

○玉澤 晃希，小澤 祐亮，佐藤 将，近野 貴博，幸村 孝由（東京理科大学），鶴 剛，田中 孝明，  
武田 彩希，松村 英晃，伊藤 真音，大村 峻一（京都大学），森 浩二，西岡 祐介，竹中 亮太（宮崎大学）

## 1. 概要

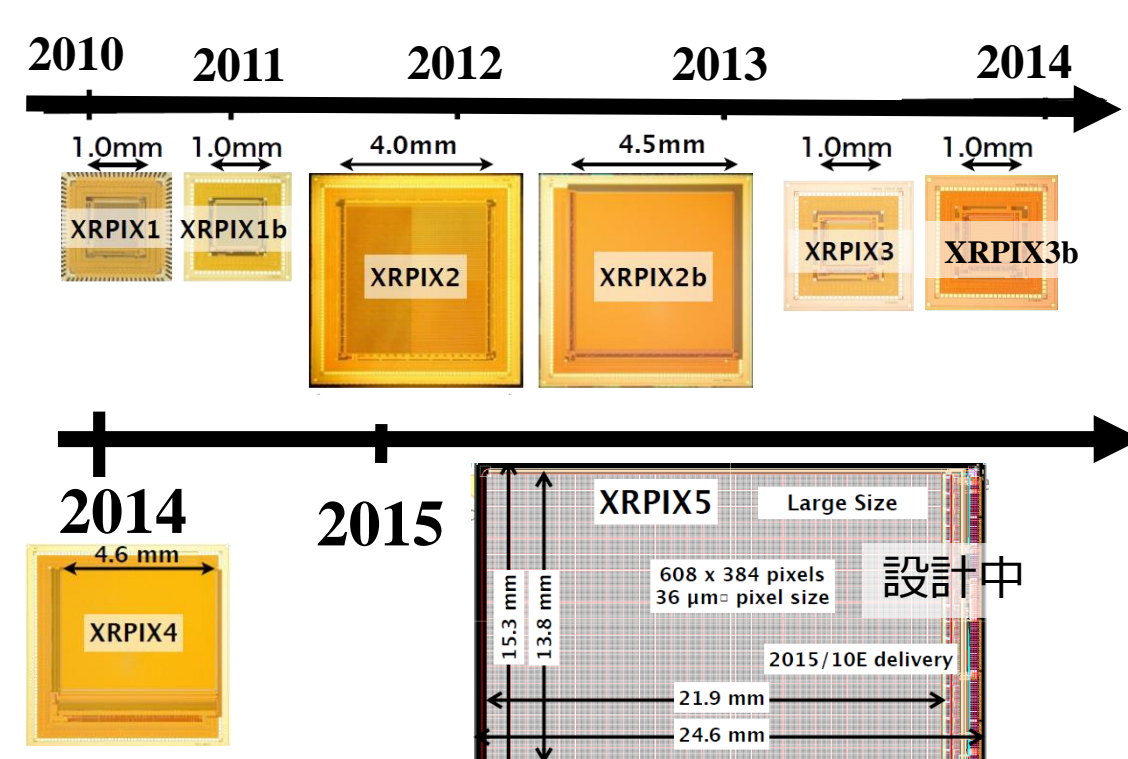
我々は、次世代のX線天文衛星に搭載するSOI技術を用いたイベント駆動型ピクセル検出器(X線SOIPIX)である「XRPIX」を開発している。XRPIXは、各ピクセルにイベントトリガー出力機能を持ち、ノイズを低減するためにCDS(Correlated Double Sampling)機能を兼ね備え、高い時間分解能(数 $\mu$ s)や、X線の広いエネルギー帯域の観測(0.5~40 keV)を実現する検出器である。現状のXRPIXは、高い読み出しノイズ(〜35 e<sup>-</sup>)が原因でエネルギー分解能が悪く読み出しノイズを改善することが最も重要な開発項目の一つである。

本研究では、XRPIX シリーズの中のXRPIX1、XRPIX2b、XRPIX3b の3 種類の素子について、エネルギー分解能、ゲイン、読み出しノイズ、リーク電流などの基本性能の温度依存性の評価実験を行った。これまでの結果から、動作温度-80 °Cにおけるエネルギー分解能、読み出しノイズ、リーク電流が、XRPIX1 では1080eV FWHM@5.95keV、110e-、6.76e-/ms/30.6 $\mu$ m角pixel、XRPIX2b では630eV FWHM@5.95 keV、52e-、41.6e-/ms/30.0 $\mu$ m角pixel、XRPIX3b では337eV FWHM@5.95keV、35e-、13.7e-/ms/30.0 $\mu$ m角pixel、であることが分かり、いずれの値も動作温度に依存していることが分かった。さらに、動作温度-100 °CにおけるXRPIX3bのリーク電流と読み出しノイズのバックバイアス電圧の依存性を調べるために、バックバイアスとして印加する電圧の値を5~200V まで変更して測定を行った。測定結果よりXRPIX3b\_FZは、バックバイアス電圧が75V以上で、リーク電流と読み出しノイズが一定となることが分かった。本ポスターでは、XRPIX1、2b、3bの基本性能の温度依存性とXRPIX3bのバックバイアス依存性の実験結果について報告する。

## 2. XRPIXとは？

XRPIX は、X 線観測用に開発された、X 線検出部と読み出し回路部が一体型のCMOSイメージセンサー(SOPIX)であり、トリガー情報出力機能により、高い時間分解能を得ることでX 線CCDではできなかった、反同時計数測定を可能にし、NXB (Non-X-ray-Background)を取り除き、広範囲での測定が可能になる。

使用したXRPIXを表1に示す。XRPIX3bは、CSA回路を組み込むことでゲインを上げ、読み出しノイズを相対的に低減するために、XRPIX2bをベースに開発された素子である。



**図 1：XRPIXの開発進捗図。**  
1.0mm角の大きさの素子の開発からスタートし、今日までに14×22mm角の大きさの素子の開発までに至っている。

**図 2 :** (左)XRPIX1の写真。  
(右)XRPIXの読み出し回路図。  
赤線で囲っている部分が、  
CDS機能部分、青線部分が、  
トリガー情報出力機能部分。  
XRPIX3bのみ、CSA回路を組み  
込んでいる。

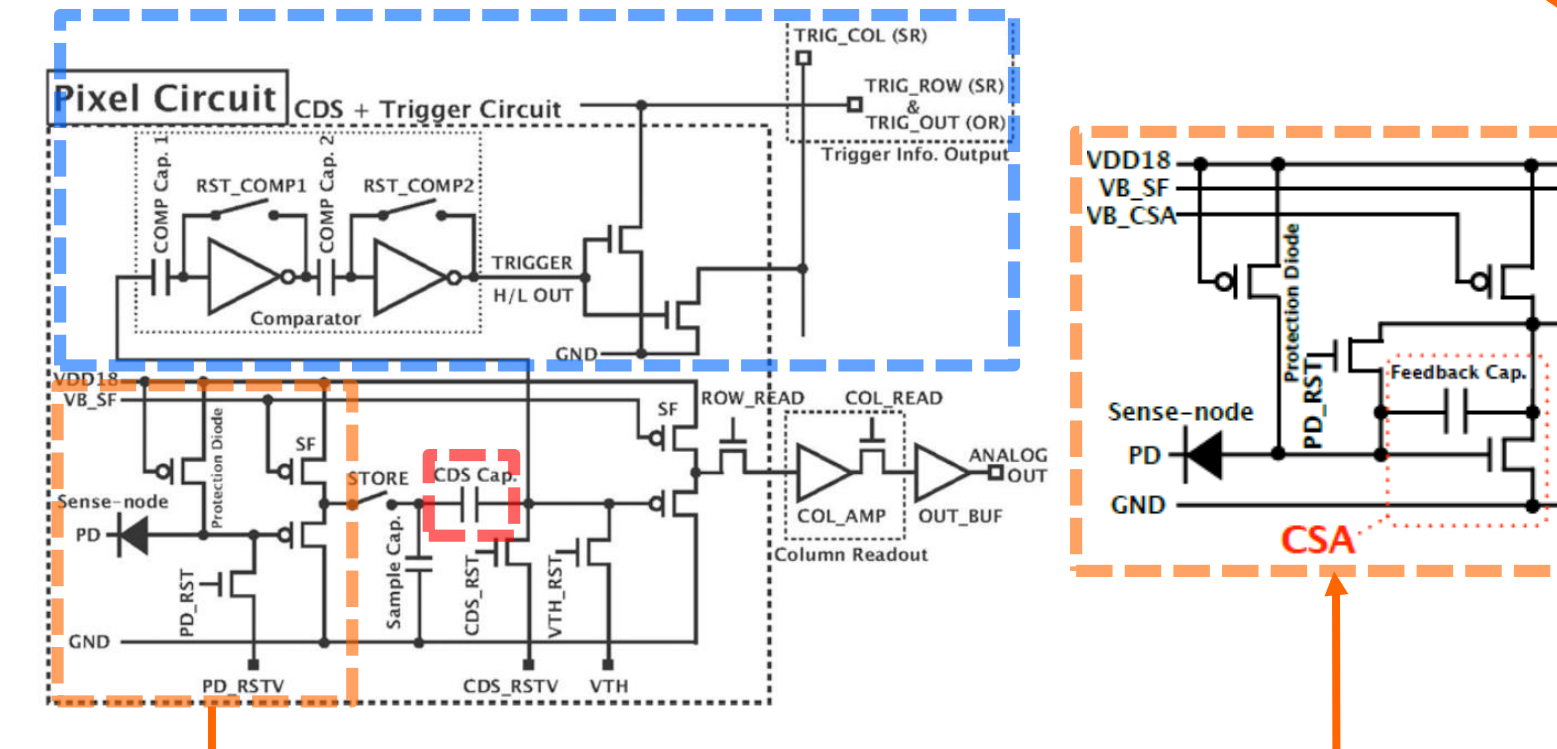
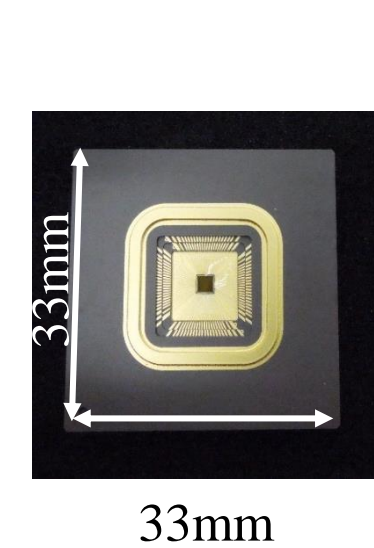


表 1 : XRPIX1, 2b, 3bのスペック

	チップサイズ	ピクセルサイズ	ピクセル数	センサー層の比抵抗	センサー層の厚さ
XRPIX1	2.4×2.4 mm <sup>2</sup>	30×30 μm <sup>2</sup>	32×32 個	700 Ω・cm	260 μm
XRPIX2b_CZ XRPIX2b_FZ	6.0×6.0 mm <sup>2</sup>	30×30 μm <sup>2</sup>	144×144 個	1.5 kΩ・cm 5.0 kΩ・cm	260 μm 500 μm
XRPIX3b_CZ XRPIX3b_FZ	2.9×2.9 mm <sup>2</sup>	30×30 μm <sup>2</sup>	32×32 個	700 Ω・cm 2 kΩ・cm	310 μm 500 μm

### 3. XRPIXの性能の評価実験

XRPIXの性能の評価  
実験を行うため、温度  
を変化させながら、  
放射性同位体 $^{55}\text{Fe}$ からの  
X線を照射した際の素子  
の出力を測定した。

さらに、XRPIX3bでは、  
-100℃の冷却時、  
バックバイアスとして印加する電圧を5~200Vの範囲  
で変更し、素子の出力を測定した。

XRPIXの評価実験に使用した実験システムを図3、図4に示す。また、図5に、XRPIX3bを-80℃の冷却時、 $^{55}\text{Fe}$ のMn-K $\alpha$ 、K $\beta$ のスペクトル図と、XRPIX1,2b,3bのスペクトルを重ねて表示したものを示す。

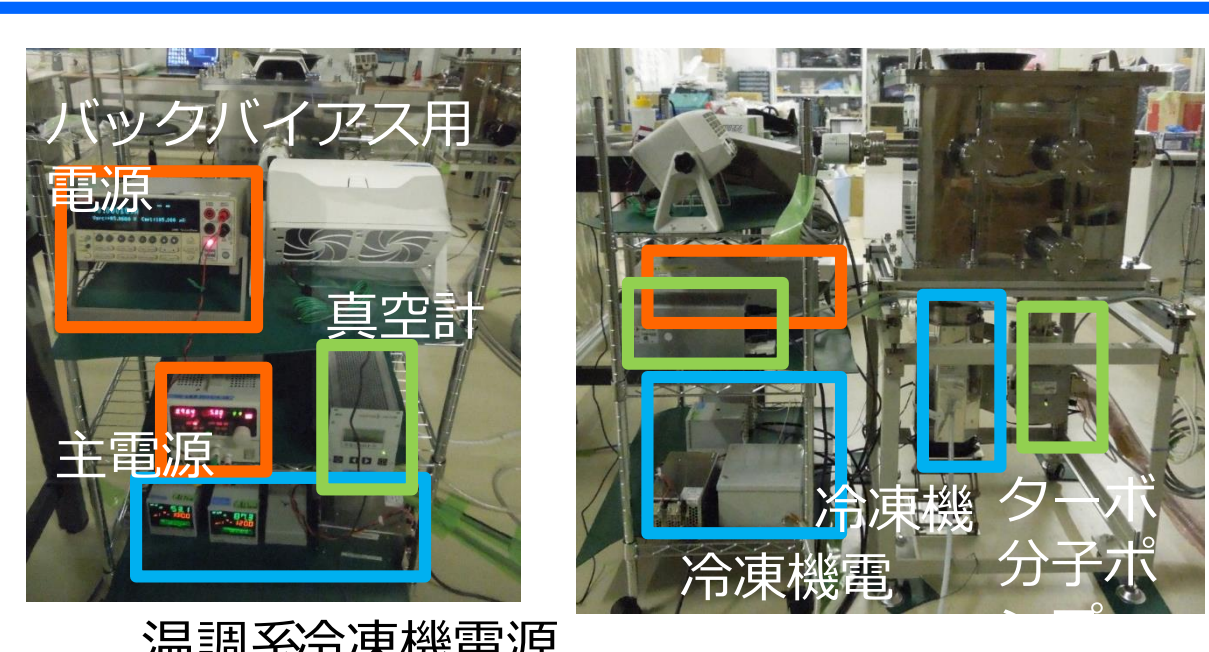
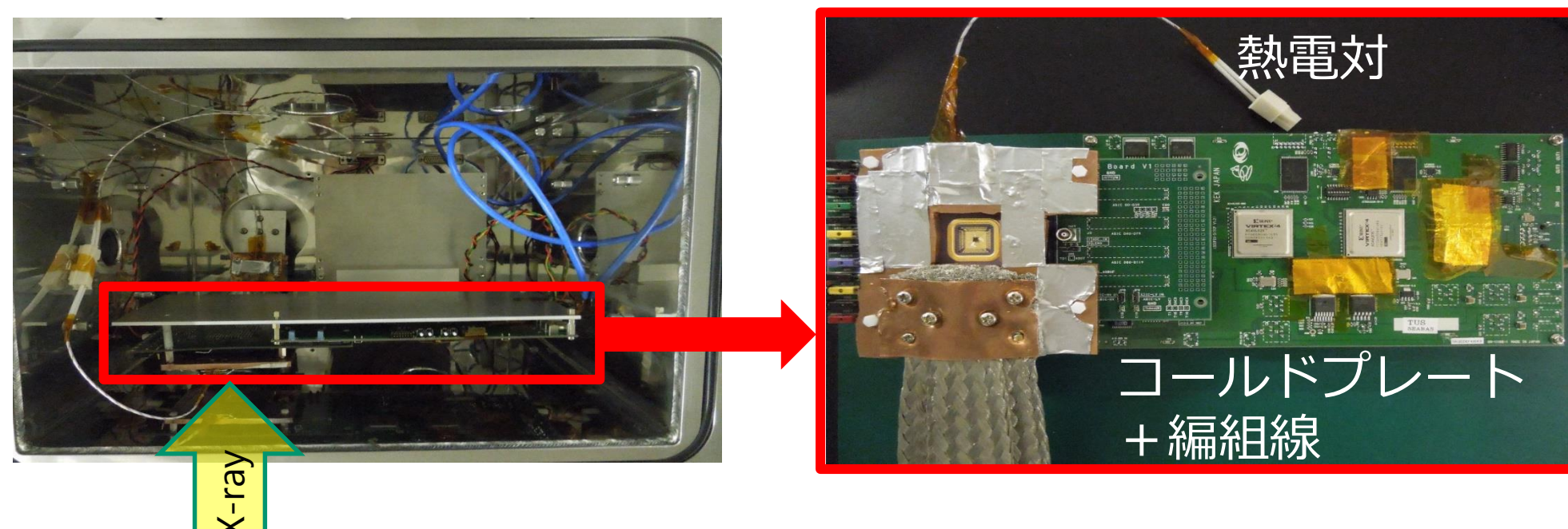
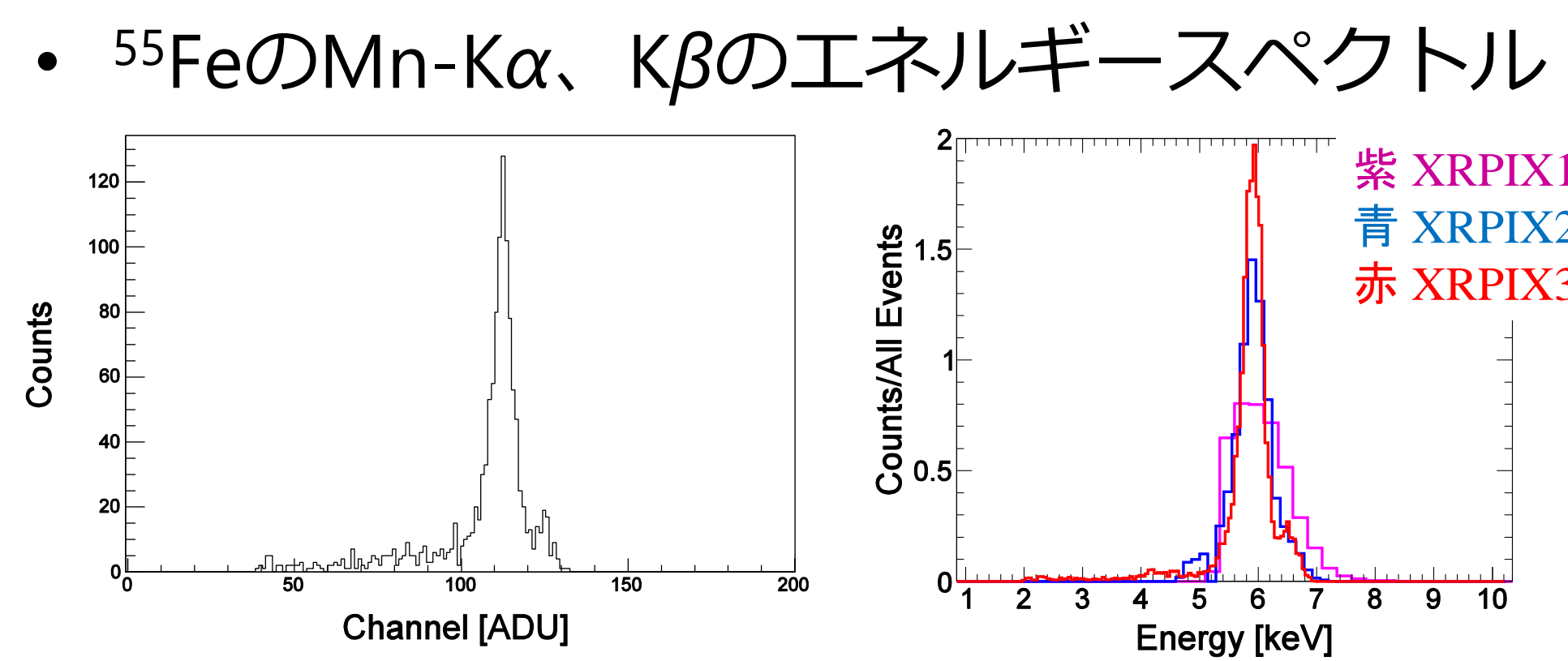


図 3：実験セットアップ外観



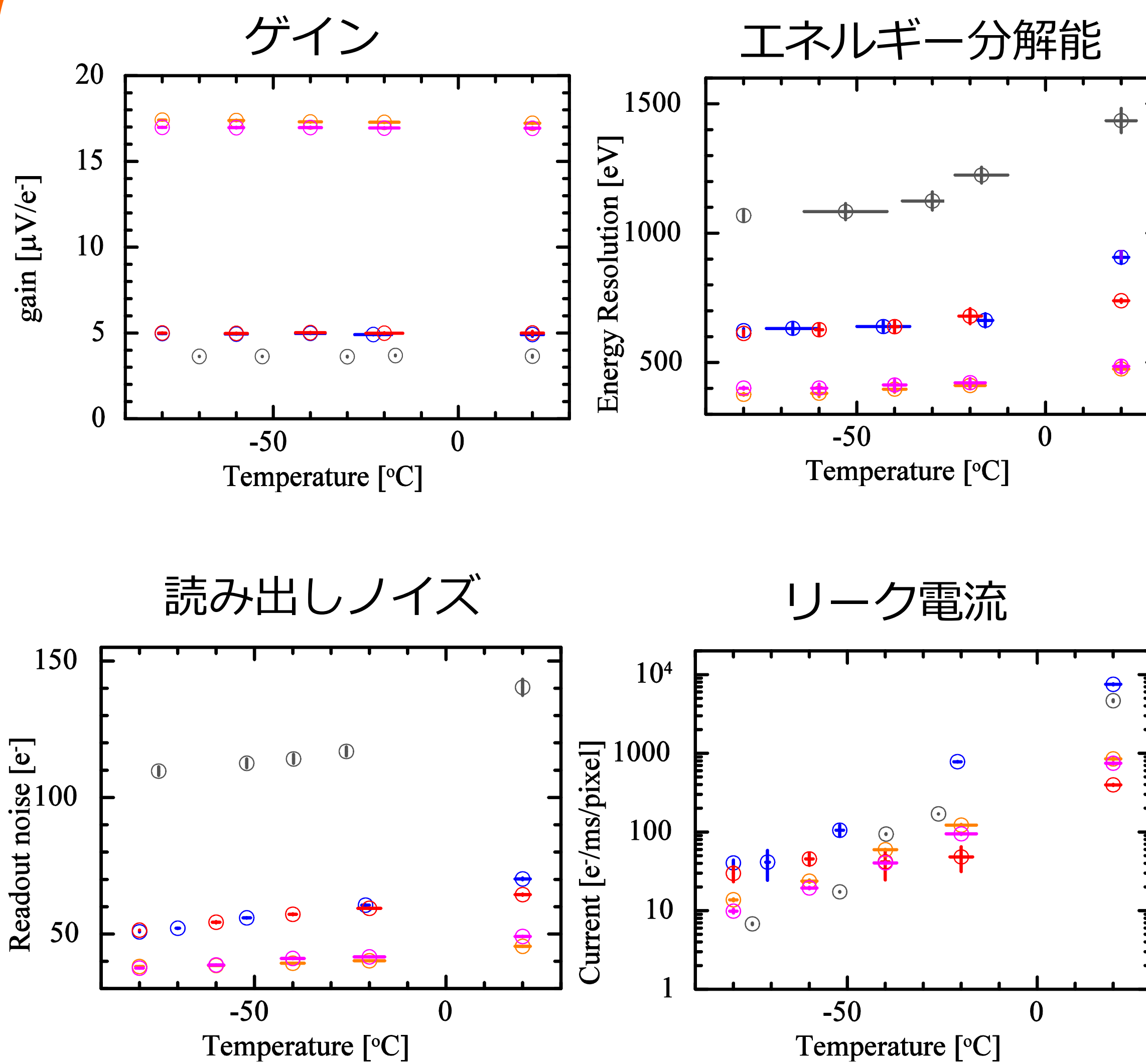
**図 4：**(左)真空層内を真上から見下ろした写真。(右)XRPIX1と、読み出しボード(SEABASとSUBボード)の写真。素子には、冷却するためコールドプレートが設置されておりコールドプレートの温度を素子の温度とする。測定中の真空層内の真空度は、 $10^{-6}$ mbar程度。素子を常温から-100℃程度まで、冷却することができる。



**図 5 :** (左)XRPIX3bで取得した、素子温度-80℃時の $^{55}\text{Fe}$ のスペクトル。(右) 素子温度-80℃時の各素子の $^{55}\text{Fe}$ のスペクトルを重ねて表示したもの。XRPIX3bでは、**Mn-K $\alpha$** と**Mn-K $\beta$** が分光できていることが分かる。スペクトルの中心値などを求めるためにスペクトルを1個のガウス関数でフィッティングを行った。算出した、中心値や幅から、ゲインやエネルギー分解能を算出した。

## 4. 実験結果

### ◆XRPIX性能の温度依存性



**図6(左上)：ゲインの温度依存性。**  
XRPIX1,2b,3bごとのゲインの違いは、センサー部の容量に由来する。

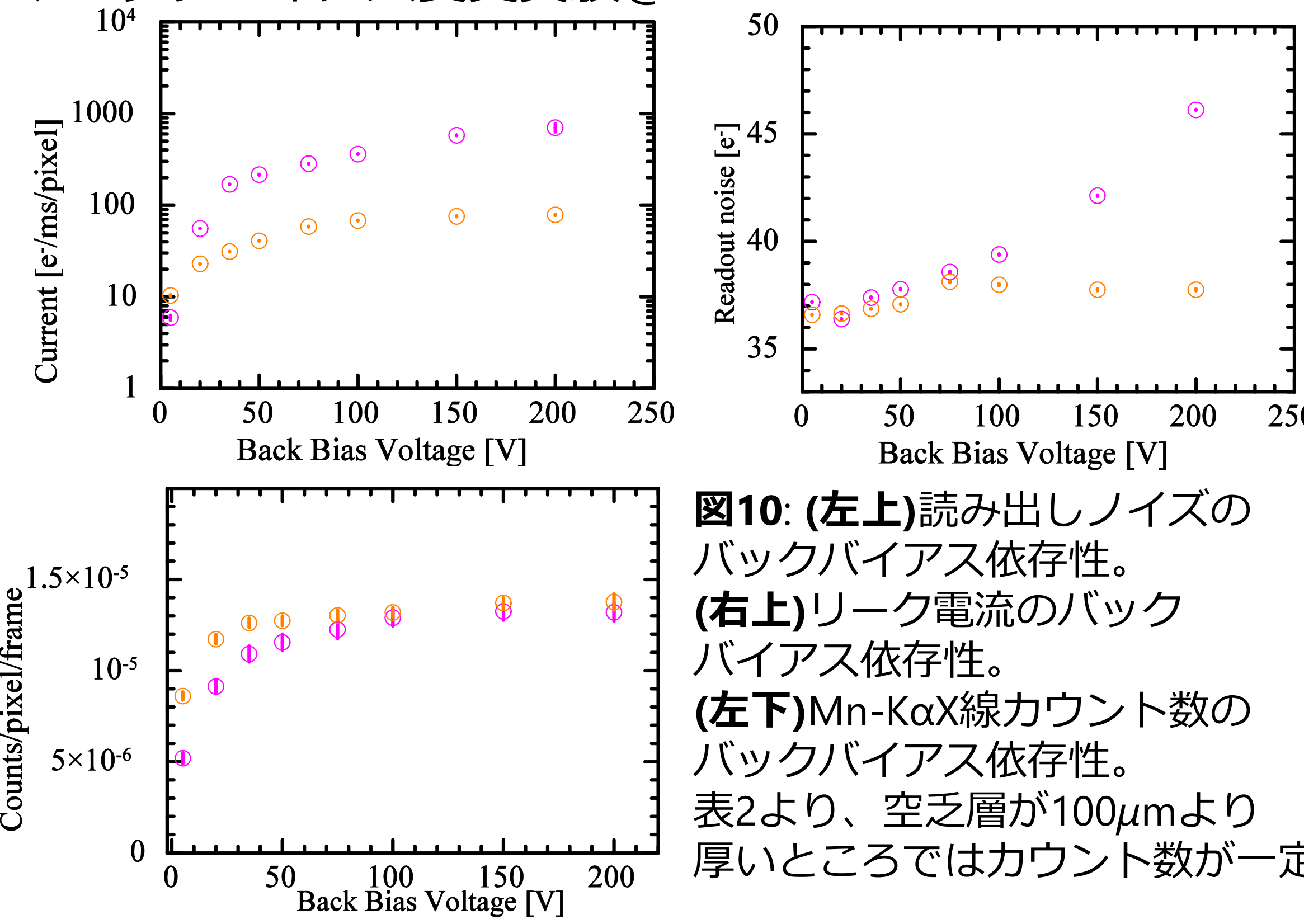
**図7(右上)：**  $^{55}\text{Fe}$  Mn-K $\alpha$ のエネルギー分解能の温度依存性。XRPIX1,2b,3bごとのエネルギー分解能の差は、読み出しノイズが減少したためである。

**図8(左下)：読み出しノイズの温度依存性。**  
XRPIX1,2b,3bごとの読み出しノイズの差は、ゲインが上昇したことによる。

**図9(右下)：リーク電流の温度依存性。**  
温度を下げていくと、リーク電流が減少するのは、素子を冷却したことにより、センサー部の低効率が大きくなったためである。

エネルギー分解能は、 $-40^{\circ}\text{C}$ まで単調減少した。これは、素子を冷却することで、
$$\Delta E_{\text{FWHM}} = 2.36 W_{\text{Si}} \sqrt{E \frac{F}{W_{\text{Si}}} + \sigma_N^2}$$
と表わせるエネルギー分解能に寄与する読み出しノイズが減少したためである。(E: X線のエネルギー, F: フォトン因子(Siの場合  $\sim 0.12$ ),  $W_{\text{Si}}$ : Siの平均電離エネルギー)  
リーク電流の読み出しノイズへの寄与は、 $-40^{\circ}\text{C}$ 以下では無視できることが分かった。

## ◆バックバイアス変更実験@XRPIX3b



**図10: (左上)**読み出しノイズのバックバイアス依存性。  
**(右上)**リーク電流のバックバイアス依存性。  
**(左下)**Mn-KαX線カウント数のバックバイアス依存性。  
表2より、空乏層が100μmより厚いところではカウント数が一定

	5V	20V	35V	50V	75V	100V	150V	200V
3b_CZ	31 $\mu\text{m}$	63 $\mu\text{m}$	83 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$	121 $\mu\text{m}$	140 $\mu\text{m}$	172 $\mu\text{m}$	200 $\mu\text{m}$
3b_FZ	53 $\mu\text{m}$	106 $\mu\text{m}$	140 $\mu\text{m}$	168 $\mu\text{m}$	205 $\mu\text{m}$	237 $\mu\text{m}$	290 $\mu\text{m}$	335 $\mu\text{m}$

空乏層の厚さは、以下の式より算出。  
(W. R. Leo “Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments”)

$$W \approx \sqrt{2\varepsilon\mu\rho V} \approx 0.53\sqrt{\rho V}$$

各グラフの色は、灰色XRPIX1, 青XRPIX2b CZ, 赤XRPIX2b FZ, 紫XRPIX3b CZ, 橙色XRPIX3b FZ のデータを表す。

## 5. まとめ

- XRPIX1,2b,3bの性能の温度依存性とXRPIX3bの「読み出しノイズ」、「リーク電流」のバックバイアス電圧依存性を測定した。
- 動作温度を低くすることで、読み出しノイズ、リーク電流とエネルギー分解能の値が低減することが分かった。エネルギー分解能が-40℃以下で一定となっているため、バックバイアス5Vでは、最低-40℃まで冷やす必要がある。
- バックバイアスを上げていくと、XRPIX3b\_FZよりXRPIX3b\_CZの方が、読み出しノイズと、リーク電流の劣化が大きかった。これはXRPIX3b\_CZより、XRPIX3b\_FZの方が空乏層が厚く、比抵抗が大きいため、バックバイアスによる、リーク電流の劣化が少なかったためである。
- 空乏層厚が100μm以上で、X線カウント数が一定となっているのは、入射X線が空乏層内で完全に吸収されているためである。