

比例蛍光読み出しによる XMASS実験テストベンチの開発 ～電極の開発

菅澤佳世、伊藤好孝、毛笠莉莎子、増田公明、関谷洋之^A
名大ISEE、東大宇宙線研^A、他XMASS collaboration

日本物理学会 第71回年次大会

2016/3/20

東北学院大学

1 相式液体XeTPC

- ・ XMASSの感度向上のため、1相式液体XeTPCテストベンチの技術検証を行いたい
- ・ 液体Xe中で発生する2つのシンチレーション光(S1,S2)を観測する

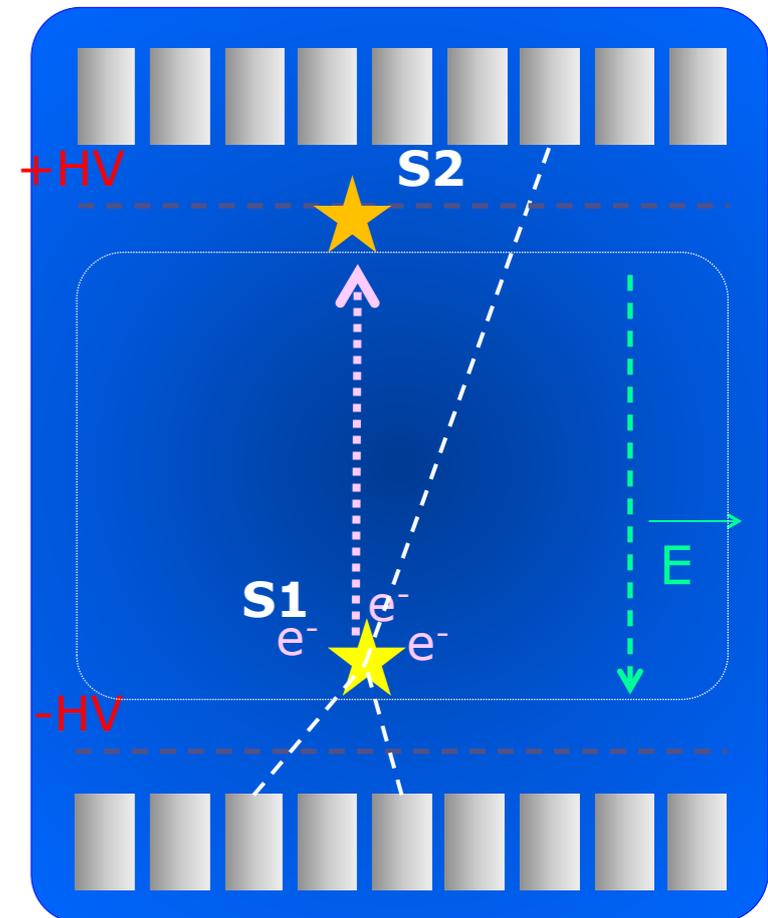
S1：入射粒子とXe原子核との相互作用時に発生する直接蛍光

S2：相互作用時に発生した電子を電場によりドリフト・増幅させた際に発生する比例蛍光

S1とS2の時間差から反応位置を特定できる

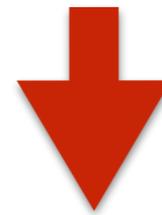
S1とS2の光量比から粒子識別が可能

- ・ 2つの信号を用いたTPCとすることで、検出感度の向上が期待される
- ・ 2相式よりも検出器形状に自由度があり、液面管理が不要



電極開発の動機

- ・ Glass GEMを用いた実験では比例蛍光(S2)が確認できなかった
- ・ GEMの穴の中に形成される37kV/cmの電場では、液体Xe中での電荷増幅は起きない？
- ・ ワイヤーを用いた実験では、液体Xe中で約410kV/cmの電場でS2発生が確認されている

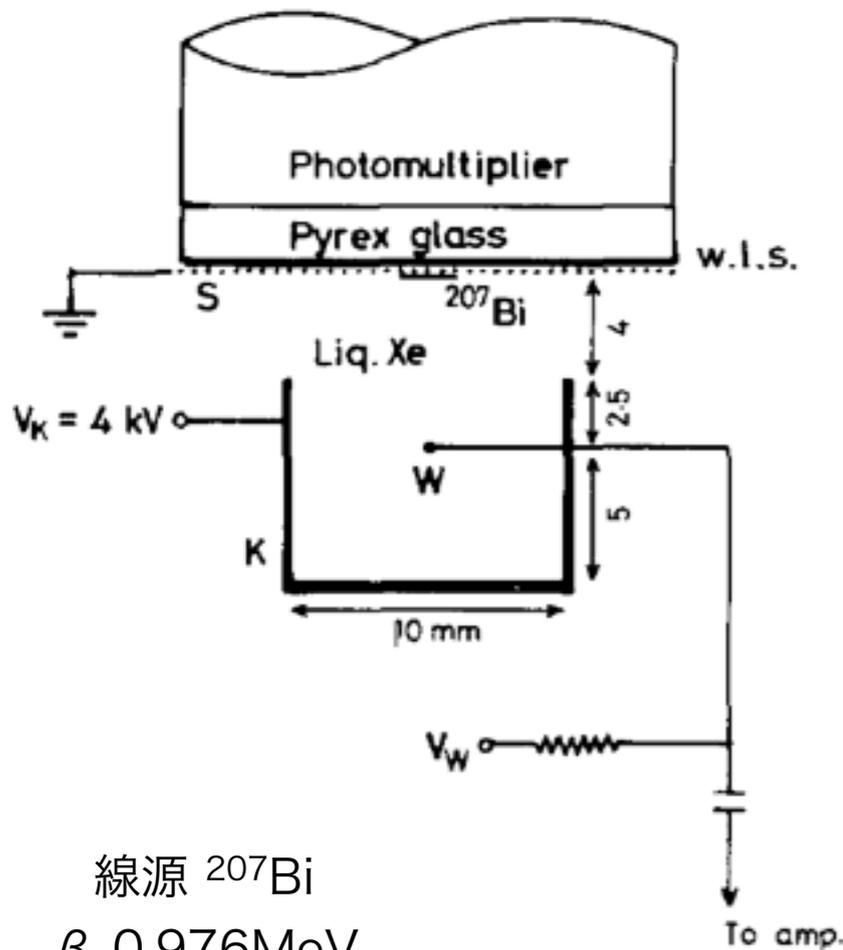


- ・ ワイヤーを用いた電極を開発
- ・ 液体Xe中でのS2発生の確認、電場のしきい値を検証する

先行研究1

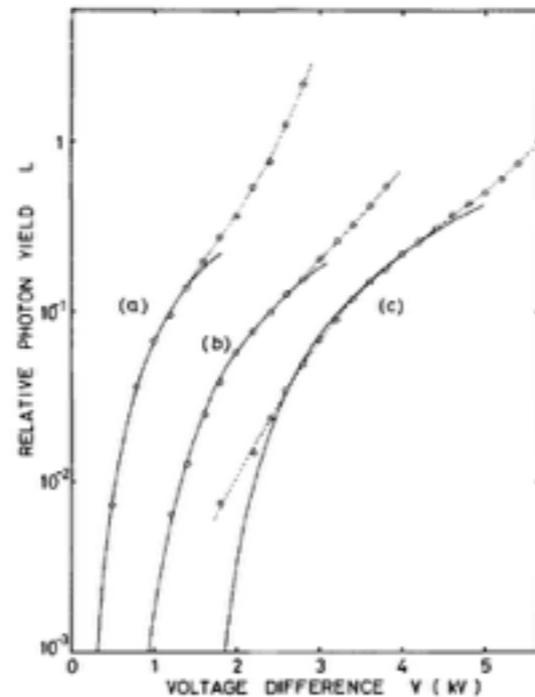
K.Masuda et al., Nucl. Instrum. Meth. 160 (1979) 247

- ・ タングステンワイヤー(直径4-20 μm)を用いた実験
- ・ ふたのない箱型の比例計数管のanodeワイヤーに高電圧を印加、シンチレーション光をPMTで観測する
- ・ S1およびS2を観測、S2発生に必要な電場のしきい値を求めた



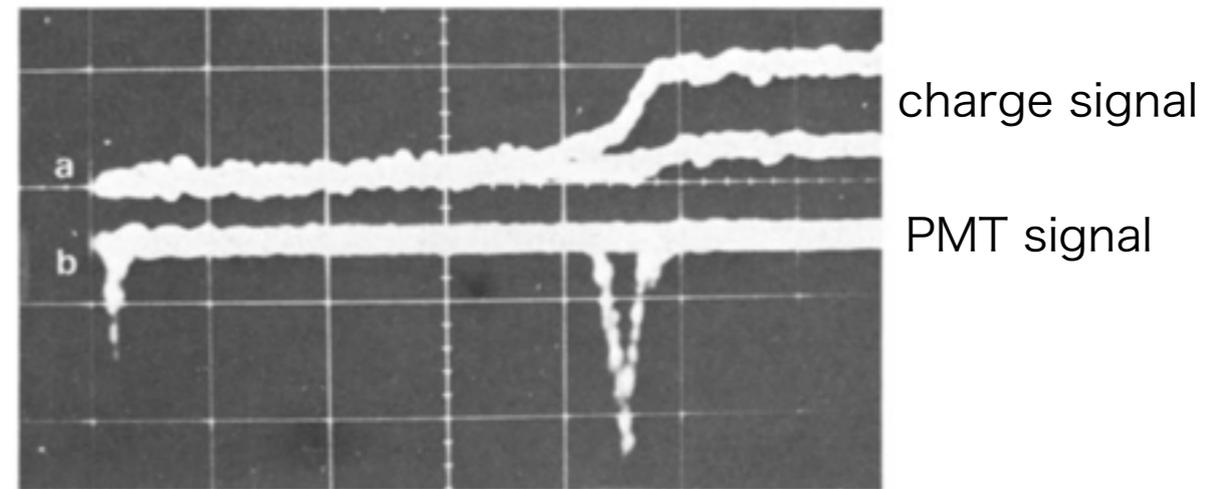
線源 ^{207}Bi
 β 0.976MeV
 γ 0.55, 1.05MeV

S2の発光量 L



$$L = Br_1 \left[A + E_s \left(\ln \frac{E_s}{A} - 1 \right) \right]$$

A: 電場のしきい値

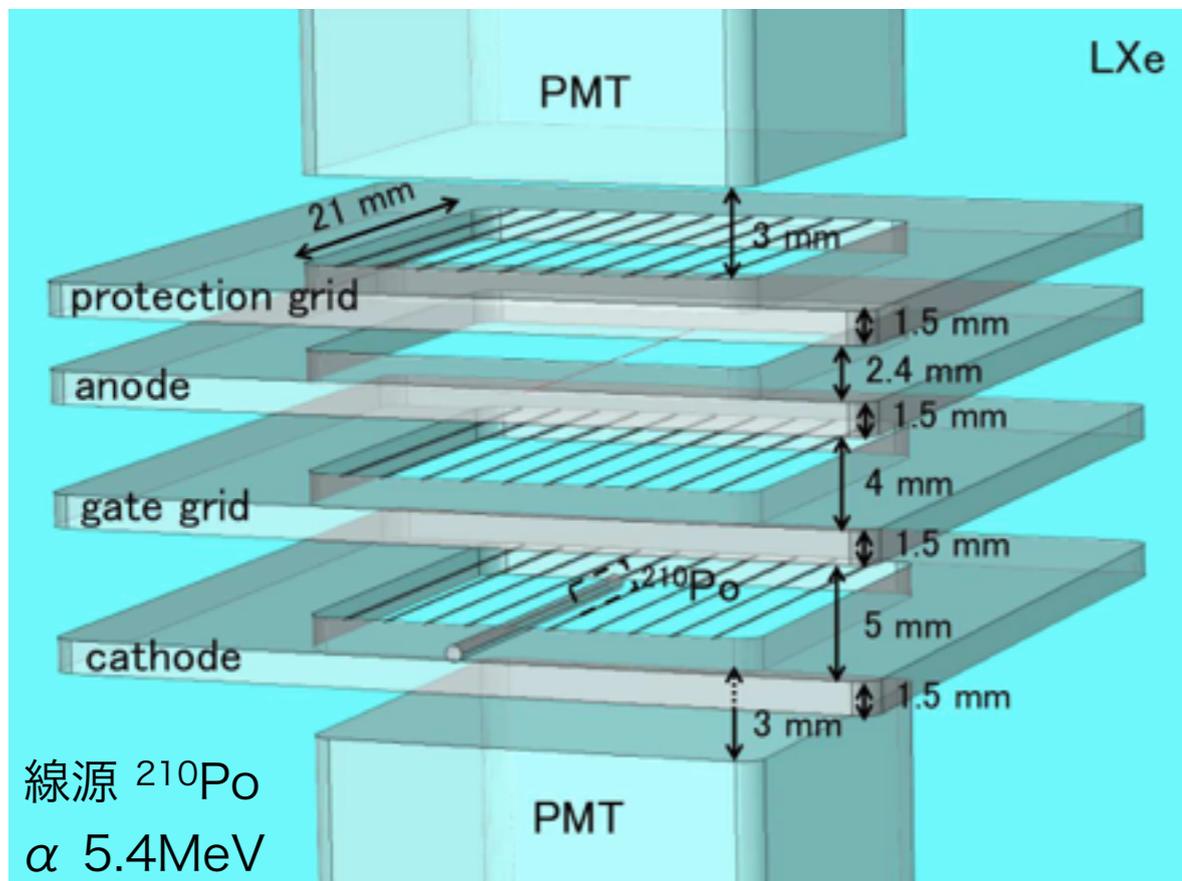


ワイヤー直径[μm]	電場しきい値[kV/cm]
4	700
10	490
20	410

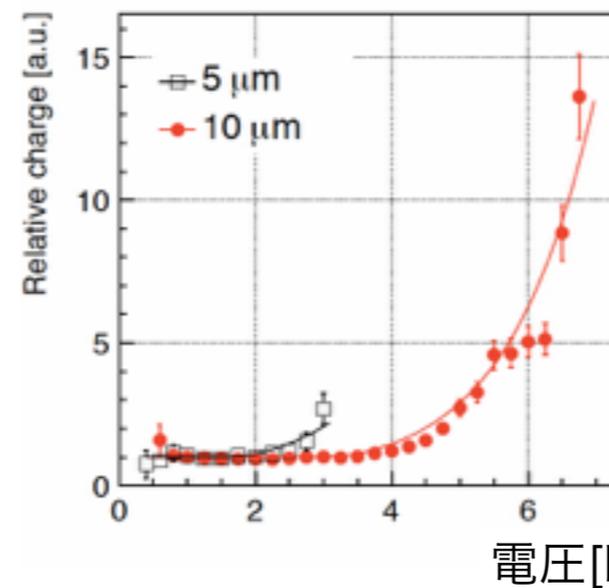
先行研究2

E. Aprile et al., 2014 JINST 9 P11012

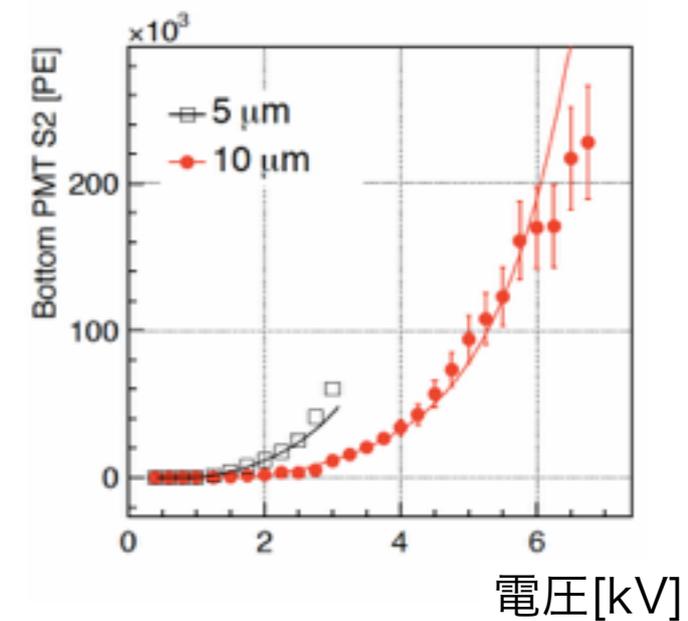
- 直径5,10 μm の金メッキWワイヤーを用いた実験
- 四角いステンレスフレームにワイヤー1本を溶接している
- cathode-gate間がドリフト領域、anode付近の高電場でS2発生
- 得られたS2発生のしきい値 412kV/cm (ϕ 5,10 μm 両方のデータ使用)



relative charge



S2 [PE]



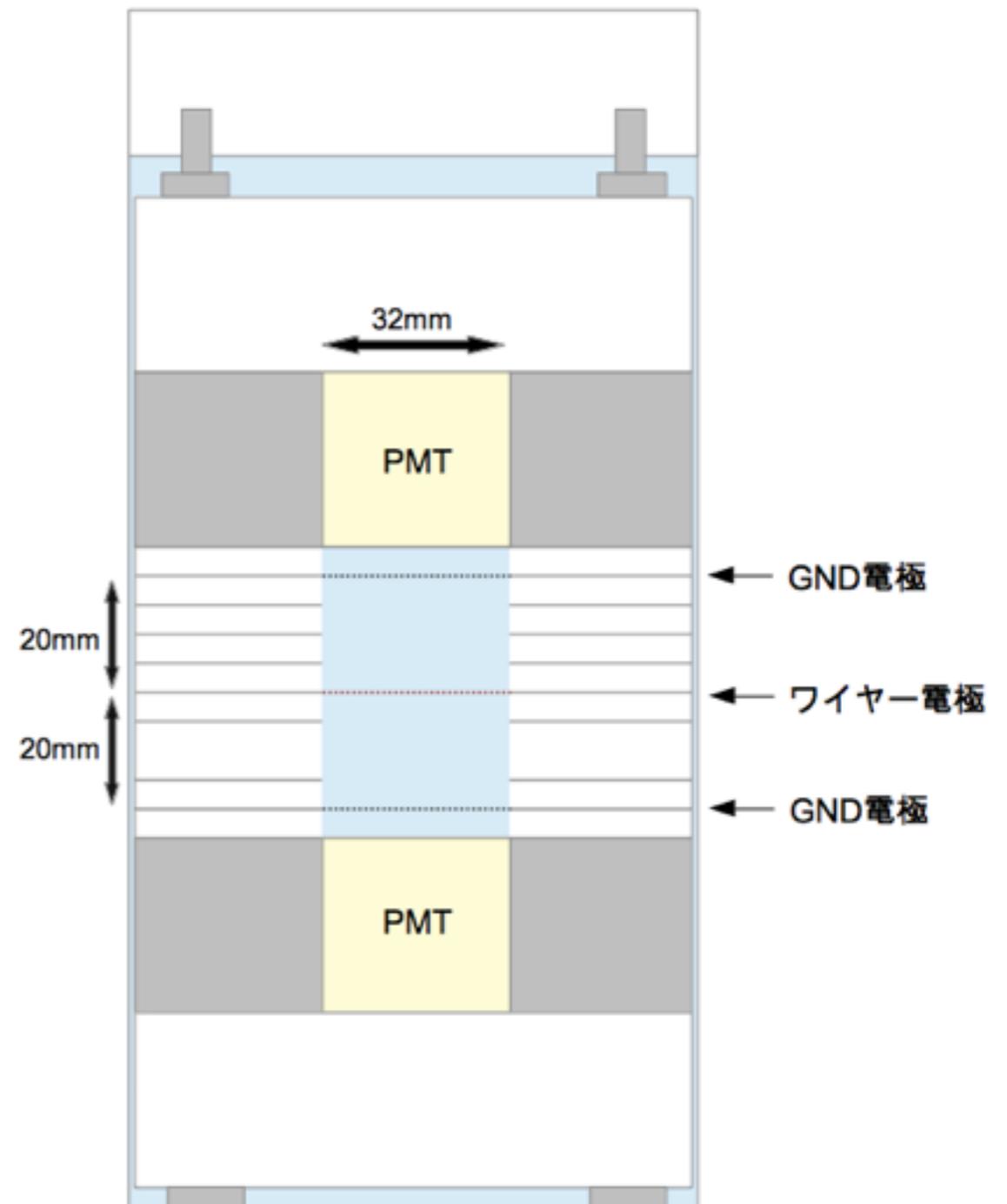
$$\Delta N_e = N_e \theta_0 \exp\left(-\frac{\theta_1}{E(\vec{x}, V_A, d_w) - \theta_2}\right) \Delta \vec{x},$$

$$\Delta N_\gamma = N_e \theta_3 (E(\vec{x}, V_A, d_w) - \theta_4) \Delta \vec{x},$$

θ_4 : S2のしきい値

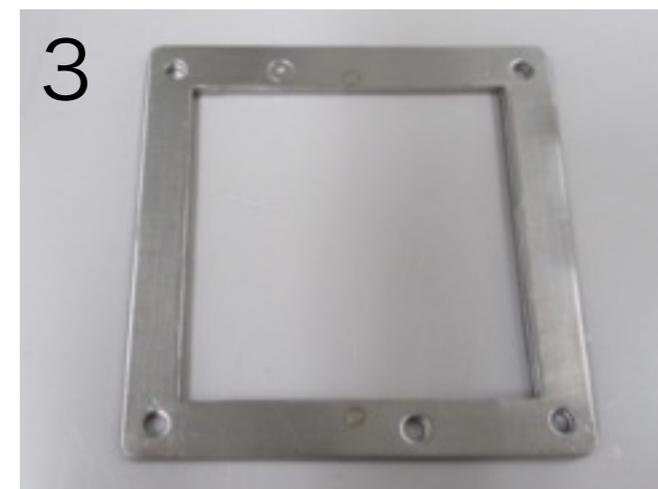
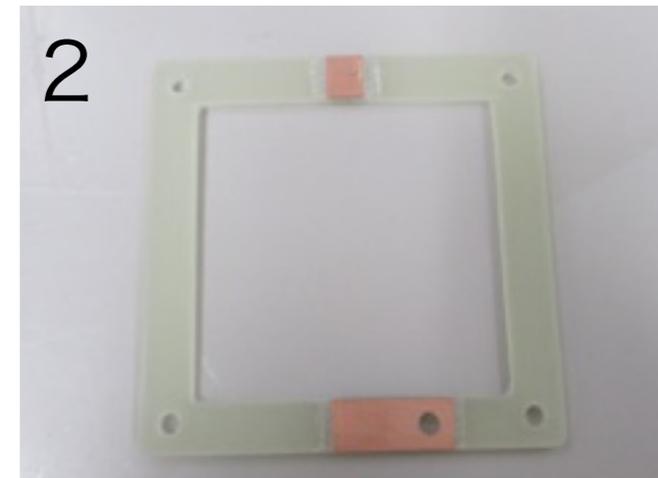
電極のセットアップ

- ・ 内真空容器内に、2枚のGND電極に挟まれる形でワイヤー電極を設置する
- ・ ワイヤーはPMTの光電面に平行に張る
- ・ テフロンスペーサーで電極を固定
- ・ 上下から2つのPMTでシンチレーション光を観測
- ・ 液体Xe有効体積 $32 \times 32 \times 40 \text{ mm}^3$



ワイヤー電極

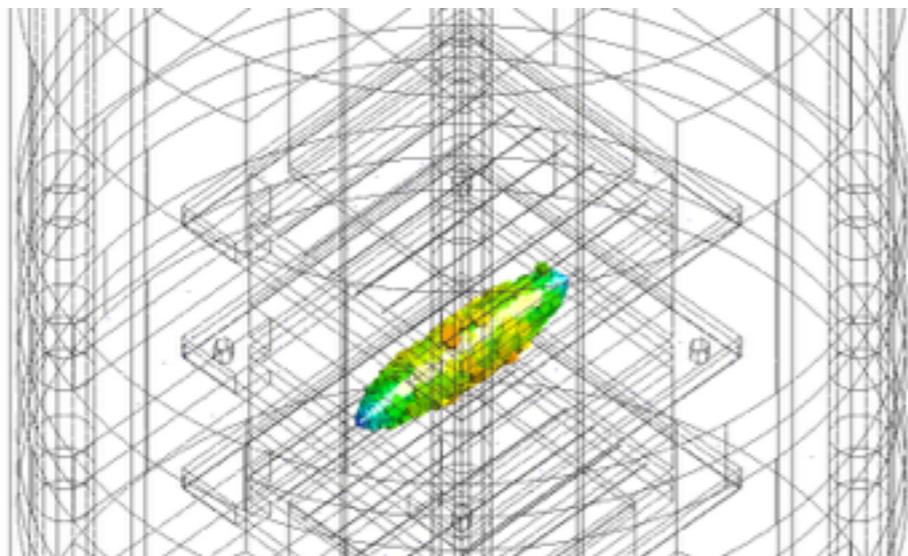
- ・ フレーム外寸42mmx42mm、内寸32mmx32mm
- ・ ワイヤーは直径10 μ mの金メッキW線で、フレームの中心に張る
- ・ ワイヤーは切れやすいため、張り直せるようはんだ付けで固定する
- ・ ガラスエポキシは銅箔が全面に残っているものと一部のみ残っているもの2種類



	材質	厚み[mm]	ワイヤー
1	銅	1	はんだ付け 未接続
2	ガラス エポキシ	1.6	はんだ付け 未接続
3	SUS	1.8	溶接済み

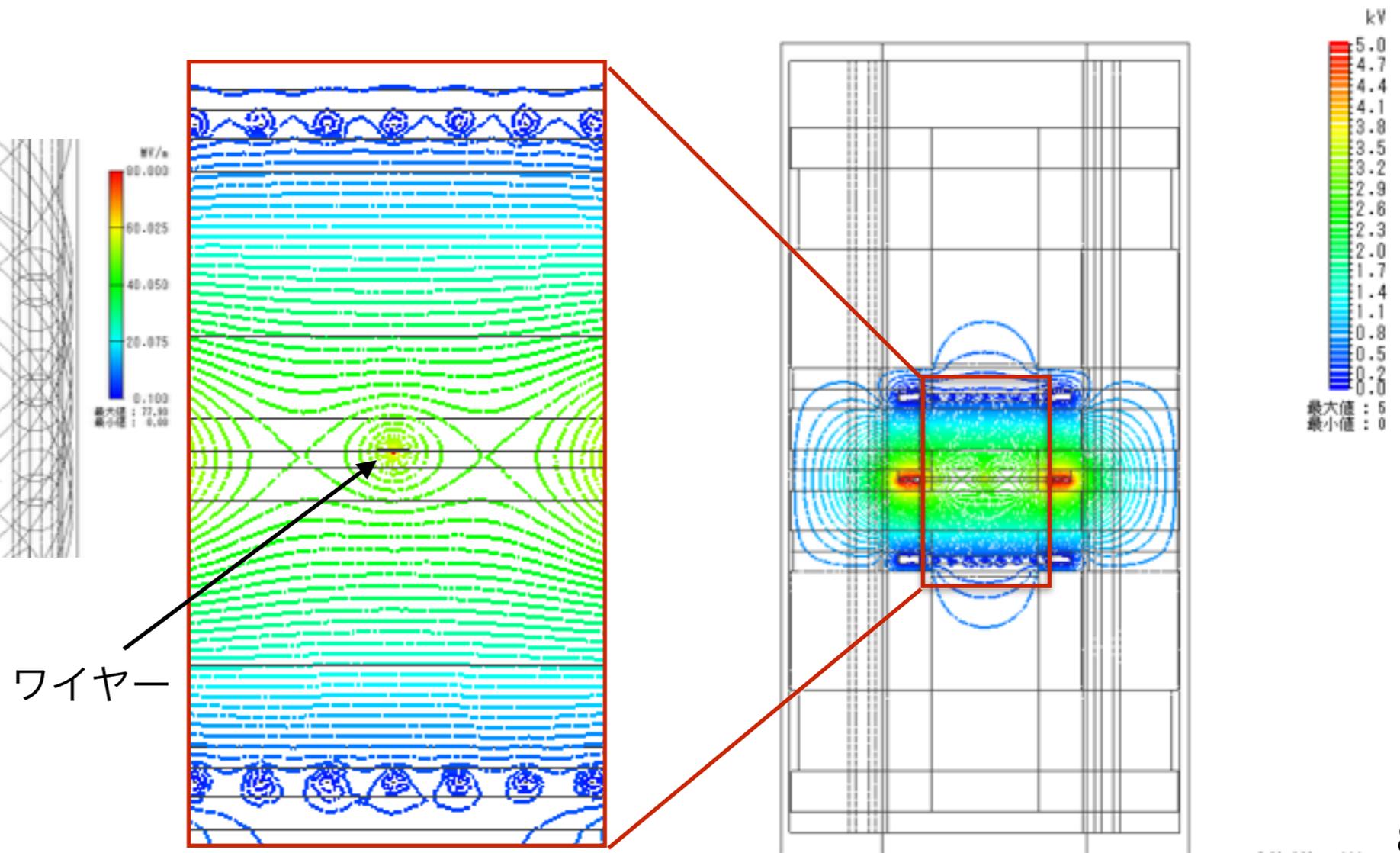
電場シミュレーション

- 有限要素法解析ソフトfemtetを用いて内真空容器内の電場をシミュレーション
- 図はCuに5kV印加時のもの。右図は等電位線を表し、赤いところほど電位が高い
- 左図は電場ベクトルで、フレームよりもワイヤー周りの電場勾配の方が大きいと確認できる



表示範囲 1-800kV/cm

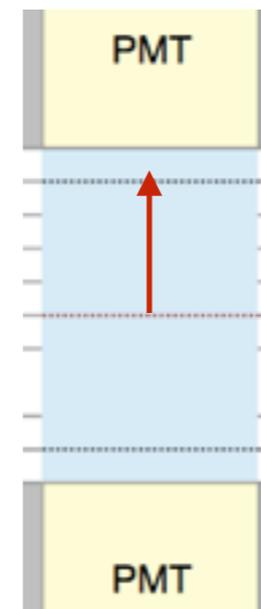
メッシュサイズ
ワイヤー0.005mm
その他2mm



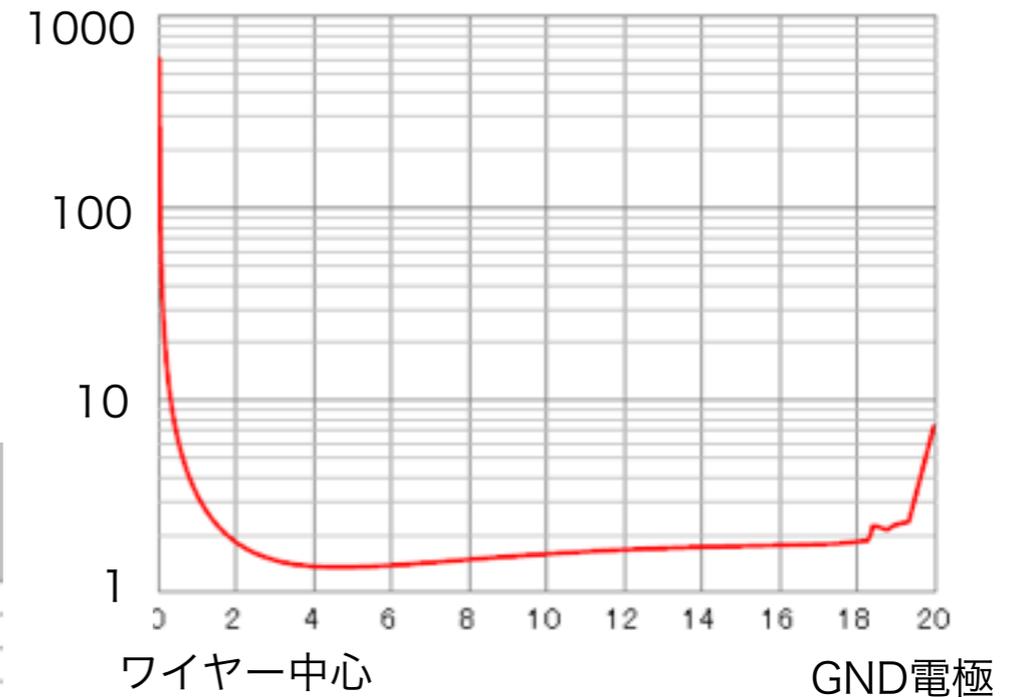
ワイヤー

電場シミュレーション

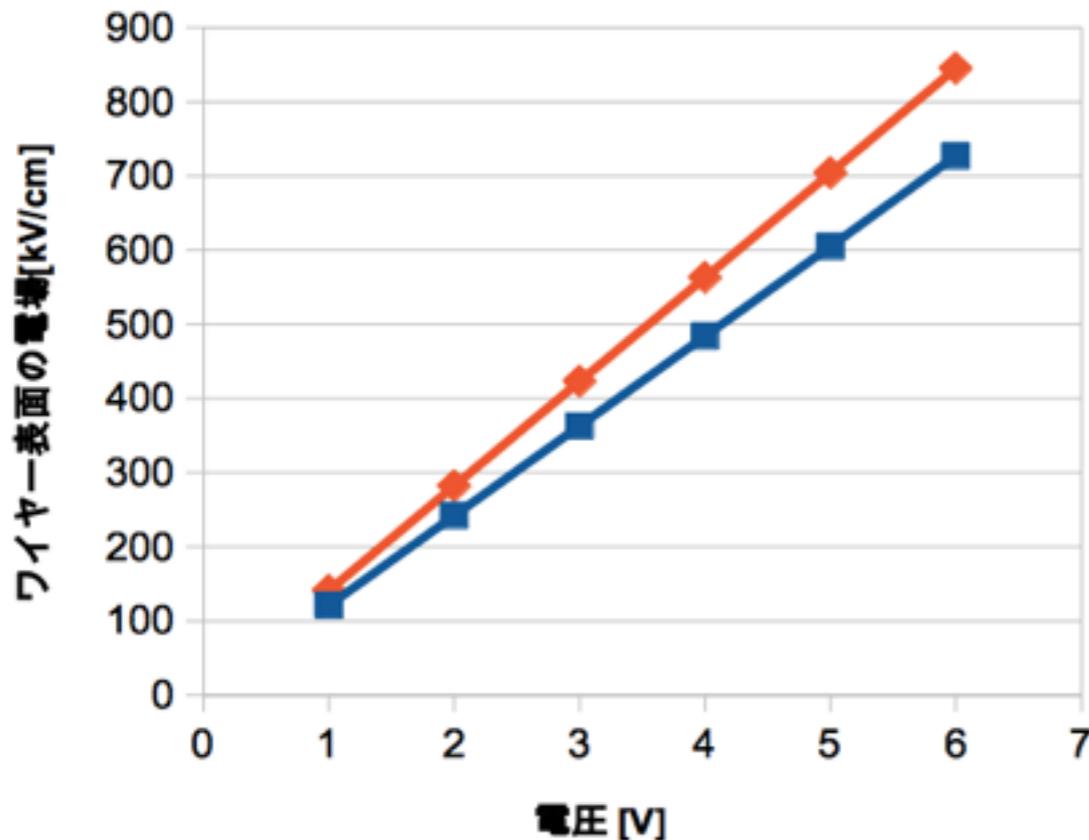
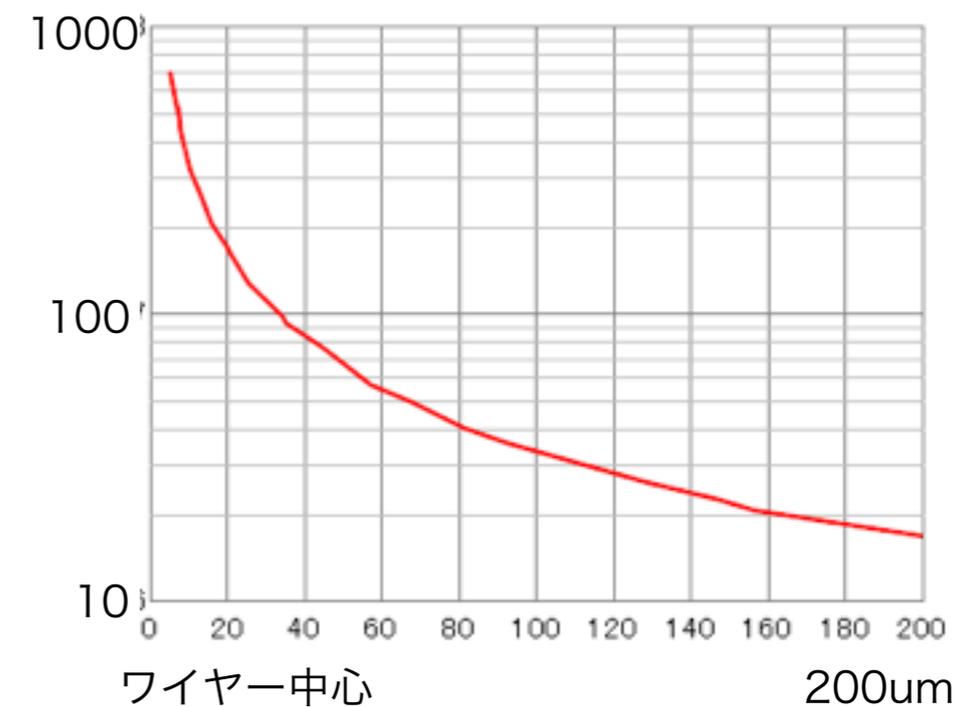
- ・ ワイヤーの電圧を変化させて電場を確認
- ・ S2の発生には4kV以上の高電圧を印加する必要がある
- ・ ワイヤー中心から10 μ m以下の距離で400kV/cmを超える
- ・ ドリフト電場1-2kV/cm
- ・ グラフはCuに5kV印加時のもの



5kV印加時の電場[kV/cm]



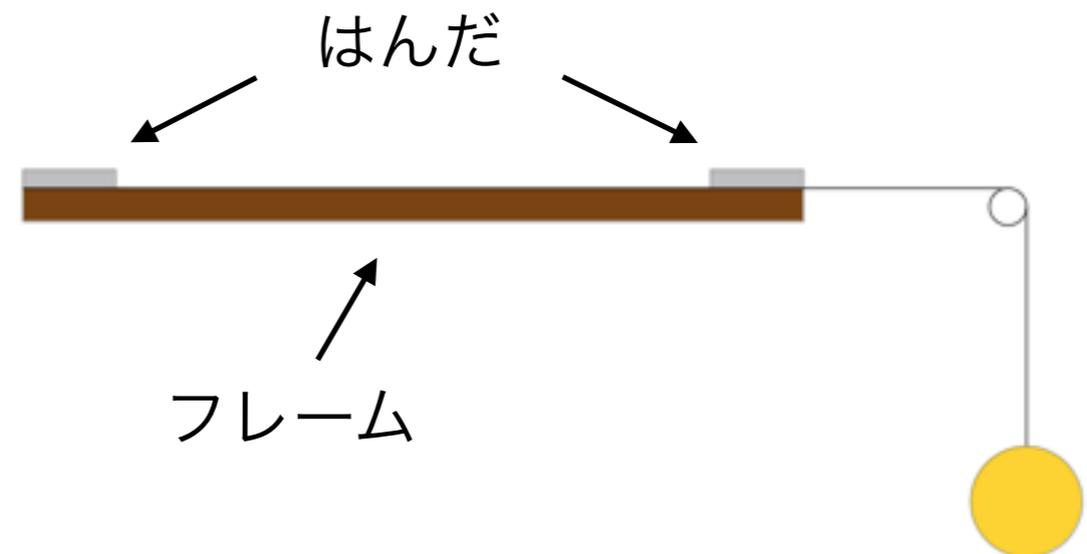
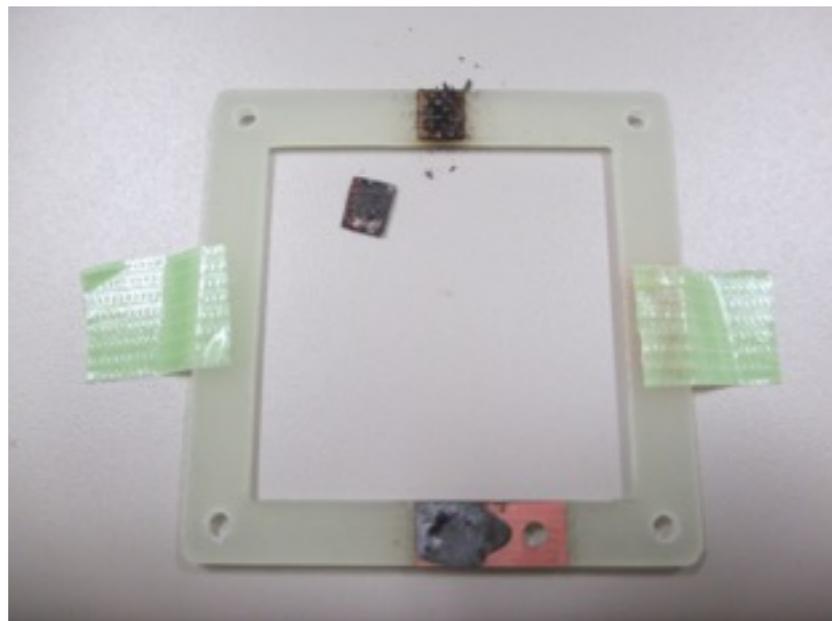
ワイヤー中心から200 μ mの範囲を拡大



SUSとCuの差はワイヤーとフレームの位置関係の違いによる

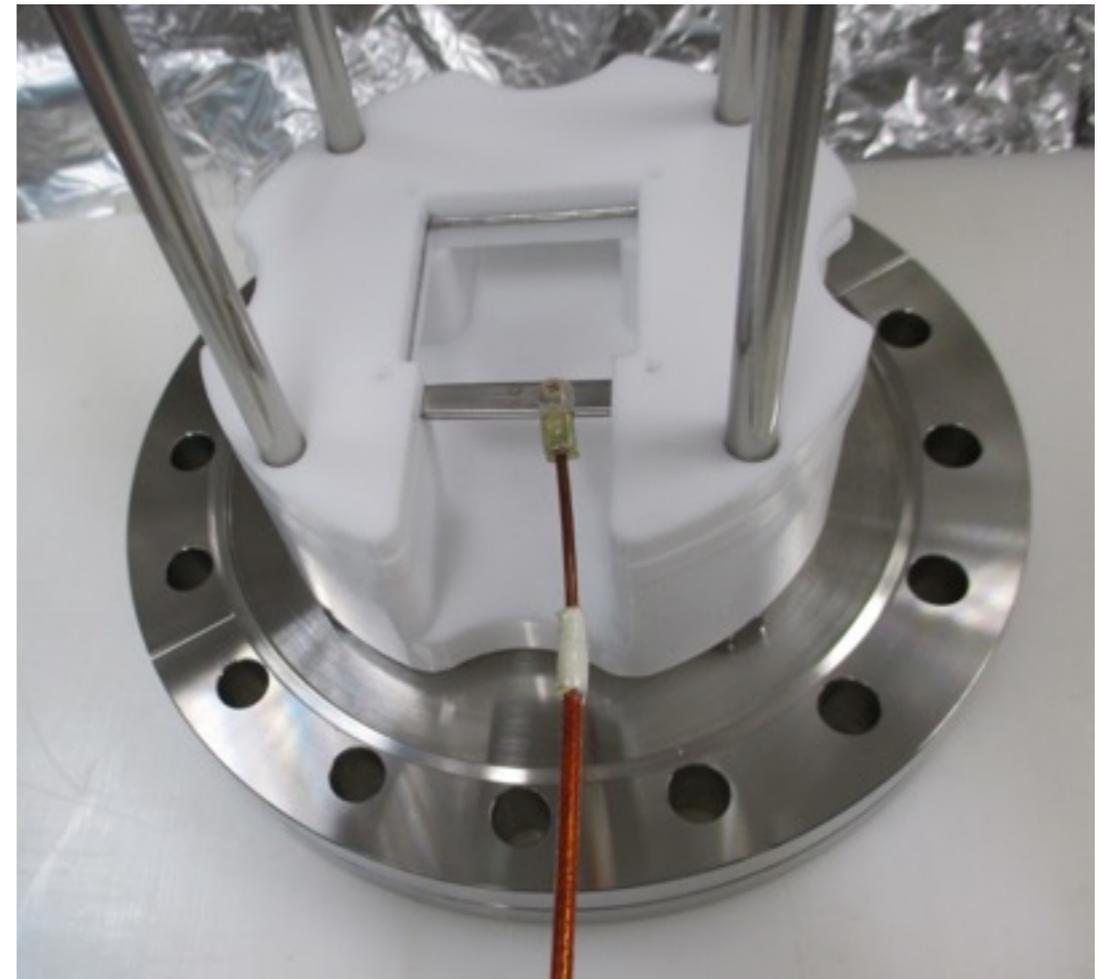
ワイヤーのはんだ付け

- ・ ワイヤー付近に円形の高電場をつくるため、ワイヤーをたるまないように張る必要がある
- ・ ヤニは液体Xe中で不純物となるため、高真空用はんだを使用
- ・ 5円玉(3.75g)をワイヤーの先にくくりつけて垂らし、ワイヤーに張力がかかった状態ではんだ付けする
- ・ 現在のはんだ付けを行っている
- ・ 難点：はんだ付けの際ガラスエポキシの銅箔の接着部分が焦げる
銅のフレームにはんだが付きにくい



大気中HV試験

- ・ ワイヤーが溶接されているSUSの電極を使用
 - ・ 大気中で電極に高電圧を印加し、放電が起こるかどうかを確認
 - ・ 結果：放電は起こらず、6kVまで印加できた
-
- ・ 今後、銅とガラスエポキシ電極についても完成次第大気中HV試験をする

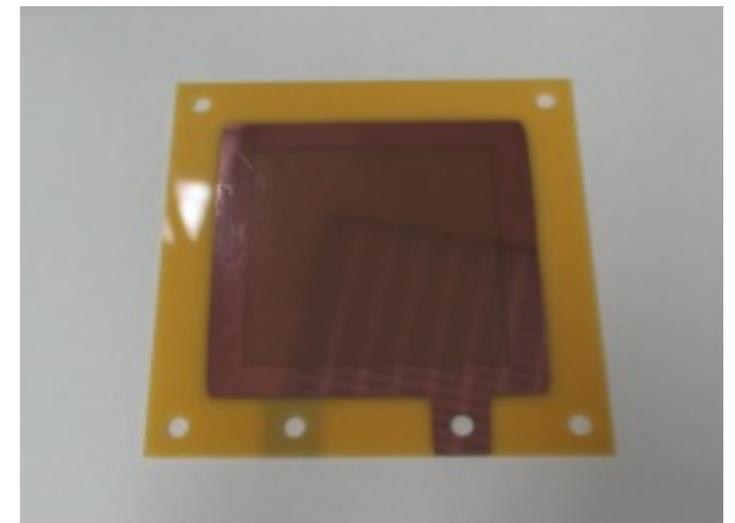


まとめ

- ・ 液体Xe中でのS2の確認に向け、ワイヤーを用いた電極を開発中
- ・ シミュレーションで検出器内に生じる電場を確認した

今後の展望

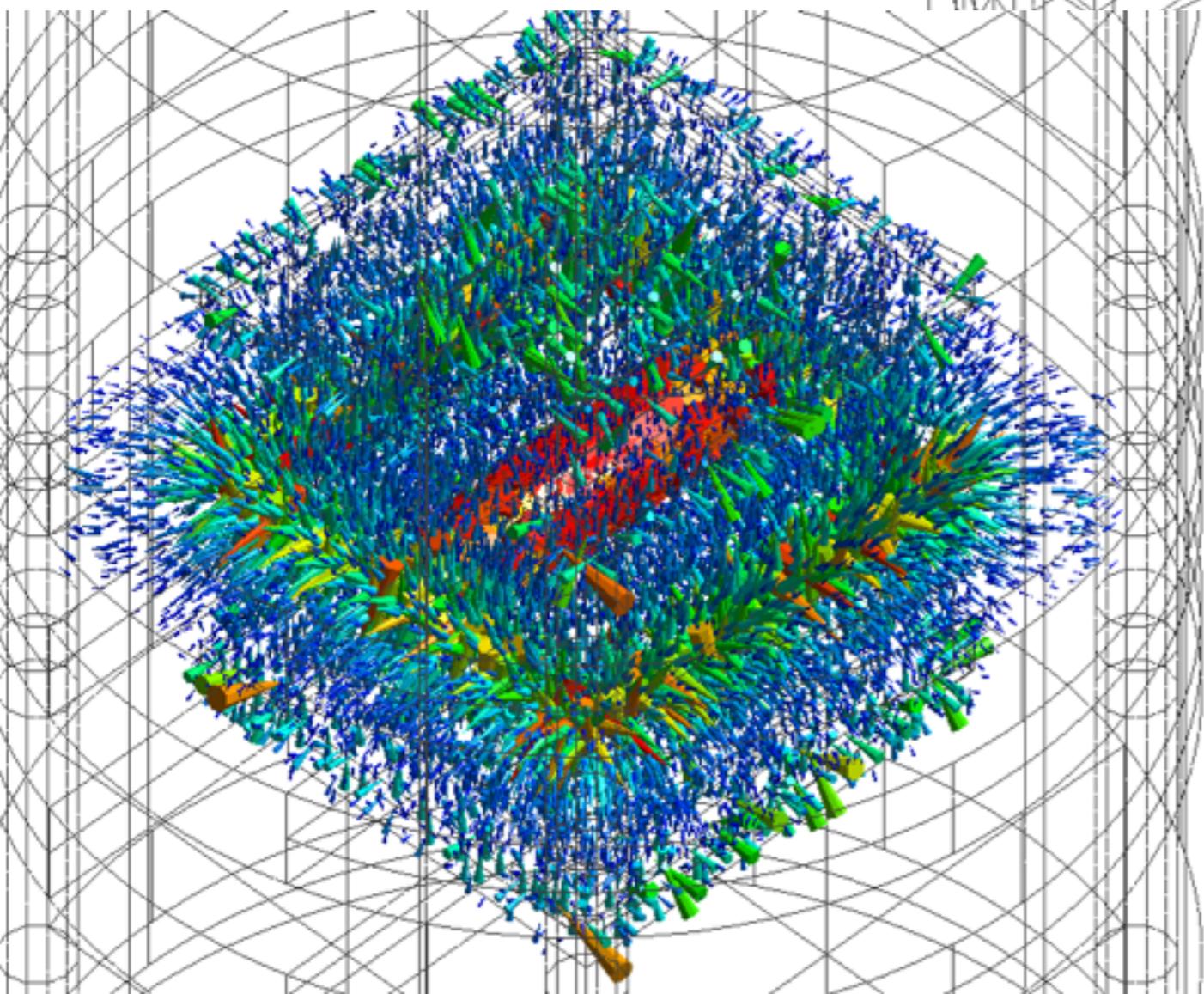
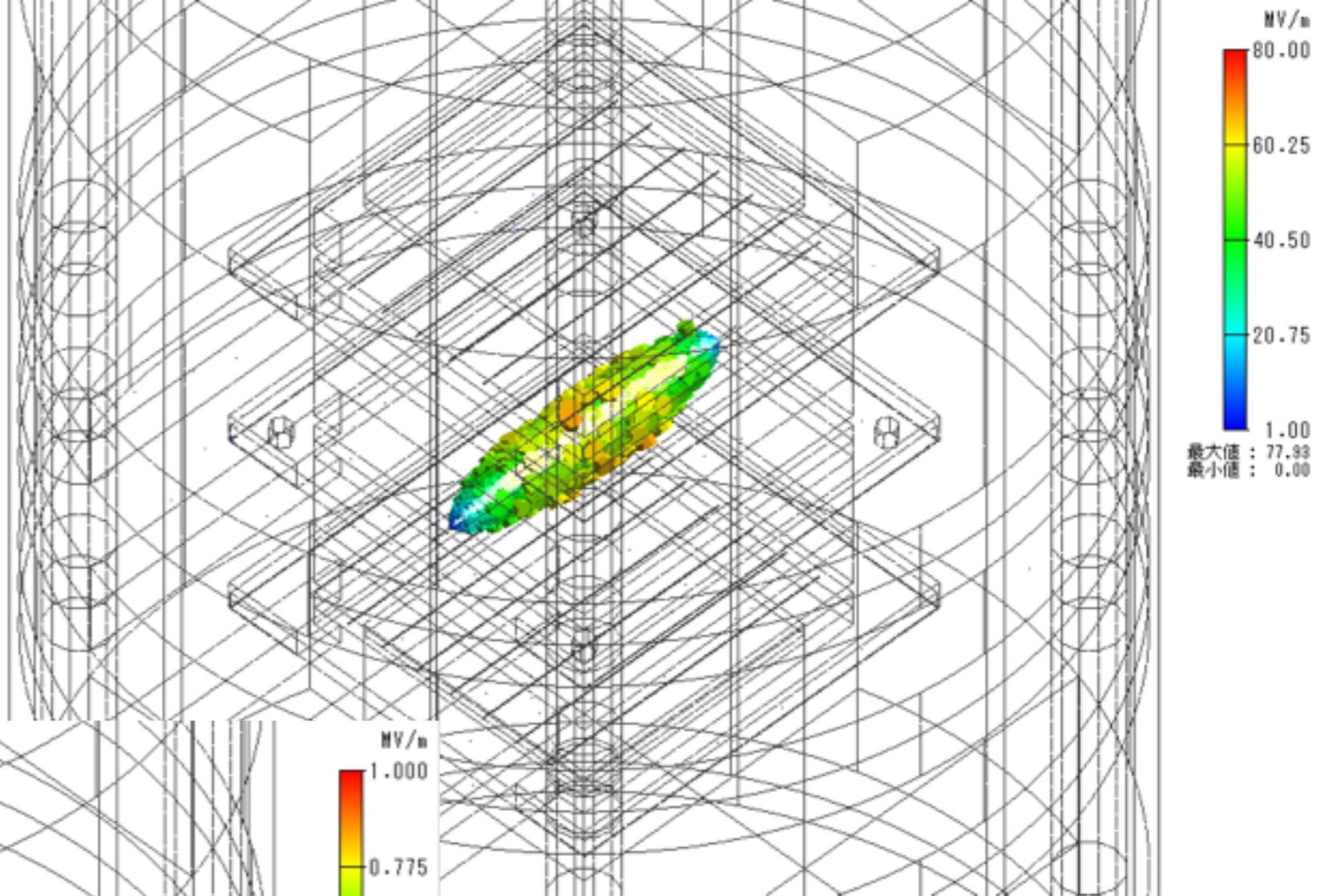
- ・ フレームにワイヤーをはんだ付けする
- ・ ワイヤー電極を用いてガスXe中、液体Xe中でのS2確認
- ・ S2発生に必要な電場のしきい値、および発光量を求める
- ・ XMASSへの電極の導入の考察
- ・ より耐電圧性のある新しいGEMを用いて、GEMによるS2発光の検証を続ける



新GEM PEG3C

backup

シミュレーションでの 電場ベクトル



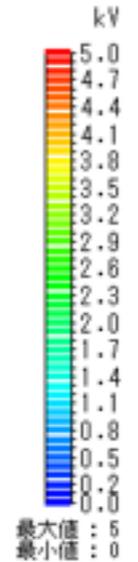
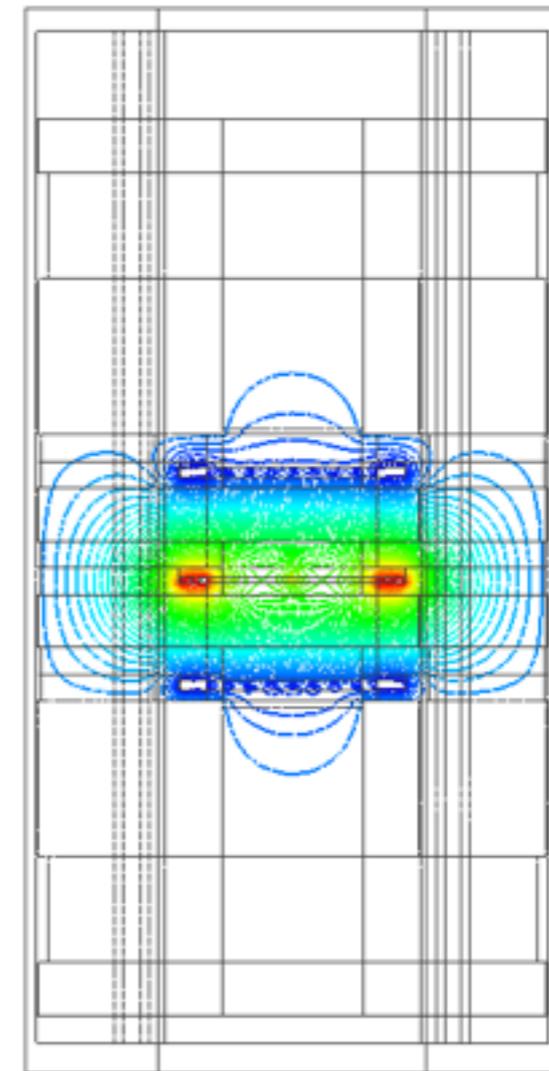
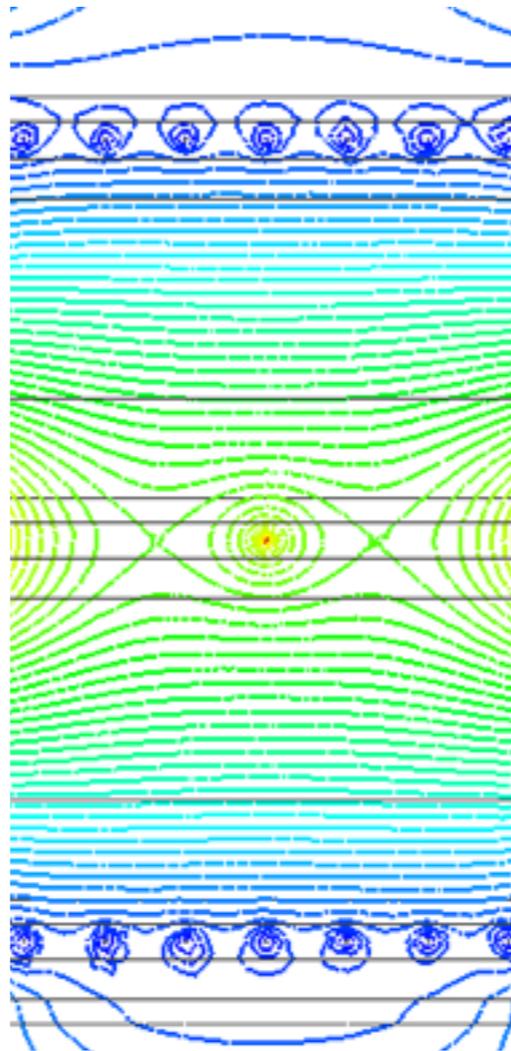
表示範囲

10kV/cm - 800kV/cm

表示範囲

1kV/cm - 10kV/cm

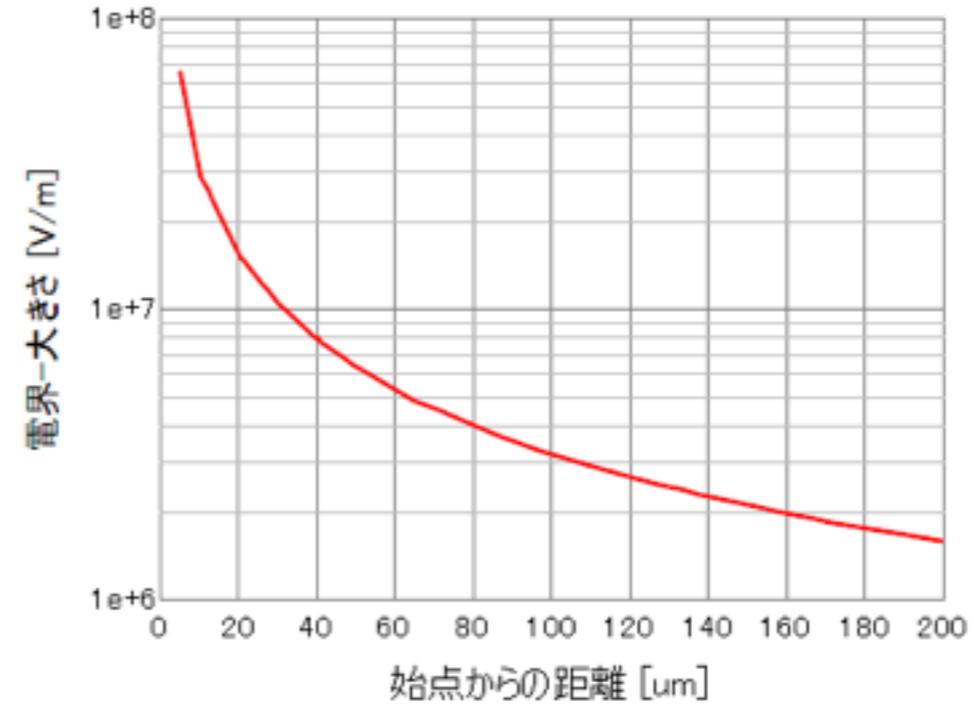
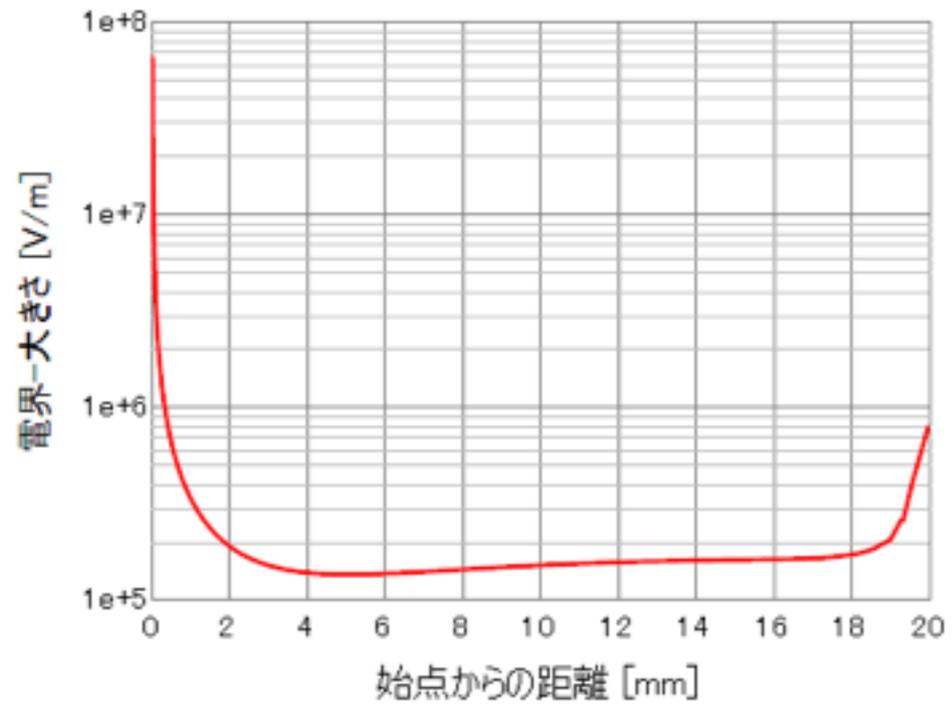
SUSに5kV印加時 シミュレーション結果



全体寸法 : 200 mm

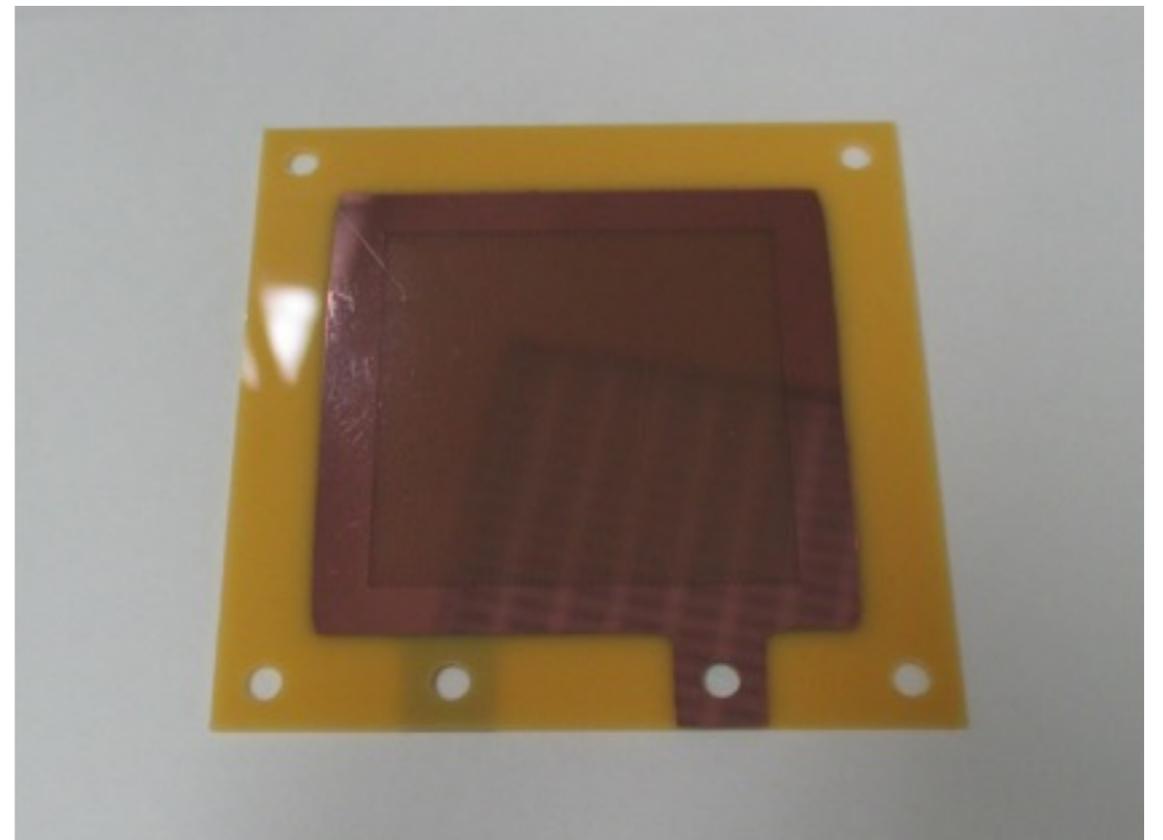
電界-大きさ

電界-大きさ



新しいGlass GEM

- ・ 材質をPEG3(現在)→PEG3C に変更
- ・ PEG3C : PEG3を熱処理してセラミックにしたもの
- ・ 現在のものよりも高電圧を印加できる
- ・ ケーブルを安定して接続するため穴を大きくしている



先行研究1 S2しきい値

S2の発光量 L

- 液体Xe中での比例計数管の相対発光量

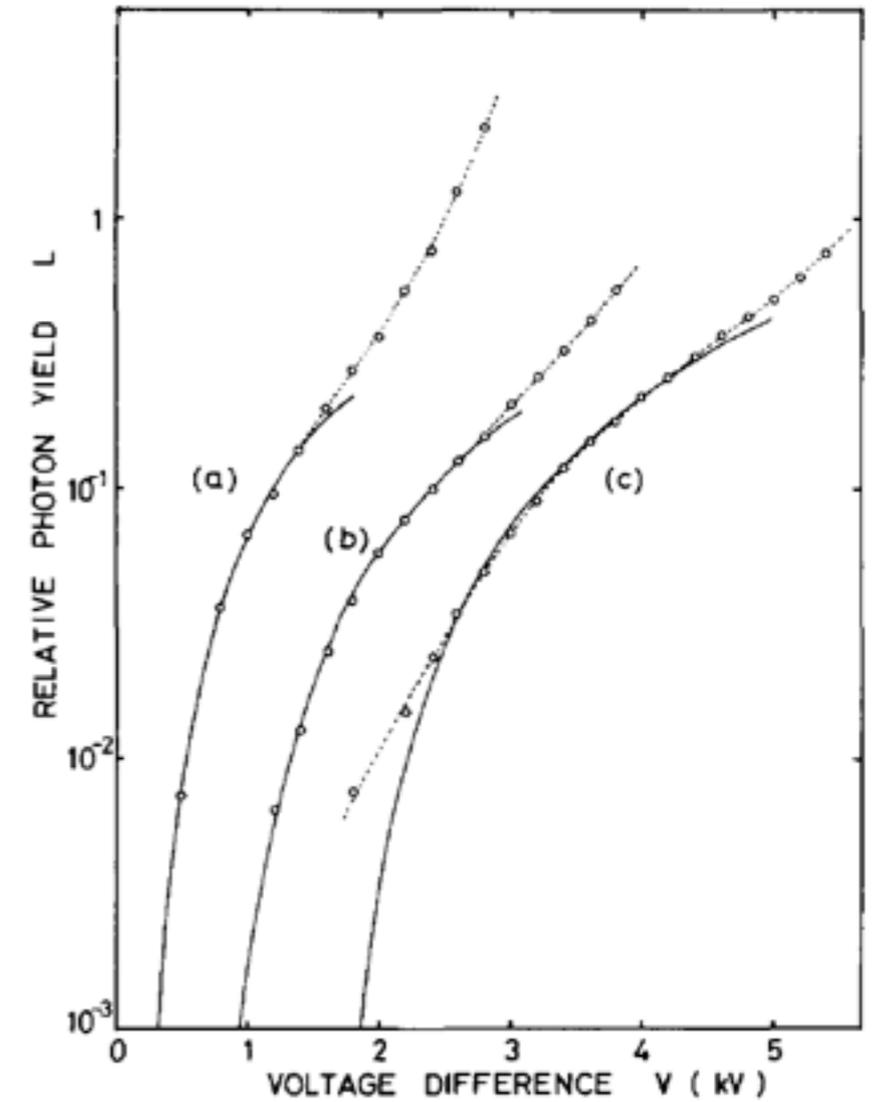
$$L = Br_1 \left[A + E_s \left(\ln \frac{E_s}{A} - 1 \right) \right]$$

A : S2発生に必要な電場のしきい値

B : 定数

r_1 : ワイヤー半径

E_s : ワイヤー表面での電場の強さ



電圧[kV]

先行研究2 S2しきい値

• $\Delta N_e (\Delta N_\gamma)$: 電子が Δx 進む際に発生する電子数(光子数)

θ : fit parameter

E: 電場の強さ

x: 電子の位置

V_A : anode-gate 電位差

d_w : anode ワイヤー直径

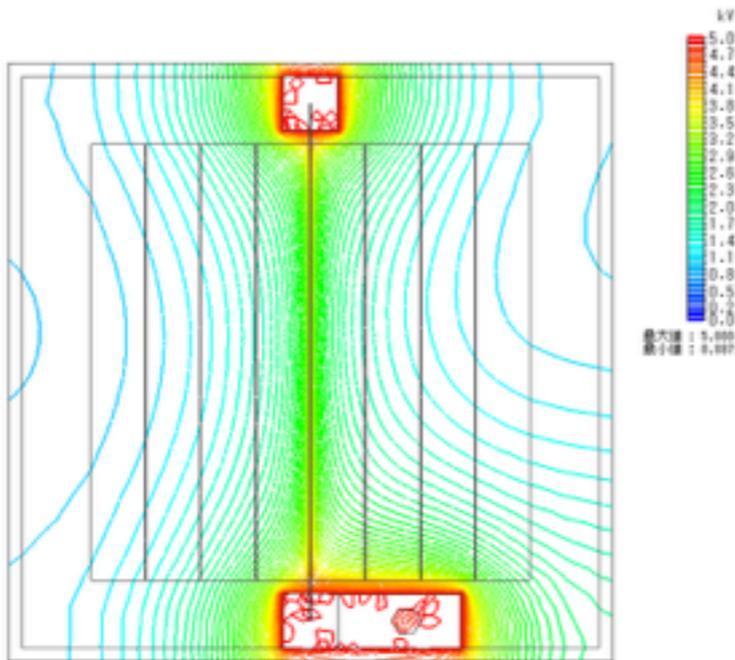
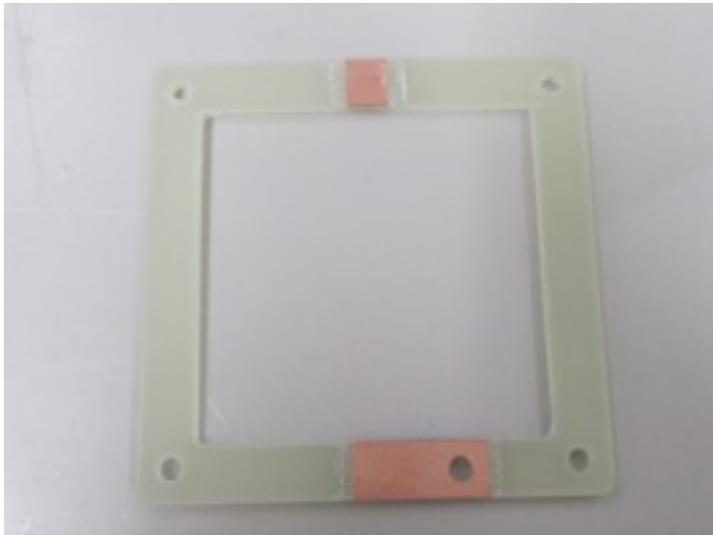
$$\Delta N_e = N_e \theta_0 \exp\left(-\frac{\theta_1}{E(\vec{x}, V_A, d_w) - \theta_2}\right) \Delta \vec{x},$$

$$\Delta N_\gamma = N_e \theta_3 (E(\vec{x}, V_A, d_w) - \theta_4) \Delta \vec{x},$$

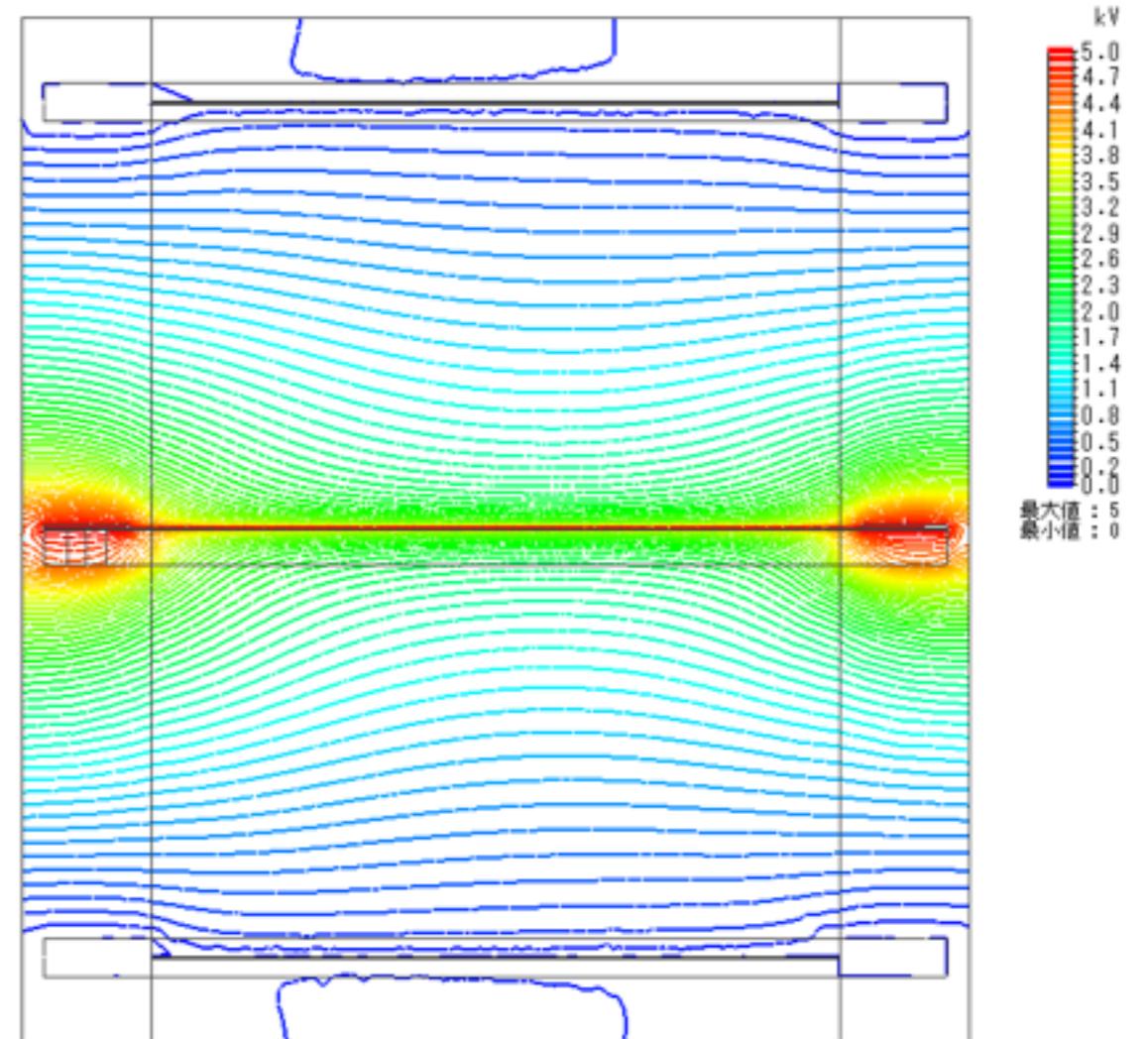
S2 = ΔN_γ を全drift path で積分したもの

parameter	10 & 5 μm	only 10 μm	only 5 μm
θ_0 : charge gain factor [$1/(\mu\text{m}\cdot e^-)$]	0.80 ± 0.10	1.15 ± 0.15	1.46 ± 0.02
θ_1 : slope in charge gain [kV/cm]	242 ± 45	561 ± 119	298 ± 1
θ_2 : threshold of charge mult. [kV/cm]	725 ± 48	586 ± 47	750 ± 1
θ_3 : S2 gain factor [PE/(kV/cm $\cdot\mu\text{m}$)]	16.6 ± 1.1	13.3 ± 0.4	17.9 ± 3.4
θ_4 : threshold of S2 [kV/cm]	412 ± 10	399 ± 7	416 ± 13
χ^2/ndf	125/63	71.4/42	19.9/16
θ_3 : S2 gain factor [$ph/e^-/(\text{kV/cm}\cdot\mu\text{m})$]	$(2.09^{+0.65}_{-0.47}) \times 10^{-2}$	$(1.68^{+0.51}_{-0.36}) \times 10^{-2}$	$(2.26^{+0.80}_{-0.65}) \times 10^{-2}$

ガラスエポキシ基板(一部銅箔)



全体寸法 : 40 mm



全体寸法 : 40 mm