

Belle II実験シリコンストリップ検出器の 電子線照射を用いた放射線損傷測定

男谷文彰, 原康二^A, 樋口岳雄^B, 石川明正^A, 中村克朗^A, 小貫良行,
佐藤瑤^A, 島崎奉文, 谷川輝, 坪山透^A, 植松祐真, 王子涵

東大理, 高エネ研^A, Kavli IPMU^B



KAVLI
IPMU



目次

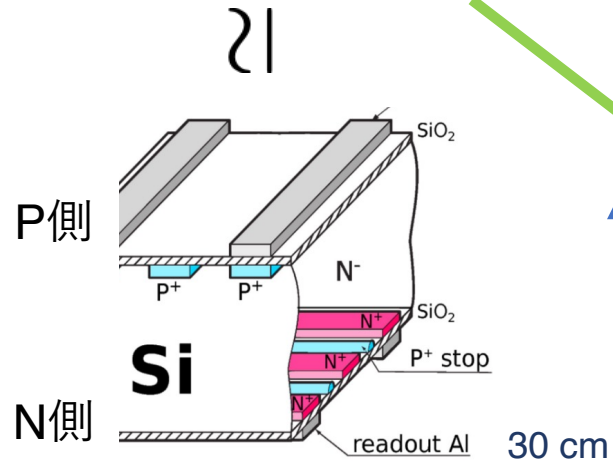
- Belle II 実験とシリコンストリップ崩壊点検出器
- 研究目的
- 試験用センサー
- 照射試験セットアップ
- 照射線量と照射範囲
- IV測定による全空乏化電圧の定義
- 全空乏化電圧 V_{FD} の変化
- リーク電流増大
- ストリップ間キャパシタンス C_{int} の変化
- アニーリング効果； V_{FD} の変化
- まとめ

シリコンストリップ崩壊点検出器(SVD)

- Belle II検出器中心付近にある。
四層

SVDセンサー (N型センサー)

- P側とN側のストリップが直交、
両面読み出し構造。
粒子通過点の2次元情報を取得

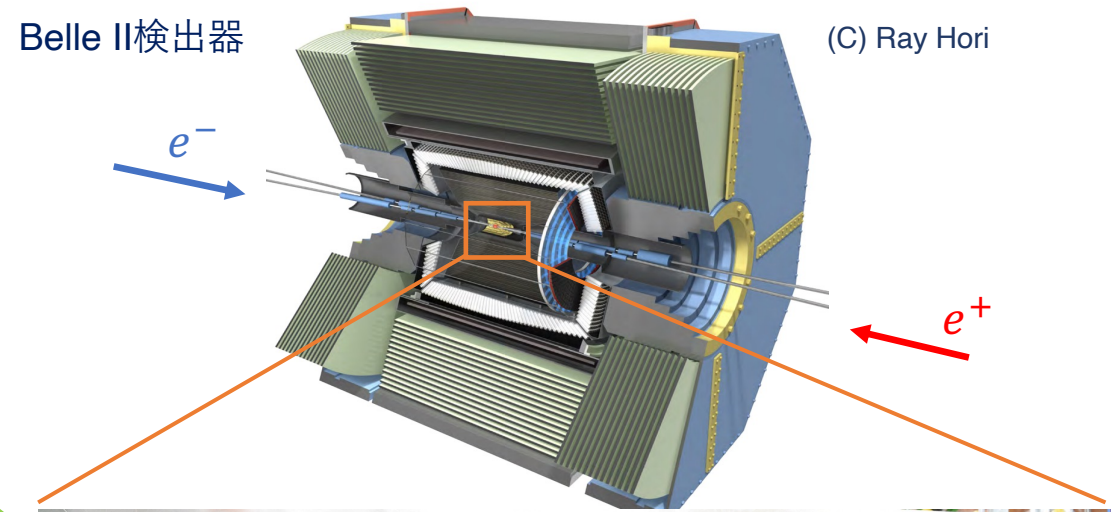


SVDが受ける放射線

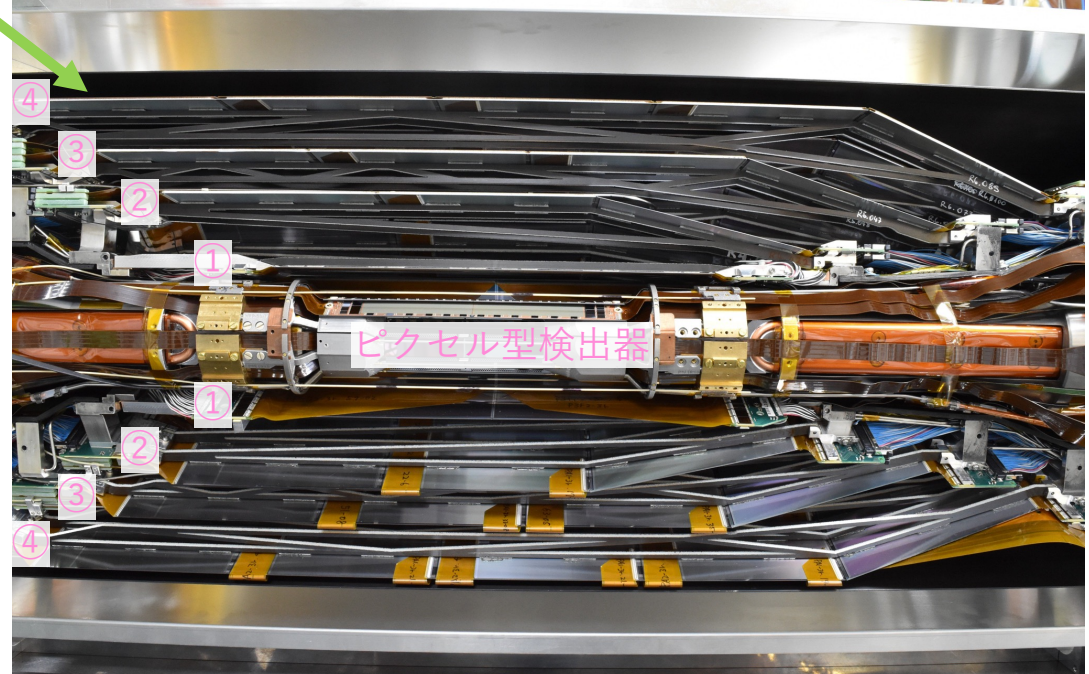
- 10年間累計放射線量 **20 ~ 30 kGy**
と推定 (最内層) @目標ルミノシティ $6 \times 10^{35} / \text{cm}^2/\text{s}$
- 電子、陽電子、中性子がメイン (中性子はバルク損傷のみ)

電子による損傷 = 表面損傷 + バルク損傷

Belle II検出器



(C) Ray Hori



SVD全体の断面図

★ 目標ルミノシティで10年間運転を行うと、20～30 kGy 程度放射線量を受けると推定

研究目的： 放射線損傷によってSVDの運転に影響が出ないか
実際に電子線照射試験を用いて調べたい。

SVDセンサーへの損傷と影響



I. 全空乏化電圧 V_{FD} の変化

→ 供給可能な電圧を超える恐れ

II. リーク電流増大

→ 信号ノイズの増大や読み出しASICの許容電流超過

III. ストリップ間キャパシタンス C_{int} の変化

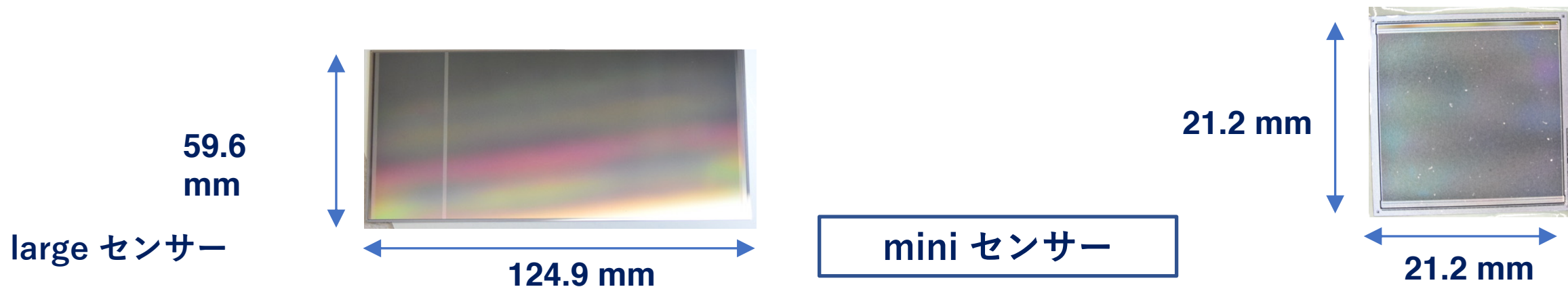
→ 信号ノイズの増大

IV測定

で確認

C_{int} V測定

- 今回試験では、HPK mini センサーとlarge センサーの2種類を照射し、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

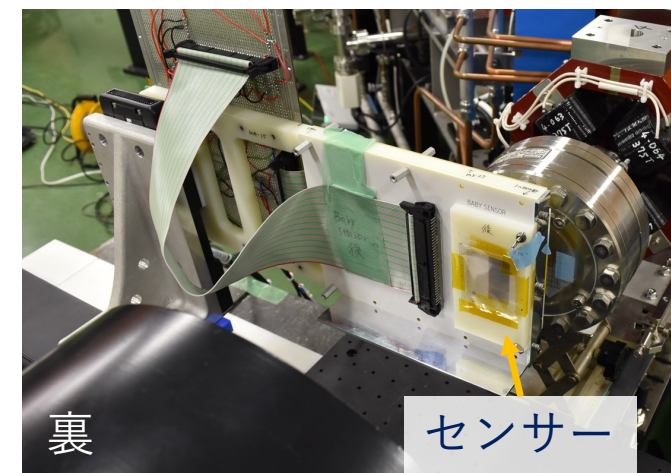
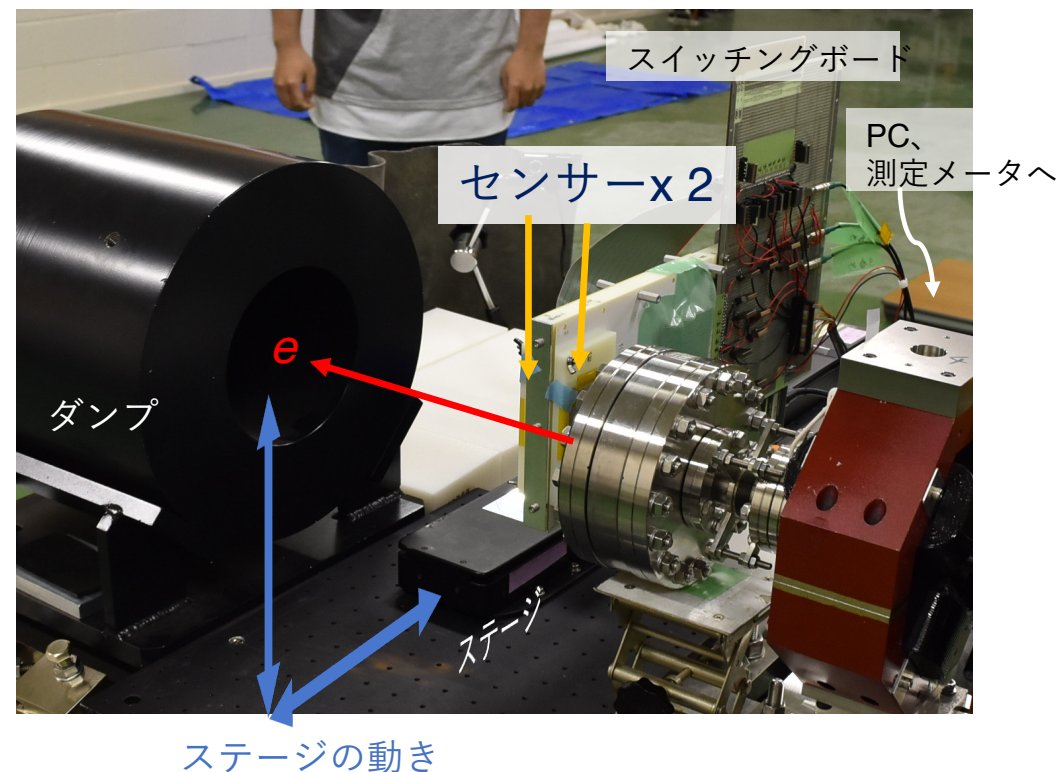
- ✓ SVDと同じシリコンウェハーから作製
- ✓ バルク性質は同じと期待される
- ✓ センサー表面のストリップがSVDと異なる部分がある

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

- 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)
- 遠隔で測定回路の切替やIV、CV、 C_{int} の測定が可能なシステムを開発し、測定に用いた
- センサーはPCBボードにワイヤーボ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
- 環境温度： 17.0 ± 0.2 °C



■ 照射線量

- Miniセンサー10枚、largeセンサー1枚を照射&測定
- 同一センサーで照射とIV (+ CV、 C_{int})測定を交互に行った。各測定点での照射線量は右図 (丸点：IV (+ CV、 C_{int})測定、星形：最終到達線量)

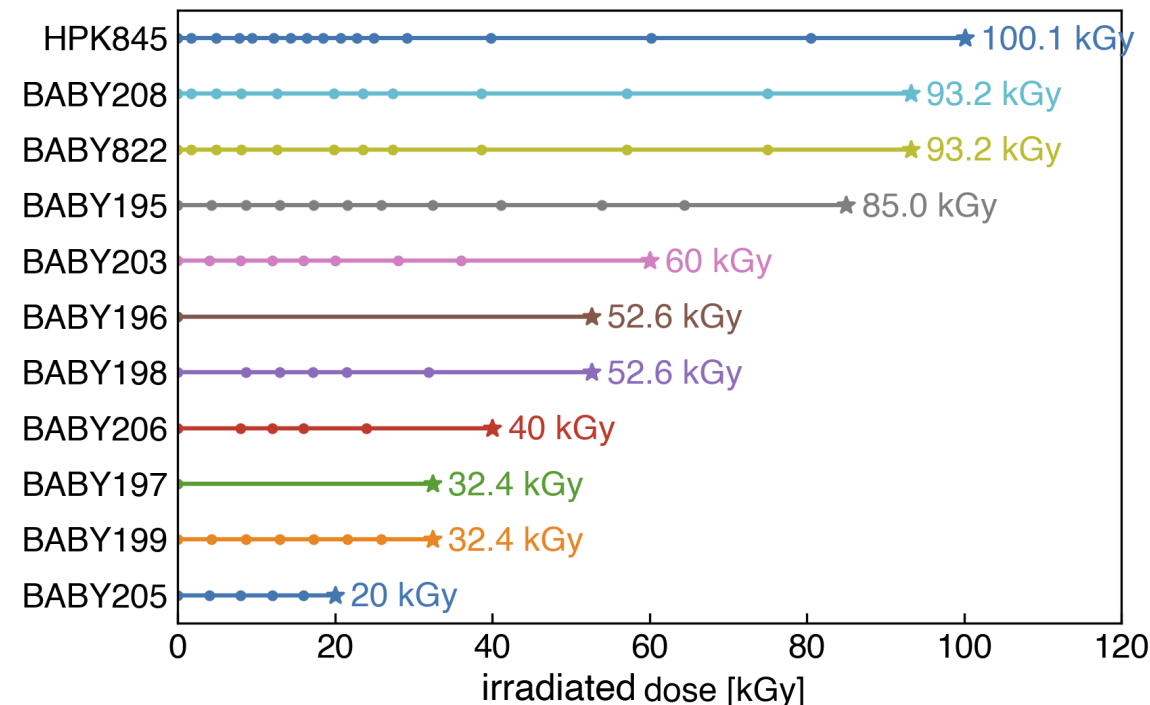
$$\text{電子数} = \text{ビーム電流} \times \text{照射時間} / \text{電荷素量}$$

$$\text{照射線量} = \text{電子数} \times \text{一電子の} \frac{dE}{dx} / \text{照射面積} \times \text{電荷素量}$$

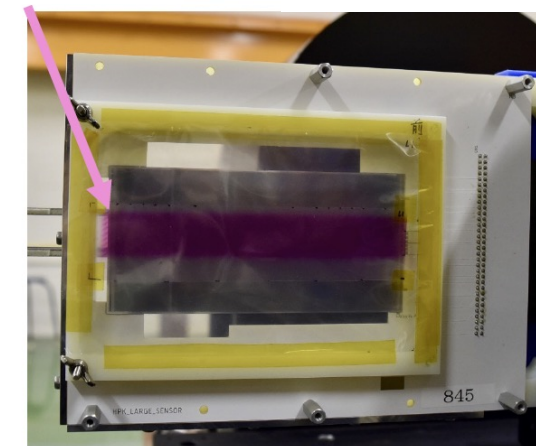
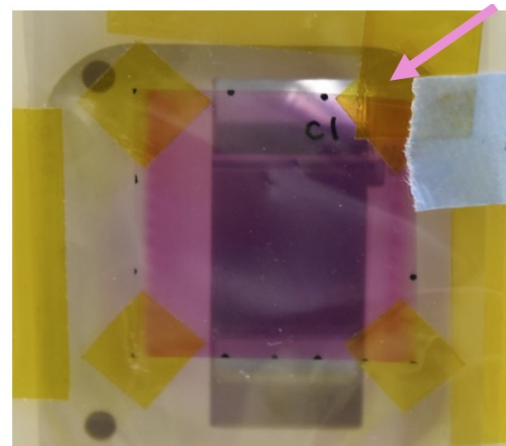
■ 照射範囲

- miniセンサー：センサー全体
- largeセンサー：
P側ストリップに平行した幅16 mmの領域

各センサーの照射線量と測定点



miniセンサー 照射範囲 largeセンサー



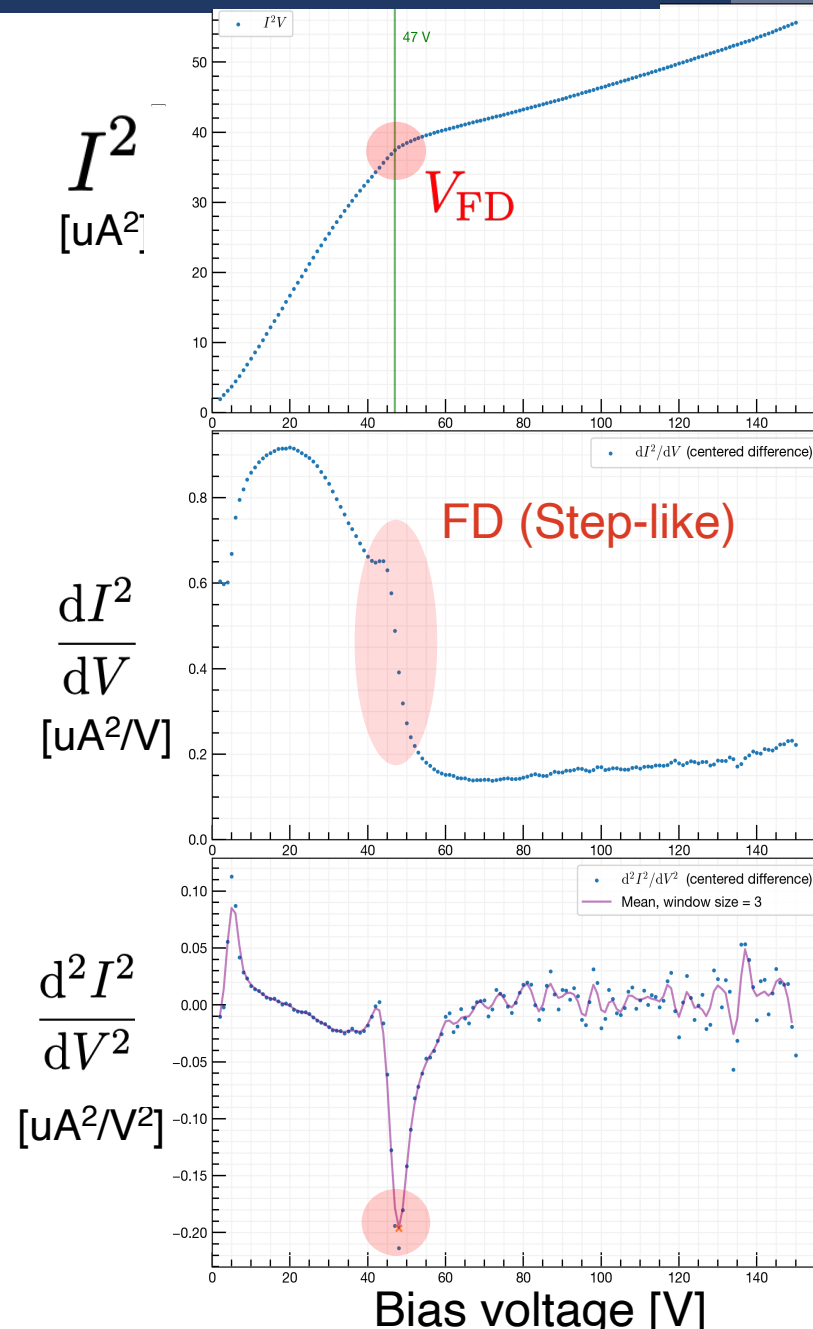
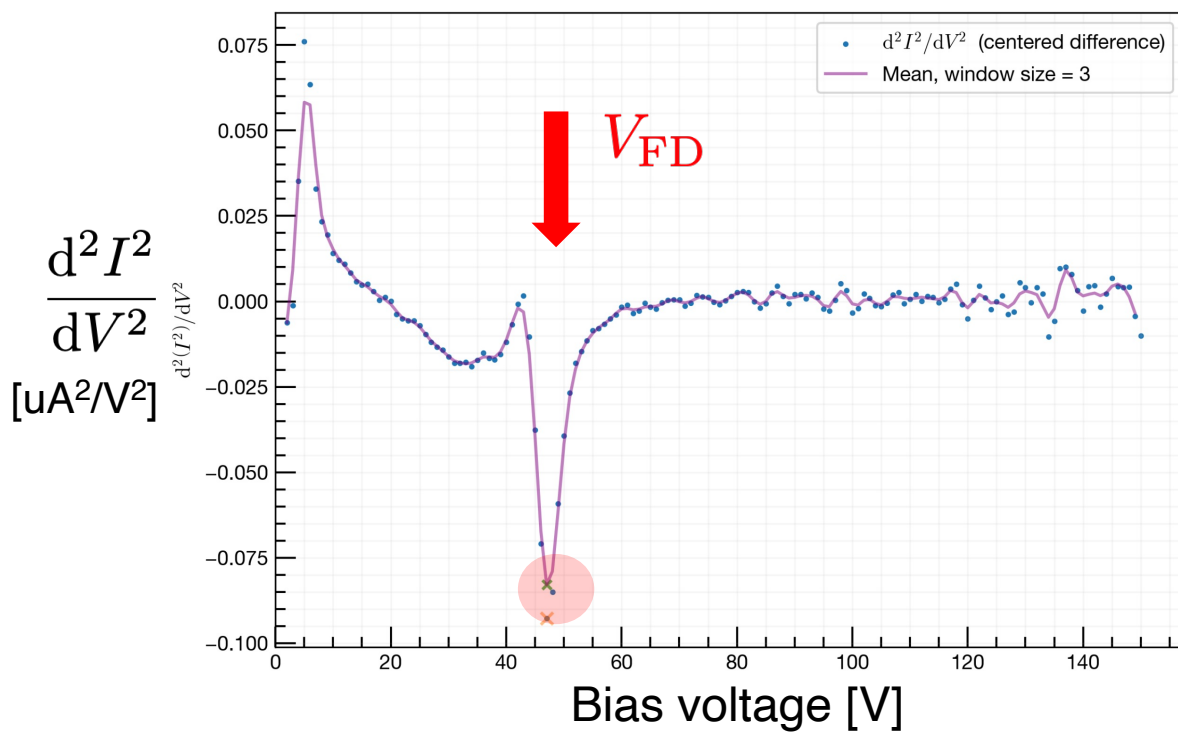
- 全空乏化電圧 V_{FD} はIV曲線の肩として現れる

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

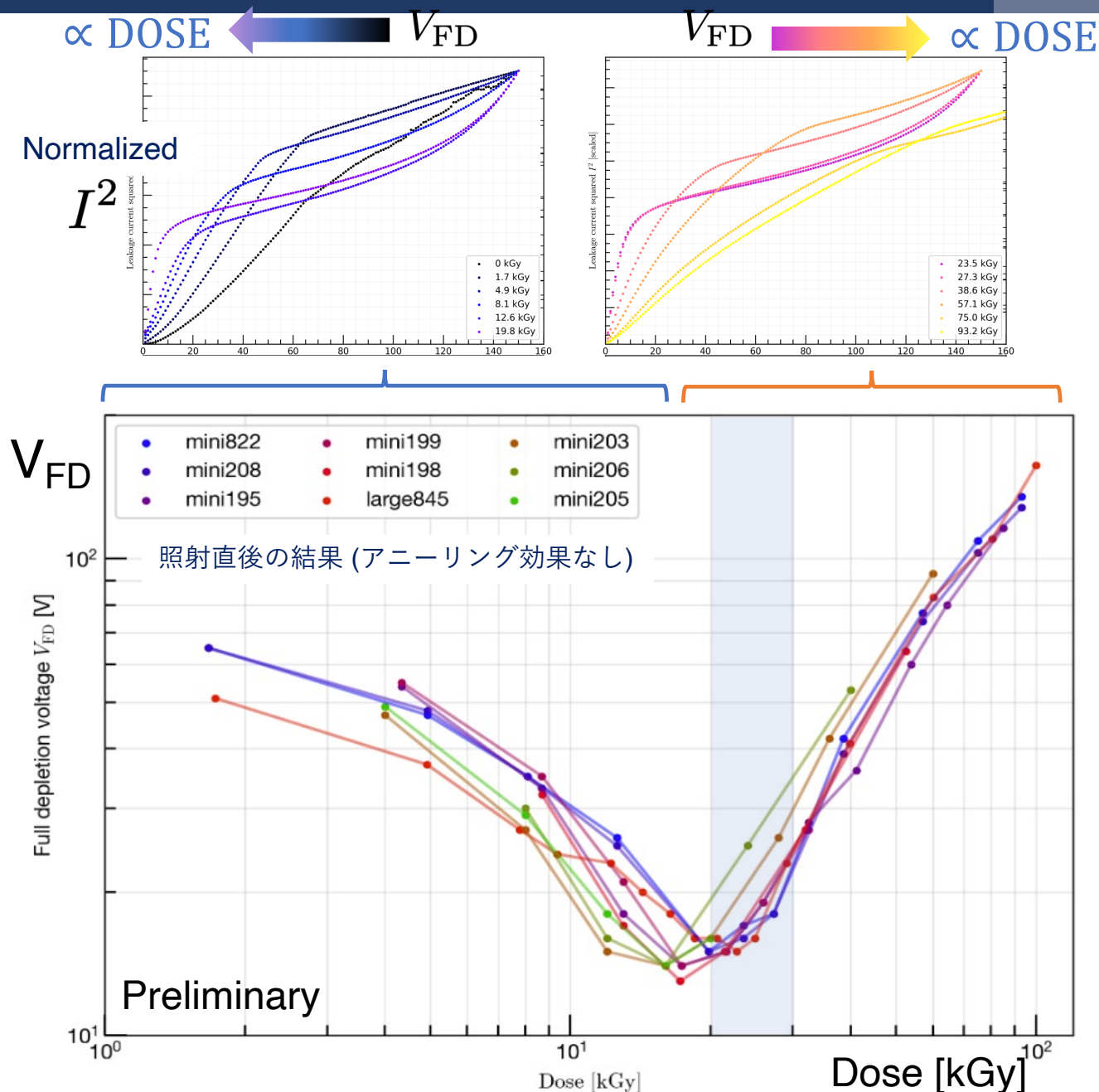
q : charge, U : electron-hole pair generation rate, A : sensor area

ϵ : Si relative permittivity, N_D : donor amount

- 第一義: 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 **15 ~ 20 kGy** の放射線量でType inversion することが確認した
(equivalent neutron fluence $4.5 \sim 6.0 \times 10^{12}$ [n_{eq}/cm^2])
- **10年間累計放射線量 20 ~ 30 kGy**照射では V_{FD} が供給可能電圧 (40 ~ 200 V) を超えないことを確認
- **80 kGy (safety factor 3 ~ 4)**照射でも $V_{FD} \sim 100$ Vとなり、供給可能電圧を超過しない
- アニール効果による損傷の回復を考慮すると、さらに高い線量でも供給可能電圧を超えないと考えられる



Preliminary

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	4.3×10^{-17}

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

$$\alpha = 1 \times 10^2 \text{ [uA/Mrad/cm}^3\text{]}$$

$$\Leftrightarrow 4 \times 10^2 \text{ [A/m]}$$

($\because 10 \text{ [kGy]} = 1 \text{ [Mrad]} = 3 \times 10^{12} \text{ [n}_{eq}\text{/cm}^2\text{]}$)

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

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

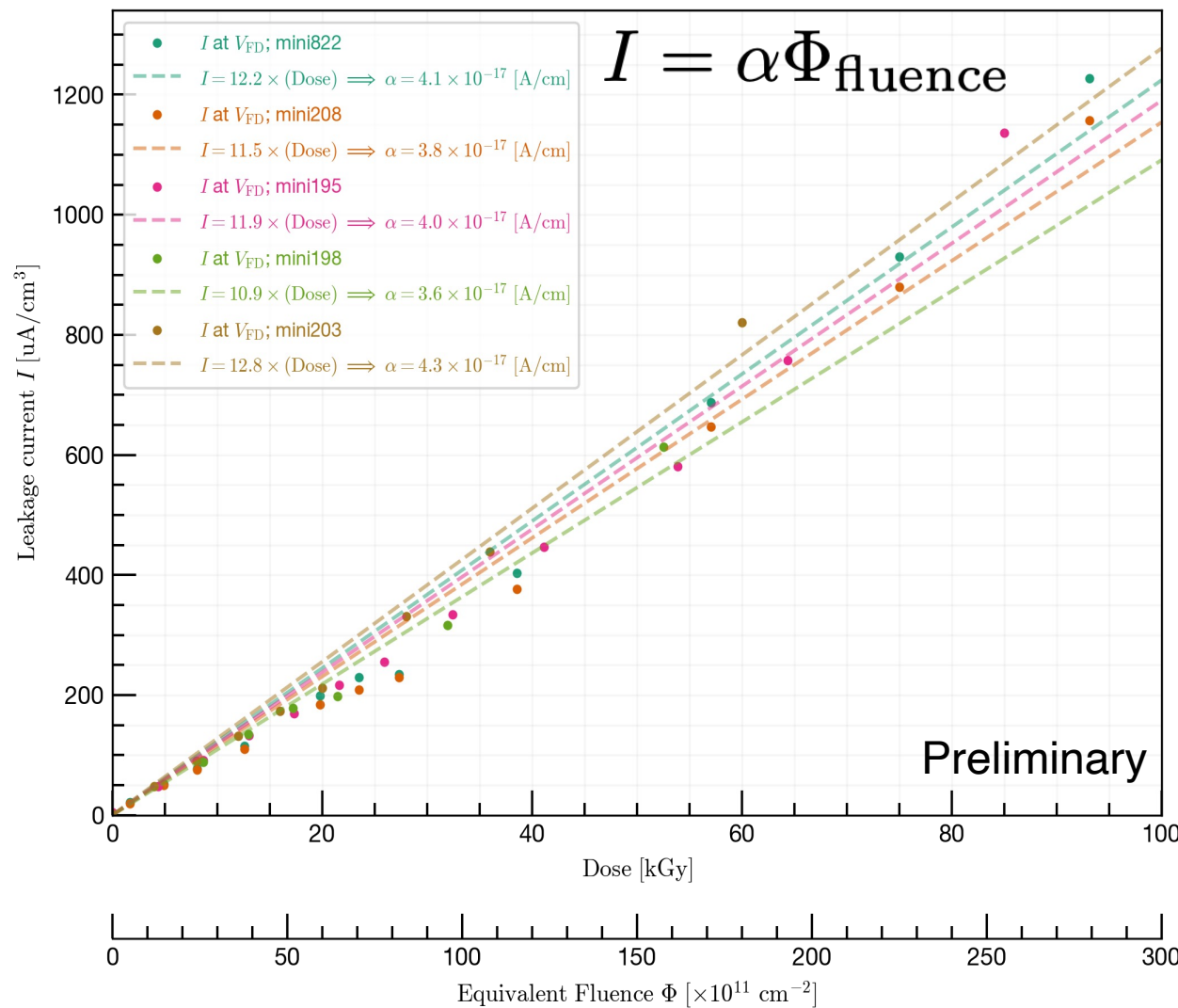
- 現在運転中のBelle II検出器最内層SVDの
測定された $\alpha = 10 \times 10^{-17} \text{ [A/cm]}$

- 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 2) 供給電源の許容電流 (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

17.0 ± 0.2 °C



照射直後の結果 (アニーリング効果なし)

- 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； $C_{int} \equiv C_{measured}/2$

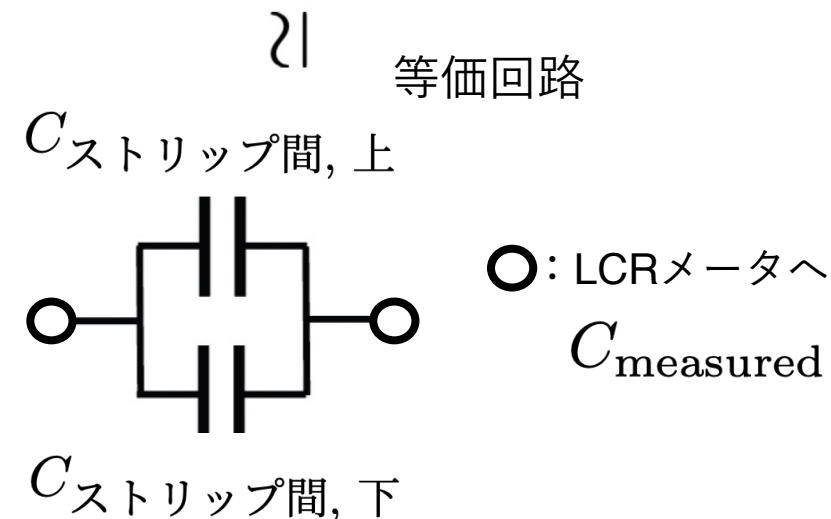
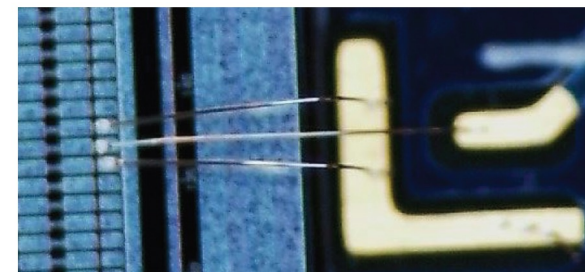
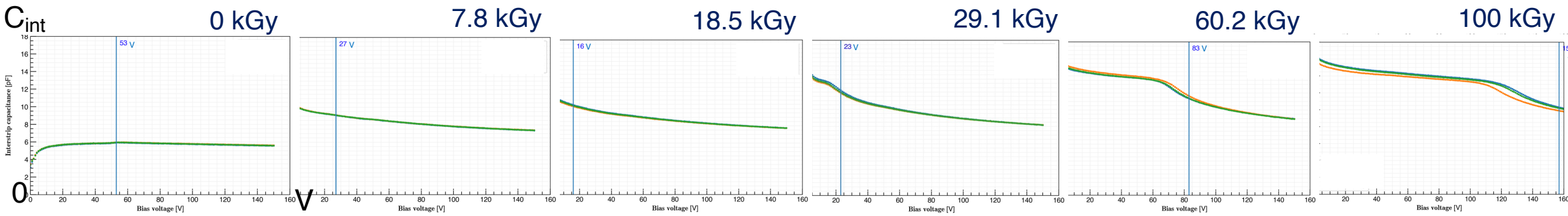
- 照射前と比較して、Type inversion後の V_{FD} での C_{int} は約2倍となった

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

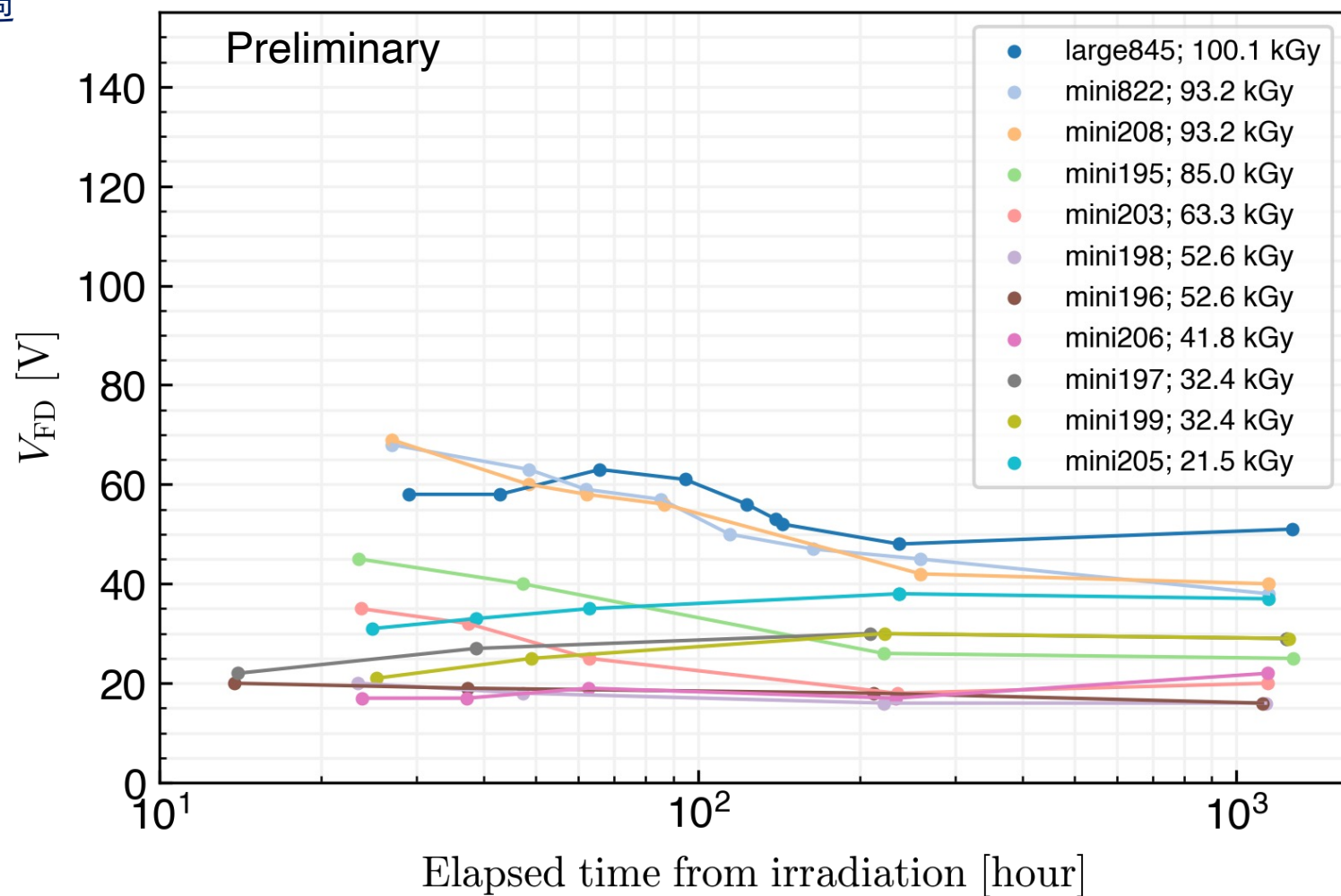
- 一方、 V_{FD} を超えて電圧をかけることで、約9 pF程度に減らすことができる。

- ノイズの増加への寄与見積りについては検討中

青線 : V_{FD} , 全てのプロット縦軸上限18pF



- 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 150 ~ 200 (約1週間) で完了しているように見える
- ある時間から逆に損傷が大きくなる (逆アニール効果)
- すでに逆アニールしているセンサーがあるようにも見える (mini197, 199, 205)
- 今後も継続してアニール効果の観測を行う。また以下への影響も観測
 - リーク電流
 - C_{int}

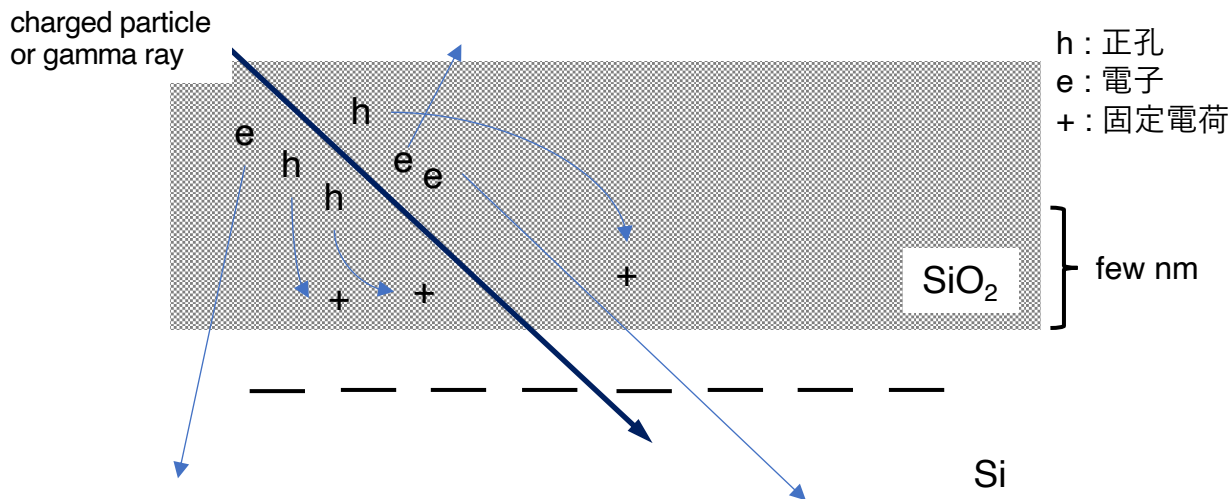


- 最内層SVDの10年間累計放射線量 **20 ~ 30 kGy**と推定@目標ルミノシティ 6×10^{35} /cm²/s
- miniセンサー10枚とlargeセンサー1枚を90 MeV電子線で照射し、開発した遠隔でIV, CV, C_{int}の測定を行えるシステムを用いて測定した
- V_{FD}の変化を観測し、**Type inversion**を確認できた
 - 放射線量: 15 ~ 20 kGy \Leftrightarrow $4.5 \sim 6.0 \times 10^{12}$ [n_{eq}/cm²]
 - 80 kGy (safety factor 3 ~ 4)照射でもV_{FD} ~ 100 Vとなり、供給可能電圧を超過しない
- リーク電流を測定し、**増大することを確認した**
 - 測定された損傷係数 4×10^{-17} [A/m], 先行研究と桁数が同じとなることを確認
 - 70 kGyまで (~ safety factor 2) 供給電源の許容電流 (10 mA) を超過しない
- C_{int}の変化を確認した
 - 照射前: ~ 6 pF
 - Type inversion後: ~12 pF (V_{FD}を超えて十分に電圧印加すれば、9 pF程度に減らせる)
 - 信号ノイズへの寄与は調査中
- **Belle II SVD は目標ルミノシティでの10年間運用で想定されるレベルの放射線損傷を受けても問題ない**

早

酒

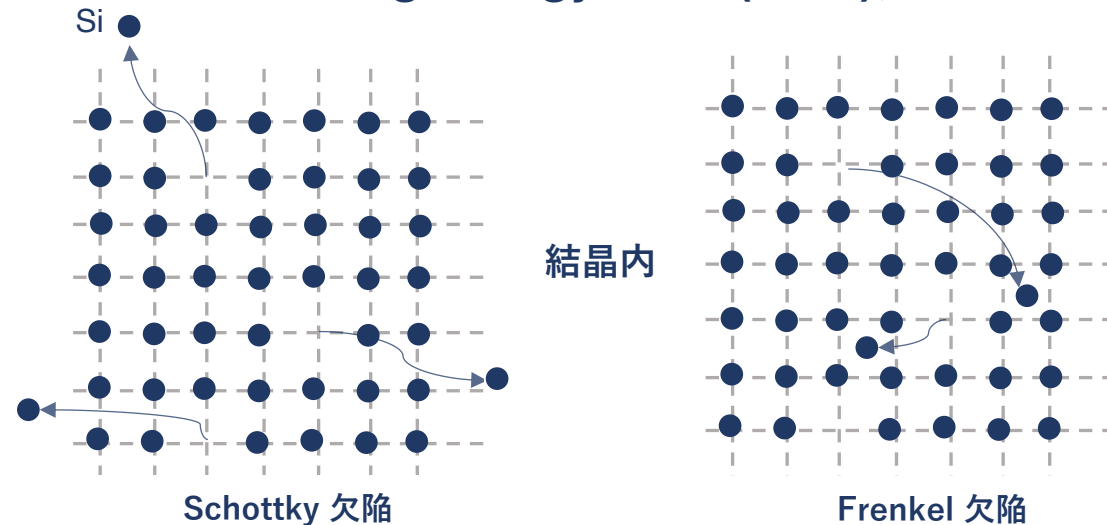
Total Ionization Dose (TID); 表面損傷



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、**センサー表面付近でのリーク電流が増大 → ☹️ノイズ増大**

★ 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



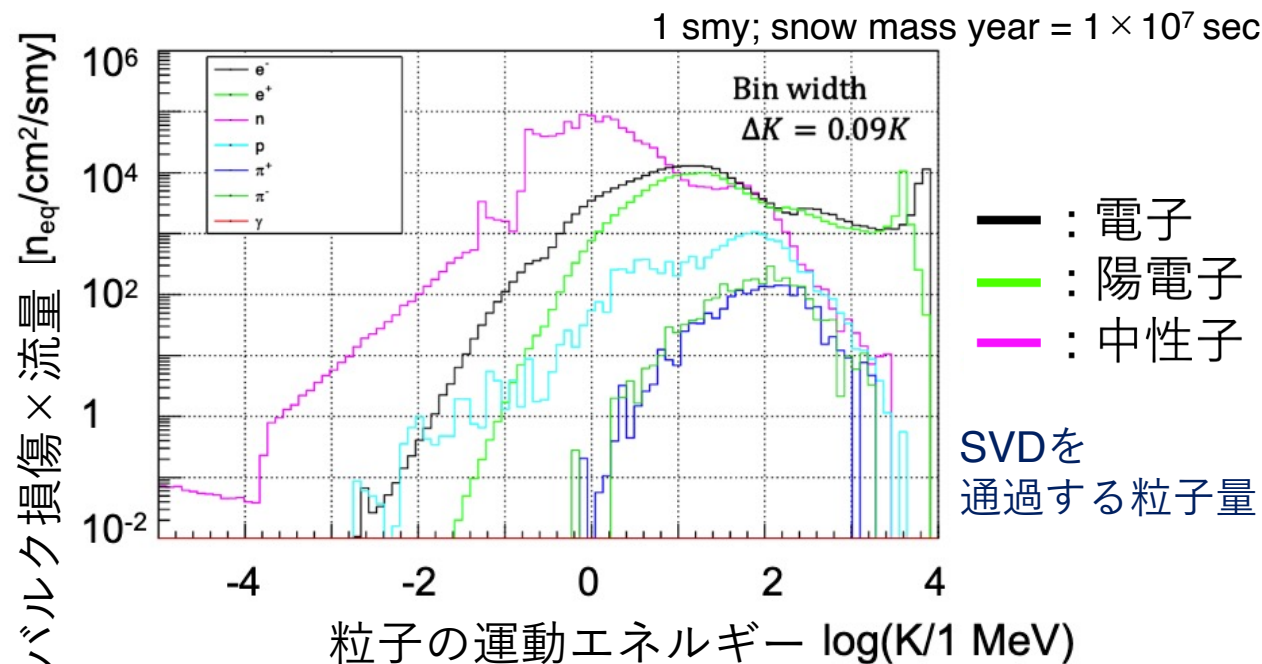
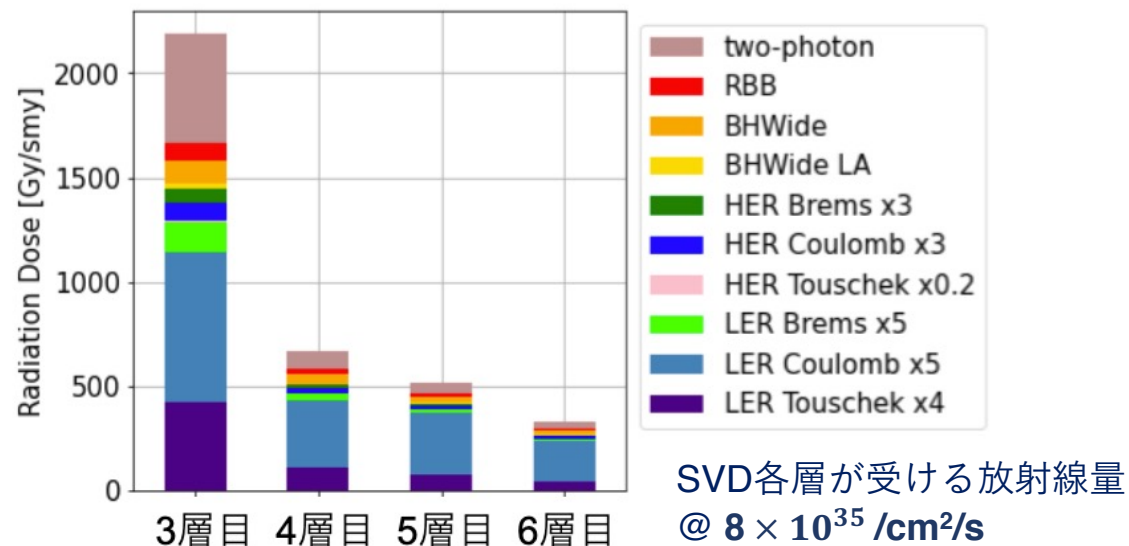
1. 放射線によってセンサーバルク層Si結晶中の原子が吹き飛ばされ、欠陥が生じる。
 2. 欠陥がP型不純物として振る舞う。
 3. N型バルク層がP型に変化する。(Type inversion)
- ☹️ 全空乏化電圧(V_{FD})が変化、増大する。
- ☹️ リーク電流増大 → ノイズ増大

★ リーク電流、キャパシタンスから V_{FD} を調べる。

- SuperKEKB加速器は現在ルミノシティを強化中
目標ルミノシティ = $6 \times 10^{35} / \text{cm}^2/\text{s}$ を目指す

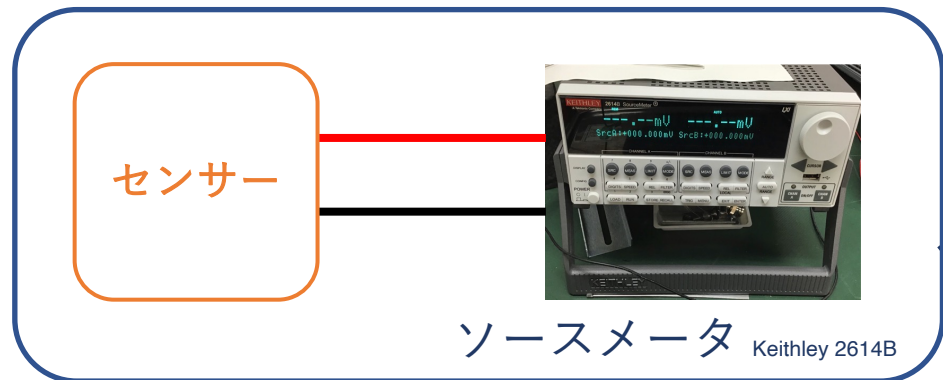
- SVDが受けるバックグラウンド放射線量も増加
最内層SVD & 目標ルミノシティでの運転
10年間累計放射線量 20 ~ 30 kGyと推定

- 放射線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 + バルク損傷
- 電子線照射で実際の損傷に近い損傷を与えられる
中性子はバルク損傷のみ

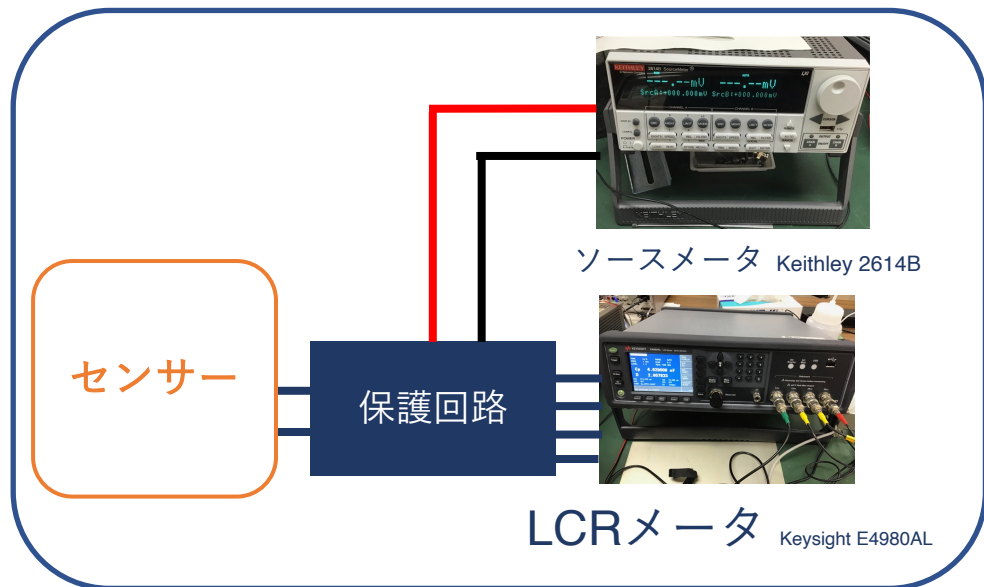


放射線損傷を調べるためにIV、CV、 C_{int} の測定システムを開発した

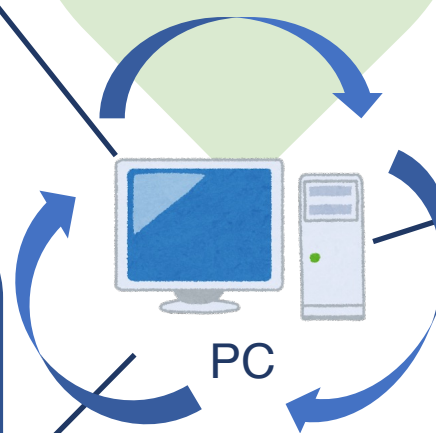
IV測定



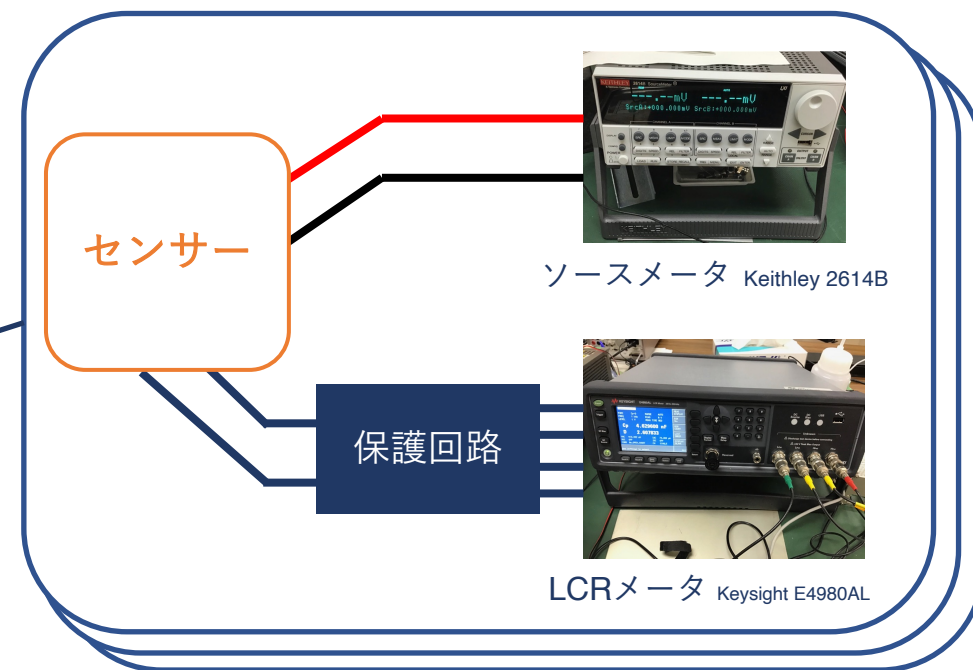
CV測定



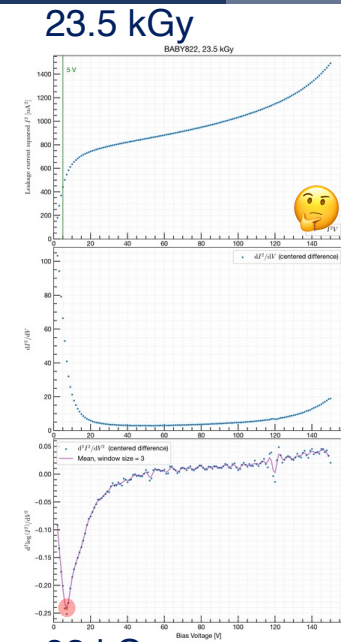
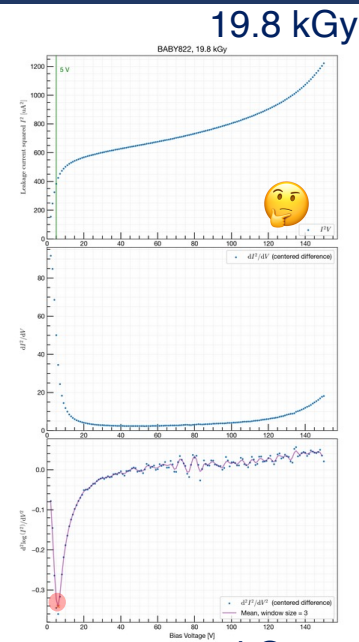
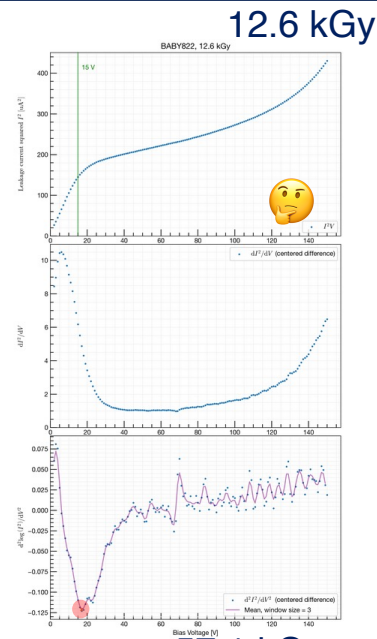
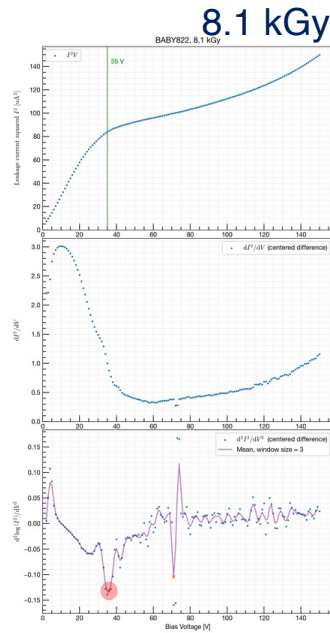
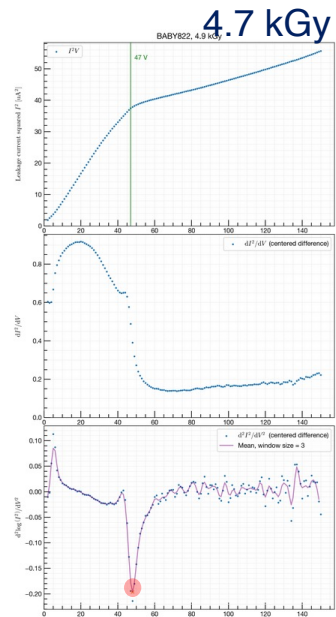
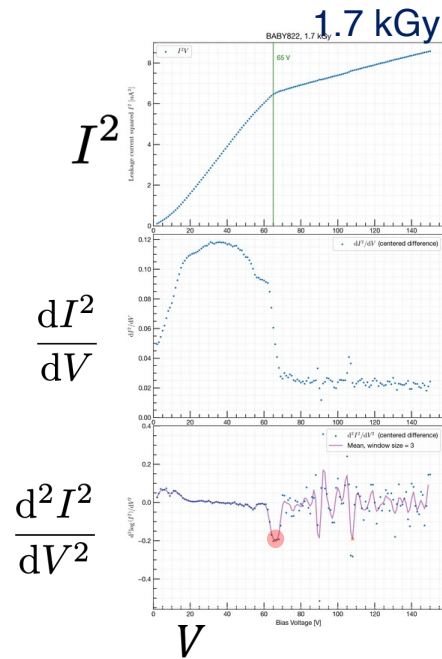
回路切替
データ取得
ソースメータ操作
LCRメータ操作
温度計測



C_{int} 測定 × チャンネル分



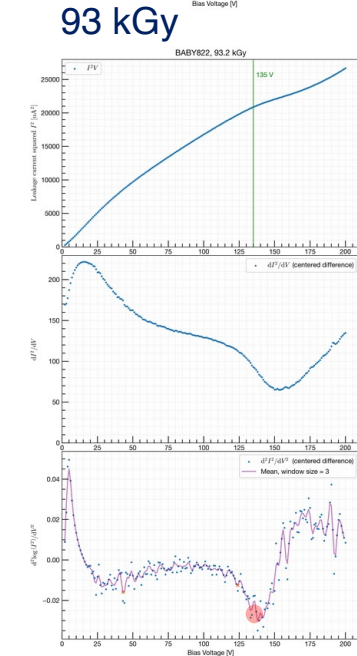
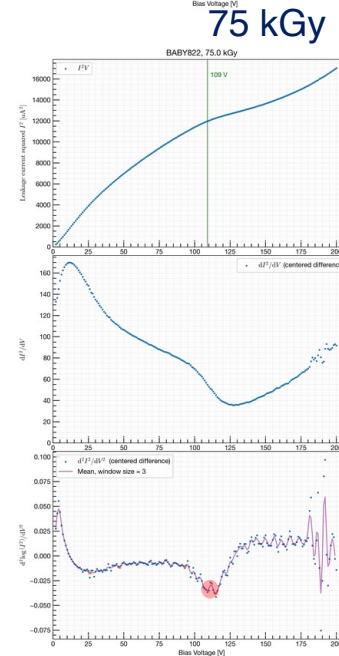
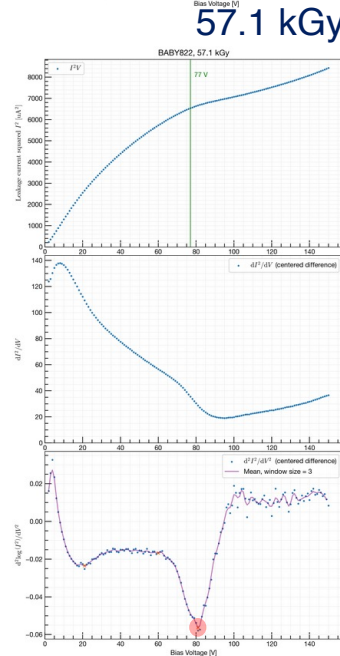
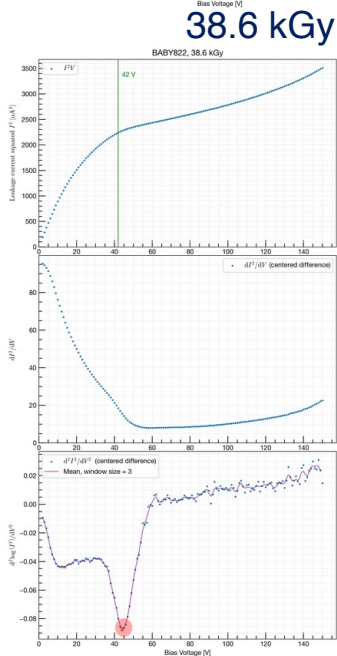
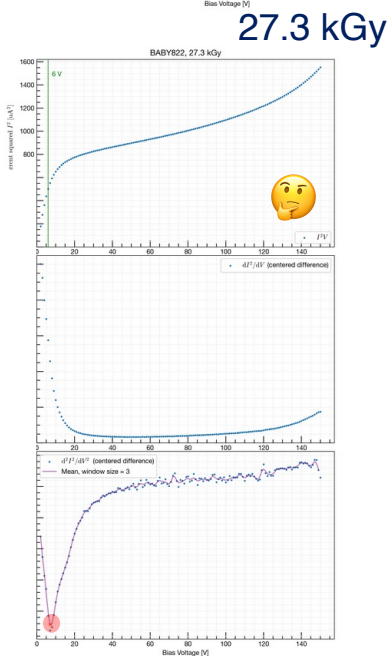
遠隔で測定回路の切替やIV、CV、 C_{int} の測定が可能のため、照射と測定を交互に行うことができた。



● :極小

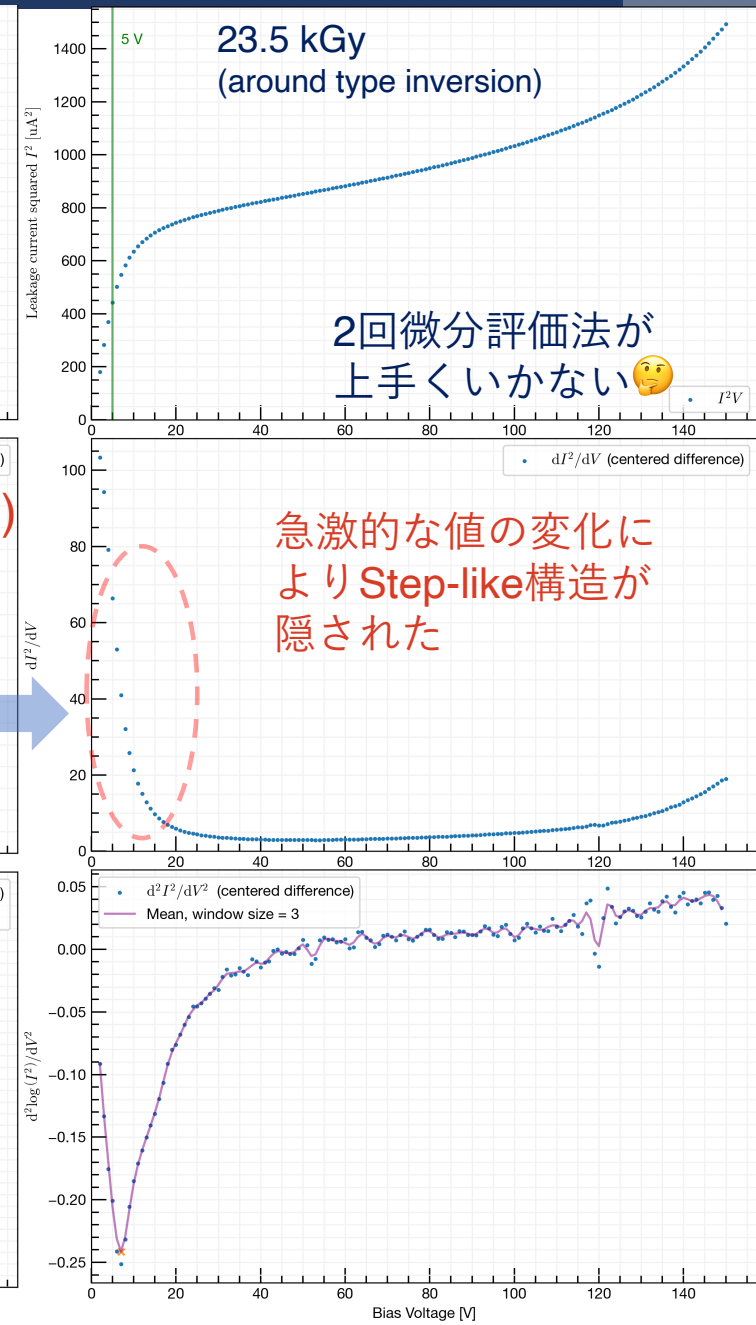
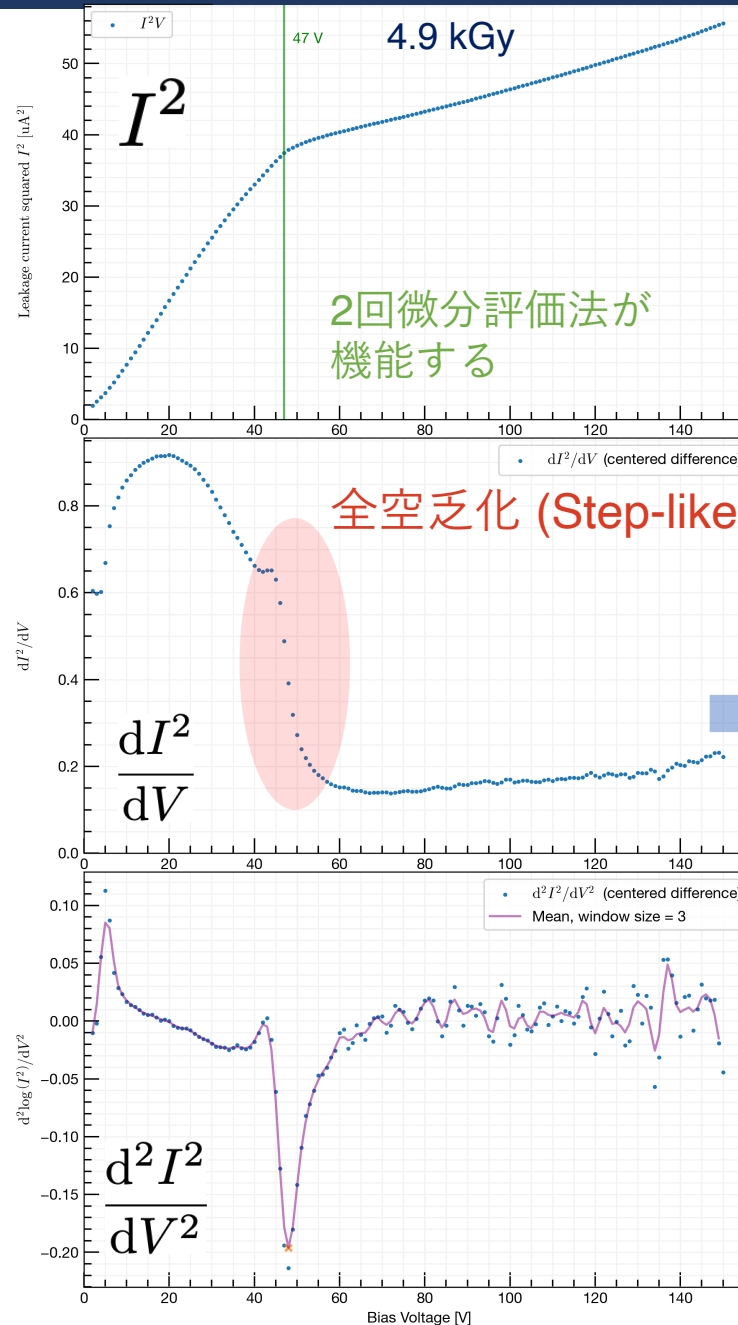
■ $V_{FD} > 25 \text{ V}$ 領域：
2回微分による評価法がIV曲線の遷移を良く評価できる

■ 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



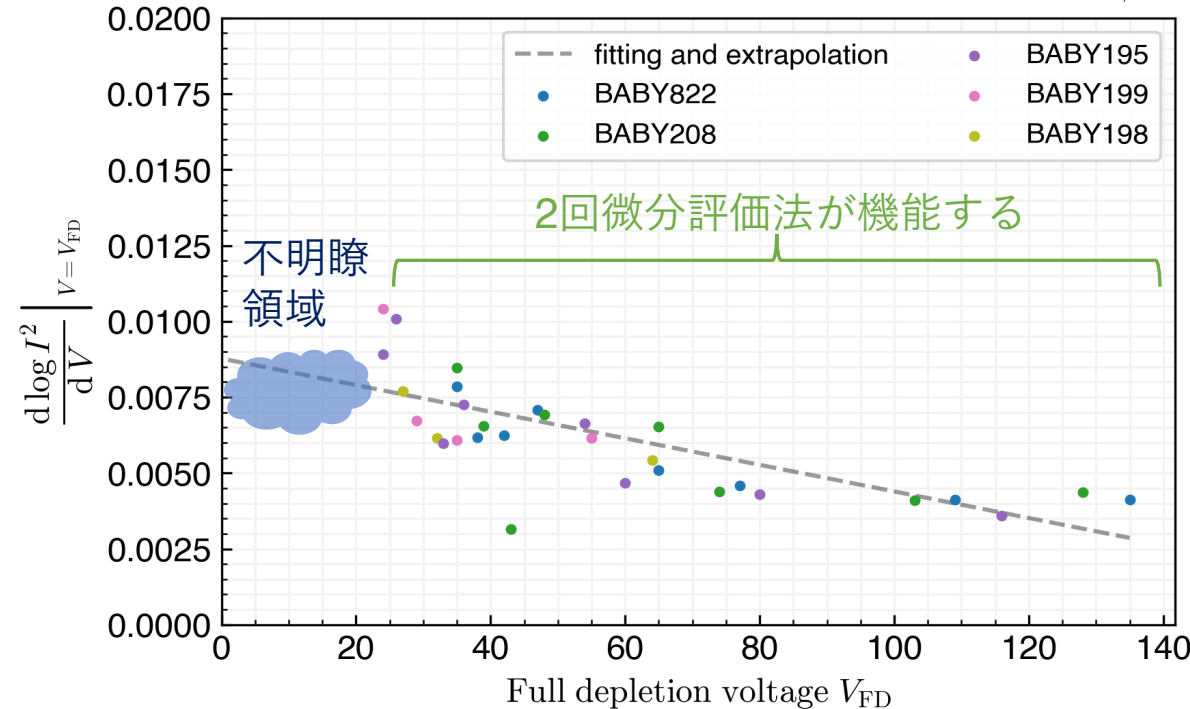
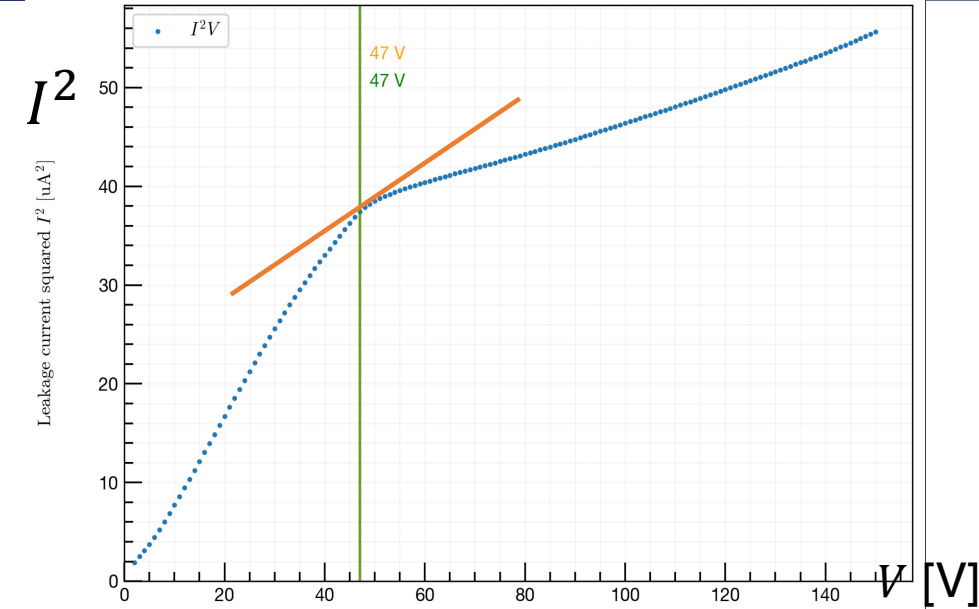
- 一次微分の値 (IVの傾き) に着目し、Type inversion付近の V_{FD} を定義する。
 - 2回微分評価法が機能する $V_{FD} > 25$ V 領域から外挿を行い、全空乏化を定義

- 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

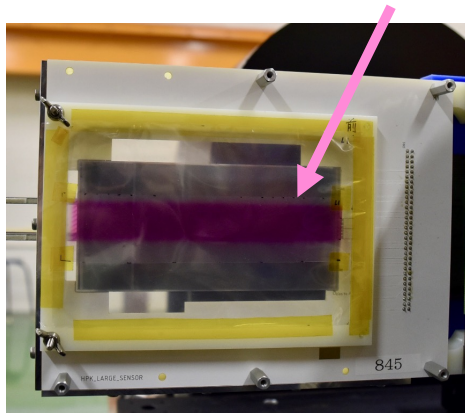
$$\underbrace{\frac{1}{I^2}}_{\text{Normalization}} \underbrace{\frac{dI^2}{dV}}_{\text{slope}} = \frac{d \log I^2}{dV}$$

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



Irradiated volume 16 mm x 12 cm x 320 um



largeセンサーのダメージファクタとminiセンサーのものを比較する。

照射領域を上 の値と仮定して計算した

Preliminary

sensor	α [A/cm]
HPK845	2.8×10^{-17}

Preliminary

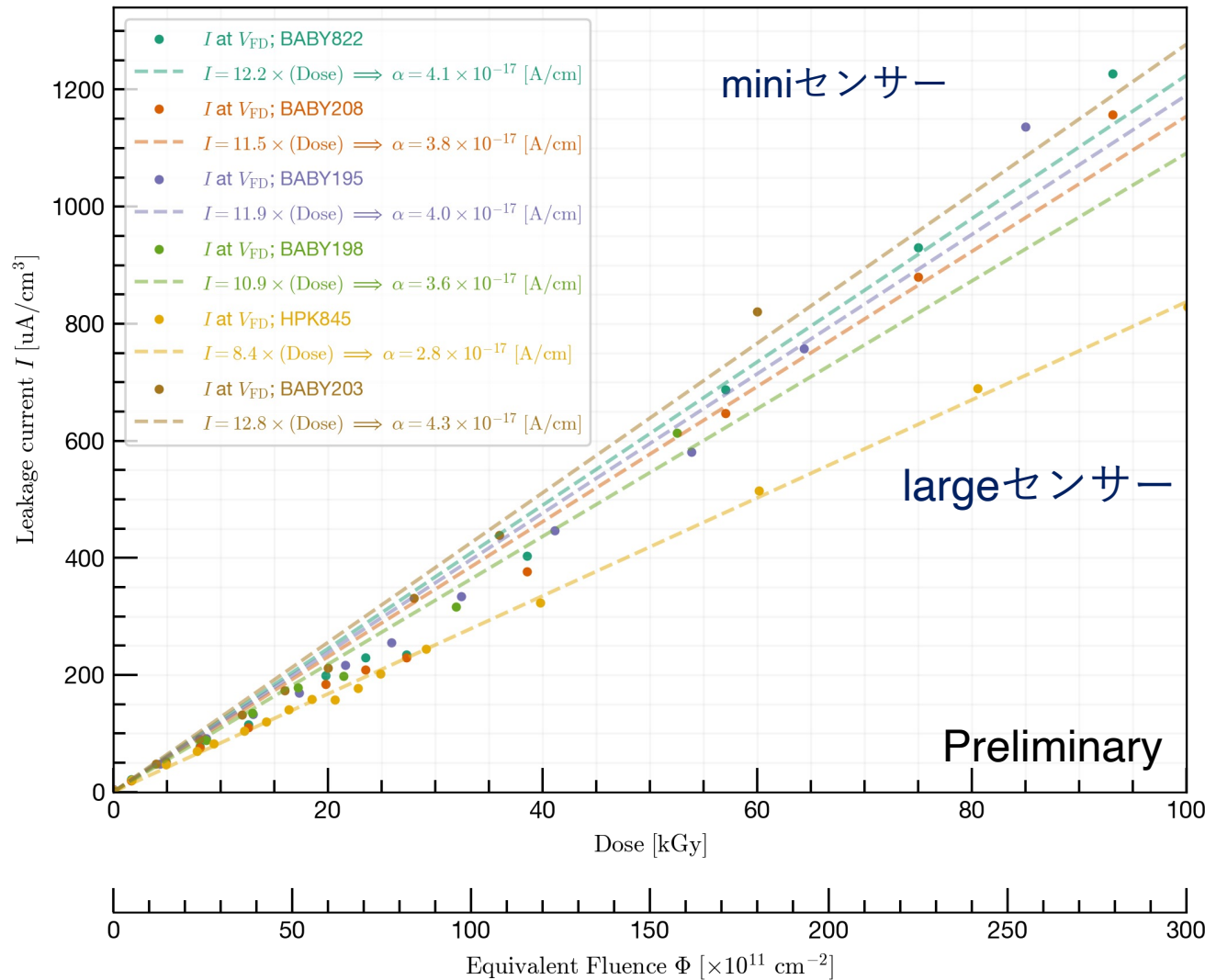
sensor	α [A/cm]
BABY822	4.1×10^{-17}
BABY208	3.8×10^{-17}
BABY195	4.0×10^{-17}
BABY198	3.6×10^{-17}
BABY203	4.3×10^{-17}
MEAN	4.0×10^{-17}

■ α の桁数は同じ

■ 係数の違い：電子ビームは広がりを持つため、とりわけ照射領域の縁では不均一の照射となることが考えられる。この不均一照射が係数の違いに寄与したと考える。

17.0 ± 0.2 °C

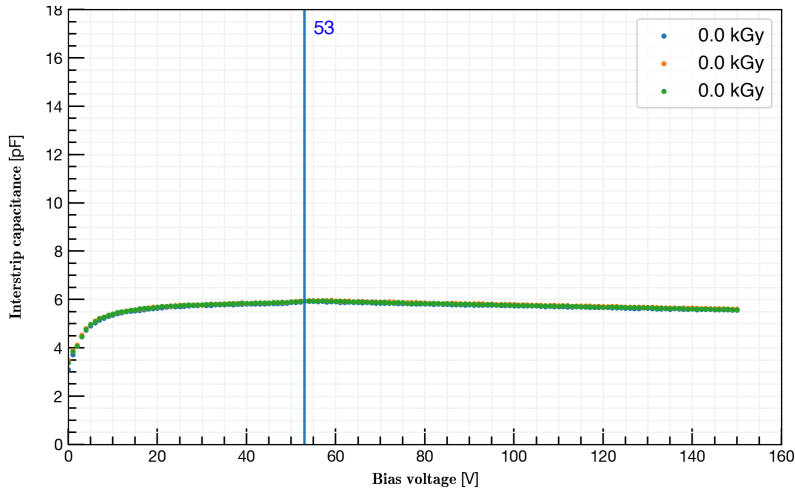
$$I = \alpha \Phi_{\text{fluence}}$$



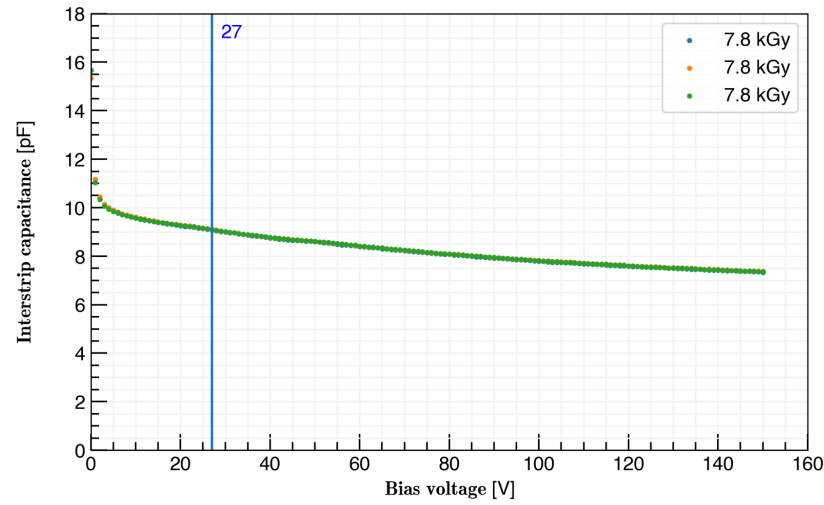
Results just after the irradiation (w/o annealing)

Blue vertex line is V_{FD}

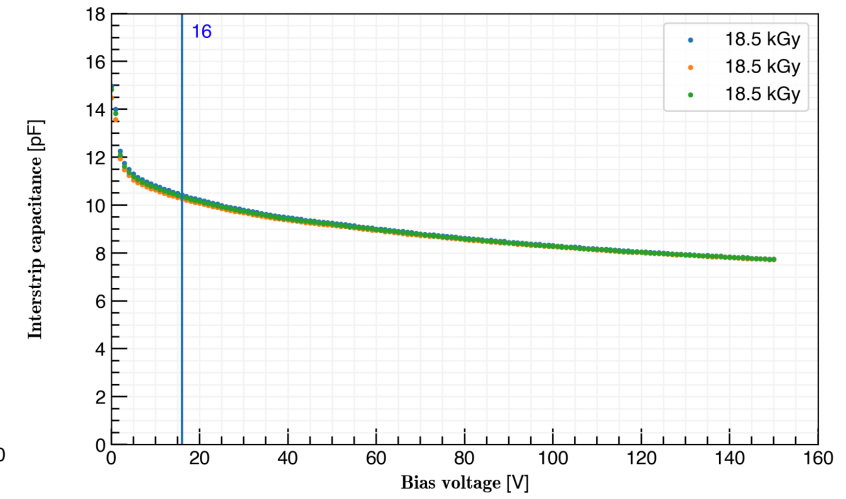
0 kGy



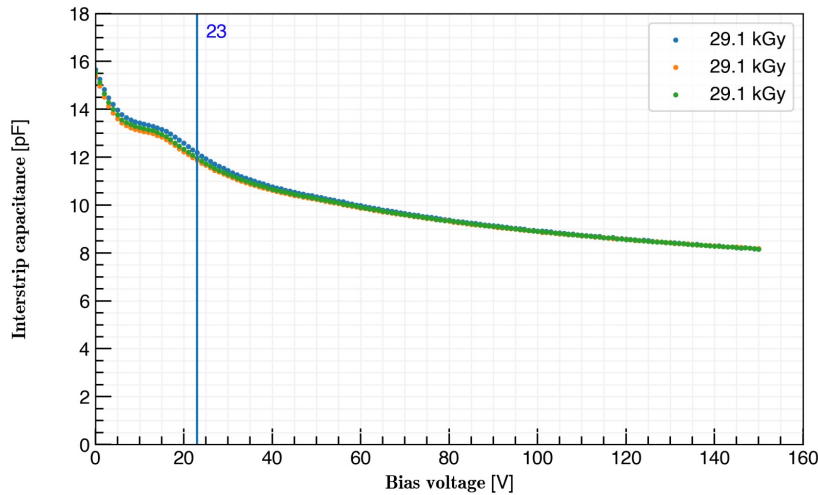
7.8 kGy



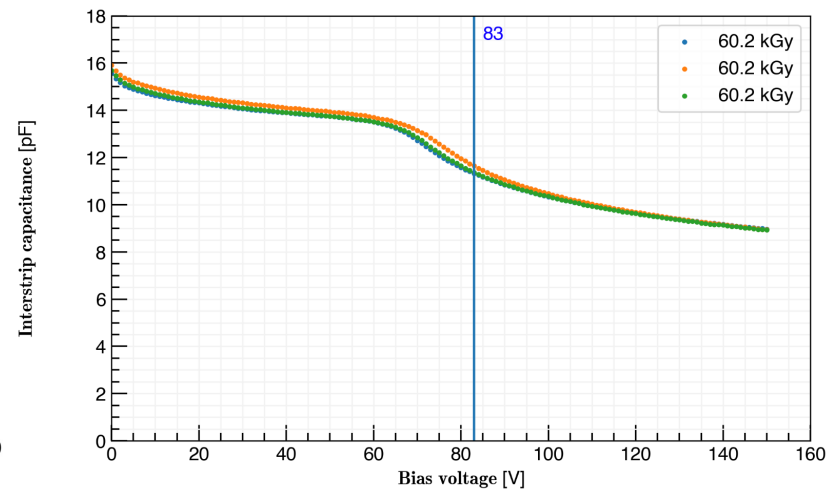
18.5 kGy



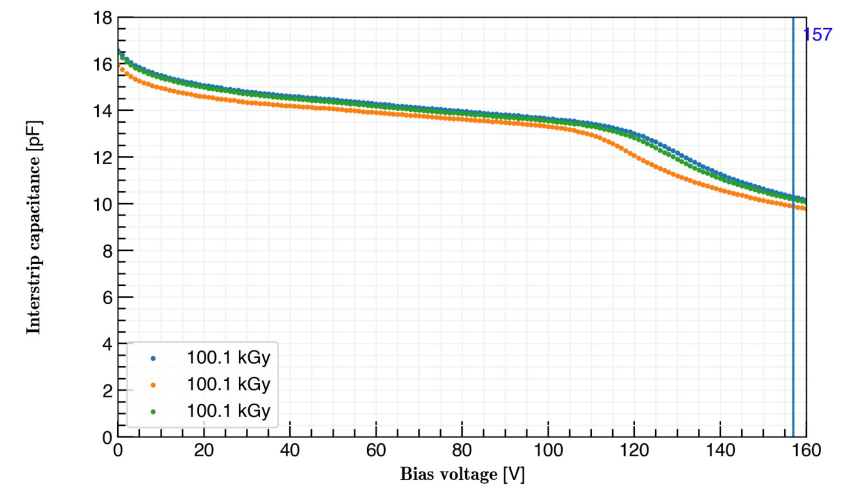
29.1 kGy



60.2 kGy



100 kGy



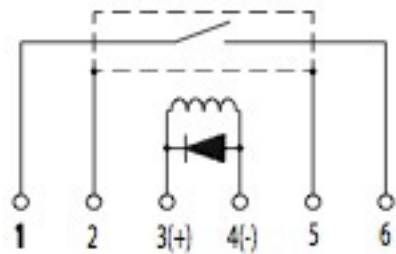
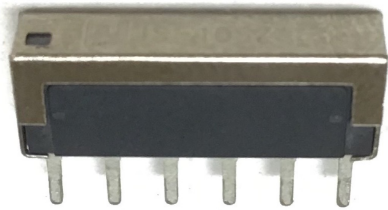
PEX-234104

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

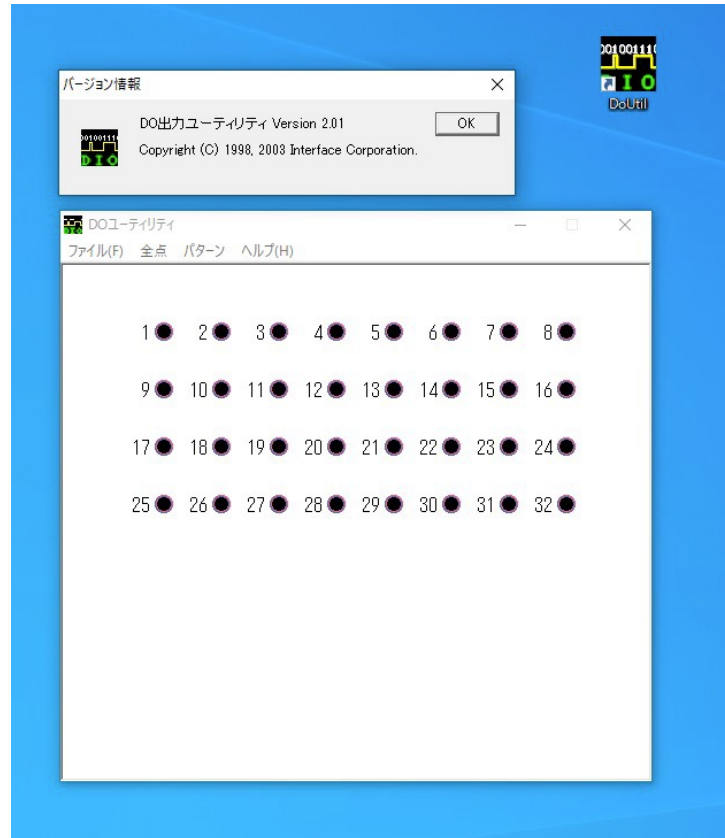


サンヨー工業株式会社

JS-105Z



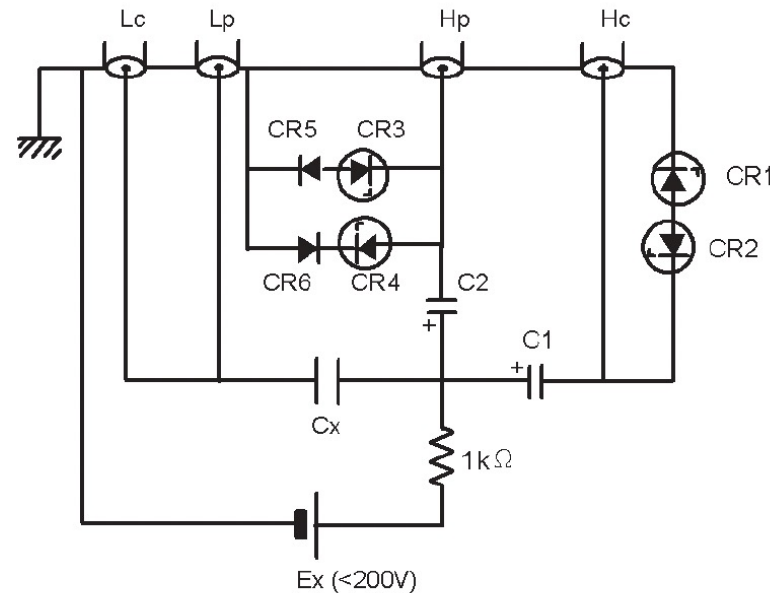
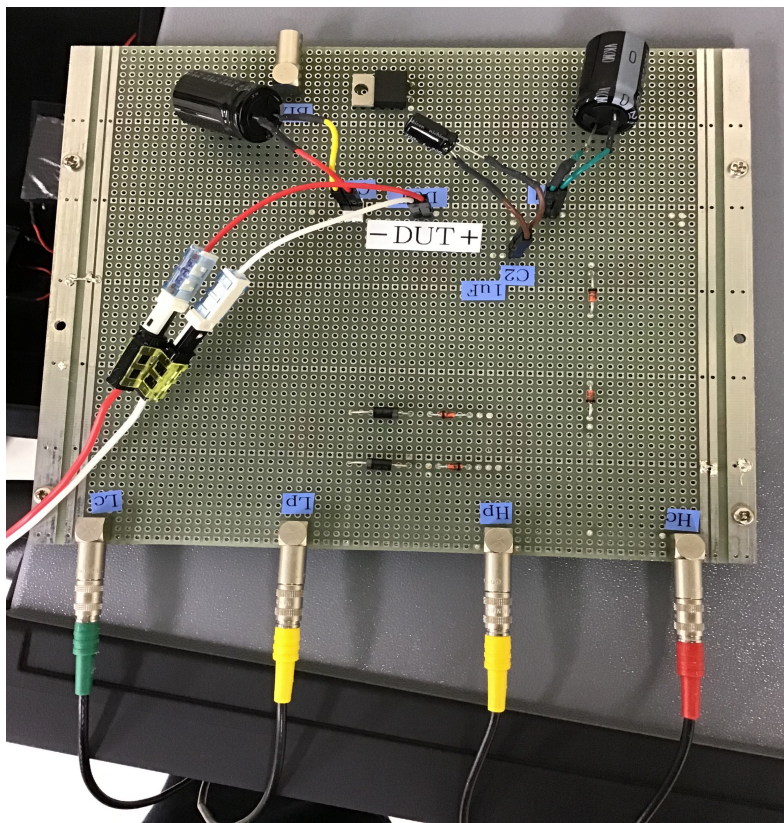
Vision & Freedom
株式会社 インタフェース



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

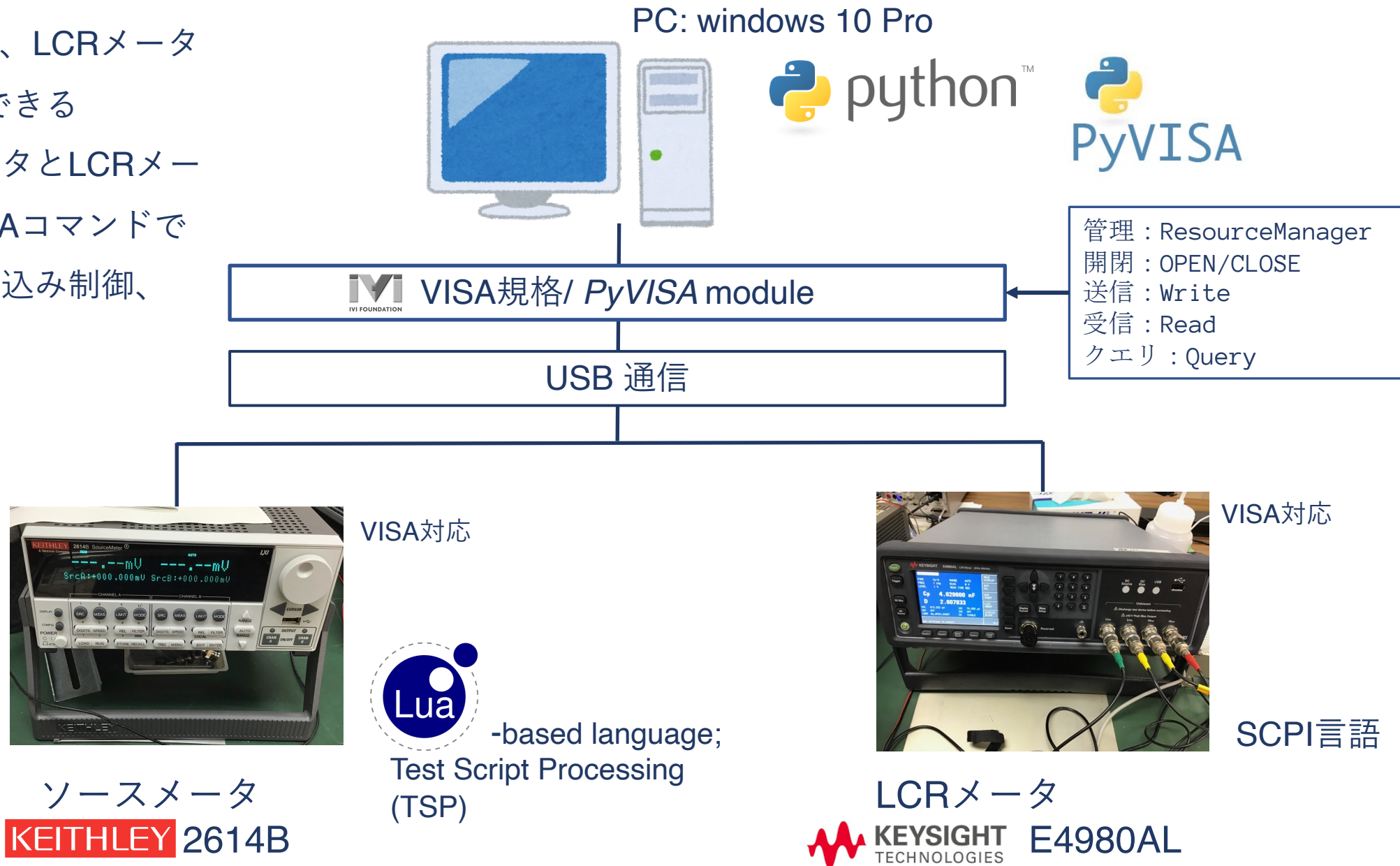
CR1, CR2 : 部品番号 : 1902-0176
ツェナーダイオード, 47V, 5%, 1W

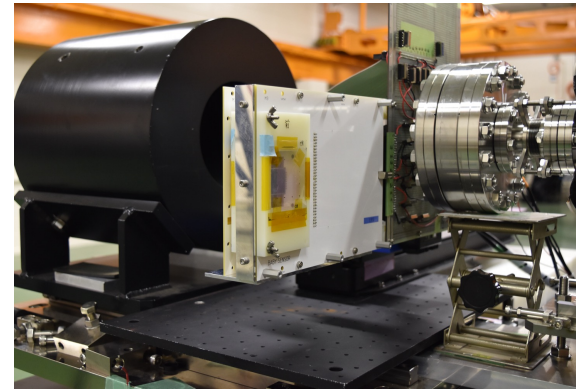
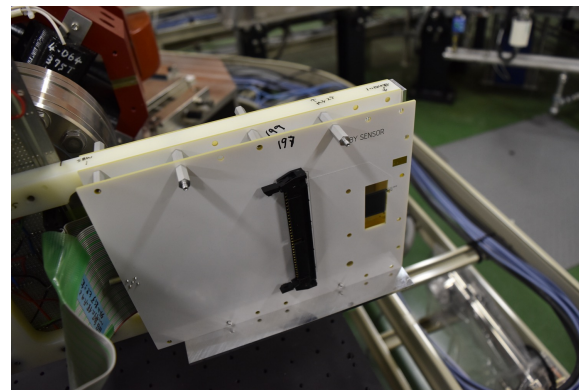
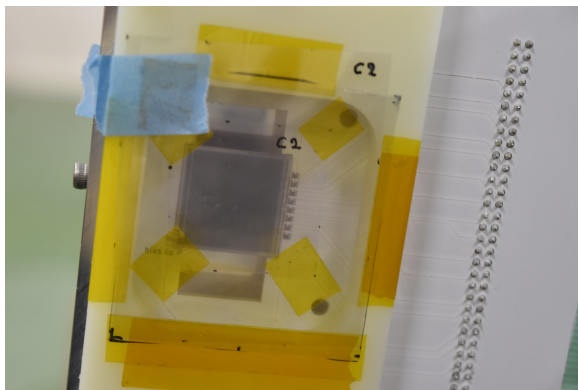
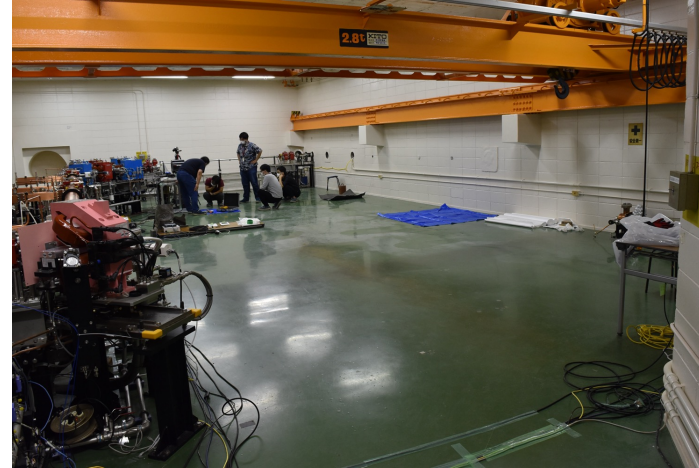
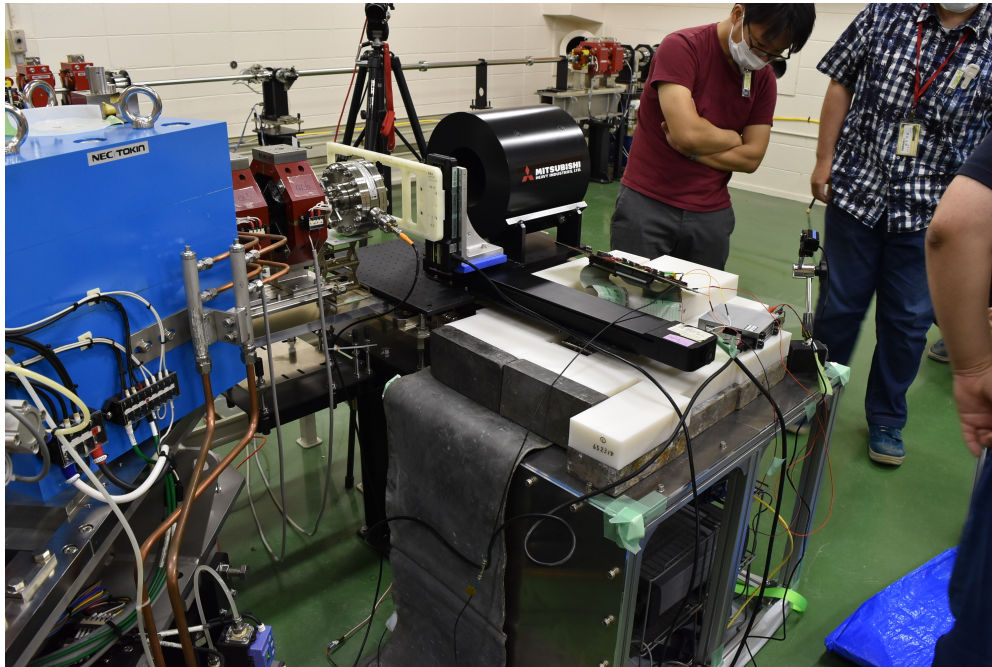
CR3, CR4 : 部品番号 : 1902-1299
ツェナーダイオード, 3.3V, 5%, 1W

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

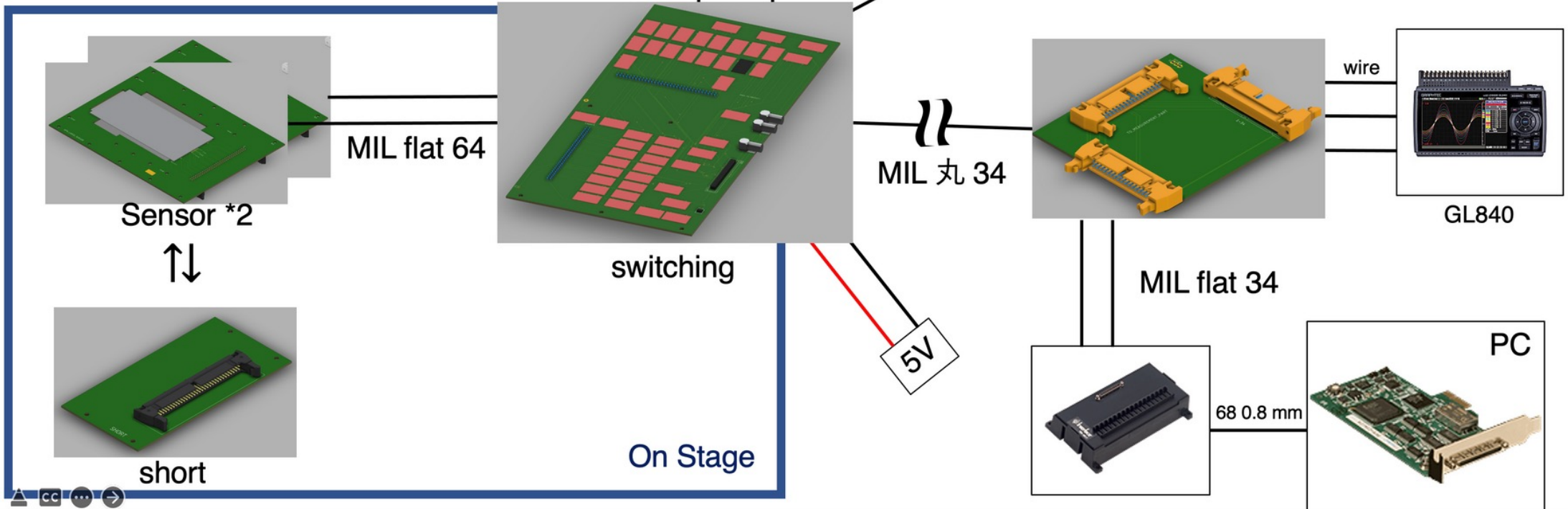
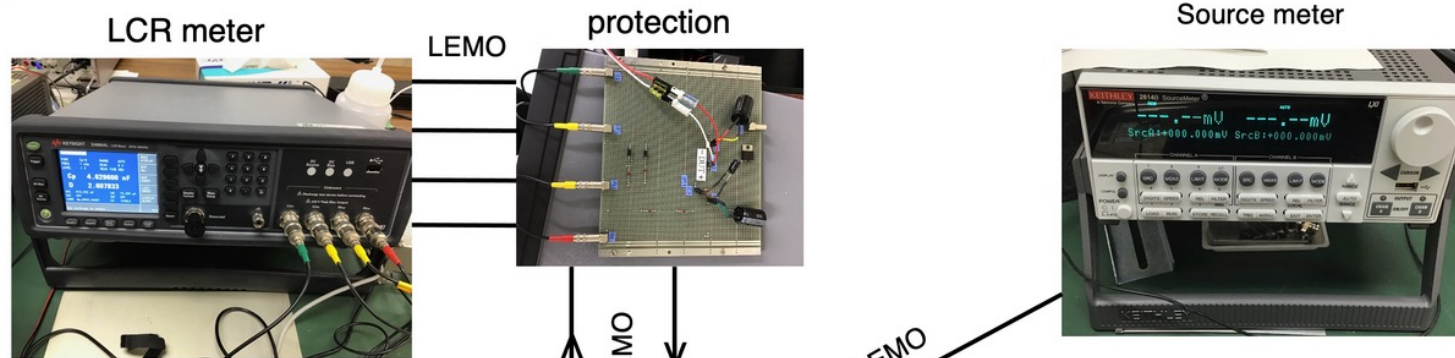
- ✓ ソースメータはTSP、LCRメータはSCPI言語で制御できる
- ✓ 使用したソースメータとLCRメータはVISA対応。VISAコマンドでサポート言語を送り込み制御、データ取得できる。
- ✓ Pythonでwrap



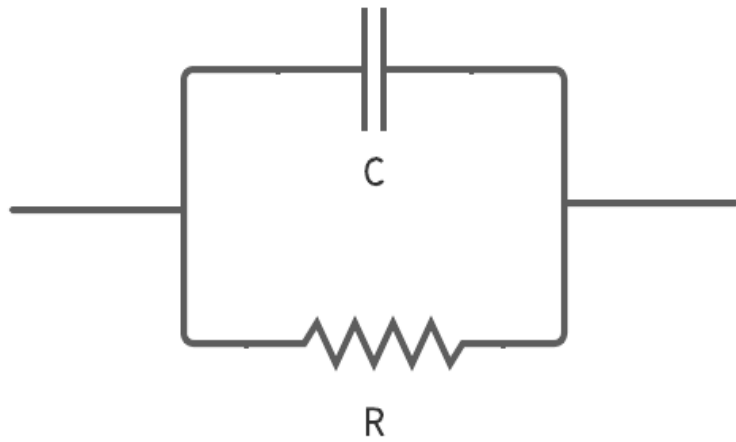


Cabling

1



DUTにおいて



並行



直列