

セラミックGEMの ガス増幅特性評価

根岸 健太郎 (岩手大学)

MPDG & アクティブ媒質TPC研究会

2019/12/7



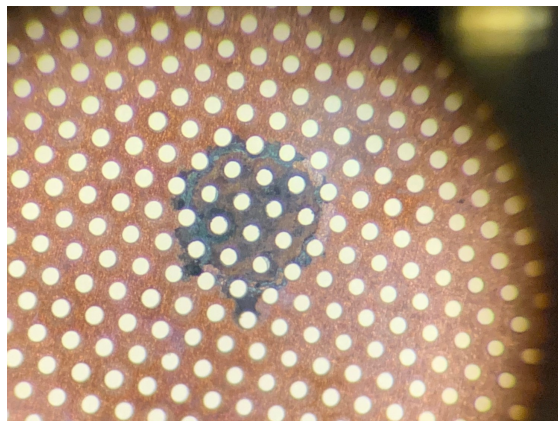
発表内容

- セラミックGEM
 - ガス増幅特性
 - 増幅率一様性
 - 増幅率安定性
 - ガス増幅シミュレーション
- まとめ

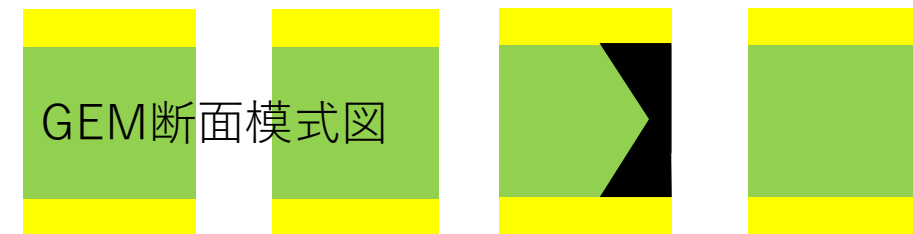


セラミックGEM

- 一般的なLCP-GEMは放電によって破壊される事がある



破壊されたLCP-GEM



GEM断面模式図

炭化導電路

- 放電耐性のある絶縁素材を用いたGEM
→ 放電してもさらに高電圧を印加すれば
高いガス増幅ゲインが得られる

セラミックを用いたGEMはその候補となりうる



LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic)

- アルミナにガラス成分(SiO_2)を含有させることで、焼結温度を約900 °Cまで下げられる。
 - 焼結前に金などの金属電極を貼ることができる。
 - 製作加工を単純化できる。
- 機械的強固で、熱膨張係数が小さい。
- 熱伝導率が高い
- 高周波電子回路や高密度実装回路等でも使用されている。

放電耐性がある

← 炭素を含んでいないため、
放電しても炭化導電路が形成されない

Material	GCS71
Coefficient of thermal expansion [$10^{-6}/\text{K}$]	5.5
Thermal conductivity [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]	3.2
Specific heat [$\text{J}/\text{g} \cdot \text{K}$]	0.66
Young's modulus [GPa]	95
Dielectric constant	7.1
Volume resistivity [$\Omega \cdot \text{cm}$]	$>10^{14}$



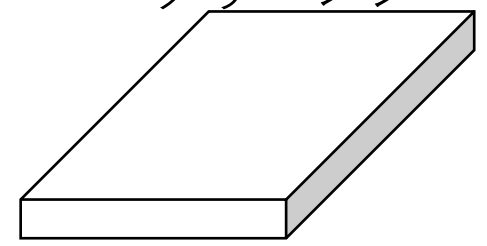
LTCC-GEM

平井精密工業, 岐阜

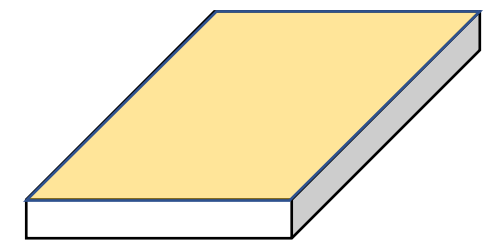
小宮氏と平井精密工業の共同で開発された新素材GEM

製造過程:

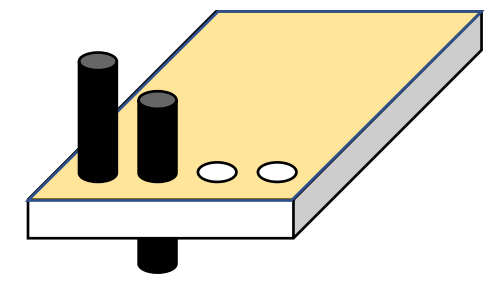
セラミック
グリーンシート



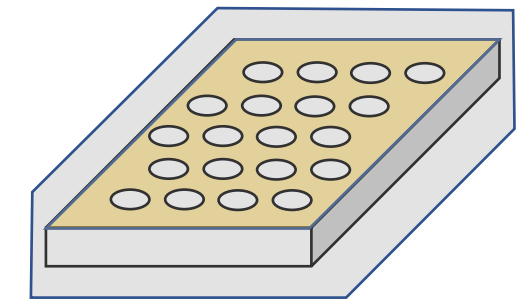
→ 金メッキ



→パンチング



→焼結

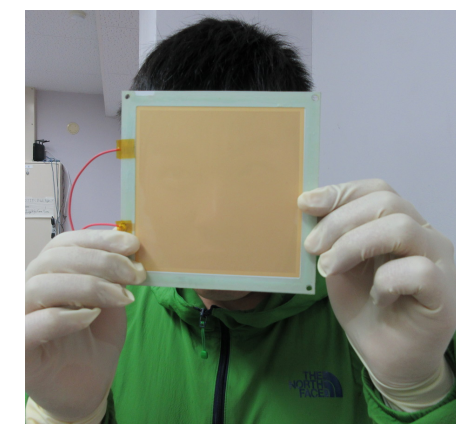
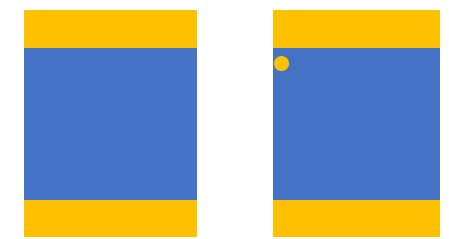
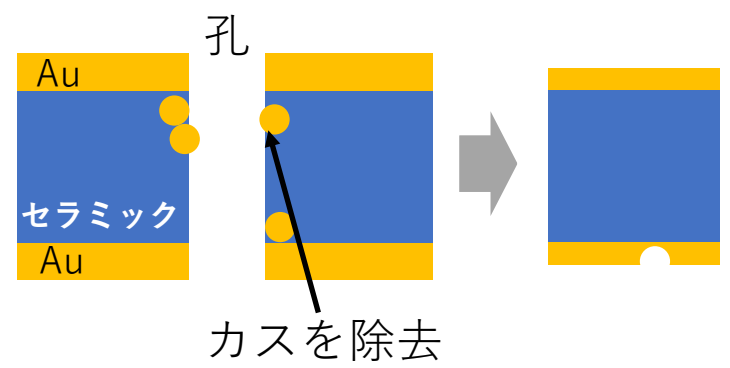


エッチング

→ 再焼結

→ メッキ

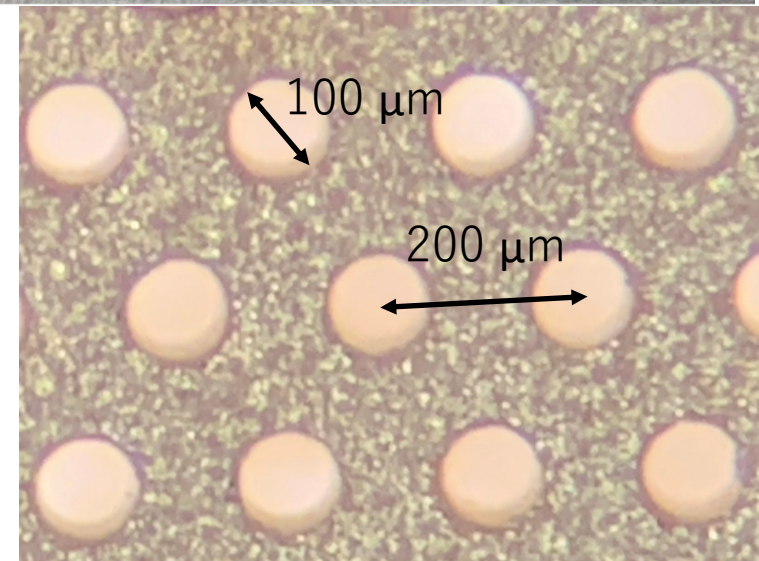
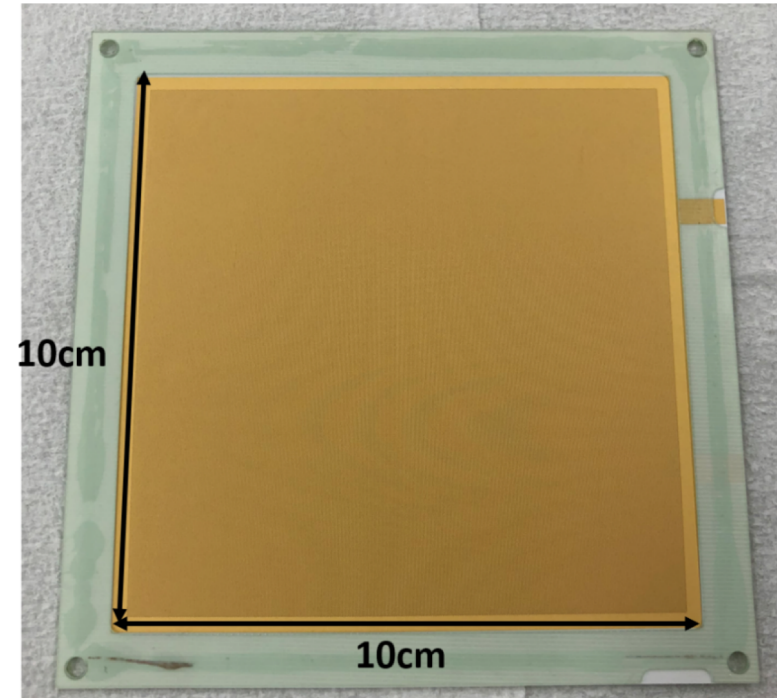
→ 完成





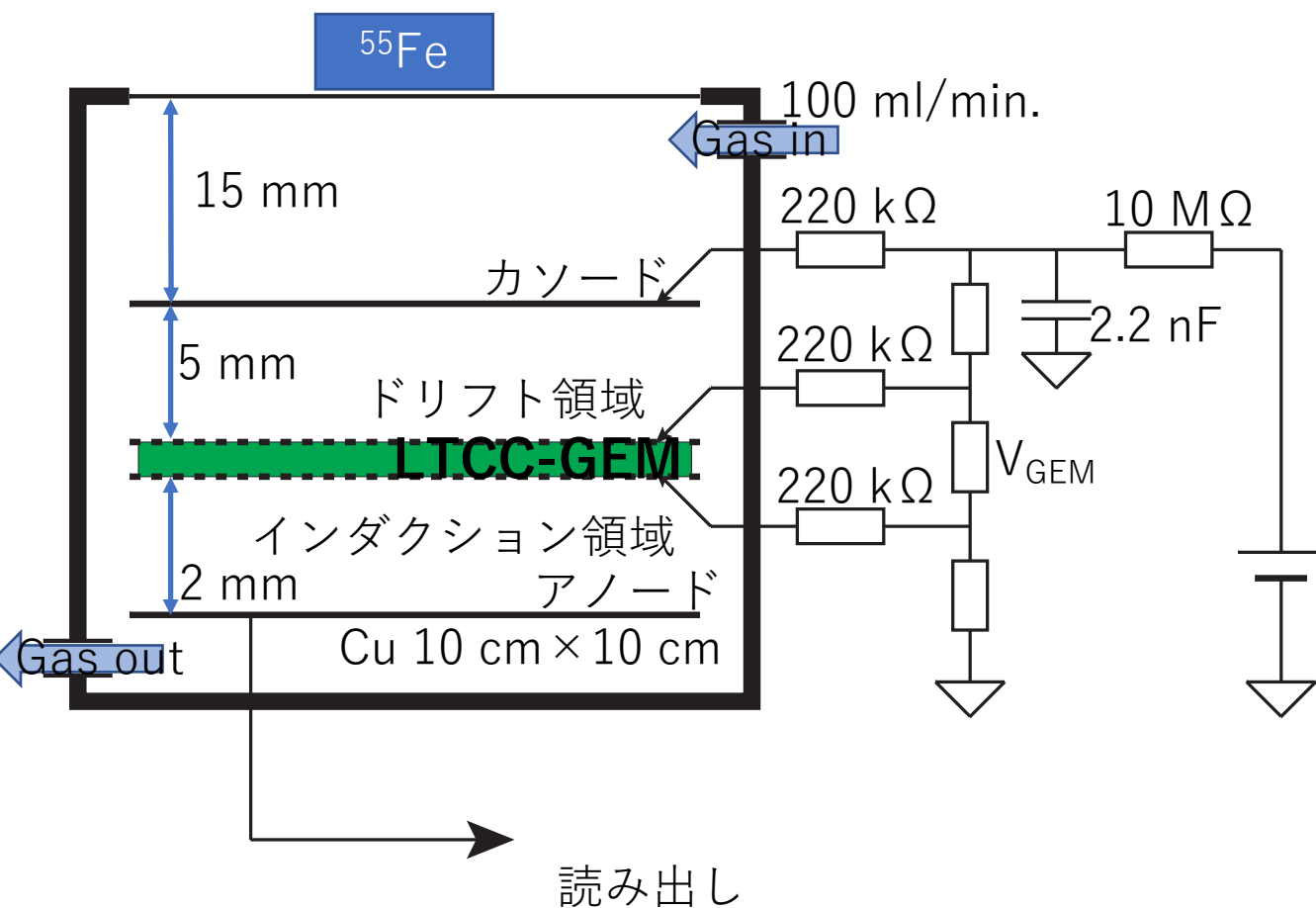
LTCC-GEM @ Iwate-U

- 有効領域 10 cm × 10 cm
- 厚さ 200 μm
- 孔の直径 100 μm
- 孔のピッチ 200 μm





実験セットアップ



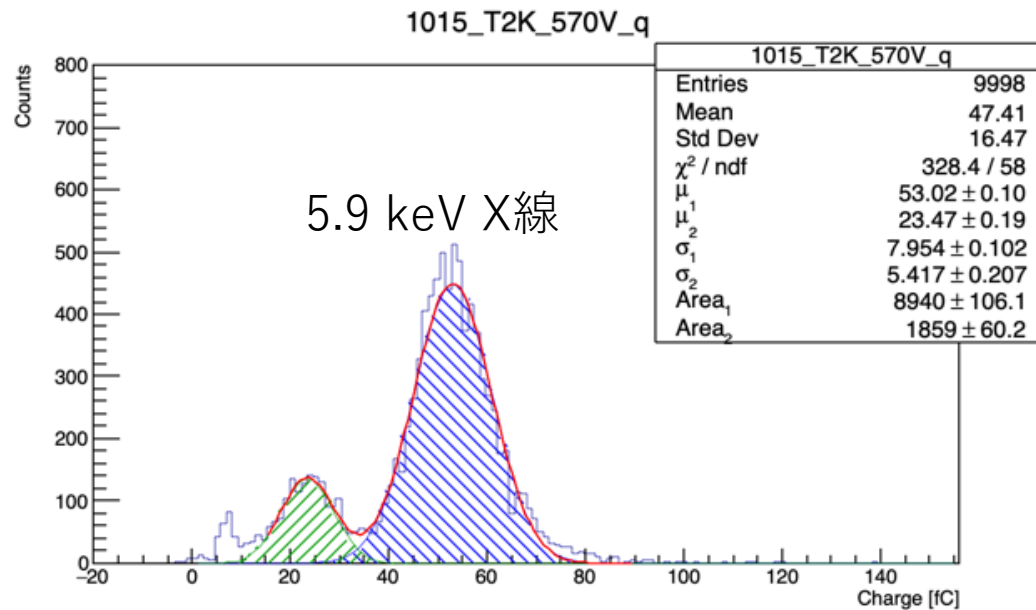
- LTCC-GEM: 厚さ 200 μm
- 線源: ^{55}Fe X線 (5.9 keV)
- ガス:
 - Ar/CO₂ (70% / 30%)
 - T2K=Ar/CF₄/iso-C₄H₁₀ (95% / 3% / 2%)
- 電場

	(ArCO ₂)	(T2K)
• ドリフト領域	1.5 kV/cm	0.23 kV/cm
• インダクション領域	6 kV/cm	2.7 kV/cm
- アノードで収集された電荷から増幅率を求める.

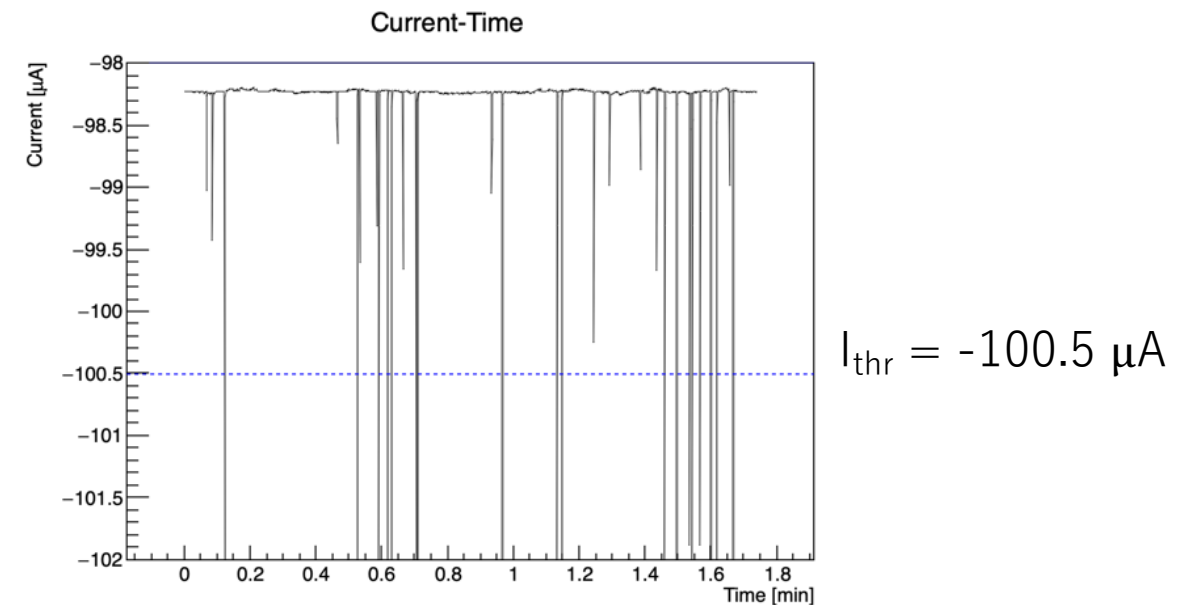


ガス増幅率, エネルギー分解能の定義

e.g.) 200 μm 厚 LTCC-GEM, $V_{\text{GEM}} = 565 \text{ V}$, T2Kガス



信号電荷分布の一例.
エネルギー分解能はピークの
半値全幅/平均で評価した.

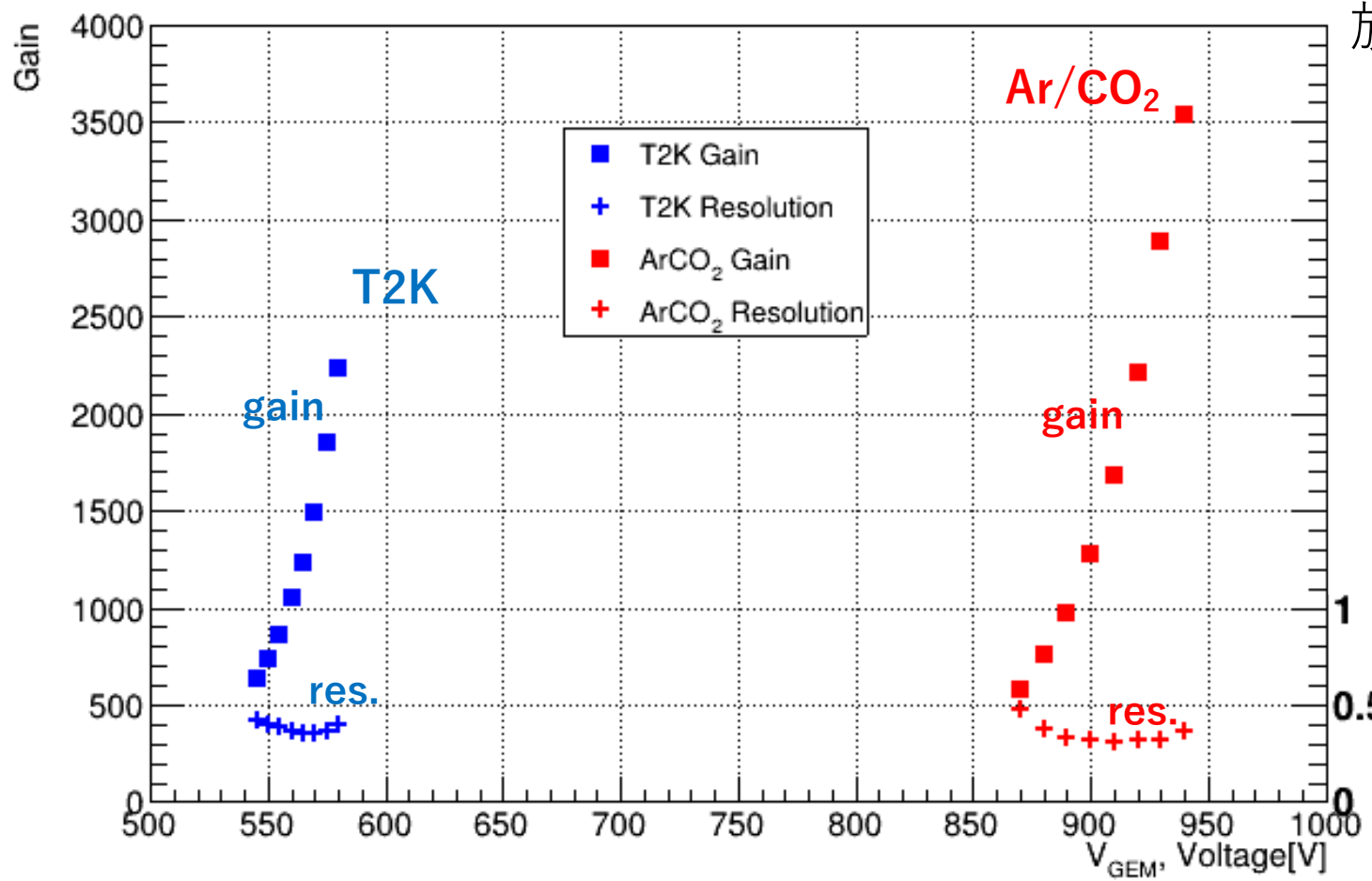


電源の電流値も監視しており,
一定の電流値 I_{thr} を超えた時に
放電が起きたと定義する.



ガス増幅率とエネルギー分解能

V_{GEM} -Gain, LTCC-GEM 200 μ m



印加電圧は放電が顕著でない
放電レート < 10 Hzの領域で試験された。

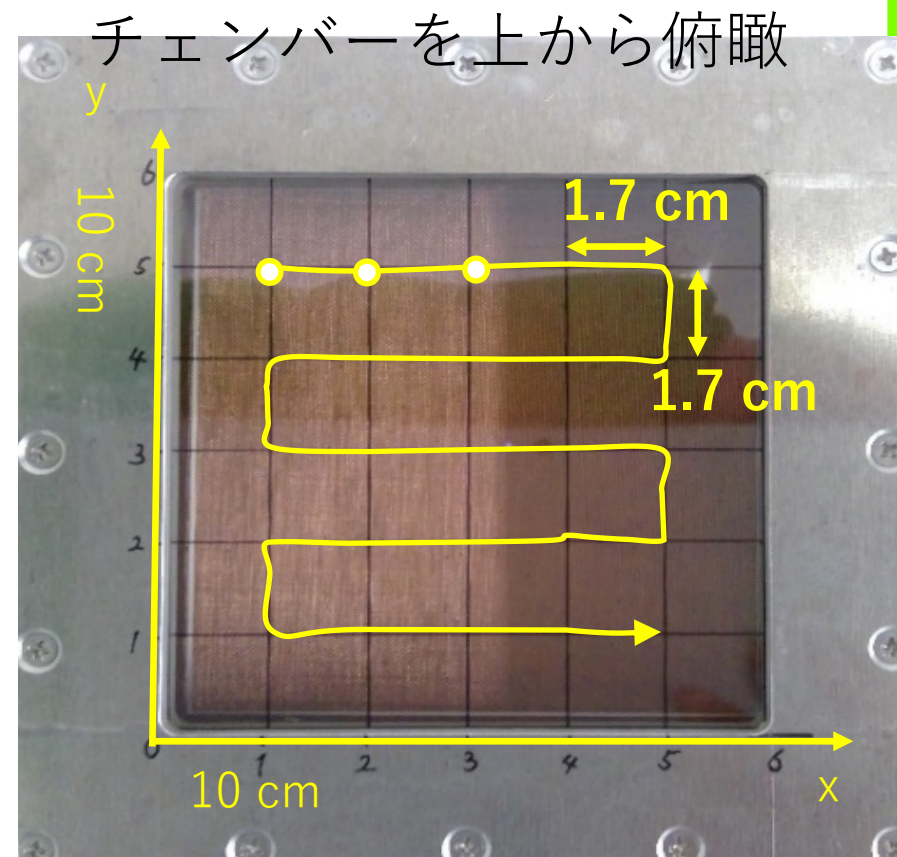
ガス増幅率は
Ar/CO₂ガスで > 3500 (V_{GEM} =940 V)
T2Kガスで > 2300 (V_{GEM} =580 V)
を達成。

エネルギー分解能は
Ar/CO₂, T2Kガスで~30 %程度
高 V_{GEM} 側では放電の影響から
分解能が悪化していることが
観測されている。

増幅率の一様性

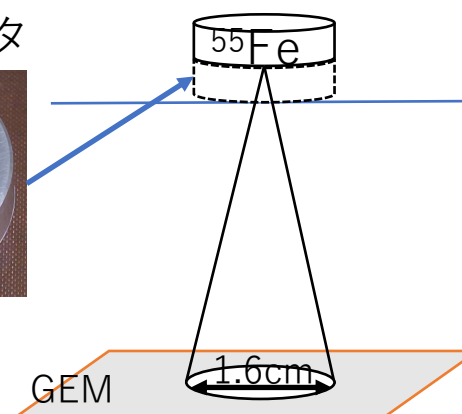
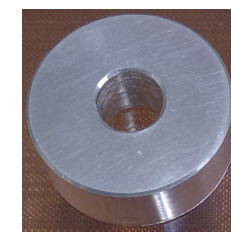
GEMの増幅率が平面の位置上でのどの程度一様であるか観測した。

- コリメータを用い, GEM平面上での広がりを直径1.6 cmに制限した。
- チェンバー窓に5×5の目印を配置し, 各点上に線源を置いて増幅率測定を行なった。
- 測定はGEMをチェンバー内で90°回転させて2回行なっており, GEM自体のガス増幅率の位置依存性を観測した。



5×5 測定点

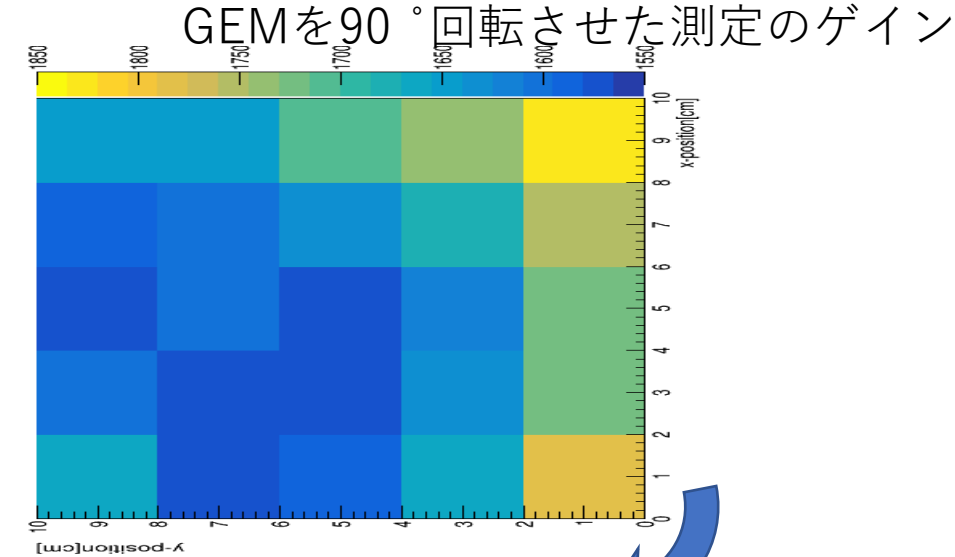
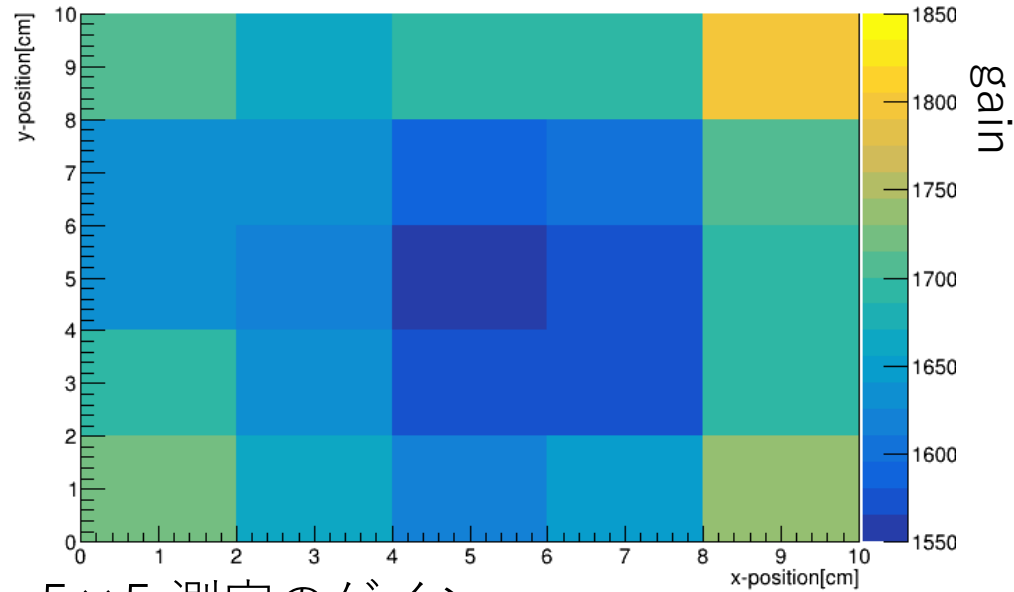
コリメータ





GEMの増幅率一様性

測定は増幅率が十分に安定したことを確認した後に行なっている。



左図とGEMの向きを合わせた

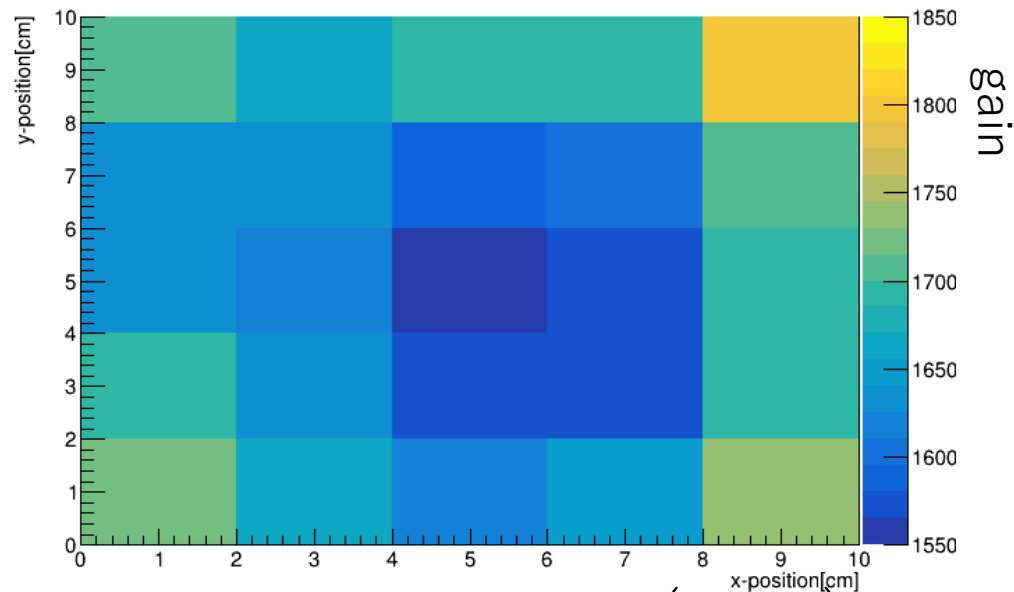
2回の5×5 測定の各測定点の増幅率の違いは最大で6.5 %程度

- GEM中央はゲインが低い
- GEM四隅(特に上図の右上は)ゲインが高い

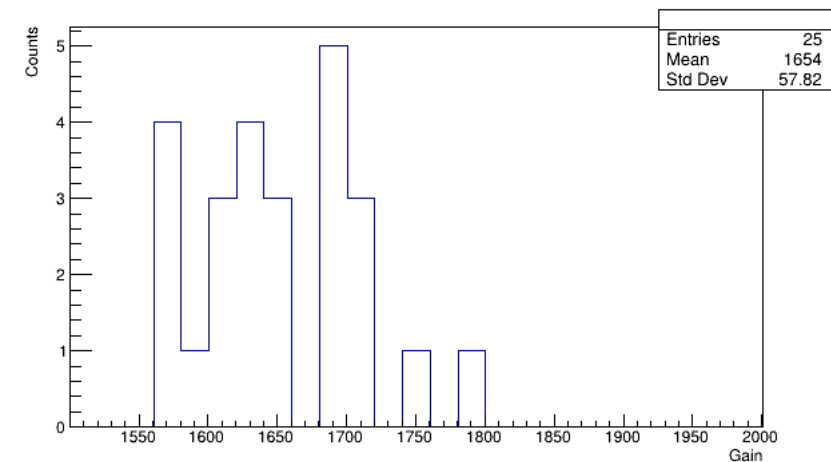


GEMの増幅率一様性

測定は増幅率が十分に安定したことを確認した後に行なっている。



Gain = 1654 ± 58 (RMS)



5×5 のゲイン測定のゲイン分布

10 cm × 10 cm LTCC-GEM(200 μm厚)の増幅率の一様性は 3.5%.

- LTCC基板の厚さの非一様性によるものではないか?
LTCC-GEMの厚さ測定と、厚さによる増幅率の効果をシミュレーションから予測する。
- GEMの製作の精度は $\pm 5\%$ ($\sim \pm 10 \mu\text{m}$)程度(平井精密工業より)。

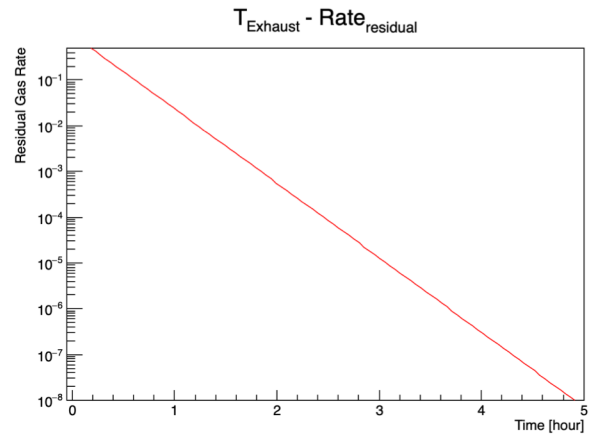
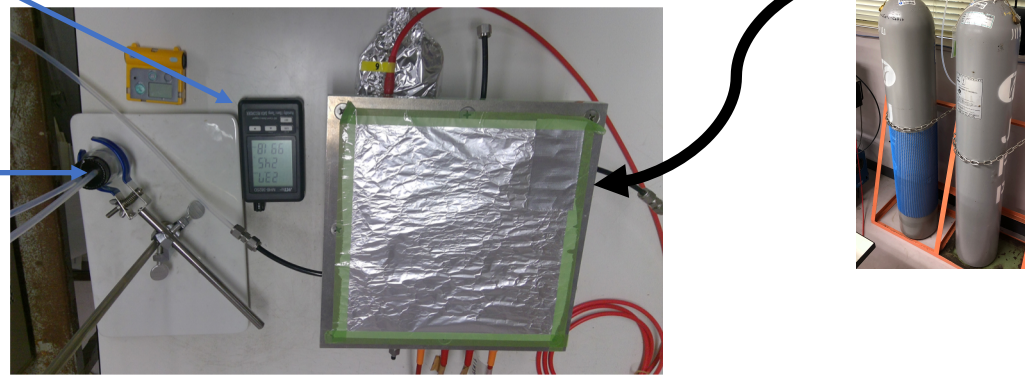


ガス置換-増幅率安定性

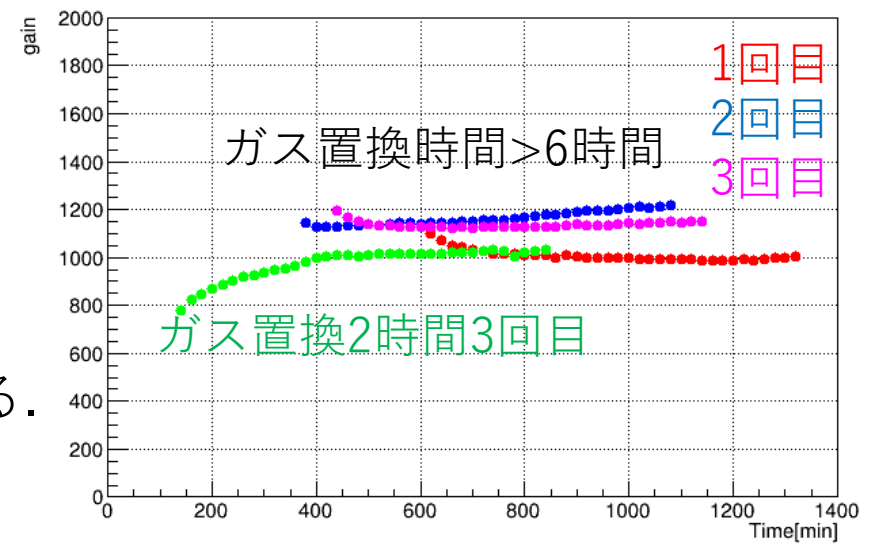
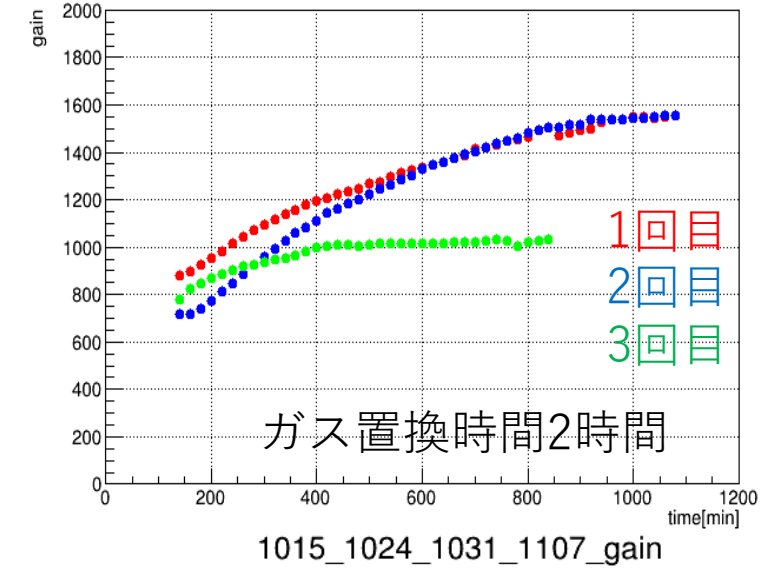
室温・気圧計

流量100 ml/min.

ガス排気:
バブラーで逆止



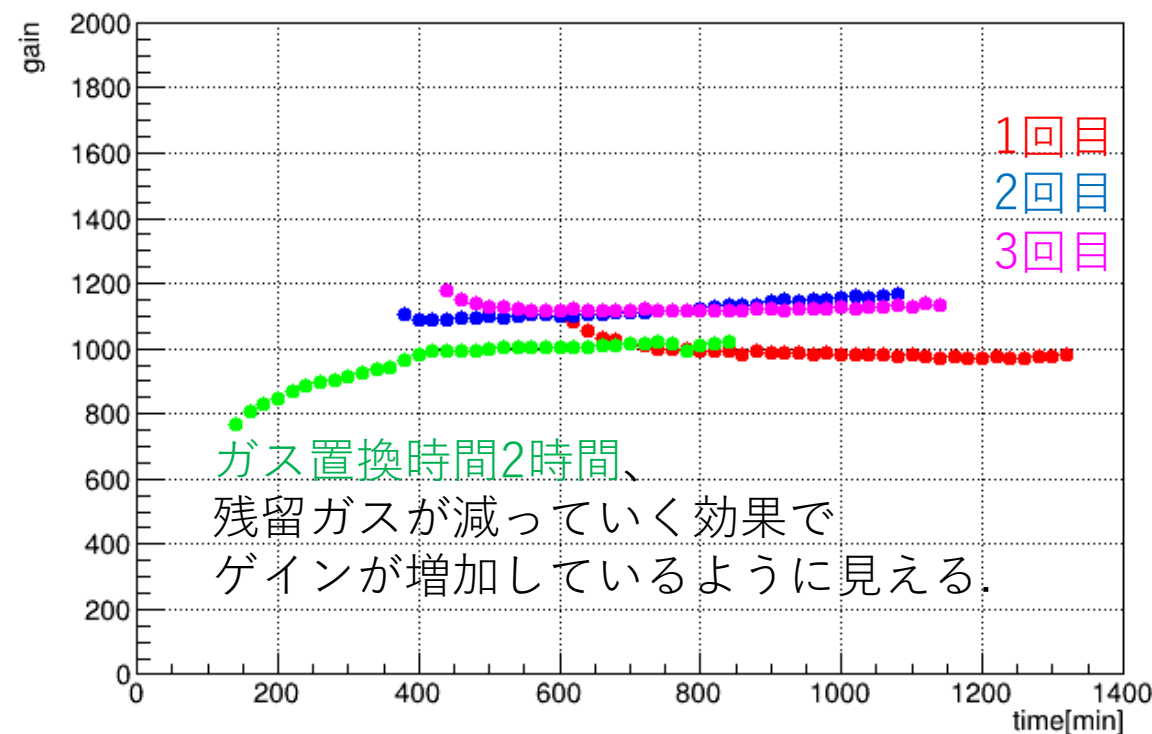
← ガス置換時間と容器内残留ガスの割合
 ここでは、容器(+配管)を約1.6 l,
 ガス流量100 ml/min.とする。
 2時間で残留ガス0.1 %程度になる。
 2時間のガス置換後の増幅率測定では、
 増幅率が増加していく様子が観測されている。
 6時間以上のガス置換(残留ガス $<10^{-9}$)では、
 増幅率が減少していく様子が観測される。





増幅率の安定性

- ガス注入開始時刻を $t = 0$ とした増幅率の時間変化の様子



チェンバー近傍の室温によって補正を行なっている

増幅率は時間変化とともに減少し、
数時間程度で変化は飽和する。

3回の実験で初期ゲインと安定後ゲインは
約10%程度ばらつく。

	1回目	2回目	3回目
初期ゲイン	1099 ± 2	1193 ± 2	1143 ± 2
安定後ゲイン	~1010	~1130	単調増加
安定化時間	60 min.	60min.	単調増加

ゲインが時間経過によって減少する様子を観測

荷電粒子がGEMホール内壁面に付着し、

増幅電界を変化させているのではないか？

ゲインに関わる別のパラメータがあるのではないか？

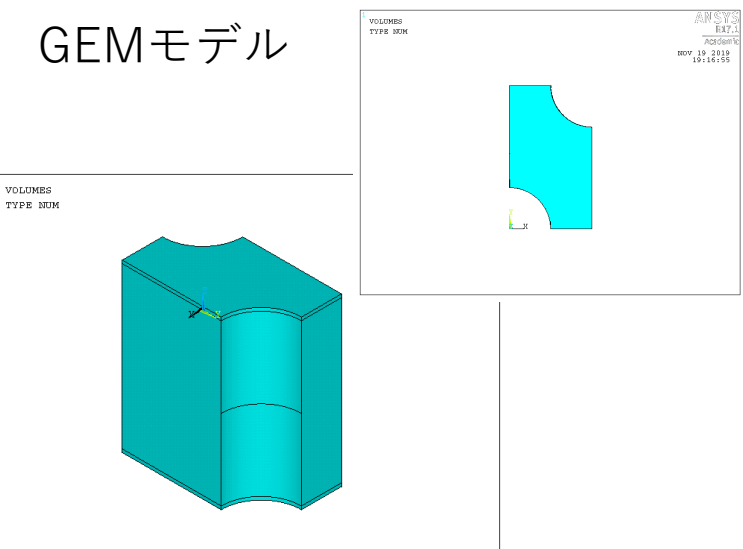


ガス増幅シミュレーション

- シミュレーションを用いて, GEMの最適化をおこなう.
- まずはLTCC-GEMのガス増幅特性を再現させる.

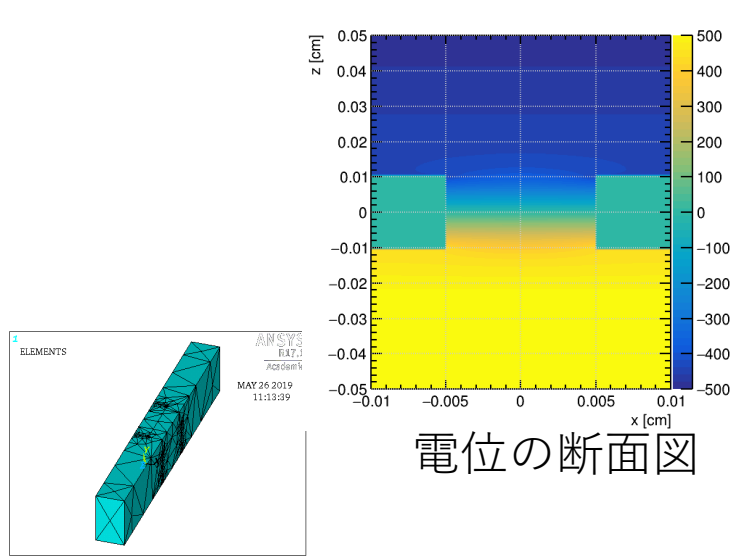
LTCC-GEMモデル作成

GEMモデル



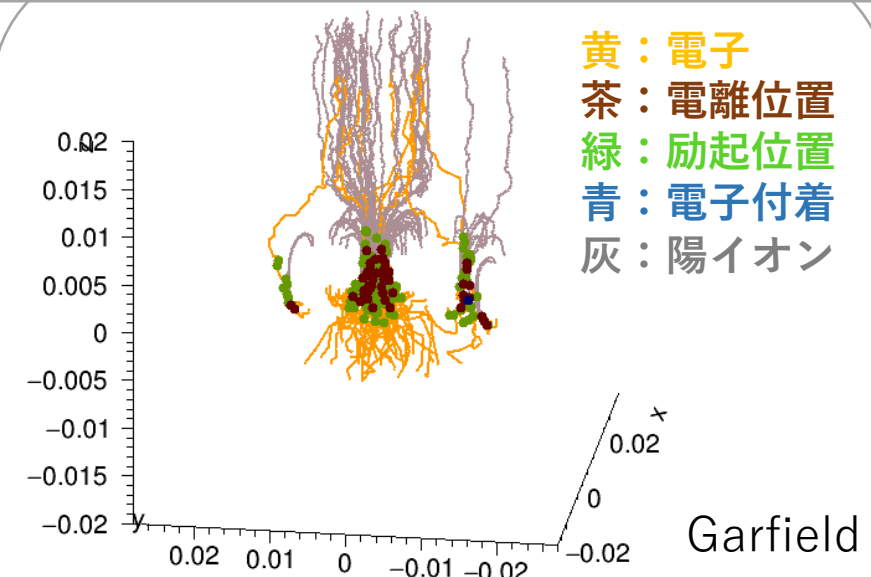
比誘電率によって素材を指定

電場シミュレーション



有限要素法(Ansys)を用いて電場計算

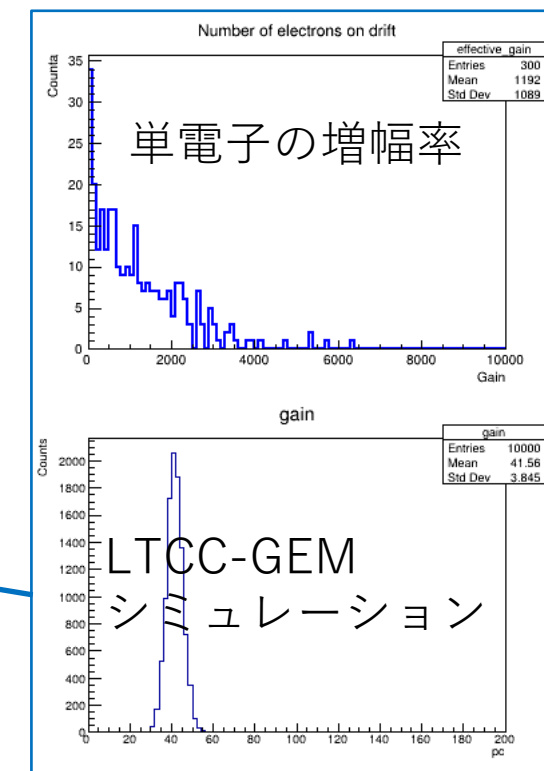
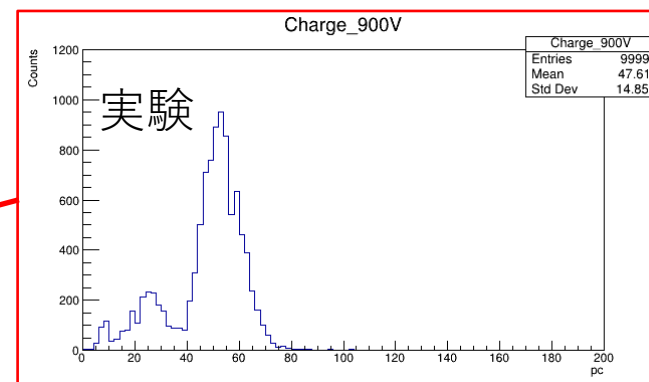
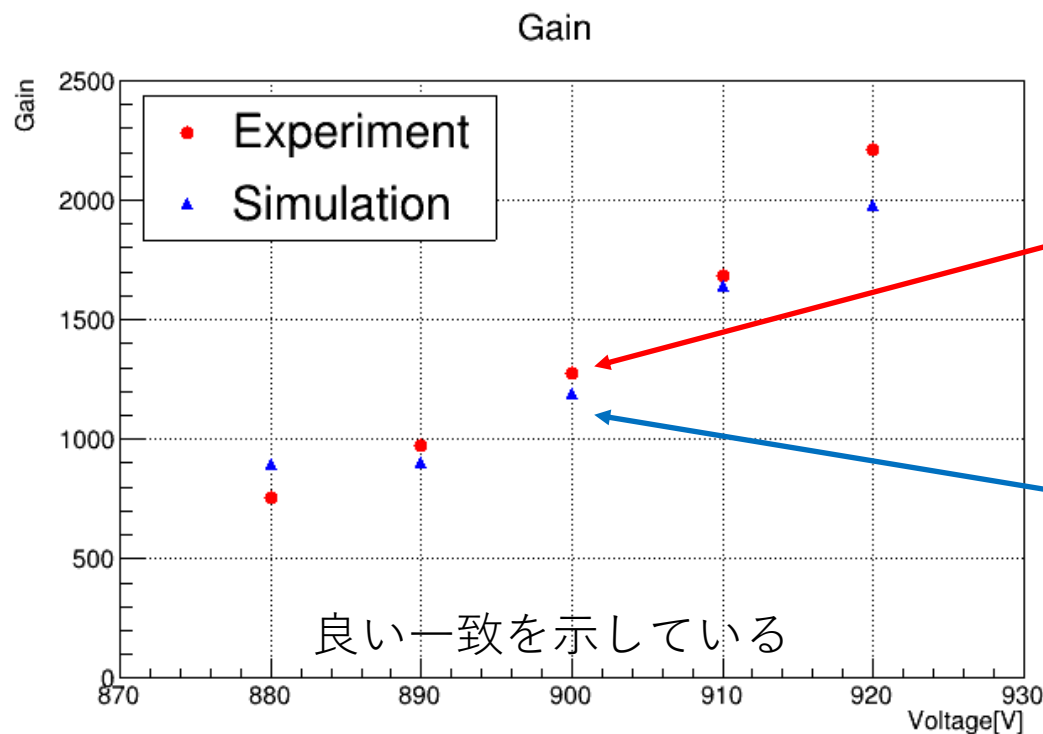
粒子の運動をシミュレーション



微小ステップごとに粒子の振る舞いを計算する



ガス増幅sim. with LTCC-GEM in Ar/CO₂



- **LTCC-GEMのガス増幅シミュレーションから、増幅率- V_{GEM} 特性を得た. 実験との差は15%程度.**

- 空間電荷効果は無視している.
- GEMの最適化や実験結果の理解を深める
 - 例)GEMの厚さがゲインに与える効果を見積もる.



まとめ

- LTCC-GEMは放電耐性を持つGEM.
- 単層で2000以上の増幅率を記録している.
 - $V_{\text{GEM}} \sim 920 \text{ V} (580 \text{ V}) \text{ Ar/CO}_2 \text{ (T2K)}$
- 10 cm × 10 cm のLTCC-GEMでゲインの一様性は $\sim 3.5 \%$.
- ガス増幅率は時間経過によって変化することが観測されている
 - 試験開始から1時間程度で約10 %ゲインが減少した.
- ガス増幅率は10%程度変化する.
 - 増幅率に関わる他のパラメータをさらに考える.
- GEMの最適化のためにガス増幅シミュレーションを行った.
LTCC-GEMの増幅率を15 %以内で再現することができた
(Ar/CO₂, V_{GEM} 880 V – 920 V).

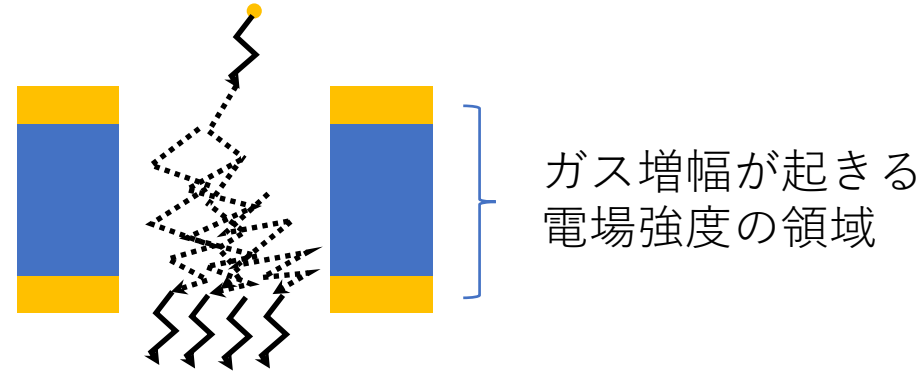


Backup



増幅率の温度/圧力 補正

- ガス増幅の増幅率はガス密度によって変化する.

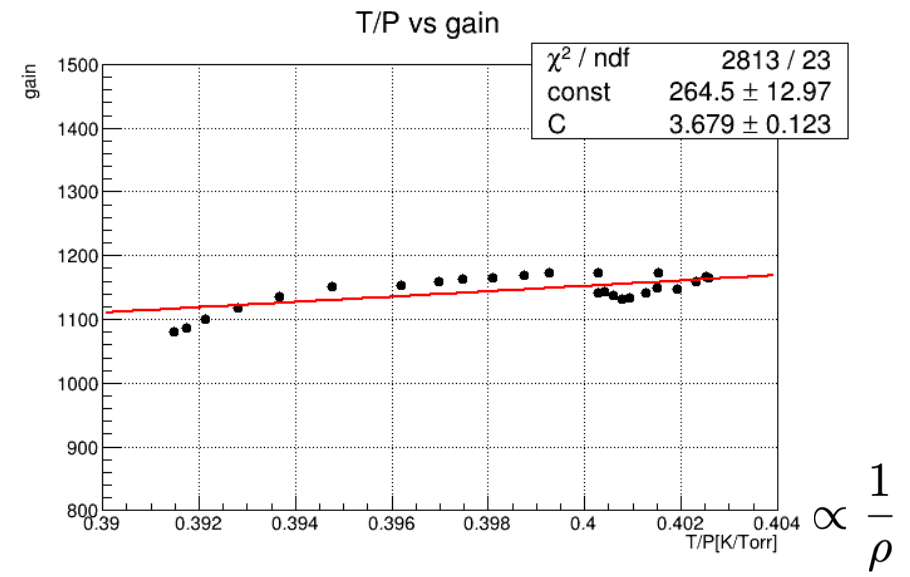


ガスの密度が変化することで、
単純にガス増幅の起きる領域で
電離の起きる回数が増えるとする

$$G(\rho) = A \exp(C\rho)$$

AとCはガスの種類や電場強度による定数

$$\rightarrow G(\rho) = G_0 \cdot \exp\{C(\rho - \rho_0)\}$$



圧力・温度はチェンバー外部の室温計

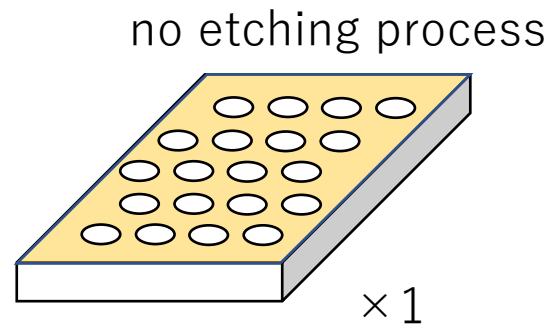
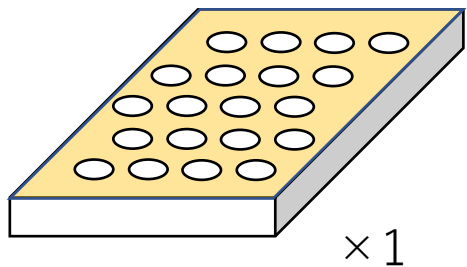
実験室の温度をコントロール(エアコンによる)することで観測される増幅率から補正係数を得た。



LTCC-GEM

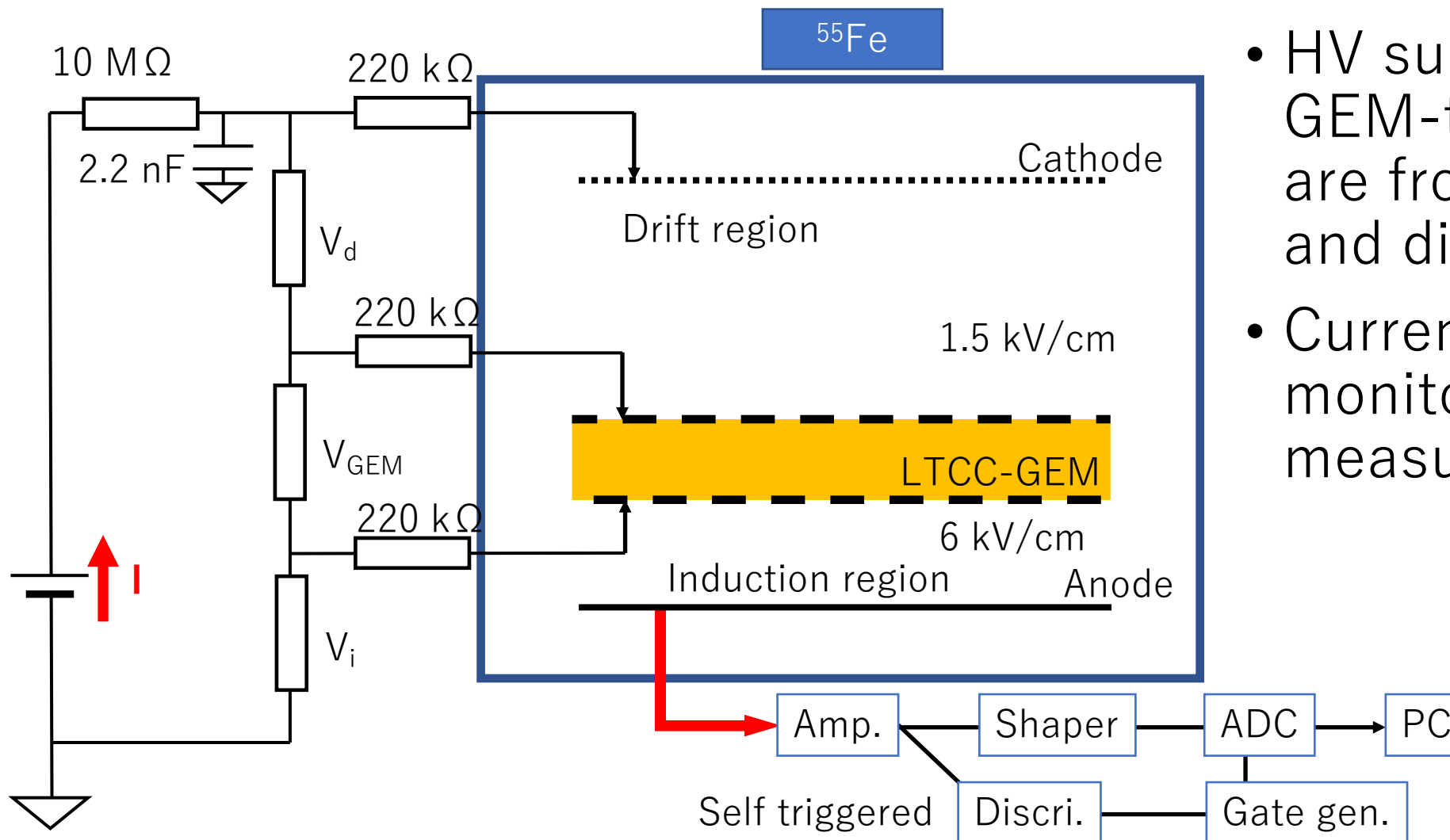
@ Iwate U.

- Effective region $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$
- Thickness $200\ \mu\text{m}$
- Hole diameter $100\ \mu\text{m}$
- Hole pitch $200\ \mu\text{m}$





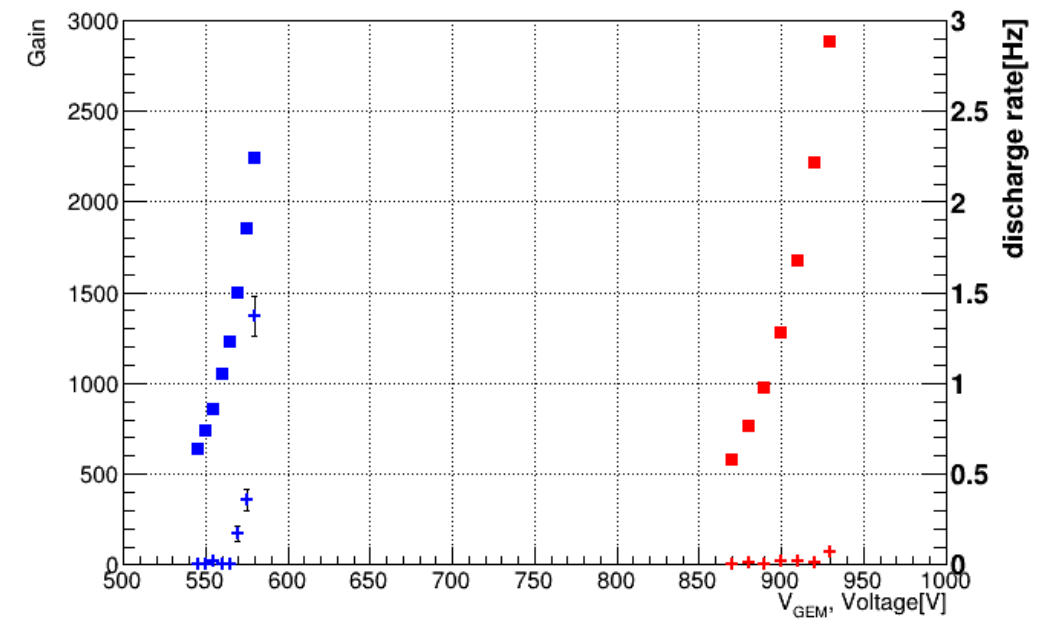
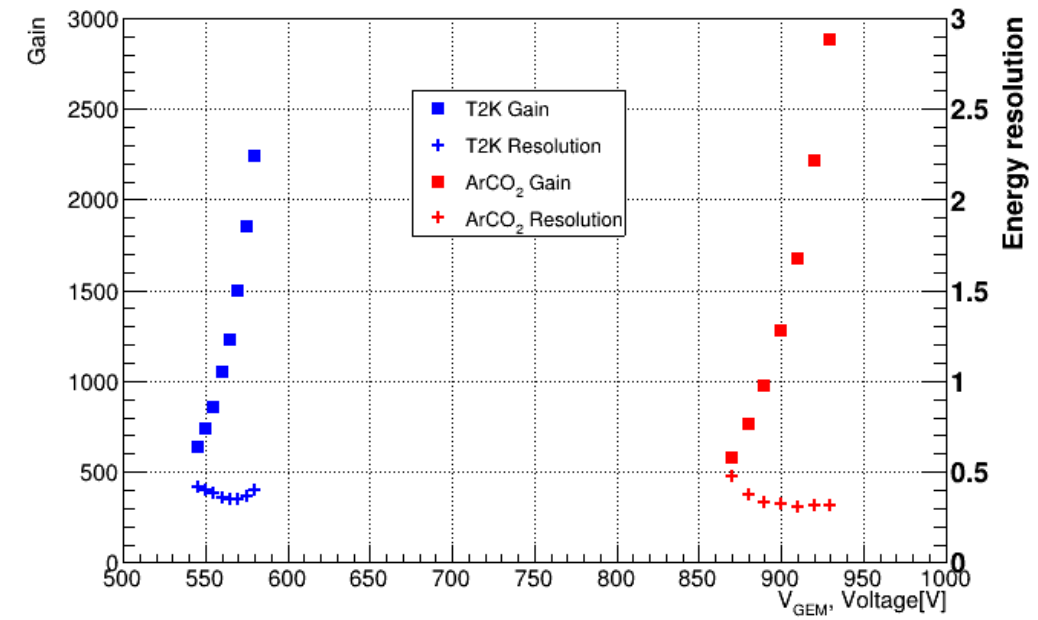
HV setup



- HV supply for Cathode, GEM-top and bottom are from a HV module and divider.
- Current of HV is monitored at measurements.



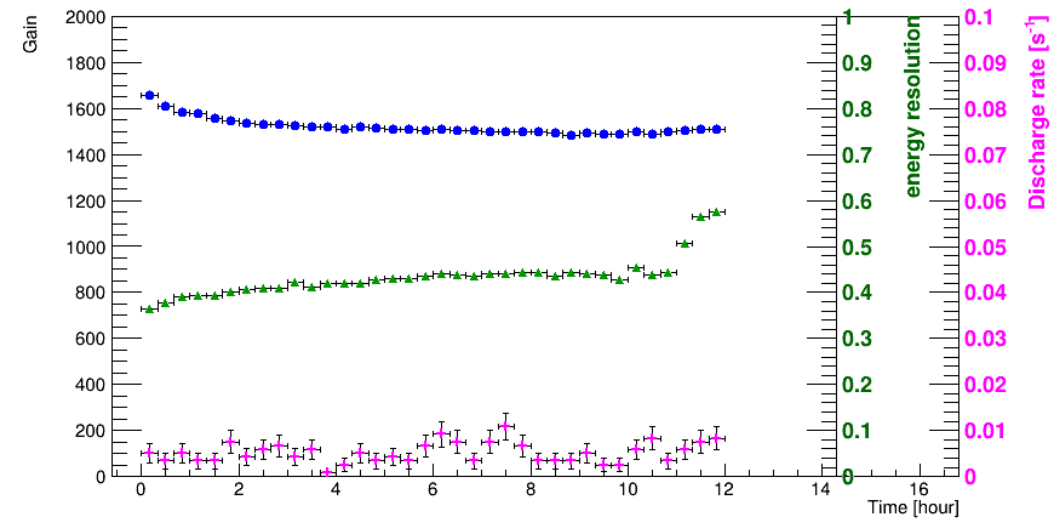
V_{GEM} -Gain, LTCC-GEM 200 μ m



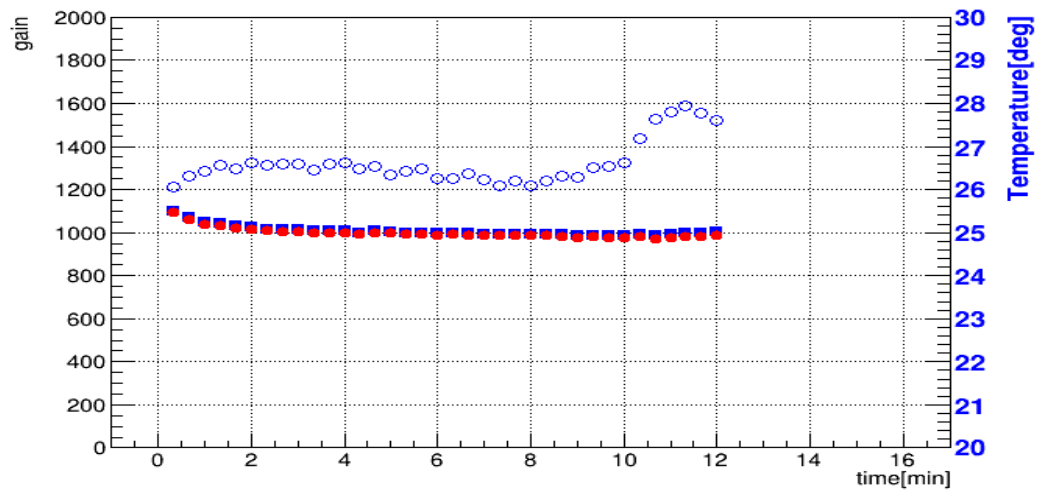


Long RUN各測定

Long time run T2K_long



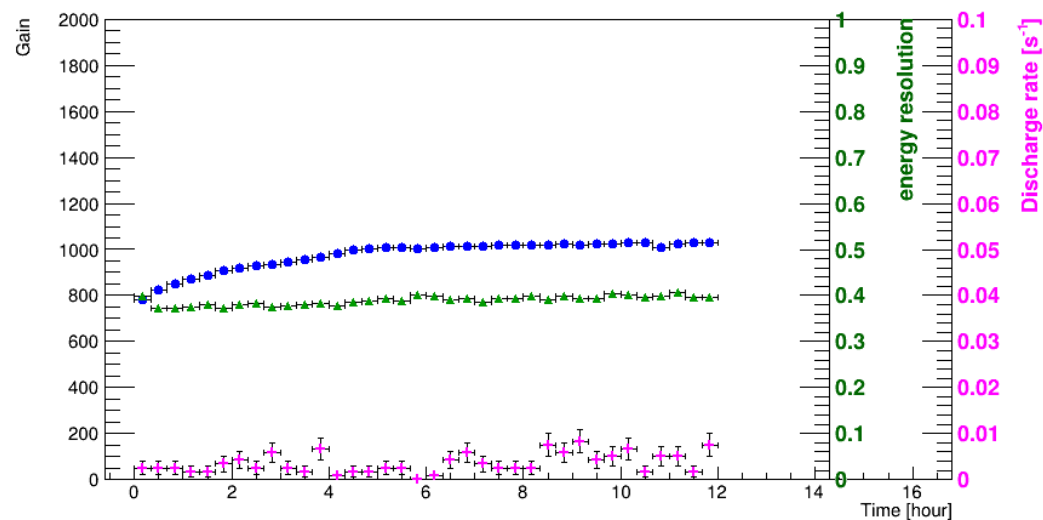
10/15
ガス置換時間10h



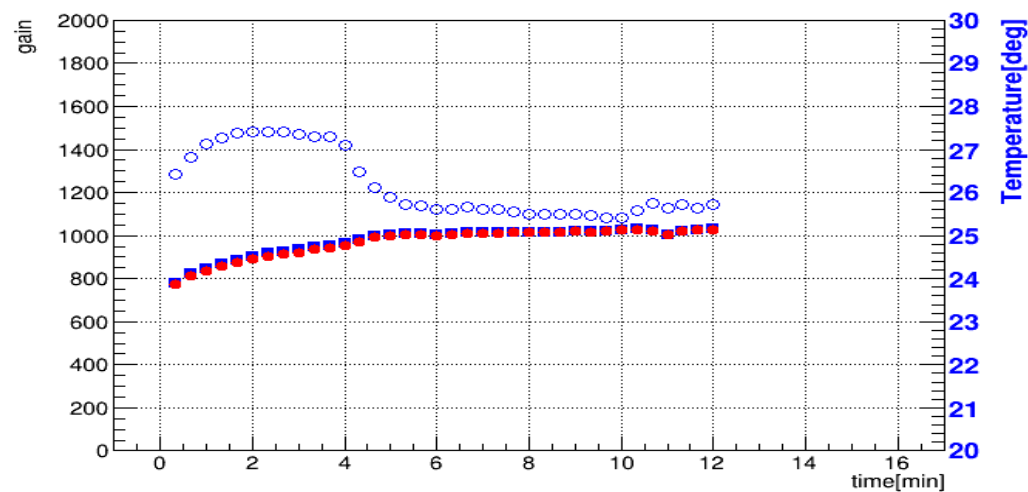


Long RUN各測定

Long time run T2K_long



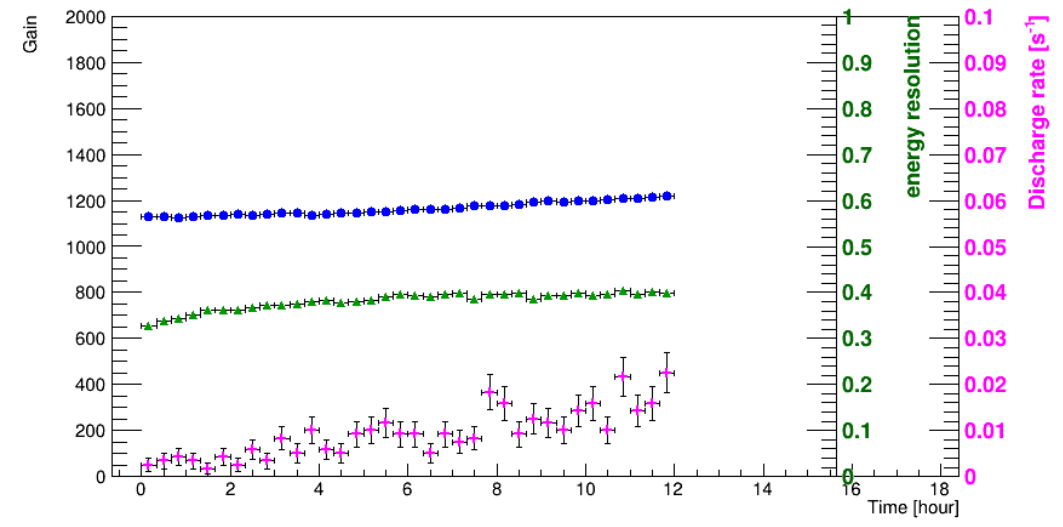
10/24
ガス置換時間2h



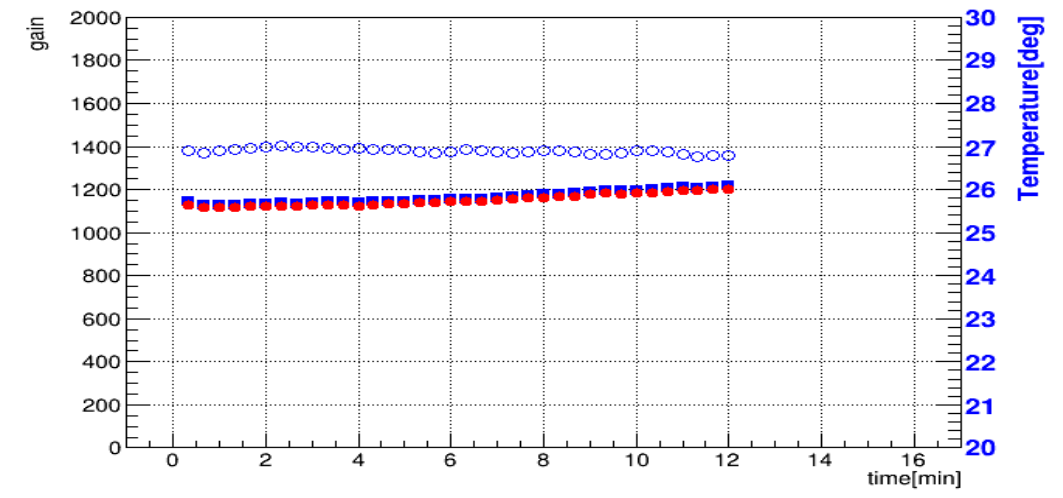


Long RUN各測定

Long time run T2K_long



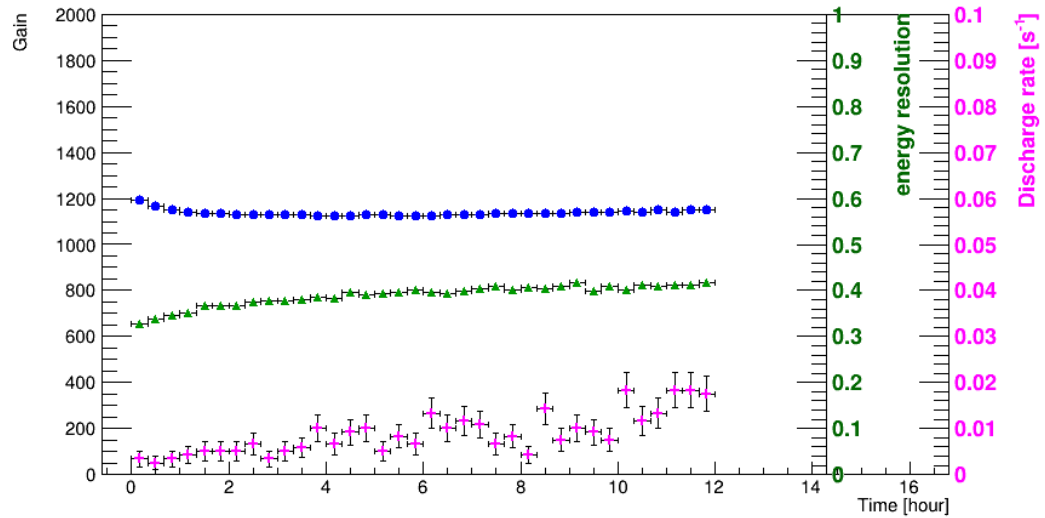
10/31
ガス置換時間7h





Long RUN各測定

Long time run T2K_long



11/06
ガス置換時間6h

