

大強度重イオンビーム照射用
低圧ガスアクティブ標的

CATの開発と現状

大田 晋輔 (東大CNS)

遠藤 史隆 (東北大)

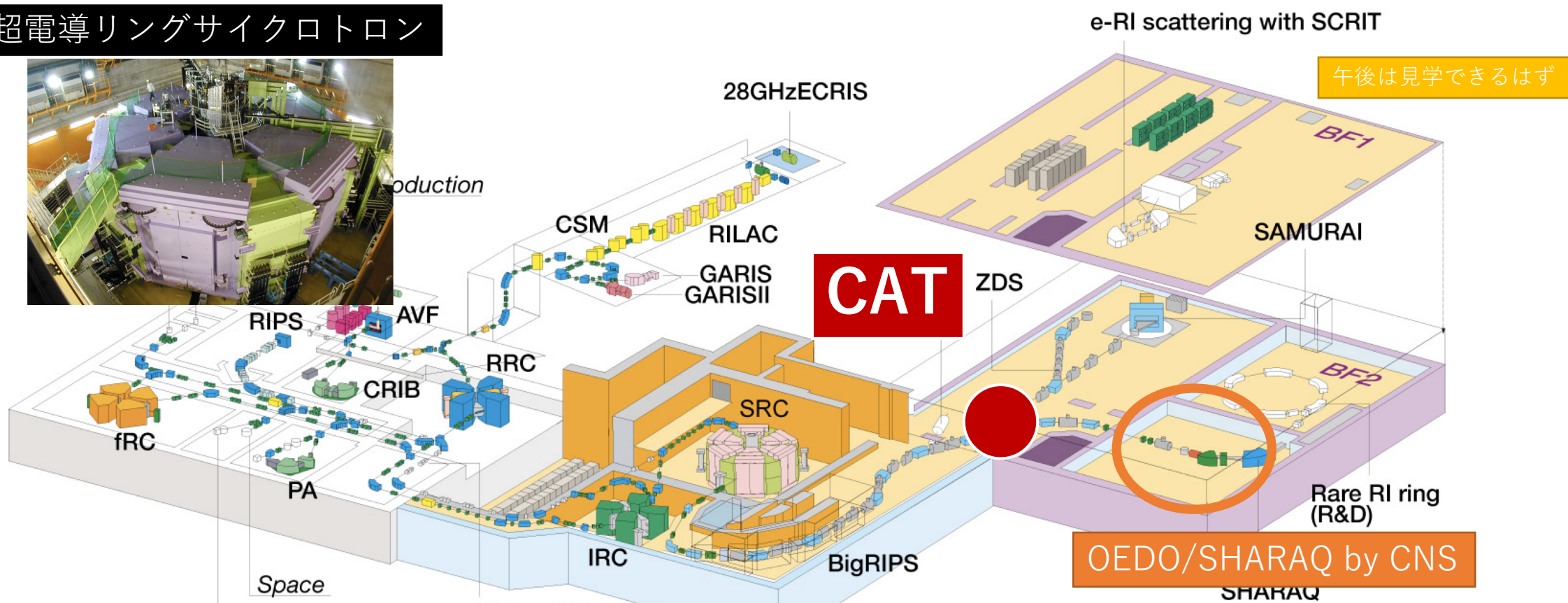
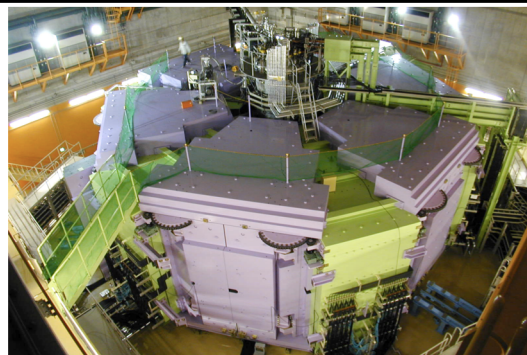
小嶋 玲子(CNS)、岩本 ちひろ(CNS=>理研)、Ningtao Zhang (IMP)、
for H307, RIBF113, RIBF79 collaborations

毎秒100万個で100-300 MeV/uの $Z=50$ 近傍のビーム粒子を入射し、
 $Z=1$ の 0.3 – 10 MeV 程度の粒子を同時測定する

不安定核物理の最前線

RIBF ~世界最大強度の不安定核ビーム施設~

超電導リングサイクロトロン



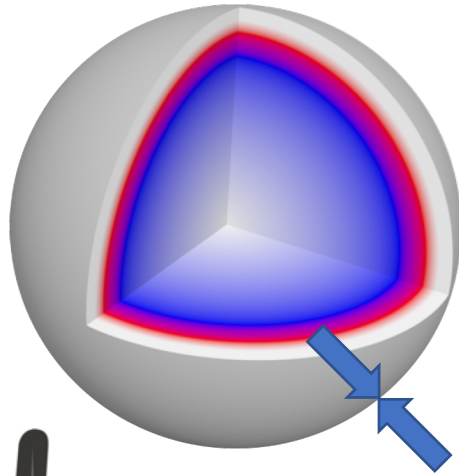
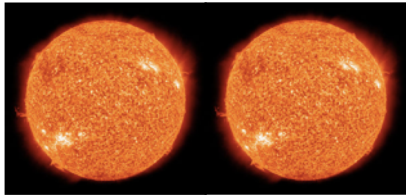
高速の70%まで加速した ^{238}U などから不安定核を生成。
176個(2019/12/06現在)の新同位元素を発見。
原子核物理、生物照射、核化学、核変換技術開発、産業利用などを推進。

核物質の物質相と状態方程式

物質：電子系
核物質：核子系

→ 中性子星 = 中性子 + 陽子 +

2 倍の太陽質量



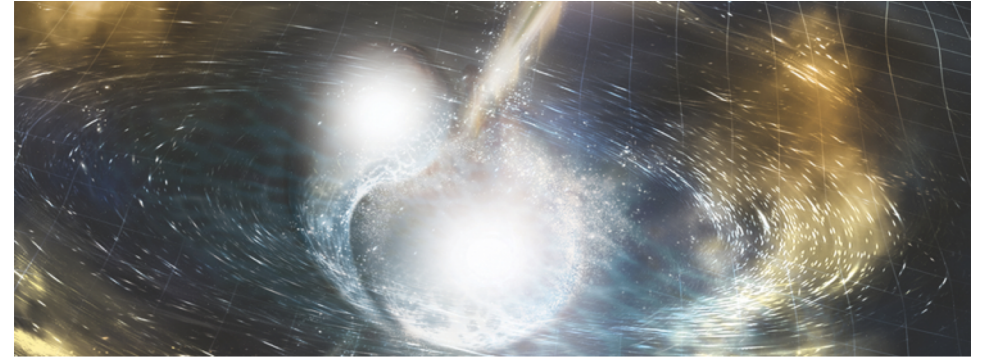
多様な物質相
超流動相
パスタ相
クラスター凝縮相
中間子凝縮相

核子対移行強度
多核子移行強度



核力による圧力P
= 重力
(密度と圧力の関係)
$$P = \rho^2 \frac{\partial E/A(\rho, \alpha)}{\partial \rho}$$

中性子星連星合体

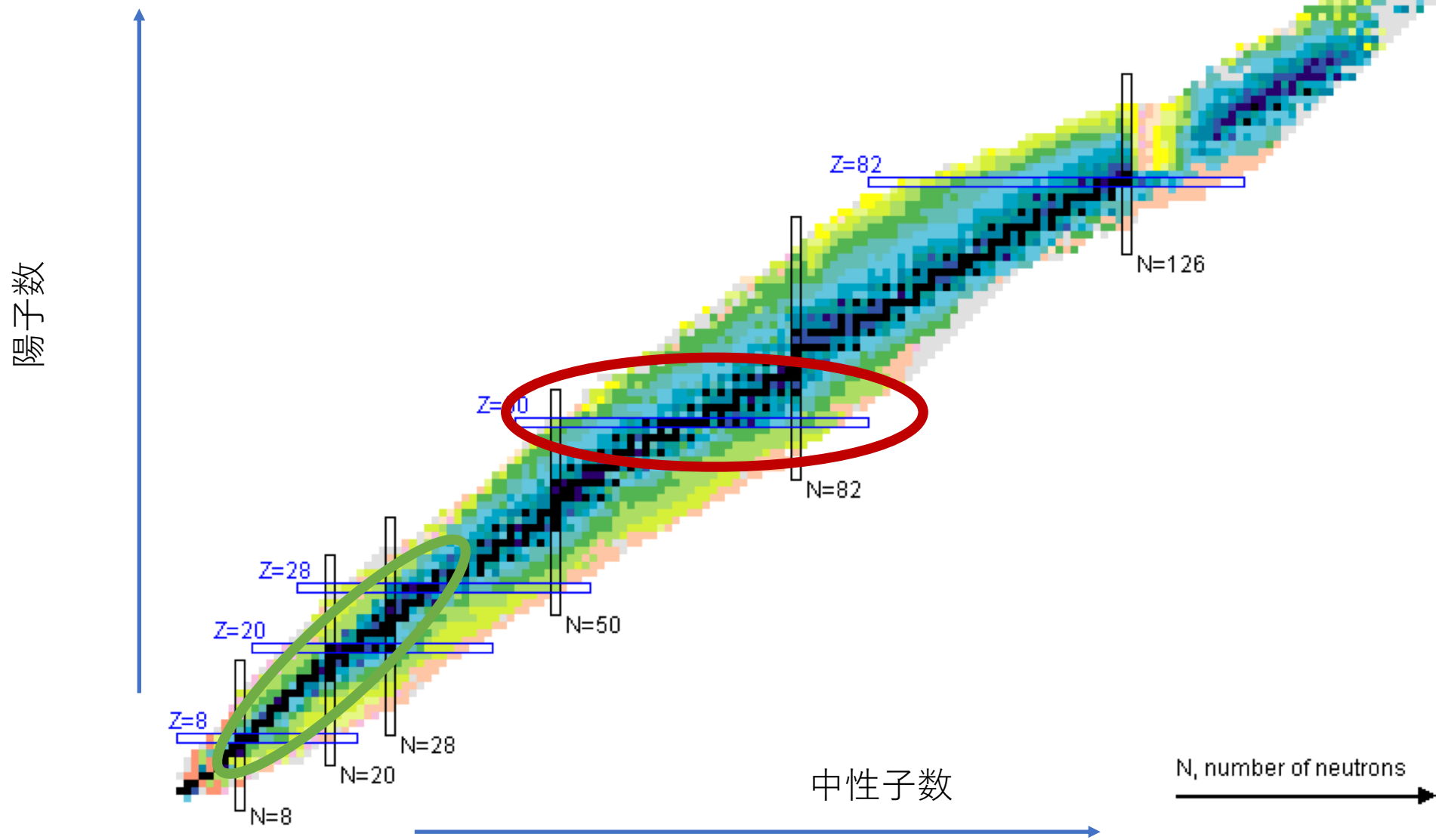


潮汐変形能 (tidal deformability)
GW170817: PRL 119, 16101 (2017)

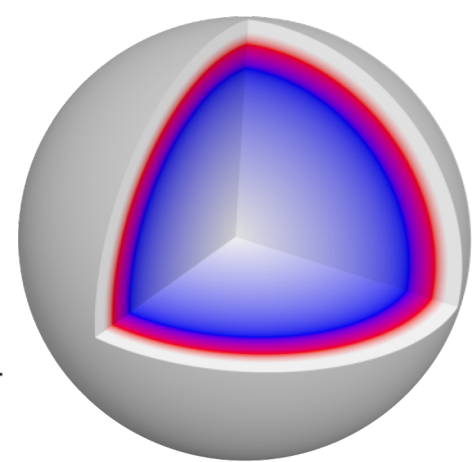
状態方程式 $E/A = E/A(\rho, \alpha)$

原子核の非圧縮率、
中性子スキン、双極分極率

中性子・陽子のバランスを変えて中性子星を目指す



中性子星

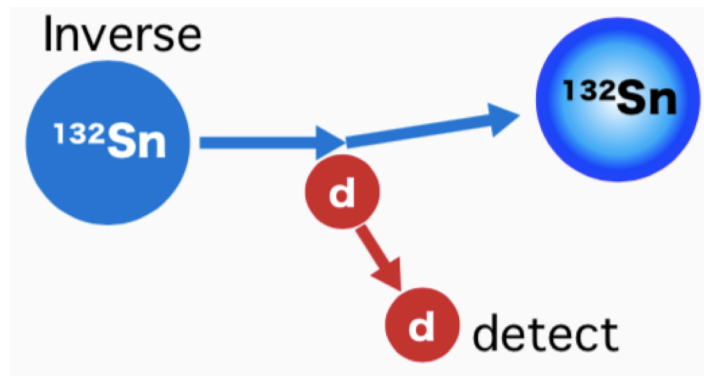


測定したい反応

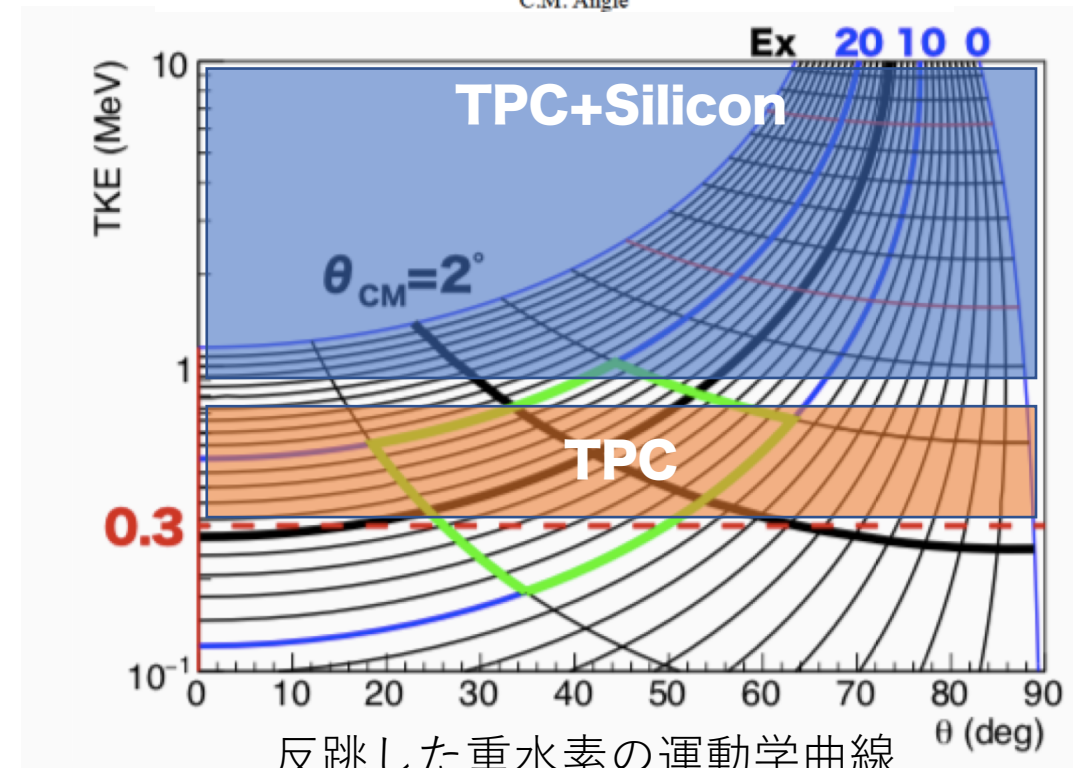
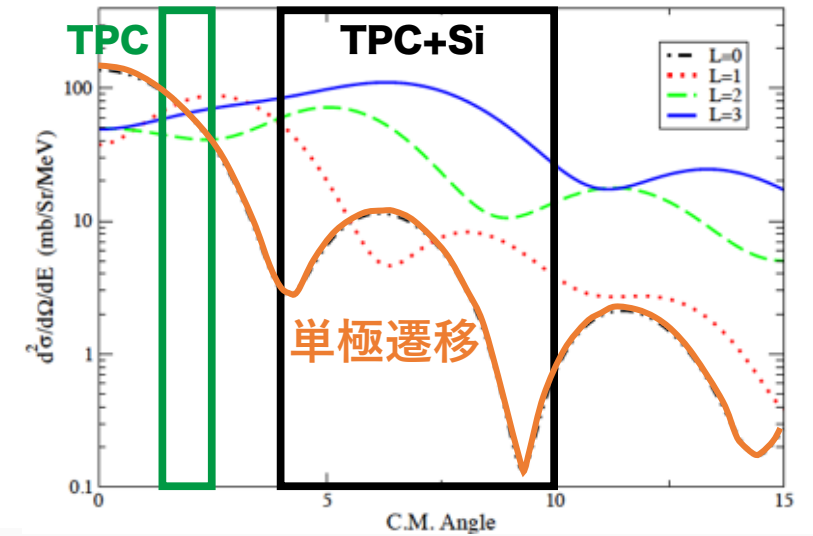
軽イオン（陽子、重陽子、ヘリウム）をプローブとする原子核反応

- 弾性散乱 (ex 中性子スキン：陽子弾性散乱)
- クーロン散乱 (ex 双極分極率：陽子非弾性散乱)
- 非弾性散乱 (ex 非圧縮率：重陽子非弾性散乱)
- 核子移行反応 (ex 対移行強度：核子対移行反応)

どの反応でも **前方 + 10度程度**までの情報が重要
=> **不安定核ビーム実験では低エネルギー反跳粒子測定**



重陽子非弾性散乱の角度分布

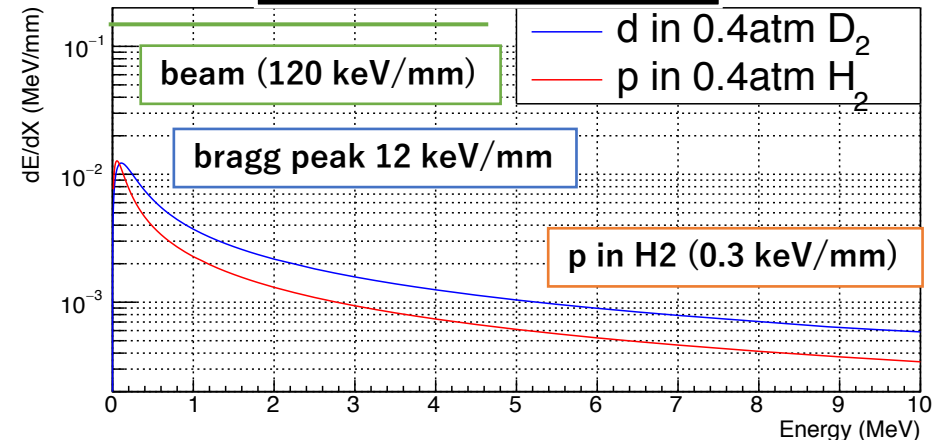


反跳した重水素の運動学曲線

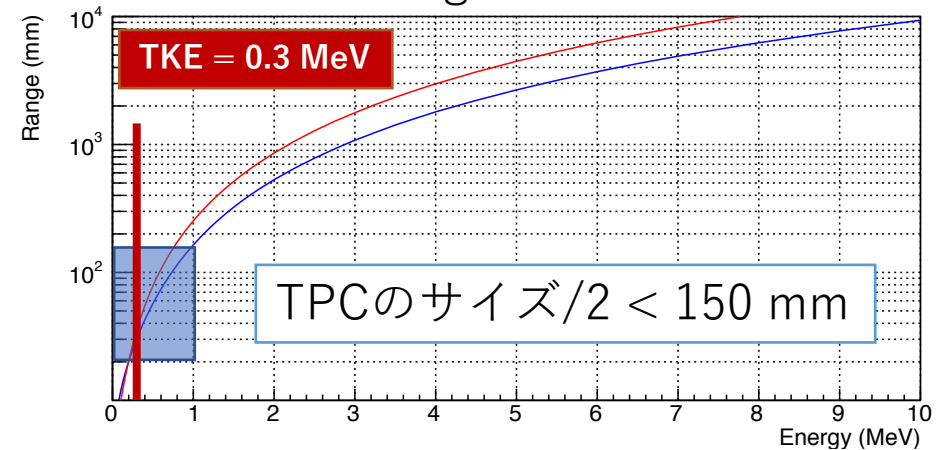
測定条件

- 反跳粒子
 - 陽子、重陽子
 - TKE 0.3 – 10 MeV
 - $dE/dX = 0.3 - 12 \text{ keV/mm}$
 - Range = 30 – 104 mm
 - Brho 0.079 – 0.647 Tm
- ビーム粒子
 - スズ領域 100 – 300 MeV/u
 - 500 – 1000 kcps
 - $\sigma x(y) \sim 3 \text{ mm}$
 - $dE/dX = 120 \text{ keV/mm}$
 - 単位時間あたりだと 100 万倍

Energy loss vs TKE



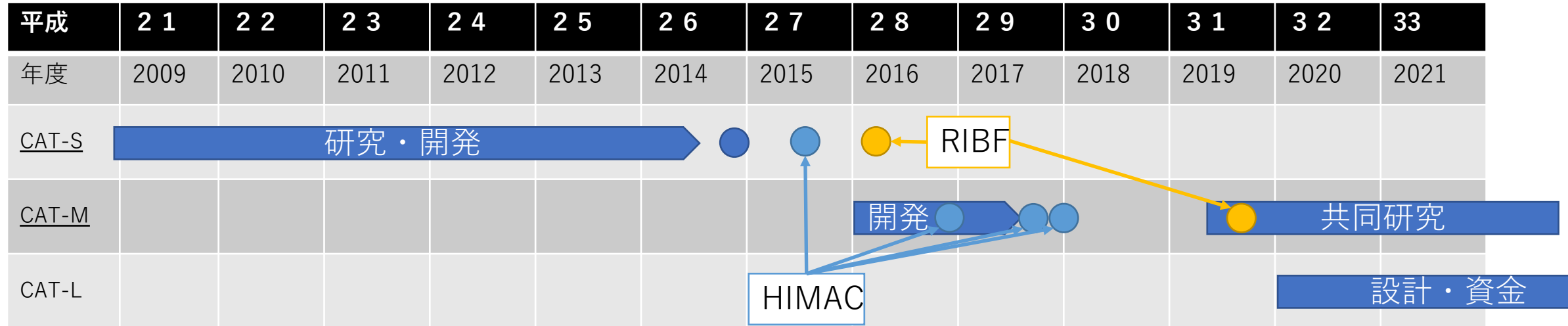
Range vs TKE



中間エネルギー原子核実験でのアクティブ標的の必要性とメリット、難しさ

- **低エネルギー反跳粒子測定に必須 (3D 原子核反応カメラ)**
- **標的厚を比較的簡単に増やすことができる** (ビームエネルギーの変化が無視できる限り)
 - 0.3 MeV d が止まる CD2 (0.7 mg/cm^2) => D2 1.6 mg/cm^2 にしても測定可能
- **ビームの大きなエネルギー損失 (ion backflow)、大量のデルタ線の中の低いエネルギー損失**

開発のタイムライン



CAT-S_{ilvestris}



10x10x25
2.5L

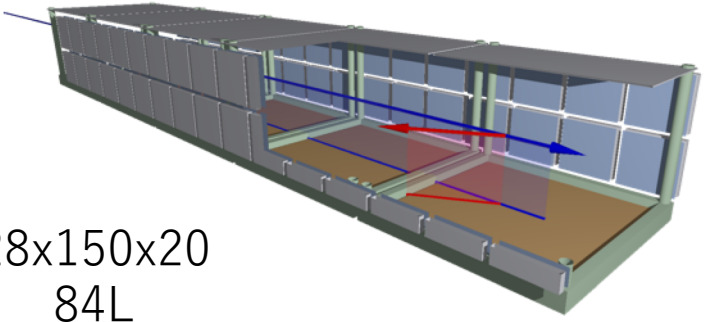
CAT-M_{anul}

科研費
(若手A)
H28-31



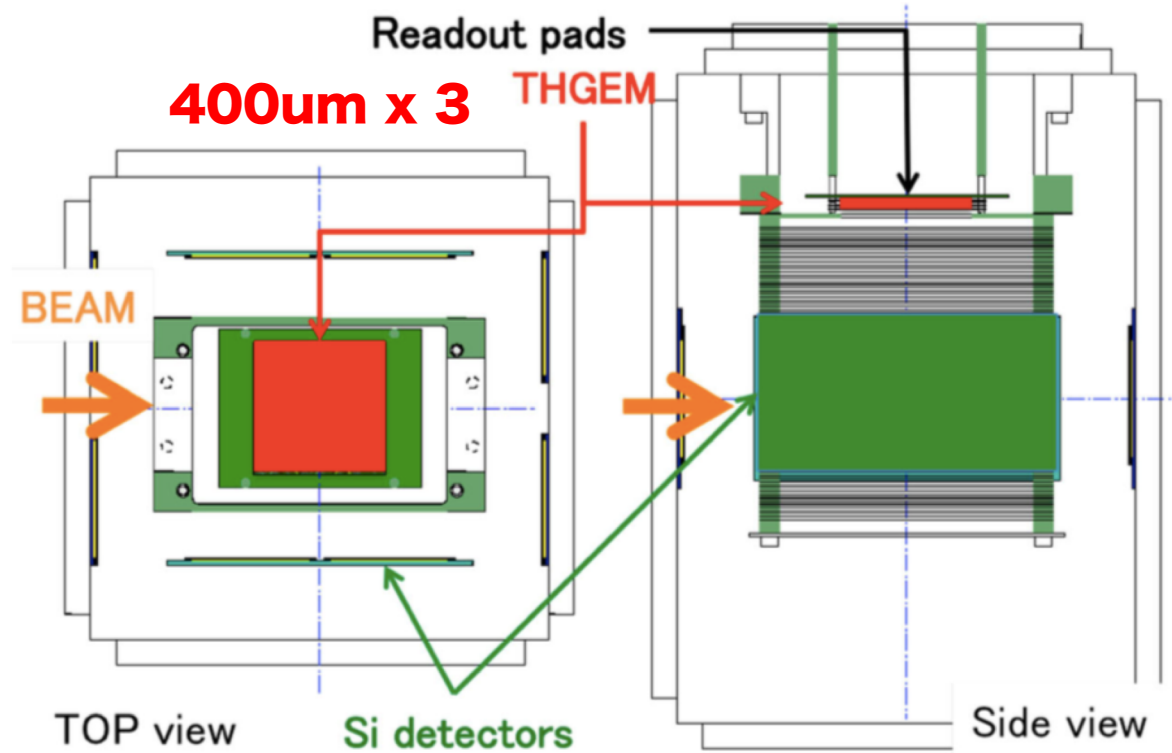
28x30x20
16.8L

CAT-L_{ynx}

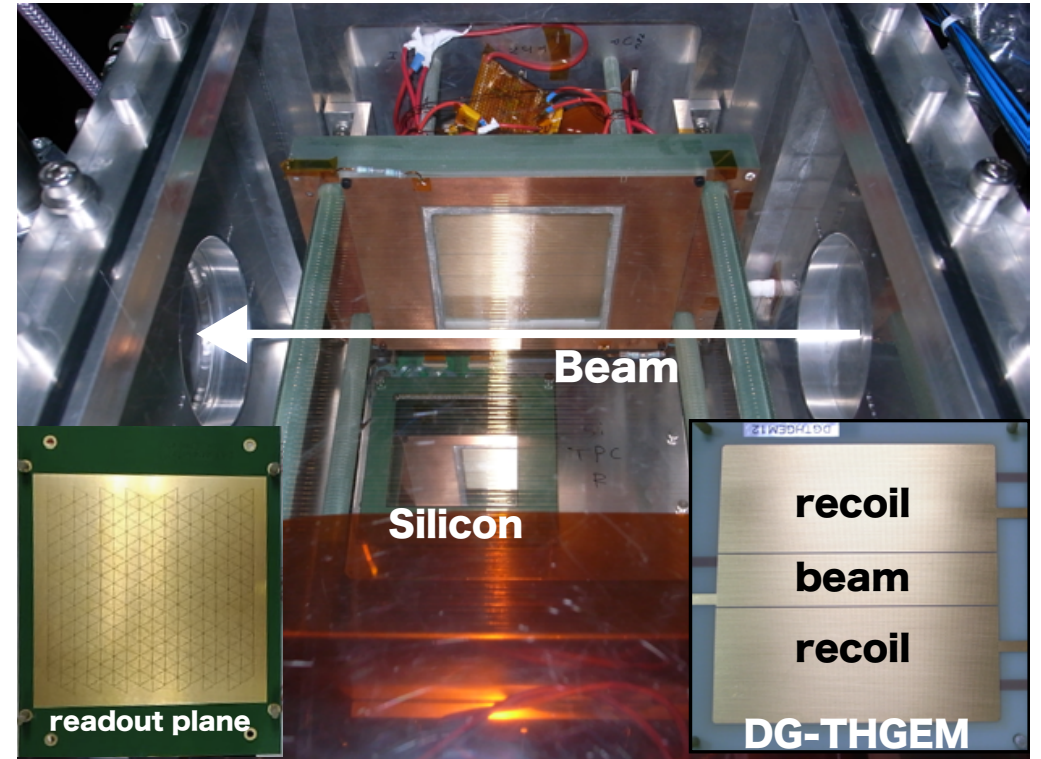


28x150x20
84L

CAT-S



**プリアンプ(RPA211)
+ 波形サンプリング(CAEN V1740)
[セルフトリガー + Silicon外部トリガー]**



0.2-0.5 atm H₂, D₂

DG-THGEM

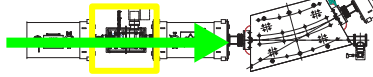
=>分割電極によりビーム領域の増幅度を独立制御
三角形パッド(7mm, 416ch)

=>電荷情報のフィッティングにより飛跡を導出
位置分解能 < 1 mm, エネルギー分解能 < 10%

Experiment RIBF113 : $^{132}\text{Sn}(d,d')$

RIBF113

800kcps



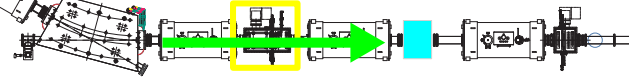
Diamond

LP- 複数の核種が入射するのでビーム側の粒子識別も必要

^{132}Sn 21%
 ^{133}Sb 48%
 ^{134}Te 26%

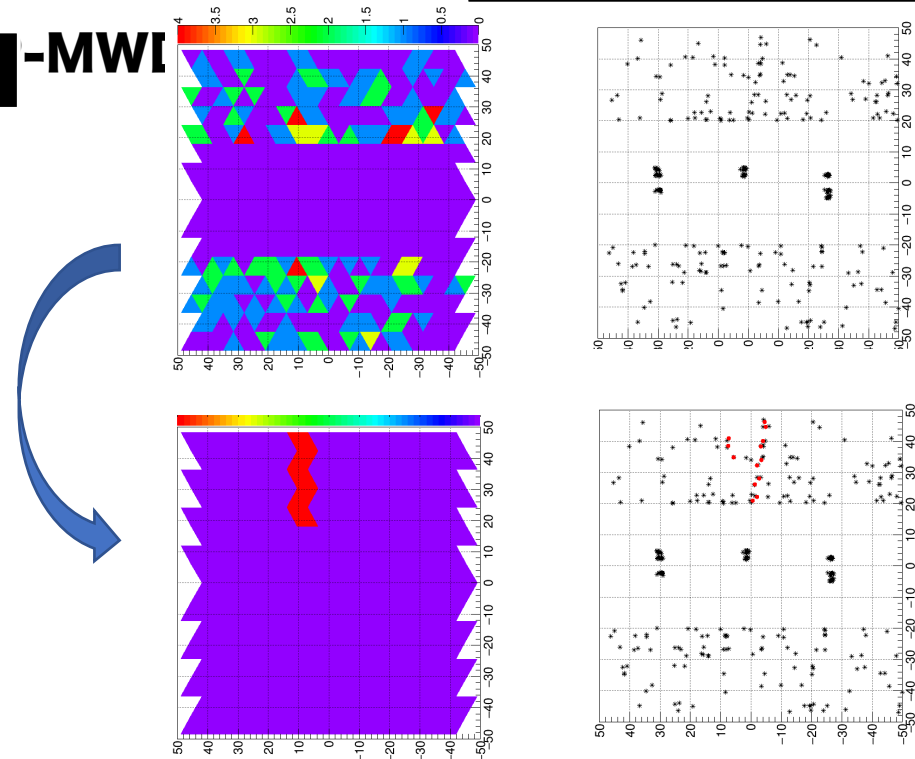
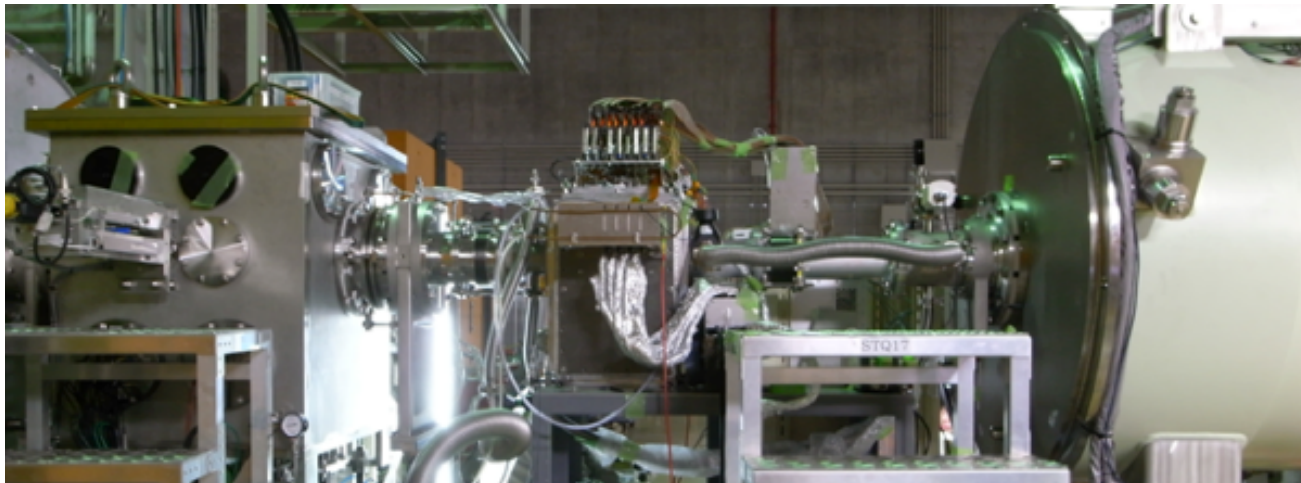
CAT-S

350kcps



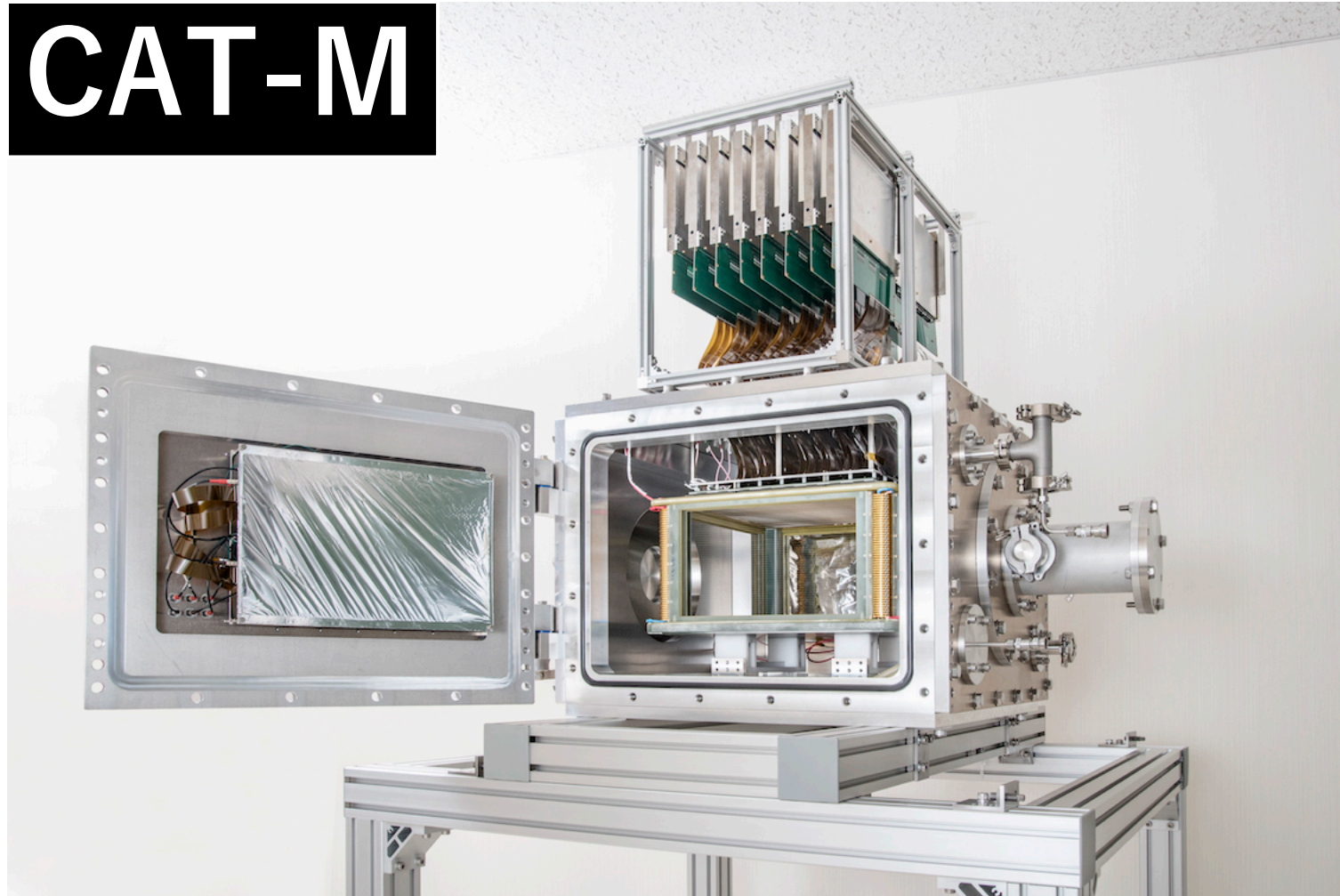
Diamond

ハフ変換の応用による飛跡検出
(low dE/dX case)



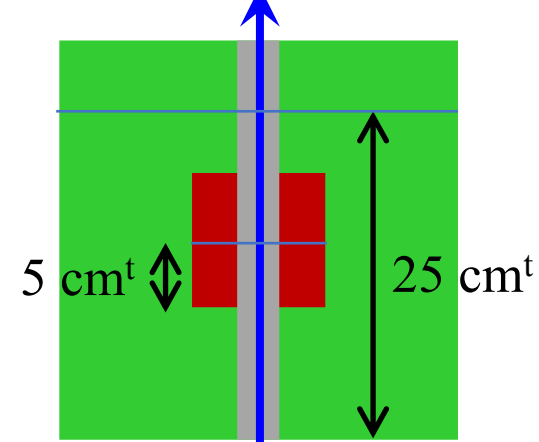
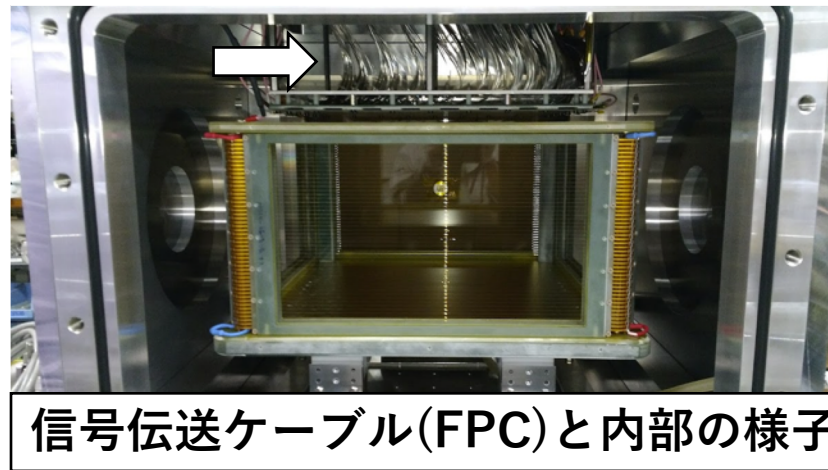
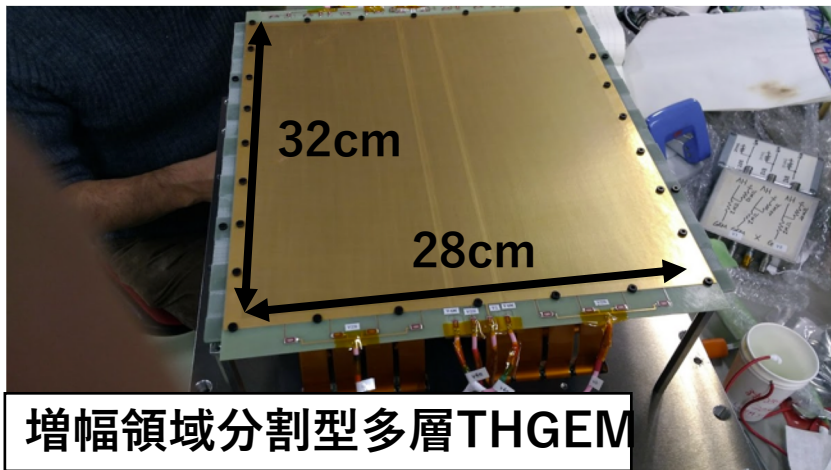
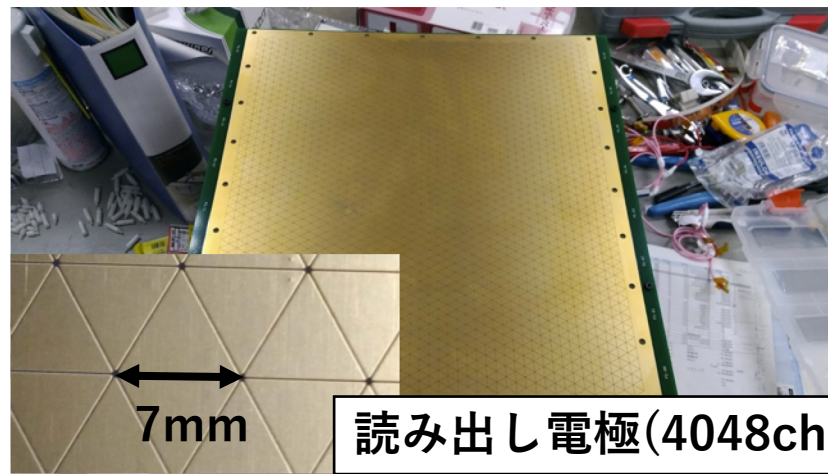
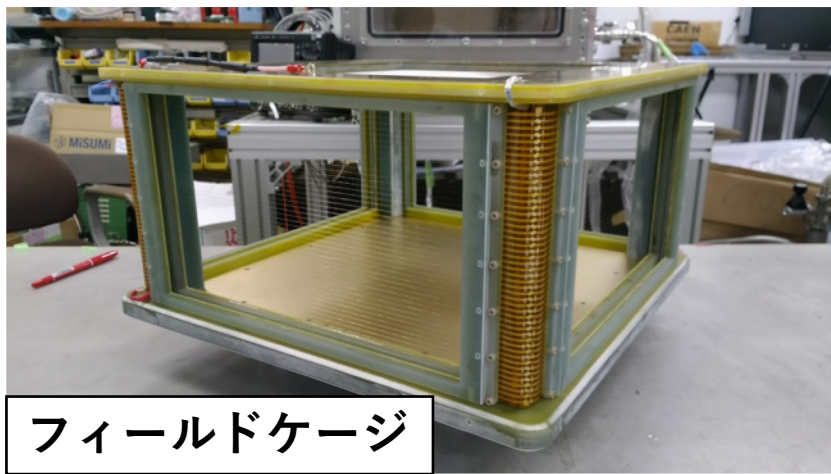
大型化 10x10 => 30x30cm²

CAT-M

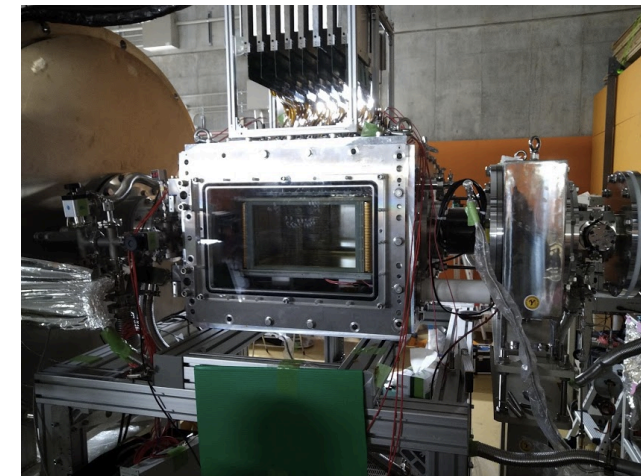


見学可能@RIBF

アクティブ標的CAT-M



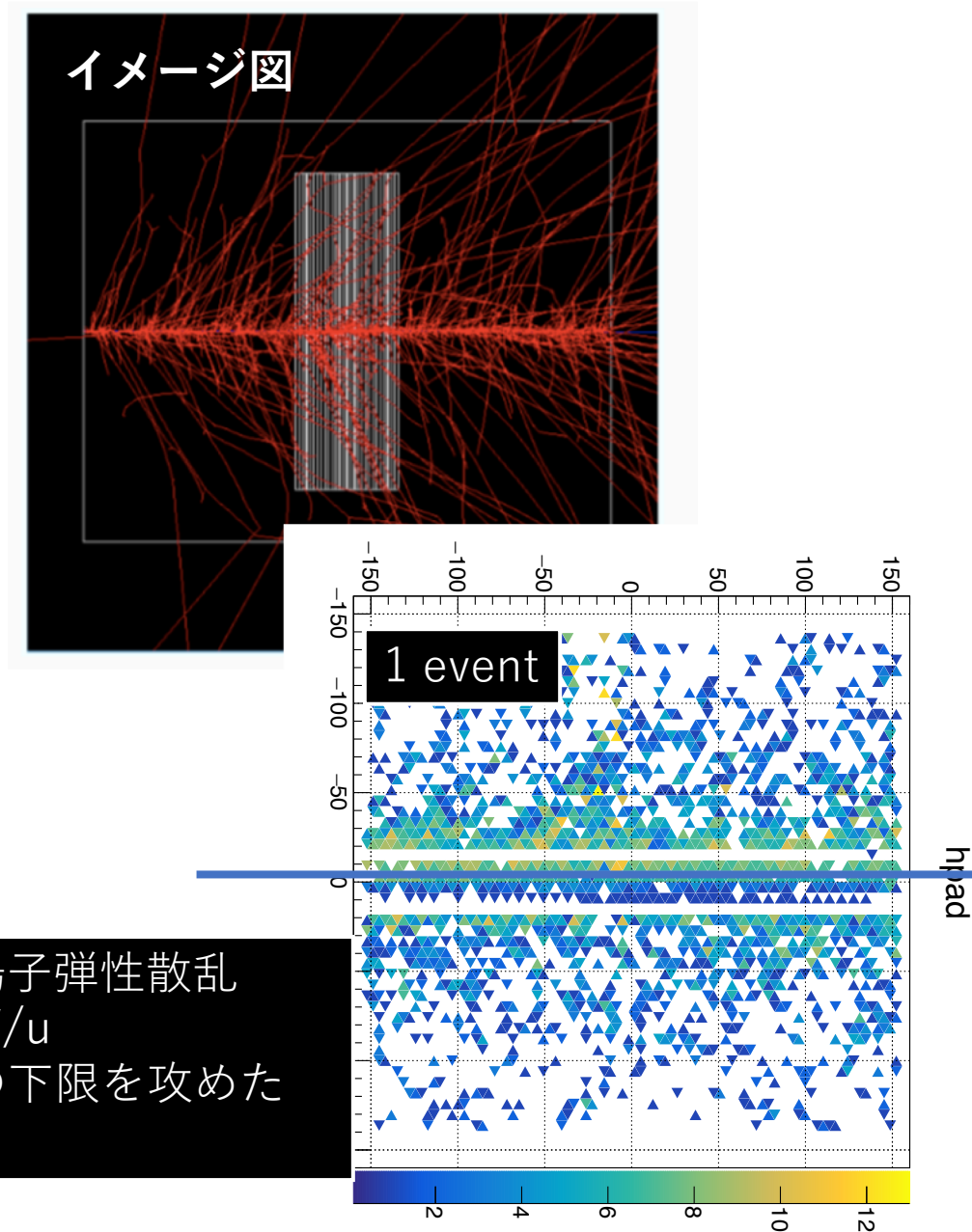
CAT-M @RIBF
18-25 Nov., 2019



波形サンプリング
GET electronics

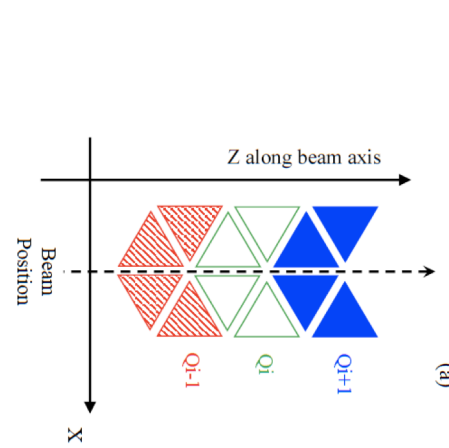
現在の問題点

- 大強度ビーム
 - IBFの低減 (後半 by 遠藤)
 - デルタ線 (ビームのエネルギー損失の2割が反跳領域へ)
 - 放電
 - GEM電極のさらなる分割を検討
 - 膨大なデータ量
 - => やっぱり磁石か。。軽イオンの飛跡も曲がる。
- データ収集 (>800 MB/s 10日間)
 - GET
 - => O2 system@ALICE (郡司氏)

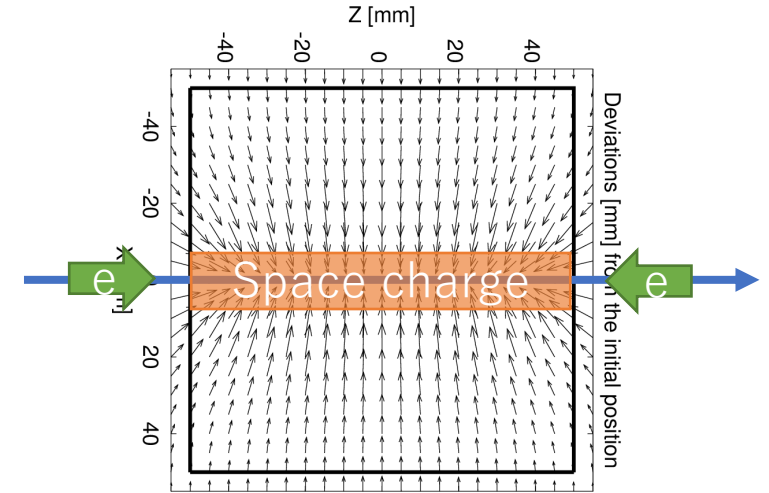


M-THGEMでのIBF

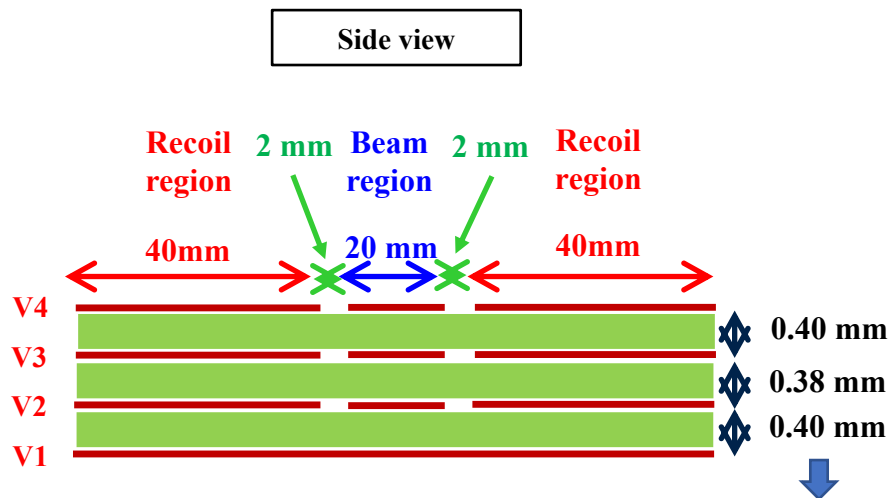
- Condition
 - M-THGEM 1 layer 0.4 atm. H2 gas**
 - proto-type 10x10cm²
 - 132Xe 185 MeV/u @HIMAC
 - 1k – **1MHz** equivalent
 - Gain < 100 @beam, Gain ~ 2000 @recoil
- Measure of IBF
 - Increase of collected charge at the edges along beam axis
- Result
 - IBF rate ~ 23% @beam**
 - 2.7e-5 C/m³



Measurement



Simulation



CAT の現状と今後

- 500 kcps を超えるスズ領域の重イオンビーム照射が可能
 - 限界を目指してあと少し基礎開発をする (IBF, 磁場、データ収集)
 - IBF については後半に続
- 物理データの取得
 - 巨大単極共鳴 (d, d') で測定可能 => 系統的測定を開始
 - 中性子スキン・双極分極率 (p, p') => デルタ線の対処が必要か
 - 低エネルギーでの核子移行反応 => 準備中
- 比較的簡単に移動できるのでアプリケーションを募集中
 - 異なる標的を追加し、同時測定
 - 標的厚を増やす

Flower GEMの性能評価と大強度
重イオンビーム下でのIon back
flowの抑制

目次

- 導入
- 実験セットアップ
- アルファ線でのゲインの測定
- 大強度ビーム下でのゲインの測定

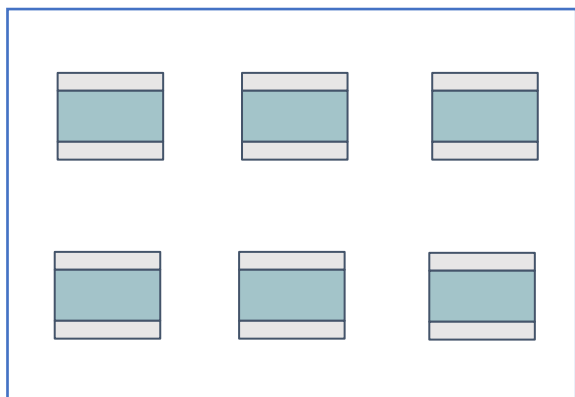
導入

現在の問題

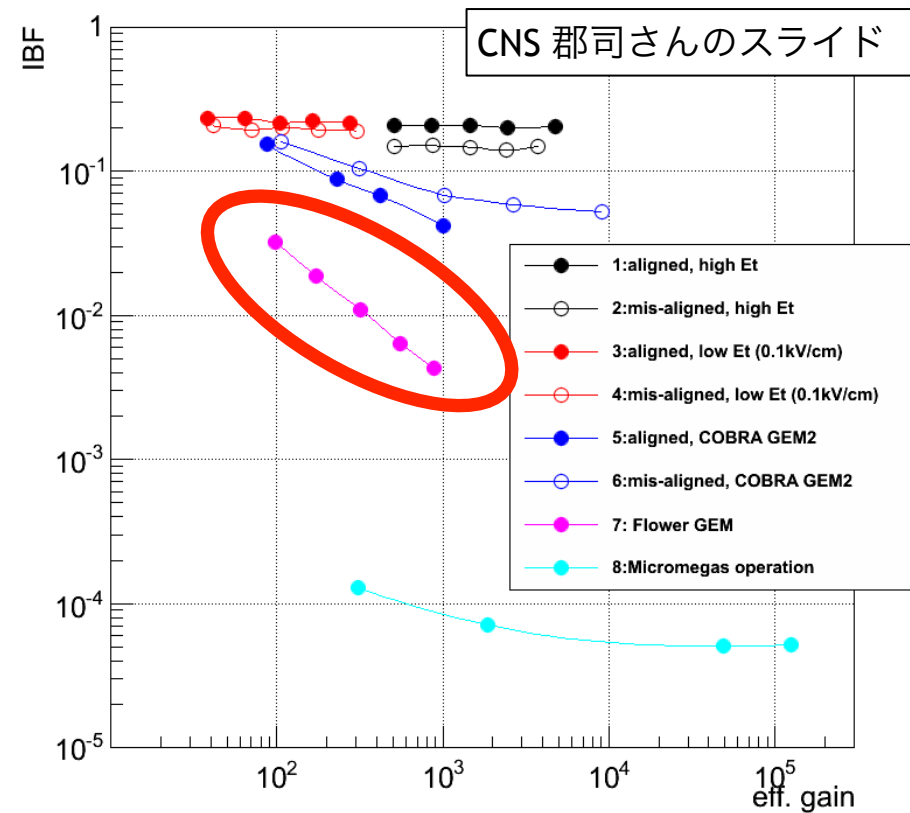
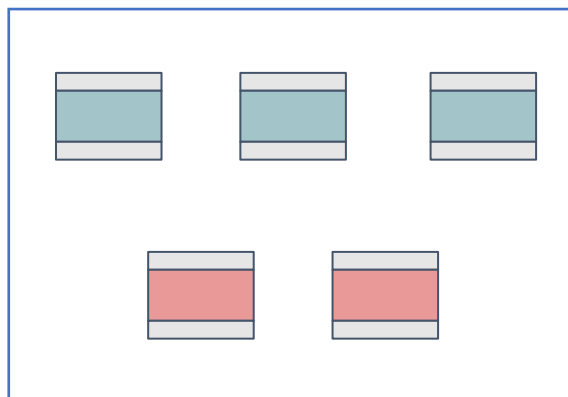
->大強度ビーム照射化ではGEMからのイオンバックフローによる電場の歪み
Flower GEMを用いるとIBFが0.5%程度まで抑制される。(郡司さん)

従来のCAT-MではM-THGEMのみ使っていた。
新しくFlower GEMを使い、IBFを抑えたい！

M-THGEM 2枚

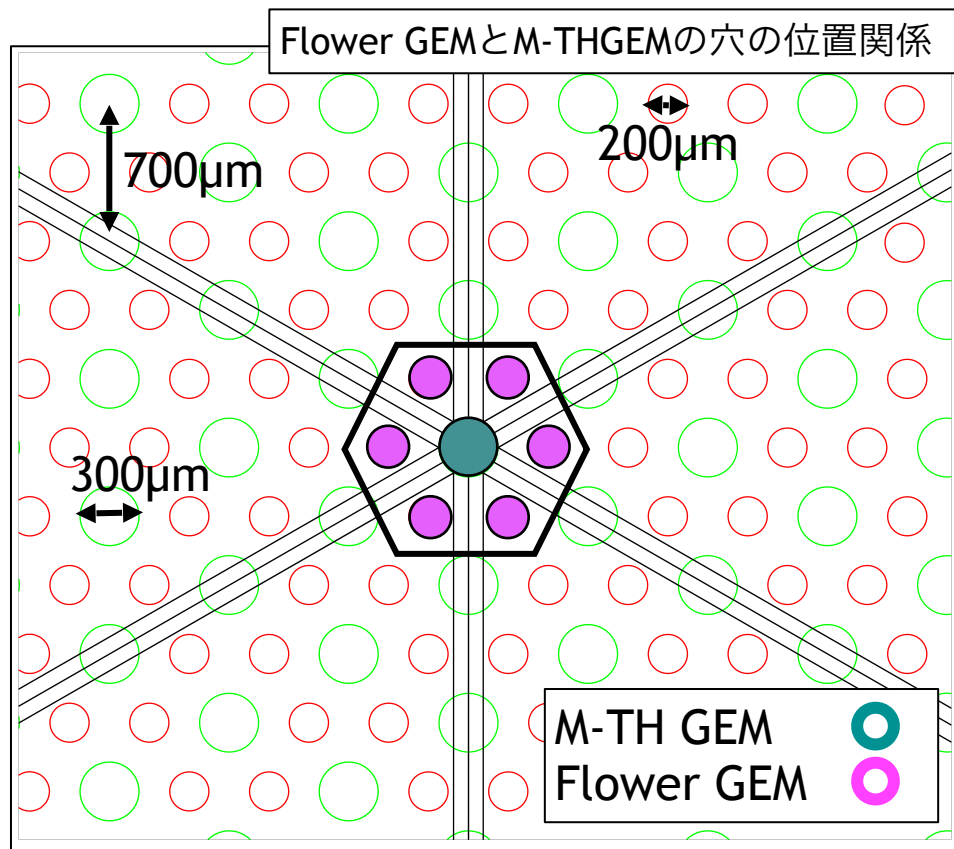


M-THGEM+Flower GEM



Flower GEM穴の構成

M-THGEMの穴を取り囲むように配置



M-THGEM

穴直径 300 μm

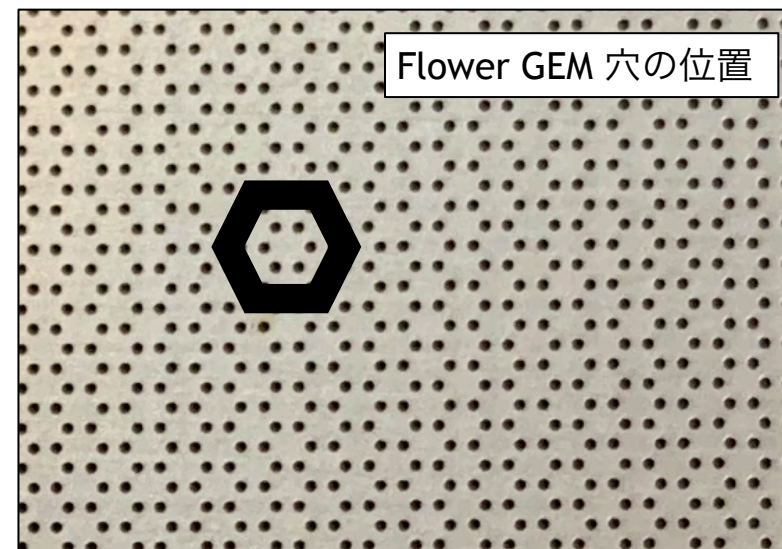
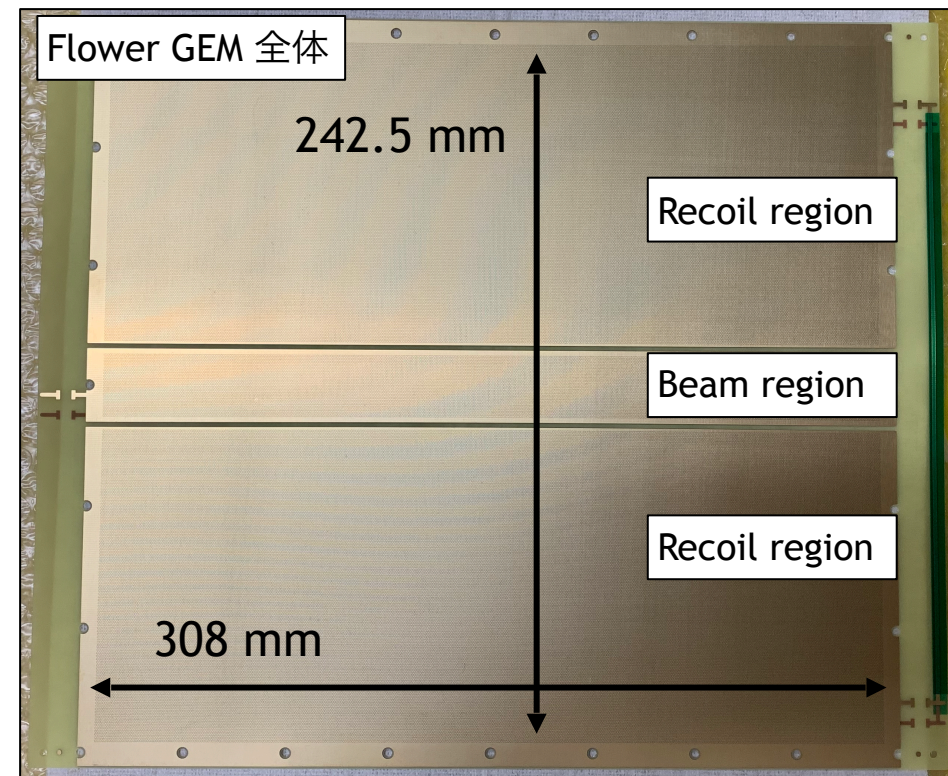
厚さ 1180 μm

ピッチ 700 μm

Flower GEM

穴直径 200 μm

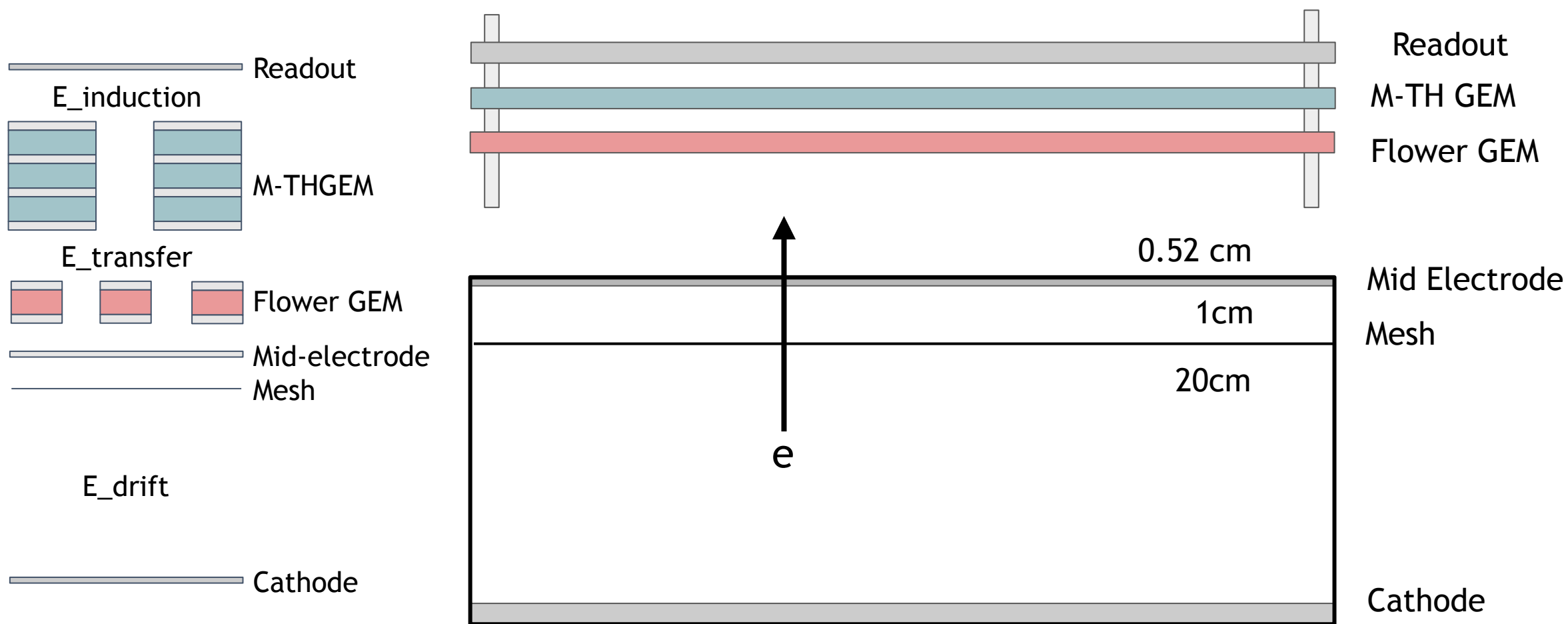
厚さ 400 μm



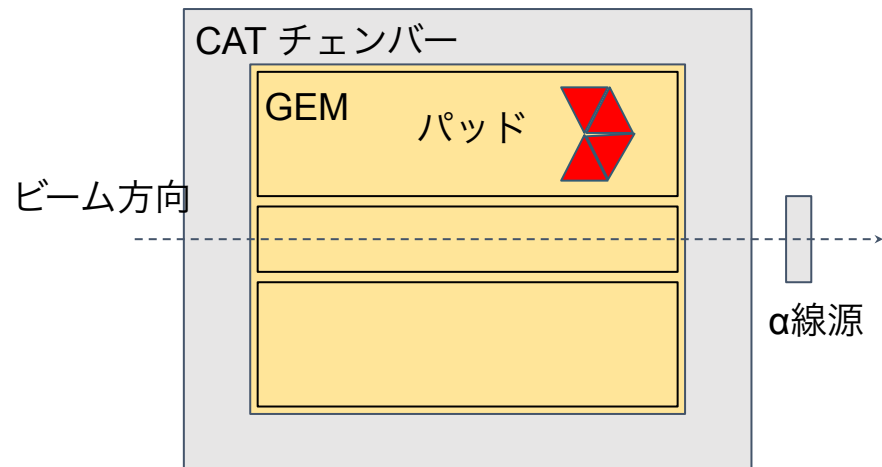
実験セットアップ

アルファ線および大強度ビーム実験でのGEMの配置

- Readout pad側からM-THGEM, Flower GEM の順に配置
- サポートピラーで穴の位置は誤差 ± 50 micron



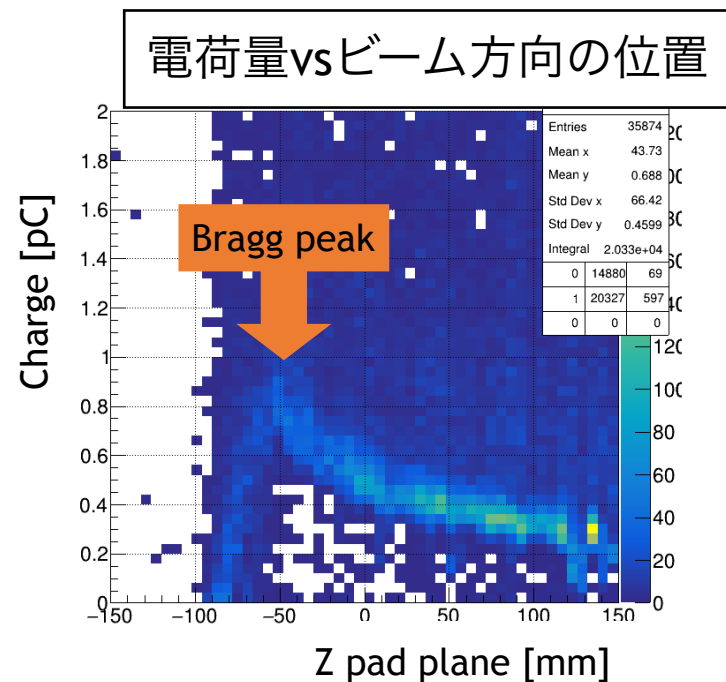
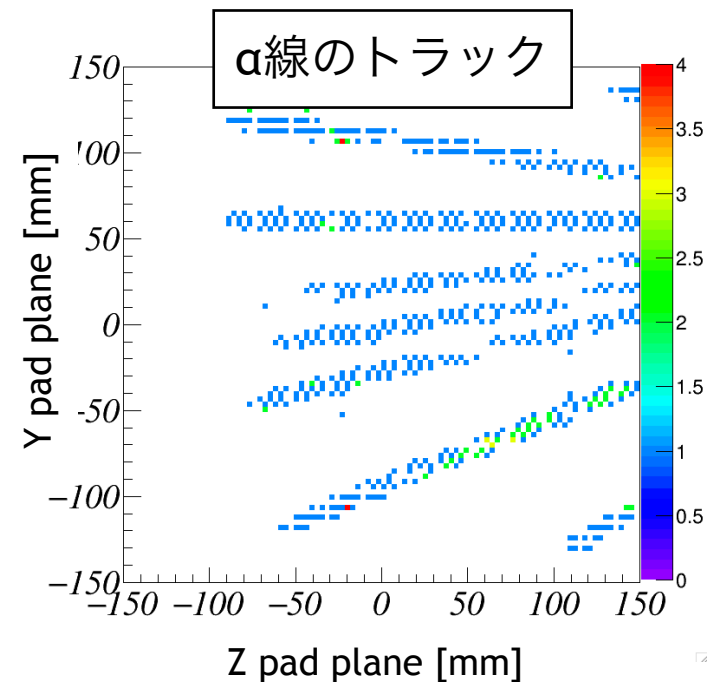
アルファ線でのゲインの測定



条件

- 0.4気圧の水素ガス
- 4つのパッドの集合を1つのパッドとみなす
- Bragg ピークのエネルギー損失からゲインを測定

Gain = 測定された電子数/Braggピークで生成される電子数



備考

Braggピークでのエネルギー損失 -> 0.25 MeV/mm

パッドの距離 -> 7 mm

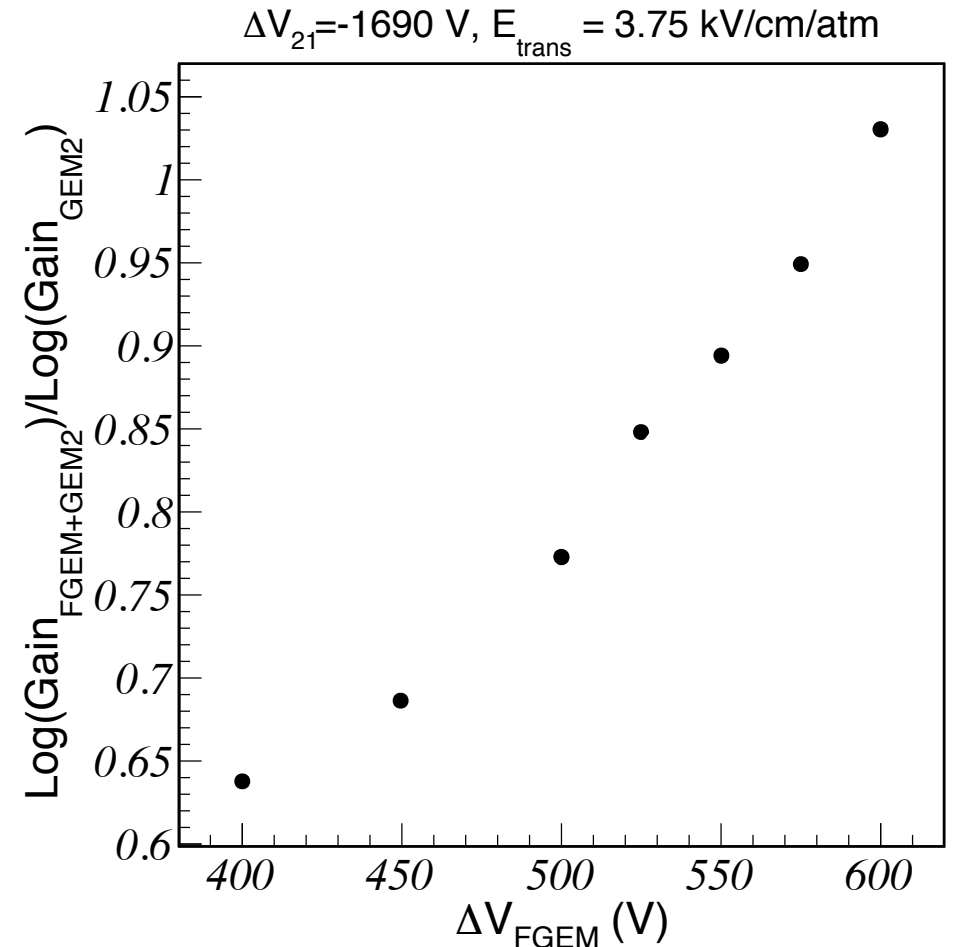
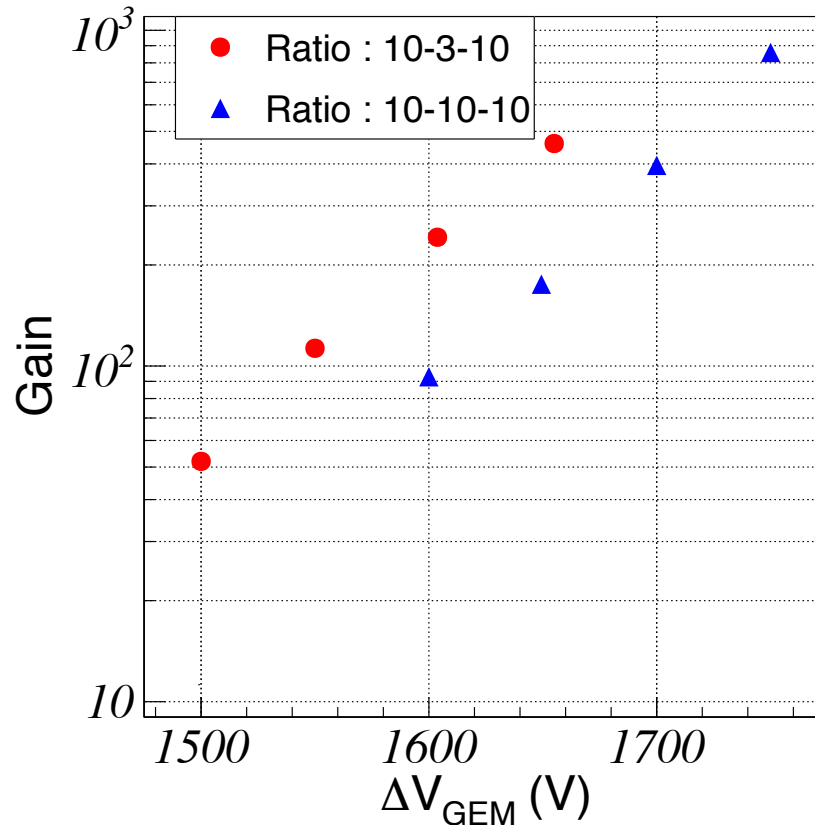
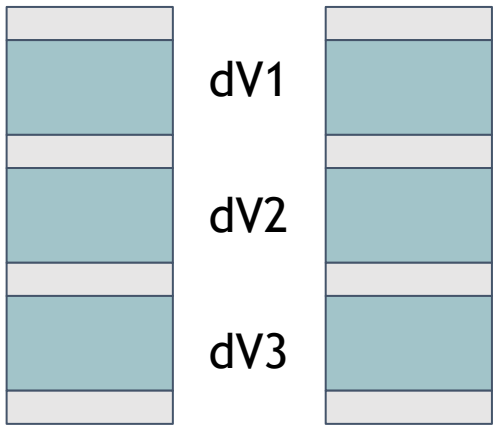
純水素のイオン化エネルギー -> 37 eV

Braggピークで生成される電子の数 ~ 4730

アルファ線でのゲインの測定

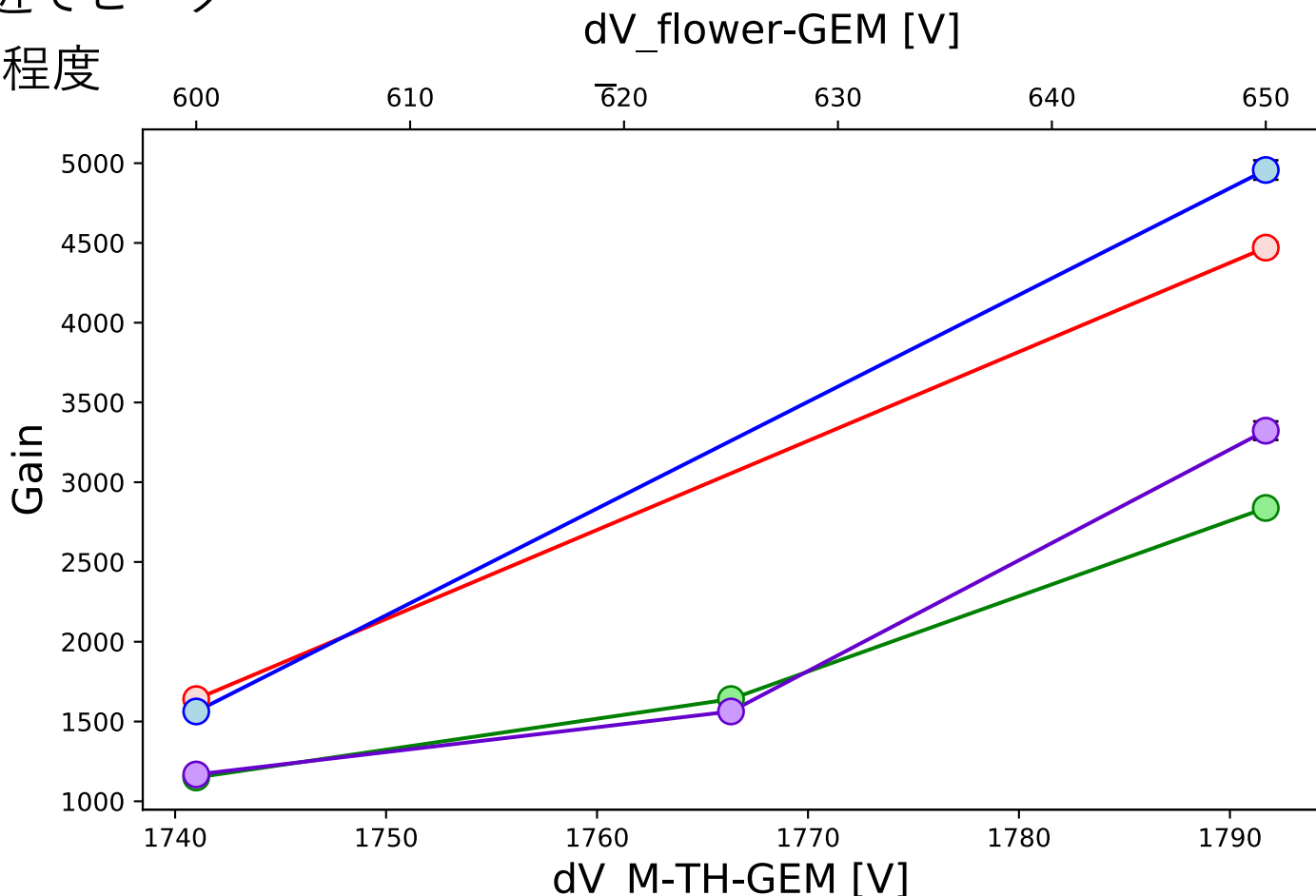
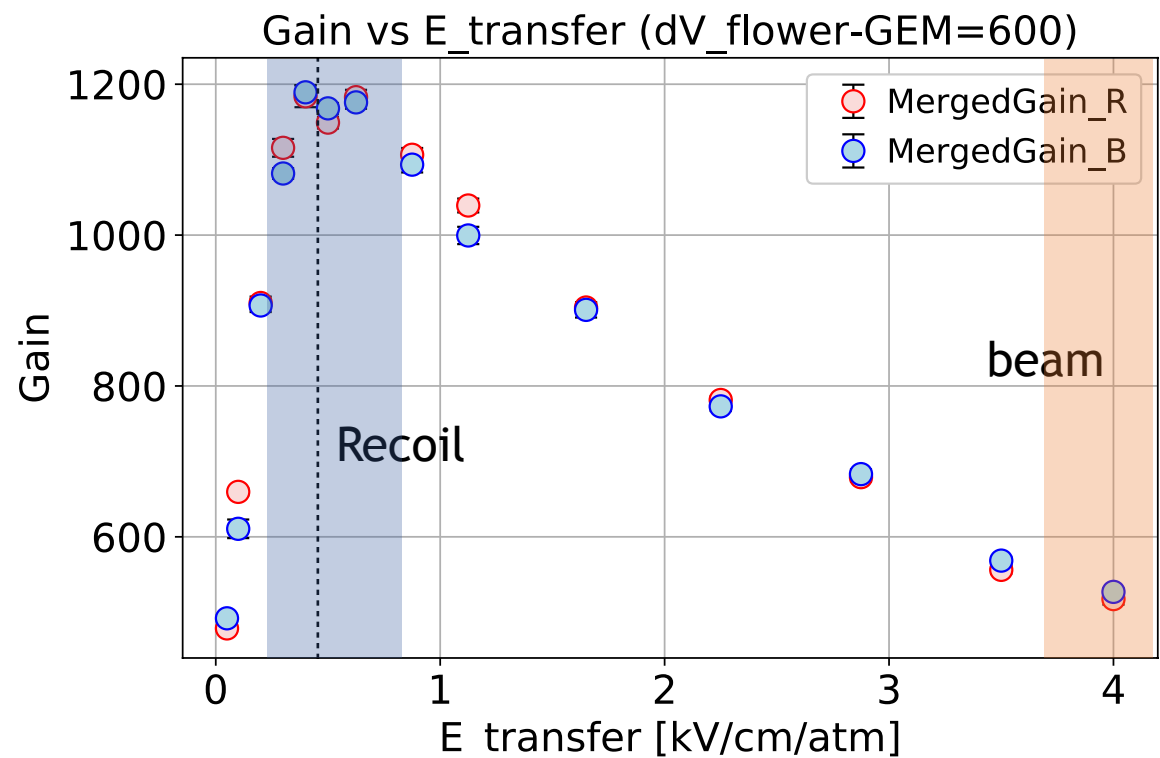
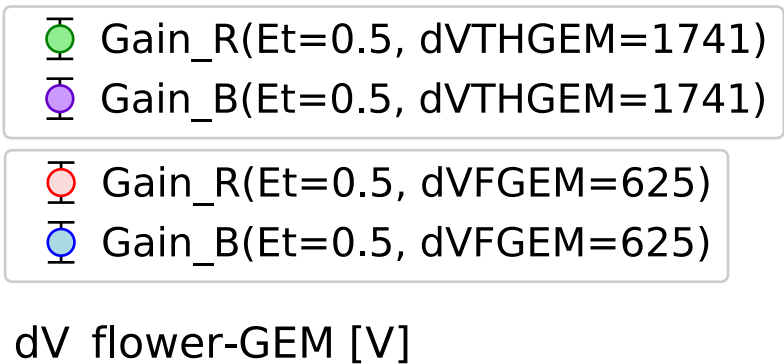
M-THGEM1枚およびM-THGEMとFlower GEM1枚ずつのケースでゲインを測定
M-THGEM単体と比べた時の有効ゲインの依存性を測定

Ratio dV1-dV2-dV3



アルファ線でのゲインの測定

- ゲインは5000まで到達
- M-THGEMの電位差に敏感
- E_{transfer} が -0.5 [kV/cm/atm] 付近でピーク
- Flower GEMの有効ゲインは0.5-1.5程度

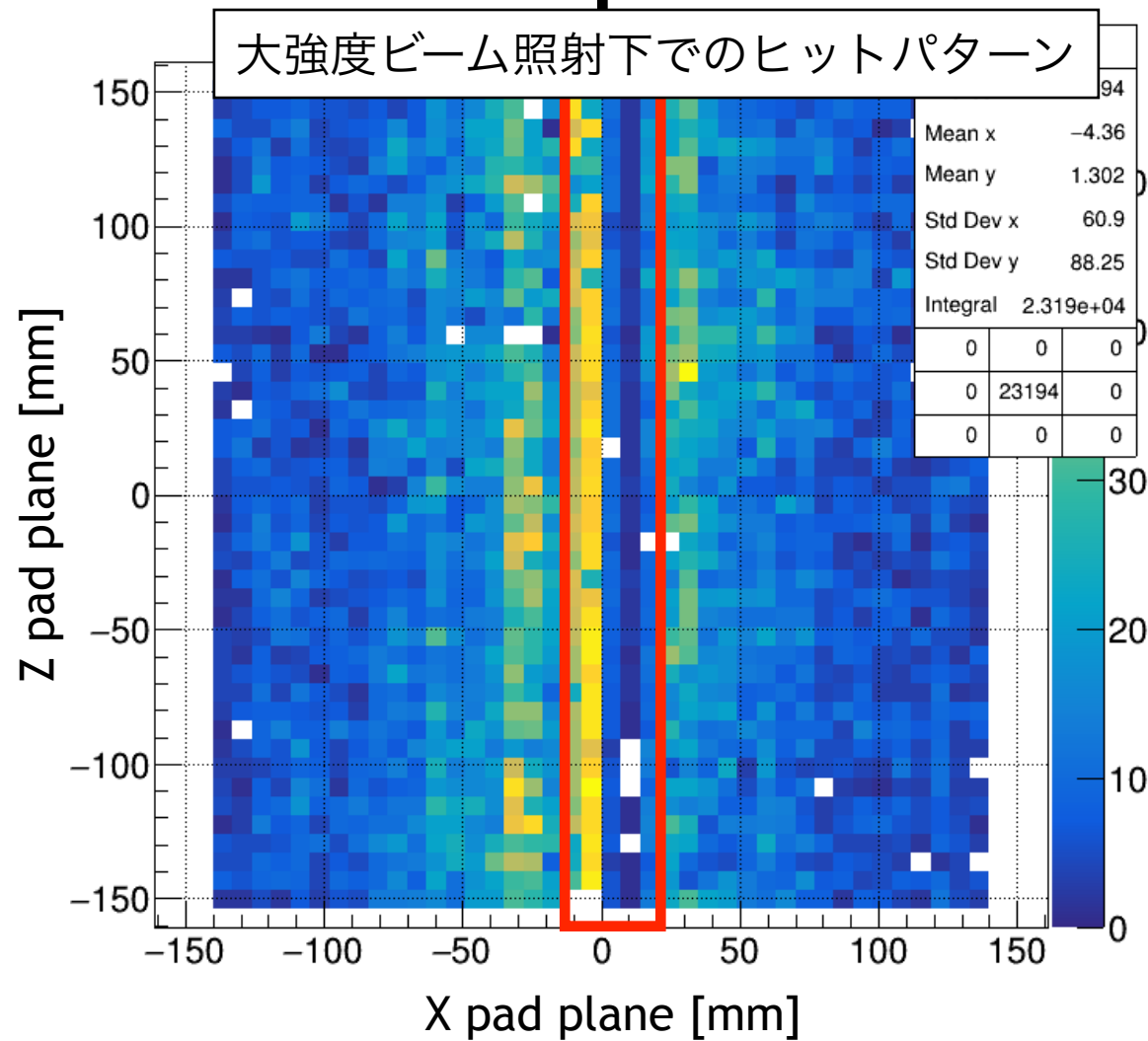
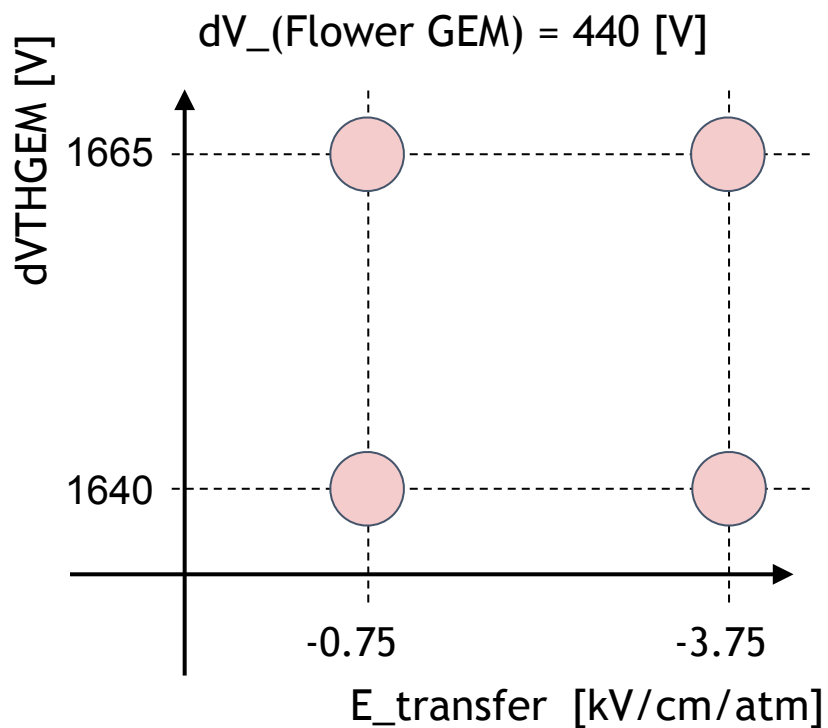
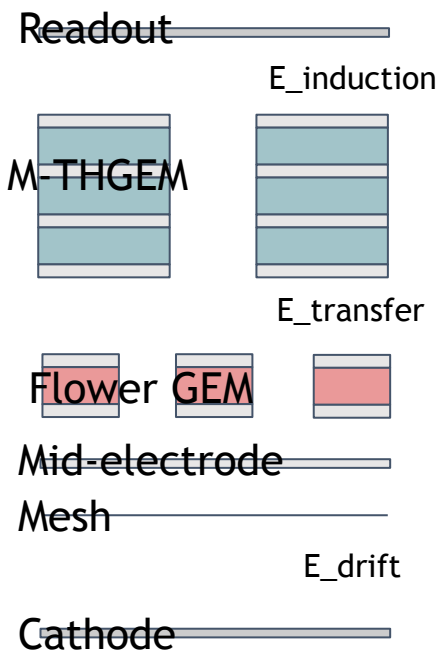


大強度ビーム下でのゲインの測定

↑ ビーム方向

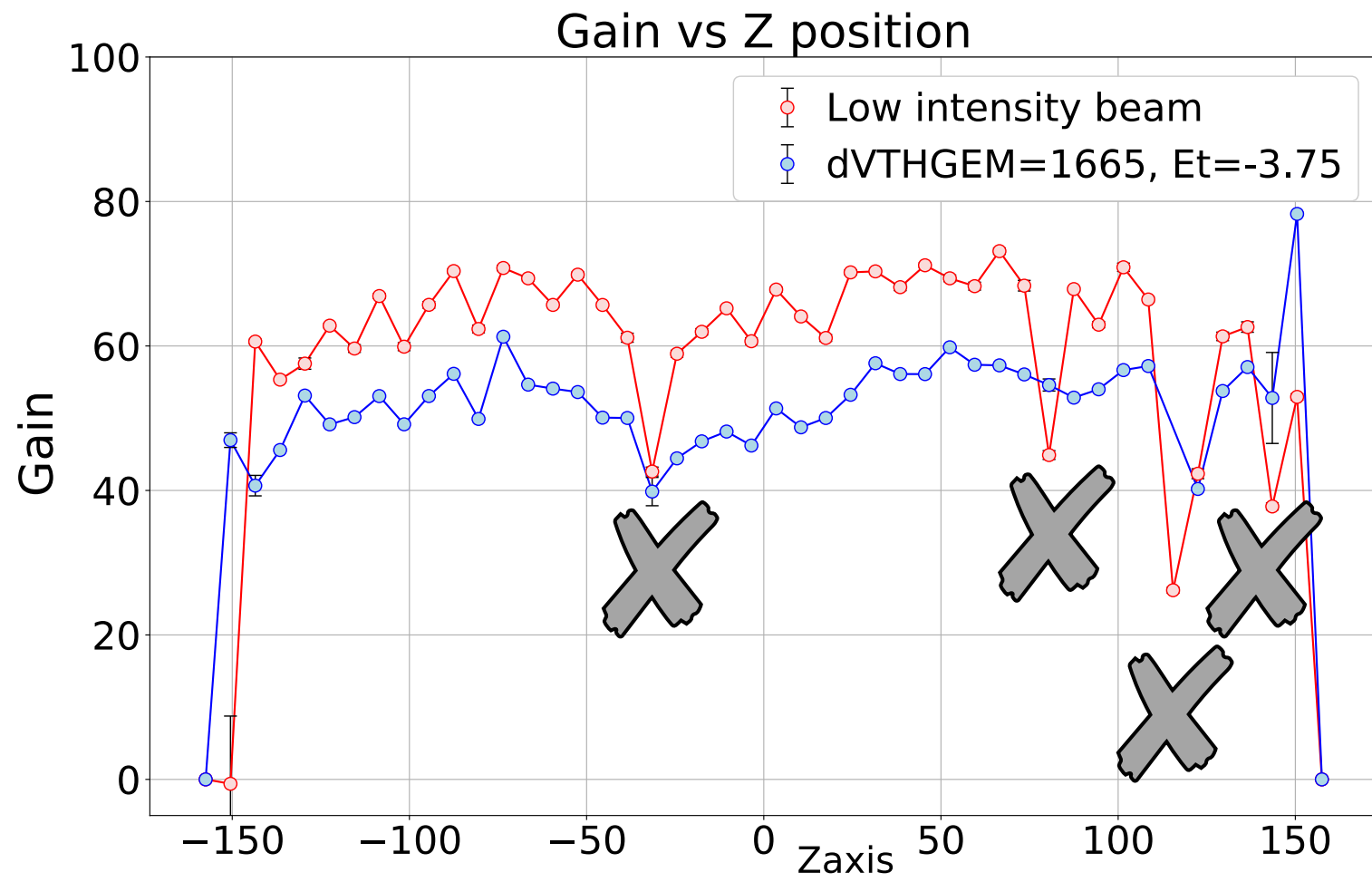
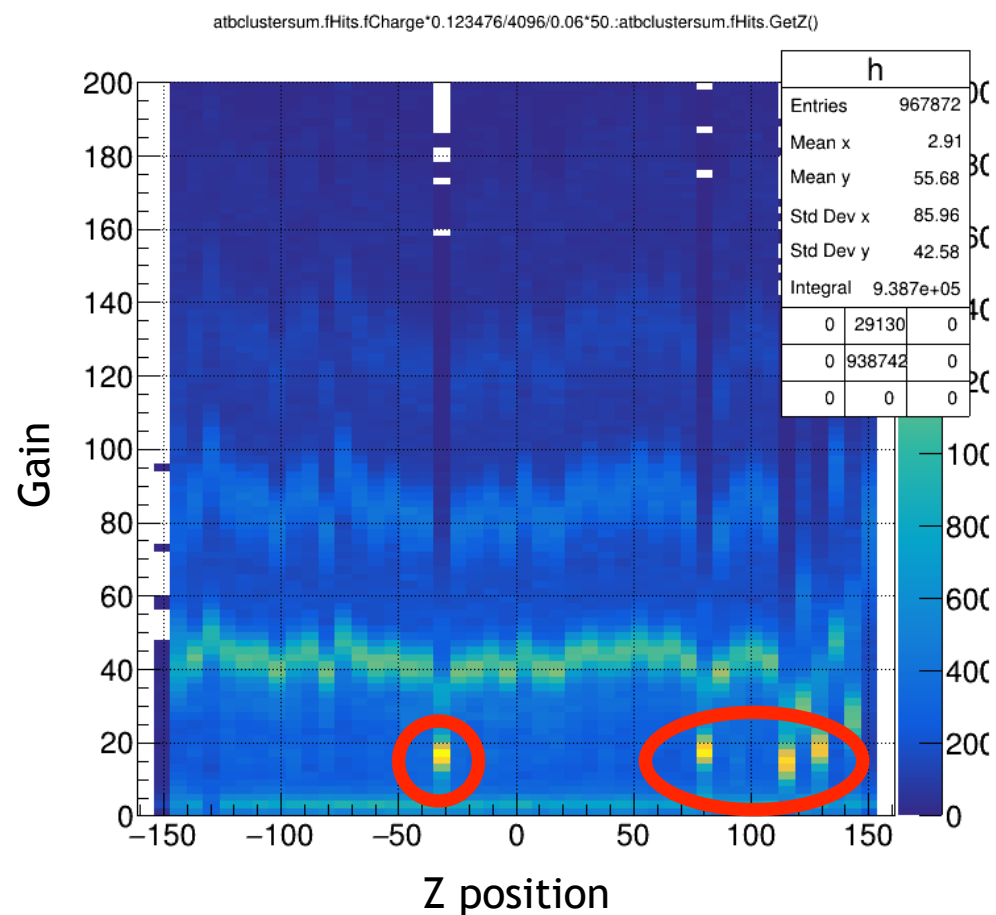
ビーム : $^{132}\text{Sn}@300\text{MeV}/u$ 600kcps

M-THGEMとE_transferを変えながら
Beam領域のゲインを測定



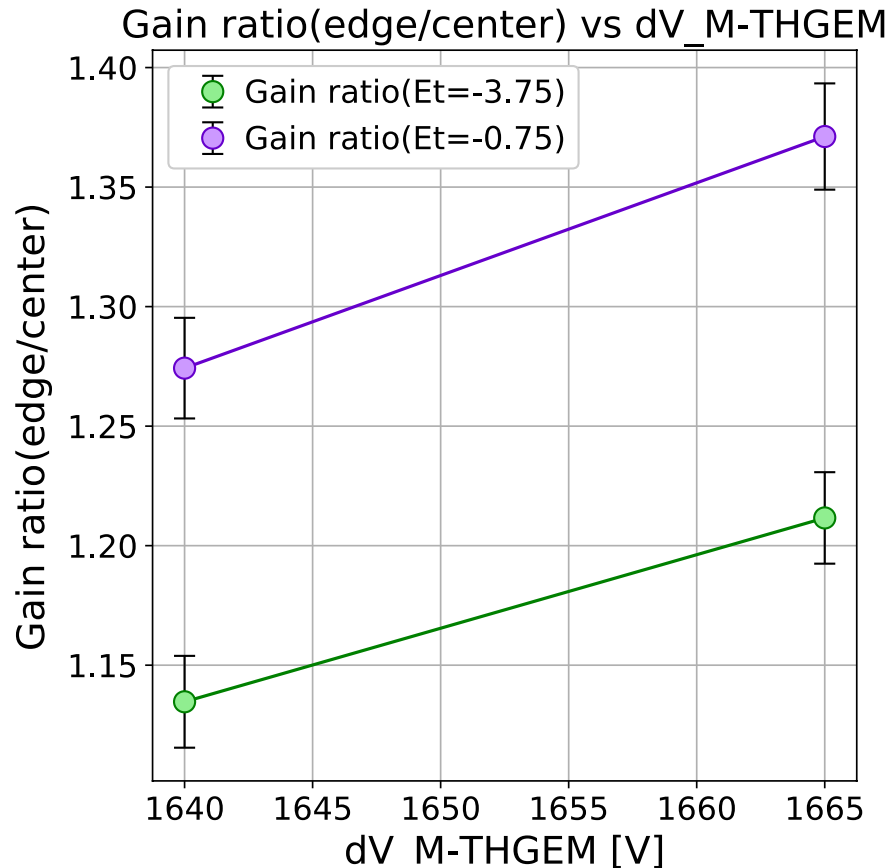
大強度ビーム下でのゲインの測定

正常に動作していないパッドが見られる



ゲイン比 vs E_transfer, dVTHGEM

- 左から3番目と真ん中に一番近いパッドのゲインの比
- Transfer 電場に強くすることでゲインの比が下がる傾向にある
- 端と中心ゲイン比はゲインによって変化する



Et=-0.75 [kV/cm/atm]

Et=-3.75 [kV/cm/atm]

正常に動作していないパッドを無視すると先行研究（岩本さん）の結果と同様な傾向が見られた
Z~140あたりのゲインの上昇から、経験的にはIBFの劇的な減少を見られない

まとめと展望

- Flower GEMを導入し、ゲインを測定した
 - $E_{\text{transfer}} \sim 0.5$ [kV/cm/atm] でゲインが最大になった
 - 最大ゲイン ~ 5000 (アルファ線)
- 大強度ビーム下における各パッドでのゲインを測定した
 - 中心と端のゲイン比の上昇を確認した
 - E_{transfer} の値に反比例してゲイン比が小さくなる
 - シミュレーション程IBFが抑制されていないと予想される

今後の展望

- Flower GEMの電位差を変えたときのゲインの解析を行う
- シミュレーションからIBFの値を推定する
- 歪みによって生じるパッドのエネルギー分解能を推定する