

Belle II 中央飛跡検出器の実機環境下におけるAging試験

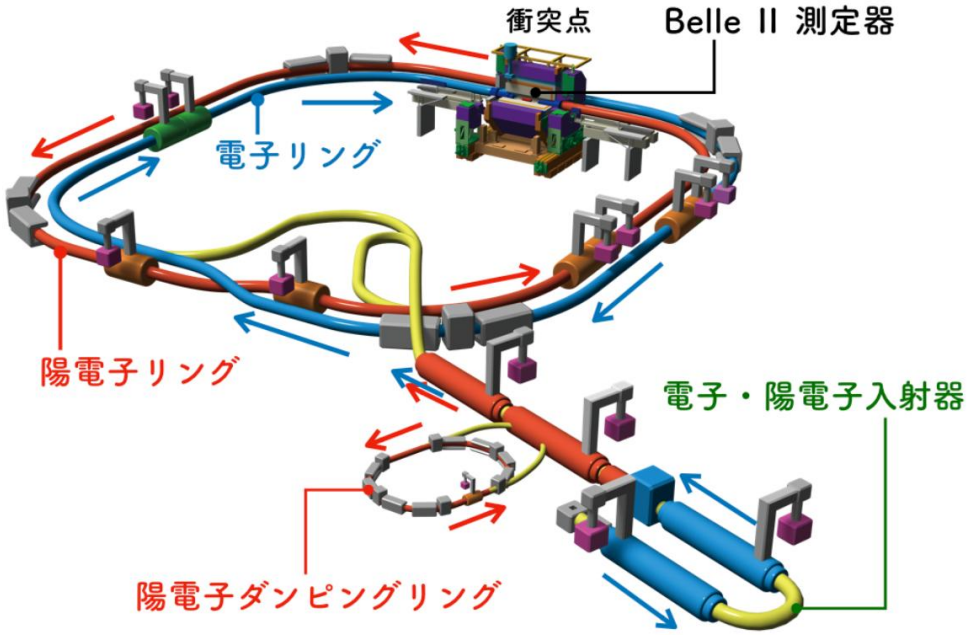
奈良女子大学高エネルギー物理学研究室　修士2年

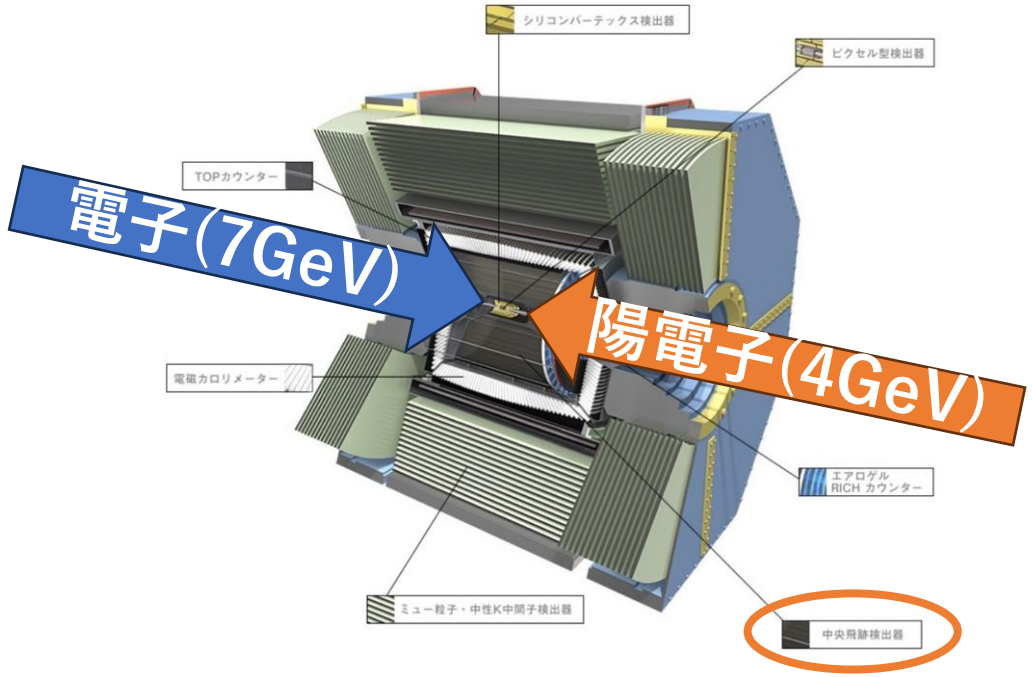
岡本　美咲

SuperKEKB/Belle II 実験

- 高エネルギー加速器研究機構(つくば)
- SuperKEKB加速器：7GeVの電子と4GeVの陽電子を衝突させ、B中間子・反B中間子を生成
- Belle II測定器：衝突点の周囲を覆うように配置された役割の異なる7種類の検出器で構成
- 粒子・反粒子の対称性の破れ
- 新しい物理法則の兆候

[中央飛跡検出器CDC]
内部を$He\text{-}C_2H_6$(50:50)の混合ガスで満たしたワイヤードリフトチェンバー
役割：荷電粒子の測定





研究動機

- CDCはガス増幅を用いて信号を形成
- 信号の検出効率維持のためガス増幅率を下げないことはBelle II実験において重要
- 長期間運転すると放電による陽極ワイヤーへのゴミの付着等により増幅率が下がること(**Aging効果**)が知られている
- 2019年稼働開始から現在で最内層は積算電荷量(被ばく量の指標)約250mC/cm
- 目標ルミノシティで運転した場合300mC/cm/year
- CDCの長期運転による影響を確認しておくことは大切

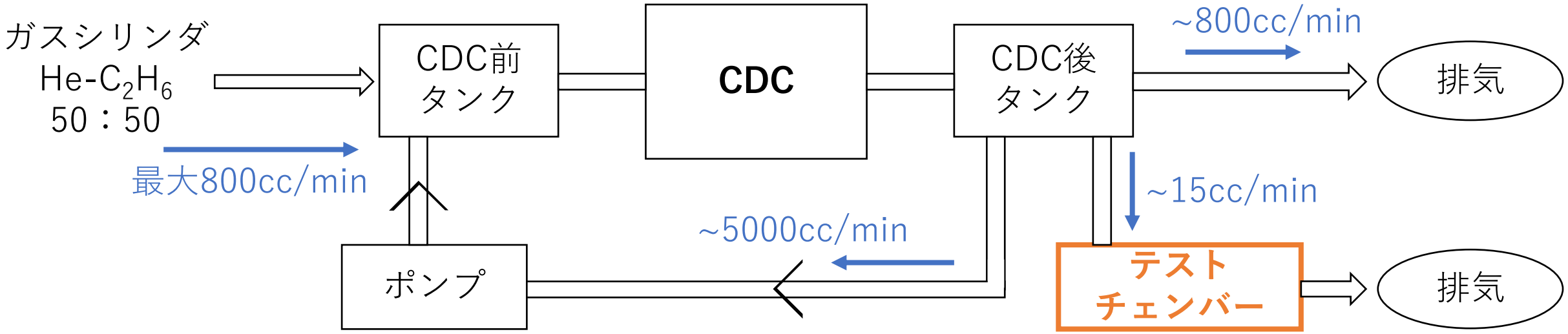
⇒積算電荷量に対する増幅率の変化を明瞭化したい

- 実機の複雑な動作環境を再現するのは難しい
- 使用可能な線源の強度が限られており、照射量の確保が困難(1C/cmに500日以上)

⇒実機の動作環境を利用したAging試験はできないか

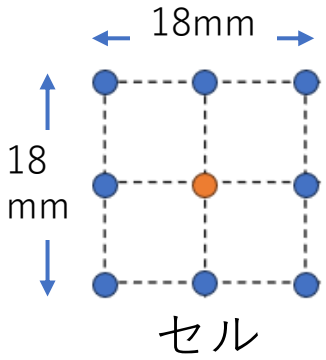
実機環境を利用したAging試験

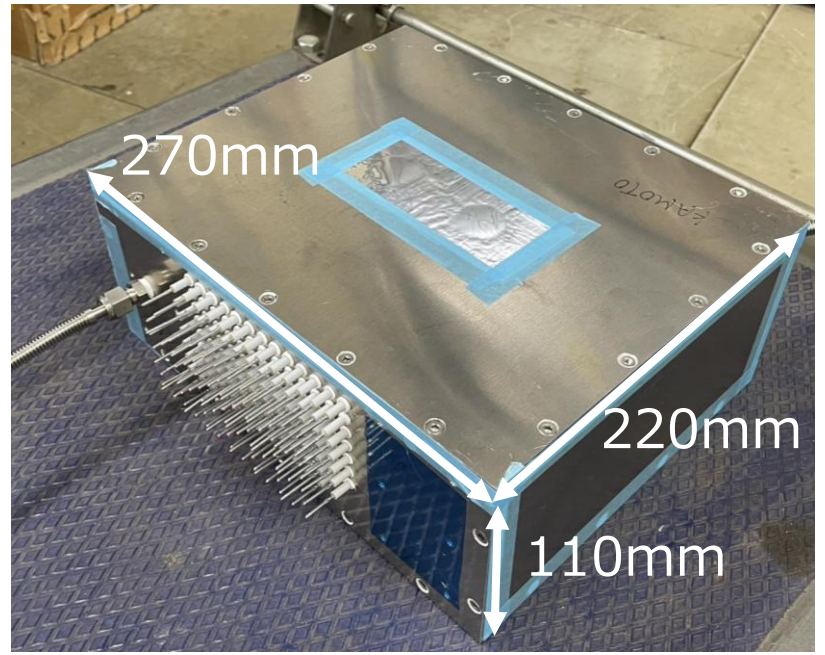
- **CDC通過後のガスを通すテストチェンバーに加速器のビームバックグラウンドを当てる**Aging試験を実施
  - CDCガスシステムのガスを使用することで、ガスに関して実機と同じ環境での試験が可能
  - SuperKEKB加速器のバックグラウンドを使えば積算電荷量が他の線源よりたまる可能性
  - HVやガス流量等の条件変更およびワイヤー自体の分析も可能



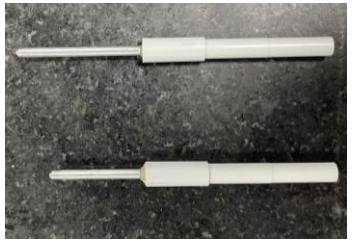
テストチェンバー製作

- クリーンルーム内で製作、清潔な服・マスク・帽子・靴・手袋を着用



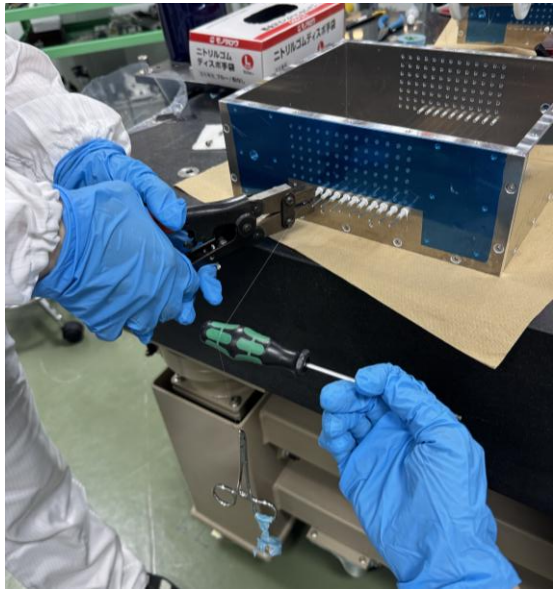


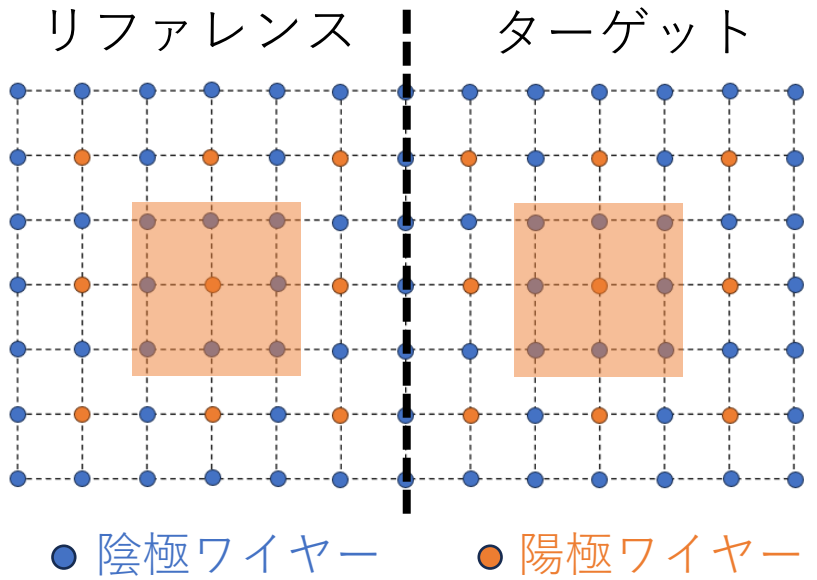
○主な材料
- 金メッキタングステンワイヤー(直径30μm)
- アルミニウム合金ワイヤー(直径126μm)
- フィードスルー
- RTVシリコーン
- アルミナイズドマイラ





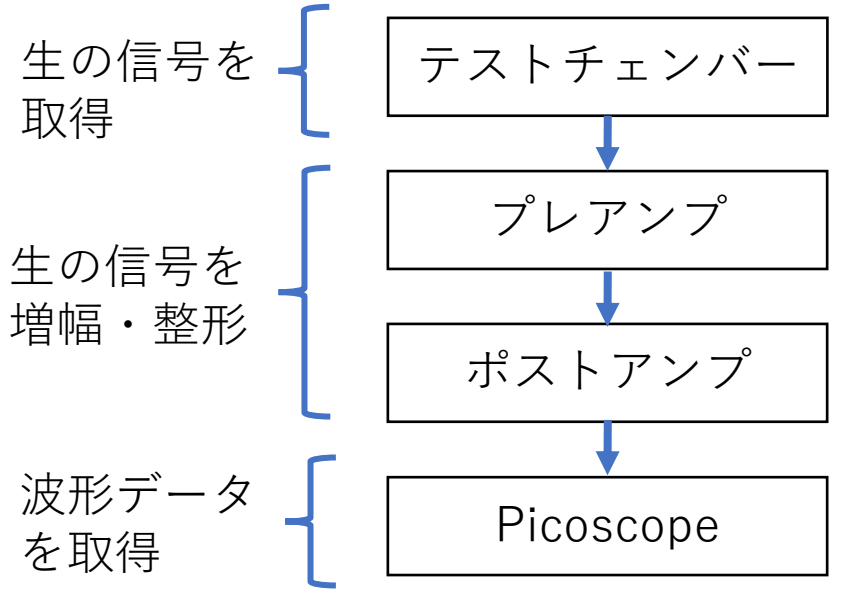
3×6セル、ワイヤー長20㎝の
マルチワイヤーチェンバー

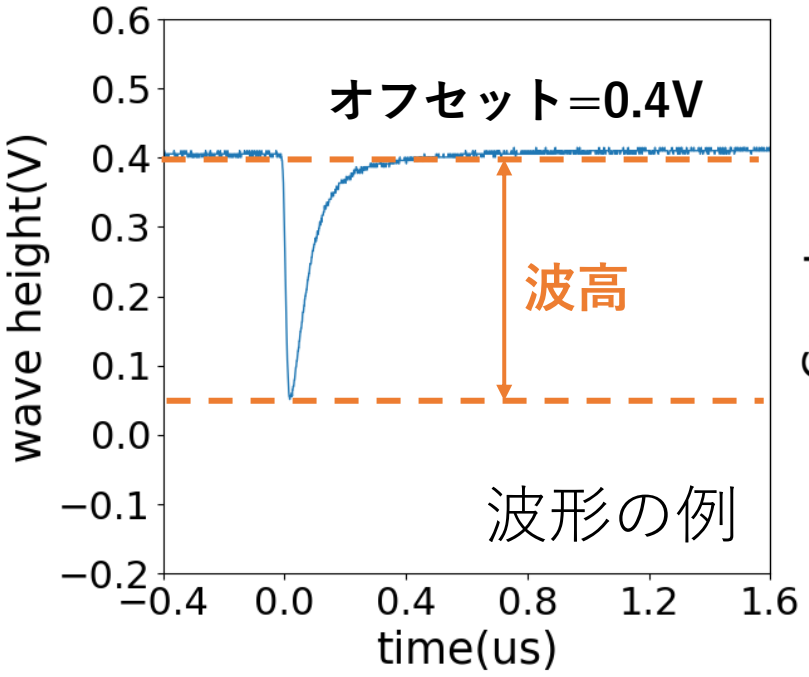


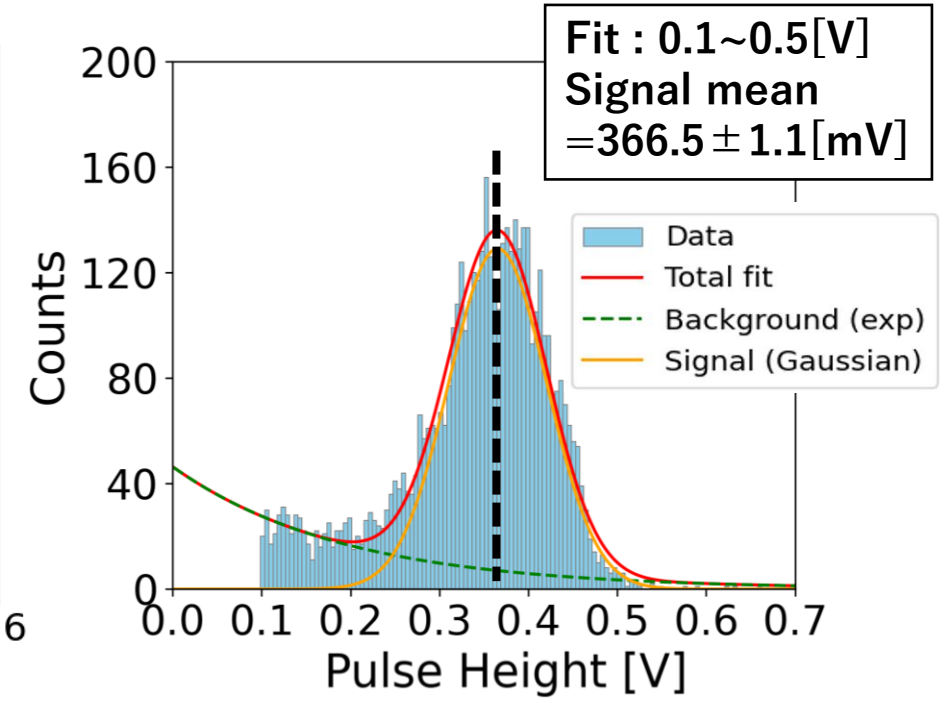


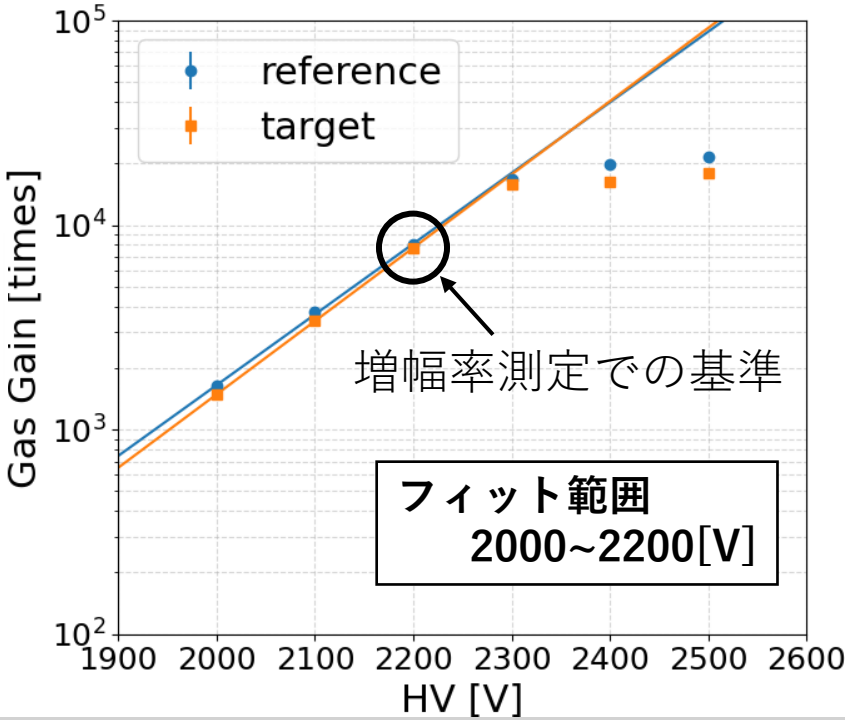
テストチェンバー動作確認

- ガス：ガスシリンダから流したHe-C_2H_6(50:50)~15cc/min
- 線源：^{55}Fe(5.9keVの特性X線)
- Belle CDCのアンプを使って信号を増幅
- Picoscope3405Dで波形を5000イベント取得
- 波高分布を指数関数とガウス関数でフィット
- HVを変化させ、増幅率の線形性を確認

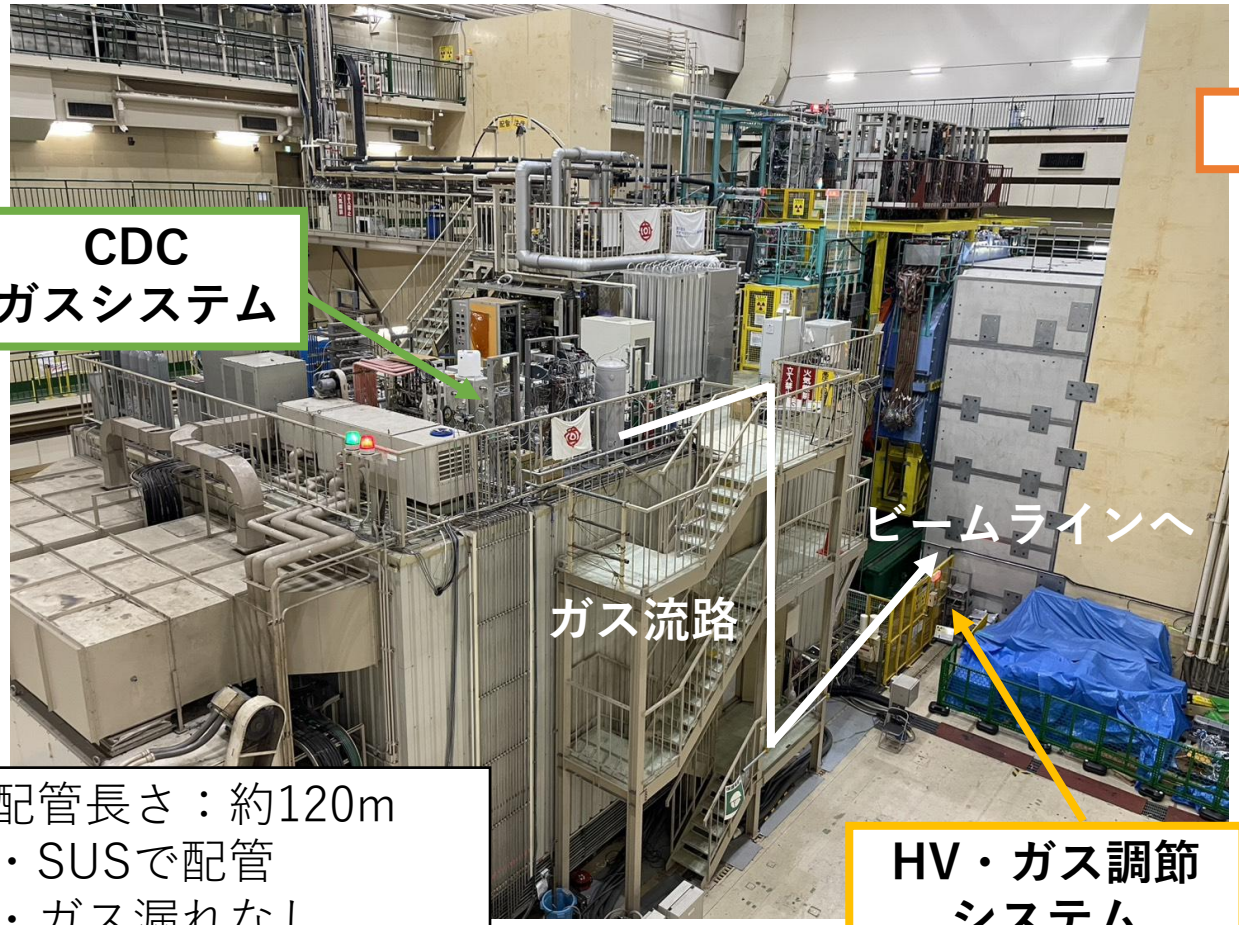






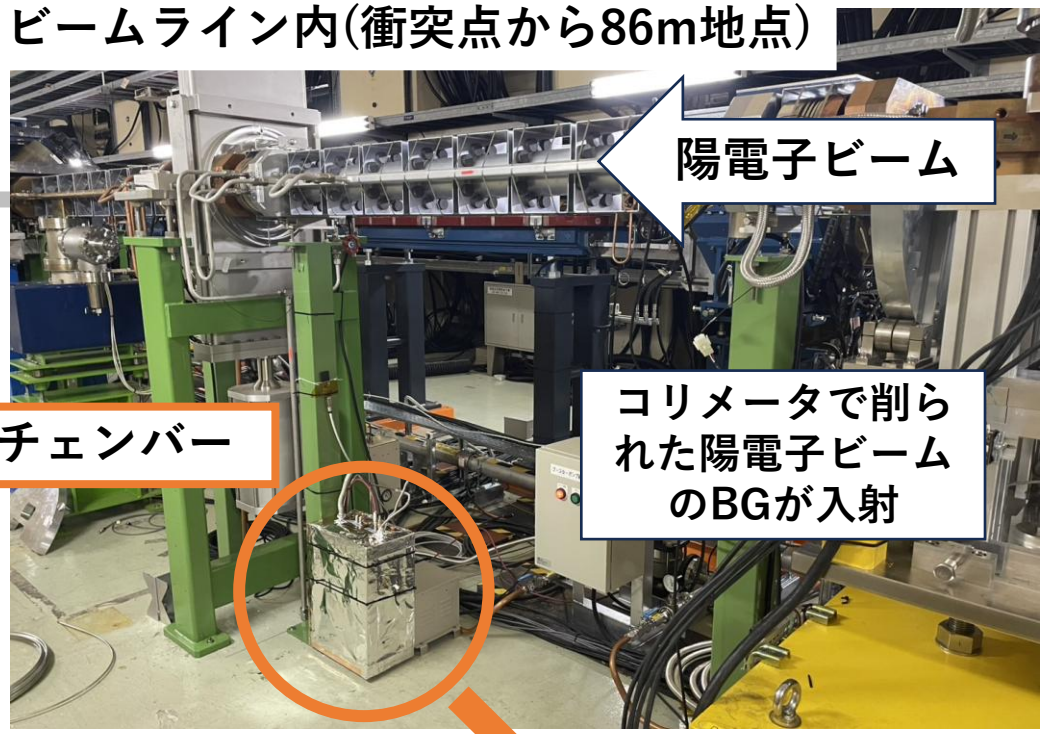


チェンバーのセットアップ

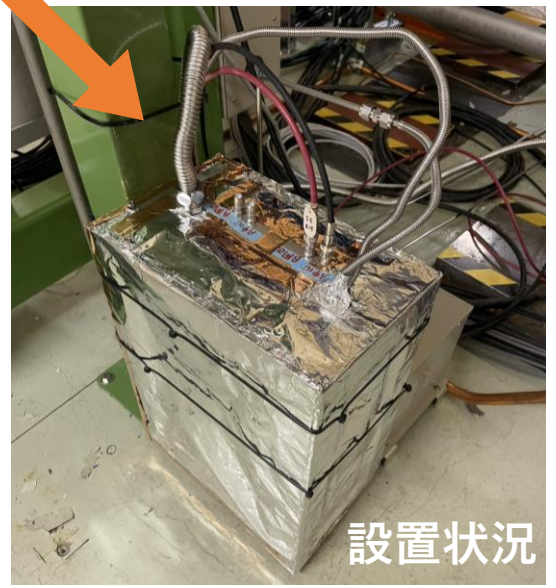


配管長さ：約120m
・SUSで配管
・ガス漏れなし

ビームライン内(衝突点から86m地点)

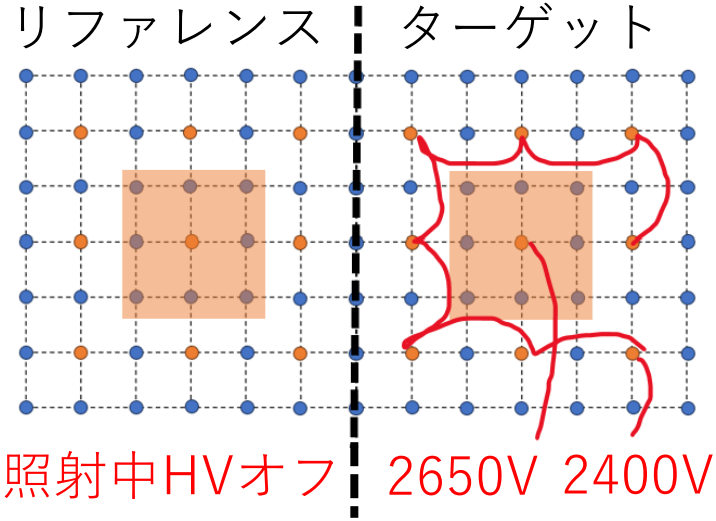


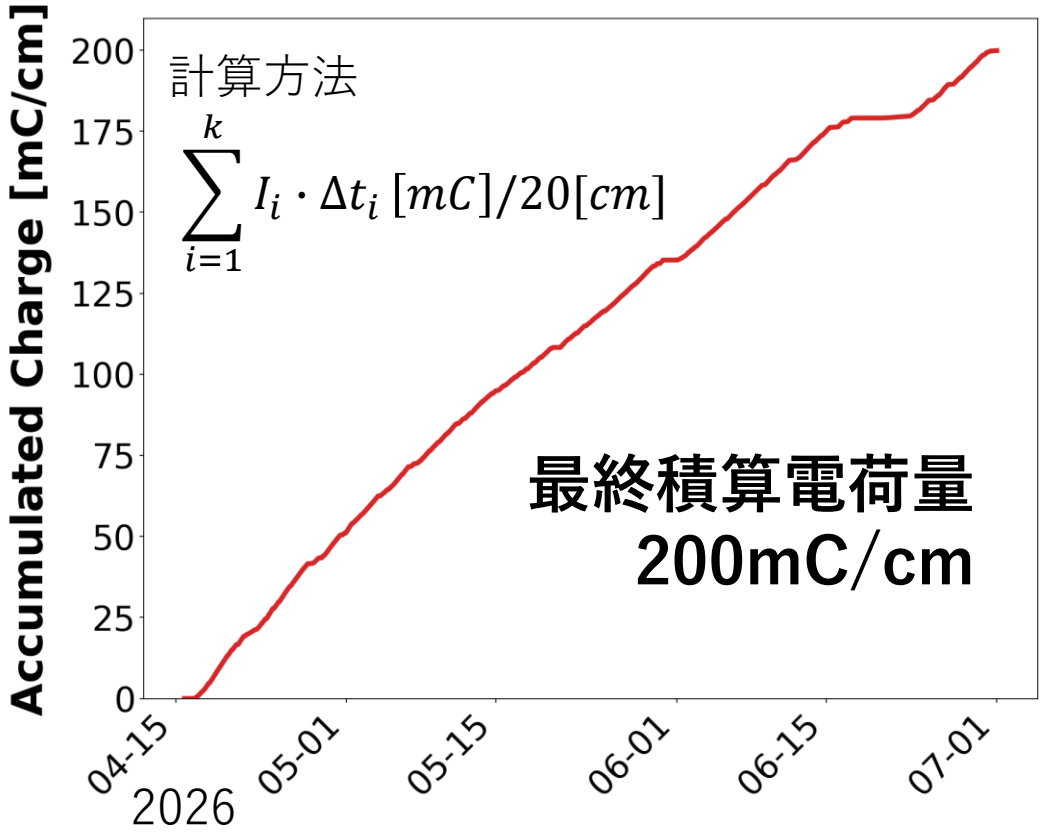


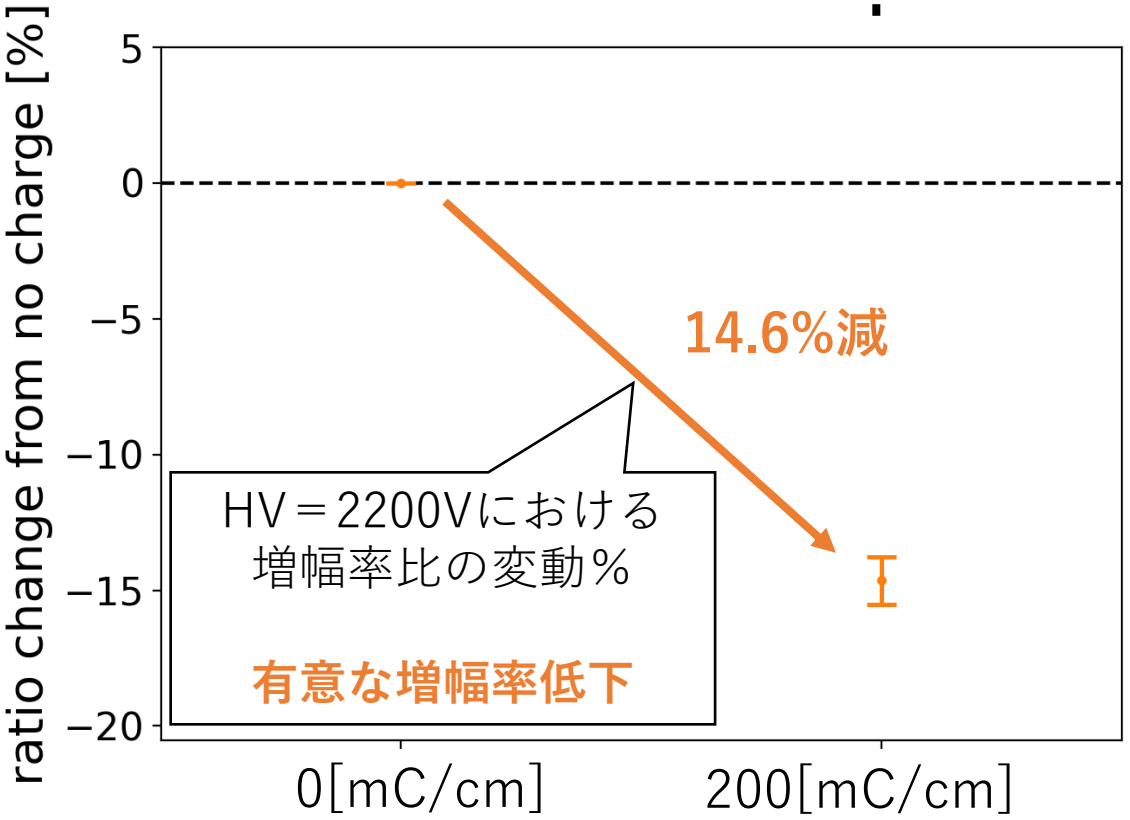


2026年度積算電荷量

- 加速器導入期間：2026年4月15日～2026年6月30日
- データロガーGL980(1Sa/s)でチェンバー電流を常に記録
- ガス：CDCガスシステムから分流したHe-C_2H_6(50:50) ~15cc/min
- ビーム停止時に増幅率測定、線源は^{55}Fe(5.9keV特性X線)







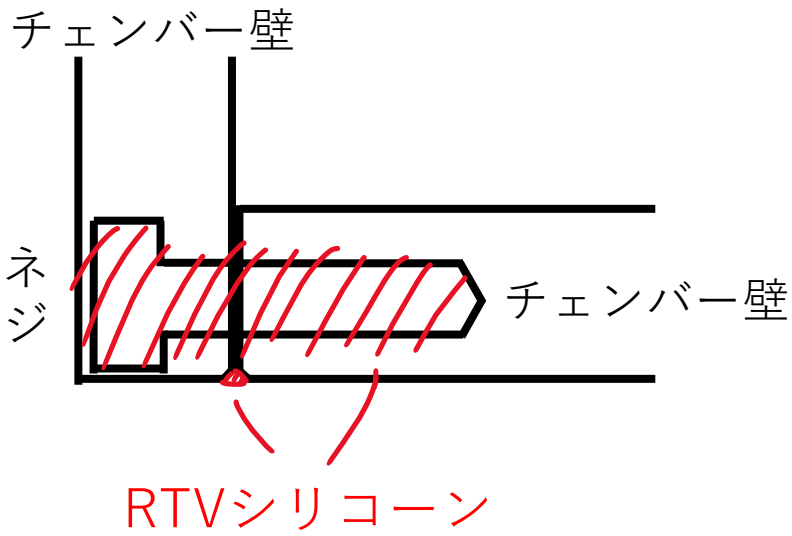
増幅率低下に関する考察

- 積算電荷量200mC/cm時点ですでにガス増幅率が低下
- CDC実機(一部で200mC/cm以上)では未だ増幅率の低下は見られていない
- **なぜこれほど早く増幅率が低下したのか疑問**
- 本研究と同時期に製作した同構造のテストチェンバーへのX線照射によるAging試験でも早期の増幅率低下が見られた

⇒**テストチェンバー自体に問題があるのではないか**

〇本研究で用いたテストチェンバーの懸念点

- アウトガスの影響
  - 製作して1年以内(実機は製作完了から約3年後に稼働開始)
  - 金属板やネジのシール材としてRTVシリコーンを使用
  - RTVシリコーンはAgingを起こしやすい　　など



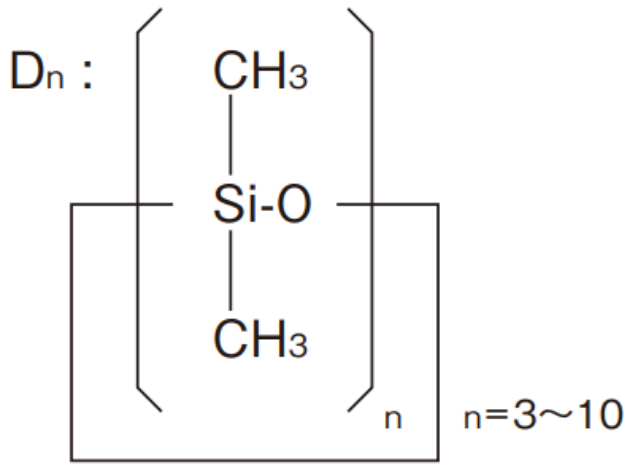
RTVがAgingを起こしやすい理由

○RTVシリコーン

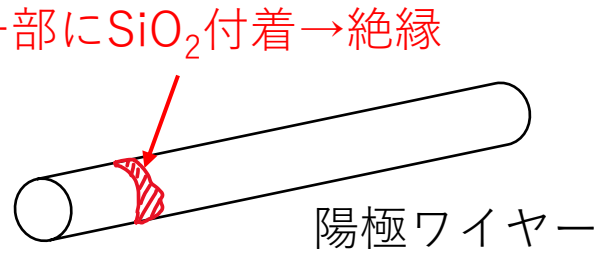
- 低分子シロキサンやポリマー成分を含む
- 反応性が無く揮発性⇒硬化後も大気に揮散
- ガス中に混入
- シロキサンが電子衝突などによって重合、分解
- ケイ素が酸素などと反応
- 陽極表面にSiO_2として付着しやすい(化学的に安定)

- 付着によって絶縁されると増幅率低下(Aging)

- しかし、シール材として扱いやすい



低分子シロキサン

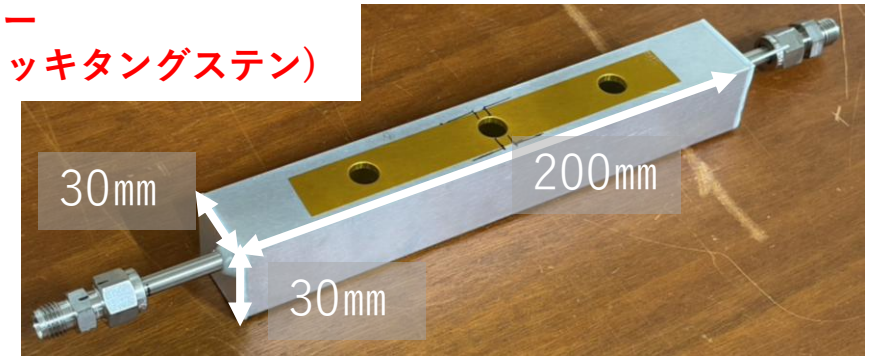


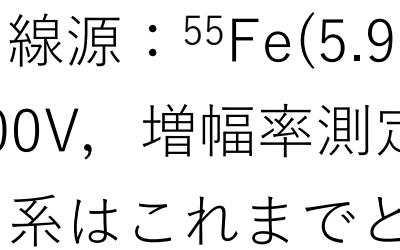
実際にRTVシリコーンが早期Agingに効いているのか、Aging原因を調べたい

X線照射によるAging試験

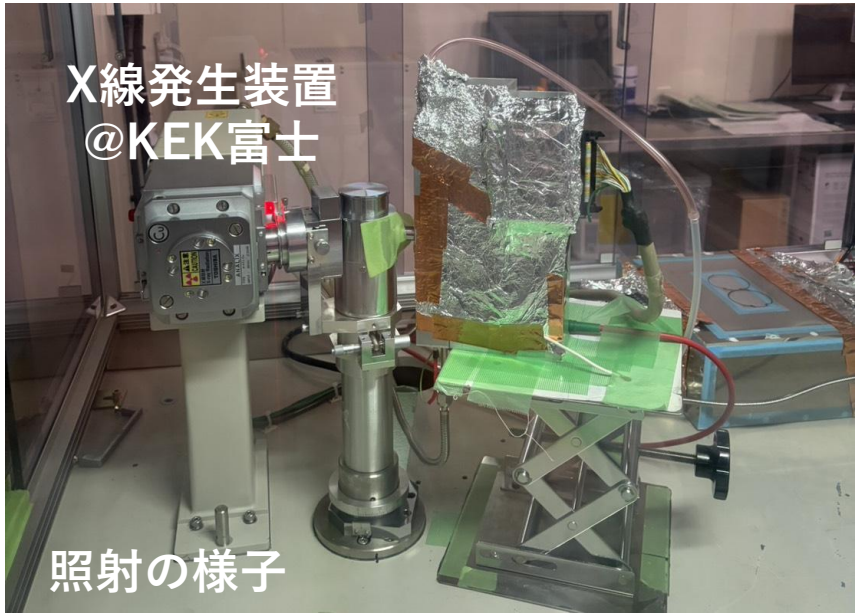
- 3つ穴が空いた小型テストチェンバー
- ガス：ガスシリンダHe-C_2H_6(50:50) ~20cc/min
- X線：リガクSA-HFM3 3kW XG(60kV,30mA,幅3.15mm) KEK ITDC管理
- 増幅率測定時の線源：^{55}Fe(5.9kV特性X線)
- HV：照射中2600V，増幅率測定2000V
- 信号の読み出し系はこれまでと同様

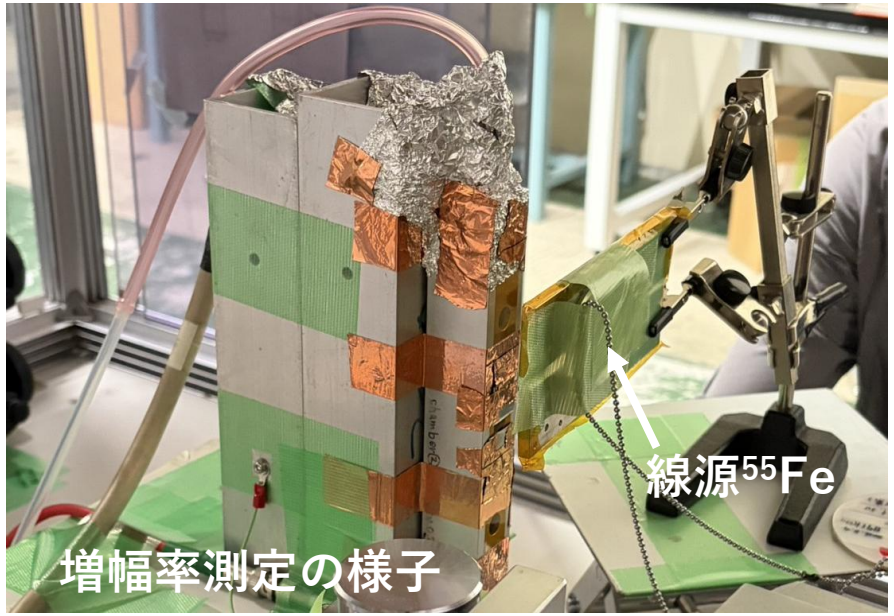
テストチェンバー
陽極ワイヤー
(30μm金メッキタングステン)

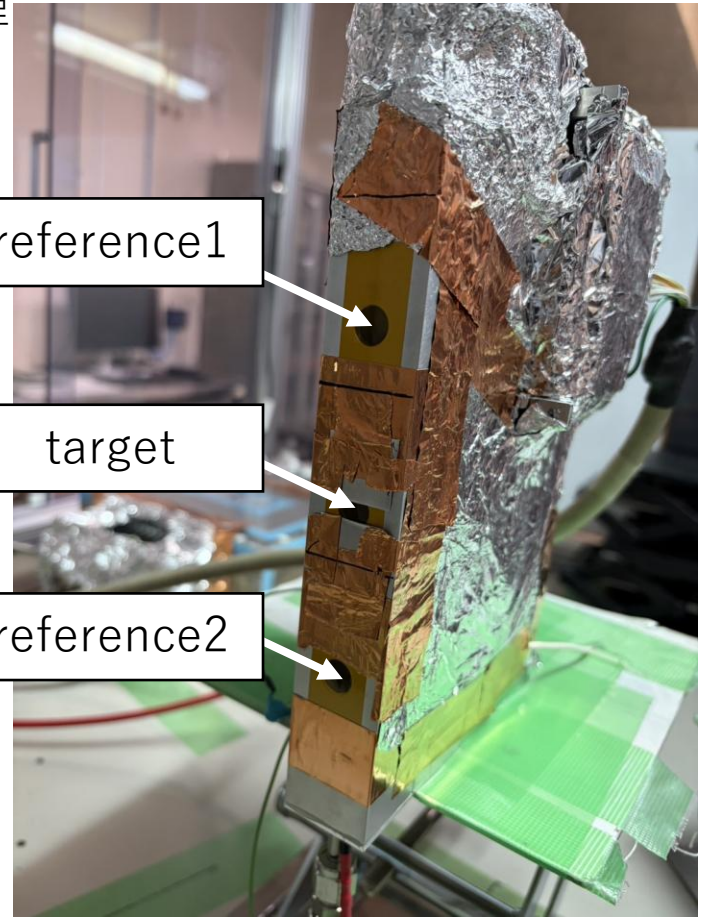




チェンバー断面







X線照射によるAging試験　概要

新しく製作したチェンバーのアウトガスが増幅率に与える影響を調べる

- 4本の小型テストチェンバーを用いてX線照射試験を実施
  - w/o　　：何も塗らない
  - w/RTV1　：RTVを0.4mL塗布(製作後すぐに照射)
  - w/RTV2　：RTVを0.4mL塗布(製作約1か月後に照射)
  - w/EPOXY：エポキシを塗布

※すべてのフィードスルーの固定にはRTVシリコーン使用
※すべてのチェンバーで端板の接着にはエポキシ使用

チェンバー端板の内側に塗布





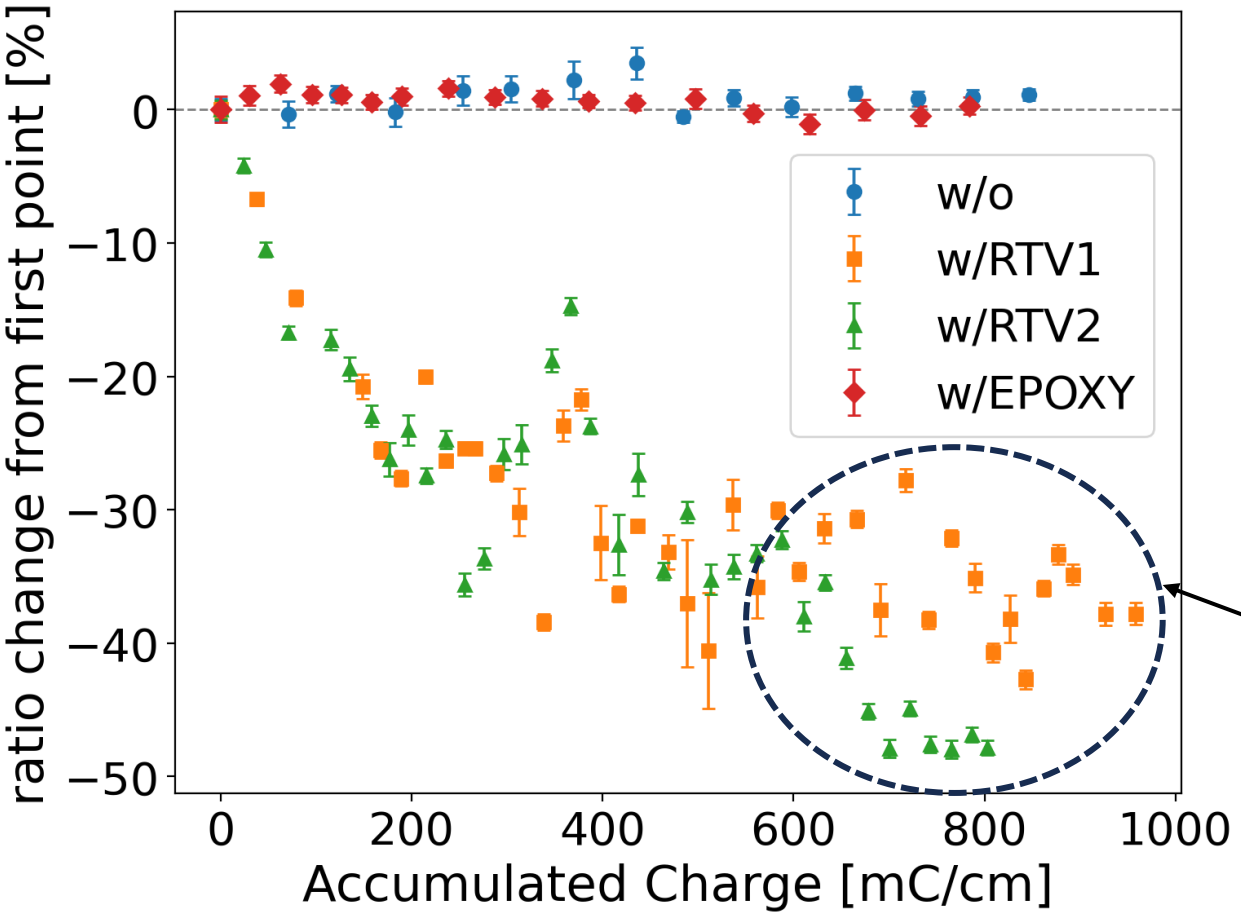
- 実際にRTVシリコーンが早期Agingに効いているか
- エポキシは増幅率に影響するか
- 早期Agingが起こらないテストチェンバーの製作方法を模索

最終目標：早期Agingを抑制したチェンバーで加速器内Aging試験を再度実施

RTVアウトガスによるAging

w/o　　：何も塗らない
w/RTV1　：RTV(すぐ照射)
w/RTV2　：RTV(約1か月後照射)
w/EPOXY：エポキシ

実際にRTVシリコーンは早期Agingに効いているか

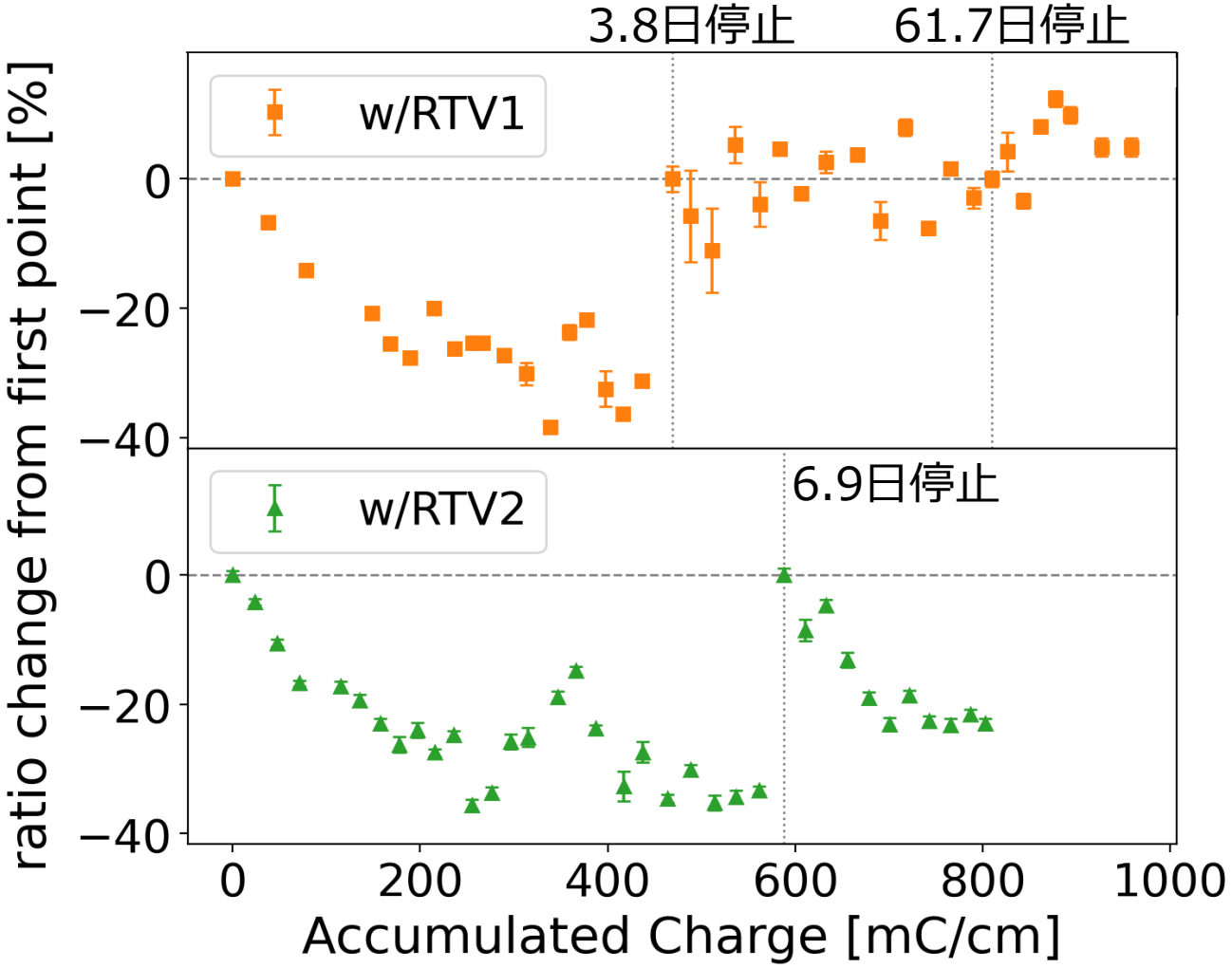


- リファレンス2点の平均とターゲットの比を計算し、初期値からの変動%をプロット
- **RTVのアウトガスによる早期Aging**
  ⇒加速器に導入したテストチェンバー自体に問題
- w/RTV1とw/RTV2は600mC/cmまでの間ほぼ同じ挙動を示した⇒**再現性あり**
- 600mC/cm以降は異なる挙動
  - w/RTV1はAgingが止まった
  - w/RTV2はAgingが止まった後、再度Aging

⇒なぜ異なる挙動を示したのか

RTV塗布チェンバーAging考察

600mC/cm付近でw/RTV2は1週間ほど照射を停止していた⇒停止期間で差が出たのでは？

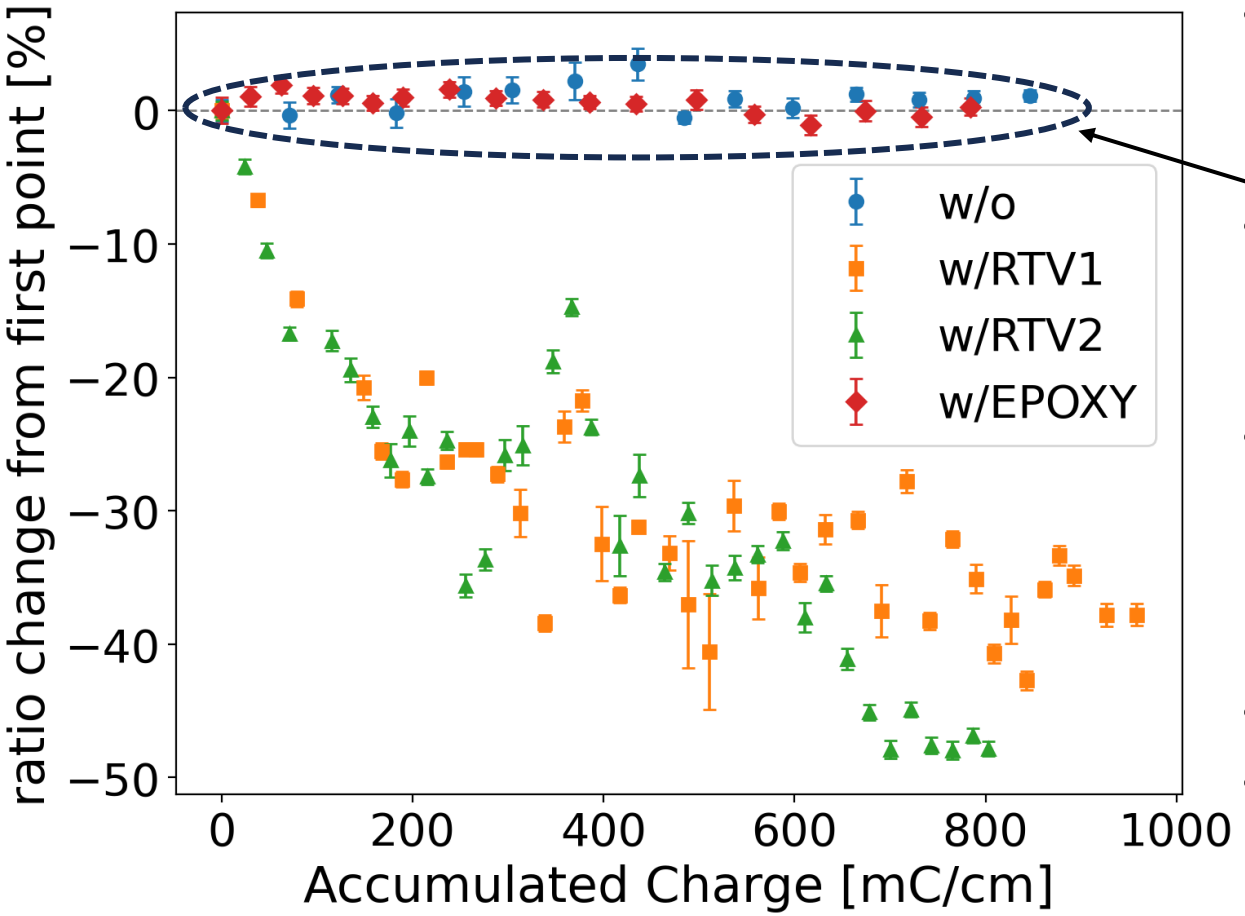


- 3日以上停止していた場合、別のセットとしてプロット
- w/RTV2は**照射停止期間後に再度Aging**
- 800mC/cm付近で照射を終了していたw/RTV1に再度照射
- **増幅率に変化は見られなかった**
- 停止期間が長すぎるとダメ？
- 600mC/cm付近で停止することに意味がある？
- 今後も再現性を確かめていく

エポキシアウトガスの影響

w/o　　：何も塗らない
w/RTV1　：RTV(すぐ照射)
w/RTV2　：RTV(約1か月後照射)
w/EPOXY：エポキシ

エポキシのアウトガスはガス増幅率に影響するか



- リファレンス2点の平均とターゲットの比を計算し、初期値からの変動%をプロット
- **エポキシのアウトガスによる増幅率変化は見られなかった**
- シール材として有用なら**早期Agingしないチェンバーを製作可能**なのではないか
  ⇒**加速器内Aging試験の再実施**につながる
- しかし、伸縮性が低くひび割れの可能性あり
- 実際の試験への使用は要検討

まとめ・今後の展望

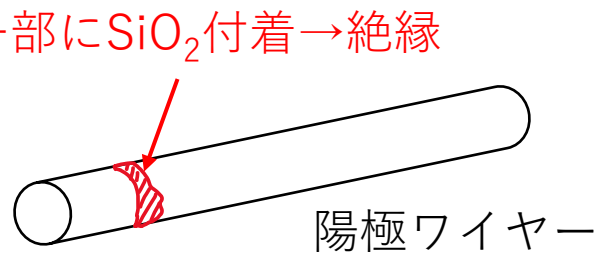
- **CDC通過後のガス&ビームバックグラウンド**を用いたAging試験を実施
- 積算電荷量200mC/cmですでに増幅率低下
- しかし、CDC実機の現状と矛盾⇒テストチェンバーが問題？
- 小型テストチェンバーを用いたX線照射試験を実施
- **RTVシリコーンによるアウトガスの影響**で早期Agingが起こる
- やはりテストチェンバーに問題がありそう
- エポキシは早期Agingを起こさない⇒テストチェンバー製作に活用できるのでは

- RTVシリコーンのアウトガスによるAgingの再現性を確かめる
- エポキシがAging試験のチェンバー製作に向いているか調査を続ける
- 対応策を見つけ出し、**アウトガス要因を抑制したテストチェンバーを用いて再度加速器内でのAging試験を実施**する

Back up

Agingとは

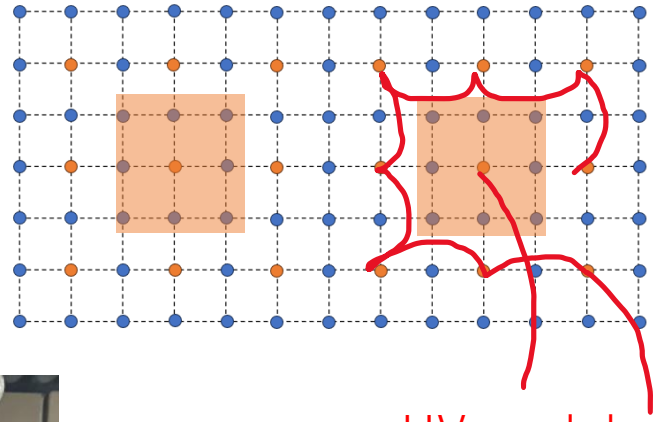
- 電子または光子が共有結合を切断するとラジカル分子が生成
- それが陽極表面に引き寄せられる(陽極近傍は強い電場勾配)
- ラジカルが高濃度存在すると陽極表面にポリマーが形成
- 追加的な化学反応やポリマー(絶縁体)による陽極表面への付着があれば増幅率が下がる＝Aging
- ワイヤーチェンバーのAgingは複雑で定量的理解には至っていない

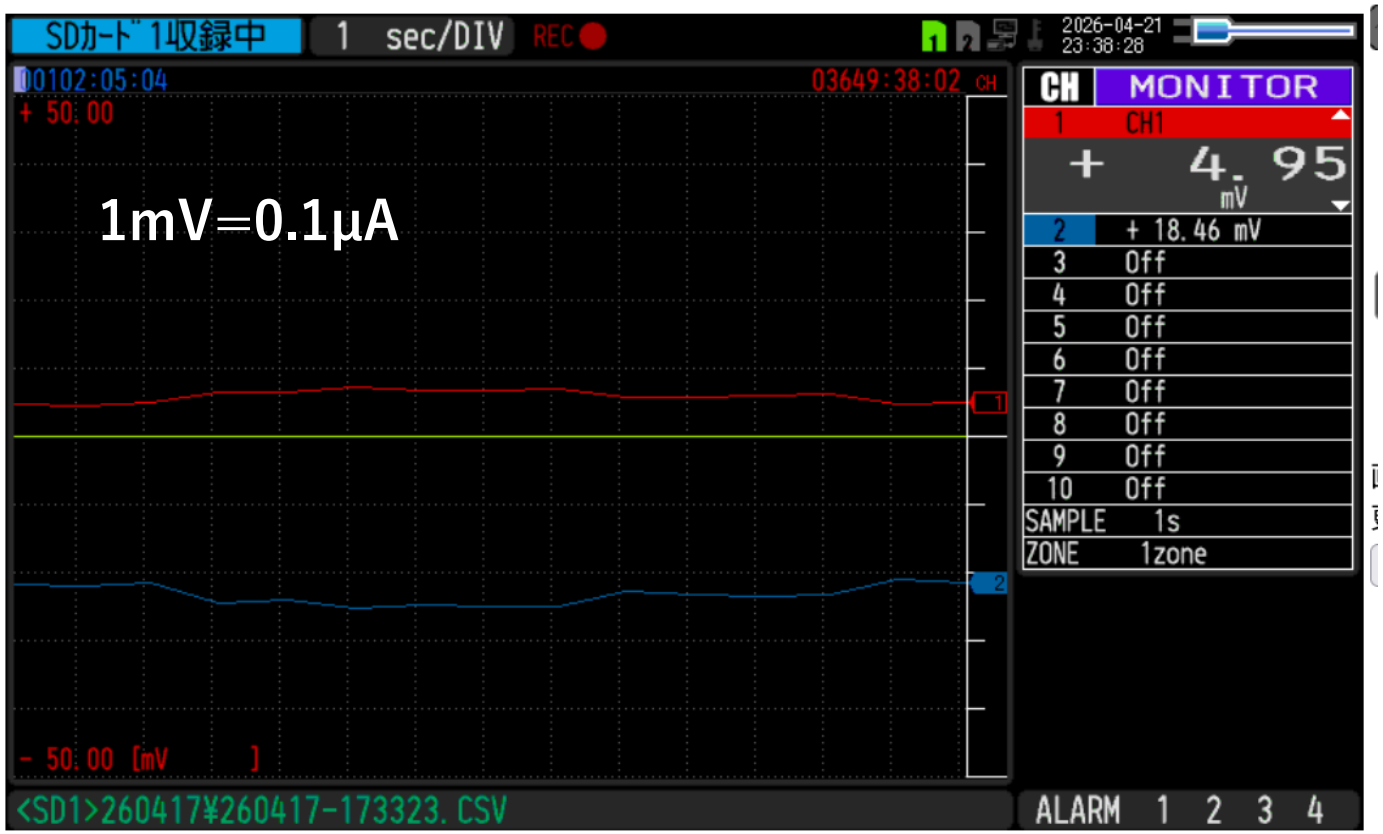


〇RTVシリコーンはなぜAgingの原因になるのか

- シロキサンやポリマー成分が含まれている
- 常温でも揮発するため、内部に混入しやすい
- ガス中に混入したシロキサンが電子衝突などによって重合、分解される
- 骨格に含まれるケイ素が酸素などと反応し、陽極表面に二酸化ケイ素として付着しやすい(化学的に安定で除去困難)

チェンバーカレントモニター



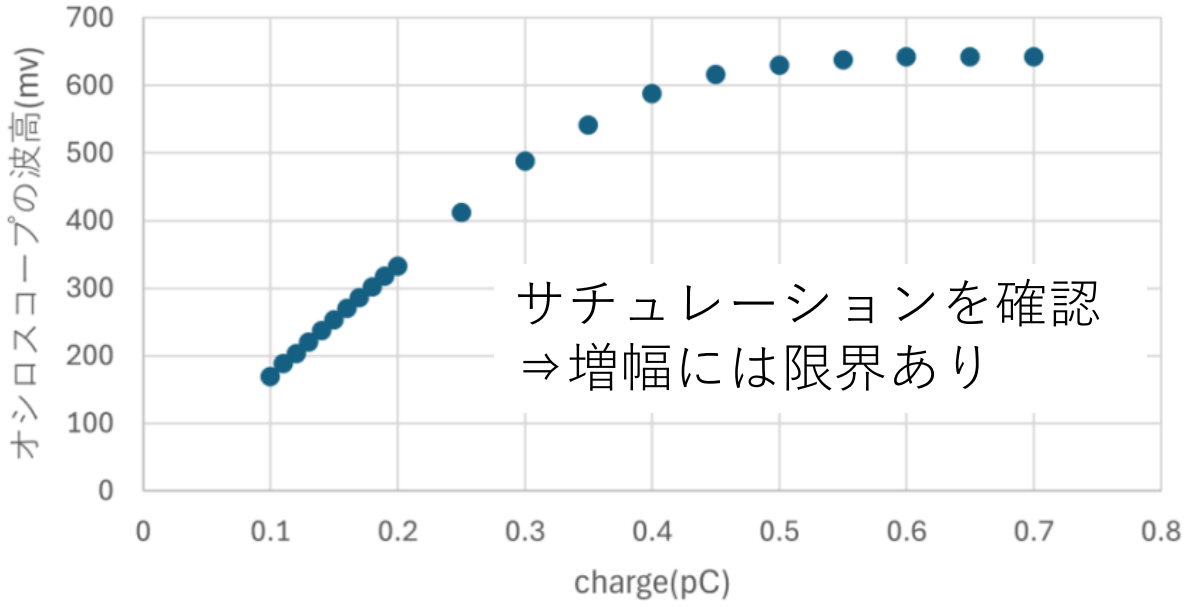


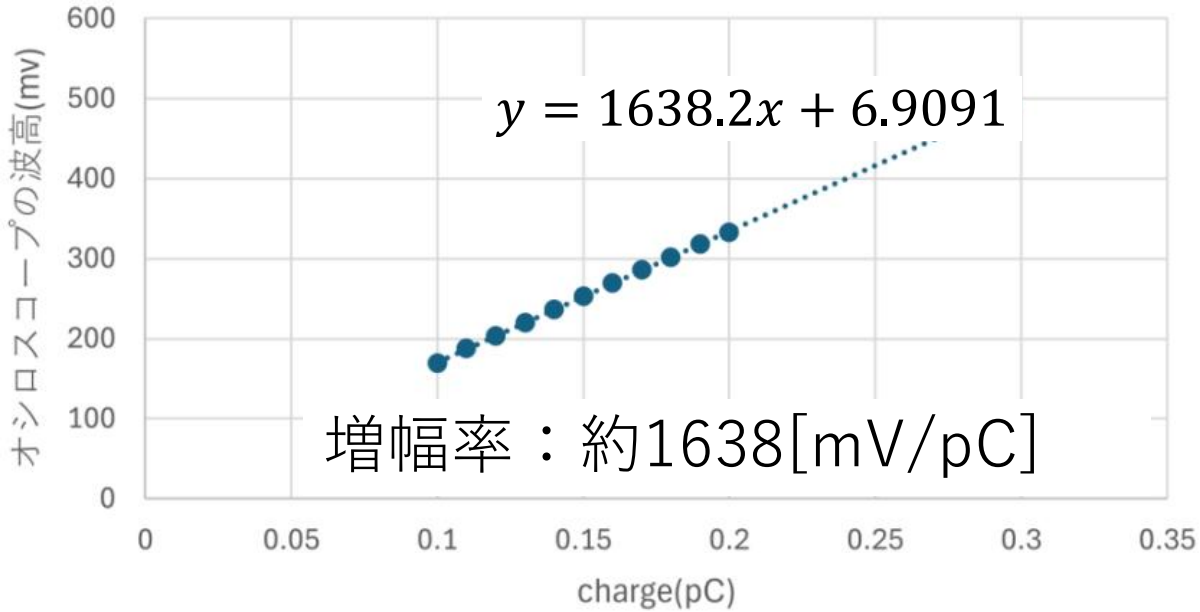


カレントモニタ出力

アンプの増幅率試験

ファンクション
ジェネレータ
→ コンデンサー
(1pF)
→ プレアンプ
→ ポストアンプ
→ オシロスコープ





ガス循環

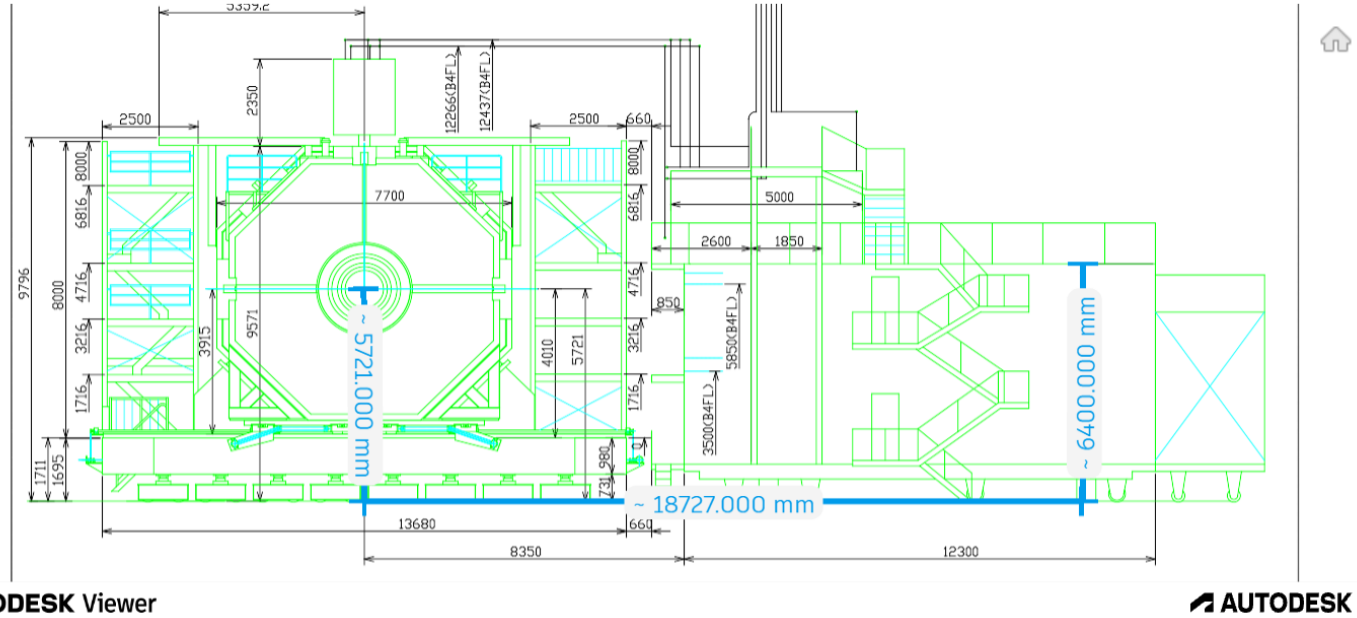
ガス流量は15cc/minとする

sus管体積
- 穴径：4.75mm
  1/4inch, 0.8肉厚
- 配管長さ：120,000mm

→ $(4.75/2)^2 \times \pi \times 120000 \simeq 2126$cc

テストチェンバー体積
→$200 \times 90 \times 250 \simeq 4500$cc

front-view-971022.dxf.png

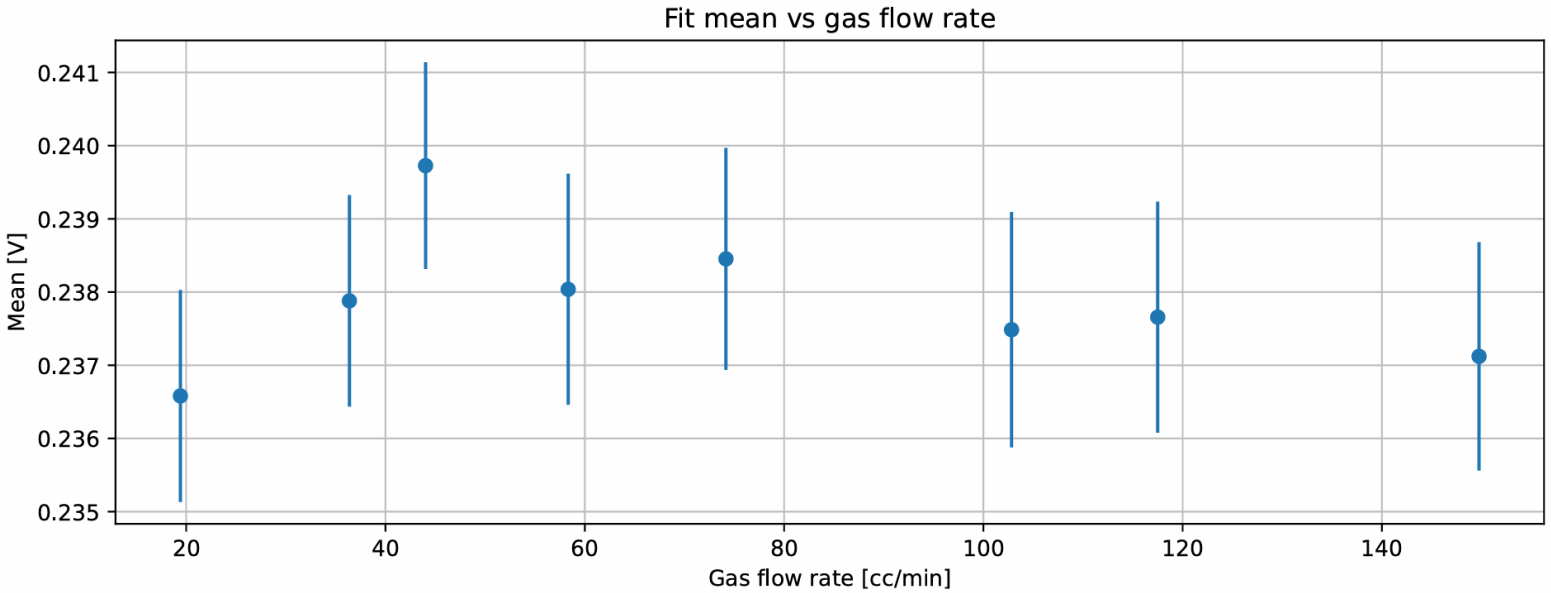


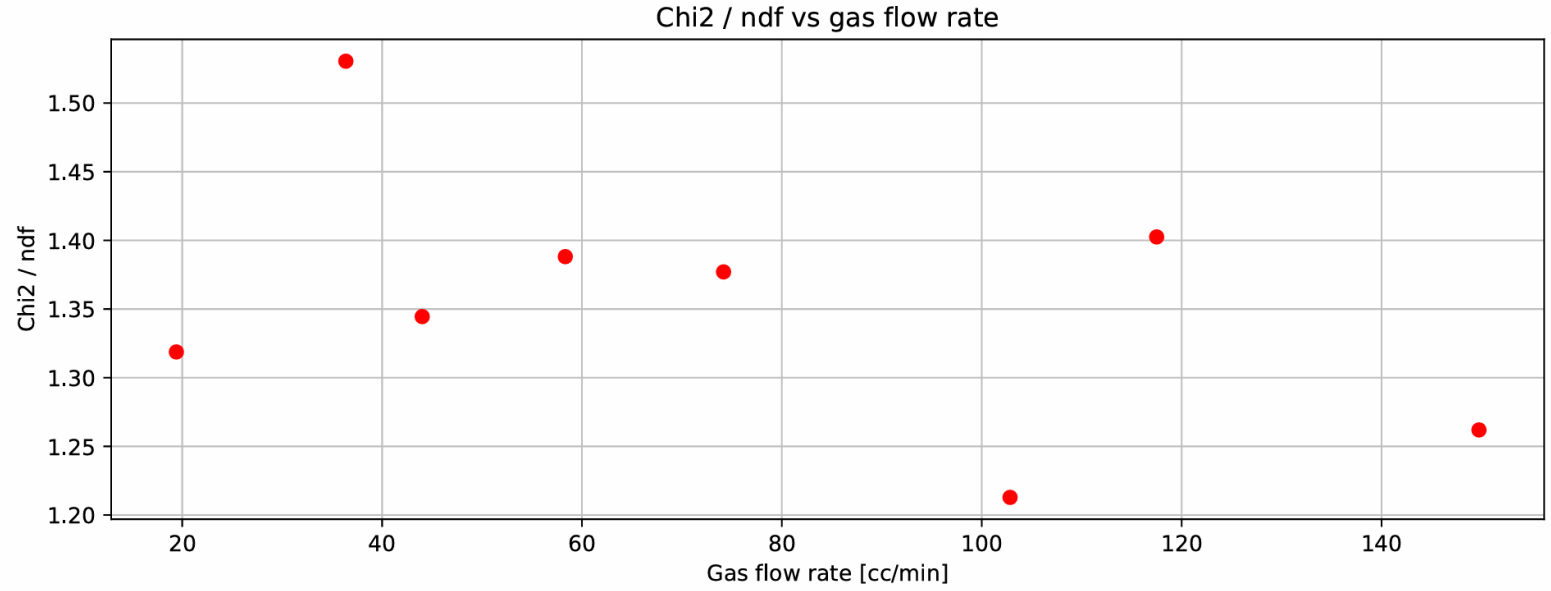
よって
sus管＋テストチェンバー$\simeq 6626$cc
1ボリューム：約7.36時間

流量試験

- Gas：CDC通過後の$He\text{-}C_2H_6$
- 線源：^{55}Fe
- HV：2050V

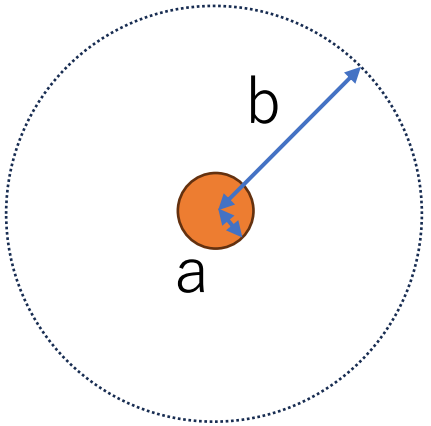
- 流量は水上置換法で確認
- ガス流量変化によるガス増幅率の変化はない



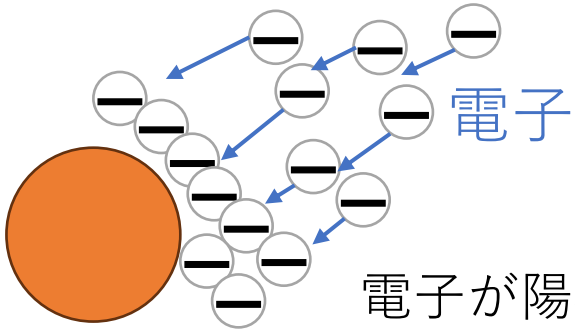


ガス増幅率

ガス増幅率： $M = \exp\left[2\sqrt{\frac{kNCV_0a}{2\pi\varepsilon_0}}\left(\sqrt{\frac{r_c}{a}}-1\right)\right]$



- k, ε_0：ガスの種類による係数
- N：ガス分子の密度(=P/R/T)
  ガスの圧力や温度に関係
- a：センスワイヤー径
- C：静電容量$\left(=\frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(b/a)}\right)$
  aやセルの大きさbに関係



電子が陽極ワイヤー近傍で増幅する様子

⇒ガス増幅率はHV値、センスワイヤー径、ガス状態に影響される

ガス増幅率とHV値

線源^{55}FeのX線：5.9keV

ガスHe-C_2H_6(50:50)のW値(一つのイオン対生成に必要な平均エネルギー)

$W_{He} \simeq 41eV$, $W_{C2H6} \simeq 26eV$

よって

$W \simeq 0.5 \times 41 + 0.5 \times 26 = 33.5eV$

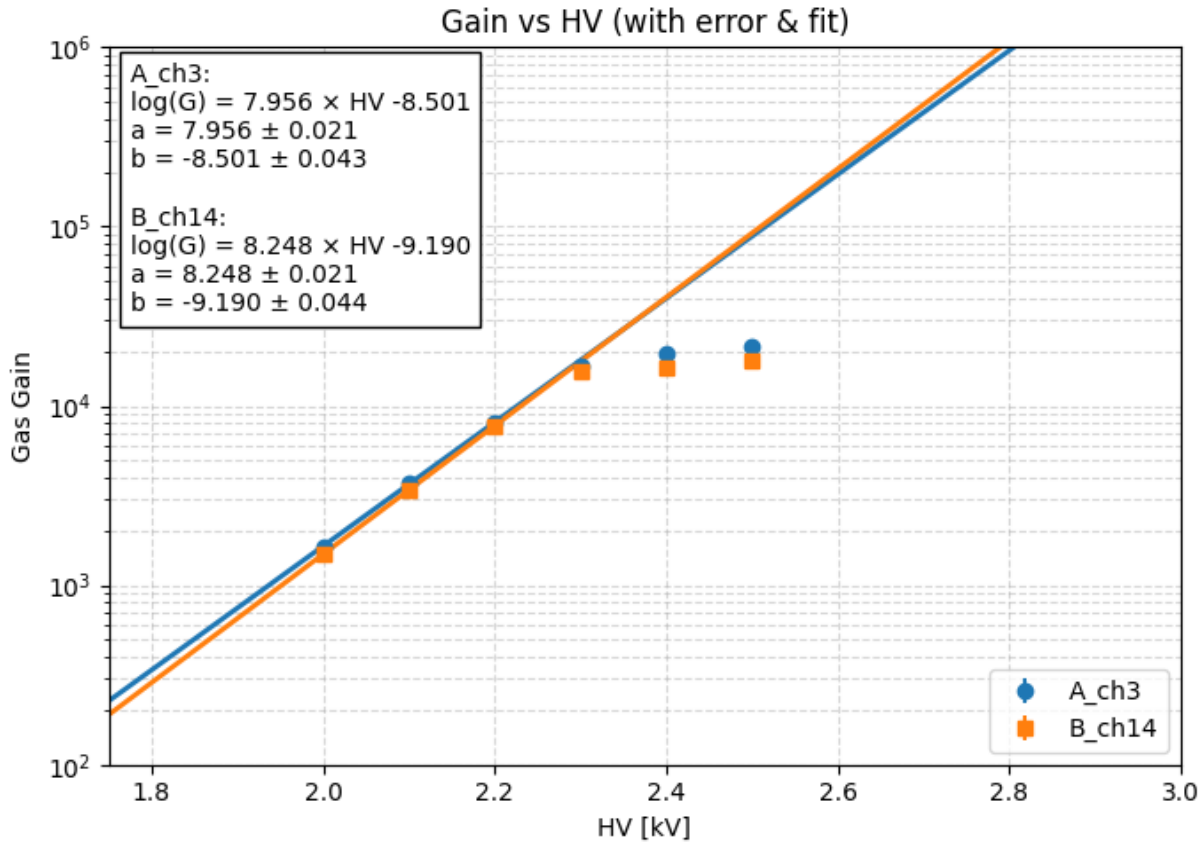
アンプ試験の結果より

入力電荷[pC]＝(出力波高[mV]－6.9091)/1638.2

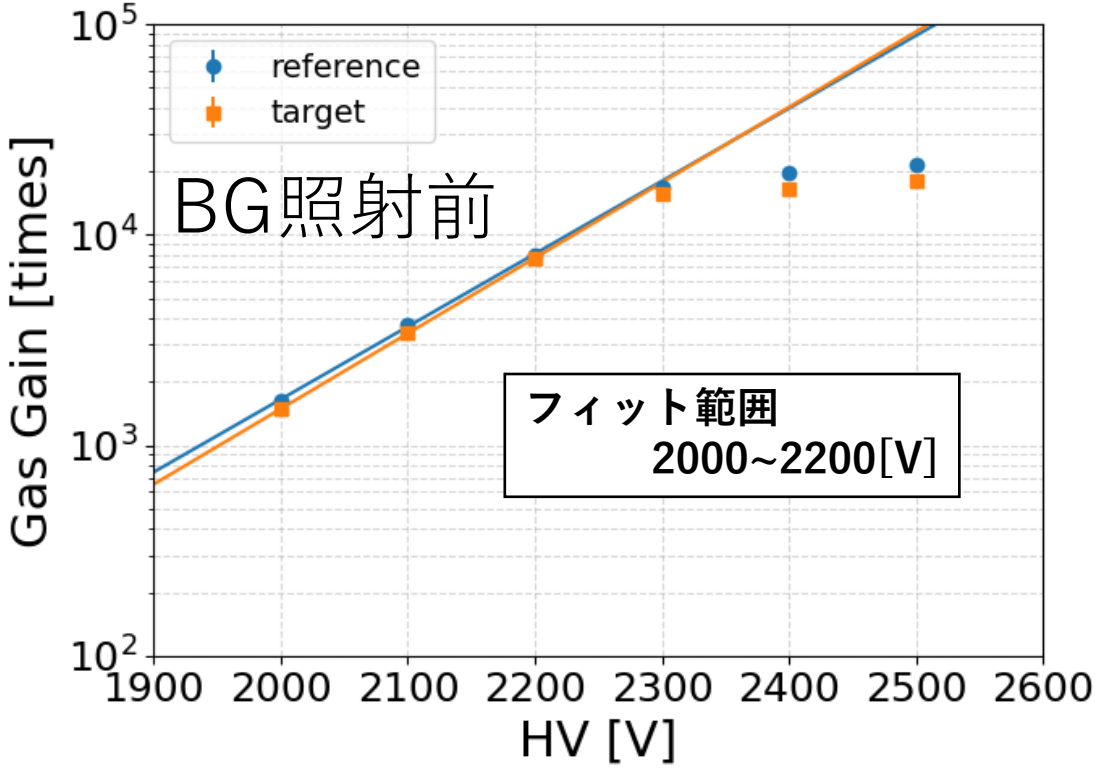
一次電子数$N_0 \simeq 5900/33.5=176$個

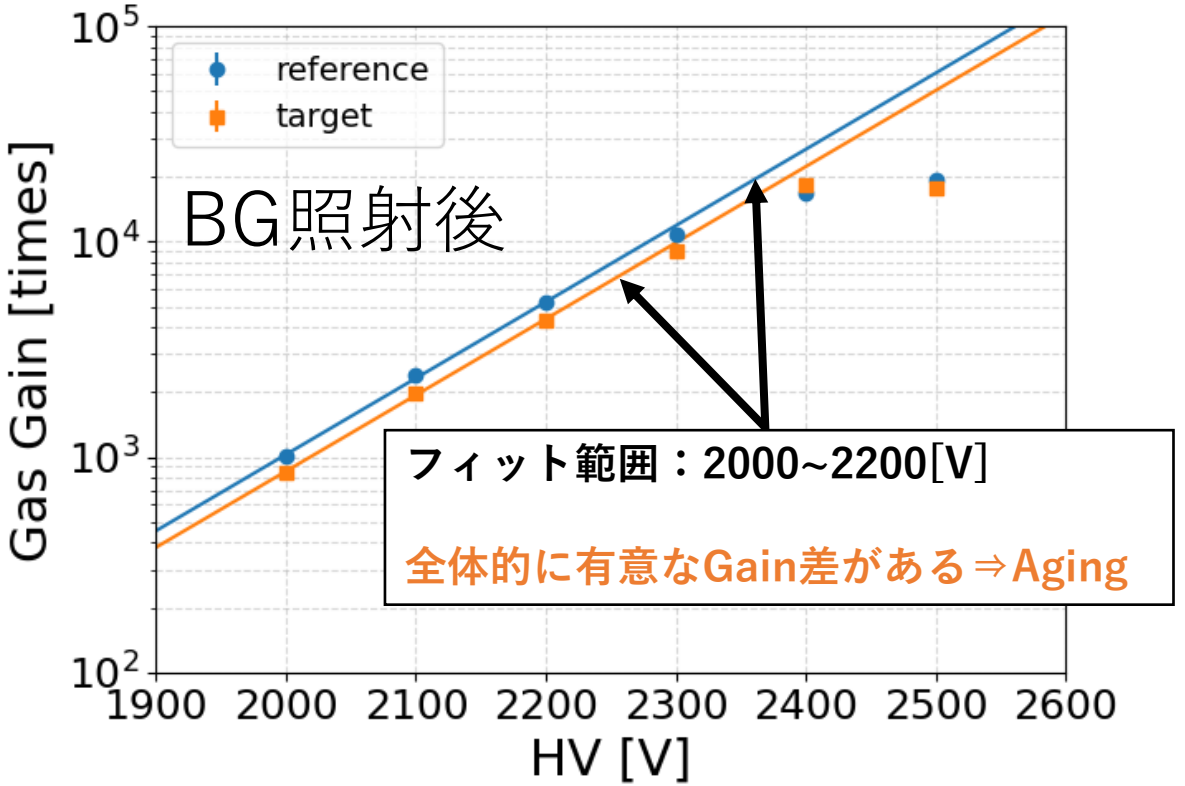
出てきた総電子数$N_e = Q/e = x \times 10^{-12}/e$

$\therefore$Gas gain $= N_e/N_0$



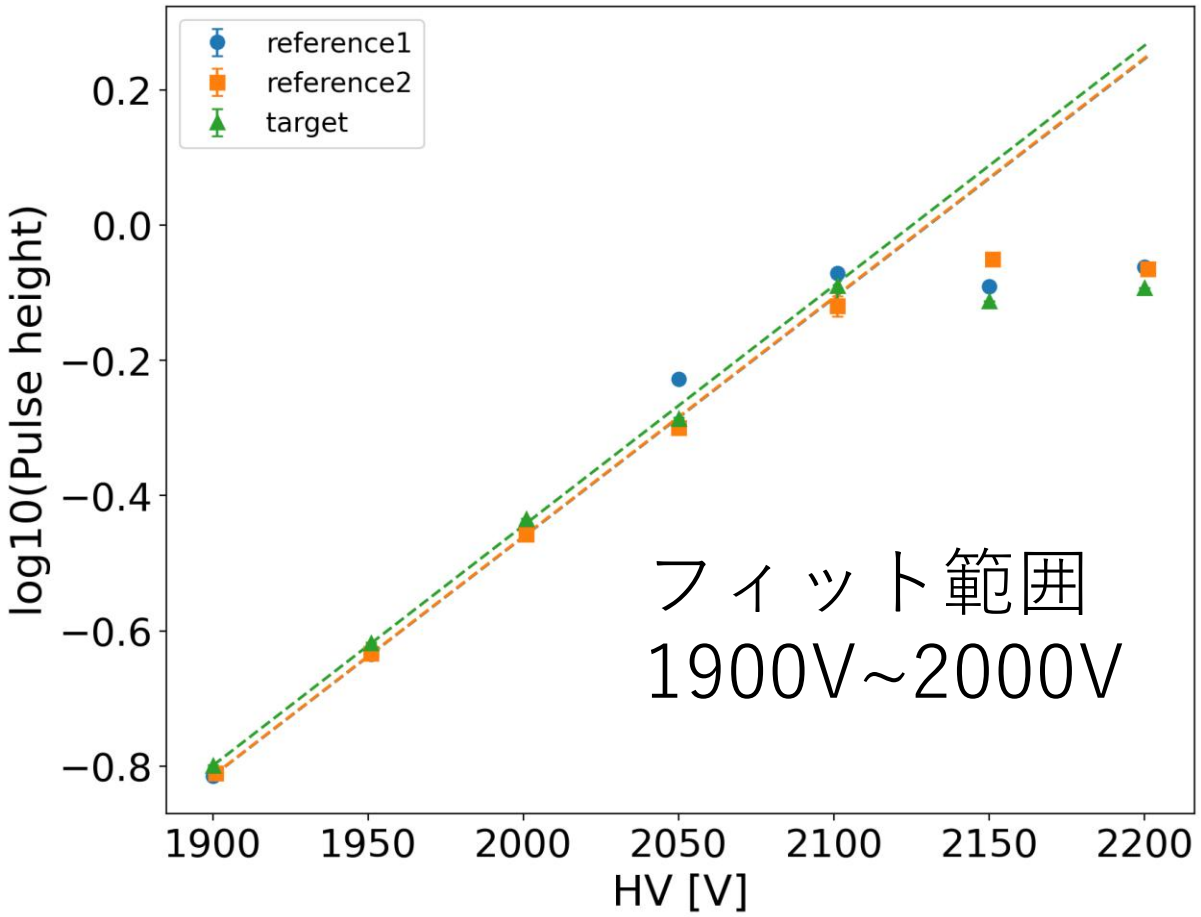
加速器内チェンバーGain測定結果



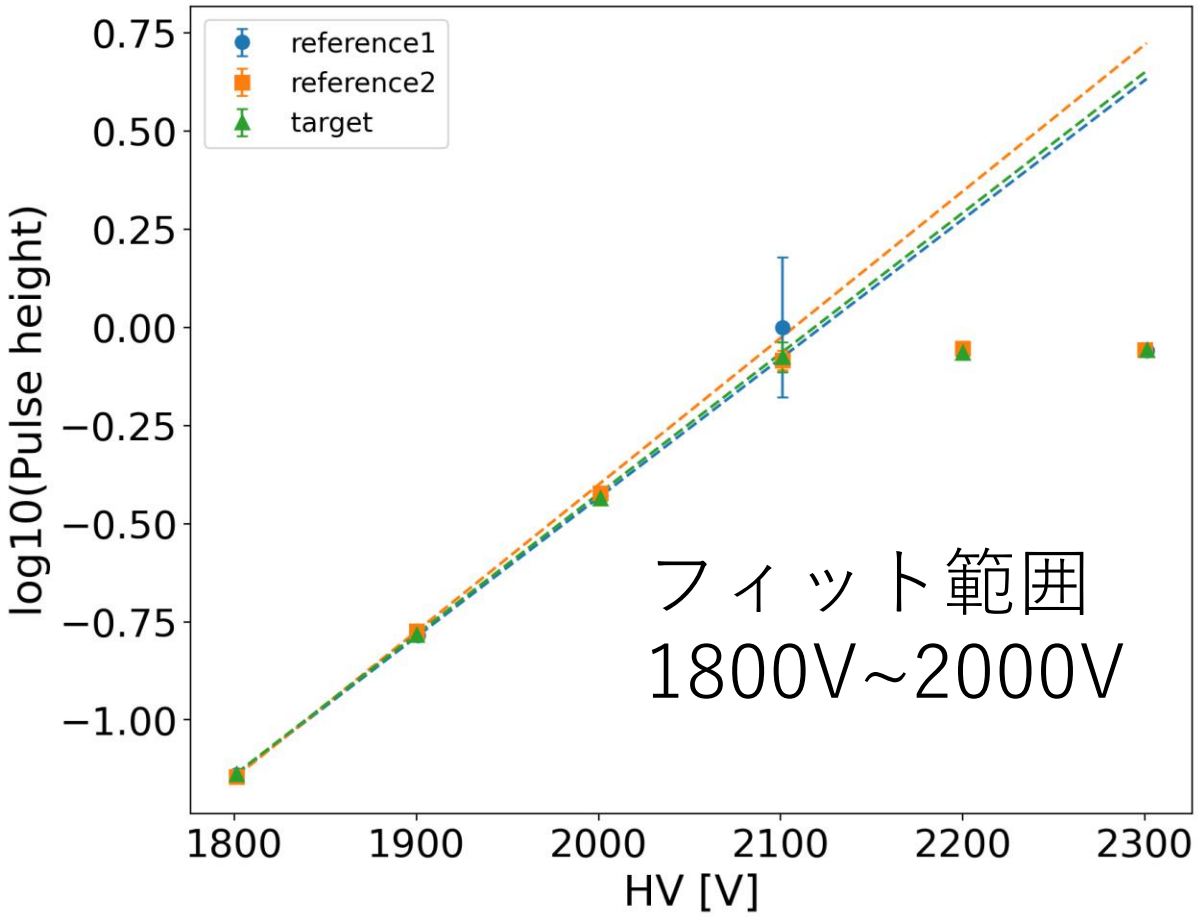


HV scan結果

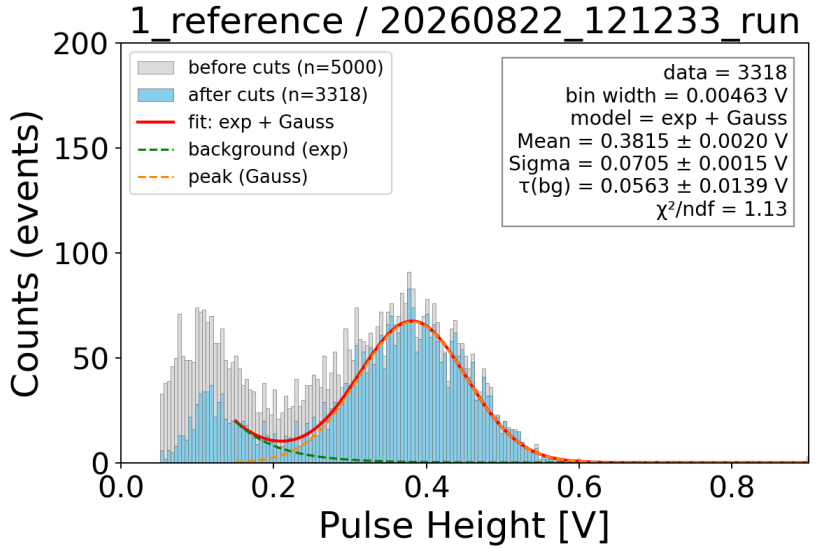
①新しいチェンバー

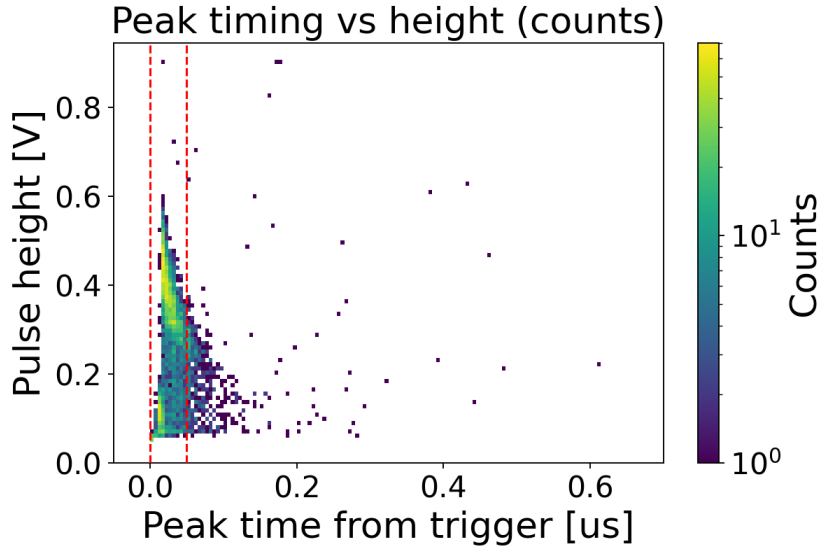


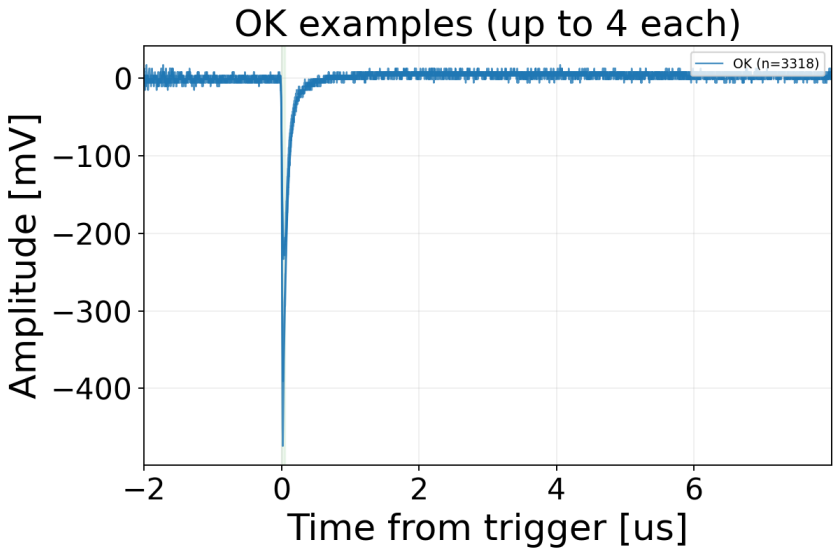
②新しい&シリコーン混入チェンバー

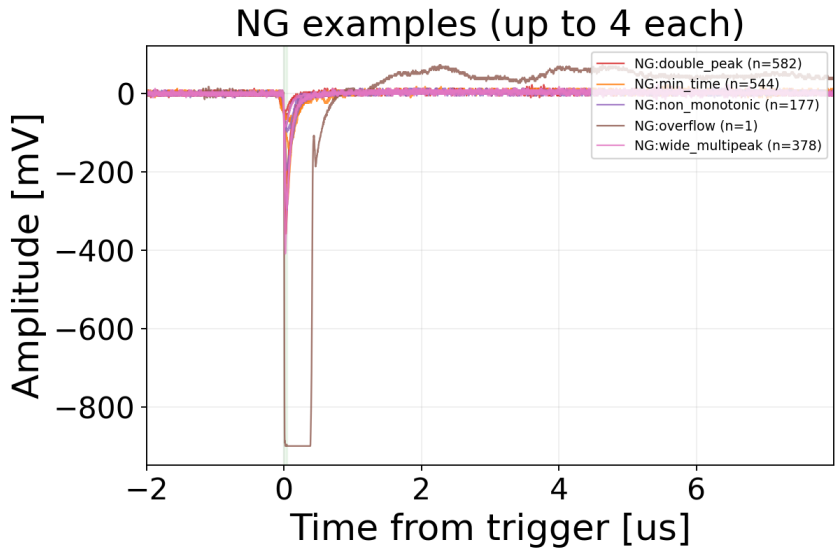


波形解析


1_reference / 20260822_121233_run
before cuts (n=5000)
after cuts (n=3318)
fit: exp + Gauss
background (exp)
peak (Gauss)
data = 3318
bin width = 0.00463 V
model = exp + Gauss
Mean = 0.3815 ± 0.0020 V
Sigma = 0.0705 ± 0.0015 V
τ(bg) = 0.0563 ± 0.0139 V
χ²/ndf = 1.13
Counts (events)
Pulse Height [V]

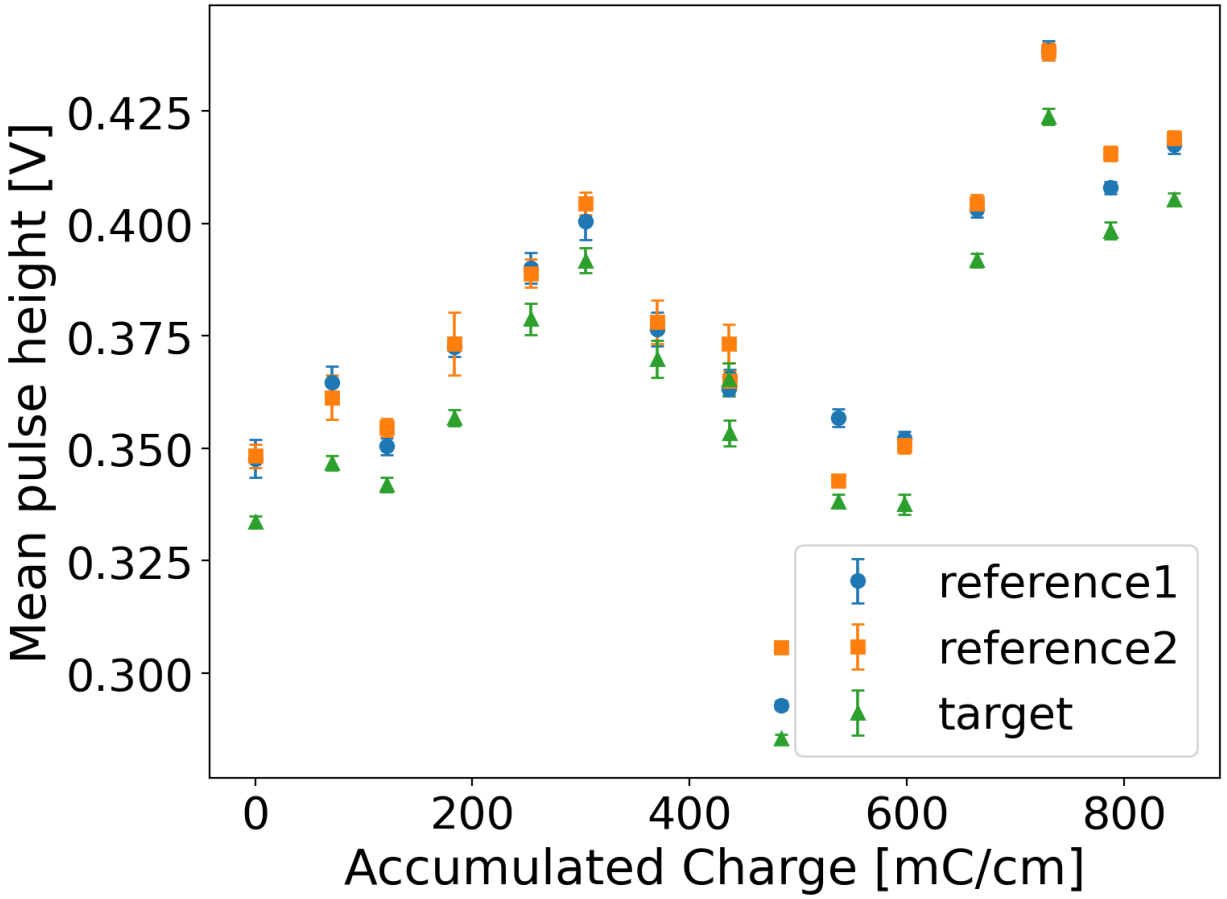

Peak timing vs height (counts)
Pulse height [V]
Peak time from trigger [us]
Counts


OK examples (up to 4 each)
OK (n=3318)
Amplitude [mV]
Time from trigger [us]

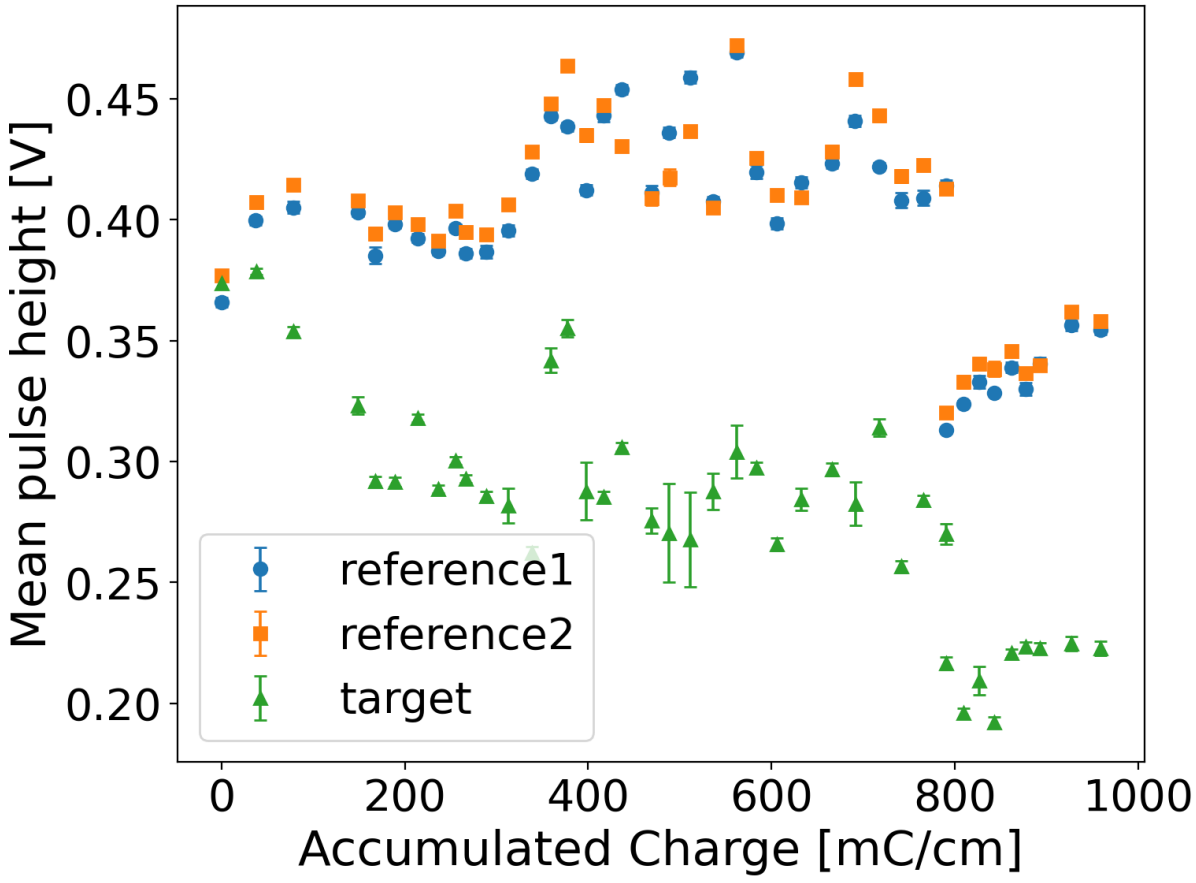

NG examples (up to 4 each)
NG:double_peak (n=582)
NG:min_time (n=544)
NG:non_monotonic (n=177)
NG:overflow (n=1)
NG:wide_multipeak (n=378)
Amplitude [mV]
Time from trigger [us]

X線照射試験結果

①RTVを塗らなかったチェンバー



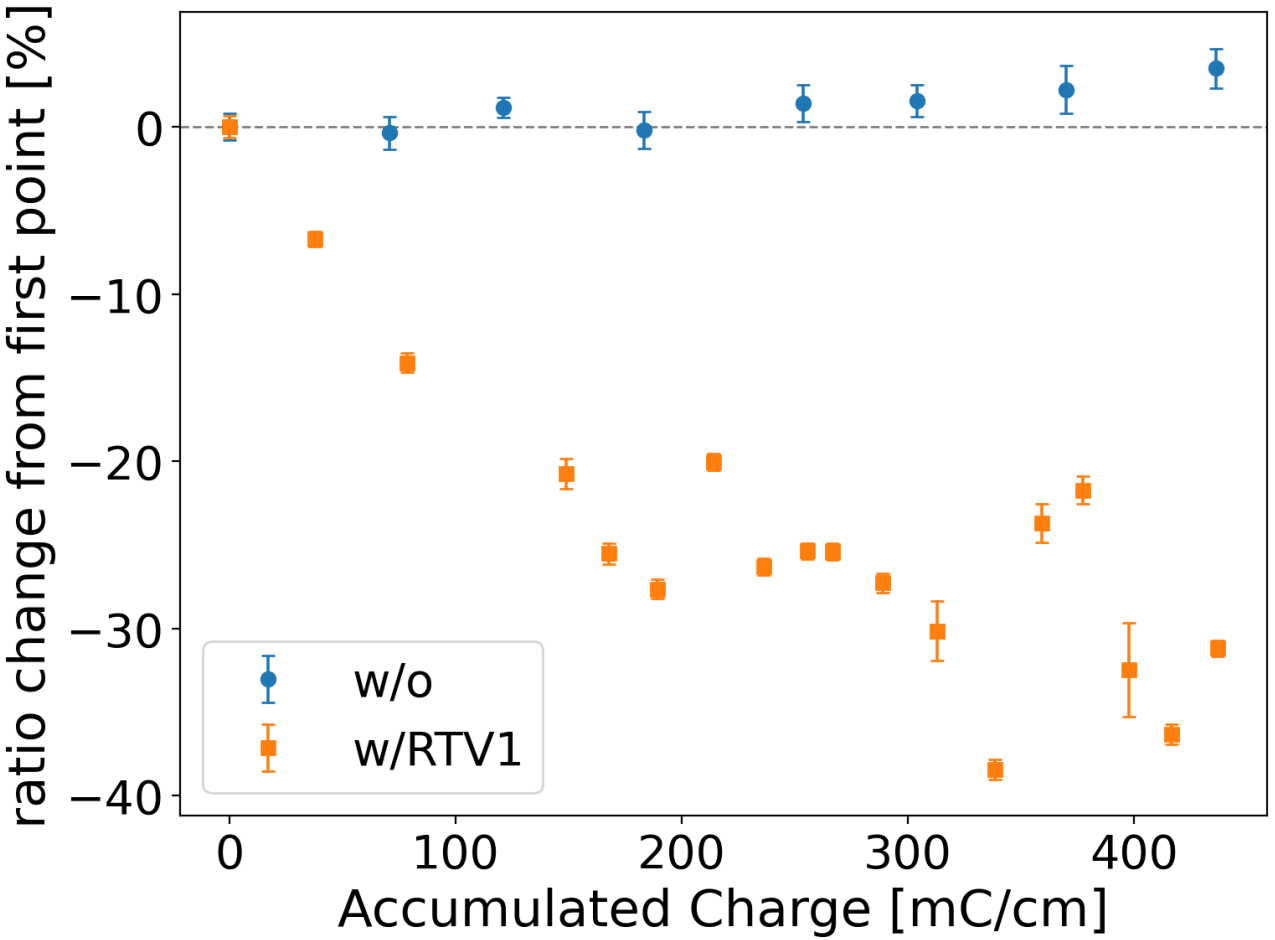
②RTVを内部に塗ったチェンバー



X線照射試験結果プロット

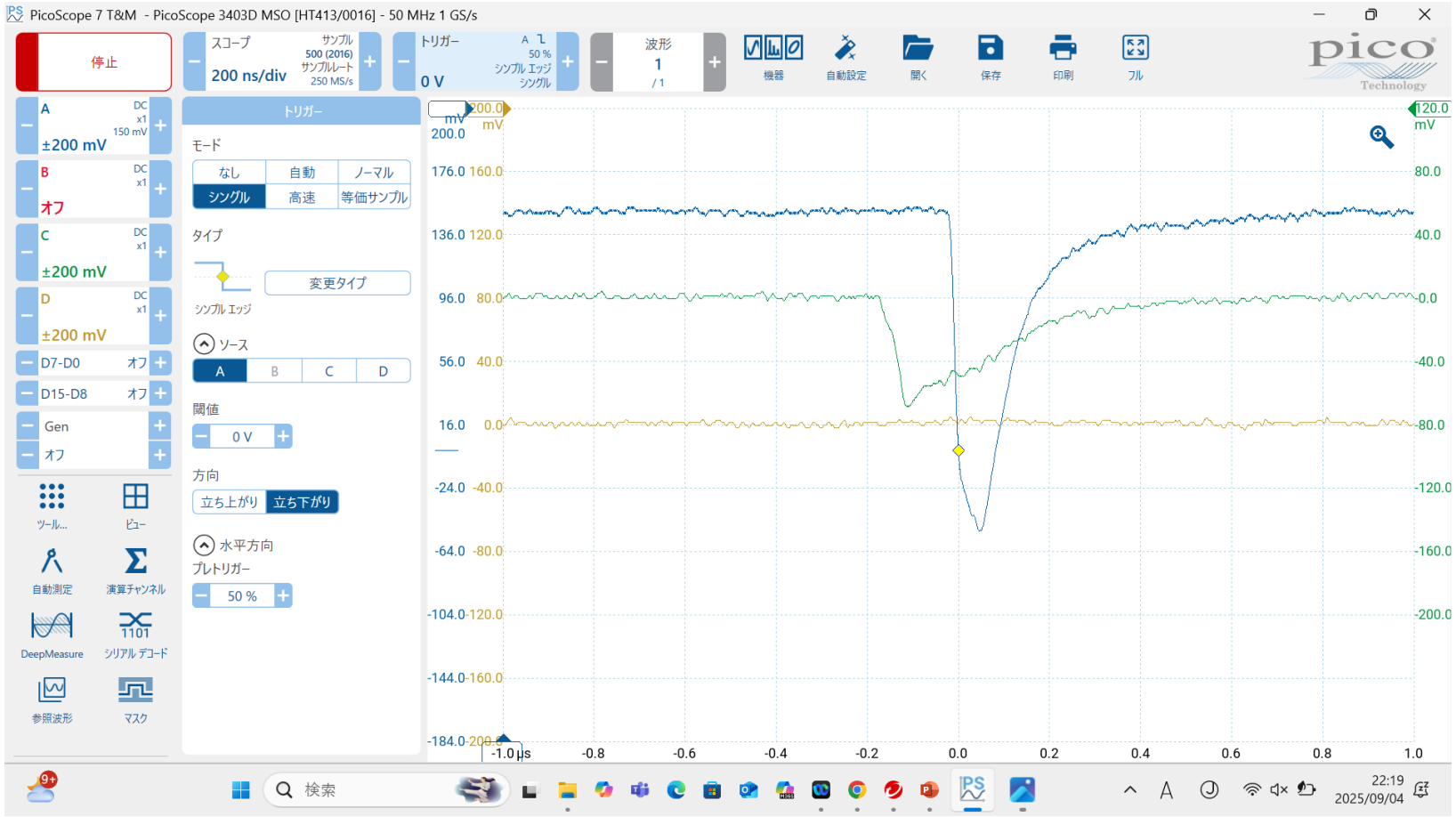
〇縦軸の計算方法
（ターゲット）/（リファレンス平均）
でリファレンスの平均を1として規格化
⇩
最初の点を基準にする
（各値/初期値－1）×100で%表記

縦軸は最初のリファレンスに対する
ターゲットの比を基準として、各点が
どれだけ下がったかを示している

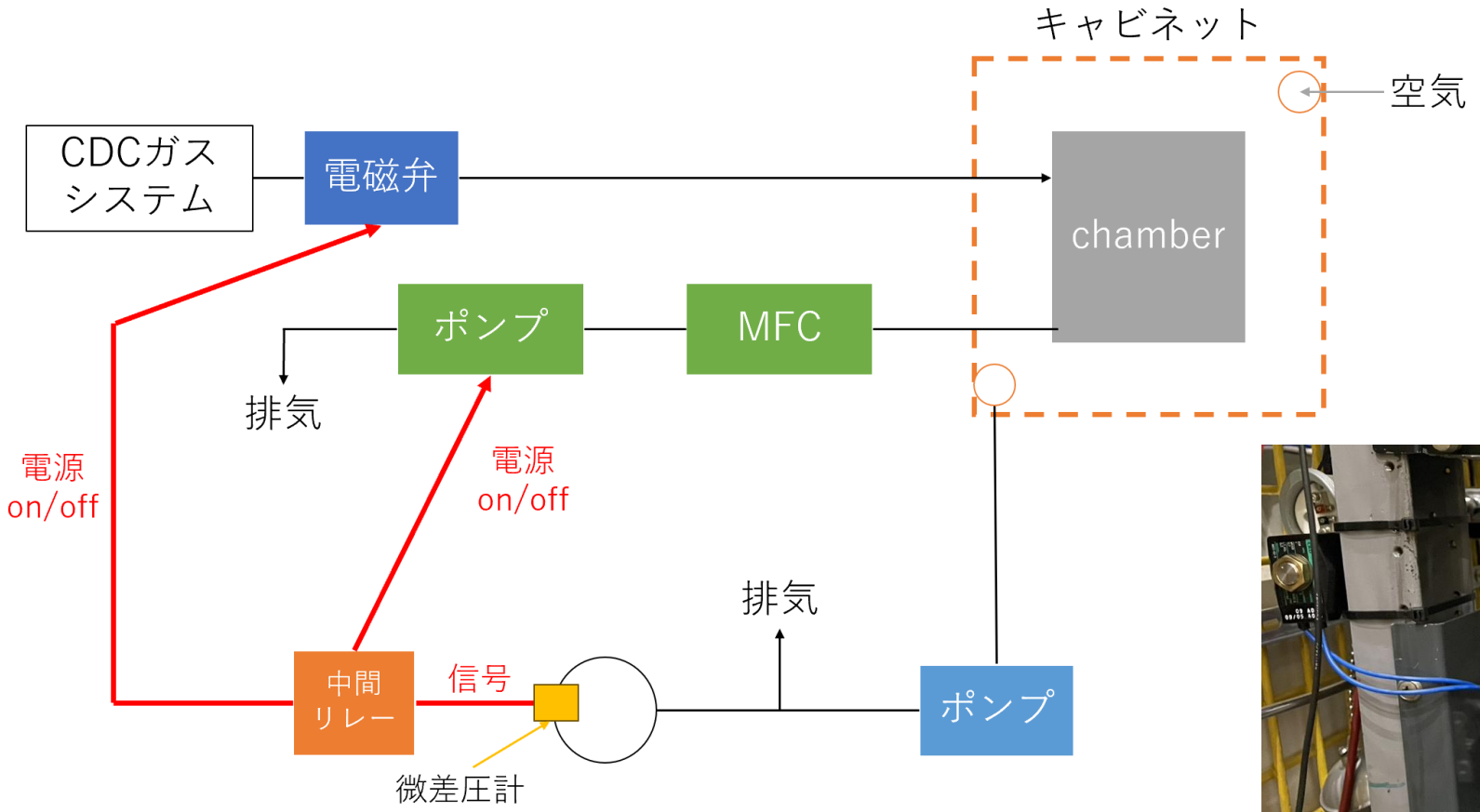


Picoscope

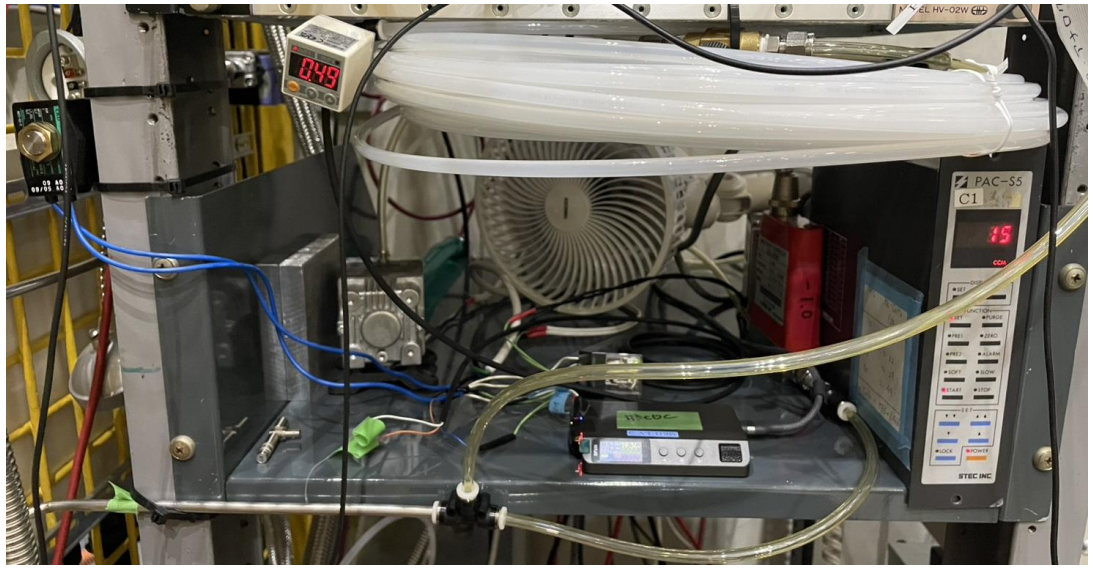
PCで設定等を変えたり、波形を見たりすることができる
オシロスコープのようなもの



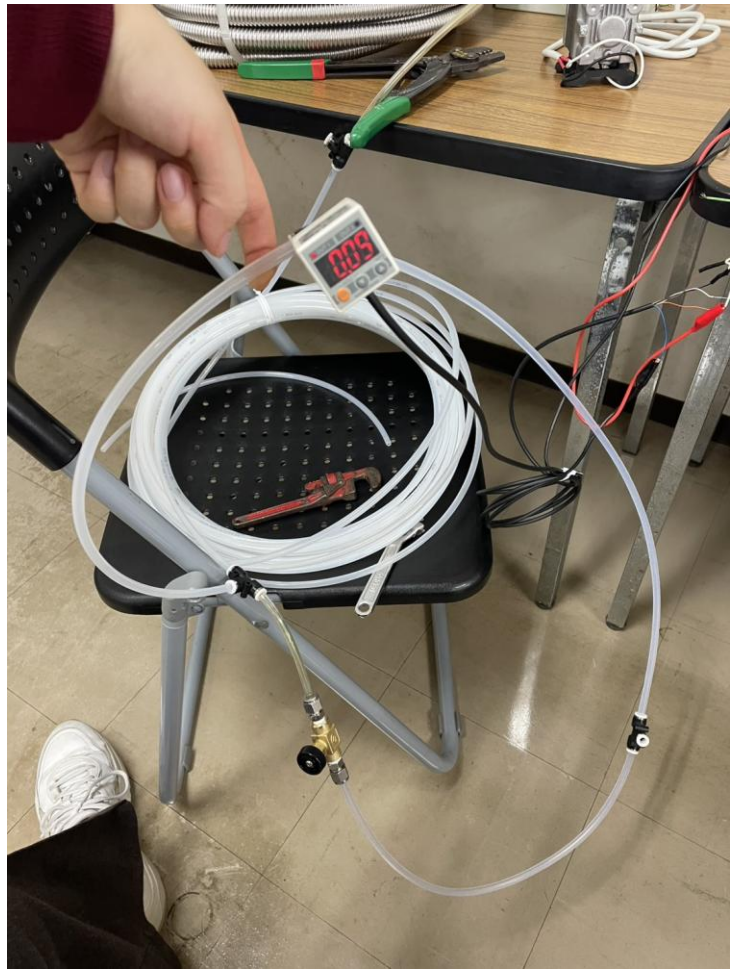
インターロックシステム①

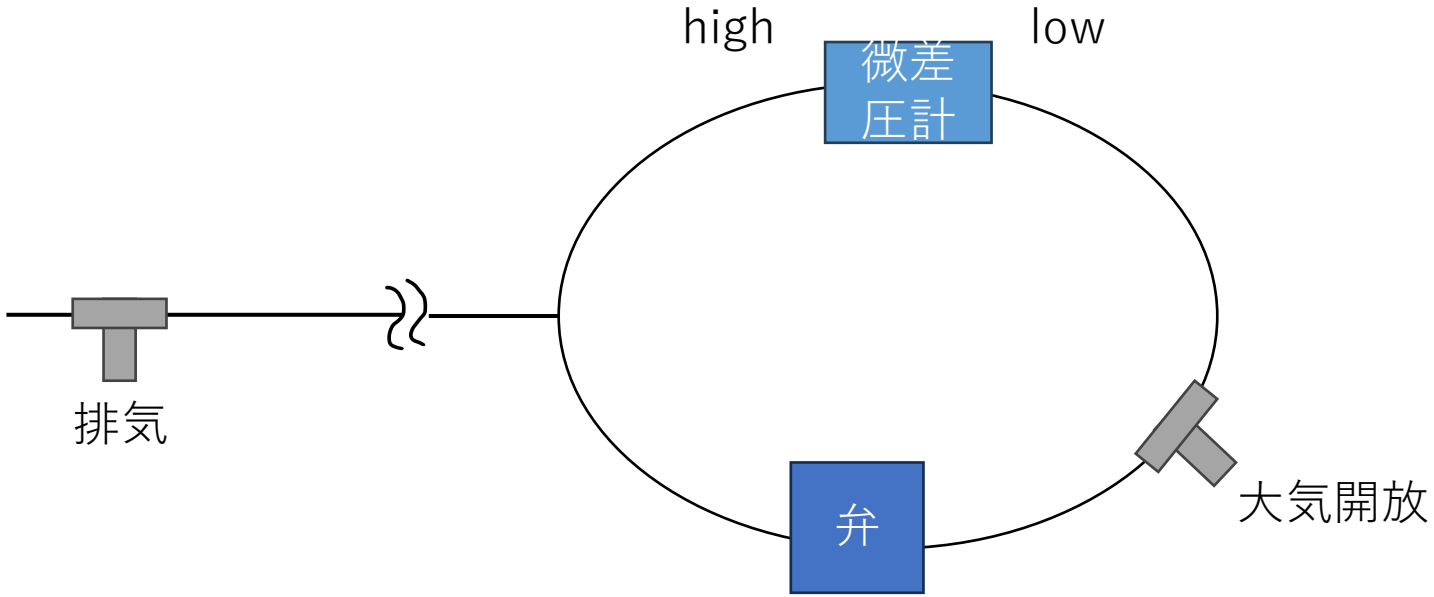


- 微差圧計で空気の排気をモニター
- キャビネット内の空気がうまく排気できていない場合、電磁弁とポンプの電源を即時OFF
- 電磁弁は常時閉(電源ONで開)
- ガス15cc/min



インターロックシステム②





弁閉じる -> 大気と排気の差圧をモニター
弁開ける -> ほぼ差圧なし

- 0.4kPa超えたらリレーに信号をON
- 0.1kPa下回るとリレーへの信号をOFF
- 正常な場合0.2~0.5kPaの間を揺れ動いている