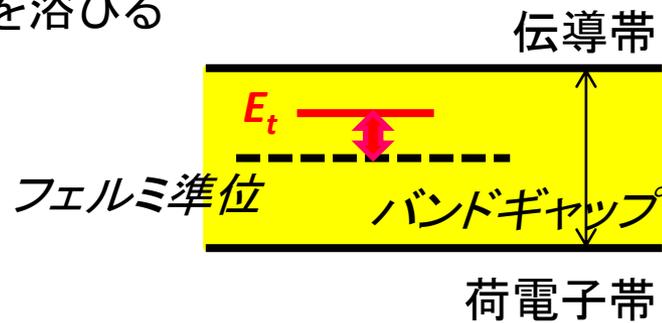
# $^{60}\text{Co}$ 線&プロトン照射実験

- 軌道上: (主として)  $\sim 150$  MeV 程度の陽子による放射線を浴びる
- シリコン検出器の放射線損傷

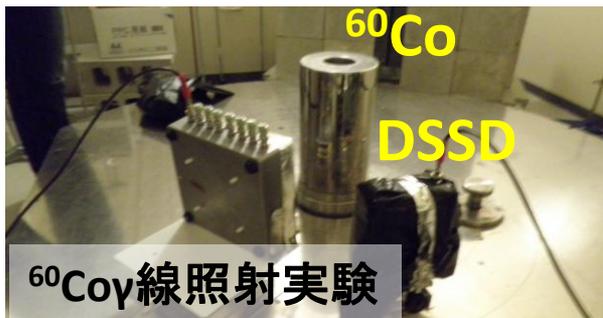
- ✓ 表面損傷: 表面の $\text{SiO}_2$ 付近で起きる電離的損傷
- ✓ バルク損傷: バルク内の結晶構造の破壊

→ バンドギャップに新たなエネルギー準位  $E_t$  の発生

→ 熱励起キャリア(暗電流)増加 → ノイズレベル増大 → エネルギー分解能悪化



$^{60}\text{Co}$ 線照射実験 → 表面損傷の寄与  
 プロトン照射実験 → 表面損傷+バルク損傷の寄与



$^{60}\text{Co}$ 線照射実験

場所	広島大学 工学研究科
total dose	2, 6, 10, 20 krad



プロトン照射実験

場所	放医研 HIMAC
proton energy	150 MeV
照射粒子数	$3 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$

• トータルで軌道上 <20 年分に相当する放射線を照射

• 300V の印加電圧をかけたまま照射

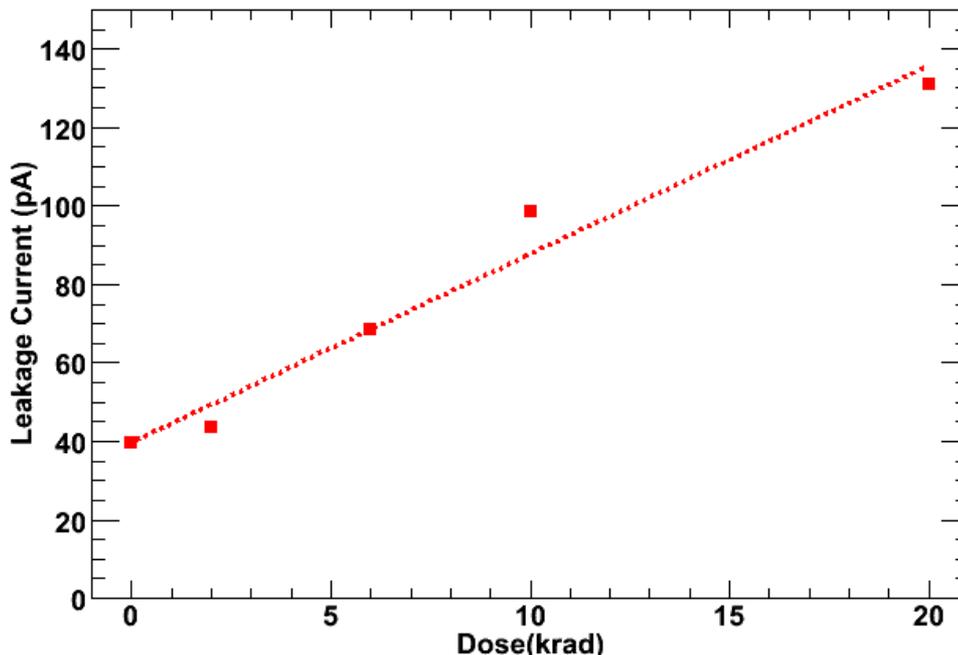
• 照射後は  $-15^\circ\text{C}$  でアニーリング



# 照射による暗電流値の変化( $^{60}\text{Co}\gamma$ 線照射)

Pside, 1ch, -15°C, 300V

暗電流のDose依存性

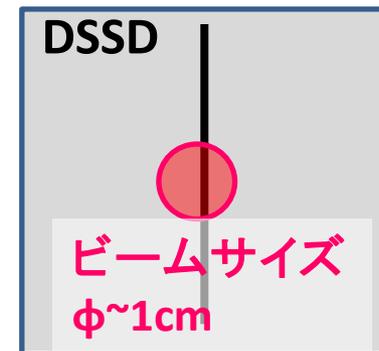
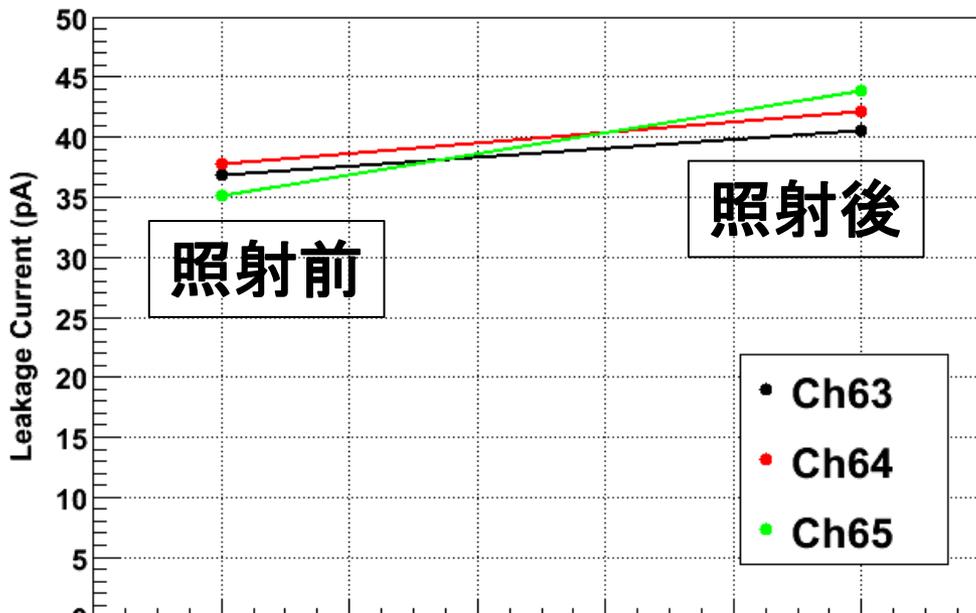


- 軌道上~20年分の放射線量に相当する $\gamma$ 線を照射 (~1 krad/year)
- 暗電流値はおおよそ照射量に比例して増加
  - ✓ 暗電流値はストリップの埋め込まれていない領域の面積に比例 (Foland et al. 1996)  
(0.061 cm<sup>2</sup>/strip) → ~75 pA/cm<sup>2</sup>/year @-15°C
  - ✓ 他の両面シリコンストリップセンサーへの $\gamma$ 線照射結果 (~60 pA/cm<sup>2</sup>/year) とほぼ一致 (Kaneko et al. 2002)
- ブレイクダウン電圧: >500V



# 照射による暗電流値の変化(プロトン照射)

Leakage Current (Pside), -15°C, 300V

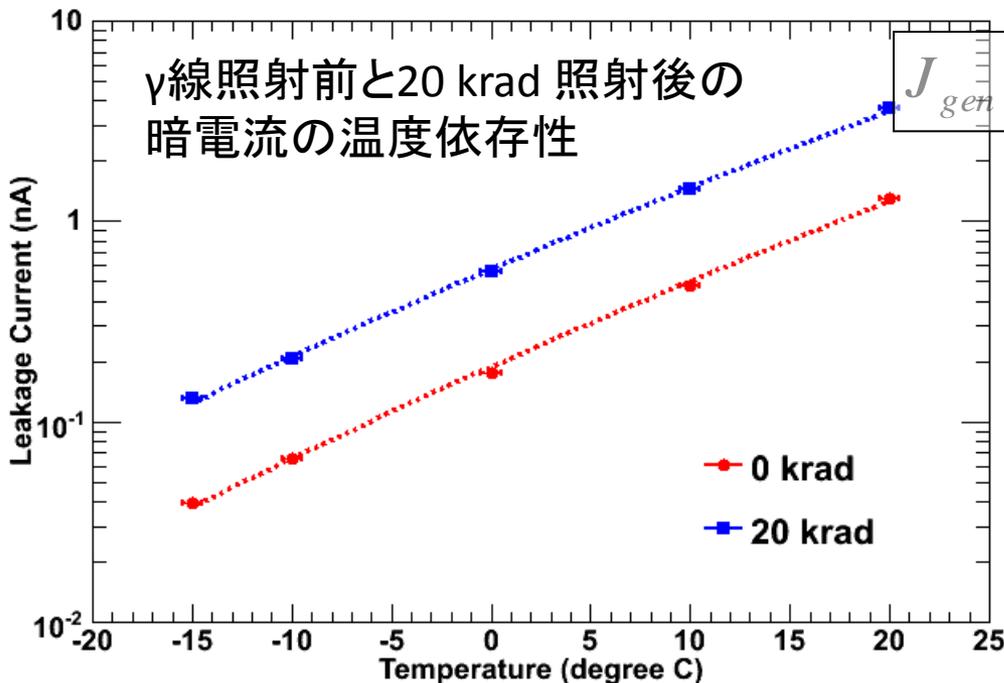


- 軌道上~10年分に相当するプロトンを照射
- 照射されたストリップの暗電流増加量 (-15°C) :  $6 \pm 3$  (pA/strip)  $\rightarrow$   $32 \pm 16$  (pA/cm<sup>2</sup>/year)  
γ線照射による暗電流増加値 (~75 pA/cm<sup>2</sup>/year) とほぼ同レベル
- 暗電流損傷定数 ( $\alpha$ =暗電流増加量/fluence) (25°C) :  $\alpha = 3 \pm 1$  ( $\times 10^{-8}$  nA/cm)  
他のシリコンストリップセンサーへのプロトン照射実験結果とほぼ一致  
(e.g.,  $3.0 \times 10^{-8}$  nA/cm, Ohsugi et al. 1988)
- ブレイクダウン電圧 : >500V



# γ線照射によるエネルギー準位の変化

γ線照射前と20 krad 照射後の  
暗電流の温度依存性



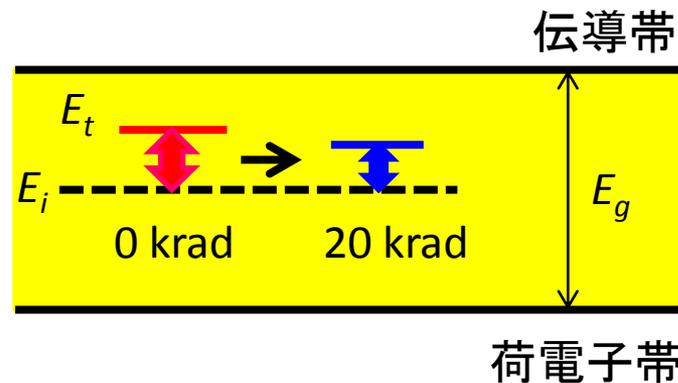
$$J_{gen} = CT^2 \exp(-(2E_g + |E_t - E_i|) / kT)$$

Ohsugi et al. (1988)

- $J_{gen}$ : 発生暗電流
- $C$ : 定数
- $T$ : 温度
- $E_g$ : Siのバンドギャップエネルギー
- $E_t$ : 発生したエネルギー準位
- $E_i$ : Fermi準位

照射による欠陥のエネルギー準位 ( $E_t - E_i$ ) の変化

	$E_t - E_i$	Chi <sup>2</sup> /dof
0 krad	0.05 +/- 0.01 (eV)	3.15/3
20 krad	0.02 +/- 0.01 (eV)	2.17/3



$E_t - E_i$  低下 (照射によってバンドギャップの中心付近に新たなトラップレベルが発生)

→ 暗電流の増加



# ノイズレベルへの寄与

- ノイズレベルに影響を与える要素

検出器および読み出し回路系の暗電流 ( $I_n$ )、容量 ( $C_p, C_{1/f}$ )、抵抗 ( $R_p, R_s$ )

$$\overline{\Delta E_{RMS}^2} = A \frac{4k_B T}{R_p} \tau + \underbrace{BI_n \tau}_{\text{ショットノイズ}} + C 4k_B T R_s C_p^2 \frac{1}{\tau} + D 2\pi C_{1/f} C_p^2$$

暗電流はショットノイズとしてノイズレベルに影響

- 15°Cでのノイズレベル

	照射前	20 krad
暗電流値	39 pA	131 pA
ショットノイズ (上記理論式より) (シェイピングタイム=4μsec)	0.37 keV	0.68 keV
トータルノイズ ( <sup>241</sup> Amスペクトル59.5 keV ラインエネルギー分解能測定値より)	1.23+/-0.04 keV	<b>1.37+/-0.03 keV</b>

→ 軌道上20年分の照射でも、トータルノイズレベルはエネルギー分解能の要求性能 < 2 keV を満たし、照射の影響は十分小さい



# まとめ

ASTRO-H衛星搭載硬X線撮像用シリコン検出器(DSSD)のFM品に対する基礎特性及び放射線耐性評価を行った

## 基礎特性

- ✓ 従来に比べてN-side側のエネルギー分解能が向上
- ✓ **暗電流値、エネルギー分解能ともに要求性能を満たす**

## <sup>60</sup>Co $\gamma$ 線及びプロトンによる放射線耐性評価

- ✓ <sup>60</sup>Co $\gamma$ 線による暗電流増加量:  $\sim 75$  (pA/cm<sup>2</sup>/year) (-15°C)
- ✓ プロトン照射による暗電流増加量:  $\sim 30$  (pA/cm<sup>2</sup>/year) (@-15°C)
- ✓ 従来のシリコンセンサーへの $\gamma$ 線・プロトン照射実験の結果とほぼ同等
- ✓ ブレイクダウン電圧 >500V

軌道上20年分に相当する放射線照射を受けても、暗電流増加により増えたショットノイズ( $\sim 0.3$ keV)が、**エネルギー分解能悪化に与える影響は十分に小さい**



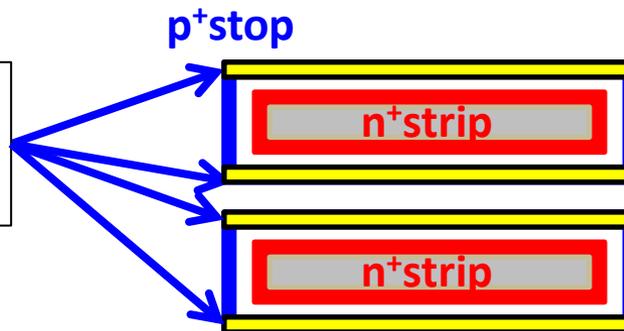
---

***Back up***



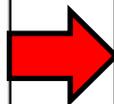
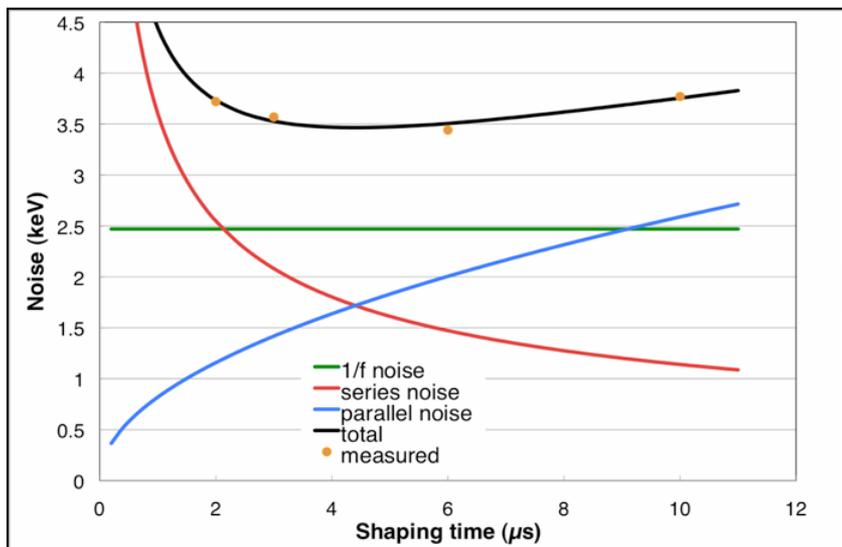
# FM品N-sideに対する処置

- FM品 : n-sideのp<sup>+</sup>stopにAl電極を埋め込む  
→ 抵抗によるジョンソンノイズを低減

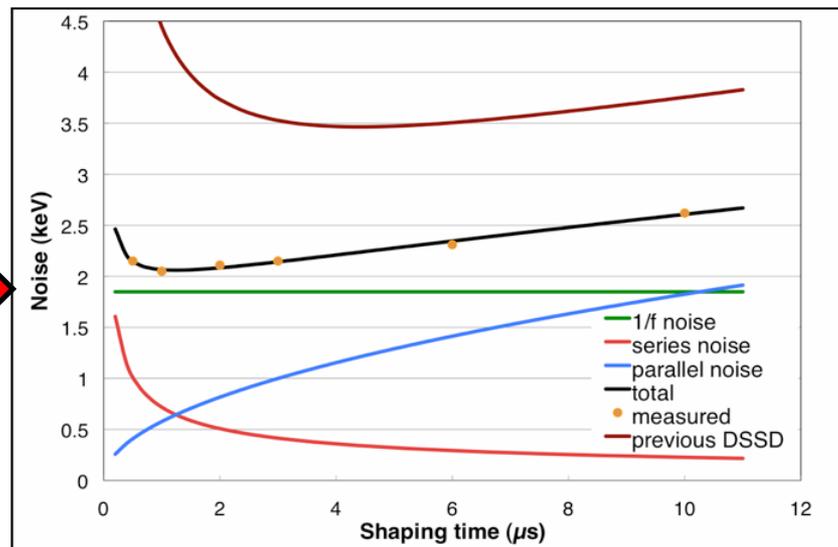


## N-side ノイズレベルのシェイピングタイム依存性

Previous DSSD



FM DSSD



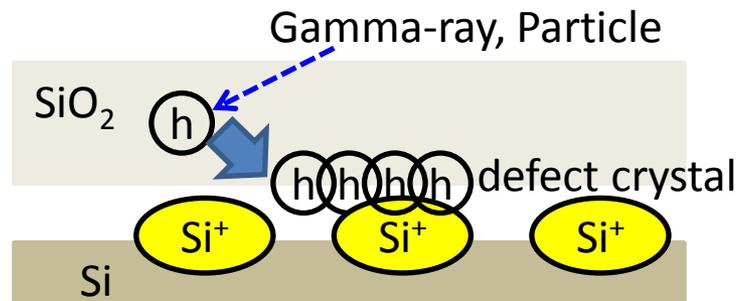


# シリコン検出器の放射線損傷

- 軌道上(高度~550 km)で、検出器は主に宇宙線陽子によって~1 krad/year の損傷を受ける
- シリコン検出器の放射線損傷

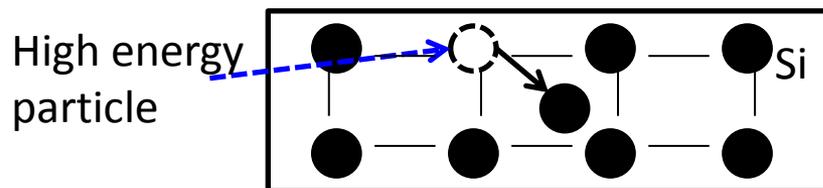
## 表面損傷

SiO<sub>2</sub>層表面付近で生成されたホール  
→境界の欠陥部分にトラップされる  
→ SiO<sub>2</sub>層に正電荷が蓄積される



## バルク損傷

陽子などの高エネルギー粒子が  
結晶格子と弾性衝突  
→結晶格子の変異



- 禁制帯に新たなトラップの準位をつくる
- 暗電流(ノイズレベル)増加

