

2020年 6月 2日 (火)

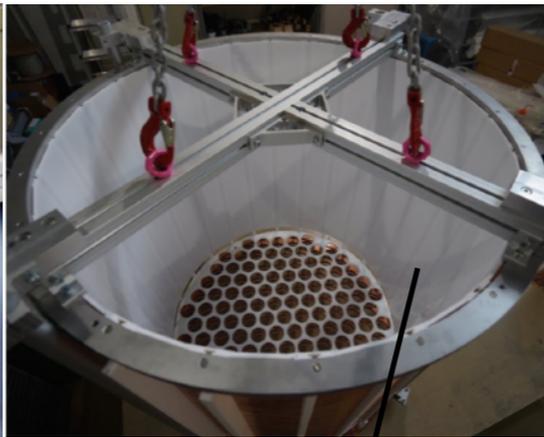
新学術領域「地下宇宙」合同研究会

# 高抵抗薄膜を用いた新たな液体キセノン TPCの開発

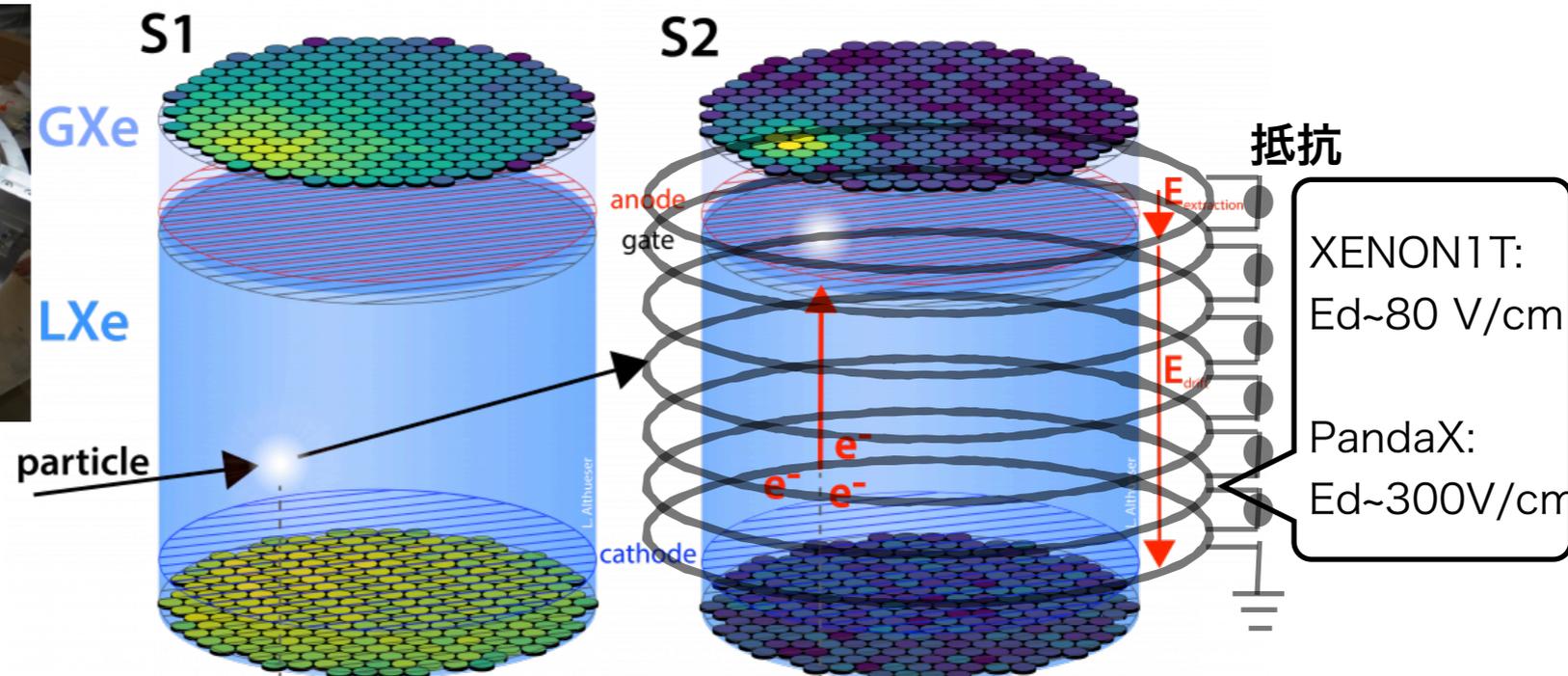
名古屋大学 理学研究科 山崎里奈

# LXeを用いた暗黒物質探索

## 検出器と検出原理



テフロン  
銅リング



XENONnT実験で使用されている検出器の概略図

### シンチレーション光

暗黒物質がキセノン原子核を反跳し、発生したシンチレーション光( $\lambda=175\text{nm}$ )を検出する。

→検出器内部に貼られたテフロンによってシンチレーション光を反射させ、反射を繰り返すことで検出器の上部と下部にあるPMT(光電子増倍管)によって検出(S1)

### 電離電子

暗黒物質がキセノン原子核を反跳し、エネルギーを得たキセノン原子が近隣のキセノン原子を電離し、再結合を免れた電子を検出する。

→銅リング電極を抵抗分割法でつなぐことによって、検出器内に電場を形成し、検出器上部の気相まで電子をドリフトさせ、気相でさらに高電圧を印加することによってエネルギーを得た電子が比例蛍光を発生し、上部のPMT(光電子増倍管)によって検出する。(S2)

# LXeを用いた暗黒物質探索における 検出器の課題

## • 銅リングを用いた抵抗値分割法

段階的な電場形成により一様な電場形成が困難。

## • テフロンの使用

テフロンに含まれるウランやトリウム $(\alpha, n)$ 反応や核分裂による中性子がバックグラウンドとなる。

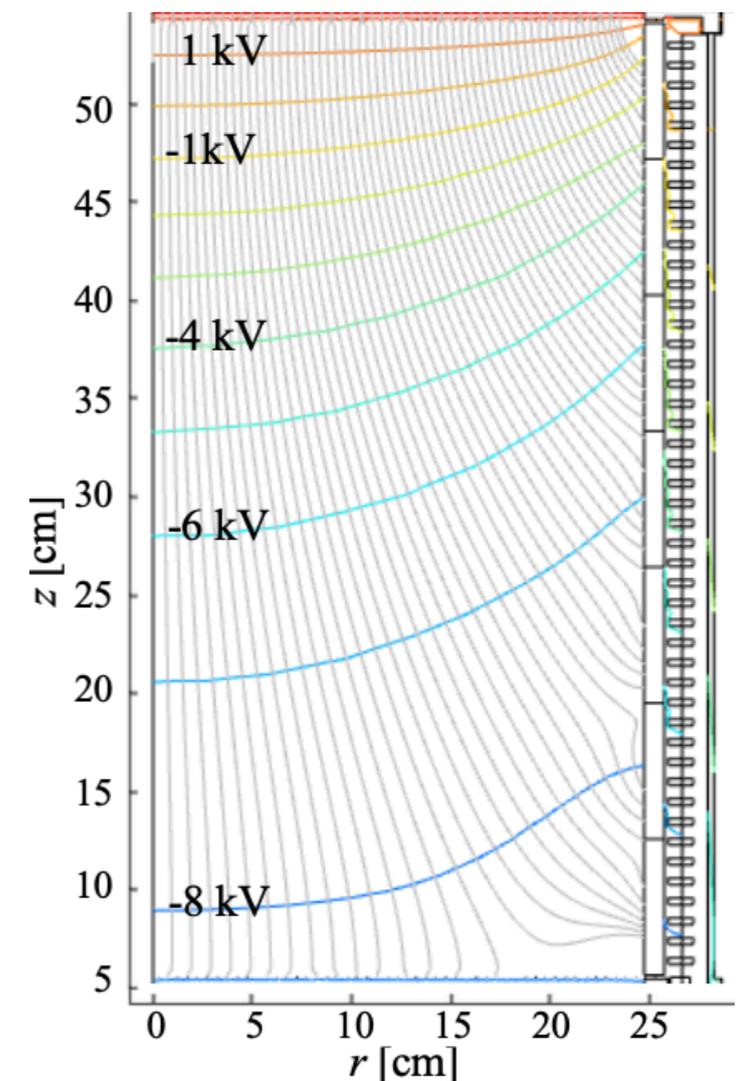
チャージアップによってドリフト電場が歪む。

反射を繰り返すことで検出効率が下がる。(XENONnTでは検出器上部と下部で約3倍近くの検出効率の差)

## • その他部材から発生するRn222

半減期3.8日でPb214となり $\beta$ 崩壊を起こし、バックグラウンド源となる。

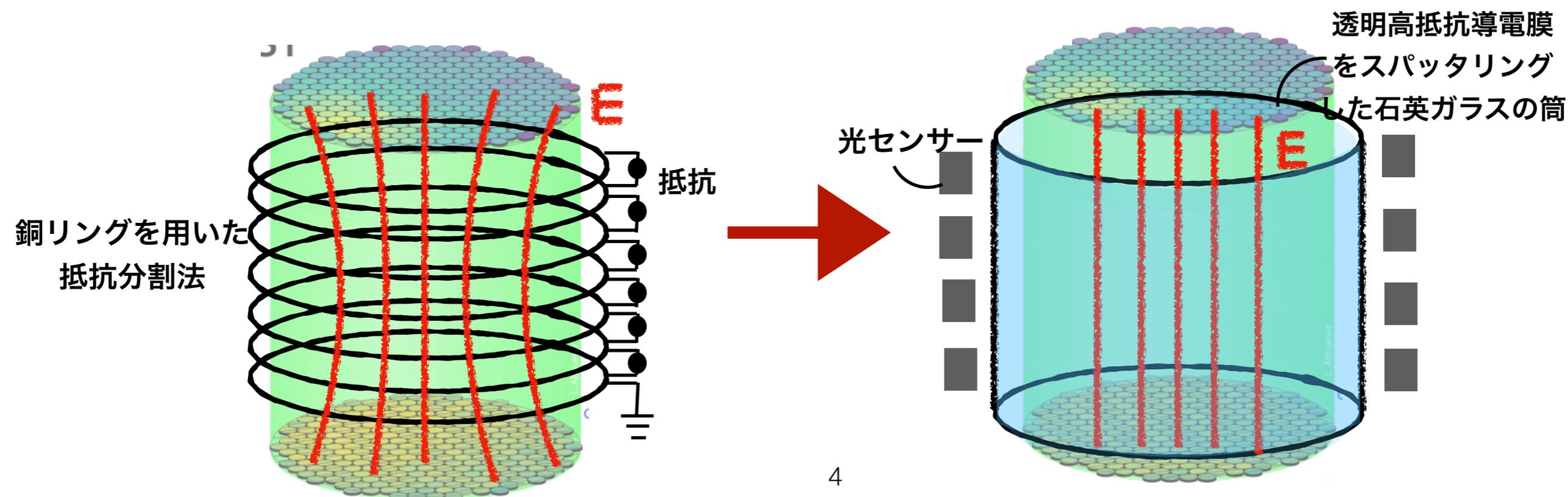
テフロンのチャージアップによってできる電気力線/等電位線



# 新たな電場形成法

## 透明高抵抗導電膜 on 石英ガラス を用いた電場形成

- ・ 石英ガラスに透明高抵抗導電膜をスパッタリングしたものを側面とするこゝで、導電膜に高電圧を印加することで電位が連続的に変化するため、一様な電場形成が可能となり、導電膜が帯電防止としても機能する
- ・ 導電膜、石英ガラスともにS1光に対して透明であれば、反射させることなく直接S1光を側面から検出することが可能。
- ・ 液体キセノン中を側面で仕切ることができ、検出器の部材から発生するラドンや酸素などに由来するバックグラウンド源を遮断できる。



# 透明高抵抗導電膜 要請事項とその候補

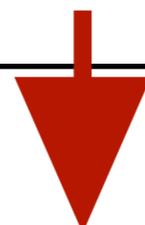
## 暗黒物質探索における透明高抵抗導電膜の要請事項

- ・ シンチレーション光( $\lambda=175\text{nm}$ )に対する透明性を持つこと。
  - ・ 液体キセノン温度(-100度)でシート抵抗値が数十 $\text{G}\Omega/\text{sq}$ から数百 $\text{G}\Omega/\text{sq}$ 程度であり、さらに導電性を有すること。
- …抵抗値が小さすぎると、導電膜上に発生する電流で発熱し、液体キセノンを蒸発させるため。また、電流が発生することで、帯電防止膜として機能をするため、チャージアップの影響を回避できる。

## 透明高抵抗導電膜の候補

- ・ ITO(Indium Thin Oxide)
  - ・ 酸化インジウム( $\text{In}_2\text{O}_3$ )に酸化スズ( $\text{SnO}_2$ )を添加した酸化半導体。
  - ・ 可視光域に対する透明性が高く、導電率も高い。
  - ・ 3.7eV程度のバンドギャップを持つ。

膜厚を10nmと薄くすることでシンチレーション光(7eV)に対して透明にすることができ、さらにITOに $\text{SiO}_2$ などを添加することによって抵抗値やバンドギャップを上げることが可能かもしれない。

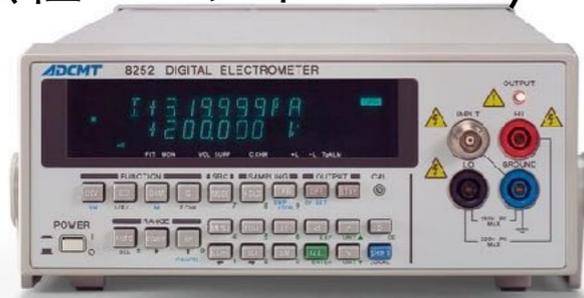


**ITOベースの透明高抵抗薄膜を、ジオマテック社の協力のもと開発を行った。**

# 透明高抵抗導電膜の抵抗値測定 抵抗値の温度依存性の評価

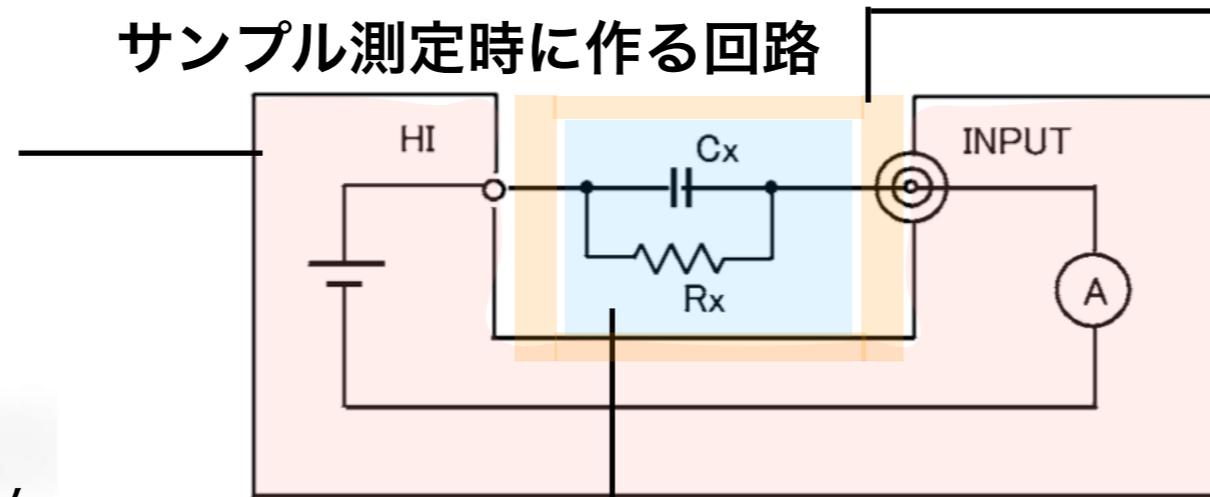
**測定原理** 恒温槽で20°Cから-75°Cまで温度を変化させ抵抗値の温度依存性の評価を行なった。

**Digital Electrometer 8252**  
(株式会社エーディーシー)

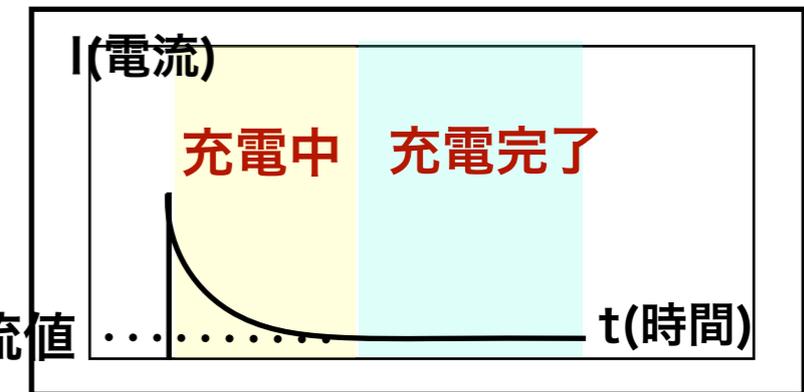
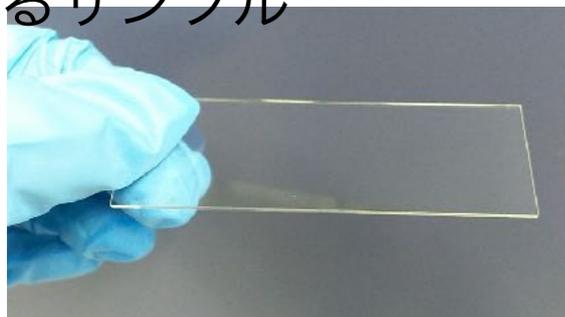


印加可能電圧 +/- 210V  
測定可能電流 1fA~30mA

サンプル測定時に作る回路

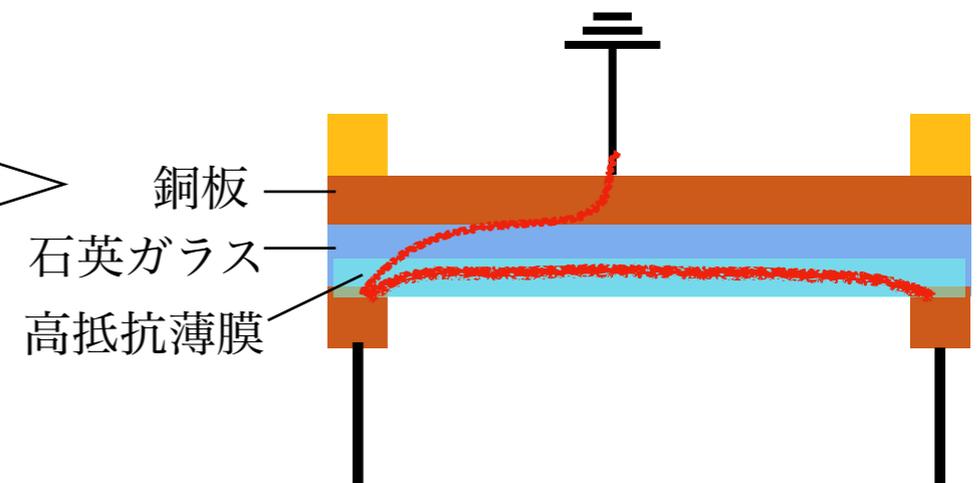


測定するサンプル



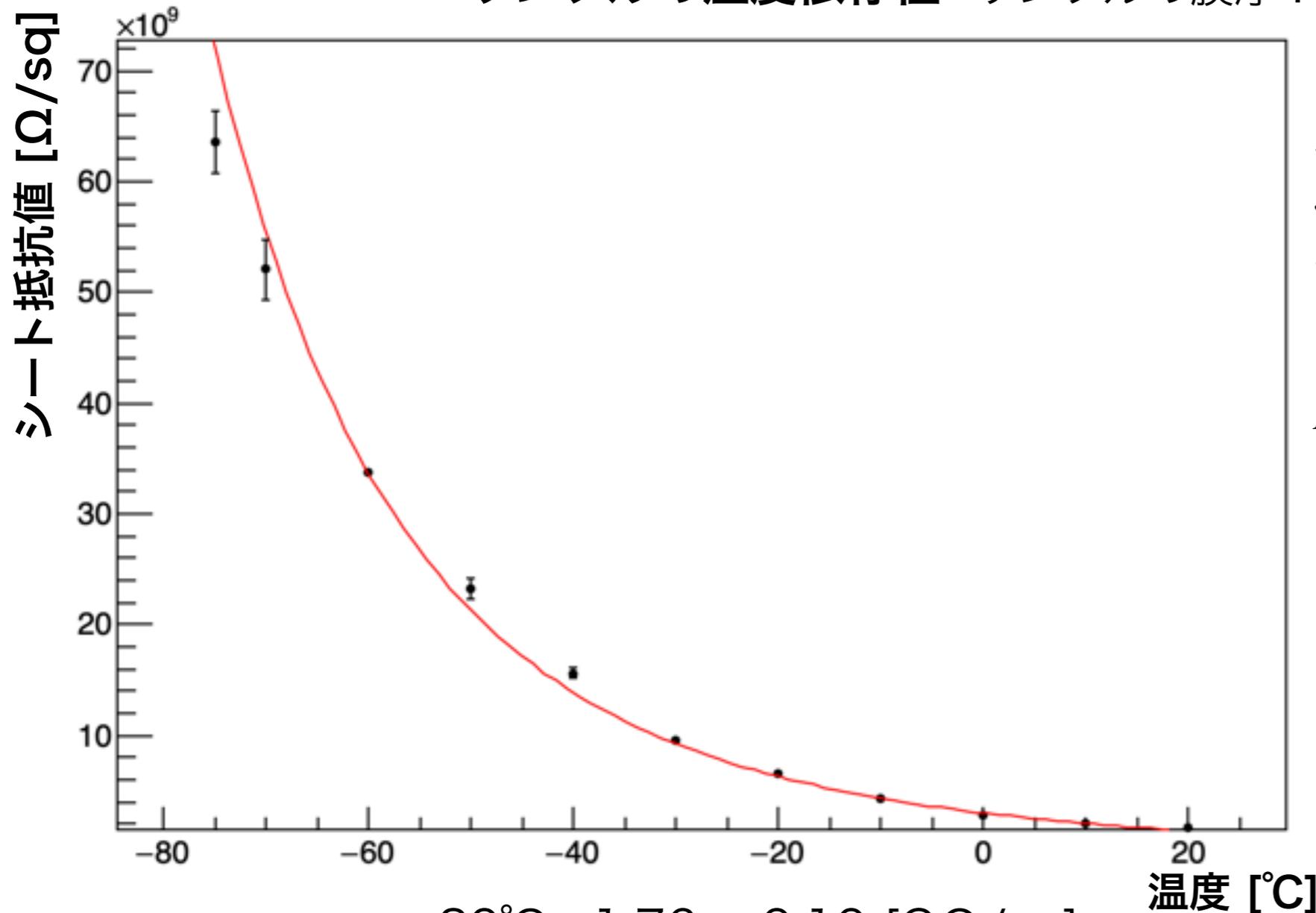
抵抗値計算に使う電流値

- ・ 恒温槽のゆれによる測定電流への影響が出にくい。
- ・ ガード電極を置くことによってサンプルの厚み方向に逃げた電流はグラウンドに落ちる。



# 透明高抵抗導電膜サンプルの評価

サンプルの温度依存性 サンプルの膜厚：～23 [nm] (ジオマテック社測定)



20°C : 1.76 ± 0.10 [GΩ/sq]  
-70°C : 52.04 ± 2.74 [GΩ/sq]

↓  
-100°C予想 : 332.67 ± 71.25 [GΩ/sq]

半導体のキャリア密度の温度依存性の式から導かれるシート抵抗の式

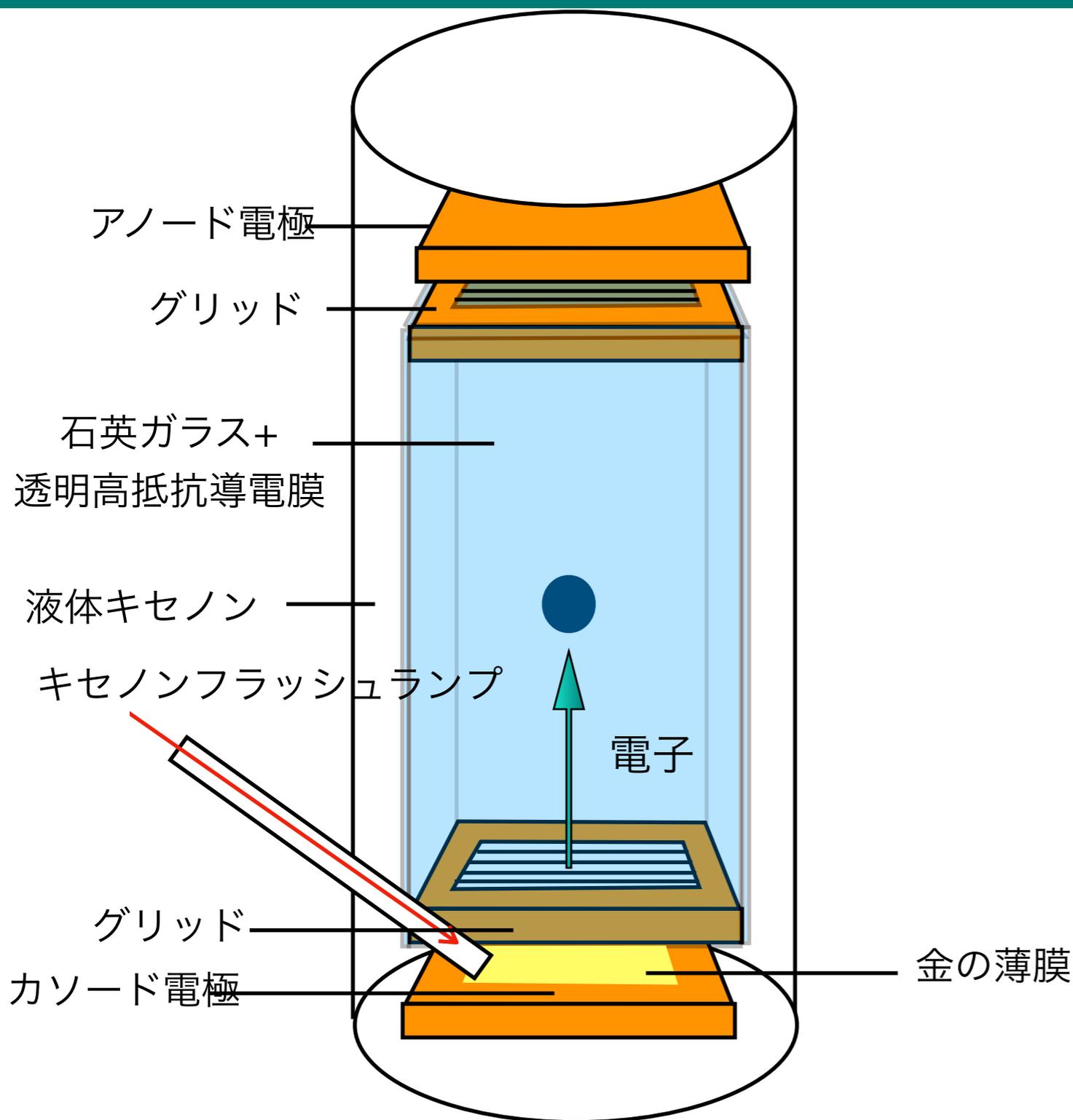
$$R_s \propto T^{-1.5} \exp\left(\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

をもとにフィッティングした。

膜厚を約3倍にすれば -100°Cで約 100 [GΩ/sq]となる。

電子ドリフトの検証には透明性は必要ないので、電子ドリフトの実証の実験と同時進行で最適な透明性になるように調整予定。

# 透明高抵抗導電膜を用いた電子ドリフトの実証



## 透明高抵抗導電膜を使用した 検出器の性能評価法

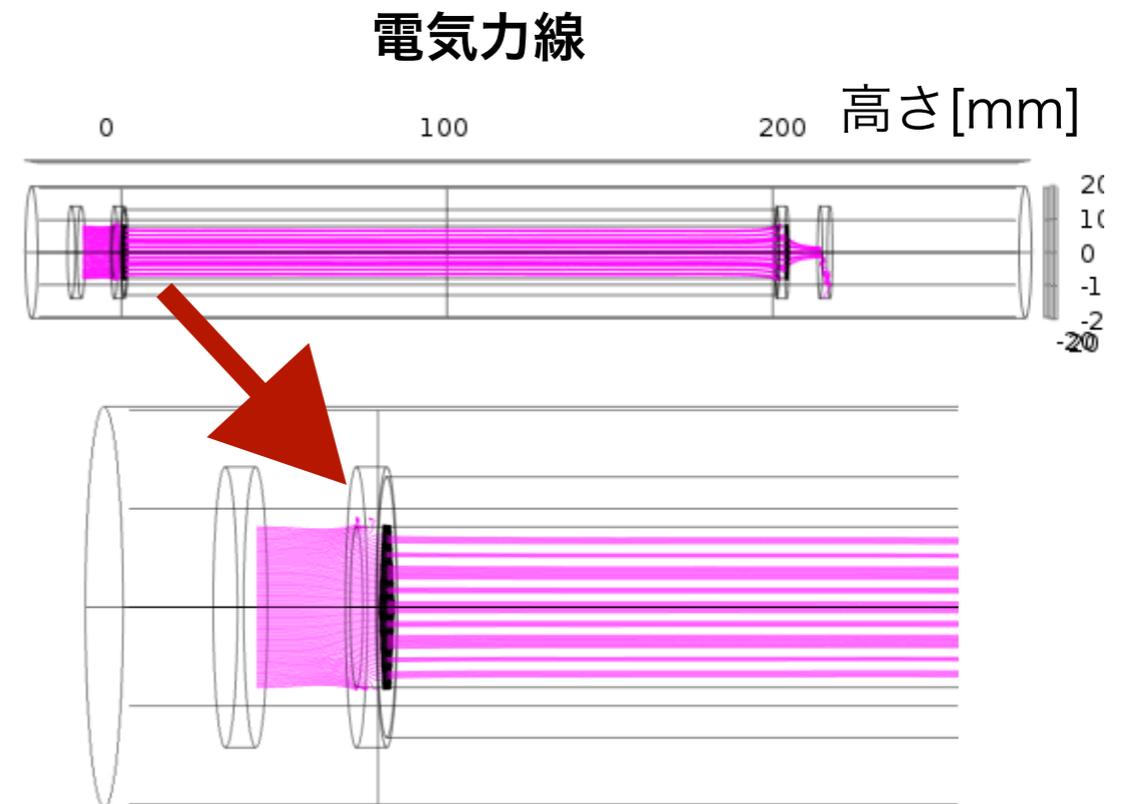
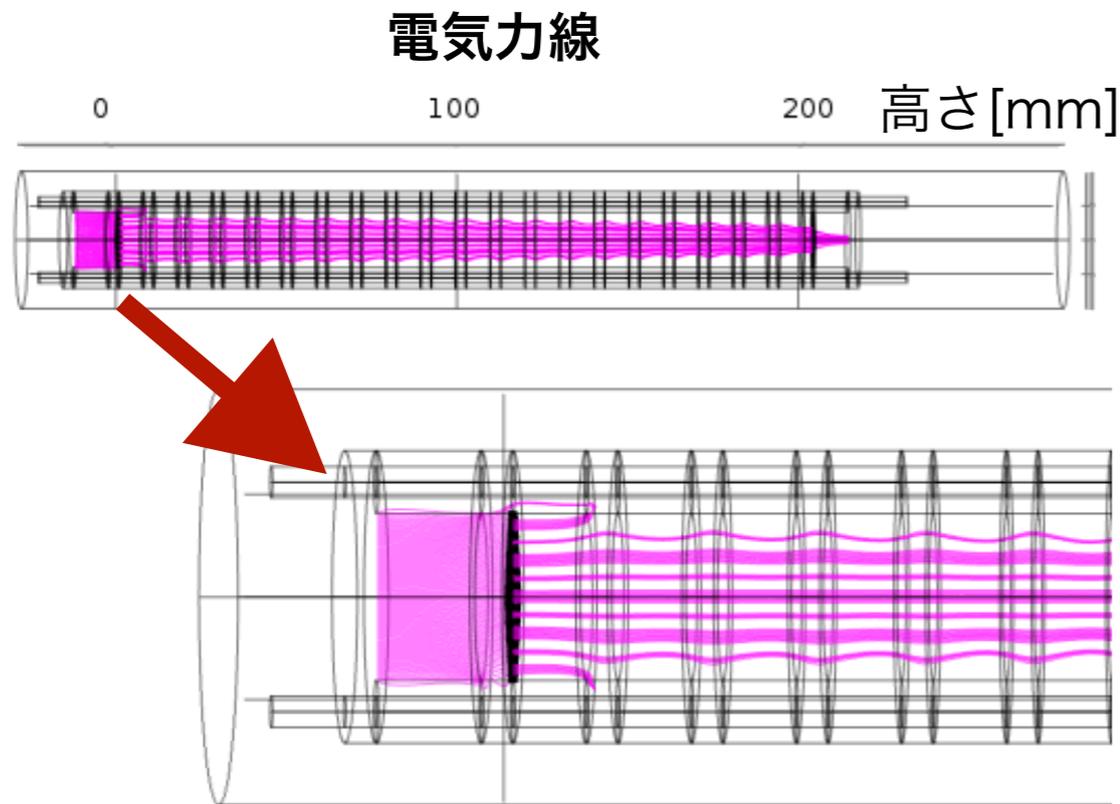
- 1.キセノンフラッシュランプによって特定の金薄膜に光を当て、光電効果によって電子を叩き出す。
- 2.一様な電場によって電子がドリフトされる。
- 3.カソード電極とアノード電極によって電荷を読み出し、比べることで電子ドリフトを評価する。

# 電気力線 COMSOLシミュレーション結果

COMSOL Multiphysics…有限要素法を用いたシミュレーションソフトウェア。

## 従来の銅リングを用いた検出器モデル

## 透明高抵抗導電膜 on 石英ガラス



- ・シミュレーションの結果から、銅リングによる抵抗値分割法を用いた従来の検出器では電気力線歪んでいることが確認された。
- ・高抵抗導電膜による検出器は電場が一様に形成されることで電気力線も直進していることがわかる。

# まとめ

- ・現状の液体キセノンを用いた暗黒物質の直接探査では電場の一様性やテフロンの使用などに関する課題がある。
- ・透明高抵抗薄膜を用いた新たな電場形成法を用いれば、現状の検出器の課題を解決できる。

## 行なったこと

- ・ジオマテック社の協力のもと液体キセノンを用いた暗黒物質探査に最適な透明高抵抗薄膜の開発を行い、性能の評価を行った。
- ・シミュレーションを行い、従来の検出器と透明高抵抗薄膜を用いた検出器を比較して新たな電場形成法では電場がより一様に形成されることがわかった。

## 今後の目標

- ・透明高抵抗薄膜を用いたセットアップを作成し、電子ドリフトの実証を行う予定。

**BACK UP**

# LXeを用いた暗黒物質探索における 検出器の課題

## • 銅リングを用いた抵抗分割法による電場形成

段階的に電位が変わるため、電場の一様性には限界がある。

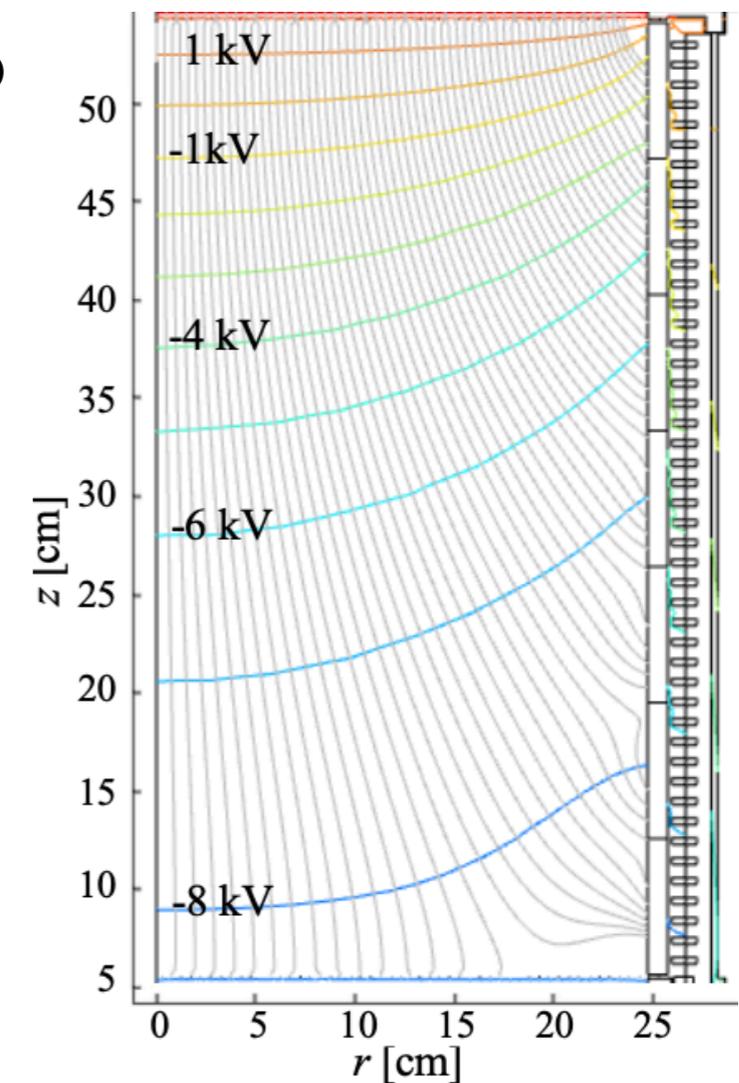
既存の抵抗分割法では、大型化した際に一様な電場を形成するのが困難になる。

## • テフロンの使用

(1) テフロン中に含まれるウラン、トリウムなどの放射線同位体は、 $(\alpha, n)$ 反応や核分裂により中性子を発生し、原子核反跳のバックグラウンドになる。

(2) テフロンは絶縁体であり、チャージアップするため、これによりドリフト電場が歪んでしまうことが、XENON1TやLUX実験にて既に確認されている。

テフロンのチャージアップによってできる電気力線/等電位線



JINST 12 P11022 (LUX collaboration)

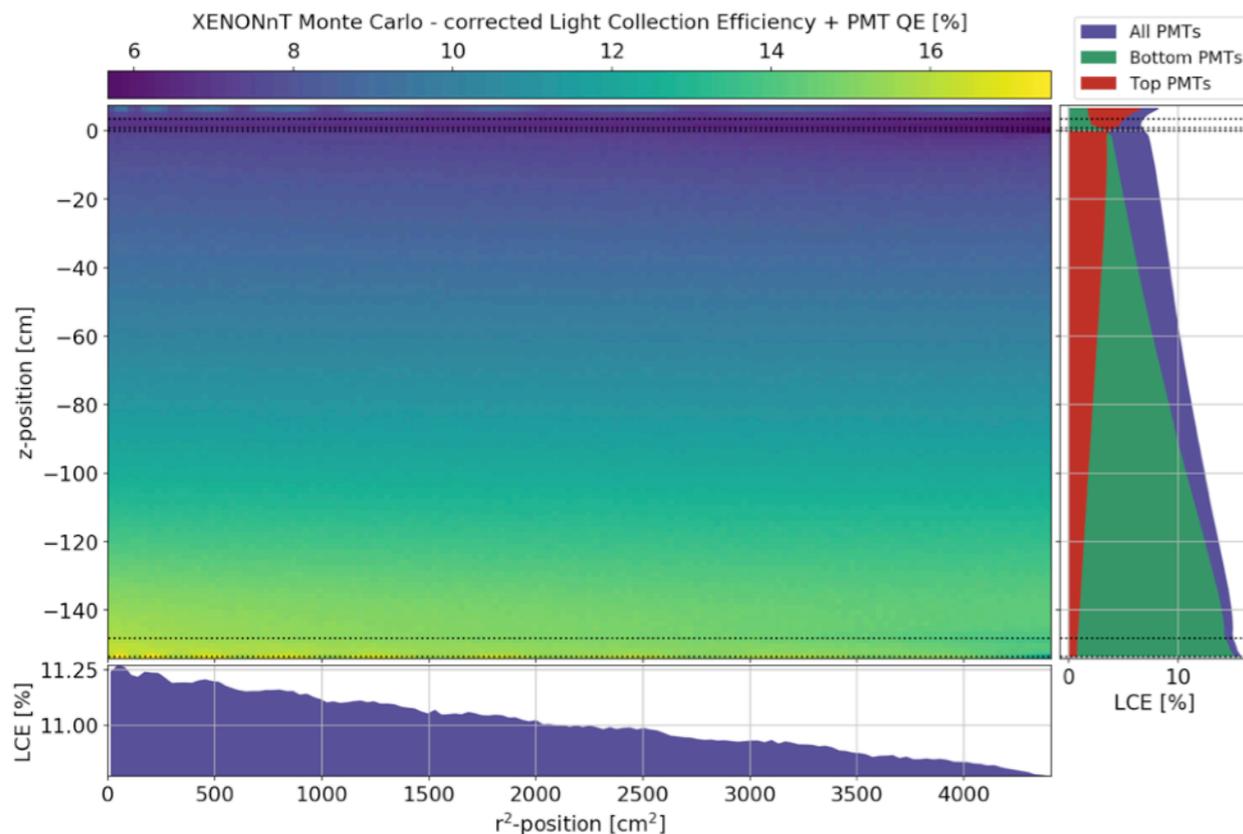
# 検出器の課題

## テフロン上での反射によるシンチレーション光の減衰

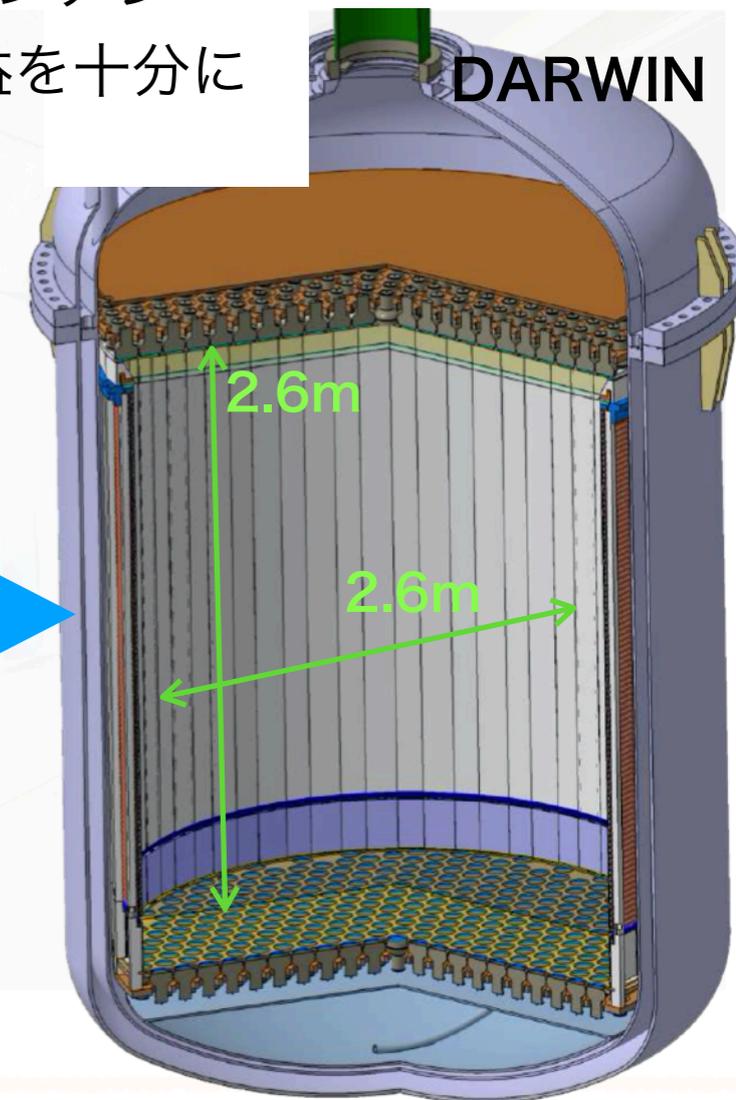
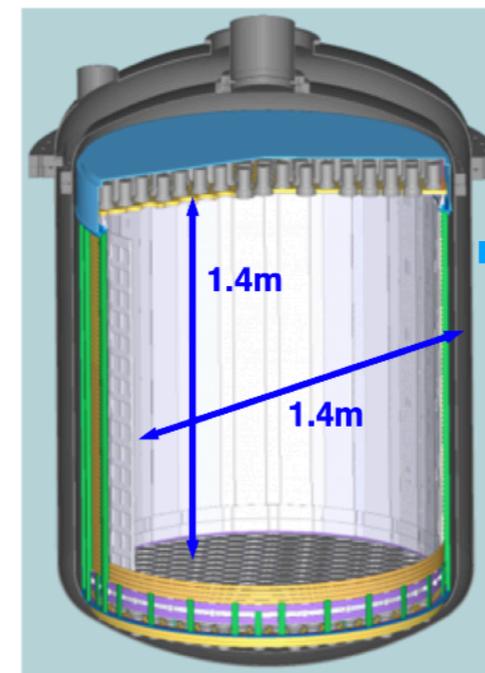
### ・テフロンの使用

(3) 検出器が大きくなると、反射ロスにより検出可能なS1光の光量が下がる

- ・ S1光は液相と気相の境界面で全反射をするため、ほとんどは下部のPMTで検出される。
- ・ そのため、検出器の上部で発生したシンチレーション光はテフロン上で反射を繰り返すことによって最終的に検出できる光量が減少する。
- ・ 将来のLXe検出器(DARWIN実験)は現状の検出器(XENONnT実験)に比べ、高さが約2倍になるが、テフロンの使用によって上部で発生したシンチレーション光を検出することが困難となり、検出器の大型化による利益を十分に受けられない。



XENONnT



# 検出器の課題

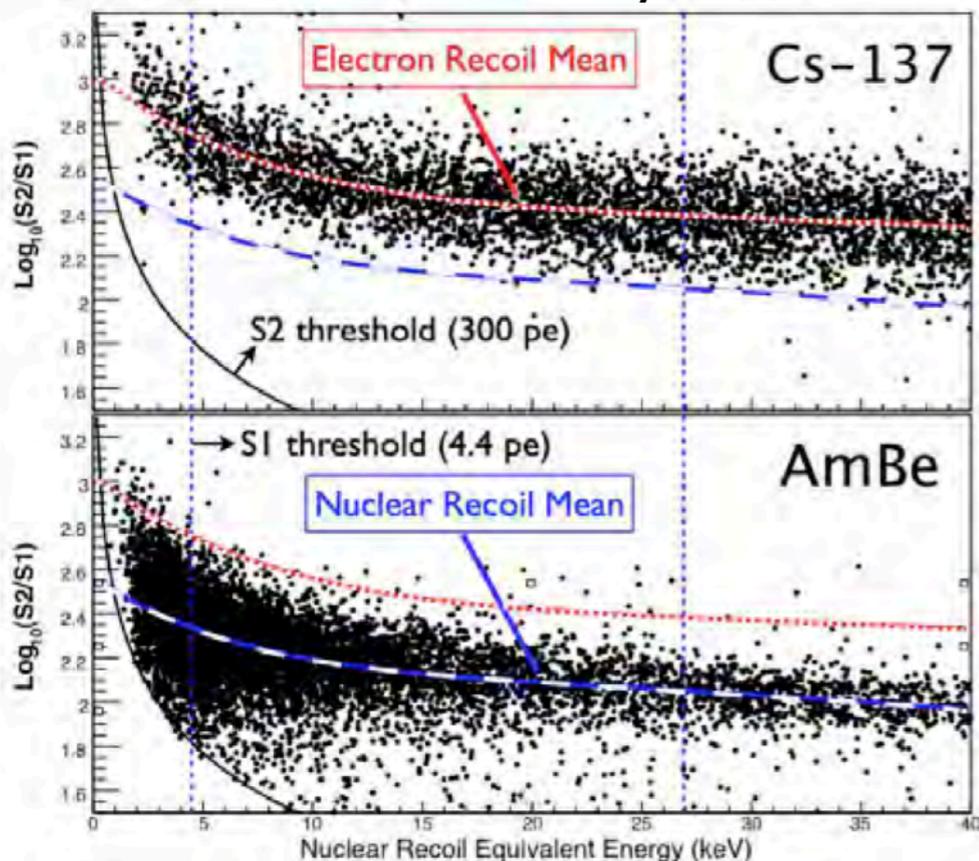
## 部材からのラドン

### ・その他問題点 (部材から湧き出すラドン)

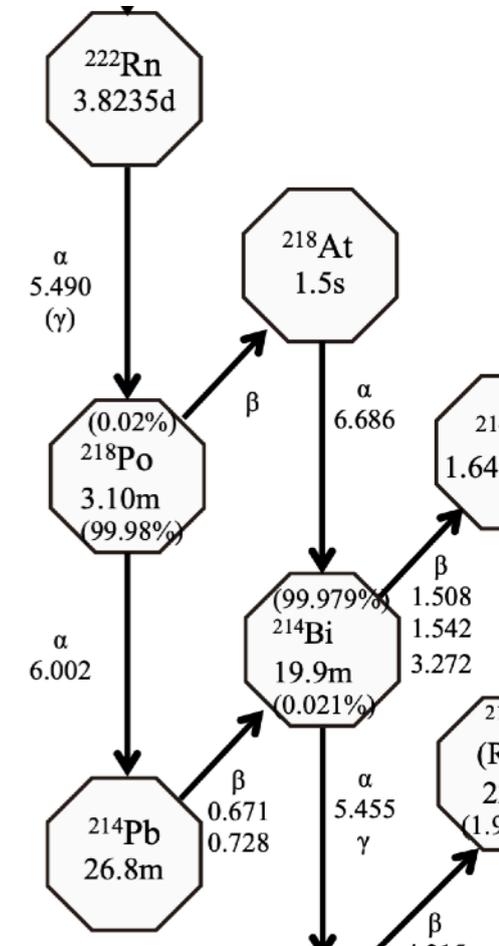
- ・ Rn222は半減期3.8日で崩壊してPb214になり、 $\beta$ 崩壊を起こす。
- ・  $\beta$ 崩壊は電子反跳を起こすが、その $\beta$ 崩壊が大量に起こることによってS2/S1信号比に影響を与えるため、原子核反跳と電子反跳の識別が困難になる。
- ・ 現状(XENONnT実験)8トンの液体キセノンを用いているが、将来(DARWIN実験)50トンの液体キセノンを用いて実験が行われる予定であり、従来の純化装置では純化が間に合わず十分にラドンを取り除けなくなってしまう。

### XENON10

#### 原子核反跳と電子反跳のS2/S1信号比の比較



- ・ 部材から湧き出るラドンが暗黒物質の反応部分に影響を及ぼさない仕組みを作る必要がある。

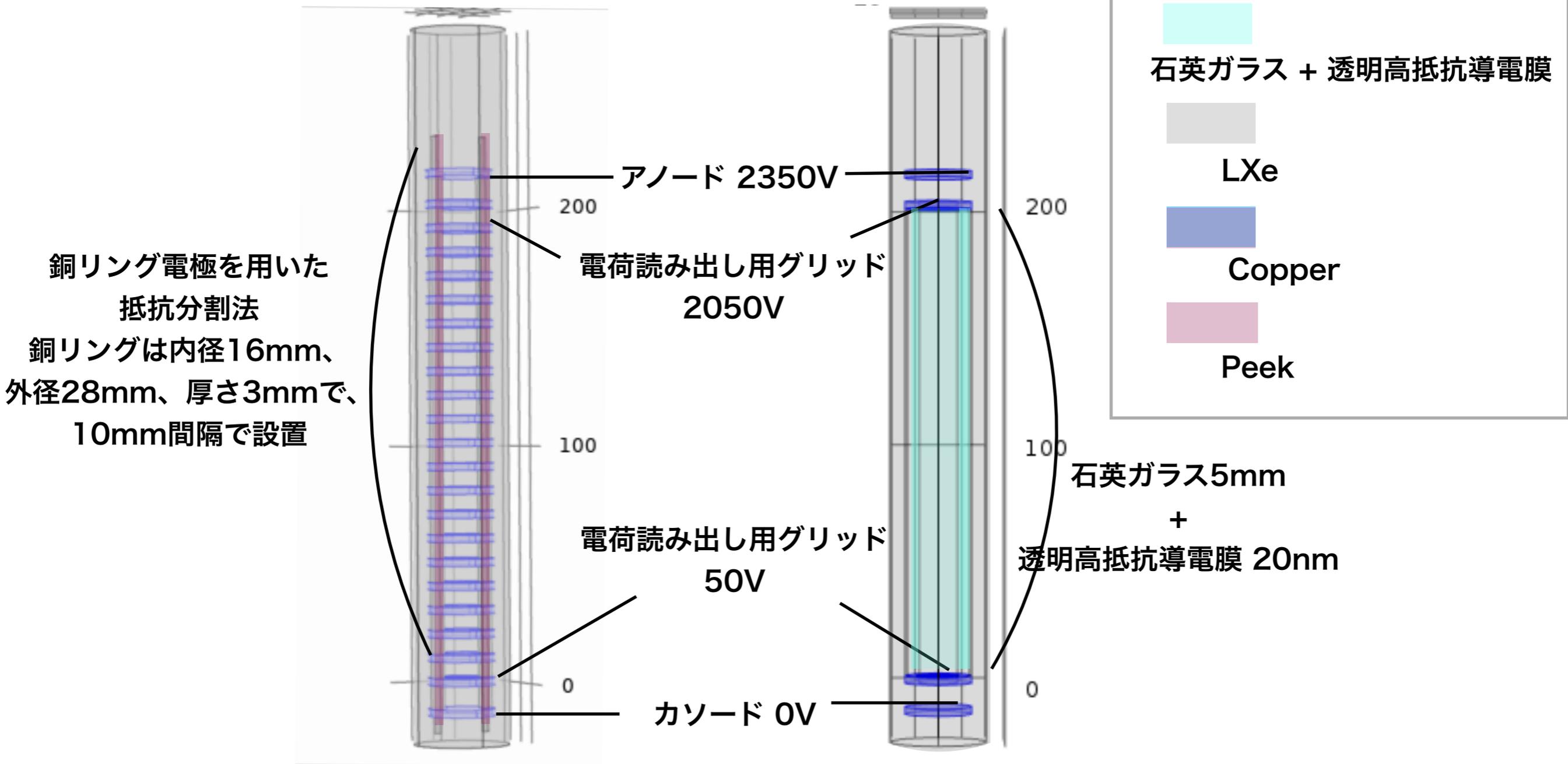


# COMSOLによる電位・電場シミュレーション 検出器セットアップ

COMSOL Multiphysics…有限要素法を用いたシミュレーションソフトウェア。

## 銅リング 検出器

## 透明高抵抗導電膜 on 石英ガラス 検出器

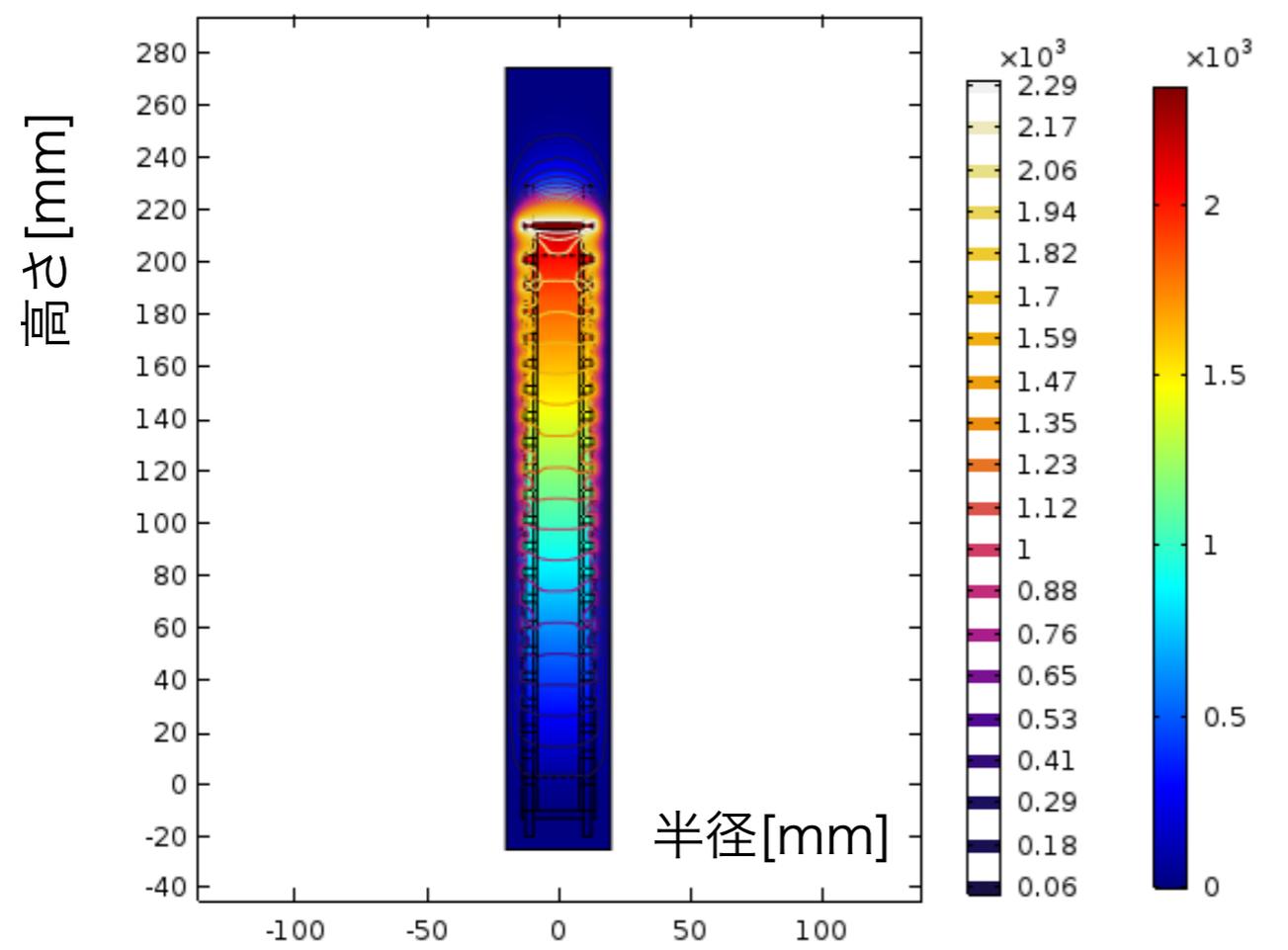


# 電位シミュレーション結果

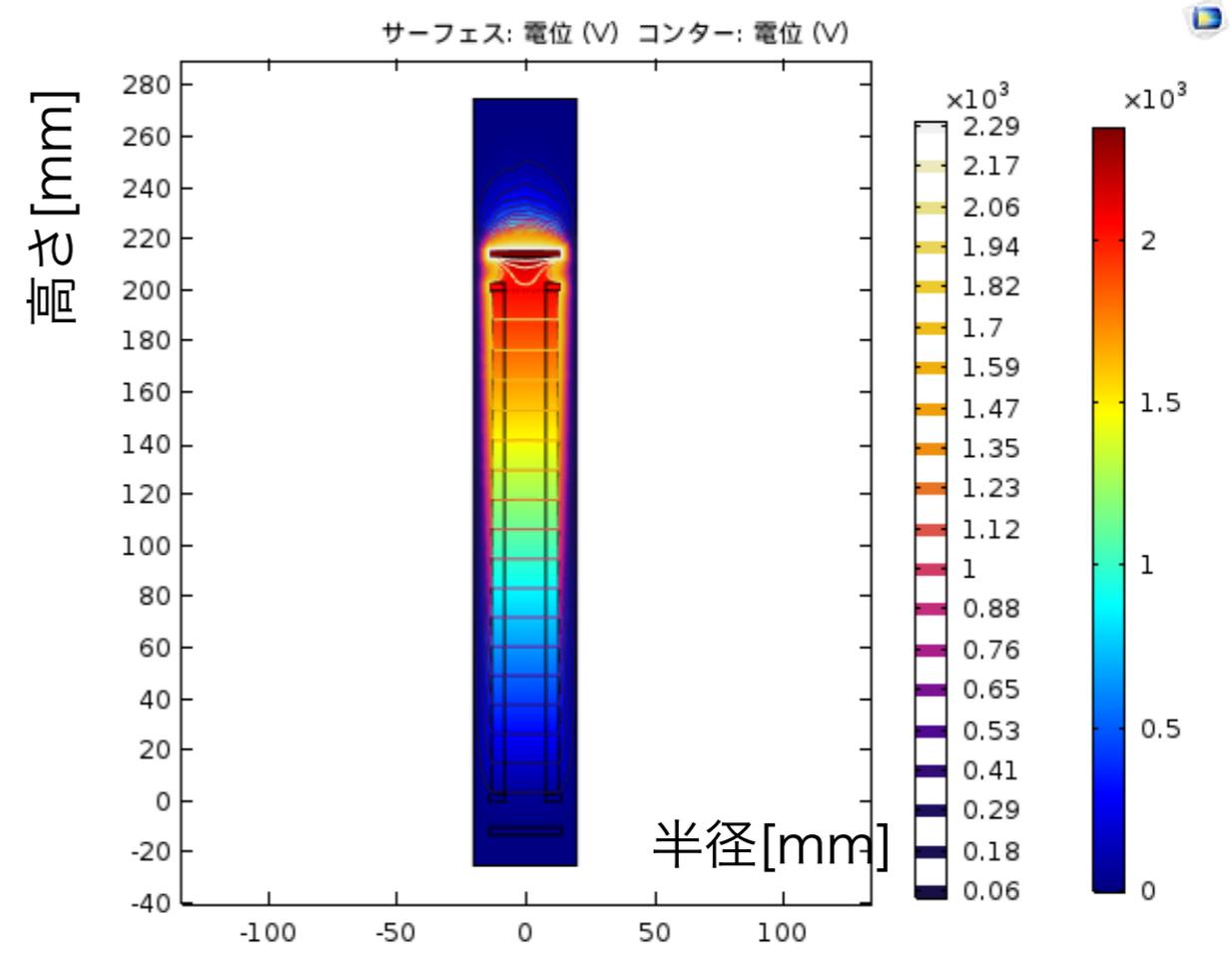
## 銅リングの抵抗分割法を用いた検出器モデル

### 透明高抵抗導電膜 on 石英ガラス

検出器を真ん中で割った時の  
等電位[V]・等電位線[V]分布



検出器を真ん中で割った時の  
等電位[V]・等電位線[V]分布

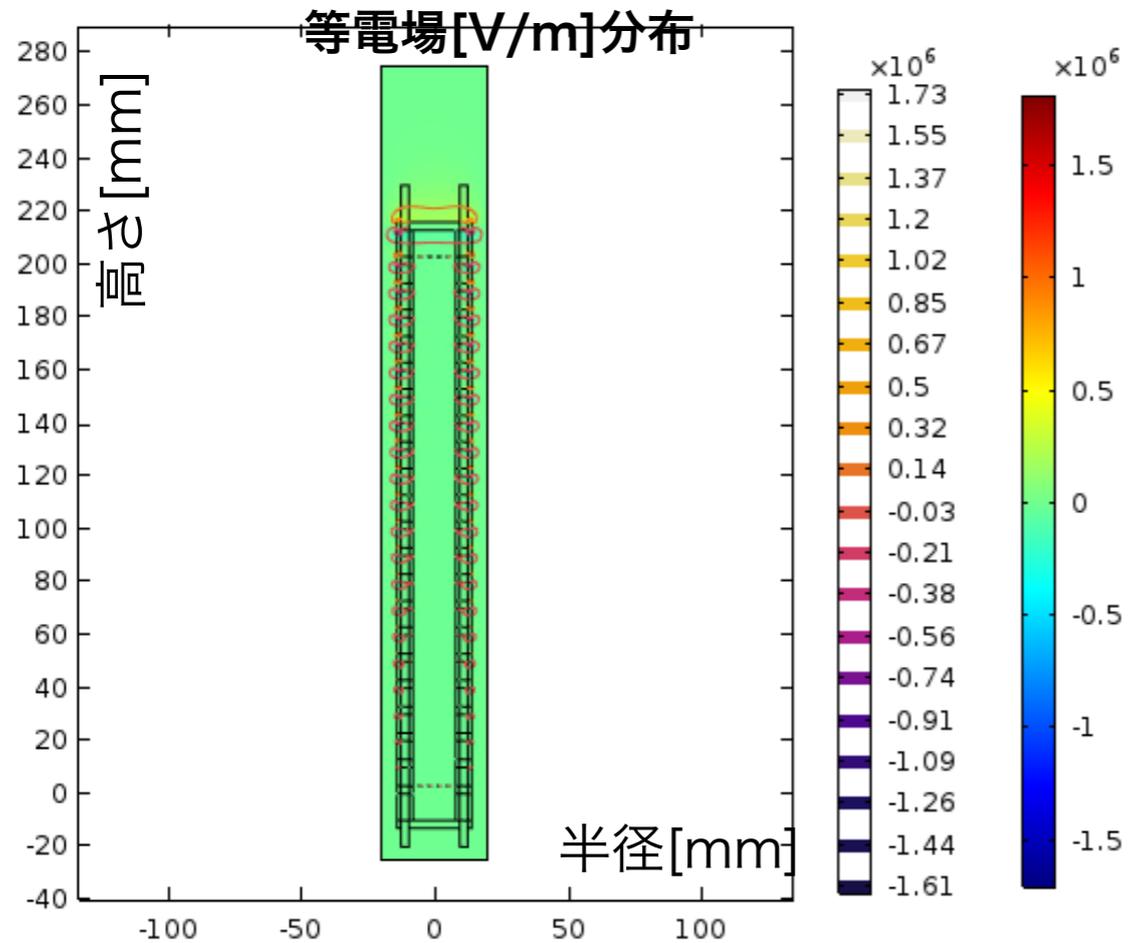


# 電場シミュレーション結果

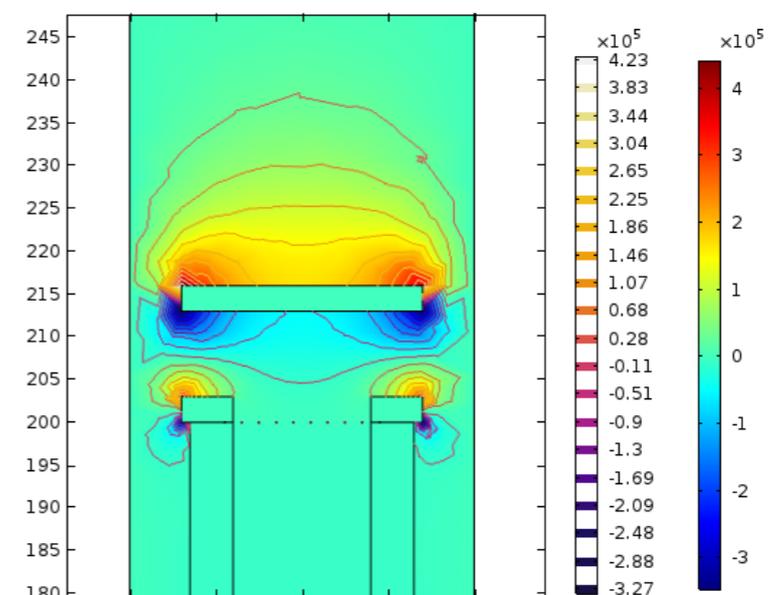
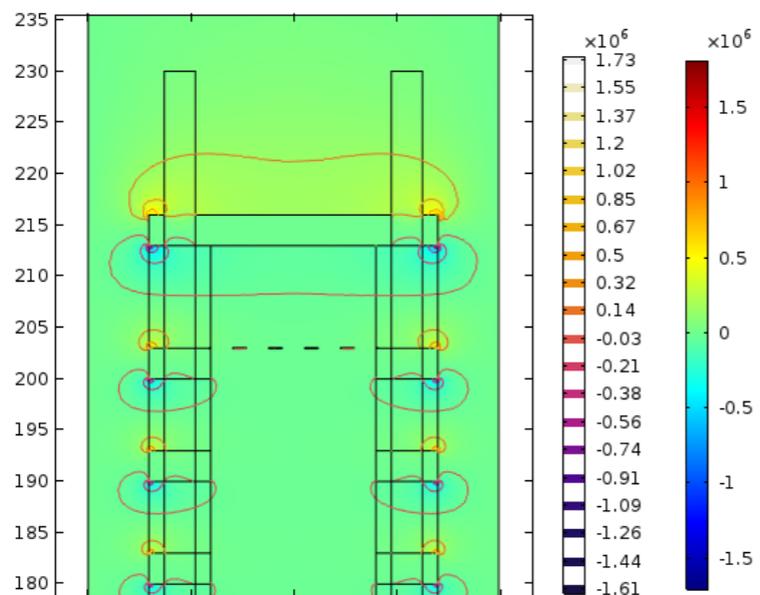
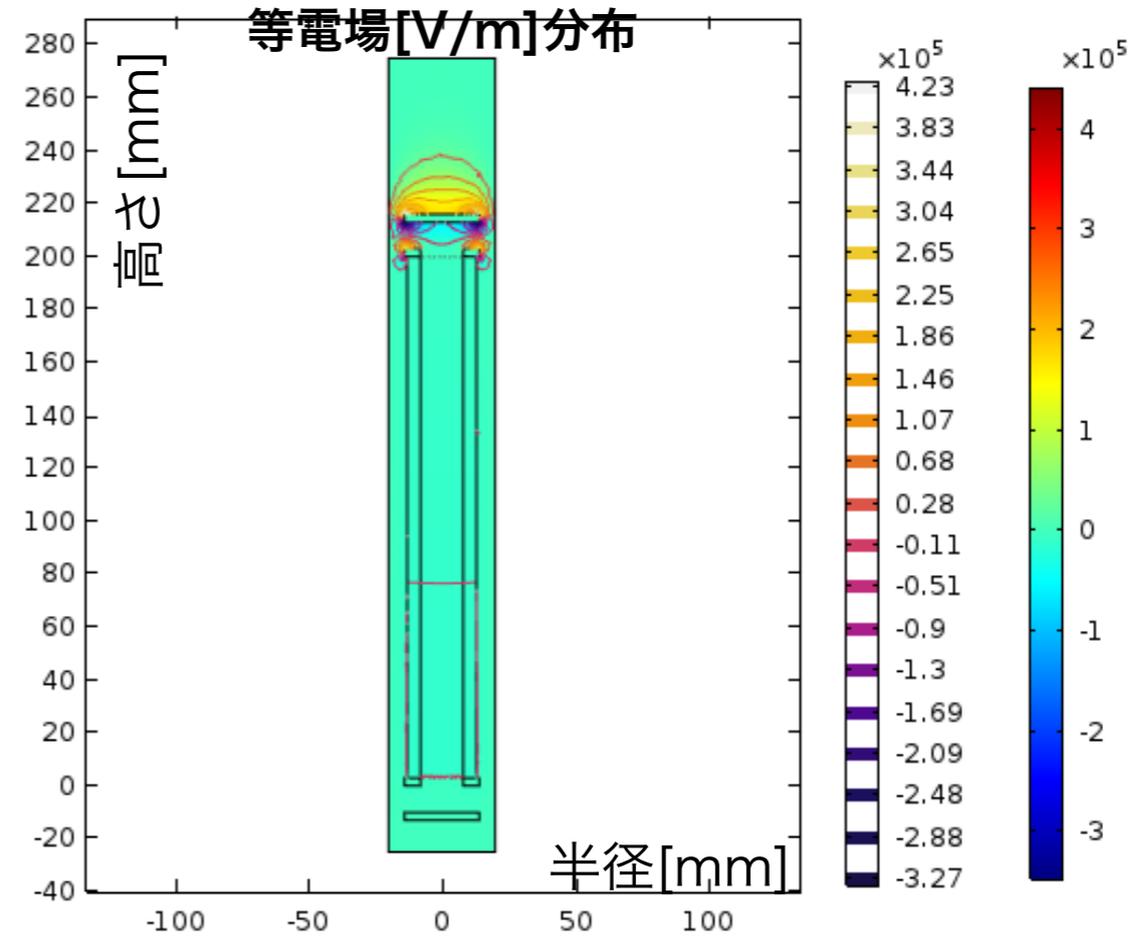
## 銅リングの抵抗分割法を用いた検出器モデル

### 透明高抵抗導電膜 on 石英ガラス

検出器を真ん中で割った時の

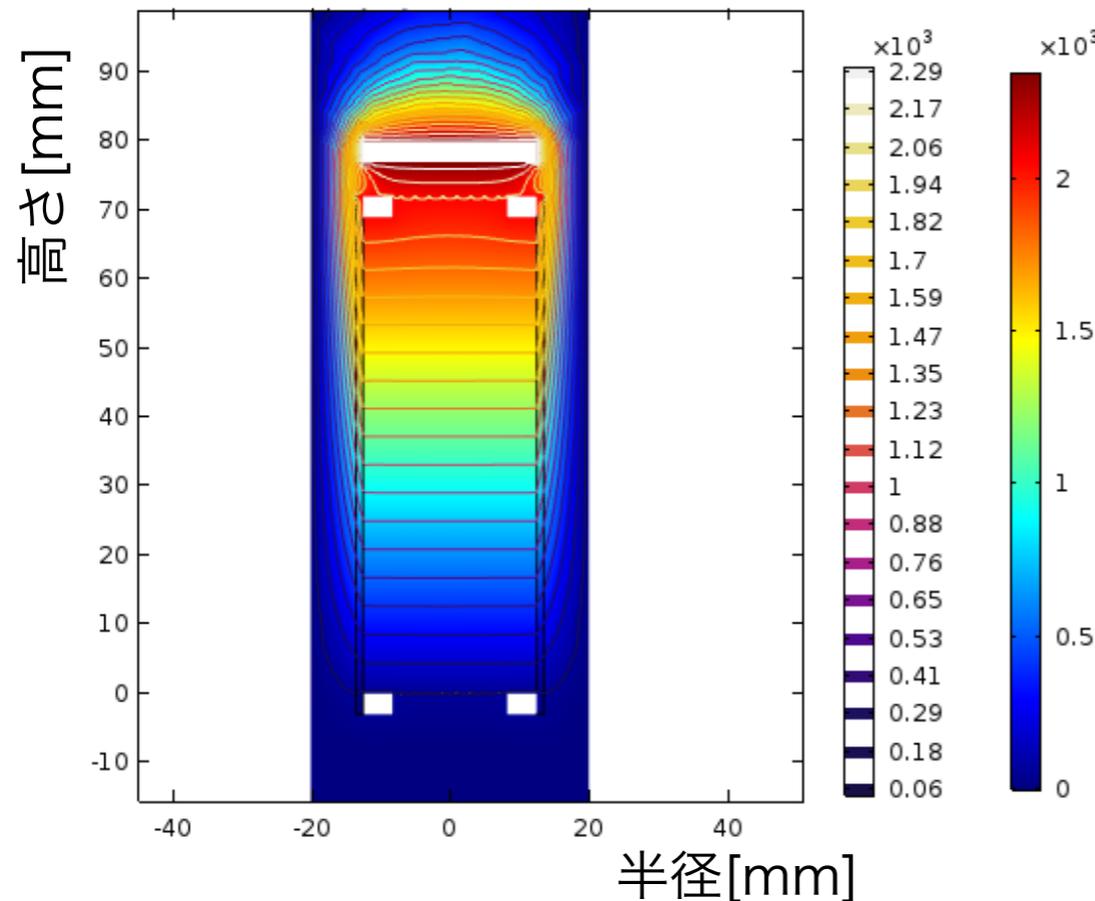


検出器を真ん中で割った時の

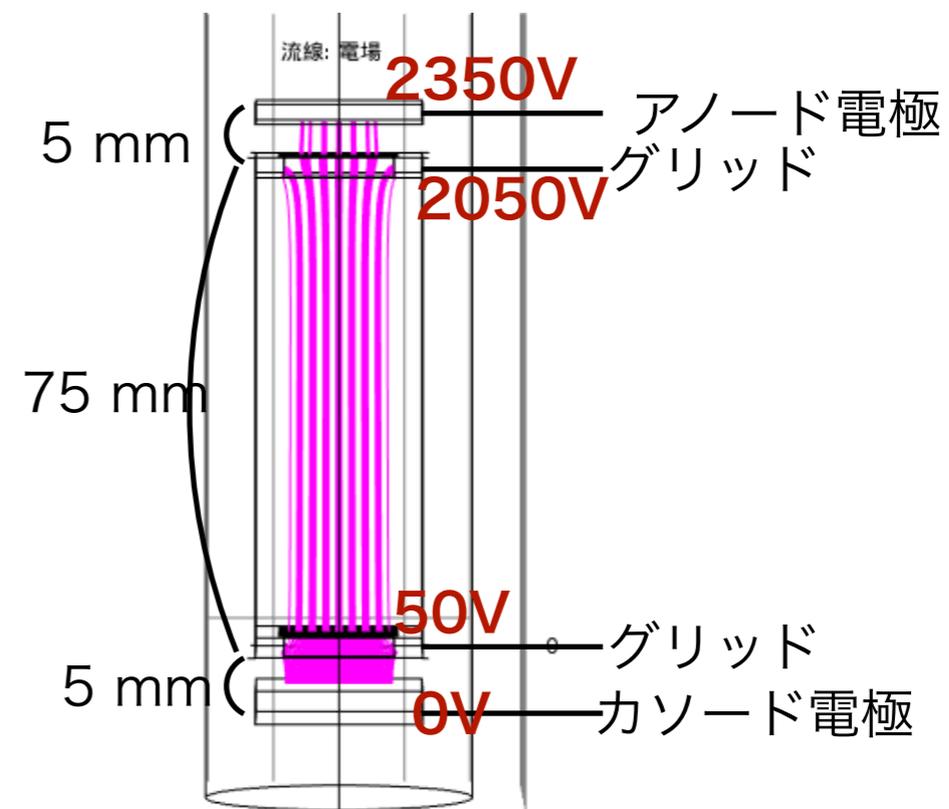


# 透明高抵抗導電膜を用いた電子ドリフトの実証 シミュレーション

検出器を真ん中で割った時の  
等電位[V]・等電位線[V]分布

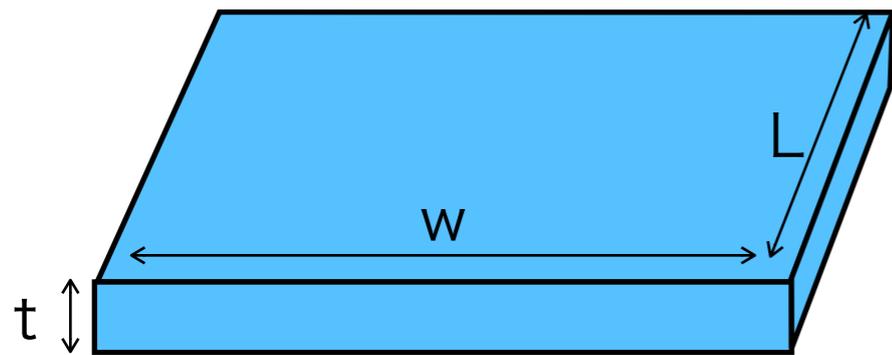


電気力線



電気力線はグリッド付近で歪んでしまいが、中心部の電気力線は真っ直ぐである。このセットアップでは金の薄膜にキセノンフラッシュランプを当てて光電効果によって電子を叩き出す方法で電子を発生させ電子ドリフトの実証を行うことが目的であるため、中心部の電気力線が真っ直ぐであれば十分である。

# シート抵抗とは( $\Omega/\text{sq}$ と $\Omega$ )



シート抵抗値は、以下の式で算出される。

$$R = \rho \frac{L}{wt} = \rho_s \frac{L}{w}$$

$\rho_s$  [ $\Omega/\text{sq}$ ]…シート抵抗値

$V$  [V]…印加した電圧

$I$  [A]…測定された電流値

実際の単位は[ $\Omega$ ]であるが、シート抵抗値と抵抗値を区別するためにシート抵抗値を[ $\Omega/\text{sq}$ ]としている。

# キセノンを使う利点

- **高密度だから**

液体キセノンの密度は $2.96\text{g/cm}^3$ （液体アルゴン密度 $1.398\text{g/cm}^3$ ）  
高密度であるほど暗黒物質が相互作用する確率が大きくなり、感度が良い。

- **原子番号が大きいから**

Xeの原子番号は $Z=54$

ガンマ線は液体キセノン中に侵入しても比較的早く減衰する。

散乱断面積は $\sigma \propto A^2$ （A:原子番号）で表されるので、

原子番号が大きいほど暗黒物質と相互作用する確率が大きい。

- **比較的高温で液体として扱えるから**

など…