

Belle II 実験

シリコンストリップ検出器の 放射線耐性の研究

2023年02月19日 夜
第29回 ICEPP シンポジウム@志賀レークホテル(長野県)

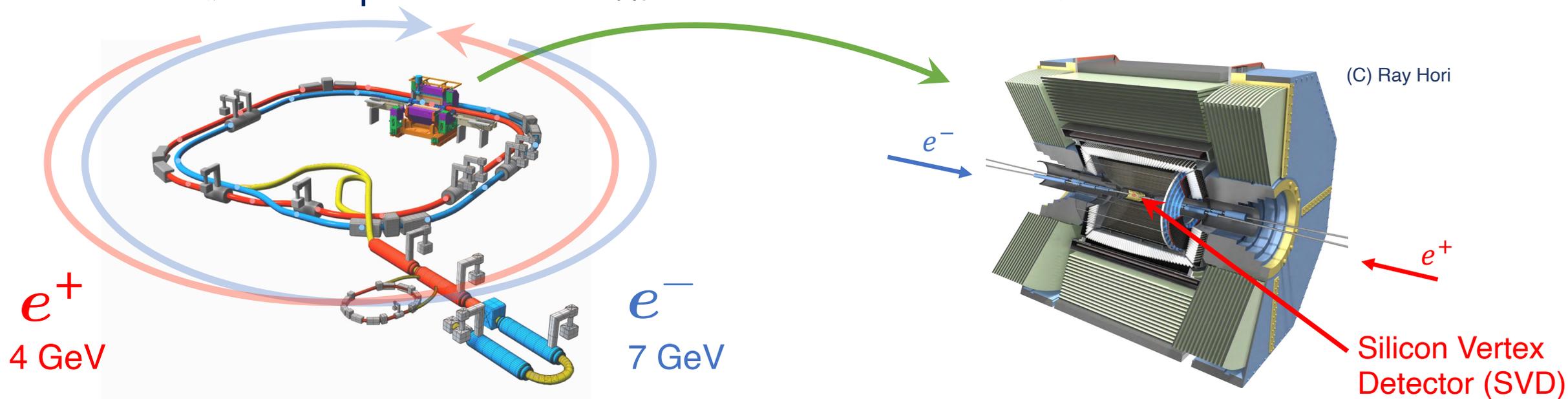
男谷 文彰

fumiaki.otani@ipmu.jp

はじめに

Belle II 実験 = SuperKEKB加速器 +

Belle II 検出器



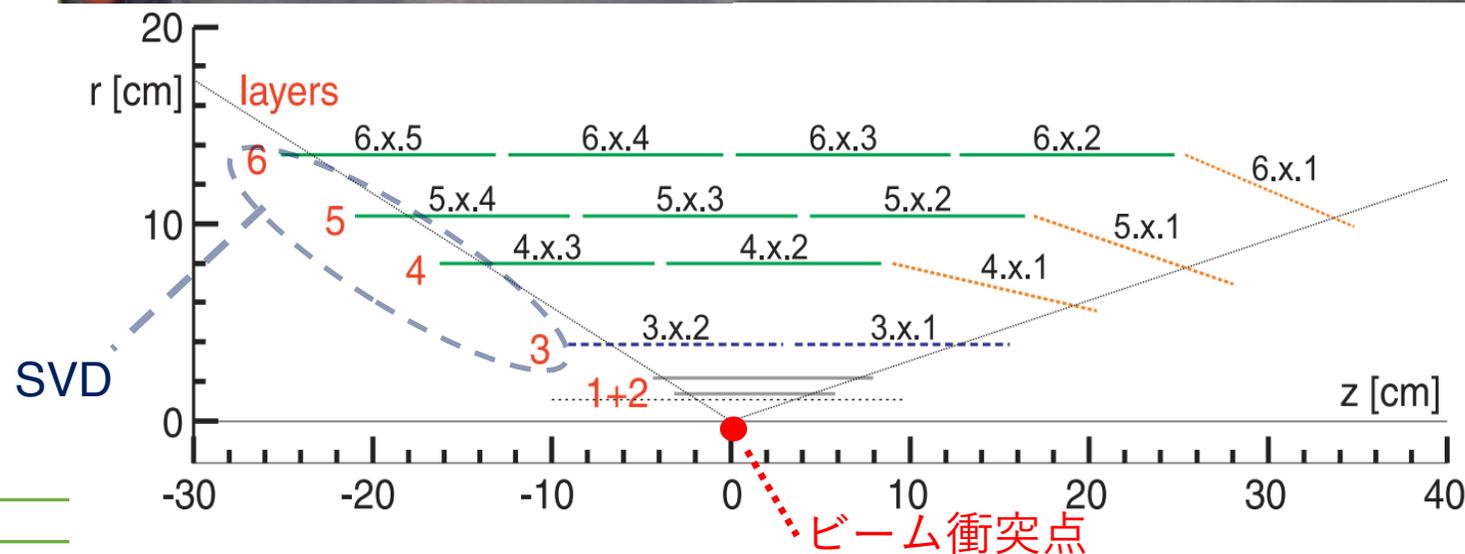
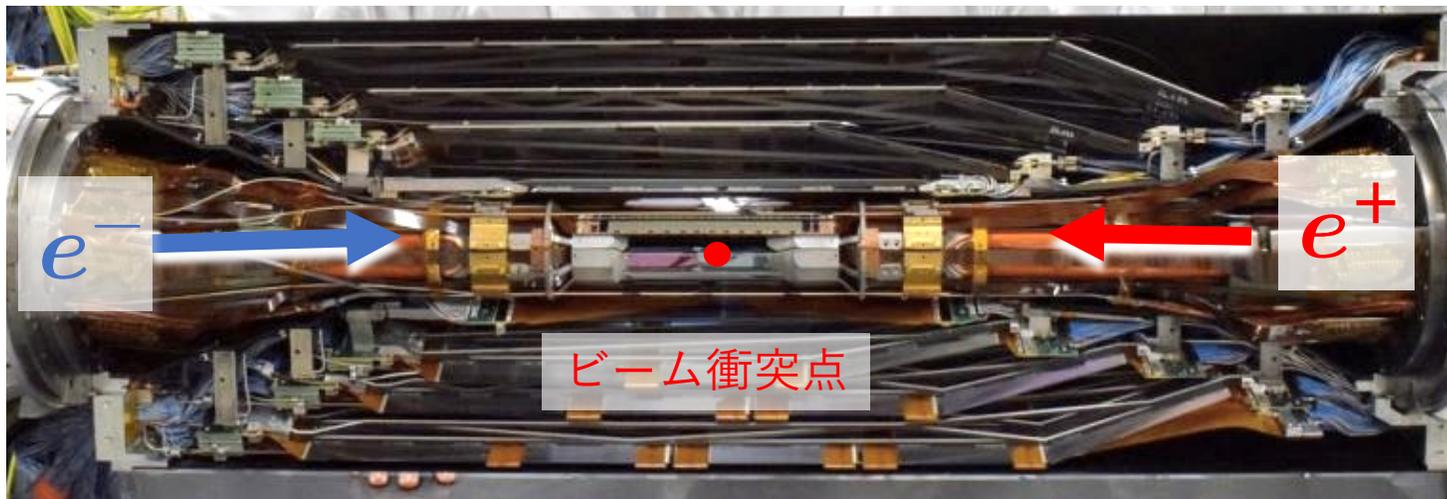
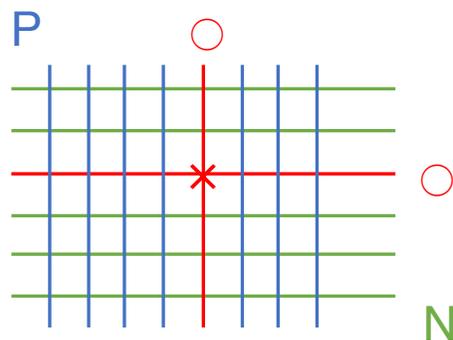
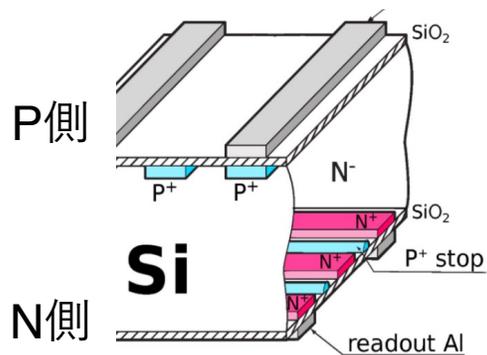
- 円形 電子-陽電子 衝突型加速器
- B 中間子を大量生成
- ルミノシティ $\sim 4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$,
積分ルミノシティ $\sim 424 \text{ fb}^{-1}$ 達成 (2022年6月)
- 現在ルミノシティを継続的に強化中
目標ルミノシティ $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

- 大量生成された B 中間子の崩壊を記録
- 主に7つのサブ検出器で構成
 - 崩壊点測定
 - 飛跡検出
 - 粒子識別... etc
- ビーム衝突点付近にある Silicon Vertex Detector (SVD) は粒子の崩壊点を測定

- Belle II 検出器中心付近にある。
四層、円筒状
- 各層の粒子通過位置をもとに粒子の飛跡を再構成し、
粒子の崩壊点を計測

SVDセンサー (N型センサー)

- 半導体センサー
- P側とN側のストリップが直交、
両面読み出し構造 (DSSD)
粒子通過点の2次元情報を取得



- ビームルミノシティ強化に伴い、SVDが受けるバックグラウンド放射線量も増加

最内層SVD & 目標ルミノシティでの運転

10年間の放射線量はTotal Ionizing Dose (TID) ~20 kGy (1 kGy = 3×10^{11} n_{eq}/cm²)

equivalent neutron fluence $\sim 6 \times 10^{12}$ [n_{eq}/cm²]とシミュレートされている

SVDセンサーのバルク(内部)損傷の理解は重要→ equivalent neutron fluenceでの評価

- Belle II SVDではバルク損傷に寄与する粒子：

- 電子、陽電子、中性子がメイン

- 電子による損傷 = 表面損傷 + バルク(内部)損傷

- 電子線照射で実際の損傷に近い損傷を与えられる → 電子線照射

- ★ 目標ルミノシティで10年間運転を行うと、
~ 20 kGy \Leftrightarrow ~ 6×10^{12} n_{eq}/cm² 程度放射線量を受けると推定

研究目的： 放射線損傷を受けても Safety factor 3をもって、
SVDの運転が可能か調べる

Safety factor 3
 \Leftrightarrow ~ 60 kGy
 \Leftrightarrow ~ 2×10^{13} n_{eq}/cm²

SVDセンサーへの損傷と影響



読み出しモジュール
= SVDセンサー + APV25

- I. 全空乏化電圧 V_{FD} の増大
→ 供給可能電源上限 200 Vを超えないか
- II. リーク電流増大
→ 供給電源許容電流上限 10 mAを超えないか
- III. Signal-to-Noise Ratio (SNR) の悪化
→ SNR > 10であるか

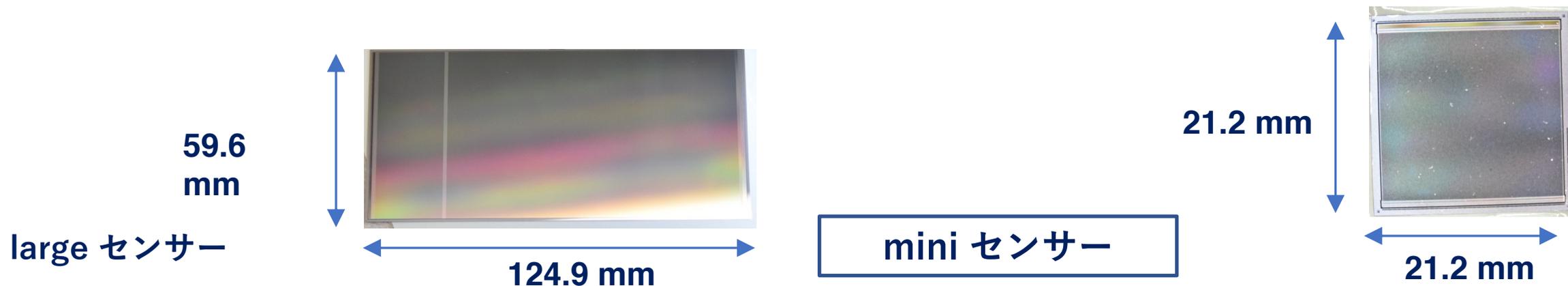
IV測定

で確認

Readout ASIC
APV25で信号読み出し

IV測定について

- 今回試験では、miniセンサーを照射し、そのバルク損傷を中心に調べた。



✓ SVDで実際に使用しているセンサー

- ✓ SVDと同じシリコンウェハーから作製
- ✓ バルク性質は同じと期待される
- ✓ センサー表面のストリップがSVDと異なる

どちらもN型センサー

	largeセンサー	miniセンサー
厚み	320 um	320 um
面積	59.6 mm × 124.9 mm	21.2 mm × 21.2 mm
ストリップ数	798 (P) / 512 (N) *	192
ストリップピッチ	75 um (P) / 240 um (N) *	100 um

*largeセンサーは読み出し用ストリップについてのみ記載
読み出し用ストリップ間にfloating stripがある

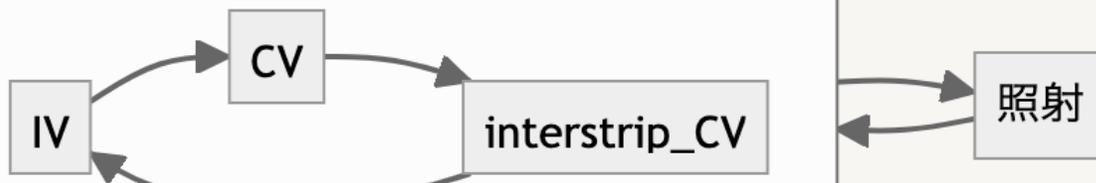
- 90 MeV 電子線、電流量：140 nA (or 70 nA)

@東北大学電子光物理学研究センター

- 期間：2022/07/28 ~ 30

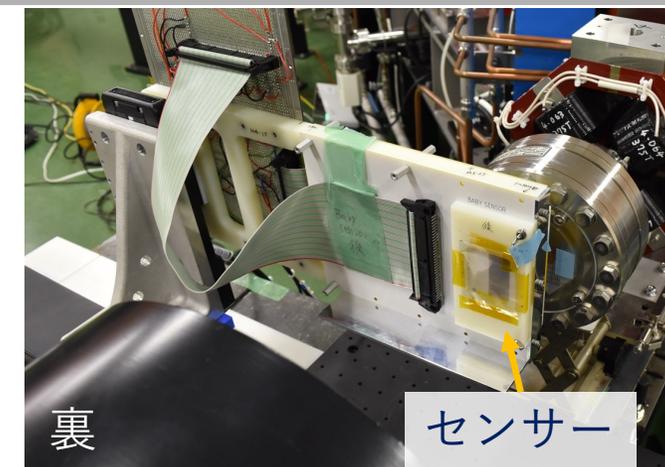
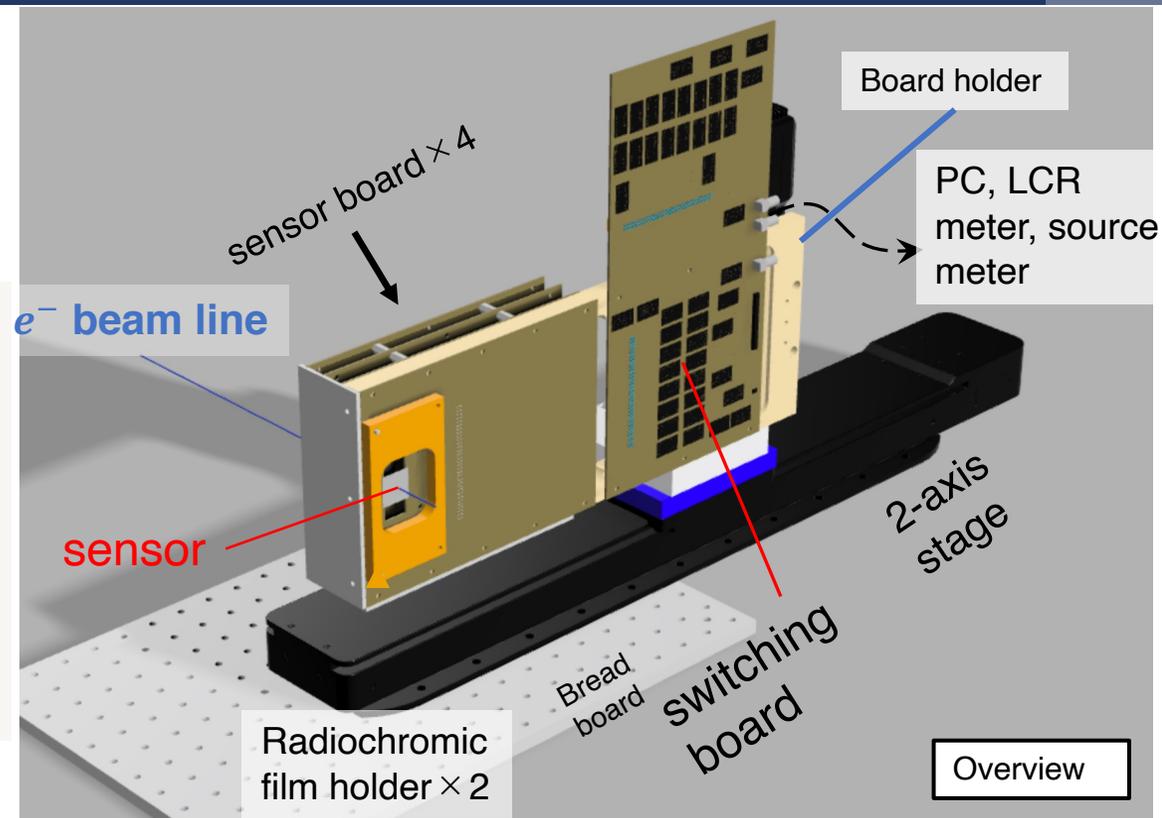
(センサー計11枚、ビームタイム約30時間)

測定@ビームライン上



すべて遠隔操作

- センサーはPCBボードにワイヤーボンンドで接続されており、スイッチングボードを介して、ソースメータやLCRメータと接続
- センサー2枚分がビームに対して、串刺しとなるように2軸自動ステージに固定
 - 2軸自動ステージはビームに対して垂直な面を移動可能 → **センサー全体への照射が可能**



■ 照射線量

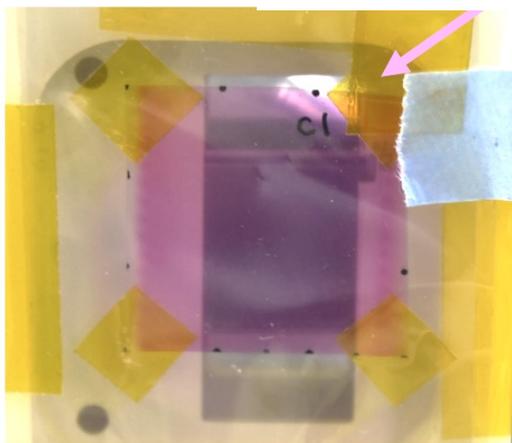
- Miniセンサー10枚を照射& IV測定
- 同一センサーで照射 ⇄ 測定

電子数 = ビーム電流 × 照射時間 / 電荷素量

$$\text{照射線量} = \text{電子数} \times \frac{dE}{dx} / \text{照射面積}$$

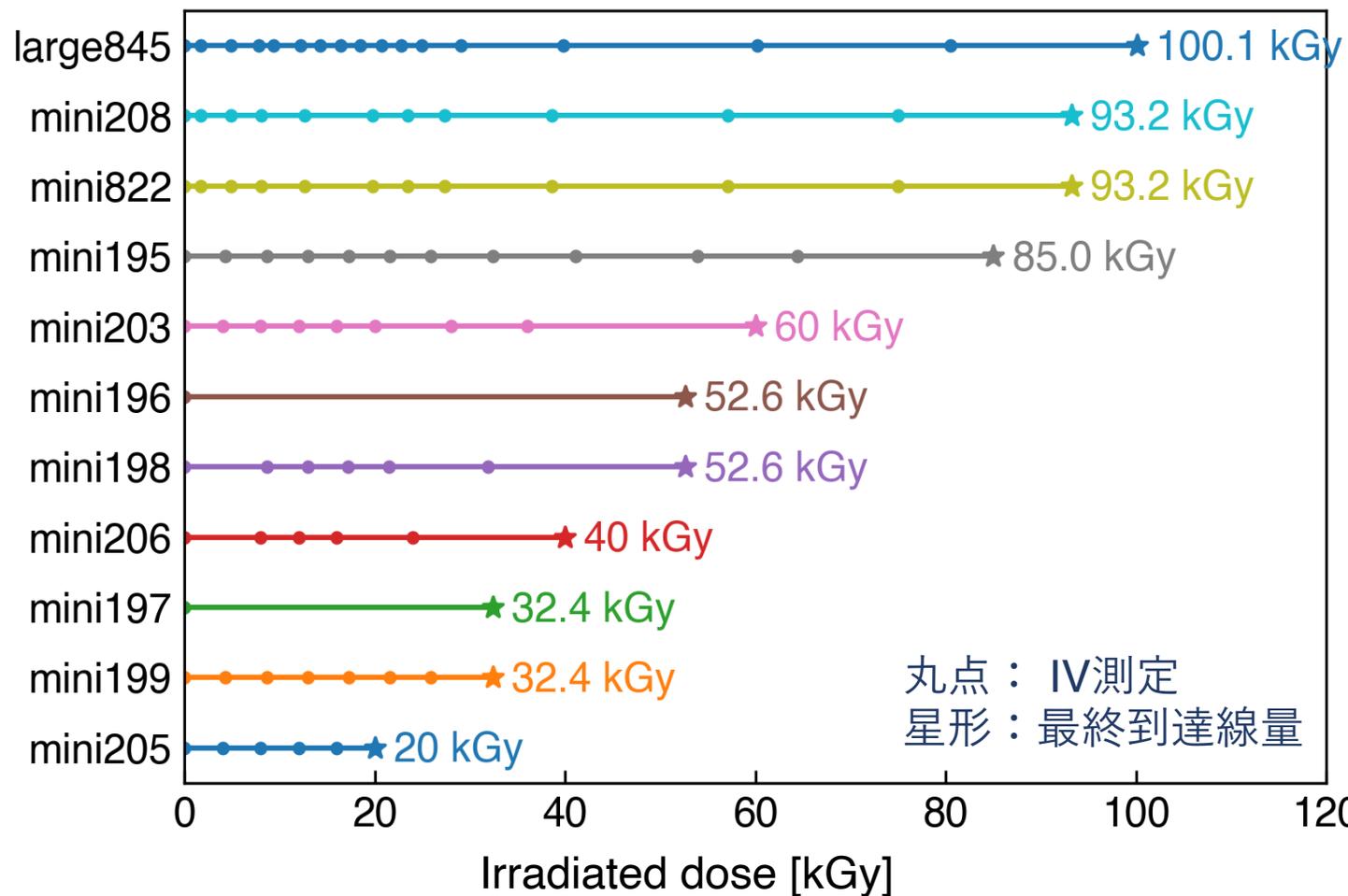
■ 照射範囲

miniセンサーのセンサー全体



シリアル番号

各センサーの照射線量とIV測定点

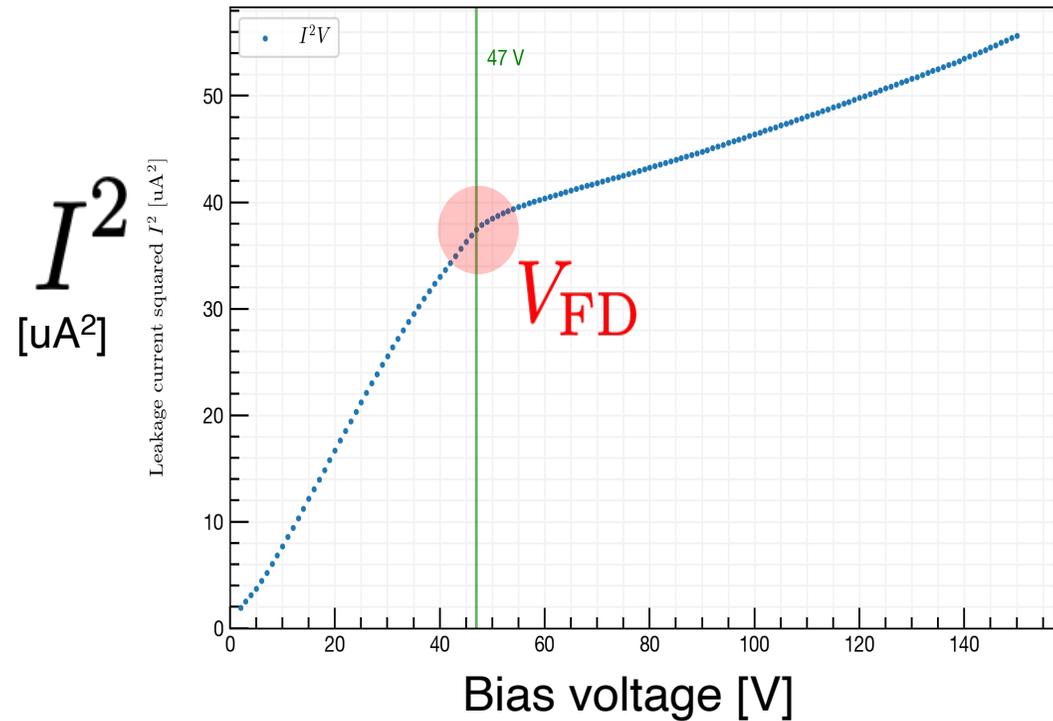


IV測定結果と解析、議論

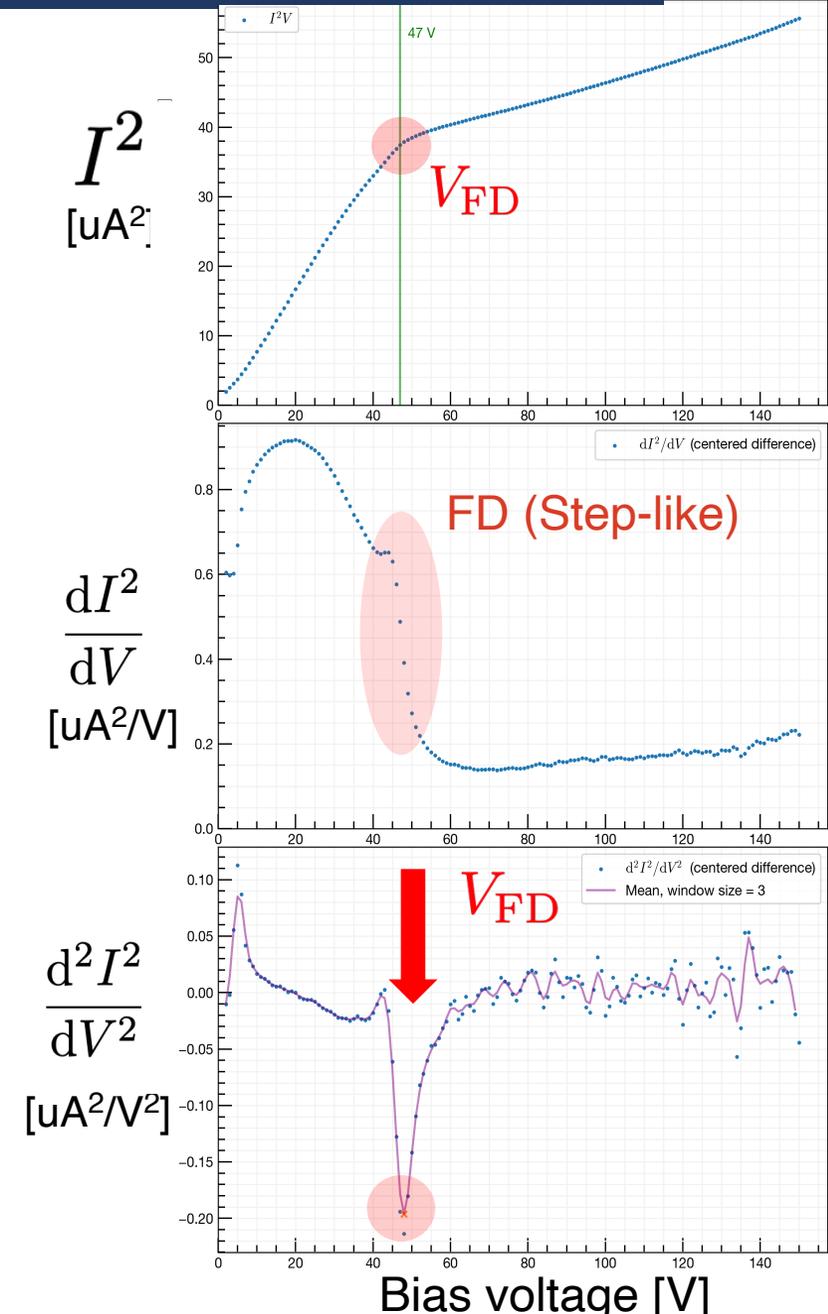
- 全空乏化電圧 V_{FD} はIV曲線の肩として現れる

$$I^2 \simeq (qUA)^2 \frac{2\epsilon_{Si}V}{qN_D} \propto V \quad (V < V_{FD})$$

q : charge, U : electron-hole pair generation rate, A : sensor area
 ϵ : Si relative permittivity, N_D : donor amount



- 2回微分の極小となる電圧を全空乏化電圧(V_{FD})と定義する

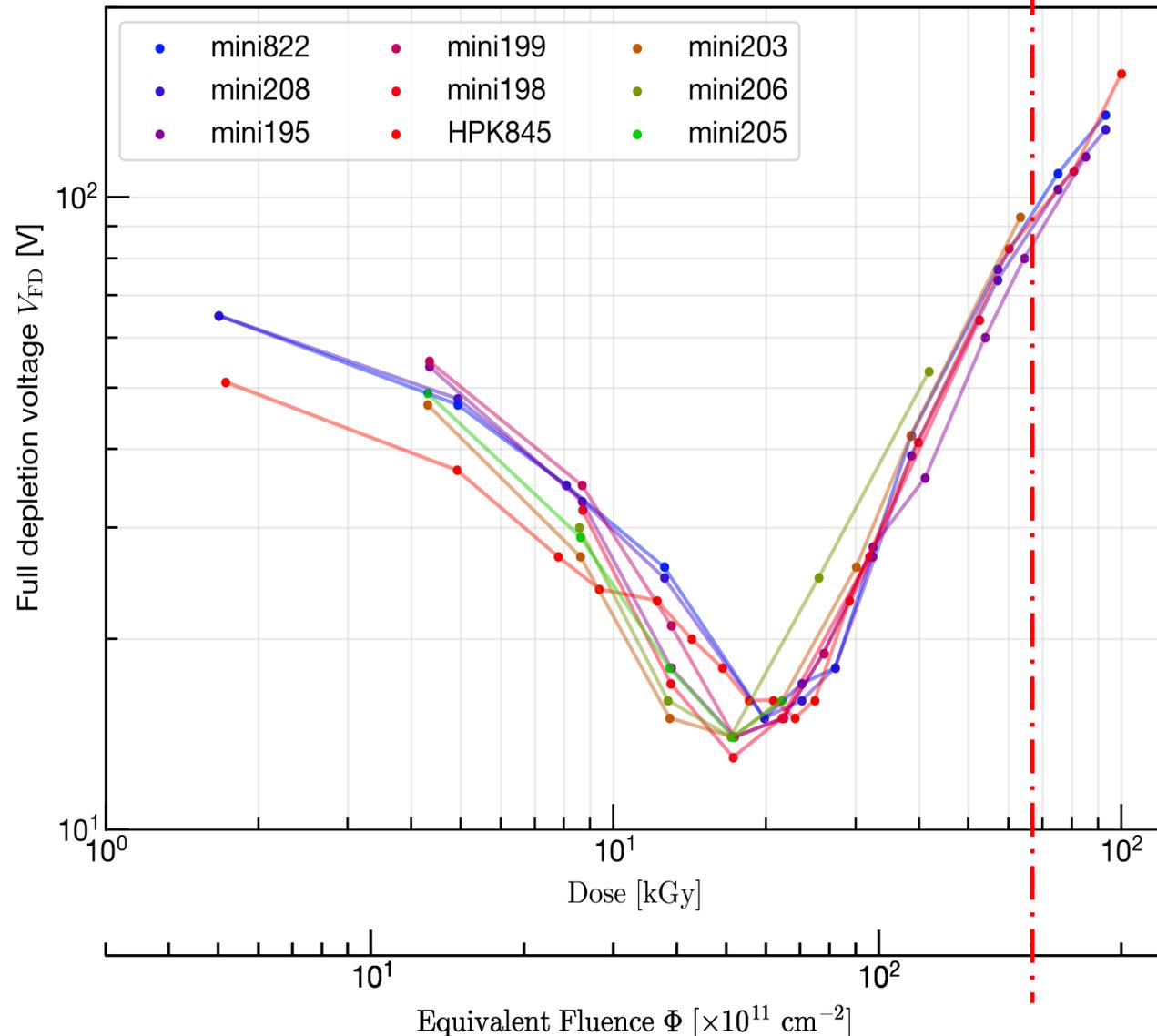


- 全空乏化電圧はある照射量になる前までは低下し、その後は上昇に転じる
⇒ Type inversion; N → P型バルクに変化
- 今回の照射試験で、SVDセンサーは $4.5 \sim 7 \times 10^{12} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$ の放射線量で type inversion することを確認した
- $2 \times 10^{13} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$ 照射でも $V_{FD} \sim 100 \text{ V}$ となり、供給可能電圧 (200 V) を超過しない

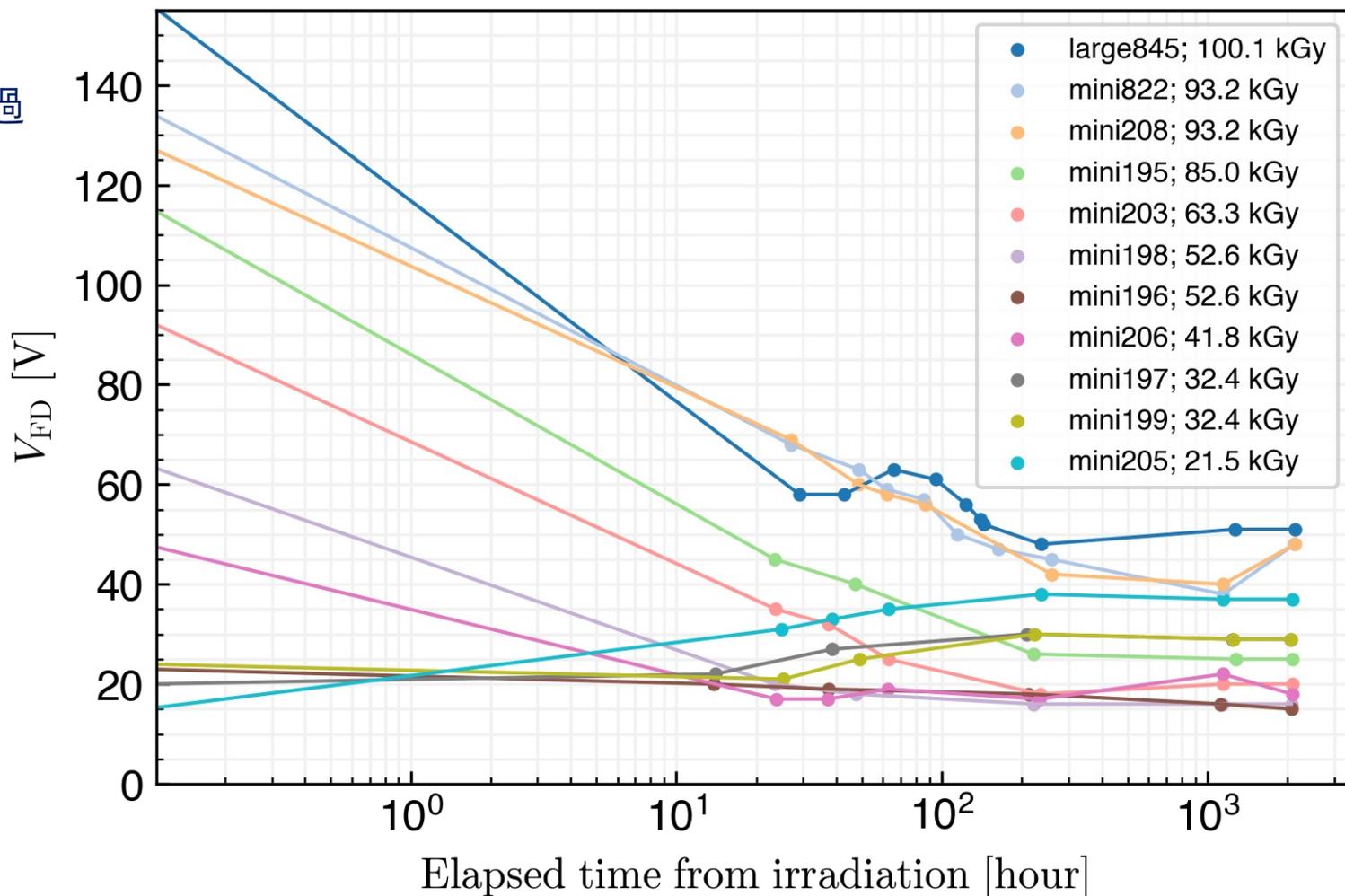
→ **Safety factor 3** をもって、**運転可能**
- 現行の電源をそのまま使用しても問題がない

照射直後の結果 (アニーリング効果なし)

$2 \times 10^{13} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$

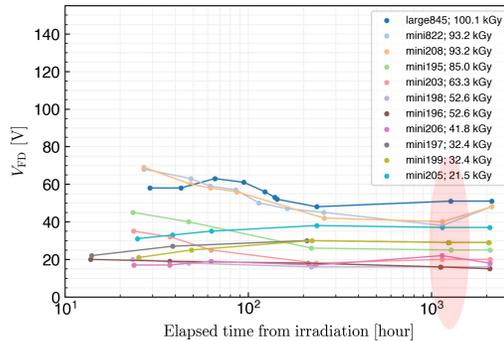
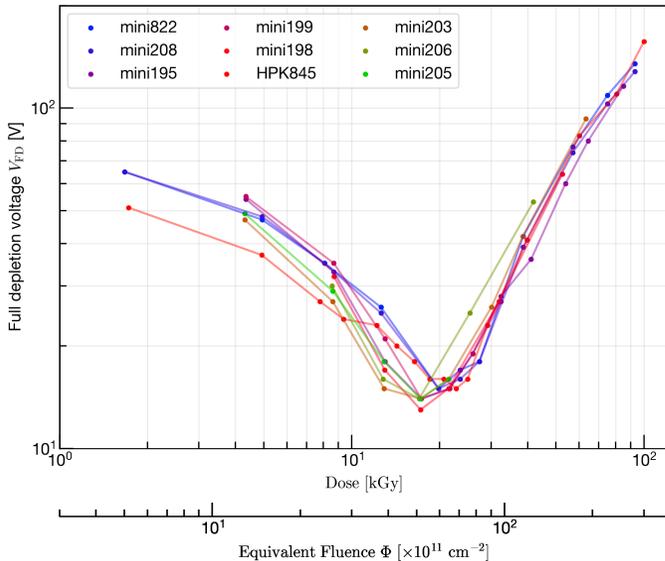


- Si結晶格子の熱振動によって、時間経過することで放射線損傷が回復することがある (アニール効果)
- 時間経過で回復に必要な時間と回復の大きさを V_{FD} の変化で見る
- アニールによる変化は初めの150~200時間 (約1週間) 内で大きく変動し、それ以降はあまり変化がない



- 照射後 $\sim 10^3$ 時間経過時にIV測定を行なった
 Type inversion: $4.5 \sim 7 \times 10^{12} n_{eq}/cm^2$ (照射直後)
 $\rightarrow \sim 2 \times 10^{13} n_{eq}/cm^2$ (アニーリング効果)
- $\sim 1 \times 10^3$ 時間経過時と $\sim 2 \times 10^3$ 時間経過時に大きな違いはない
- アニーリング効果で
 $V_{FD} < 100 V$ @ $3 \times 10^{13} n_{eq}/cm^2$,
 safety factor 5以上

照射直後

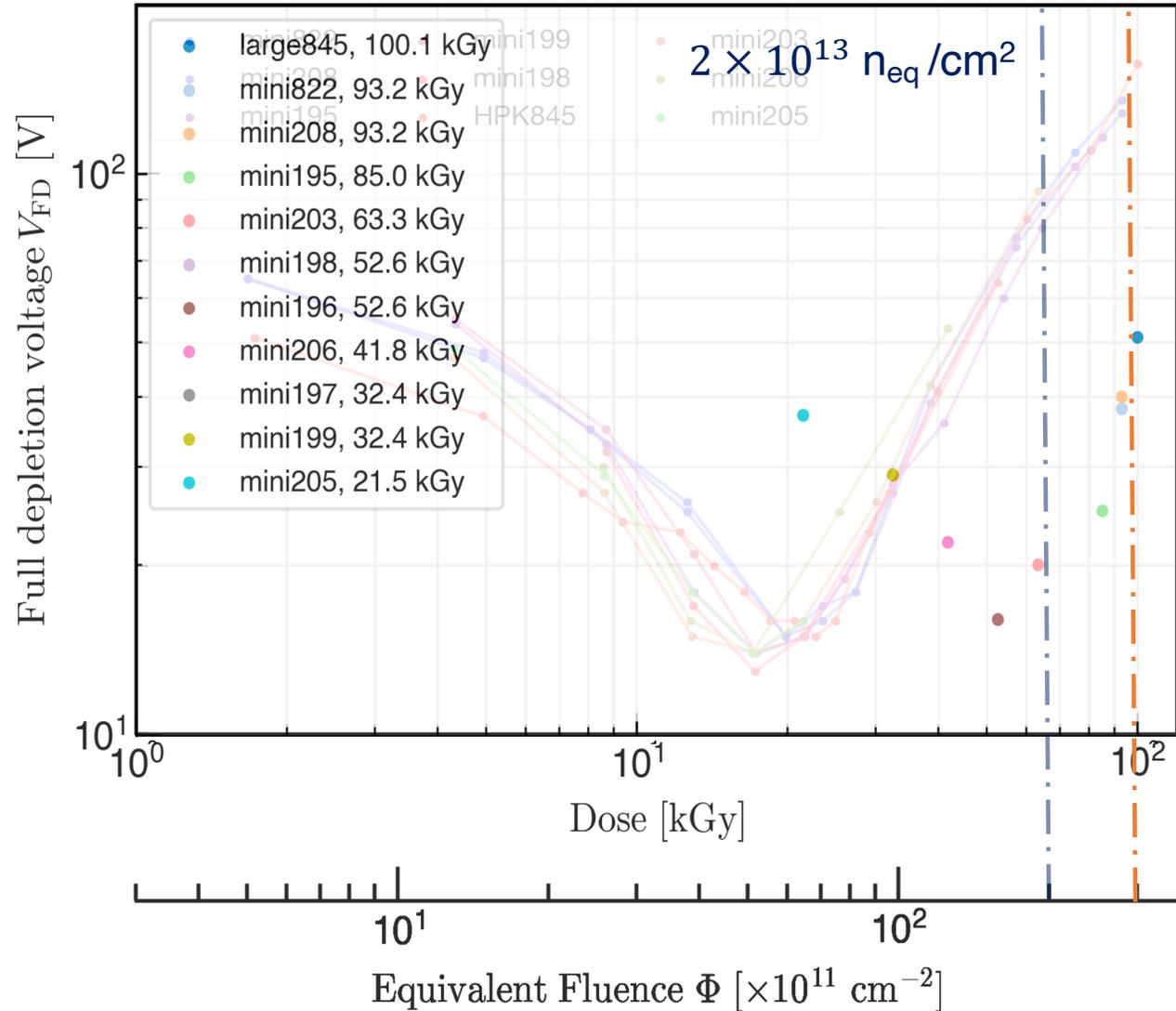


$\sim 10^3$ 時間経過

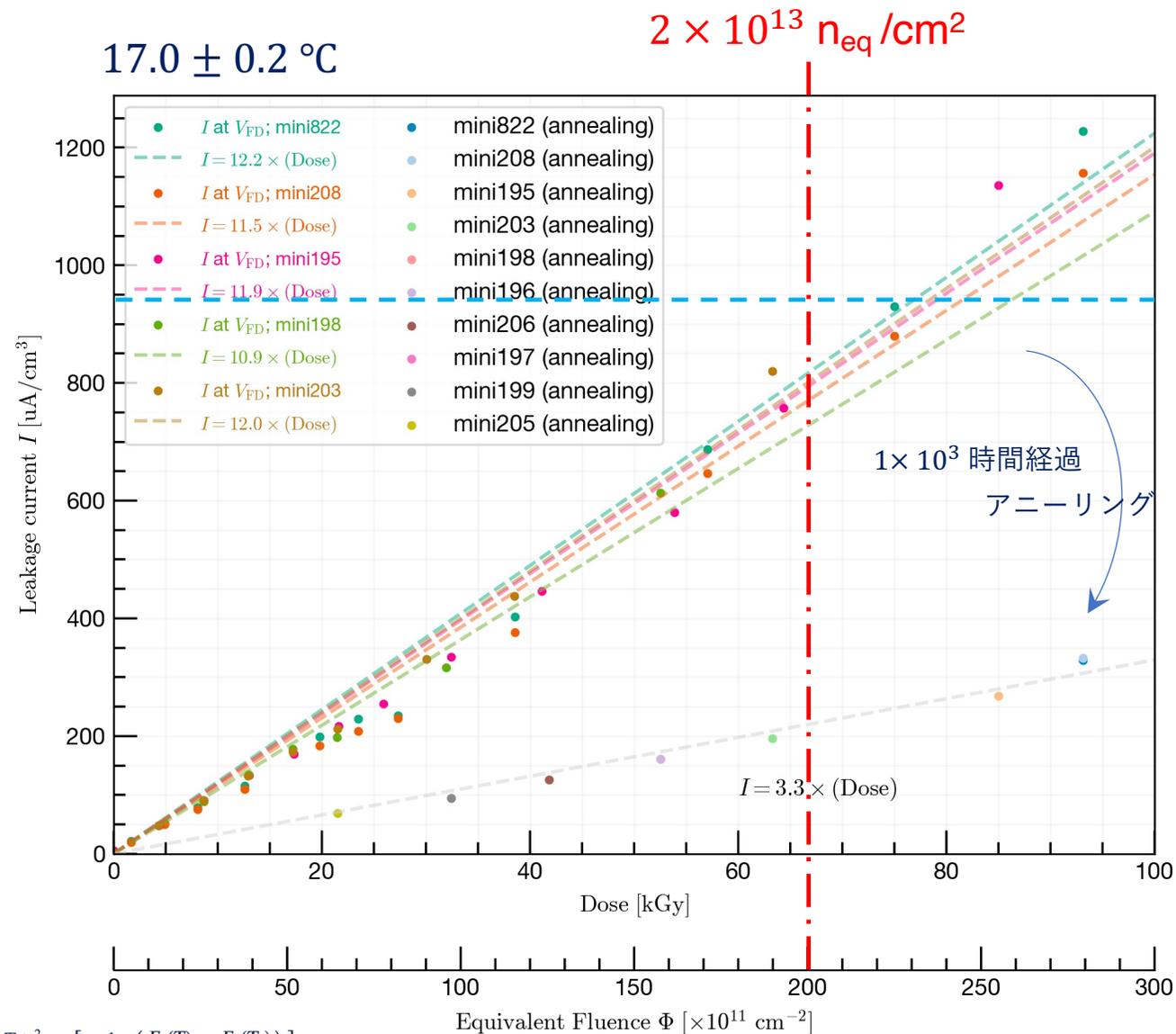


$\sim 1 \times 10^3$ 時間経過

$3 \times 10^{13} n_{eq}/cm^2$



- リーク電流は $I(V = V_{FD})$ を使用、照射量に対して線形増加
- 供給電源許容電流は 10 mA
→ 供給電源許容電流の単位体積あたり許容電流：
~940 $\mu\text{A}/\text{cm}^3$
- $2 \times 10^{13} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 照射で $I < 940 \text{ uA}/\text{cm}^3$ となり、許容電流を超過しない
→ **Safety factor 3** をもって、**運転可能**
- さらにアニーリング効果で損傷が回復され、リーク電流*2は低下。
 1×10^3 時間経過時の結果では傾きが1/4程度に。

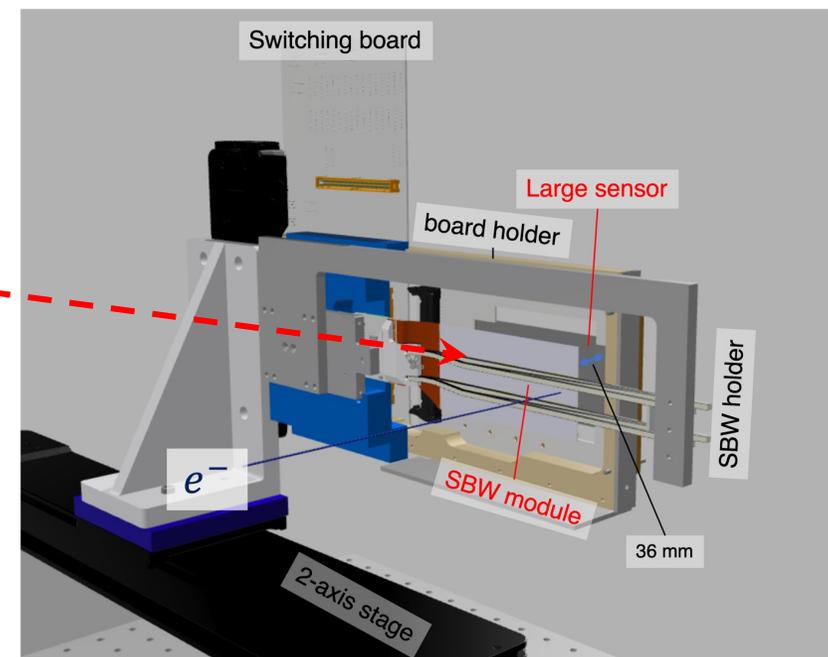
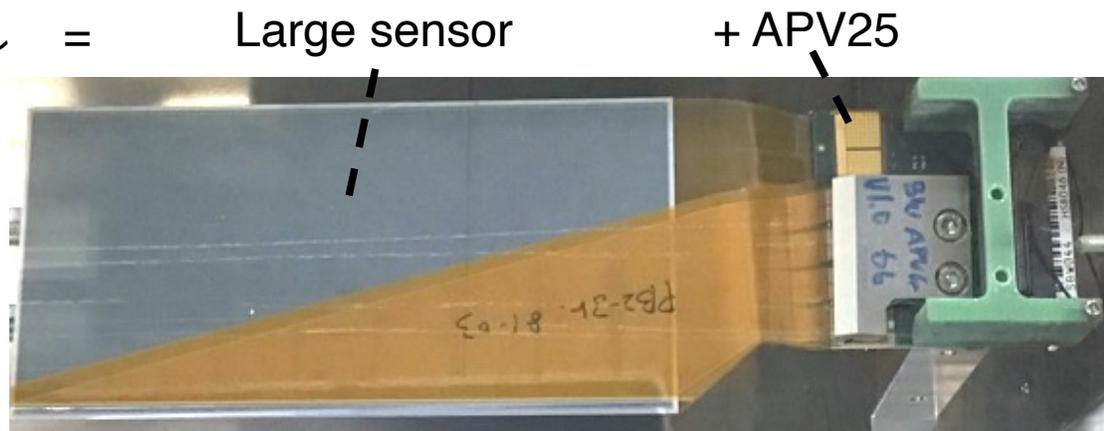


*体積 $4737.8 \times 0.032 \text{ cm}^3$ *2測定温度が 25°C であったため、 17°C に補正している

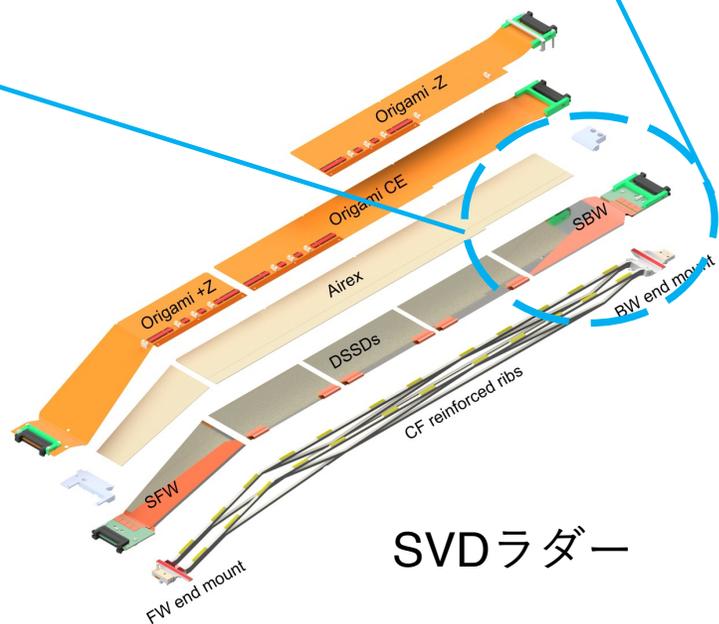
$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 \exp\left[-\frac{1}{2k_B} \left(\frac{E_g(T)}{T} - \frac{E_g(T_0)}{T_0}\right)\right]$$

読み出しモジュール を使用した測定

信号読み出し
モジュール



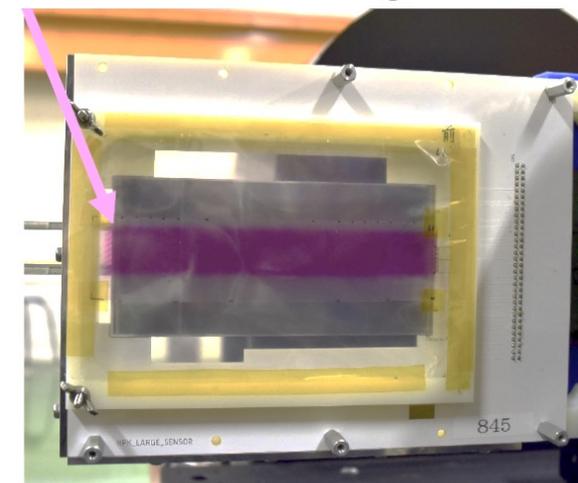
- 信号読み出しモジュールはラダーの一部
主にLarge sensorとAPV25から構成、信号読み出し可能
→ ノイズや電荷収集効率の測定が可能
- 照射試験ではLarge845と相乗
照射線量：100 kGy
照射範囲：P側ストリップに平行した幅16 mmの領域

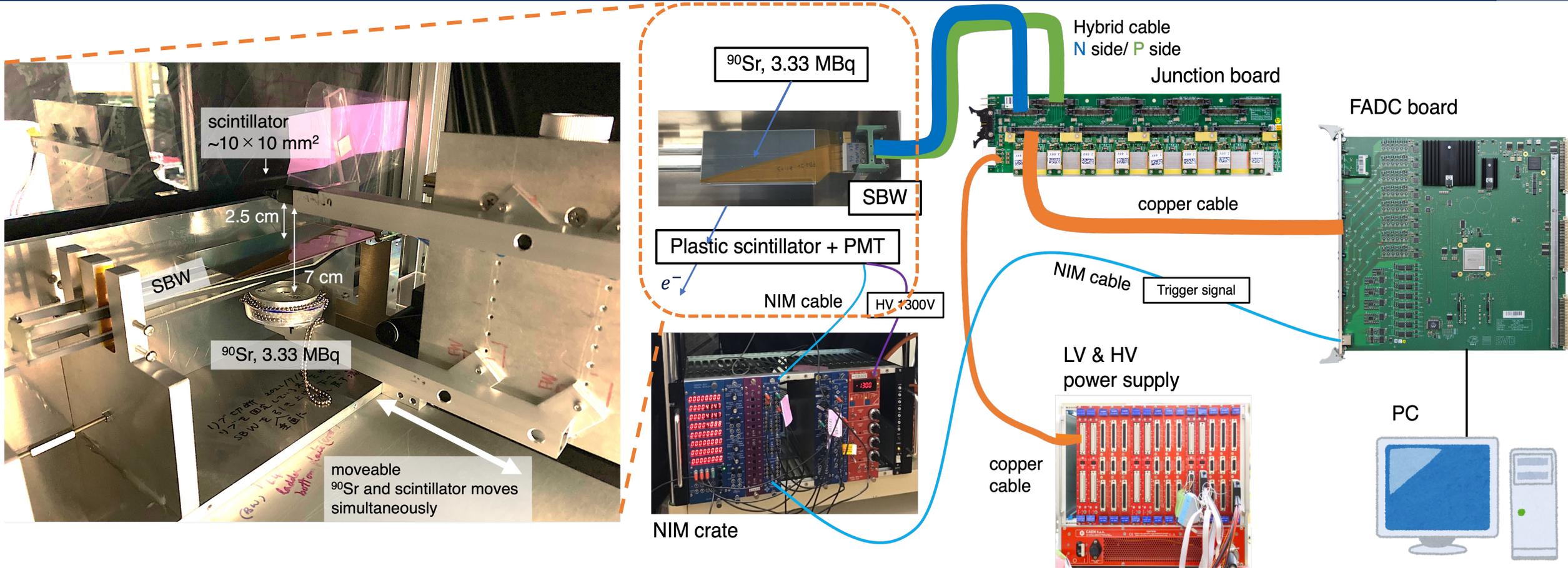


SVDラダー

照射範囲

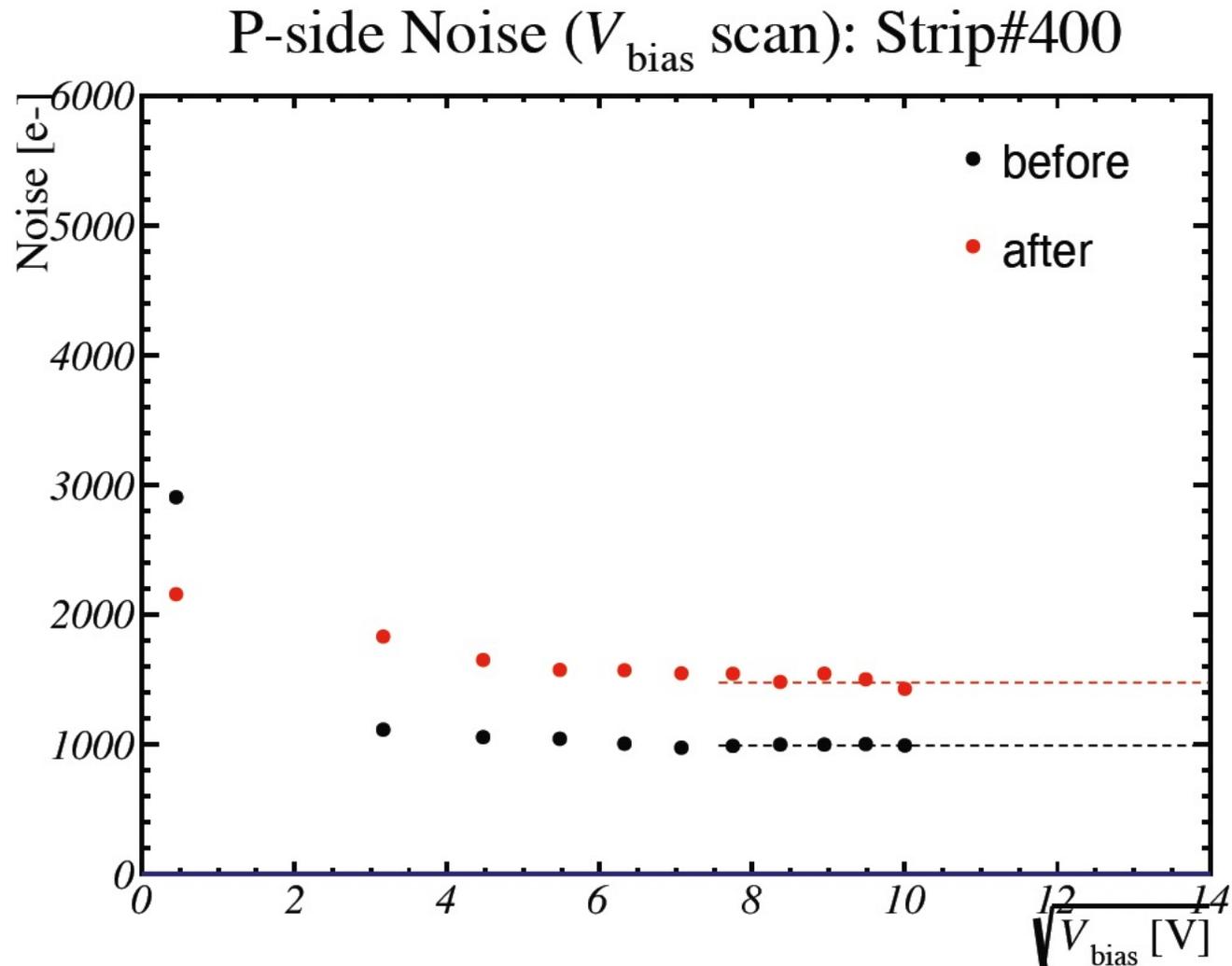
large sensor





- このセットアップでNoiseデータ取得、β線センサー通過時に発生する信号の収集が可能
- 放射線源：β線源; ⁹⁰Sr 3.3 MBq
- プラスチックシンチレータ + PMT → NIMモジュールを介して、トリガー信号をFADCに
- トリガーレートを ~ 150 HzになるようにNIMモジュールで調整

- HV = 100 Vに注目
- 照射された領域ではnoiseが $400e^-$ 程度増加。
 - 照射前： $1000 e^-$
 - 照射後： $1400 e^-$
- 照射されていない領域では変化がほとんどない

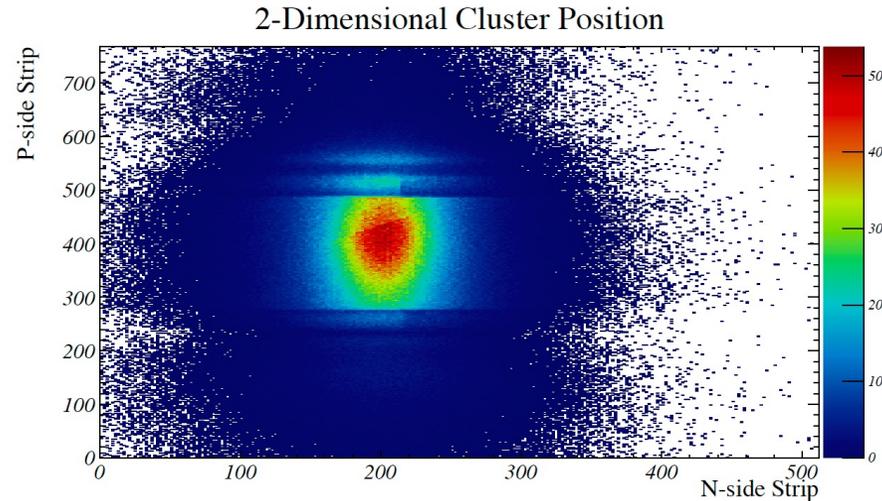
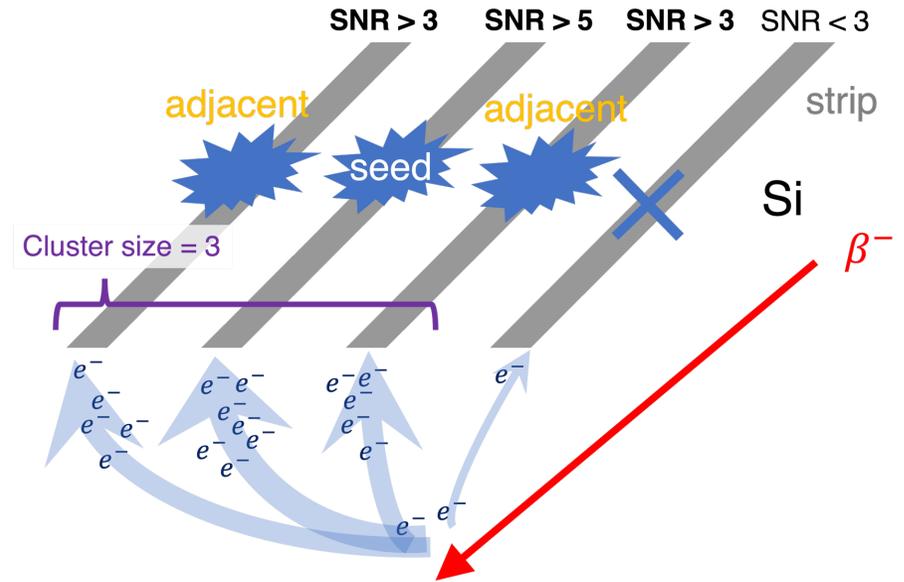


■ Noiseとsignalを識別するために、以下のようにclusterを探することで、粒子の通過を検知する

1. Signal-to-Noise Ration (SNR) > 5となるストリップ
2. その両隣からSNR > 3となるストリップを探す
3. これに適合する集団全体がclusterとなる

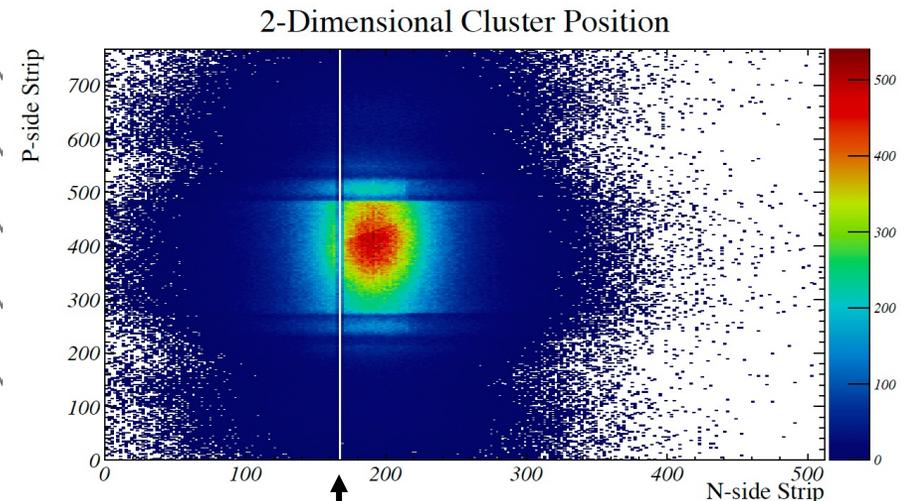
- Cluster charge = cluster内で収集された電荷量
- Cluster size = cluster内のストリップ数

■ 放射線源とSBWの相対位置は照射前後でほぼ同じ、実際の線源位置とconsistent



(a) before irradiation

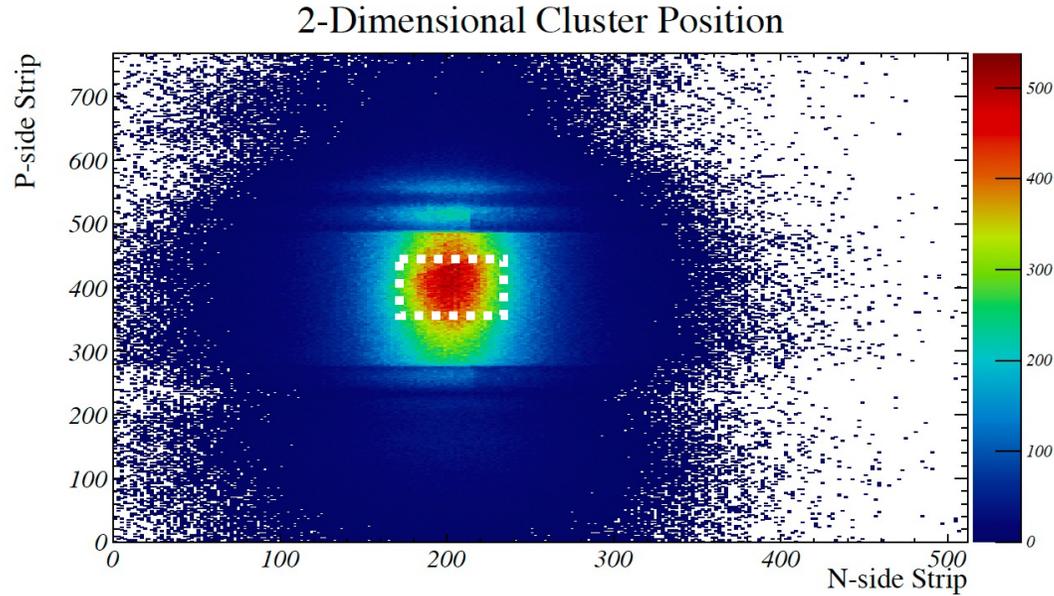
照射前



(b) after irradiation

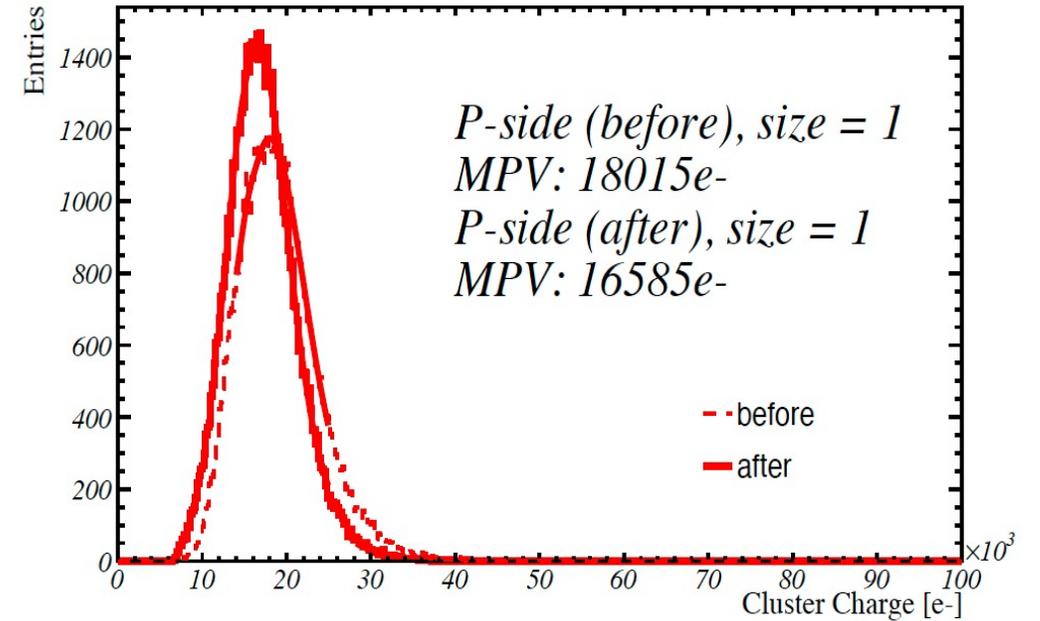
Noisy channel

照射後



(a) before irradiation

- HV = 100 V
- ベータ線が垂直に入射される領域を選んだ
- Cluster size = 1とAll clustersの分布ピークは照射後、電荷の低い方が移動、他のcluster sizeでの分布ピークに違いがほとんどない
- Cluster size = 1とAll clustersに注目



- Smearred landau fitting → 最頻値 (MPV)
- 照射前後のMPVの変化

Cluster size	MPV (before) [e^-]	MPV (after) [e^-]
1	18015	16585
all	20068	19085

- 各HV stepで300 k-events取得
- HV全体的にMPVは照射後減少
- 照射前HV=100 Vと照射後HV=160 VのMVPを比較：
~500e⁻程度の差 (~3%程度)

- Cluster SNR =

$$\text{Signal} / \sqrt{\sum_{\text{cluster}} \text{Noise}^2}, \text{Signal} = \text{MPV}$$

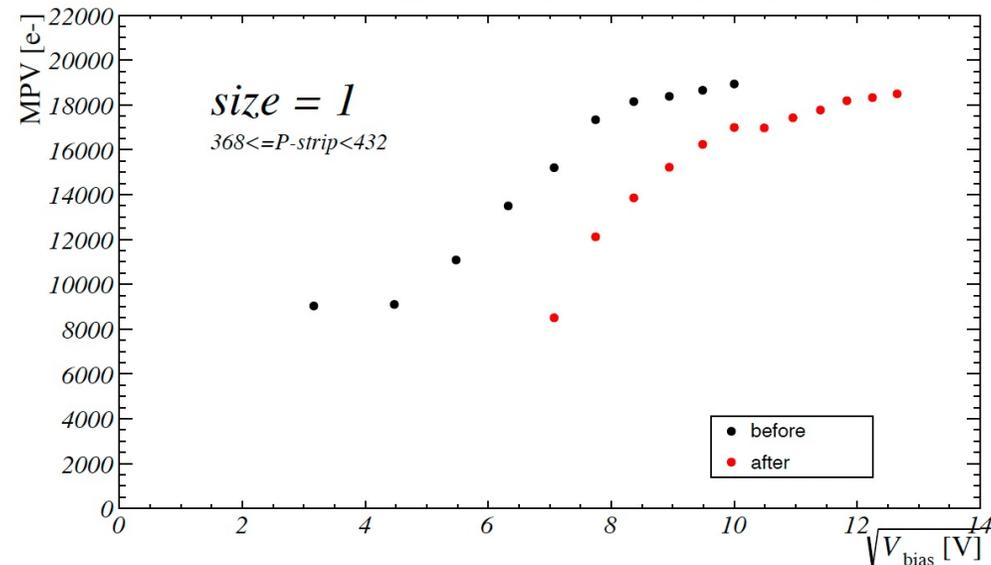
- 照射後のCluster size = 1の cluster SNRを考える
(HV = 160 V)

cluster SNR_{size=1} ~ 14 > 10

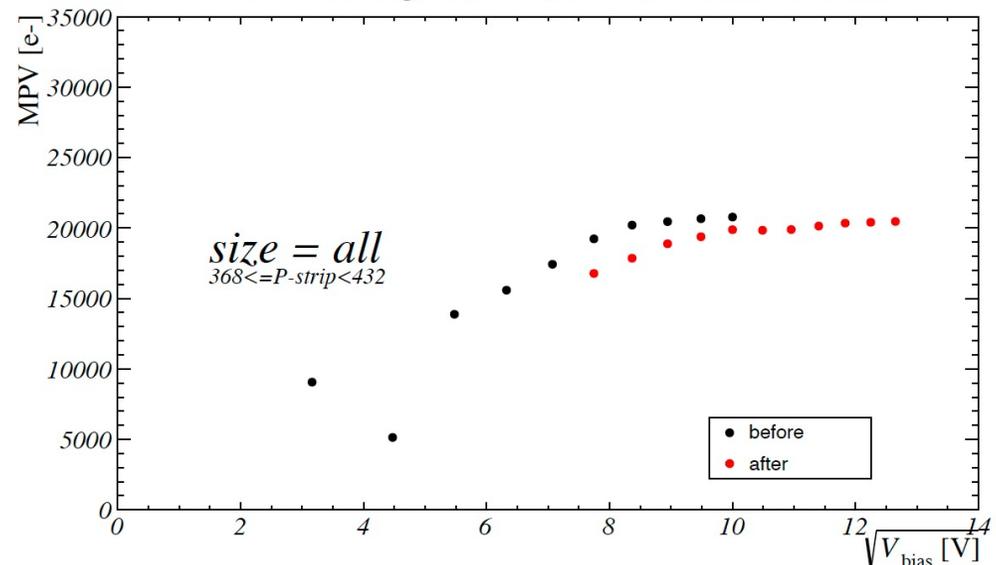
100 kGy ⇔ 3 × 10¹³ n_{eq}/cm² (> safety factor 3)

照射でもSNR > 10を満たす

P-side Charge MPV (Smearred Landau Fit)



P-side Charge MPV (Smearred Landau Fit)



- 最内層SVDの10年間の放射線量はTID: ~20 kGy, equivalent neutron fluence ~ 6×10^{12} n_{eq}/cm²と推定
@目標ルミノシティ 6×10^{35} /cm²/s
- safety factor 3 (TID: ~60 kGy, equivalent neutron fluence ~ 2×10^{13} n_{eq}/cm²)でSVDが問題なく運転可能かを検討する
- miniセンサー10枚を90 MeV電子線で照射し、開発した遠隔でIV, CV, C_{int}V測定を行えるシステムを用いてIV測定を行った
- 放射線量15 ~ 20 kGy , $4.5 \sim 7 \times 10^{12}$ n_{eq}/cm²でType inversionすることを確認

2 × 10 ¹² n _{eq} /cm ² での	条件	測定値	safety factor 3
全空乏化電圧 V _{FD} の増大	V _{FD} < 200 V	V _{FD} ~ 100 V	○
リーク電流増大	許容電流 10 mA → 単位体積あたり I < 940 uA/cm ³	I ~ 800 uA/cm ³	○
SNRの悪化	SNR > 10	SNR ~14 @HV=160 V	○

- V_{FD}とリーク電流はアニーリング効果で損傷が回復し、それぞれの値は低下
- SVDは目標ルミノシティでの10年間運転で受ける放射線のSafety factor 3倍の放射線を受けても、SVDの運転が可能

早

酒

$$N_{\text{eff}}(\Phi) = N_D e^{-c\Phi} - \beta\Phi$$

$$V_{\text{FD}}(\Phi) = \frac{e|N_{\text{eff}}(\Phi)|}{2\epsilon_{\text{Si}}} d_{\text{sensor}}^2 \quad .$$

- Si結晶格子の熱振動によって、時間経過することで放射線損傷が回復することがある（アニーリング効果）
- アニーリング効果の進行は温度に依存する
- 照射物の保管温度を確認
- 異常な温度変化は見られない
 - 17 ~ 20 °C@ELPH
 - 23 ~ 27 °C@KEK

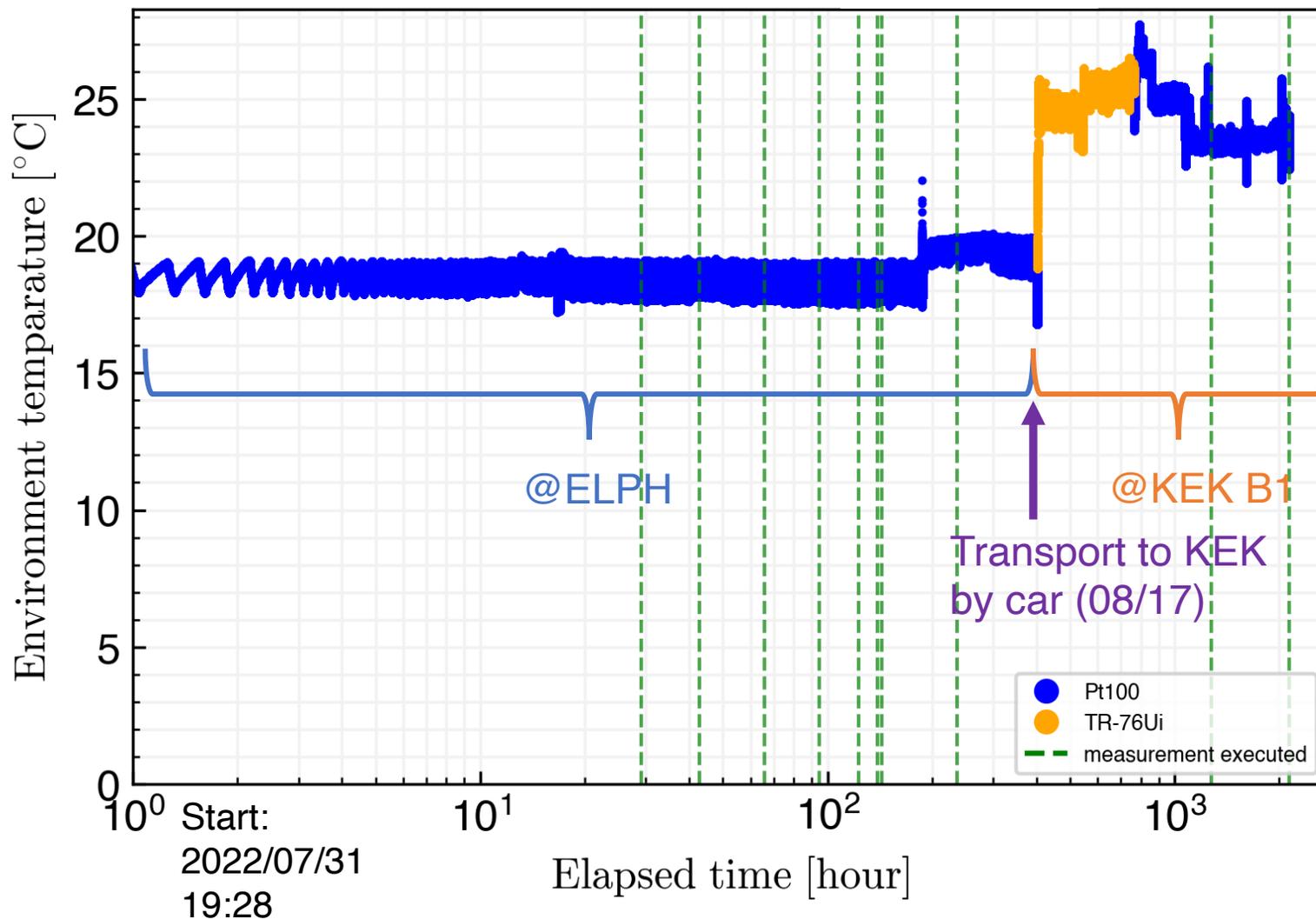
Thermometer :

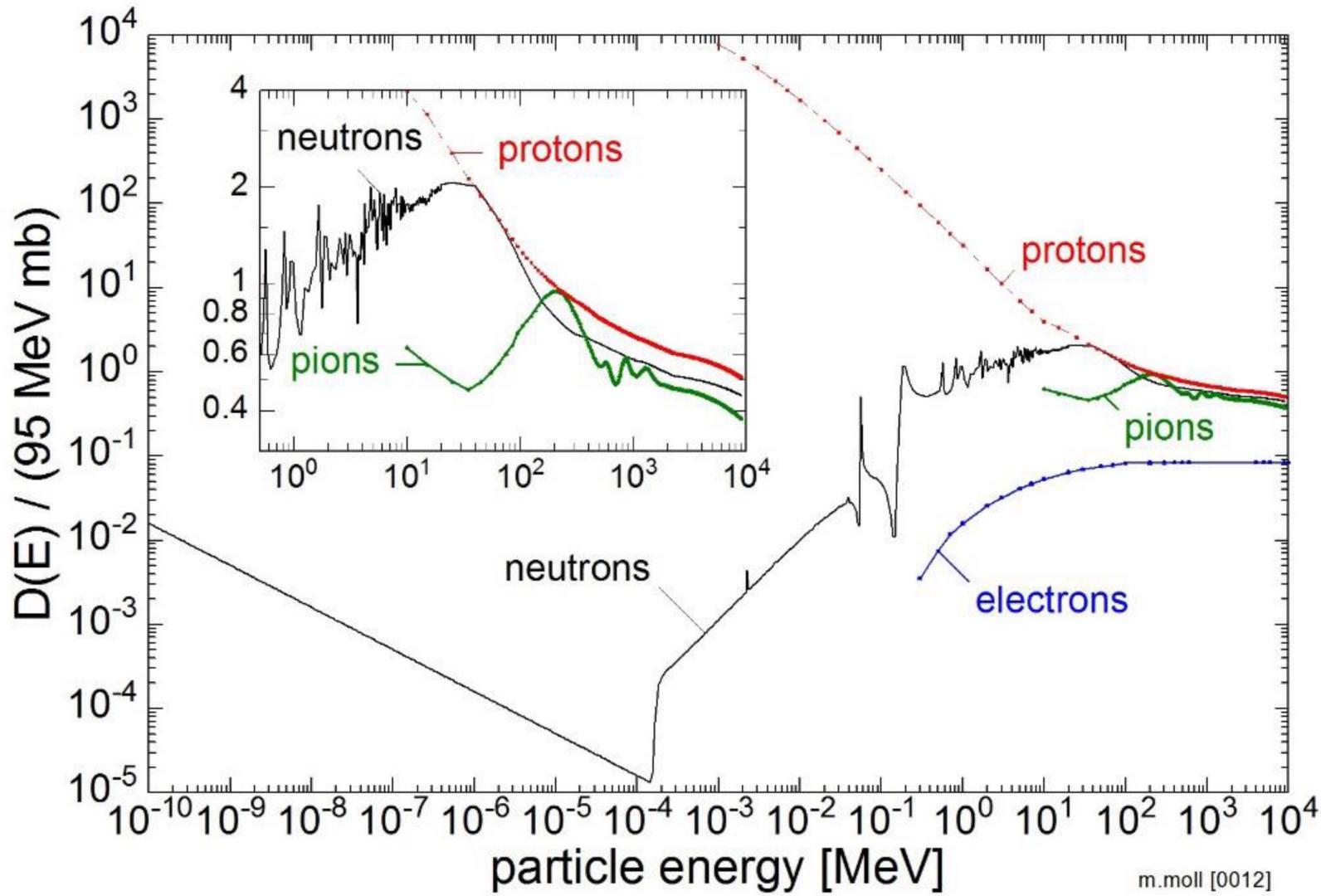


Pt100



TR-76Ui

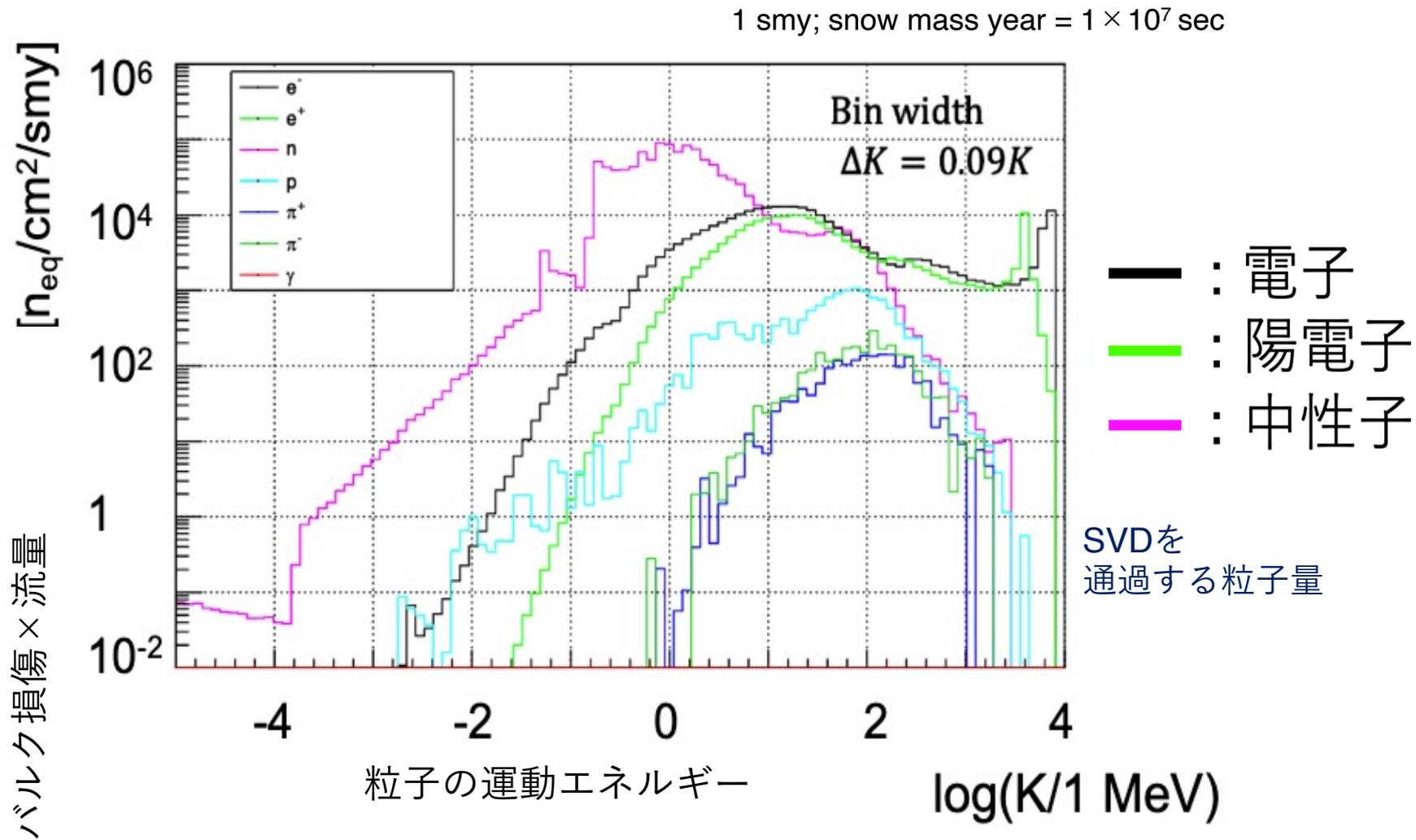


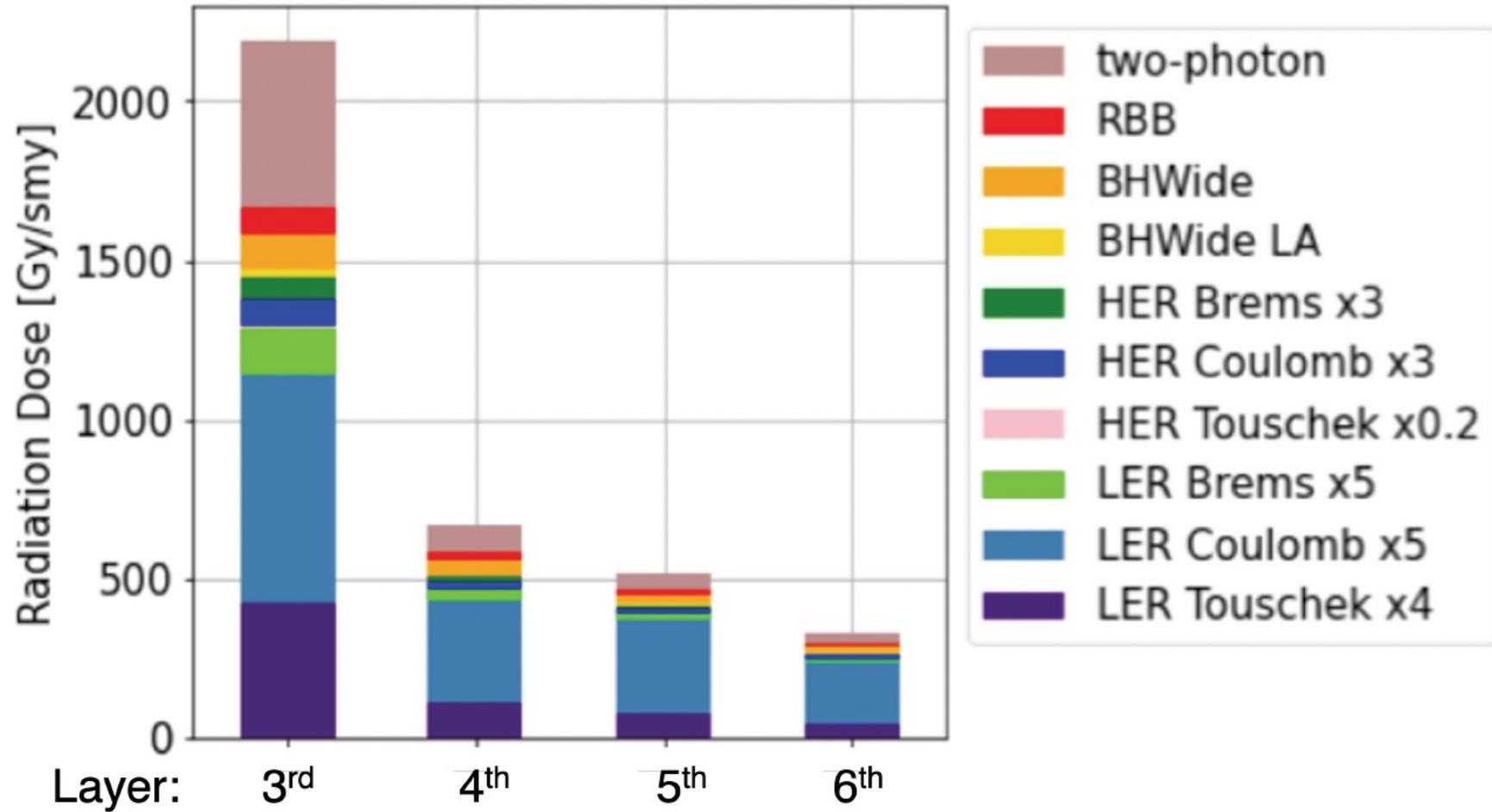


$$NIEL = f_{NIEL} \times I/e \text{ [n}_{eq}\text{/sec]}$$

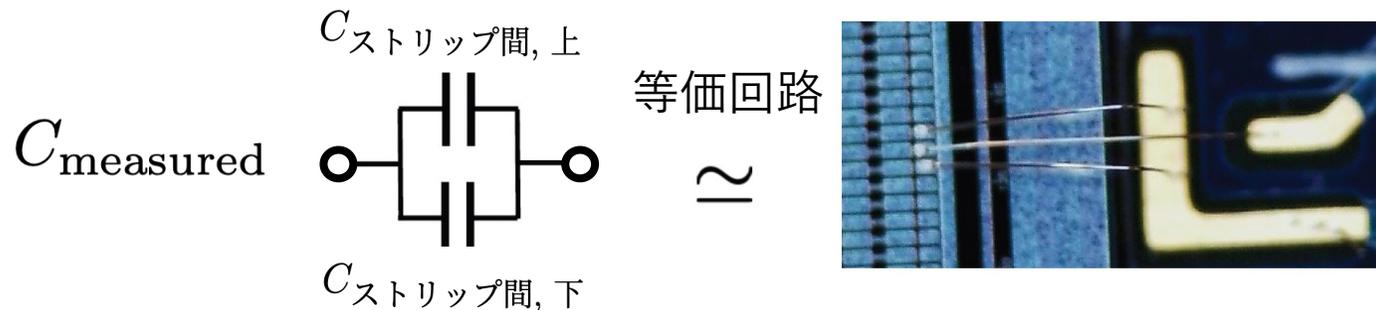
$$TID = \frac{dE}{dx} \times \frac{I}{S_{irrad}} \text{ [kGy/sec]}$$

neutron = 1.1e6
 electron = 2.6e5
 positron = 1.7e5
 proton = 1.4e4
 piplus = 1.7e3
 piminus = 2.4e3
 photon = 0





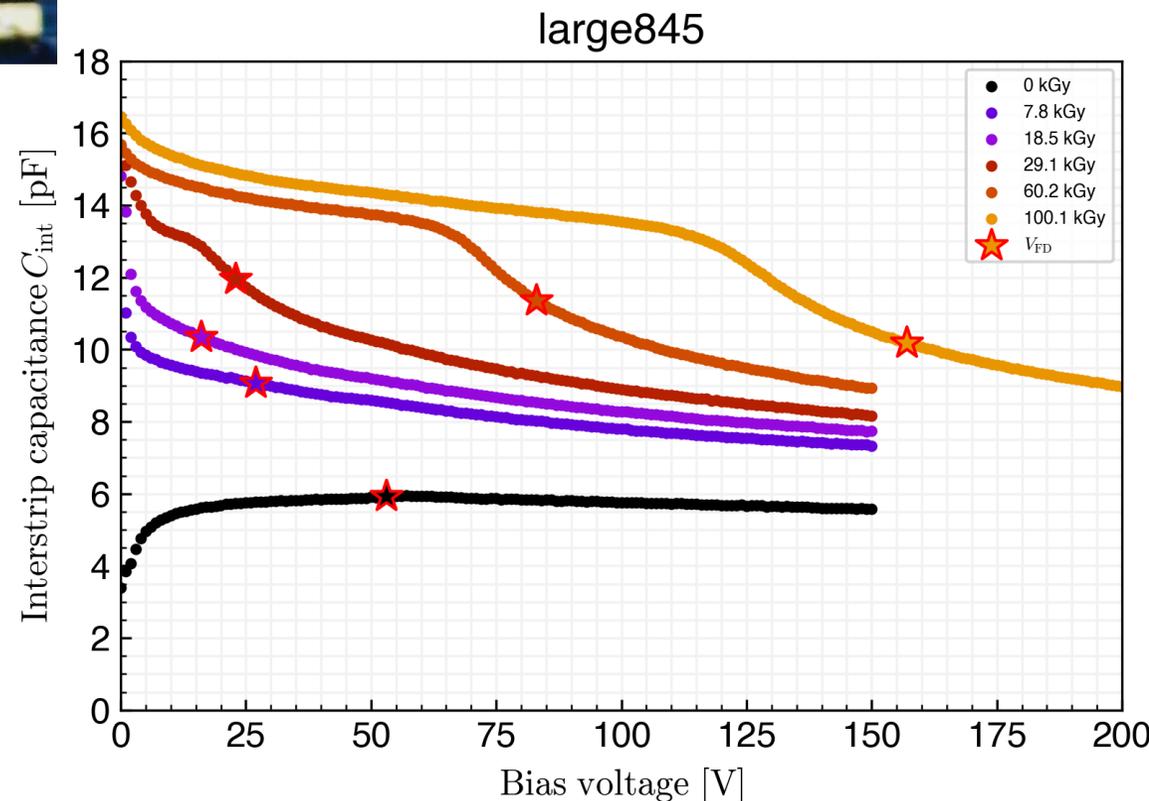
- この測定では1つの中央のストリップとその両隣2つのストリップ間のキャパシタンスを測定して、その平均を C_{int} と定義； $C_{int} \equiv C_{measured}/2$

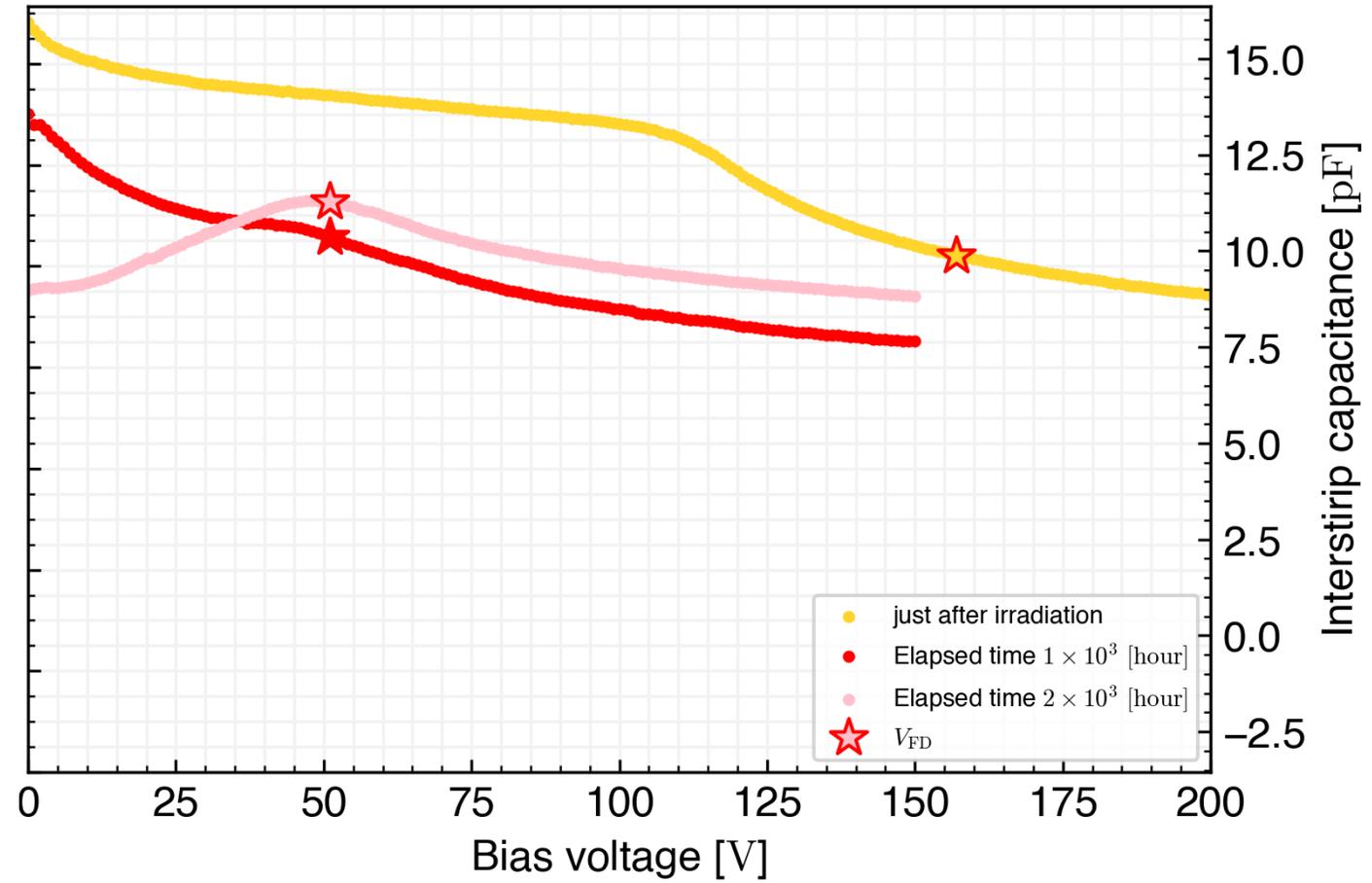


- 照射前と比較して、Type inversion後の V_{FD} での C_{int} は約2倍となった

- 照射前: ~ 6 pF
- 7.8 kGy : ~ 9 pF
- Type inversion: ~ 12 pF

- 一方、 V_{FD} を超えて電圧をかけることで、約9 pF程度に減らすことができる。

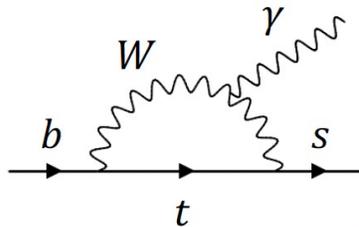




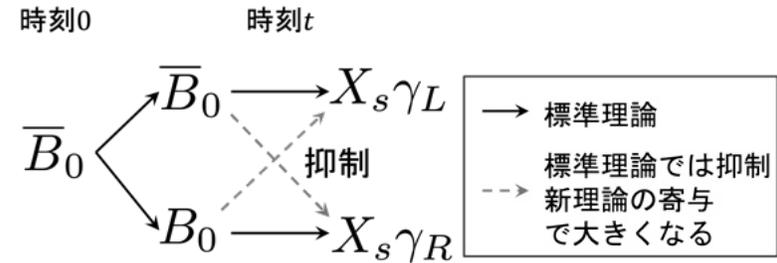
- 現在の素粒子の標準理論は非常に良く
 今までの素粒子実験の結果を説明できているが、
 まだ説明できない現象も多く存在する

➔ 標準理論を超えたより多くの現象を
 説明できる新理論が必要である

- $b \rightarrow s\gamma$ を含む崩壊; $B \rightarrow K_s\pi^0\gamma, K_s\rho^0\gamma...$
 - 終状態の光子の偏極に注目する



- SMでは $b \rightarrow s$ に変化するには W boson を介した 1 loop が必要 → Parity の破れが γ の偏極に現れる



X_s : s クォークを含む粒子
 (今回は共鳴状態 K_{res})

- B と \bar{B} の崩壊はそれぞれ独立しているため、
 CP対称性は保たれるはず → CP非対称度は
 Suppressされる

- 例えば、 $B \rightarrow K_s\pi^0\gamma$ では、
P. Ball et al, Phys. Rev., D75, 054004 (2007)
 CP非対称度 $S_{CP} \cong -0.023 \pm 0.016$
 と予測されている。

➔ 新物理の寄与があれば、この値から測定値はズレる

Belle II実験

■ Belle II実験 = Belle II 検出器 + SuperKEKB加速器

■ SuperKEKB: 大量なB中間子を生成
 Belle II検出器: 生成されたB中間子の崩壊を記録
 → 大量な $b \rightarrow s\gamma$ 過程を観測できる (精密測定)

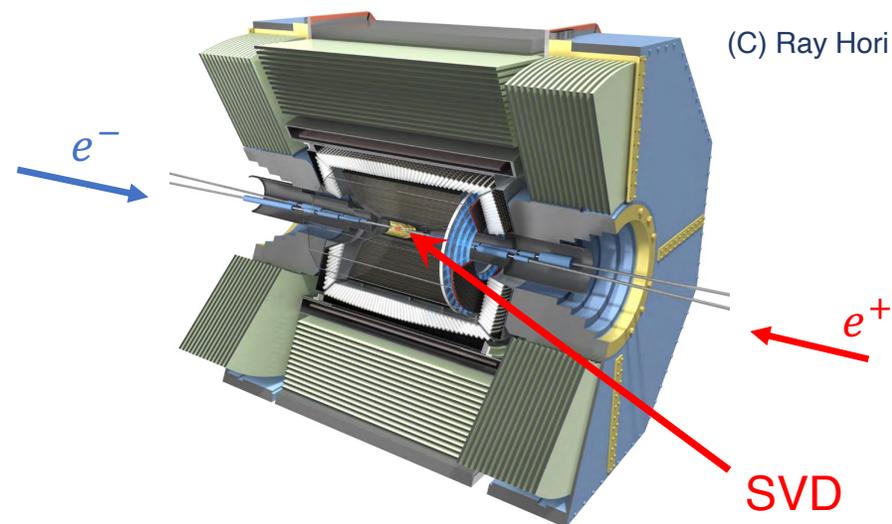
■ CP非対称度測定

Time Dependent CP Violation (TDCPV) 解析
 で測定

- 時間依存崩壊幅 $\Gamma_{B^0 \rightarrow X_s^{CP} \gamma}(t)$ を測定
- CP非対称度は時間依存崩壊振幅から理論的に次のような式になる

$$\begin{aligned} \text{Asym.} &= \frac{\Gamma_{\bar{B}^0 \rightarrow X_s^{CP} \gamma}(t) - \Gamma_{B^0 \rightarrow X_s^{CP} \gamma}(t)}{\Gamma_{\bar{B}^0 \rightarrow X_s^{CP} \gamma}(t) + \Gamma_{B^0 \rightarrow X_s^{CP} \gamma}(t)} \\ &= \mathcal{A}_{CP} \cos(\Delta mt) + \mathcal{S}_{CP} \sin(\Delta mt) \end{aligned}$$

Belle II検出器



■ 主に7つのサブ検出器で構成

- 崩壊点測定
- 飛跡検出
- 粒子識別... etc

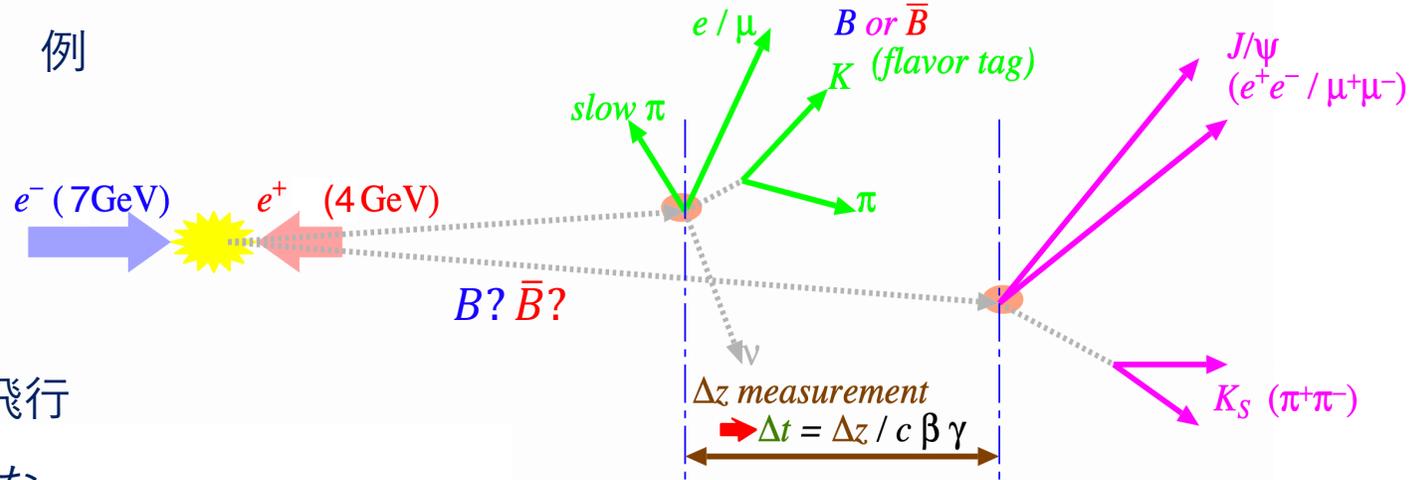
■ TDCPVではSilicon Vertex Detector (SVD)が重要

SVD: B中間子の崩壊点を再構成する
 ビーム衝突点付近に設置

→ $\Gamma_{B^0 \rightarrow X_s^{CP} \gamma}(t)$ の t を崩壊点から計算する

- Belle IIのFlagship、 Belleではこの方法で B 中間子のCP非対称性を測定し、小林益川両氏のノーベル賞受賞に貢献

- 生じた $B\bar{B}$ ペアは互いに入れ替わりながら飛行する。片方が崩壊するまで B or \bar{B} は定まらない → 片方のフレーバーが定まる (flavor tag) と、もう一方が定まる (CP side)



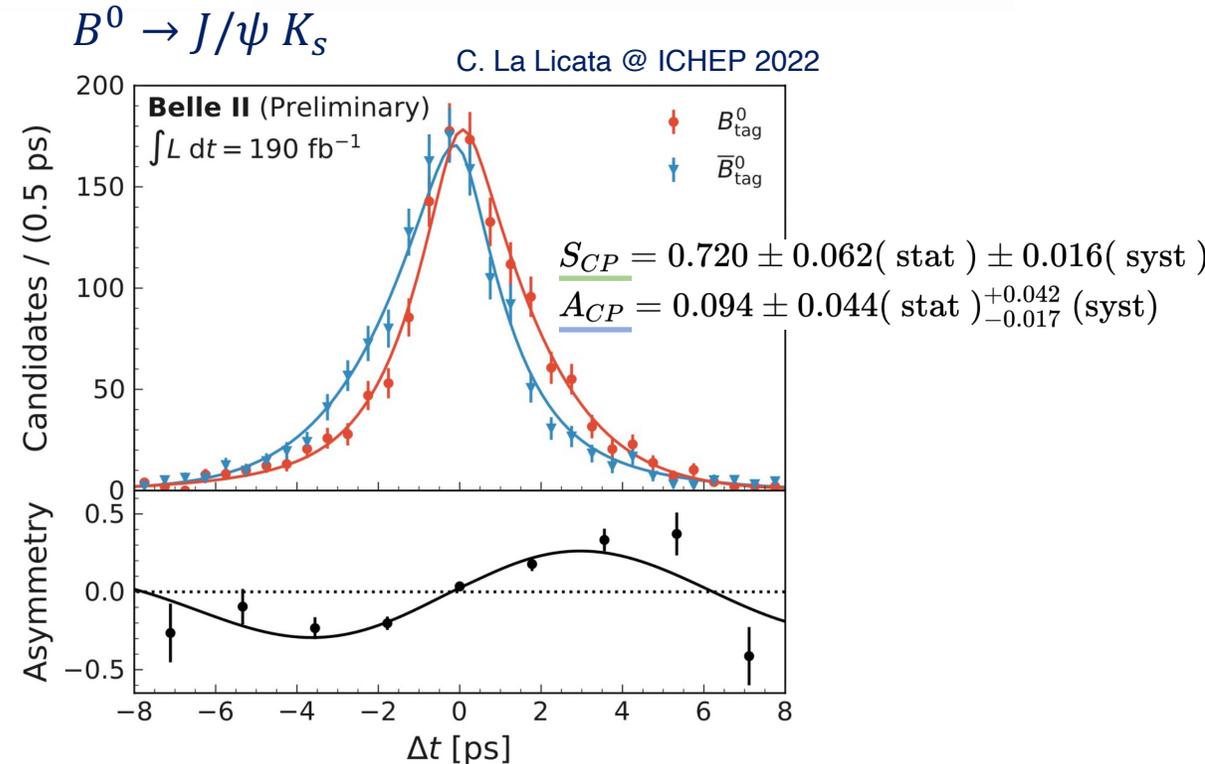
CP sideの崩壊時間差分布

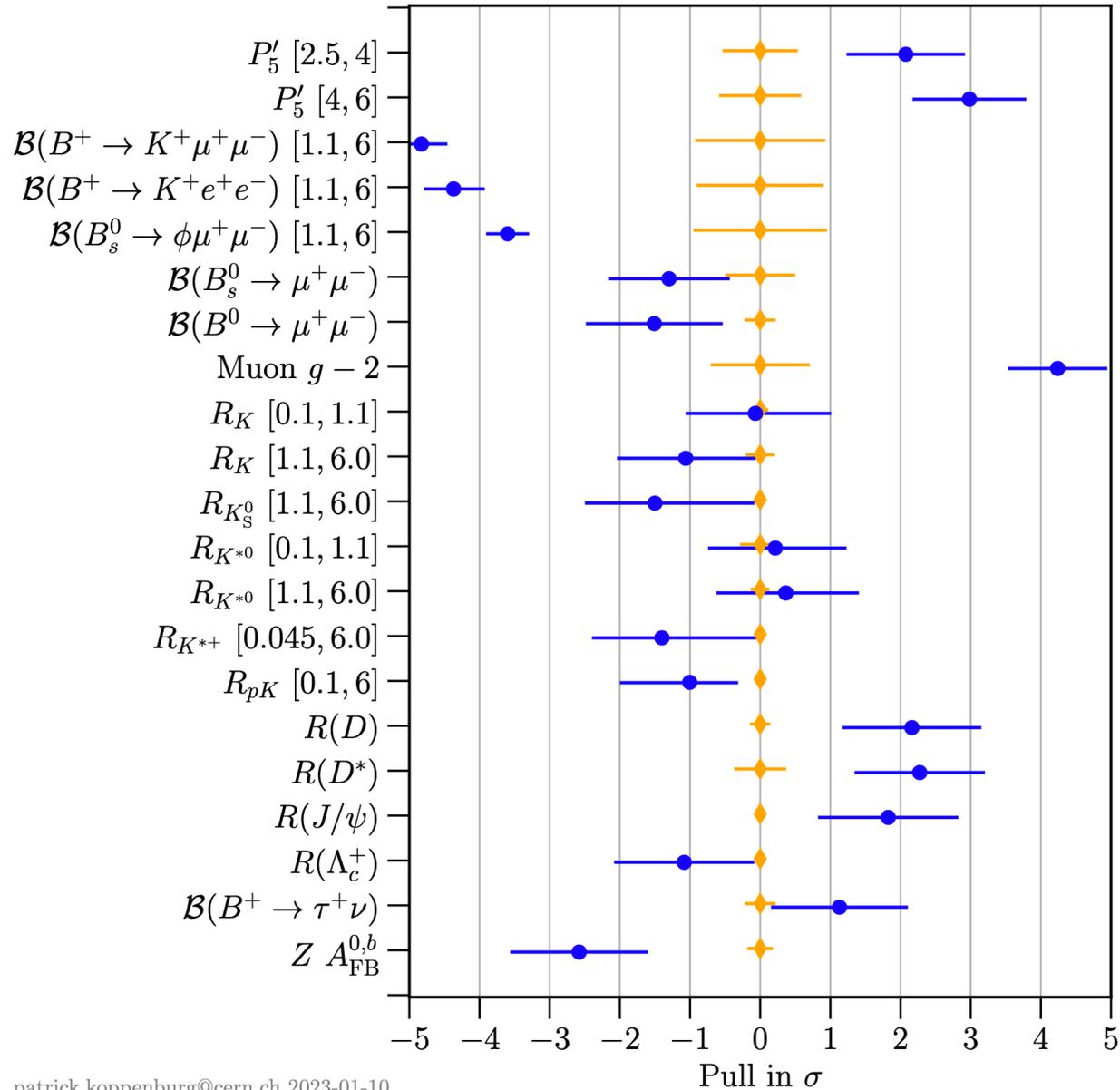
$$\mathcal{P}(\Delta t, q; \mathcal{S}, \mathcal{A}) = \frac{e^{-|\Delta t| \tau_{B^0}}}{4\tau_{B^0}} \{1 + q \cdot [\mathcal{S} \sin(\Delta m_d \Delta t) + \mathcal{A} \cos(\Delta m_d \Delta t)]\}$$

CP 非対称度

$$A(\Delta t) \equiv \frac{\mathcal{P}(\Delta t, +1; \mathcal{S}, \mathcal{A}) - \mathcal{P}(\Delta t, -1; \mathcal{S}, \mathcal{A})}{\mathcal{P}(\Delta t, +1; \mathcal{S}, \mathcal{A}) + \mathcal{P}(\Delta t, -1; \mathcal{S}, \mathcal{A})}$$

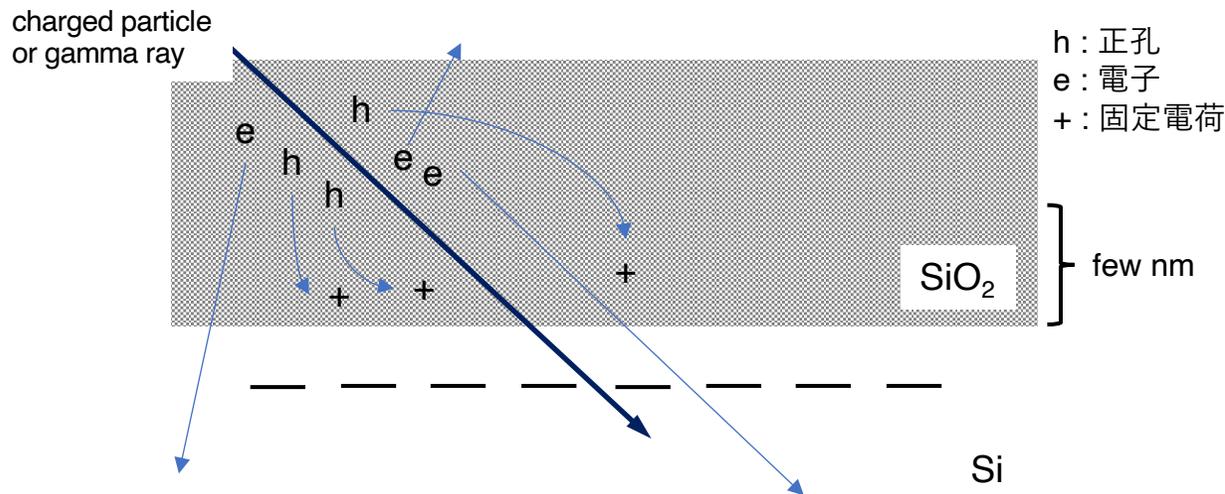
$$= \mathcal{S} \sin(\Delta m_d \Delta t) + \mathcal{A} \cos(\Delta m_d \Delta t)$$





By Patrick Koppenburg
<https://www.nikhef.nl/~pkoppenb/anomalies.html>

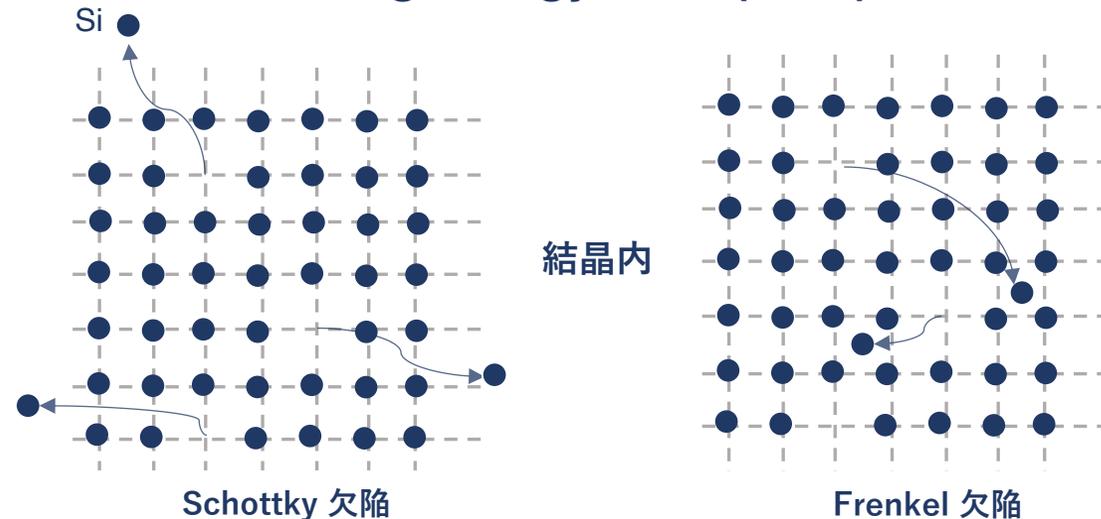
Total Ionization Dose (TID); 表面損傷



1. 放射線によってSiO₂で電子正孔生成が行われる。
2. 正孔はSi-SiO₂界面方向へ輸送され、界面付近で捕獲される。これが固定電荷となる。
3. これが元に新たな界面準位を生じ、**センサー表面の性質が変化**

★ センサー表面のストリップ間性質変化を調べる。

Non-Ionizing Energy Loss (NIEL); バルク損傷

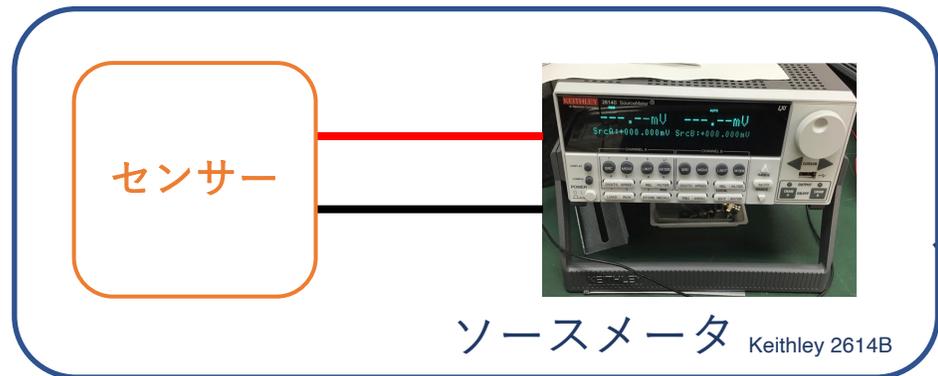


1. 放射線によってセンサーバルク層Si結晶中の原子が吹き飛ばされ、欠陥が生じる。
 2. 欠陥がP型不純物として振る舞う。
 3. N型バルク層がP型に変化する。(Type inversion)
- ☹ 全空乏化電圧(V_{FD})が変化、増大する。
- ☹ リーク電流増大 → ノイズ増大

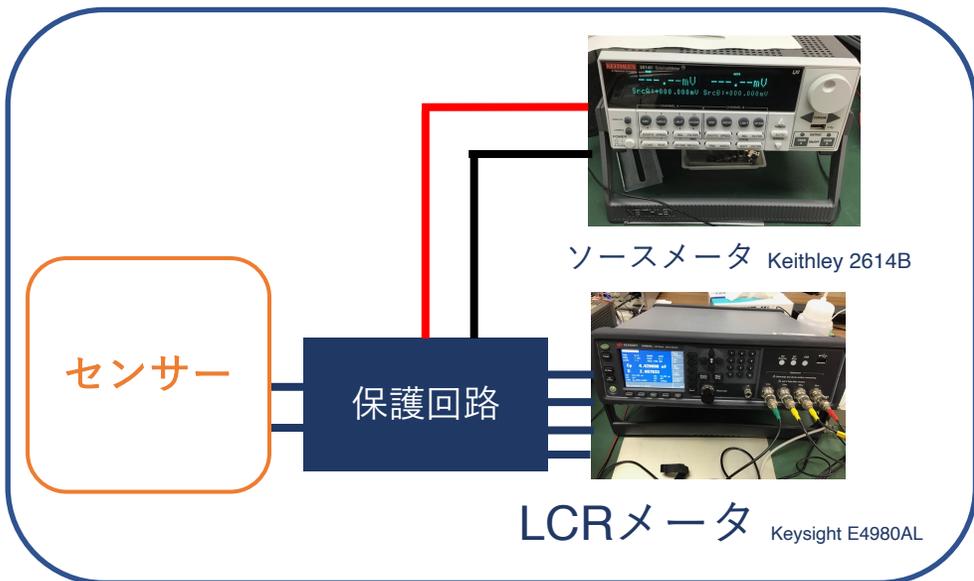
★ リーク電流、キャパシタンスから V_{FD} を調べる。

放射線損傷を調べるためにIV、CV、 C_{int} の測定システムを開発した

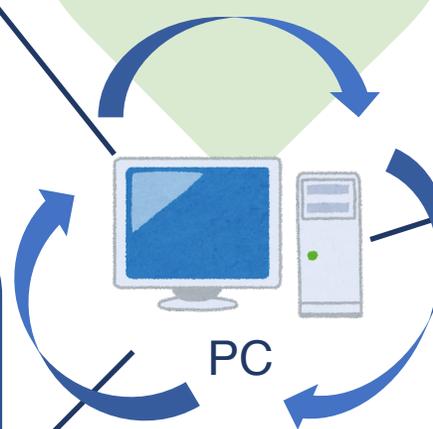
IV測定



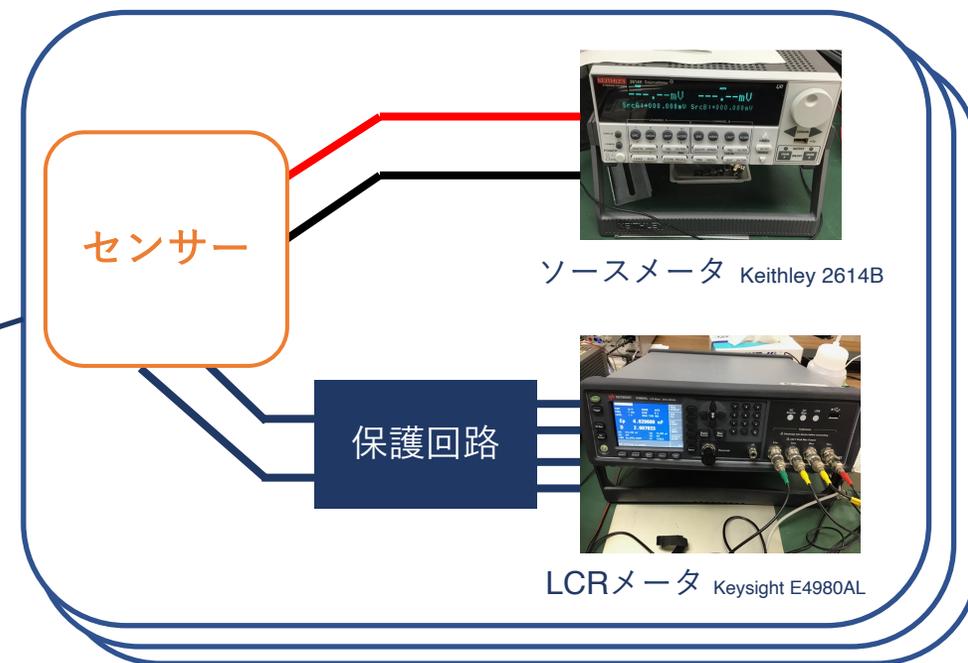
CV測定



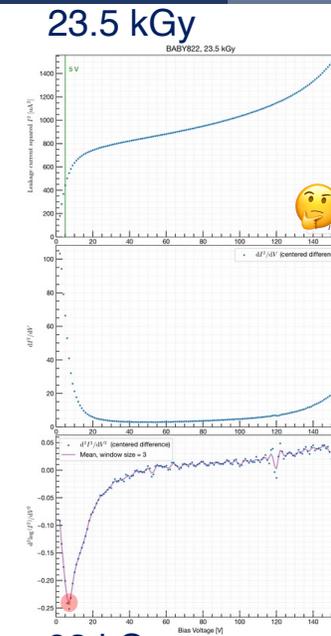
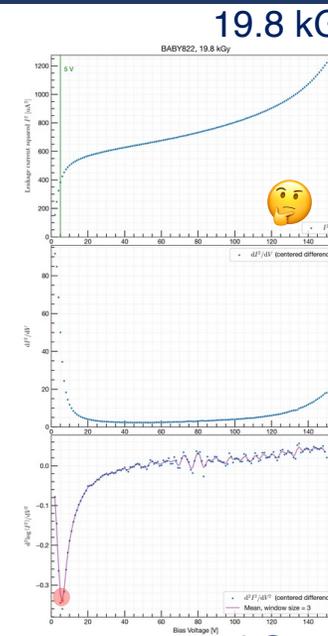
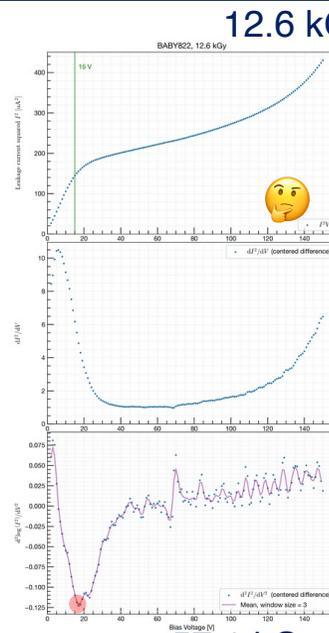
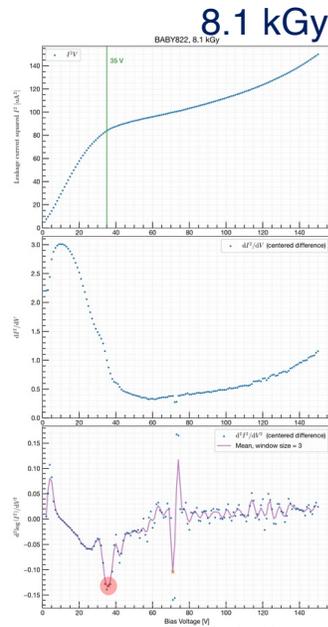
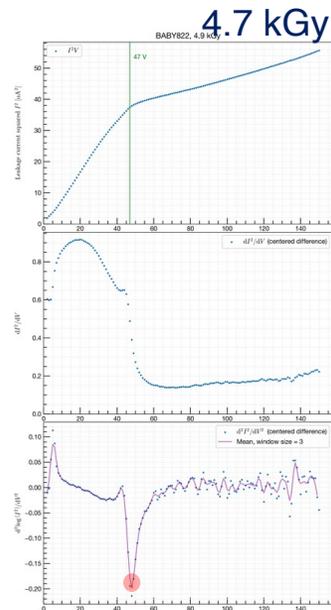
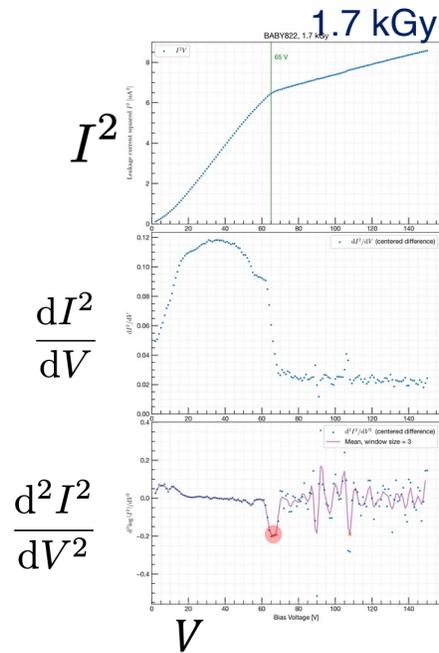
回路切替
データ取得
ソースメータ操作
LCRメータ操作
温度計測



C_{int} 測定 × チャンネル分



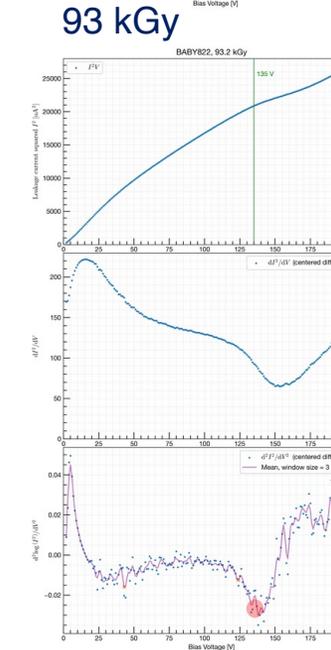
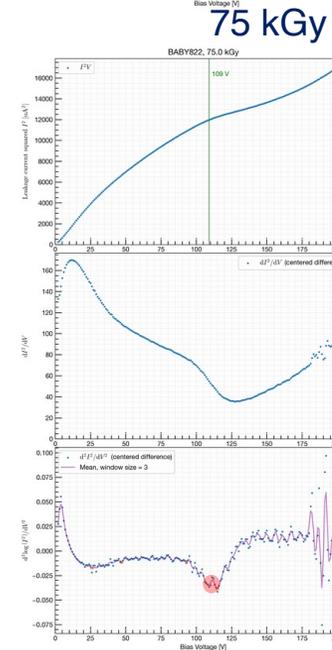
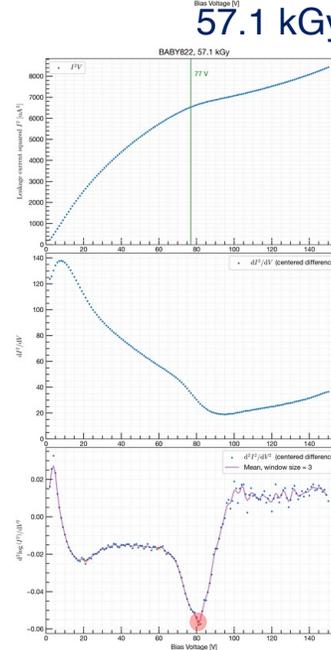
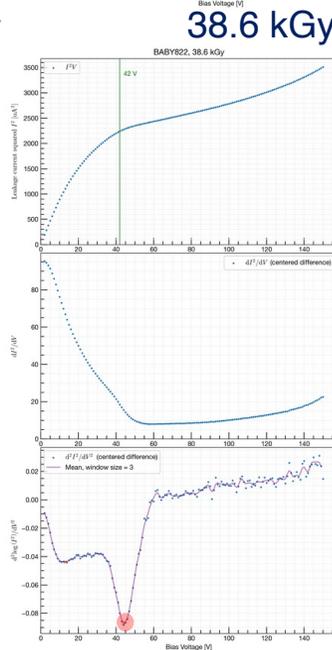
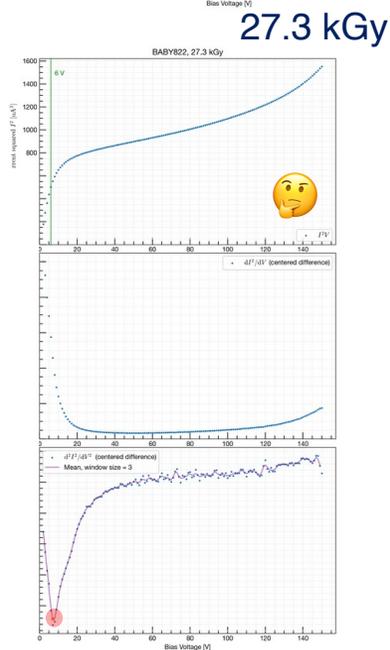
遠隔で測定回路の切替やIV、CV、 C_{int} の測定が可能のため、照射と測定を交互に行うことができた。



● :極小

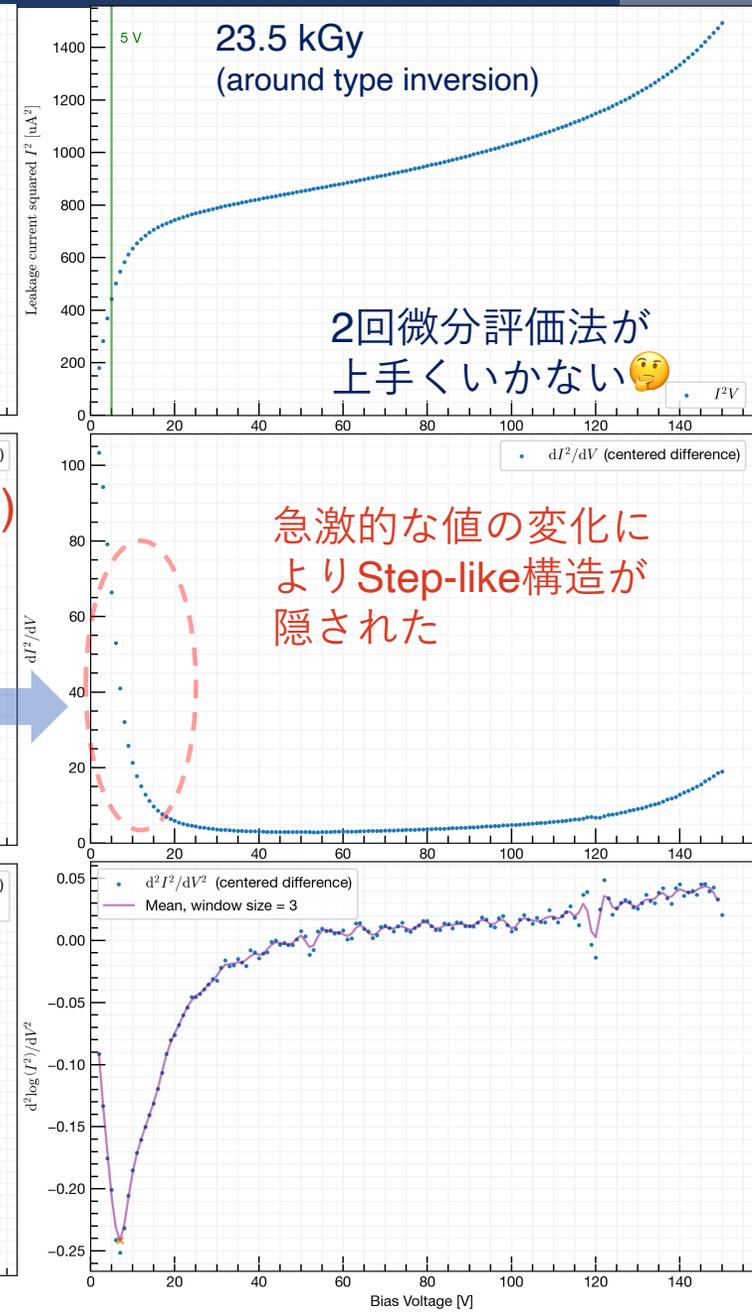
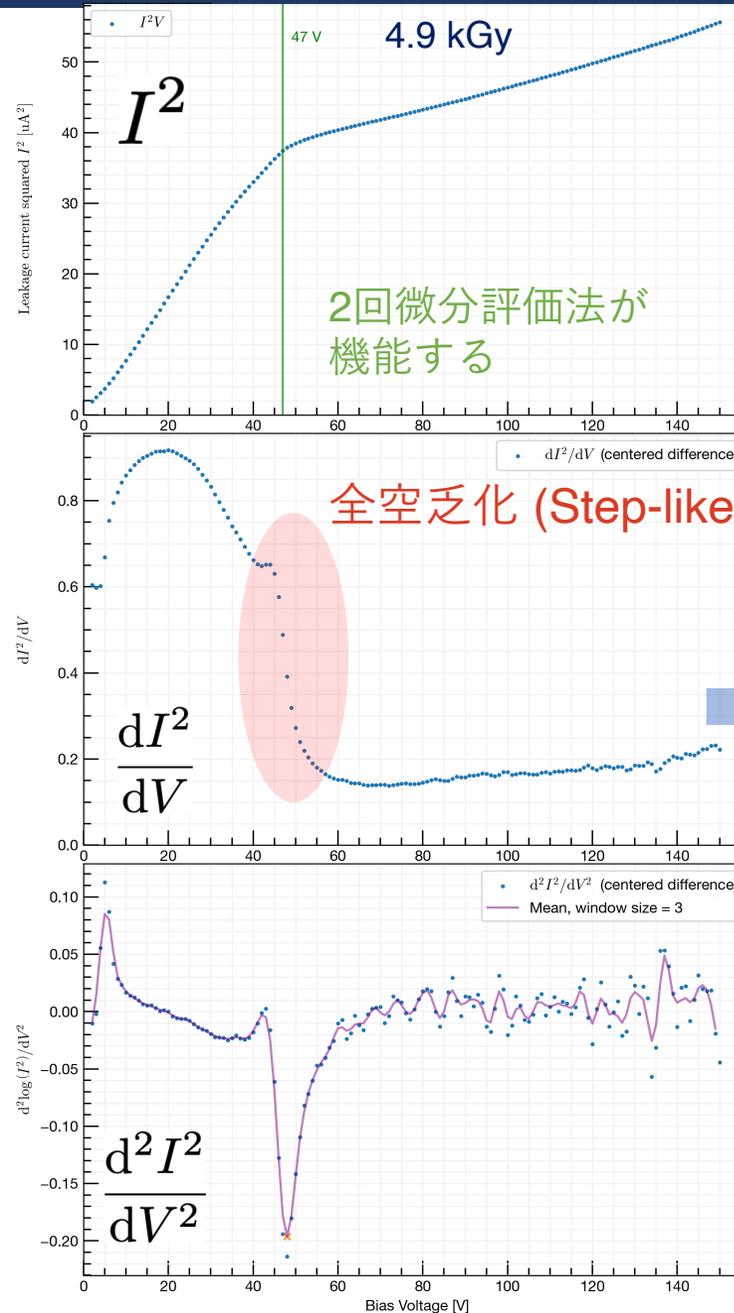
■ $V_{FD} > 25 \text{ V}$ 領域：
2回微分による評価法がIV曲線の遷移を良く評価できる

■ V_{FD} が低い領域：
2回微分による評価法では正しい遷移の位置から乖離する
Type inversion付近



- V_{FD} が低い領域では、全空乏化となるのが早いため、一次微分の値が早い段階で急激に変化し、本来評価すべきStep-likeな構造が隠された
→ 2回微分による評価法がうまく機能しない

- V_{FD} が低い領域 \cong Type inversion付近より正確なType inversionを把握するために、Type inversion付近での V_{FD} 評価法を恣意的でない方法で改良する



- 一次微分の値 (IVの傾き) に着目し、Type inversion付近の V_{FD} を定義する。
 - 2回微分評価法が機能する $V_{FD} > 25$ V 領域から外挿を行い、全空乏化を定義

- リーク電流の絶対値は放射線照射量によって異なるため、スケールする。

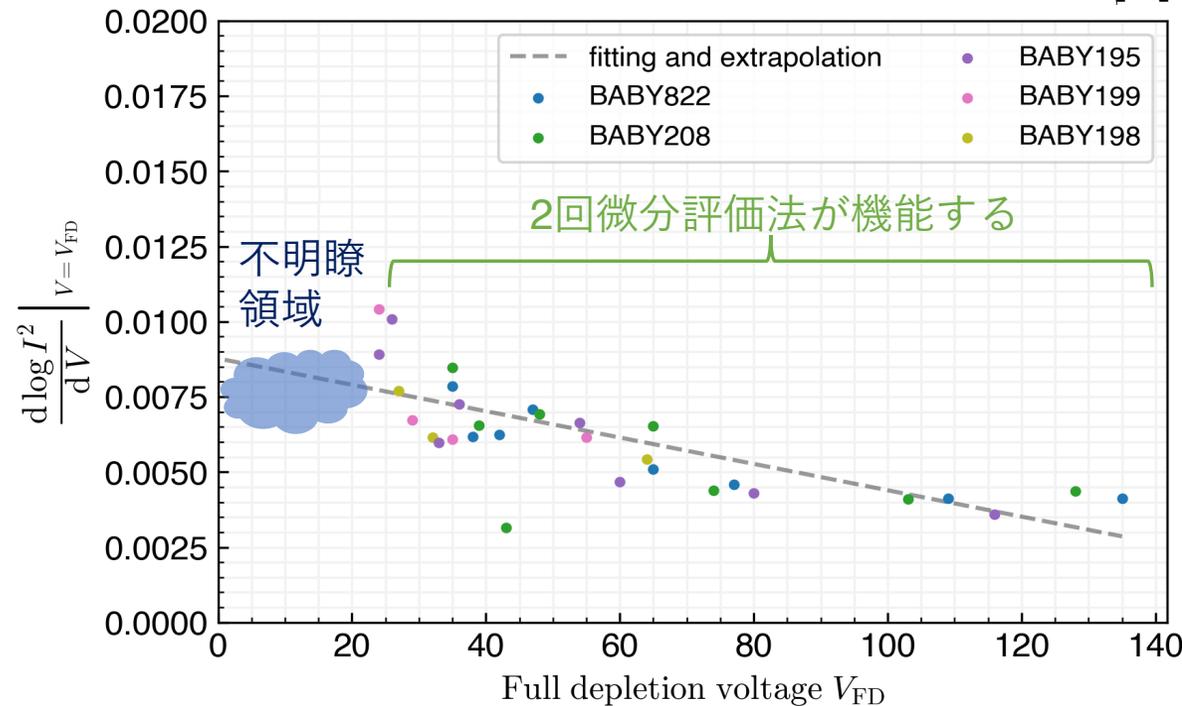
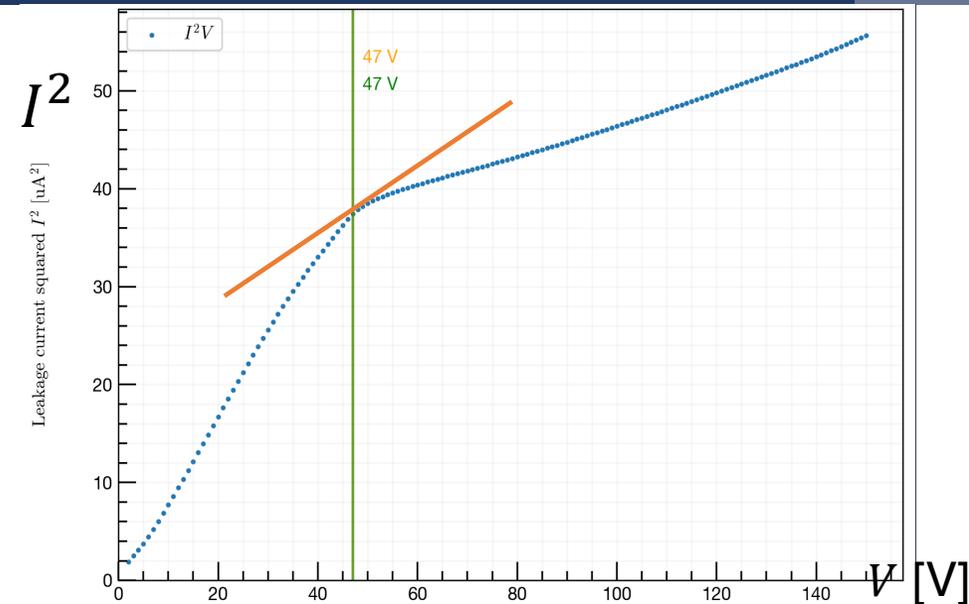
□ ここで

$$\underbrace{\frac{1}{I^2}}_{\text{Normalization}} \underbrace{\frac{dI^2}{dV}}_{\text{slope}} = \frac{d \log I^2}{dV}$$

を正規化された微分値に採用

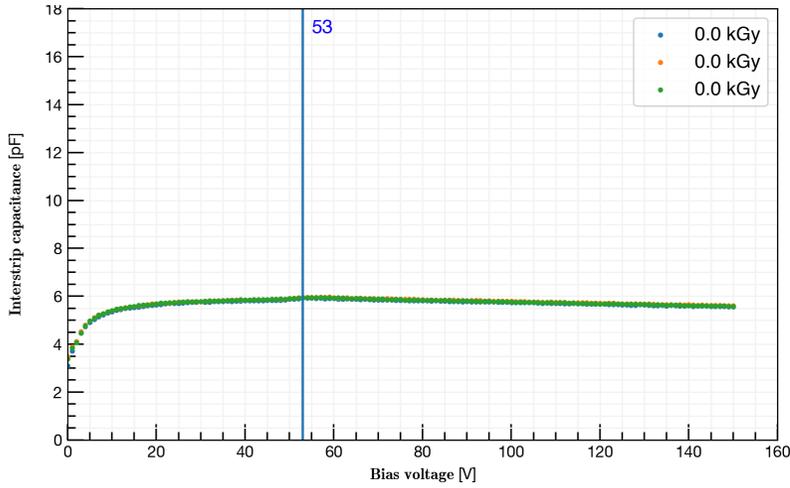
- V_{FD} の関数としての正規化された微分値の振る舞いは異なる全てのセンサー間にわたって**consistent**

- 複数のセンサーの測定結果を一次関数で線形近似し、その関数を使用して、**Type inversion**付近での **V_{FD}** を評価する

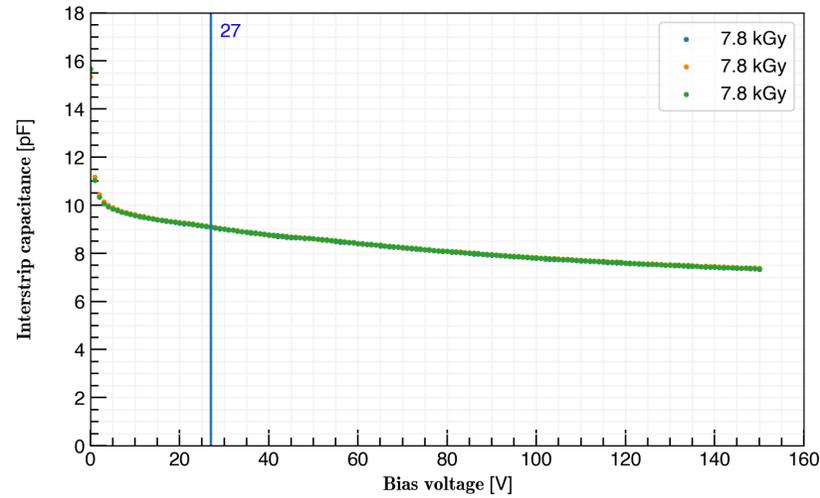


Blue vertex line is V_{FD}

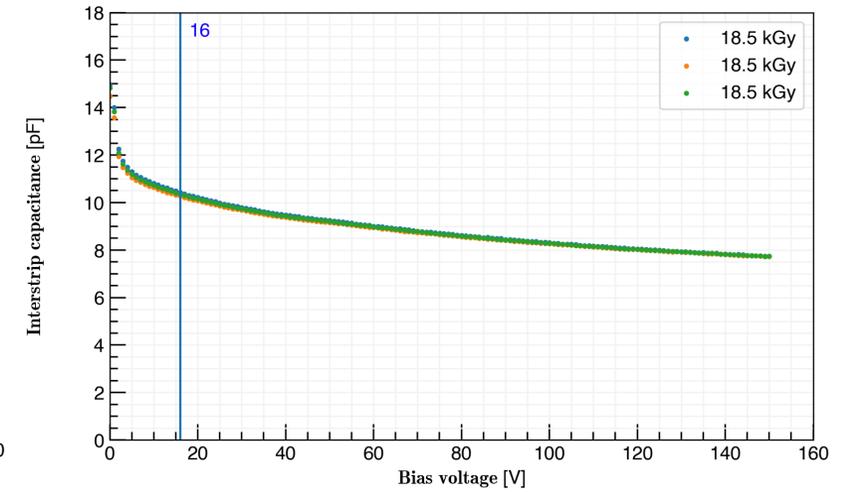
0 kGy



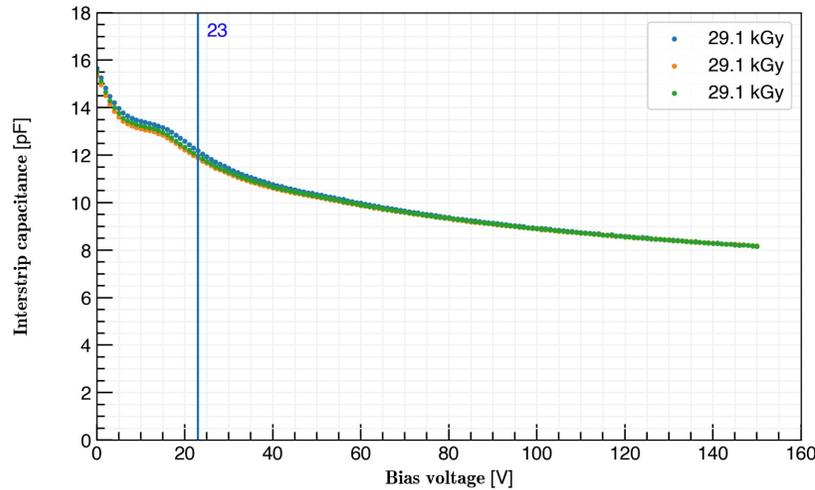
7.8 kGy



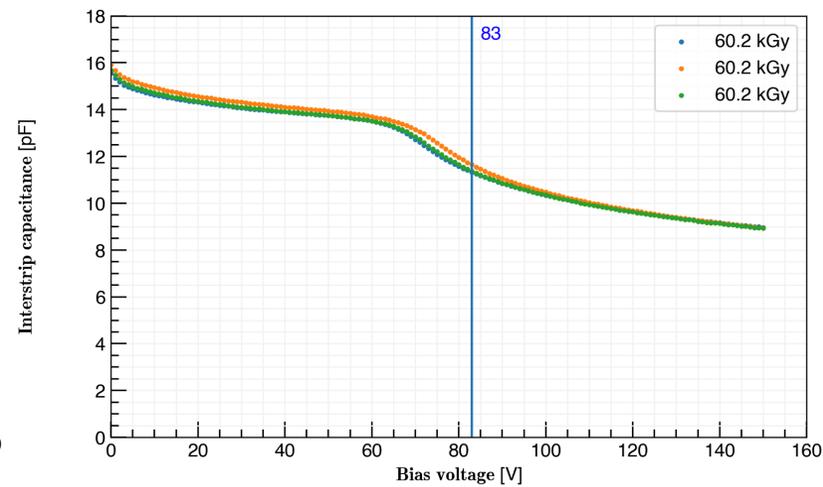
18.5 kGy



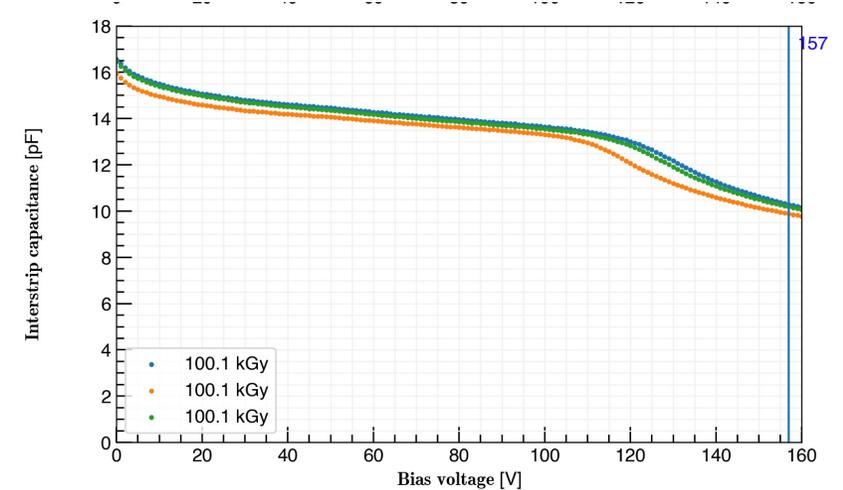
29.1 kGy



60.2 kGy



100 kGy



sensor	α [A/cm]	単位体積あたりのリーク電流 と放射線量間の損傷係数 α
mini822	4.1×10^{-17}	$\alpha = 1 \times 10^2$ [uA/Mrad/cm ³] $\Leftrightarrow 4 \times 10^{-17}$ [A/m] (∵ 10 [kGy] = 1 [Mrad] = 3×10^{12} [n _{eq} /cm ²])
mini208	3.8×10^{-17}	
mini195	4.0×10^{-17}	
mini198	3.6×10^{-17}	
mini203	4.0×10^{-17}	

17.0 ± 0.2 °C

$$I = \alpha \Phi_{\text{fluence}}$$

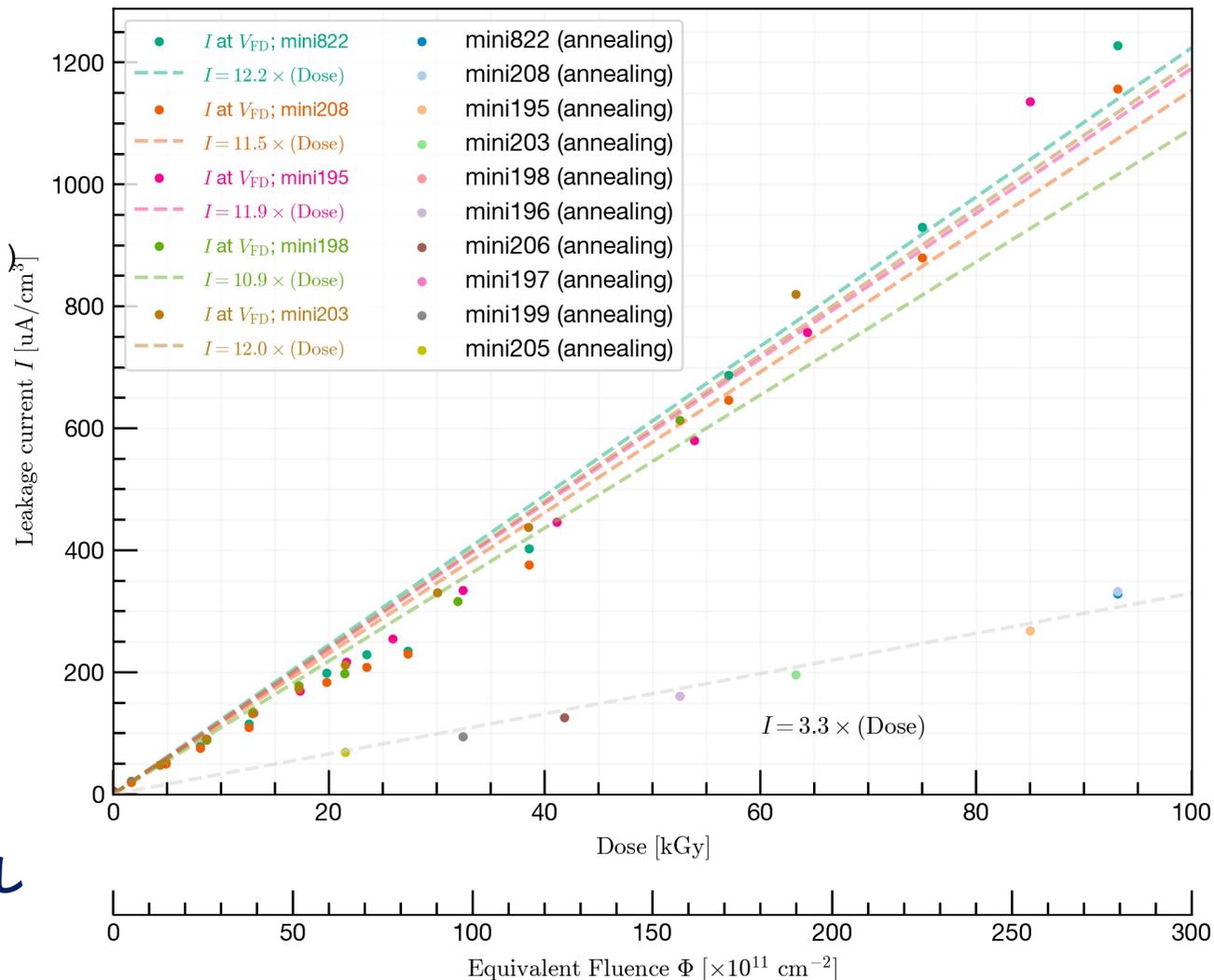
- Babar SVT*の900 MeV電子線試験による測定された $\alpha = 2.7 \times 10^{-17}$ [A/cm]

I. Rachevskaia et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **485**, 126–132 (2002)

- 現在運転中のBelle II検出器最内層SVDの測定された $\alpha = 10 \times 10^{-17}$ [A/cm]

- 桁数はconsistent、数値の差は温度に起因していると考える

- **70 kGyまで (~ Safety factor 3) 10 mAを超過しない**



*SVT; silicon vertex tracker: Belle IIのSVDに相当する崩壊点検出器

17°C

sensor	α [A/cm]
mini822	4.1×10^{-17}
mini208	3.8×10^{-17}
mini195	4.0×10^{-17}
mini198	3.6×10^{-17}
mini203	4.0×10^{-17}

$$I = \alpha \Phi_{\text{fluence}}$$

Results just after the irradiation (w/o annealing)



~ 10³ 時間経過

$\alpha \sim 2.3 \times 10^{-17}$ [A/cm] 25°C
 → 1.1×10^{-17} [A/cm] 17°C



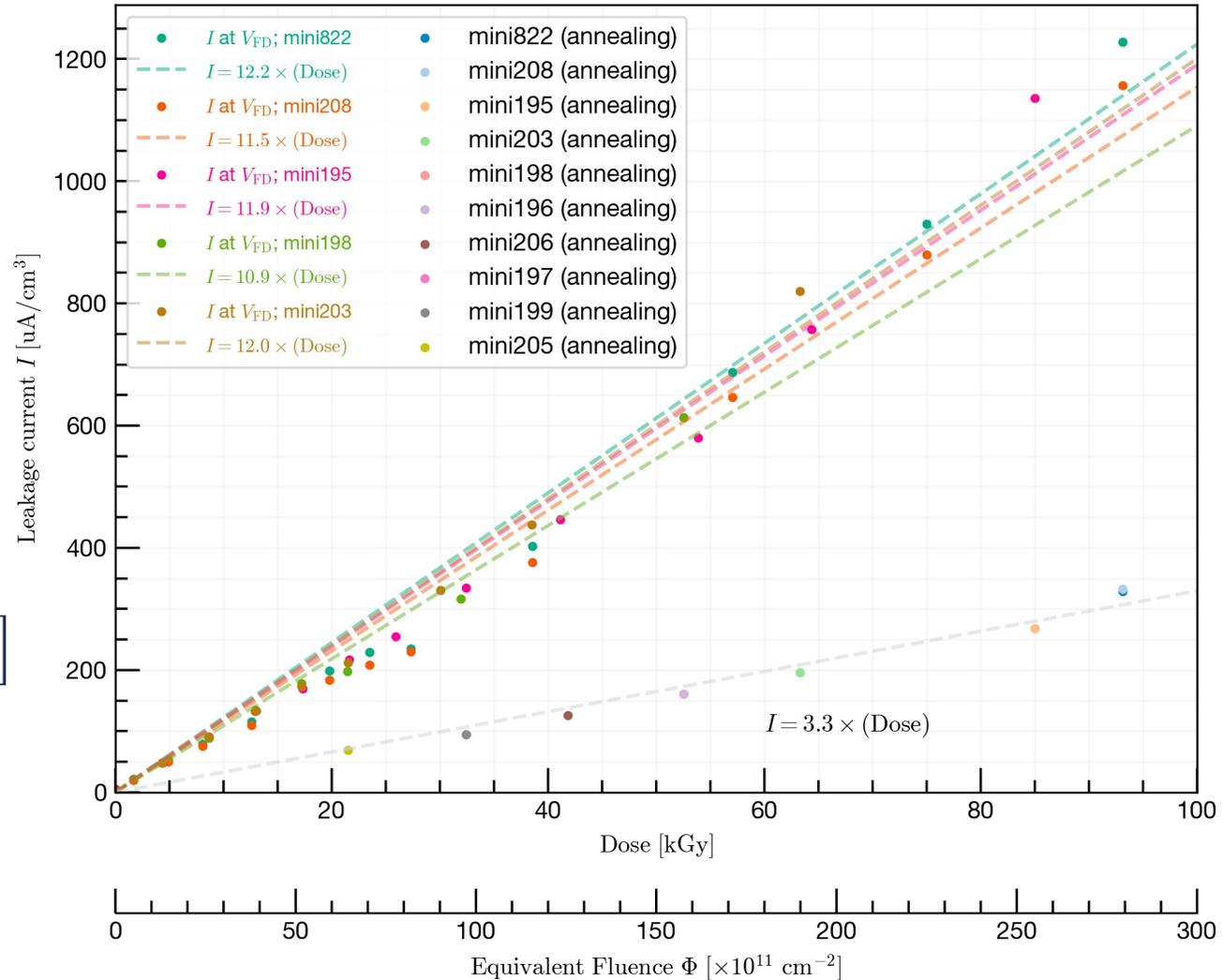
さらに~ 10³時間経過

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 \exp\left[-\frac{1}{2k_B} \left(\frac{E_g(T)}{T} - \frac{E_g(T_0)}{T_0}\right)\right]$$

$\alpha \sim 2.2 \times 10^{-17}$ [A/cm]

■ 損傷係数が半分程度に回復

10³ 時間経過、25°C



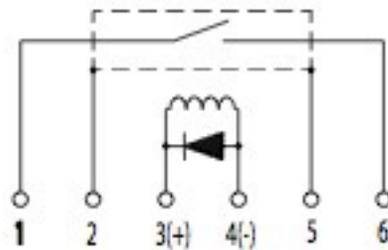
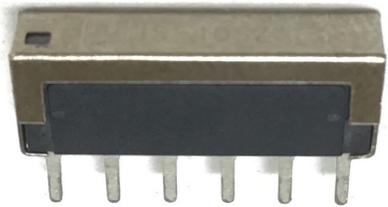
PEX-234104

PC with Digital-O(open collector)
control board, 5V, PCI Express,

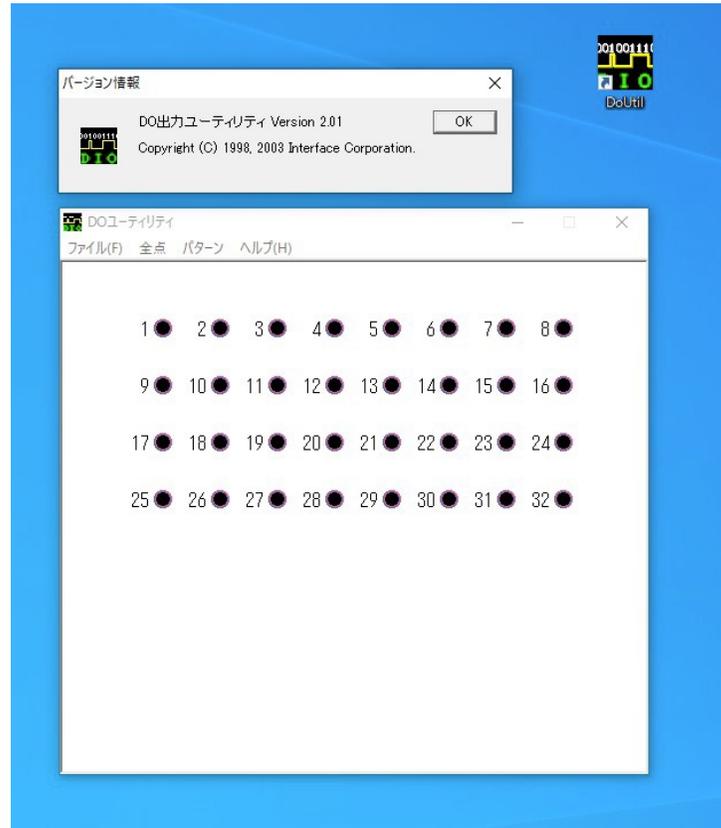


サニヨー工業株式会社

JS-105Z



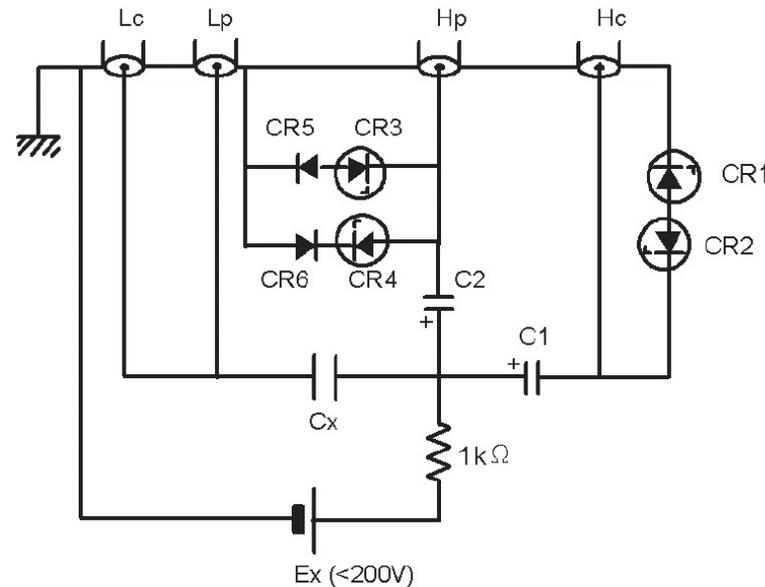
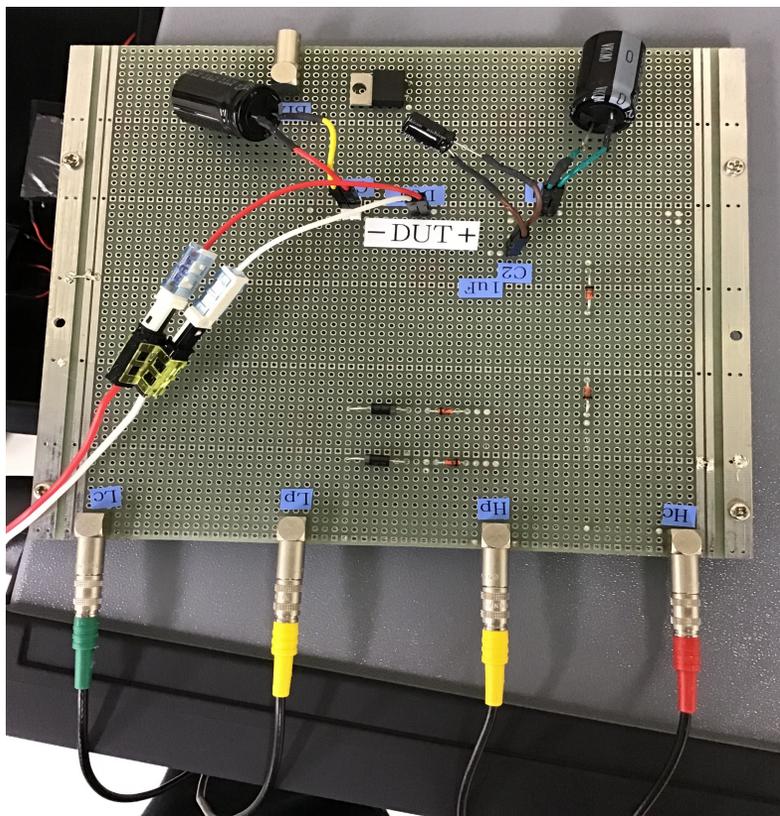
Vision & Freedom
株式会社 インタフェース



ソースメータからLCRメータへの
電流逆流から保護する。

Cx位置においてOPEN/SHORT補正

- ✓ 四端子対法
- ✓ Exはソースメータを使用



ここで Cx: 供試コンデンサ
Ex: 外部DCバイアス電圧源
C1: 直流阻止コンデンサ

$$\text{容量値} \geq \frac{1}{10 \pi f}$$

(f: 測定周波数 (Hz))

DC耐電圧: > Ex.

C2: 直流阻止コンデンサ

容量値 : 1μF

DC耐電圧 : > Ex

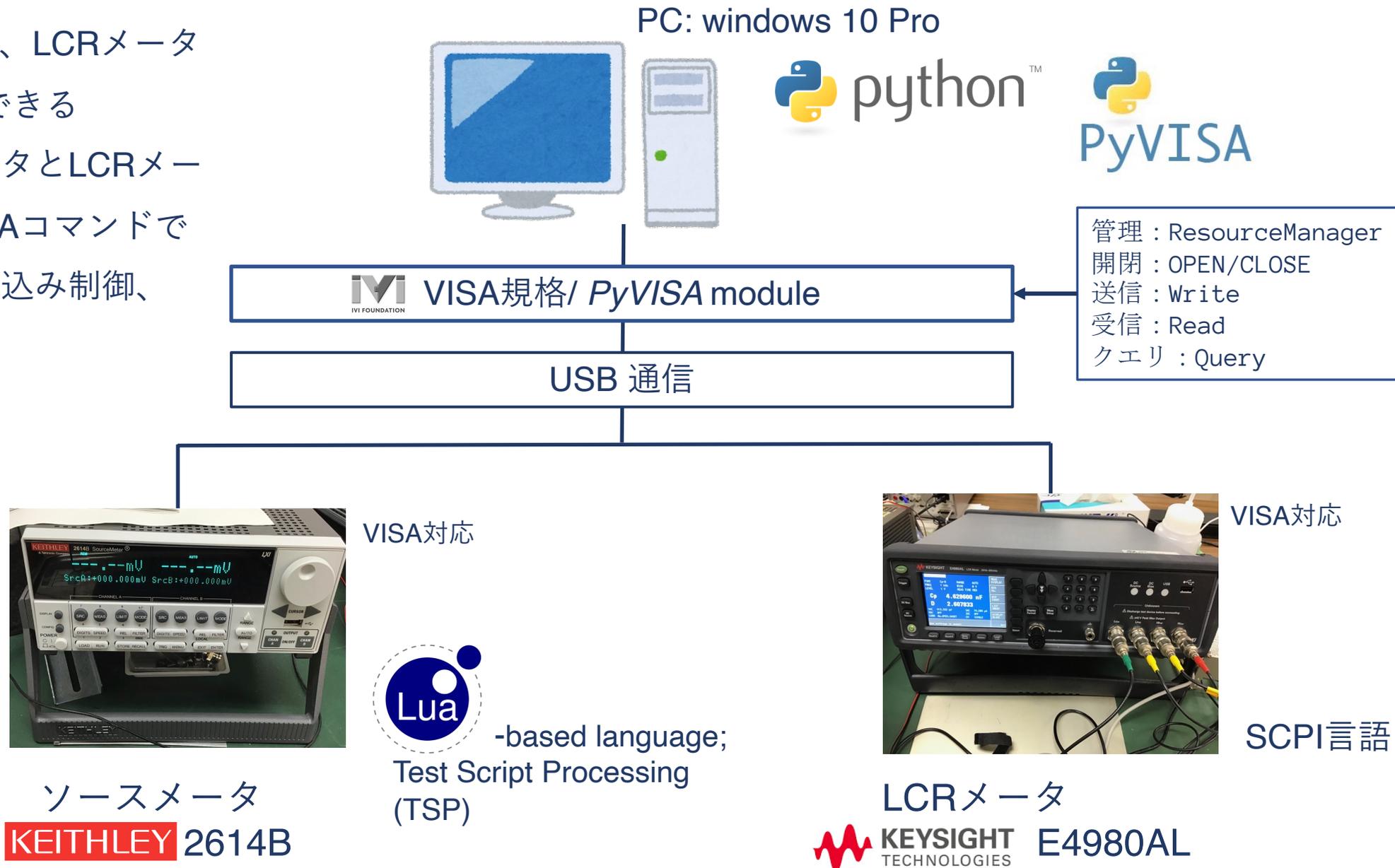
CR1, CR2 : 部品番号 : 1902-0176
ツェナーダイオード, 47V, 5%, 1W

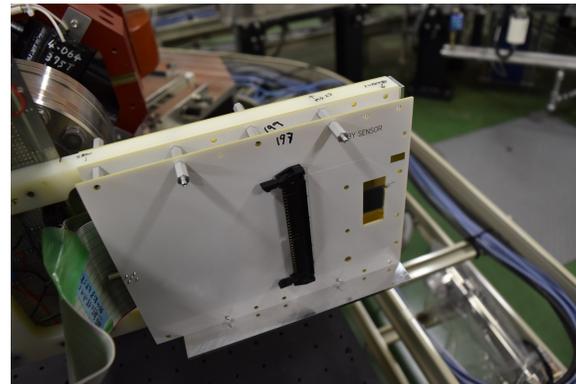
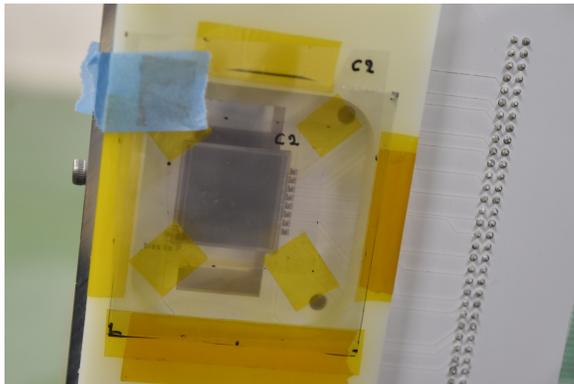
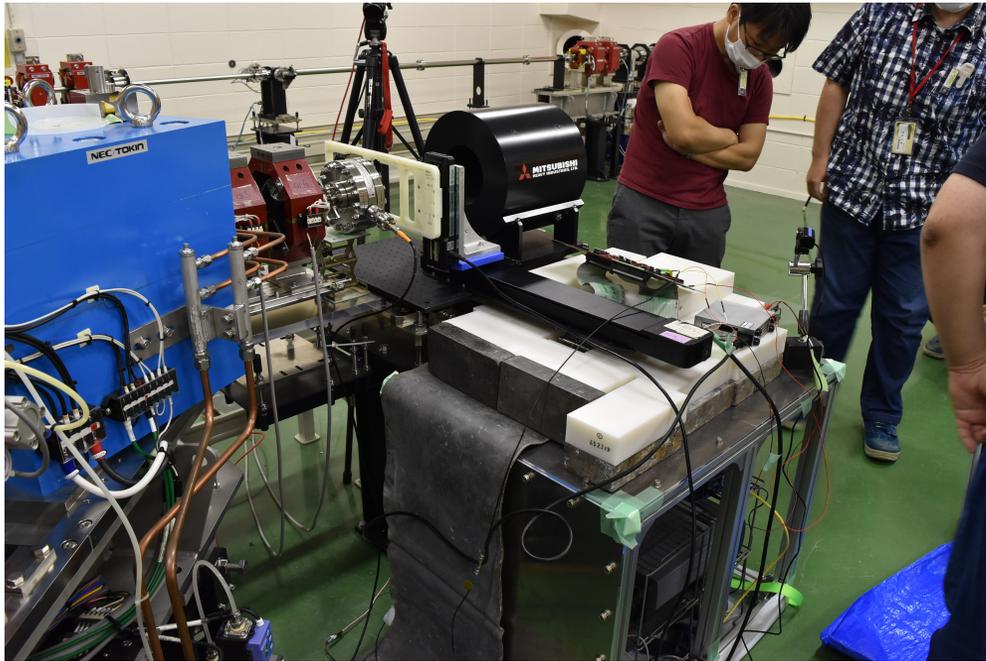
CR3, CR4 : 部品番号 : 1902-1299
ツェナーダイオード, 3.3V, 5%, 1W

CR5, CR6 : 部品番号 : 1901-0646
整流用ダイオード, 200V, 1A

Agilent Technologies
インピーダンス測定ハンドブック 2003年11月版より

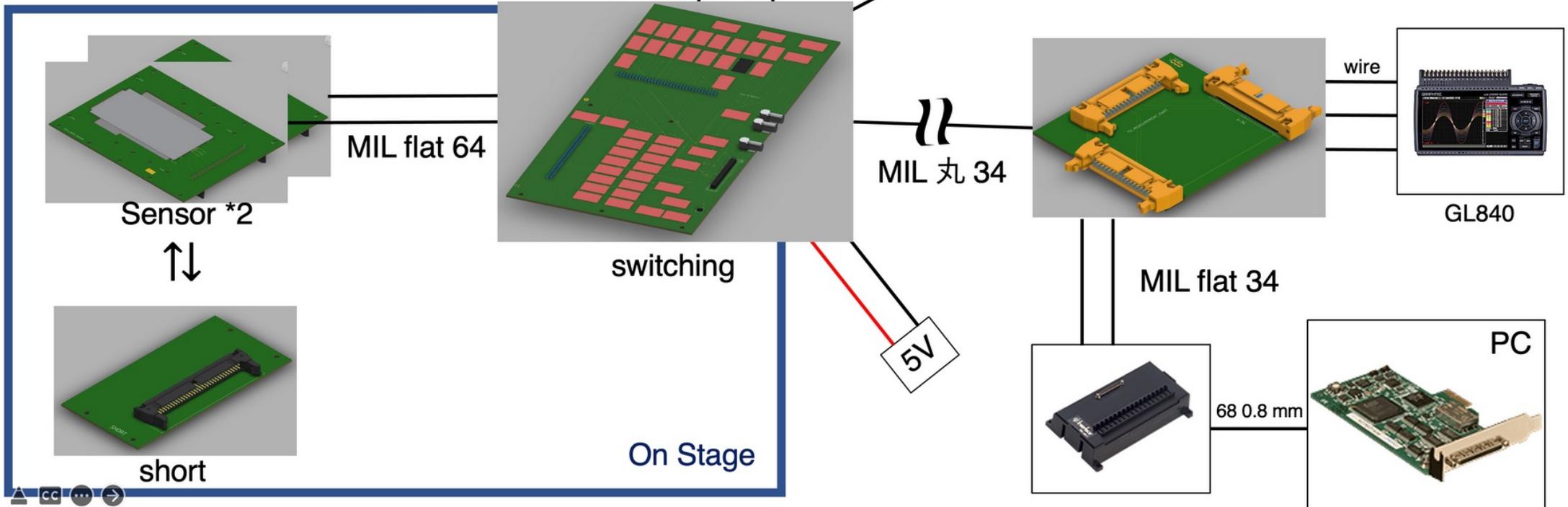
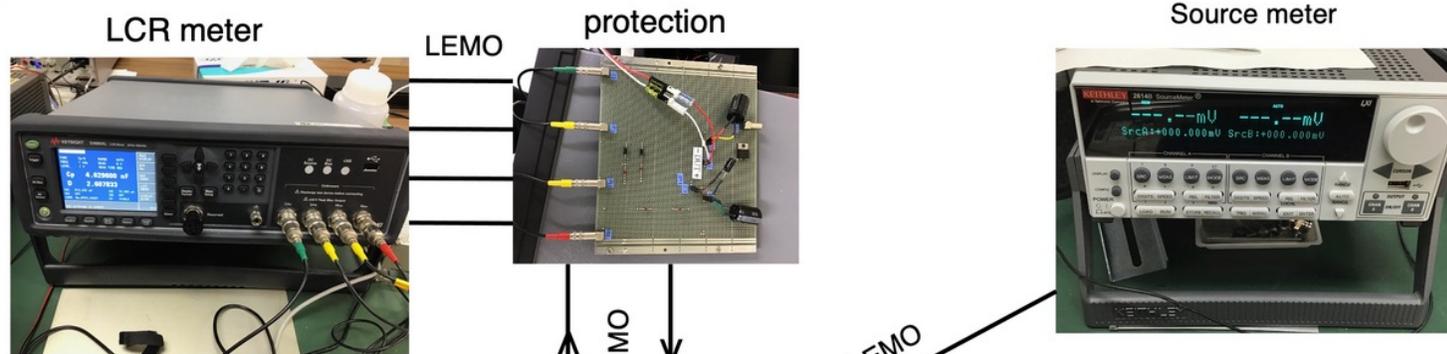
- ✓ ソースメータはTSP、LCRメータはSCPI言語で制御できる
- ✓ 使用したソースメータとLCRメータはVISA対応。VISAコマンドでサポート言語を送り込み制御、データ取得できる。
- ✓ Pythonでwrap



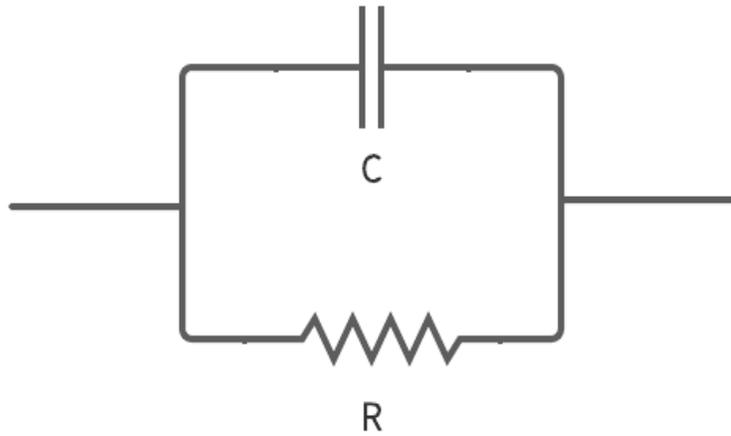


Cabling

1



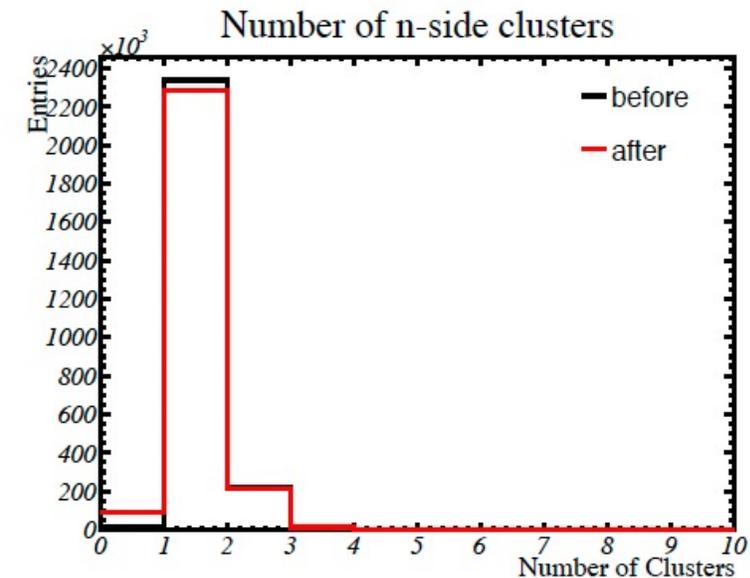
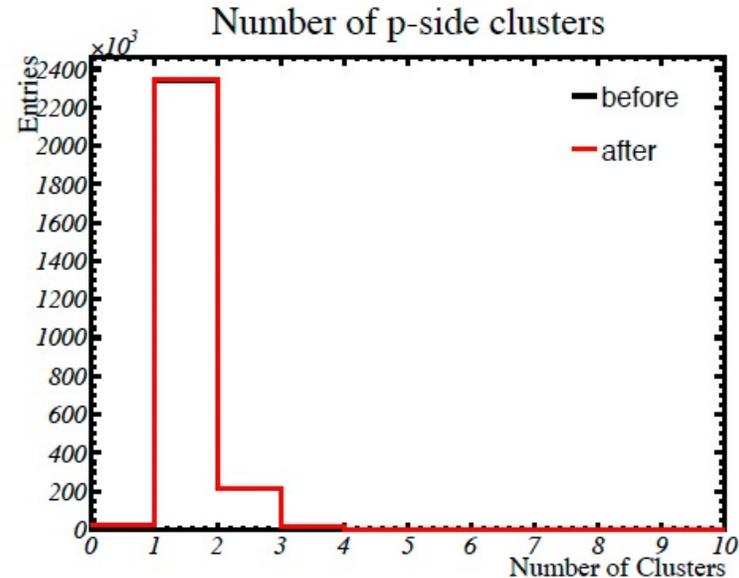
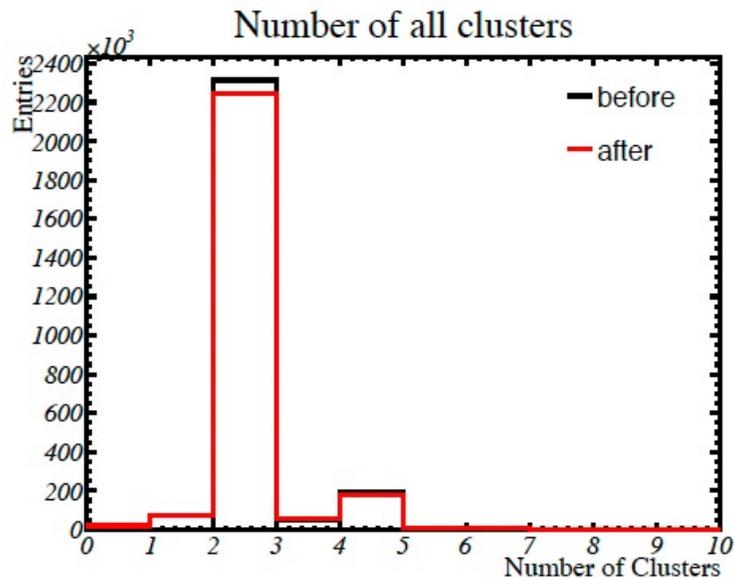
DUTにおいて



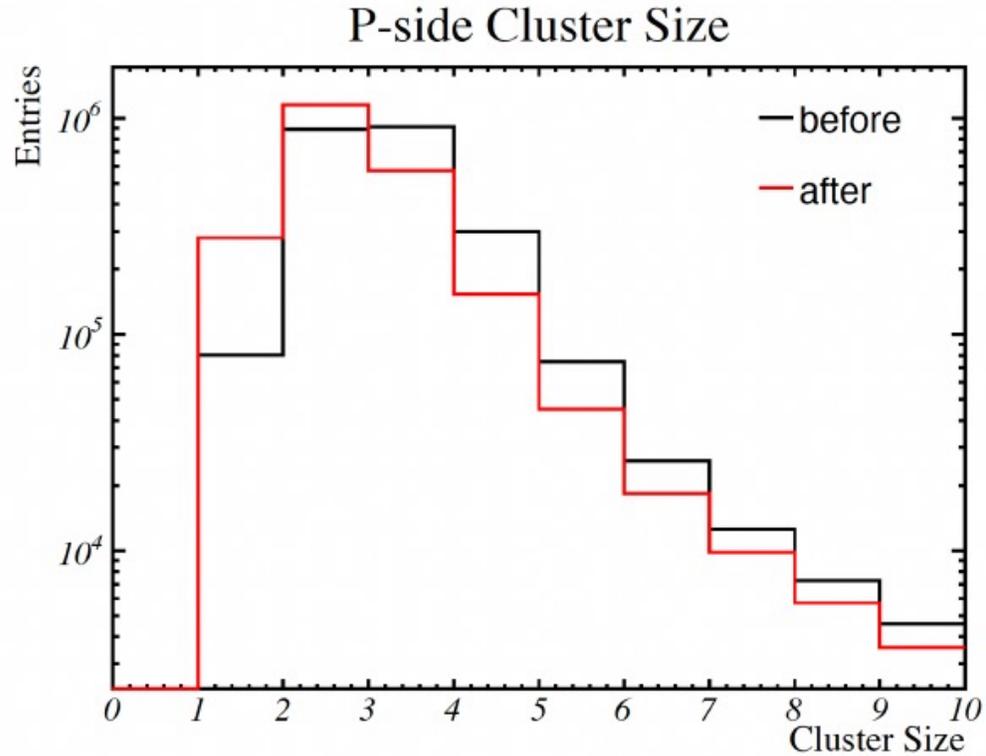
並行



直列

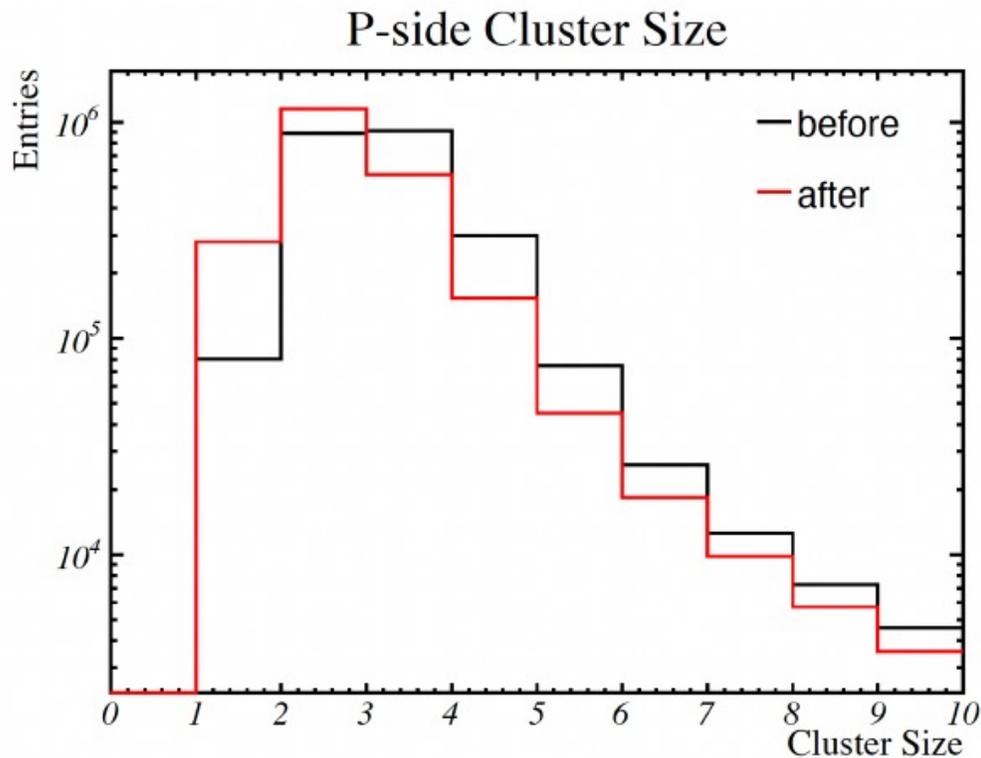


- P側は照射前後で差はない
- N側は照射後1-clusterが減り、0-clusterが増えた
↳ Pinhole?の部分による影響と予想
- N側はストリップの一部のみ照射されたため、放射線損傷の構造が複雑
また、一部にpinholeの疑いがあるため、この後の議論はP側のみに注目

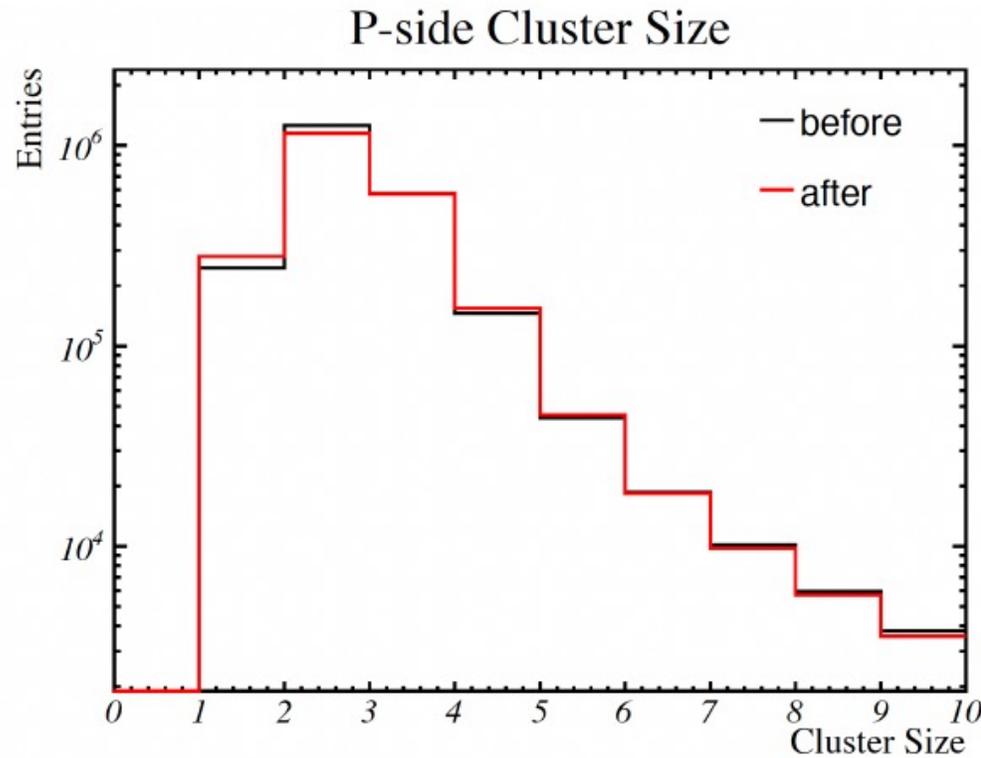


照射前後でそれぞれのnoiseで補正

- cluster sizeが減少している (cluster数は同じ)
- Noiseが上昇したため、 $SNR > 3$ の条件によってカットされたストリップが増えたためと考えられる



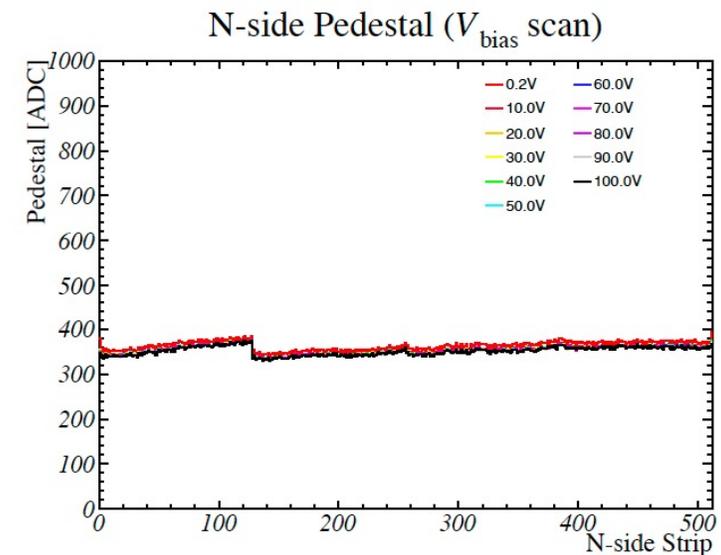
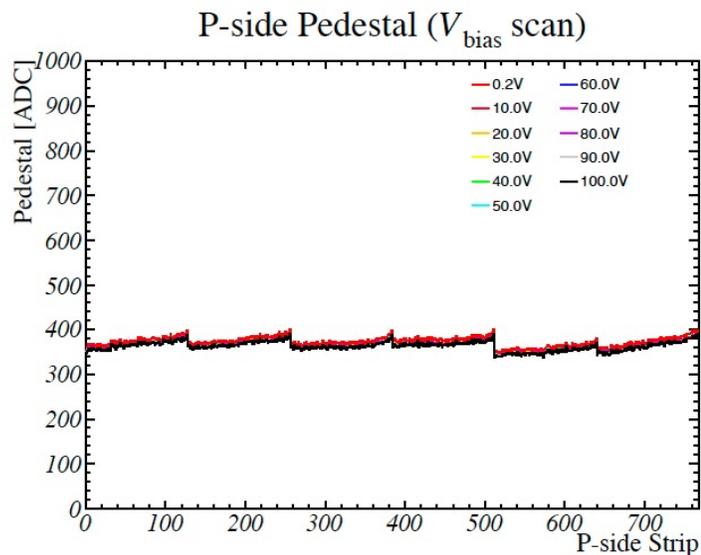
照射前後でそれぞれのnoiseで補正



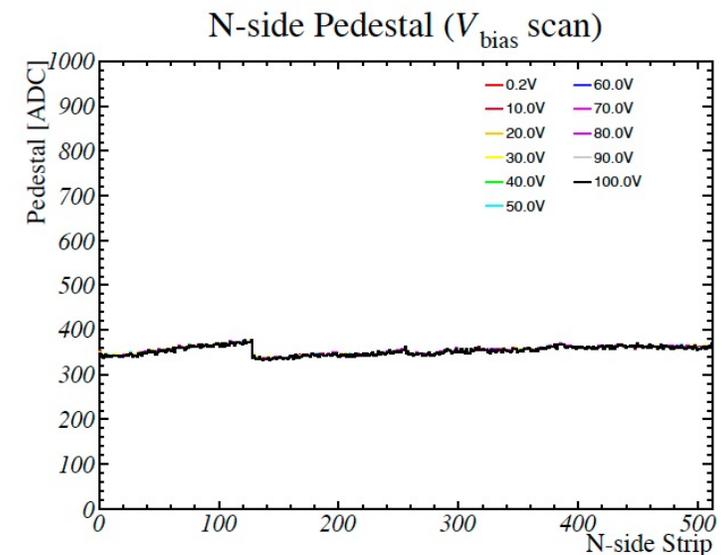
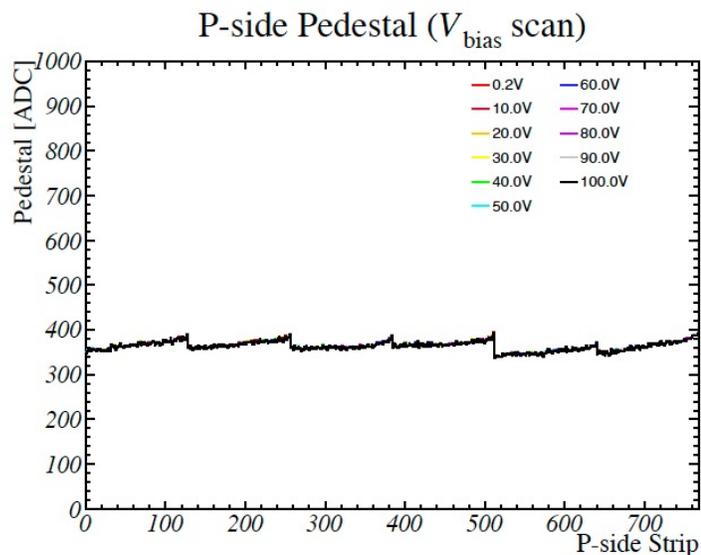
Noiseを照射後のnoiseに統一して補正

- cluster sizeが減少している (cluster数は同じ)
- Noiseが上昇したため、 $SNR > 3$ の条件によってカットされたストリップが増えたためと考えられる
- Noiseを照射前後で統一して比較すると、ほぼ分布に差は見られない
 - ➔ Noise上昇によってカットされたストリップが増えた

- 照射前後での変化が見られない
- 電圧による変化も見られない
- PedestalはAPV25の入力DCオフセット電圧に起因するもののため、HVや照射による影響はないと考えられる



Before



After

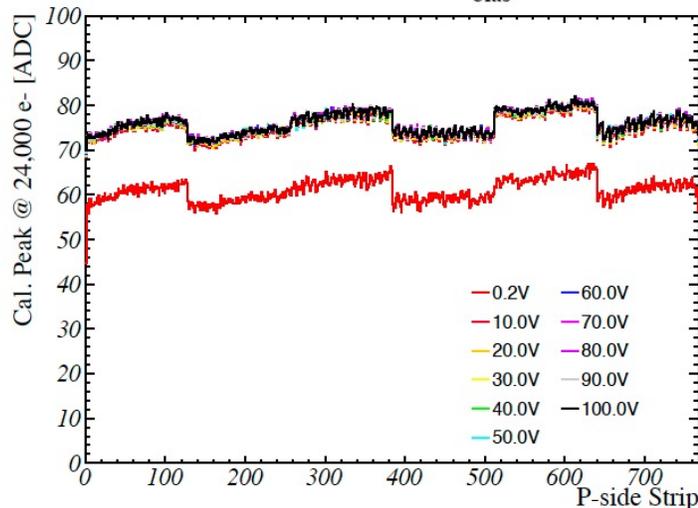
■ P側での変化

- 全体的に照射後の方が僅かに低い
- APV25につながっているC_{int}の増加に起因していると考えられる

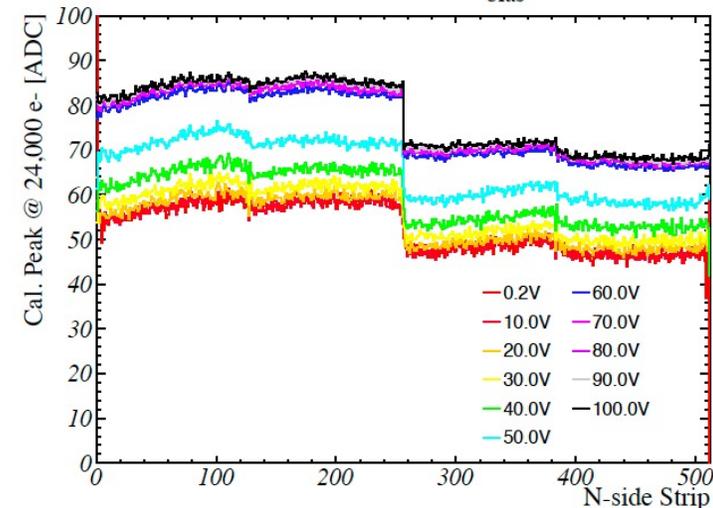
■ N側での変化

- N側はストリップの一部のみ照射されているため、損傷の構造が複雑

P-side Cal. Peak (V_{bias} scan)

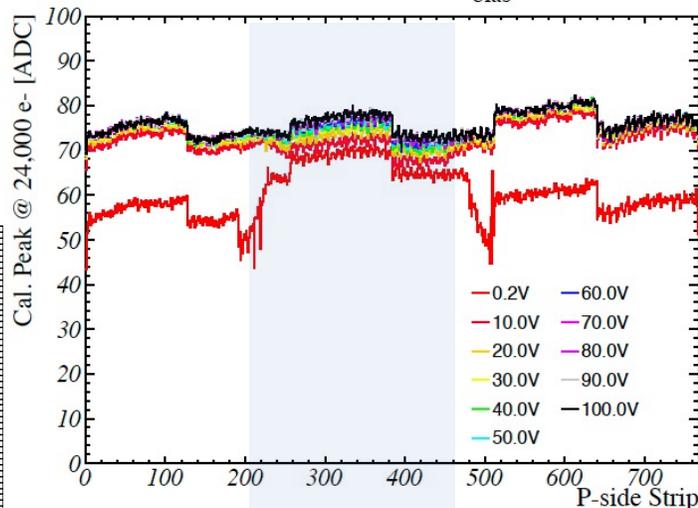


N-side Cal. Peak (V_{bias} scan)

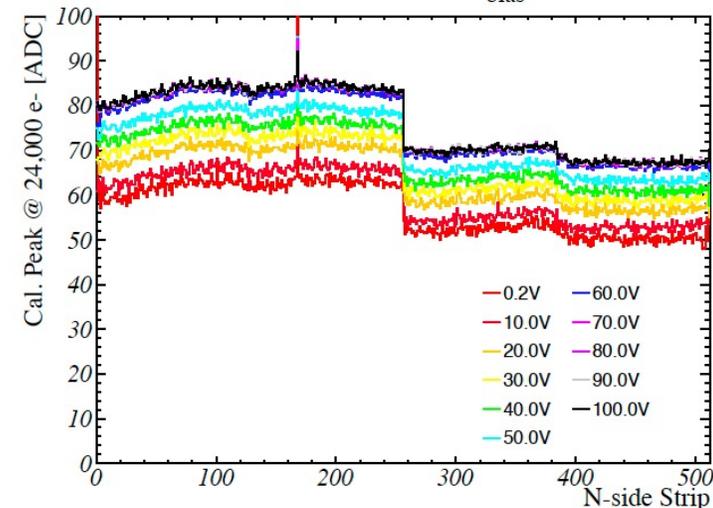


Before

P-side Cal. Peak (V_{bias} scan)

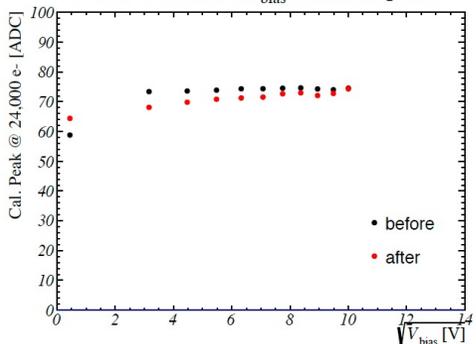


N-side Cal. Peak (V_{bias} scan)

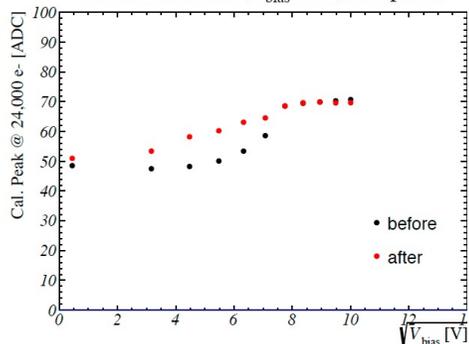


After

P-side Cal. Peak (V_{bias} scan): Strip#400



N-side Cal. Peak (V_{bias} scan): Strip#300



照射領域