

方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験 のための大型TPC開発 及びMPGDシミュレーション

石浦宏尚, 身内賢太郎, 池田智法, 中村拓馬
島田拓弥, 中村輝石
神戸大理

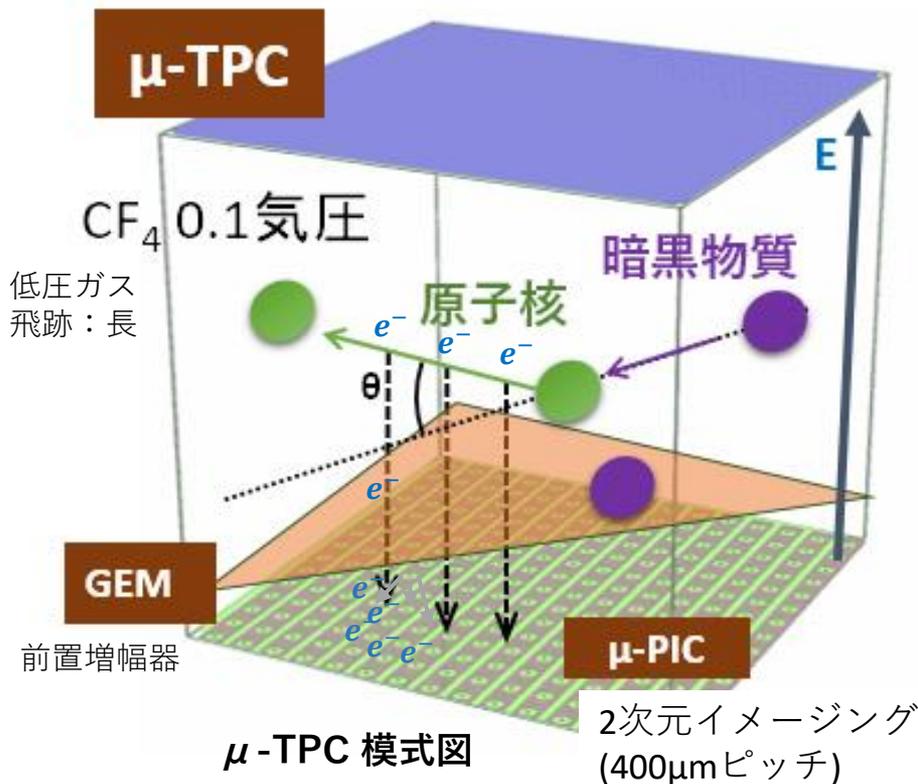
Outline

- ◆NEWAGE
- ◆陰イオンガスTPC
- ◆陰イオンガスMPGDシミュレーション
- ◆CYGNUS/NEWAGE-1.0 TPC
 - ◆概要
 - ◆TPC製作進捗
- ◆今後の予定・まとめ

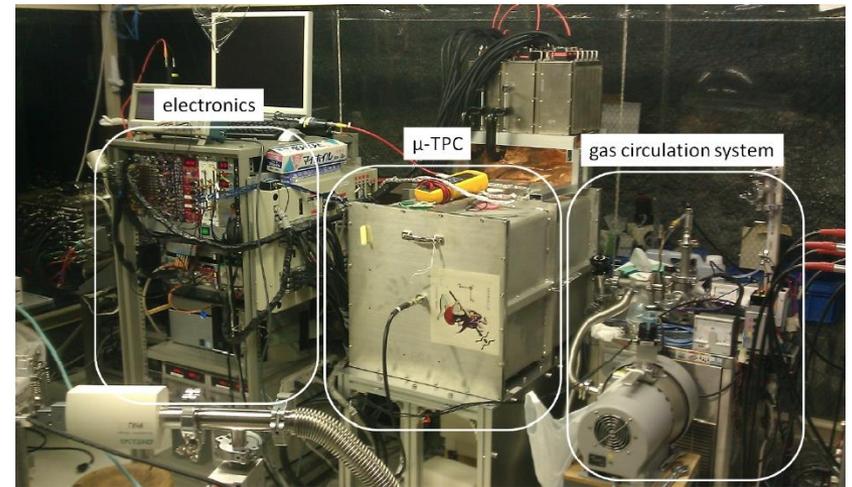
➤ **NEWAGE** (NEw general WIMP search with an Advanced Gaseous tracker Experiment)

3次元ガス飛跡検出器(μ -TPC)を用いた**方向に感度**を持つ暗黒物質直接探索実験

➤ 暗黒物質により原子核反跳されたフッ素原子核の飛跡をとらえる



東京大学宇宙線研究所
神岡宇宙素粒子研究施設地下実験室Bで観測中



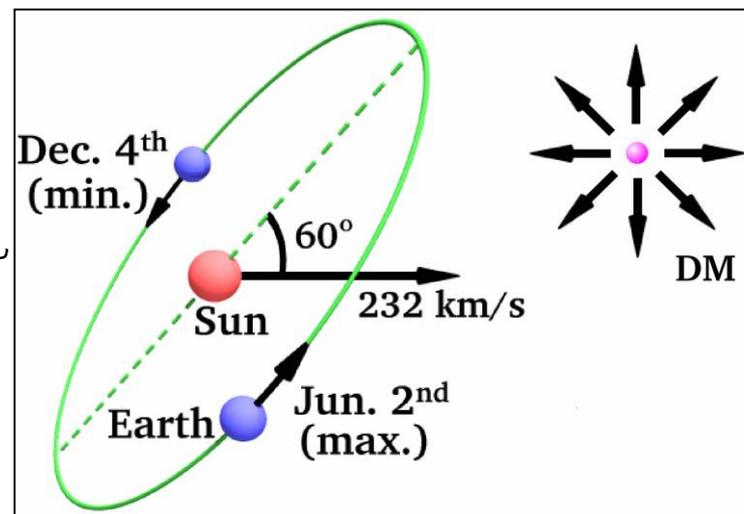
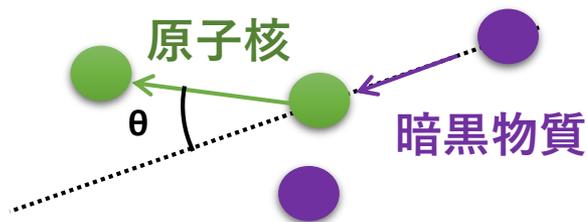
NEWAGE検出器 NEWAGE -0.3b' @神岡

30 x 30 x 41 cm³ volume

GEM, μ -PIC : MPGD(Micro Pattern Gaseous Detector)の一種

➤ 方向感度

- 太陽系：銀河系内を移動
 - 銀河に付随するDMに対して動く
 - 暗黒物質の風を受ける、原子核が前方散乱
- 散乱角度を捉え、到来方向を同定



➤ 季節変動

- 季節による相対速度の変化による計数率の変化をとらえる
- DAMA実験が観測を主張 ← → 他実験で否定

➤ NEWAGE

- 低圧ガス（飛跡跡長）・高精細なTPCで方向感度を持つ手法で原子核飛跡をとらえることを目的

これまでのNEWAGE

感度がBGにより制限

➤ 検出器 μ -PIC由来 α 線バックグラウンド(BG)

➤ U/Th 系列由来放射性不純物

対策

DNPさま
ありがとうございます

➤ 低アルファ μ -PICの開発

➤ 低アルファ化 素材選定から
(橋本隆 博士論文)

➤ 低アルファ μ -PICを用いた探索

➤ 2018年より開始 (Run22-)(池田智法 TAUP2019)

更なる感度向上、DAMA領域に向けて

➤ μ -PICの表面BGの削減

➤ 絶対位置決定によるBG削減

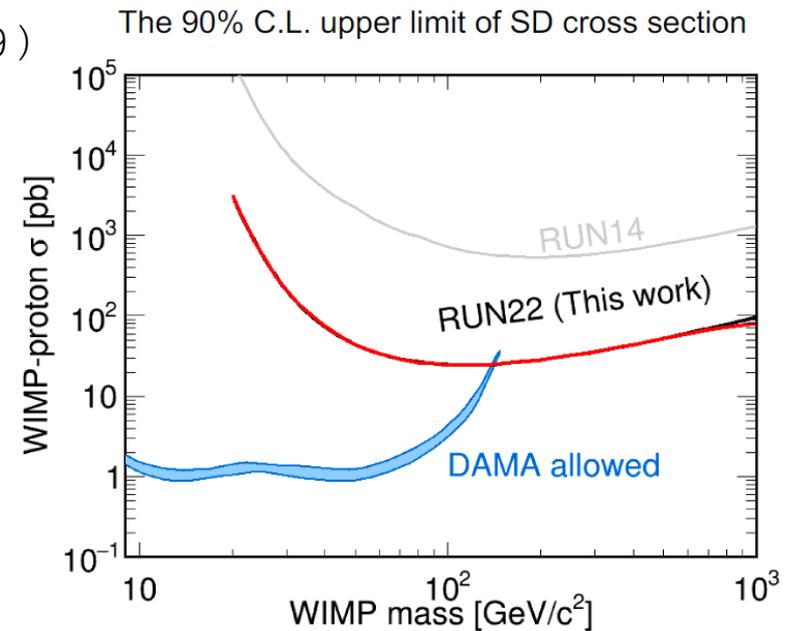
➤ 大容積化による質量増大

下2つを実現できる

大型陰イオンガスTPCの開発・製作へ



	^{238}U [ppm]	^{232}Th [ppm]
Standard material (PI+glass cloth)	0.39 ± 0.01	1.81 ± 0.04
New material (PI+epoxy)	$< 2.98 \times 10^{-3}$	$< 6.77 \times 10^{-3}$

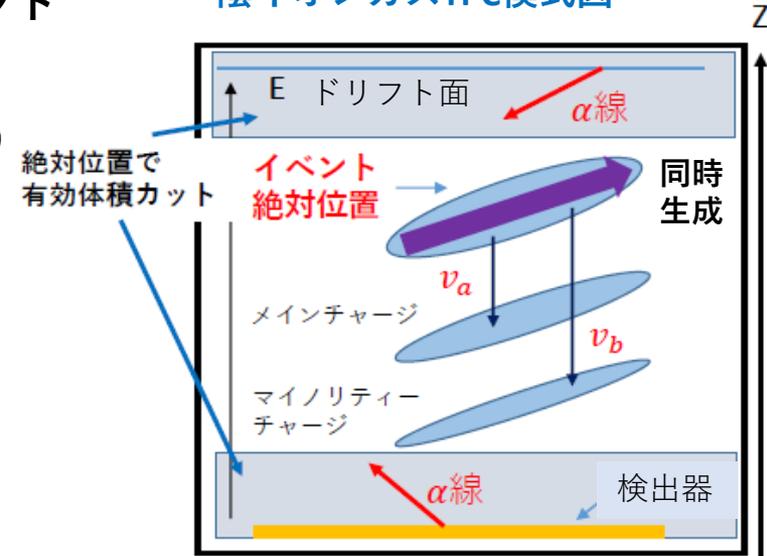


◆陰イオンガスTPC – 電子より重い陰イオンをドリフト

- 従来用いていた電子ドリフトTPCに比べ**拡散小**
- **絶対位置決定**で**BG有効体積カット**(右図)
- 複数種陰イオンドリフト速度差
→絶対位置決定

CS₂(DRIFT(英))、その後SF₆で実証(N.Phanら)
Astropart.Phys. 91 (2017) 65-74

陰イオンガスTPC模式図

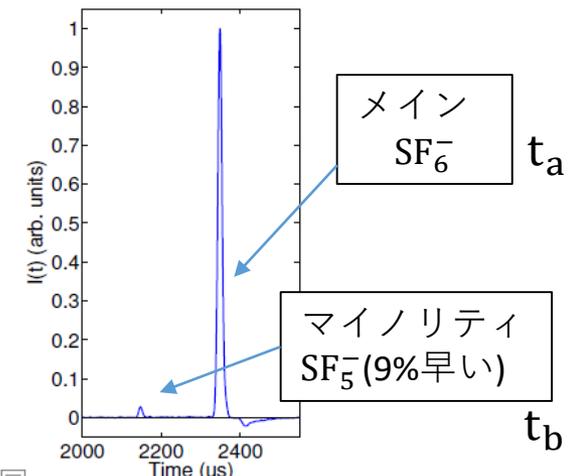


◆陰イオンガスTPC開発に向けて

- 陰イオンガスTPC 開発
 - 島田拓弥 2019JPS秋季 18aT12-5
- 陰イオンガス/液体Ar TPC エレクトロニクス開発
 - 岩手大 五十嵐氏, 中村拓馬 講演
 - 2019 JINST 14 T01008
- 陰イオンガス中MPGDシミュレーション
 - 石浦 arXiv:1907.12729 など
- 大型陰イオンガスTPC製作

本講演

$$\text{絶対位置} z = (t_a - t_b) \frac{v_a v_b}{v_b - v_a}$$

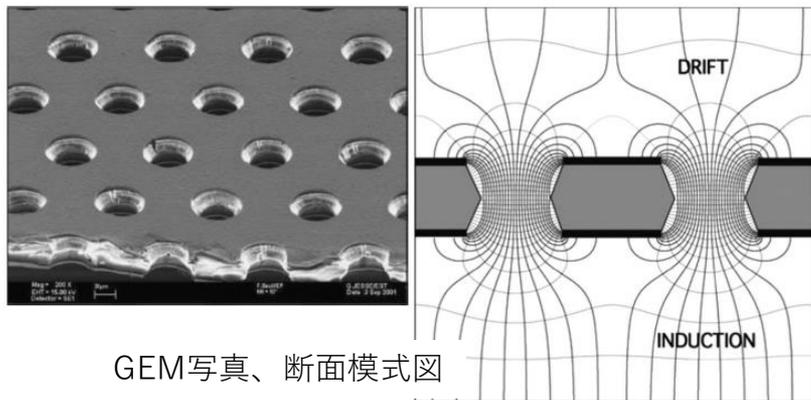


陰イオンガス中MPGD特性

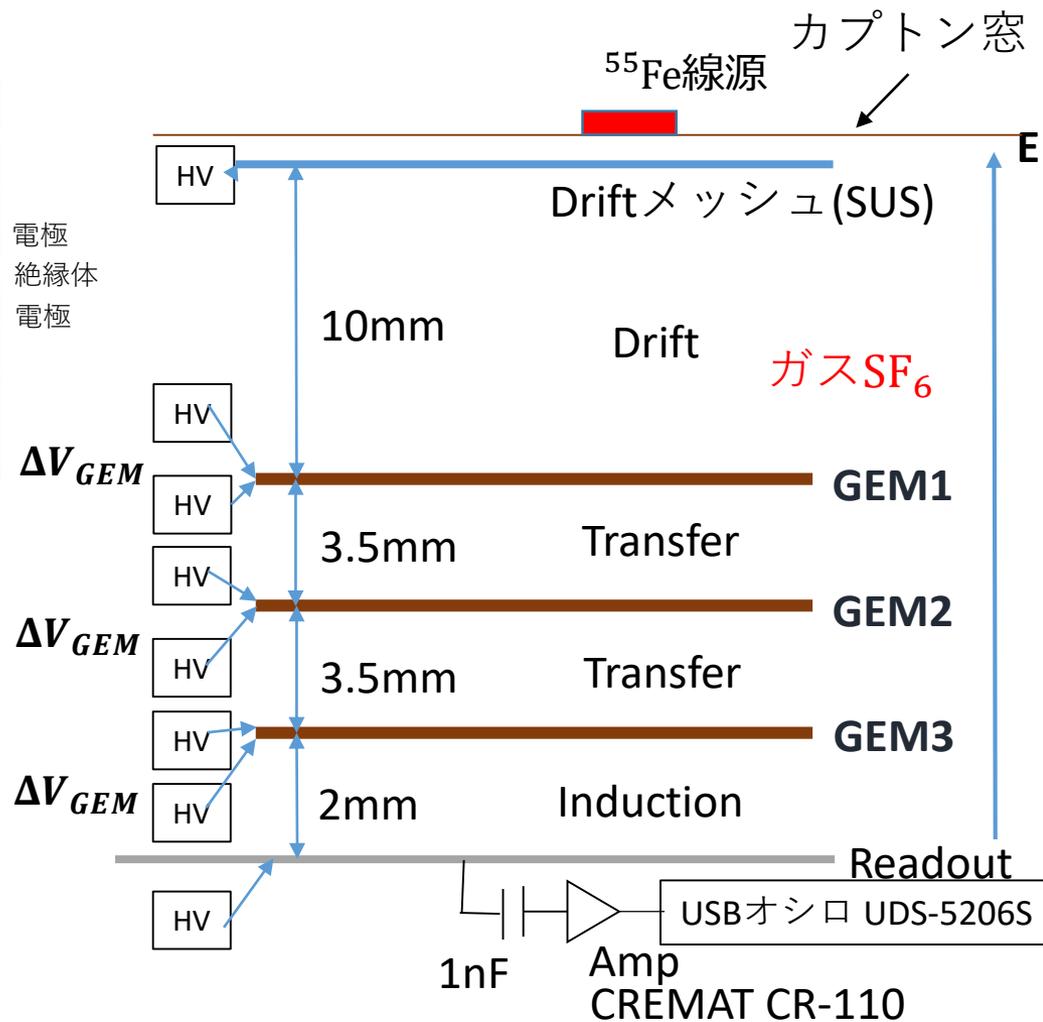
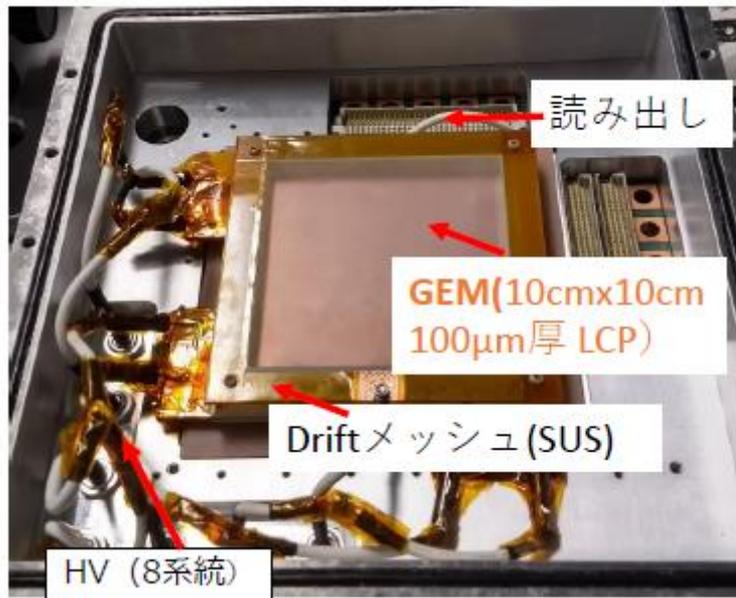
基礎測定としてSF₆ガス(陰イオンガス)中GEMガスゲインを測定

➤ 100 μm GEM 2 or 3段を用いてガス圧、印加電圧を変え測定

GEM厚 50 μm 3段、400 μm 1段の先行研究あり



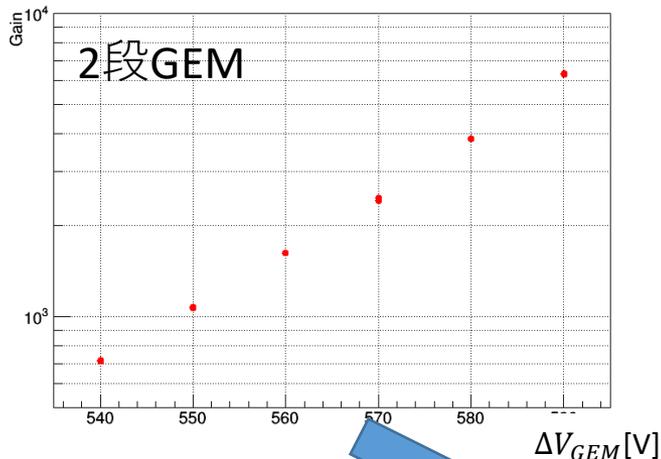
GEM写真、断面模式図



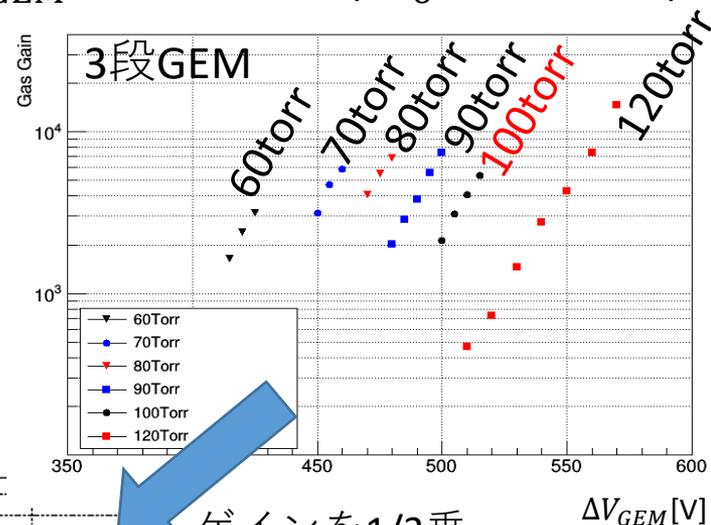
2段/3段GEM 測定結果

2段/3段GEMの結果から1段当たりのゲイン計算 (100 Torr)

Gain @ 100 Torr SF6 Double-GEM



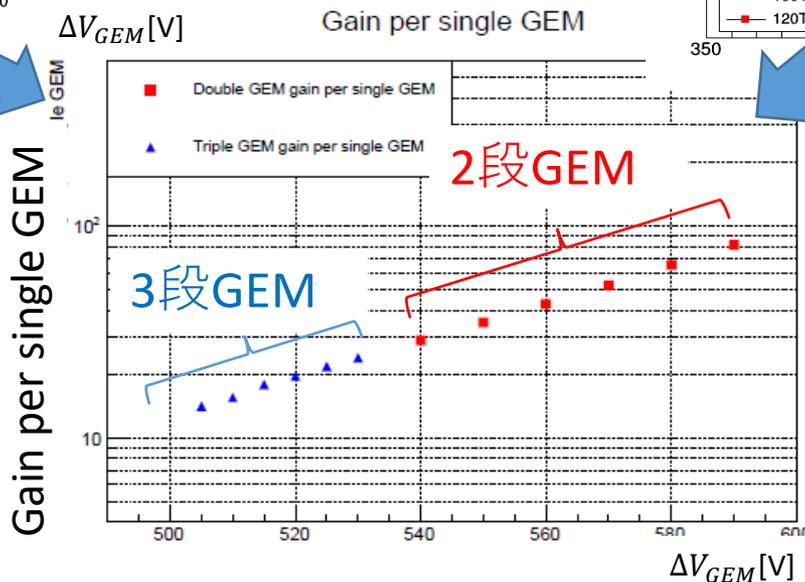
ΔV_{GEM} and Gas Gain (SF₆ 60~120torr)



ゲインを1/2乗

ゲインを1/3乗

- 1段当たりガスゲイン → 一直線上
- GEM間電荷損失 ほぼ無し



2段、3段GEM

- 脱離・増幅・吸着過程が N(=2,3)回繰り返す
- 段ごとのプロセスに着目

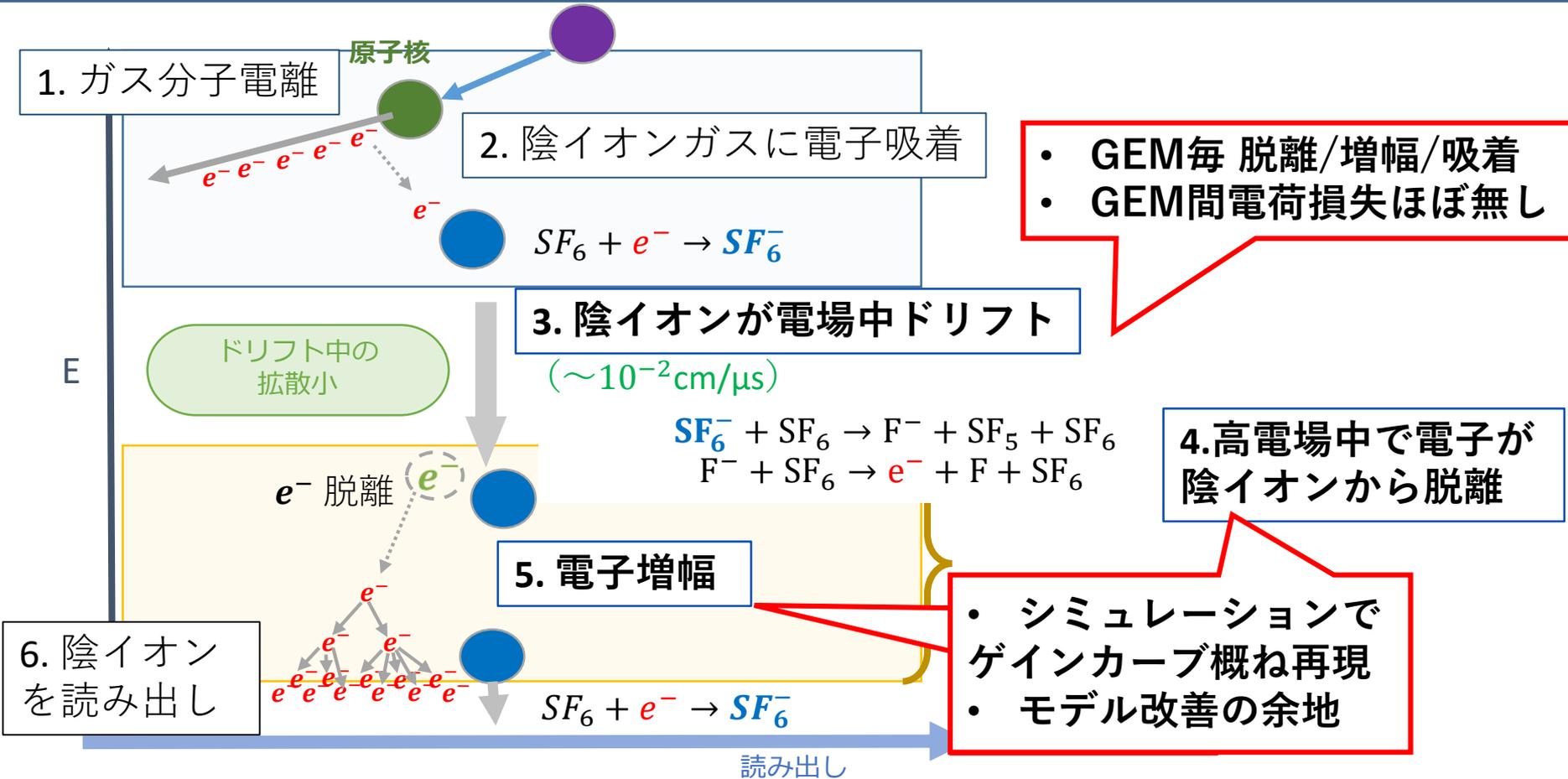
1段GEM(N=1)

について考えればよい

目標

- 1段GEMシミュレーションを行いゲインカーブを再現

陰イオンガス中MPGD描像



MPGD描像&シミュレーションから

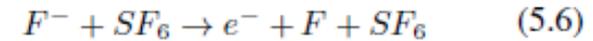
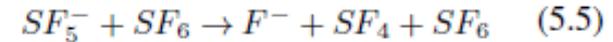
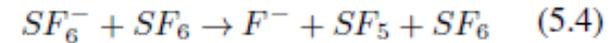
- ガスゲイン/エネルギー分解能の理解→エネルギー閾値へ
- メイン&マイノリティチャージ検出向上→有効体積カットなど運用条件最適化

大型NI μ -TPC実現へ

Garfield++: 陰イオンからの電子脱離プロセス含まれず

→陰イオンからの電子脱離プロセスを組み込む必要

電子脱離の反応



➤ 電子脱離のモデルとして

1) 実験結果から推定したトイモデル

GEM中電場 40~50kV/cm @100Torr で脱離 (実験より)

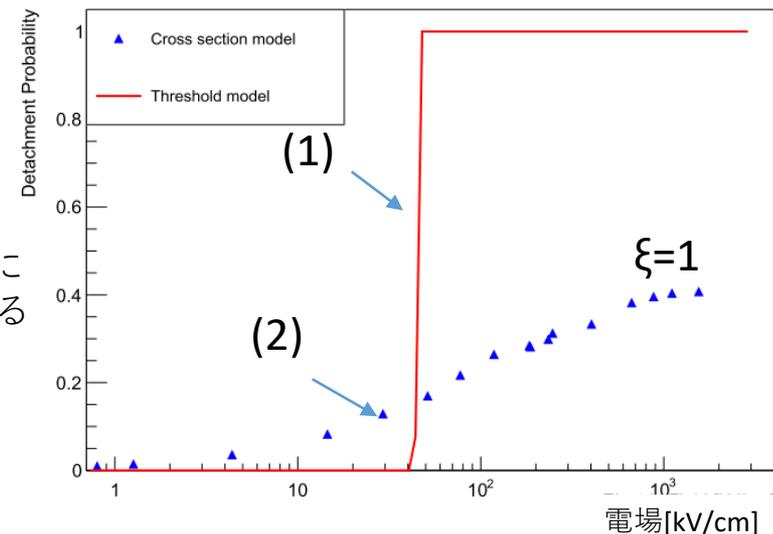
40~50kV/cm付近で電子脱離確率が立ち上がるモデル (右下図 赤線)

2) 電子脱離電場依存モデル(右下図)

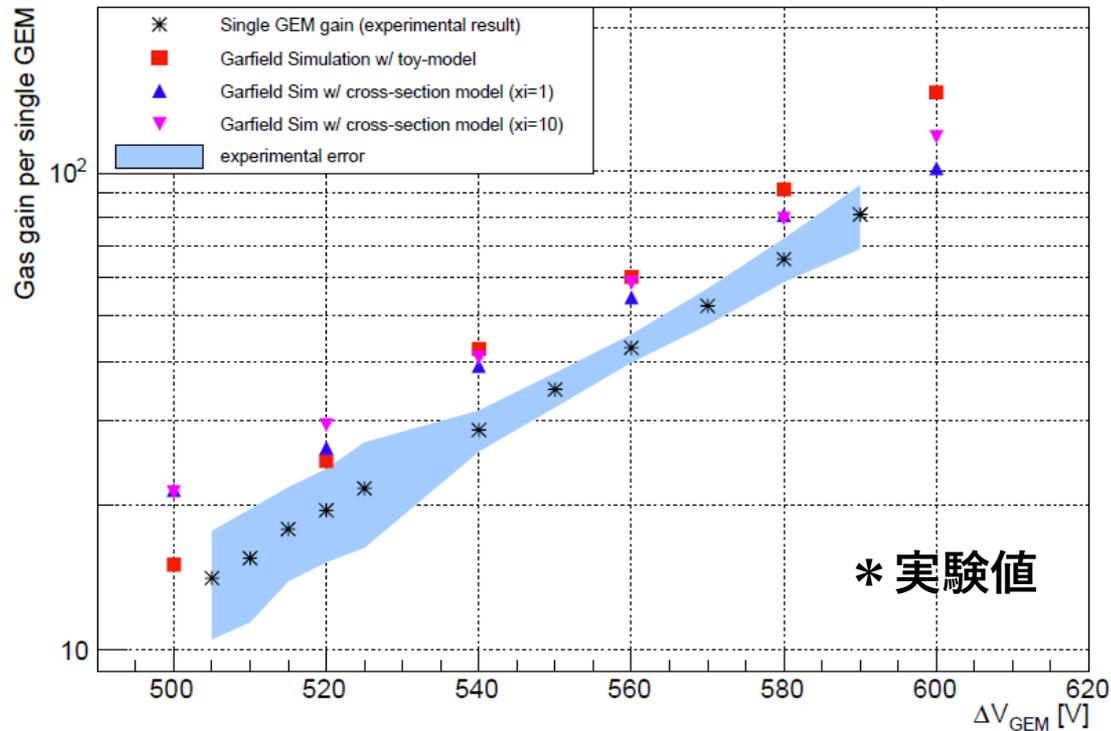
電子脱離反応断面積から構築した(青) 電子脱離確率

を用いてgms+Elmer+Garfield++
でシミュレーション

1 μ m走る間に
電子脱離する
確率



- 1) 40~50kV/cmの電場付近で電子脱離確率が立ち上がるトイモデル (赤 ■)
 - 実験で得られたゲインカーブとGarfield++を用いた再現
- 2) 電子脱離の反応断面積を考慮したモデル (青▲、マゼンダ▼)
 - 反応断面積モデルではトイモデルと実験値に比べ、傾き小



反応断面積モデルは低電場でも電子脱離が起き、増幅長がトイモデルより長く
→ 傾きに違い

電子脱離確率電場依存モデルのパラメータ再考の必要性

エネルギー分解能

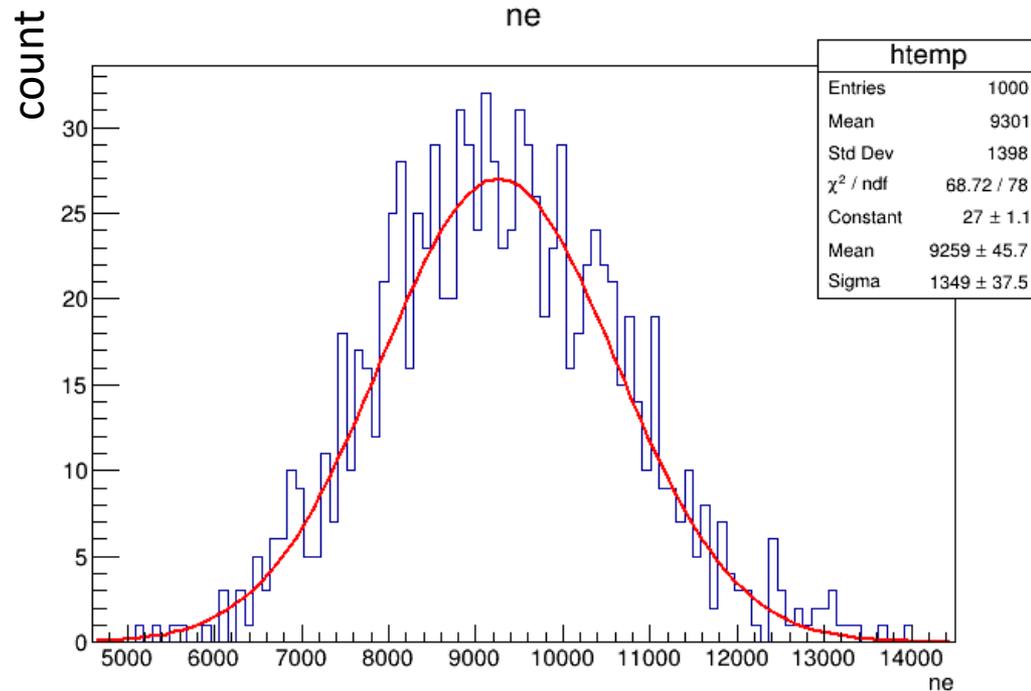
➤ 反応断面積モデル

➤ エネルギー分解能(FWHM) 34%

これだとGEM2枚で48%, 3枚で58%
にしかない

GEM2枚で60%, 3枚で80%の実験結果を説明するには
1枚あたり50% FWHMが期待されるが食い違う

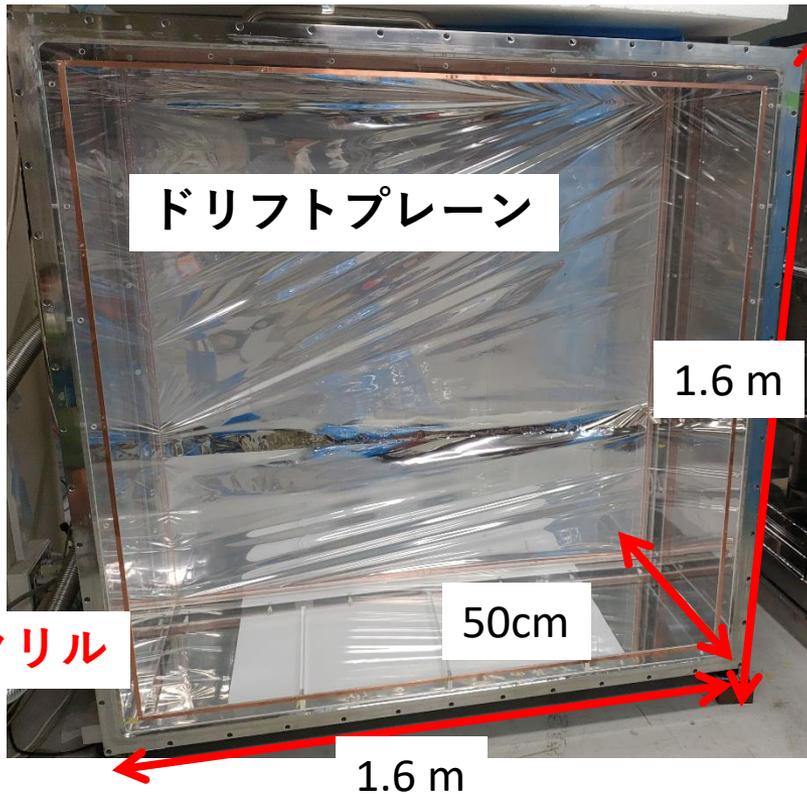
- エネルギー分解能を悪くするプロセスの存在?
(電子脱離モデルの位置ばらつきが大きい、など)
- 課題、モデルの検証中



5.9 keV X線
により予想されるゲイン

大型TPCフィールドドケージ

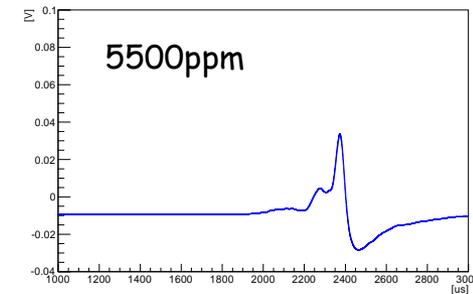
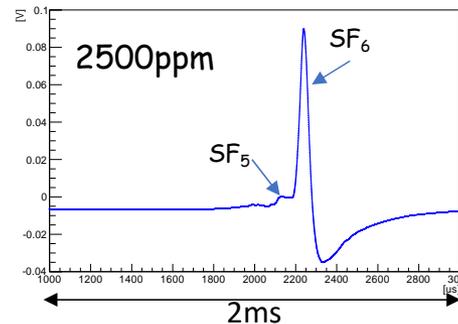
➤ フィールドドケージ(抵抗シート or チェーン)支持体として**アクリル**を利用



- 放電防止
- PEEK等に比べコスト小
- 小型TPCで実績あり

ただし

- 水分を吸収しやすい→ H_2O アウトガス
- SF_6 ガス中 H_2O 量→波形に変化



池田智法 JPS第73回年次大会Talk

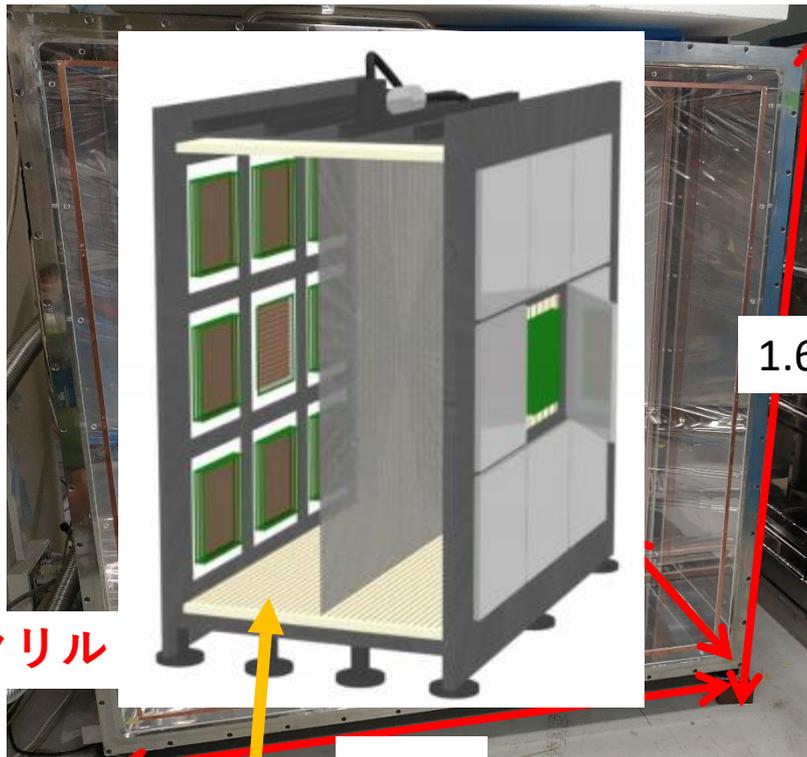
→要請値 5000ppm 以下

水分量が波形変化 = z絶対値決定に影響

➤ アクリルからの水分を低減・コントロールする必要

大型TPCフィールドケージ

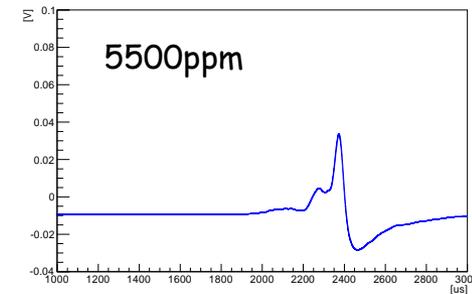
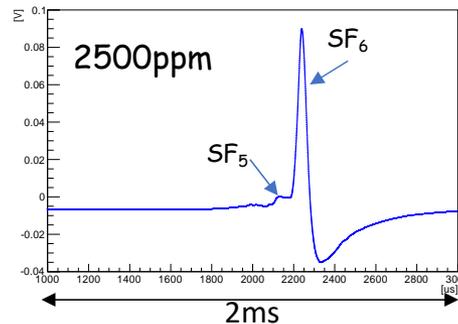
▶ フィールドケージ(抵抗シート or チェーン)支持体として**アクリル**を利用



- 放電防止
- PEEK等に比べコスト小
- 小型TPCで実績あり

ただし

- 水分を吸収しやすい→H₂Oアウトガス
- SF₆ガス中H₂O量→波形に変化



池田智法 JPS第73回年次大会Talk

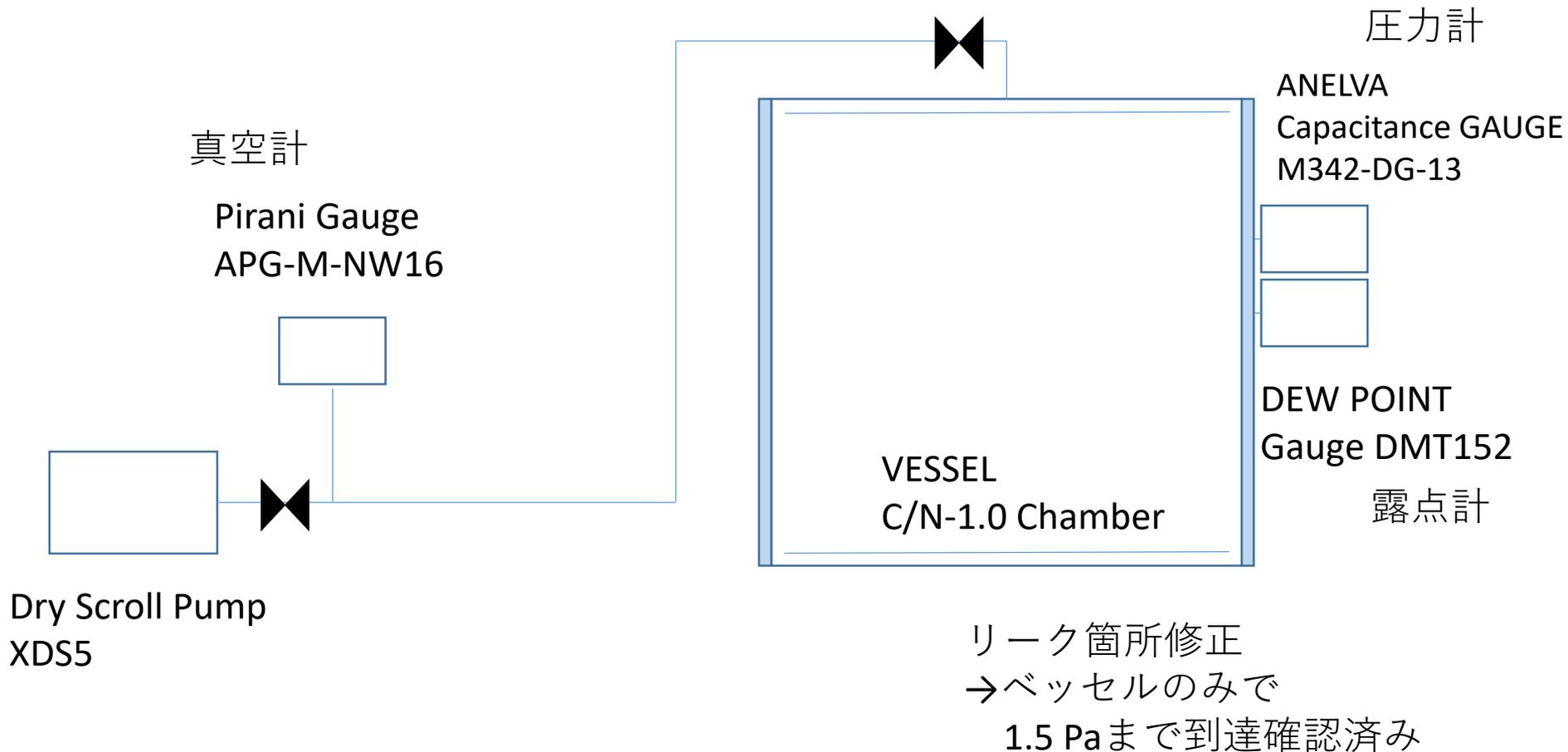
→要請値 5000ppm 以下

水分量が波形変化 = z絶対値決定に影響

▶ アクリルからの水分を低減・コントロールする必要

アウトガス測定

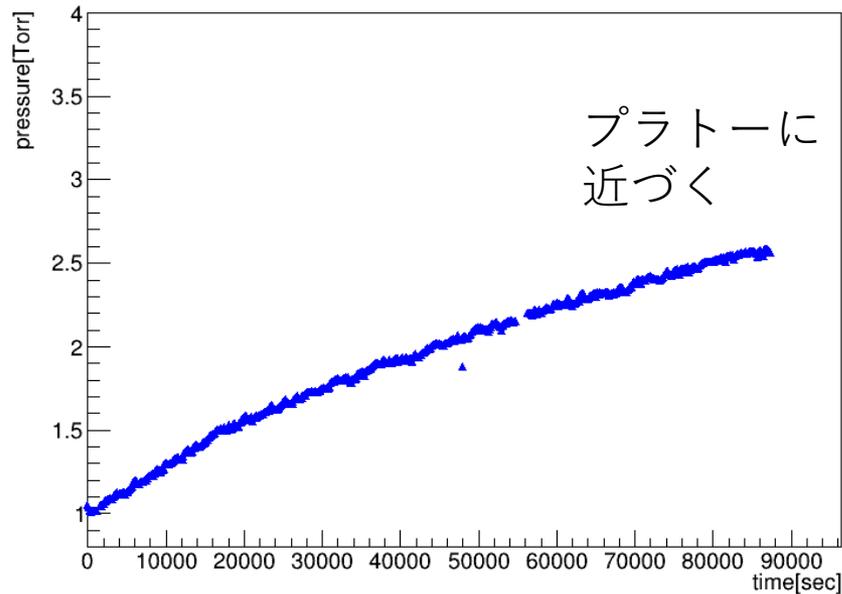
- ▶ アクリルフィールドケースをベッセルに入れ
 - ▶ 真空引き後の圧力および水蒸気量（露点計より）をモニタ



アウトガス測定

➤ 真空引き停止後の圧力と水蒸気量

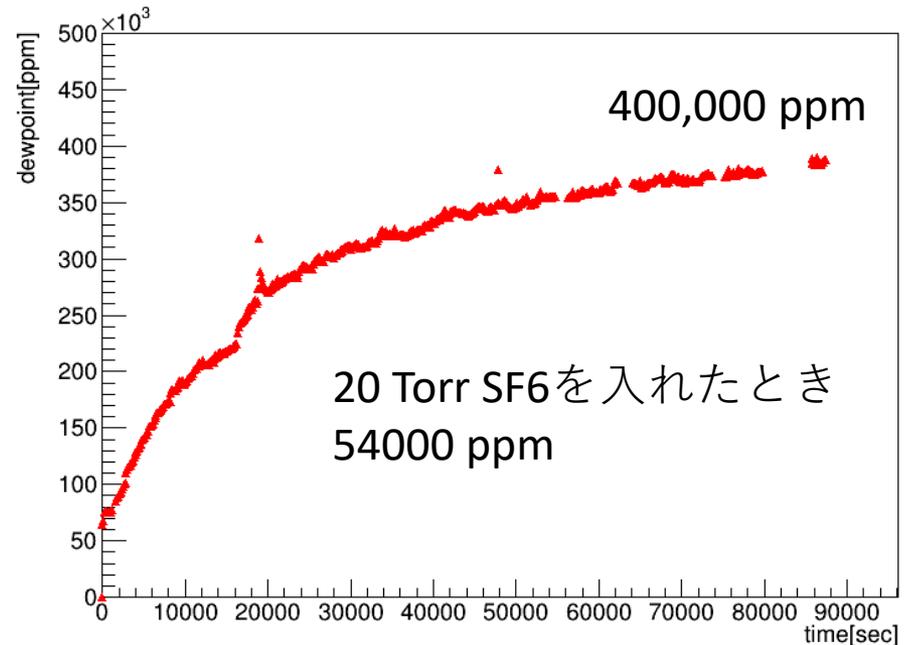
ベッセル内圧力



真空引き停止後からの経過時間

用いた圧力計の感度が1 Torr付近から

水蒸気量



真空引き停止後からの経過時間

アクリルからの水蒸気アウトガス
→多い = SF6波形に影響
→対策必要

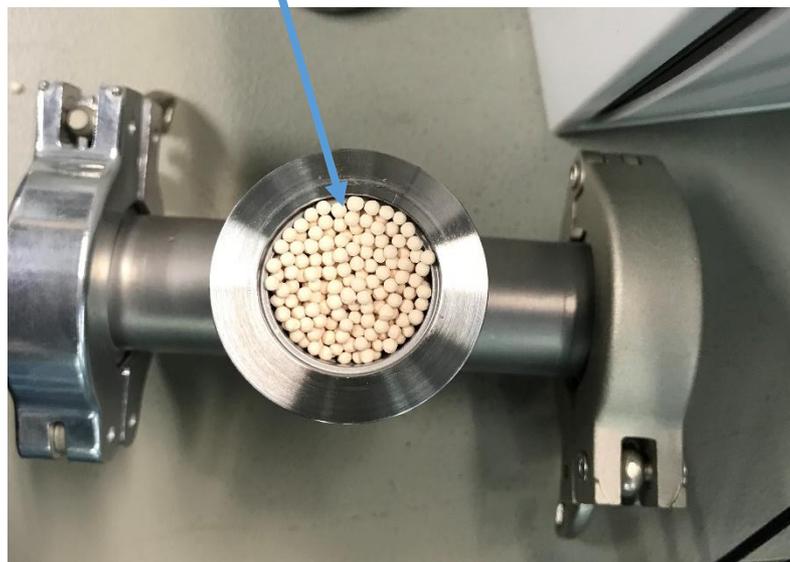
H₂Oアウトガス対策

対策として (案)

➤ H₂Oをゼオライト系吸着剤を用いて吸着

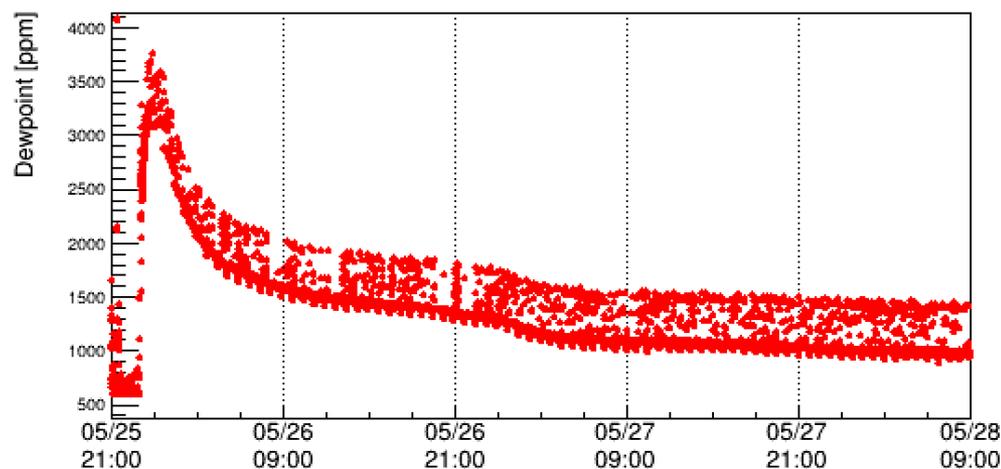
- 小型チェンバー(10 cm角 x 16cmドリフト、アクリル利用)での実績 (図)
- 必要量、流量など検討中 → 大型TPCでの試験へ

ゼオラム (吸着剤)



流量 0.3 L/min SF6

H₂O含有量の経過



池田智法 2018年 TPC研究会@京都大学

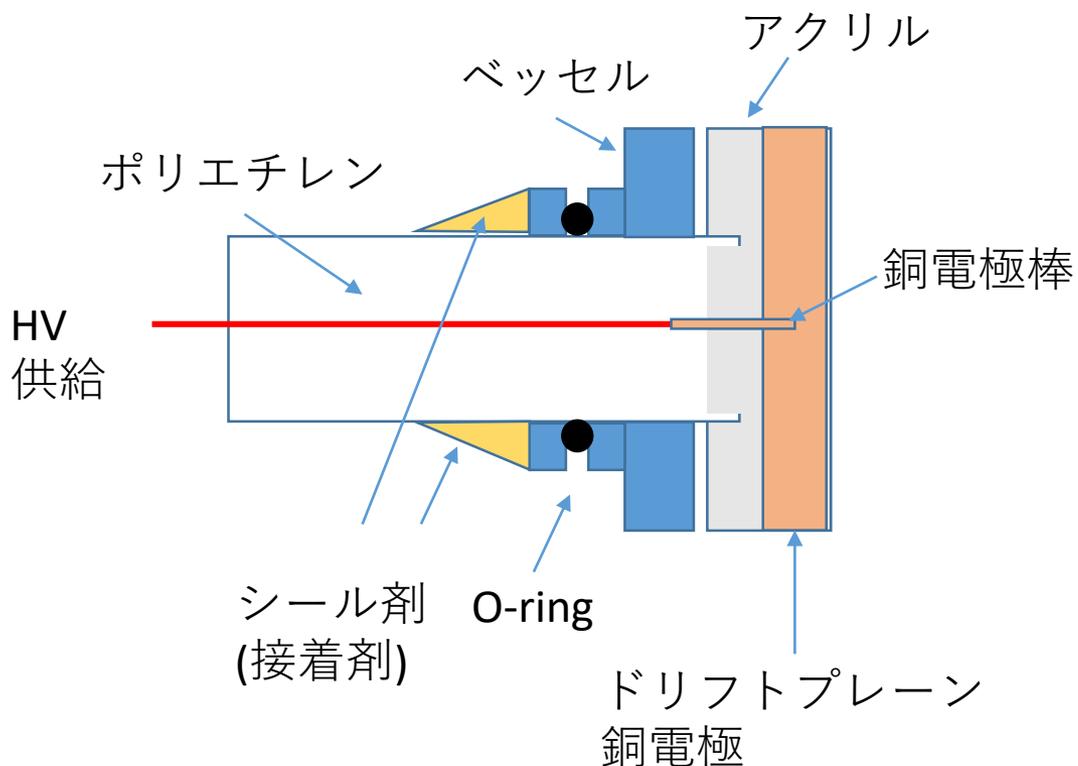
ドリフト電圧印加

SF₆ 大きなドリフト電場必要 –

ドリフトプレーンへの50 kV印加 @ 低圧(~20 Torr) を目標

➤ 放電対策としてポリエチフィードスルーを使用予定

- バックアップとしてCockcroft-Walton回路
- 当初アライメントのズレ→再加工発注 & 修正済み

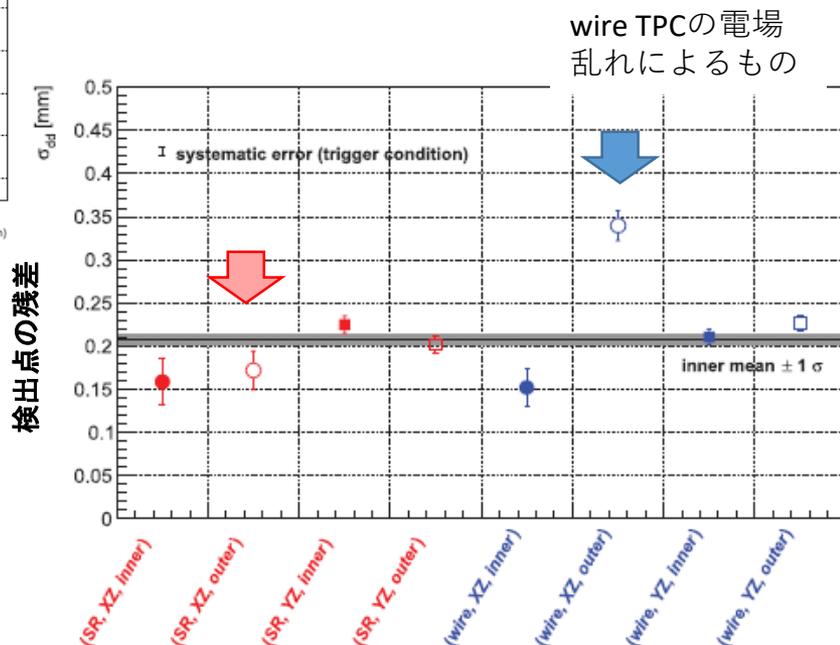
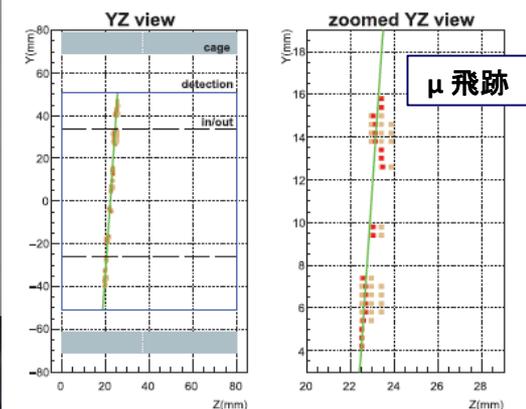
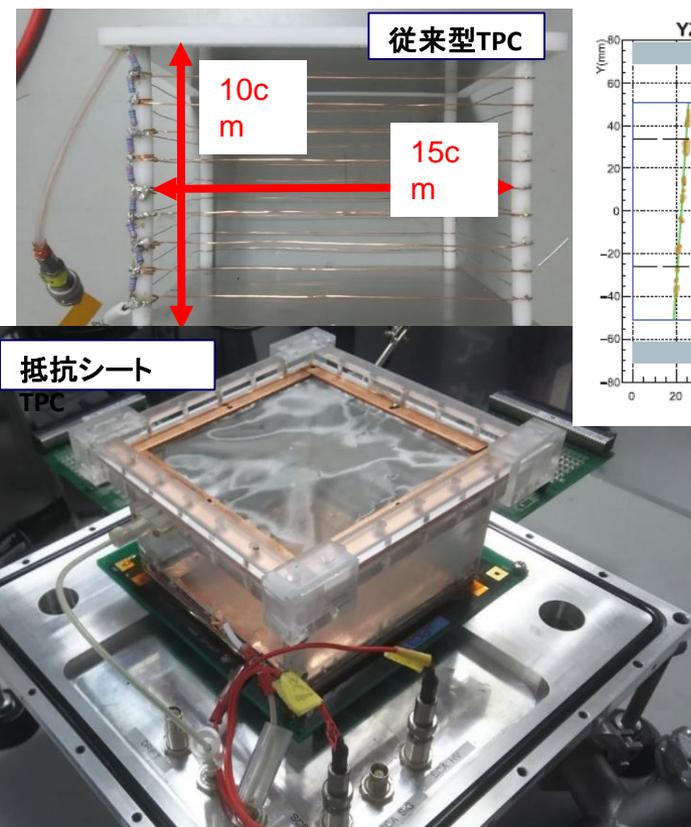


現状空気中で-11 kV印加で放電
→放電箇所特定中

最近の技術展開 : 「抵抗シートTPC」

- 連続抵抗 (市販のシート) を使ったTPC電場形成
- ワイヤタイプよりシンプルな構造 一様な電場

PTEP 2019 (2019)063H01



Kentaro Miuchi

今後とまとめ

今後

- 陰イオンガスMPGDシミュレーションまとめる
- H₂Oアウトガス対策
- フィードスルー高電圧試験
- TPCを開発・製作し暗黒物質探索へ

まとめ

- NEWAGE
 - 低アルファ μ -PICを用いて方向に感度を持つ探索で感度を更新
 - 大型陰イオンガスTPCを開発・製作中
 - 低BG化&大質量化を目指す
- フィールドケージに用いるアクリルのアウトガス (H₂O) 確認
 - モルキュラーシーブによる低減確認しTPC構築へ