

# 整電部材料試験

# 目的・動機

LXeTPCにおいて重要な役割を果たす、  
整電部(Field Cage)の設計に生かす。

LXeTPCとはどういうものか？

# 用途

- 用途

医療： 陽電子断層画像装置

PET(Positron Emission Tomography)

物理学： 暗黒物質探索実験

(特に未発見の素粒子(ニュートラリーノなど)を  
候補としている探索実験)

# LXeTPCとは

- 放射線検出器の一種
- 液体キセノンを用いたTPC

(TPCとはTime Projection Chamberの略で、  
放射線( $\gamma$ 線)の飛跡を読み取ることができる装置)

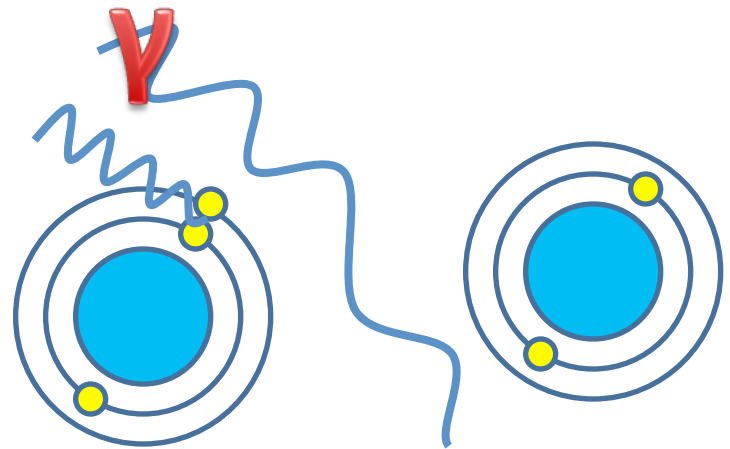
# 放射線検出器

放射線と検出器構成物との相互作用を利用

最も利用しやすいのは電磁相互作用

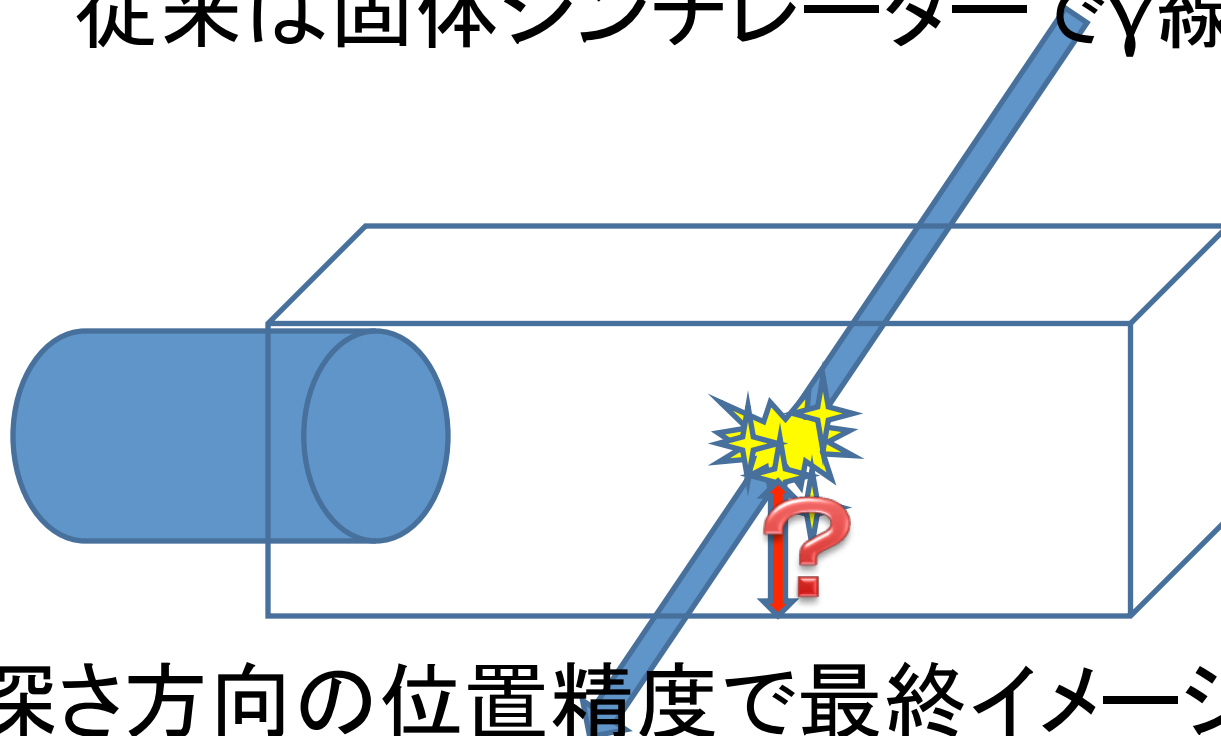
今回は $\gamma$ 線を見ようとしている。  
( $\gamma$ 線は電磁波の一種)

エネルギーの全部  
または一部を媒質  
中の電子に与えな  
がら進む。



# 従来のPETとの違い

従来は固体シンチレーターで $\gamma$ 線を拾う

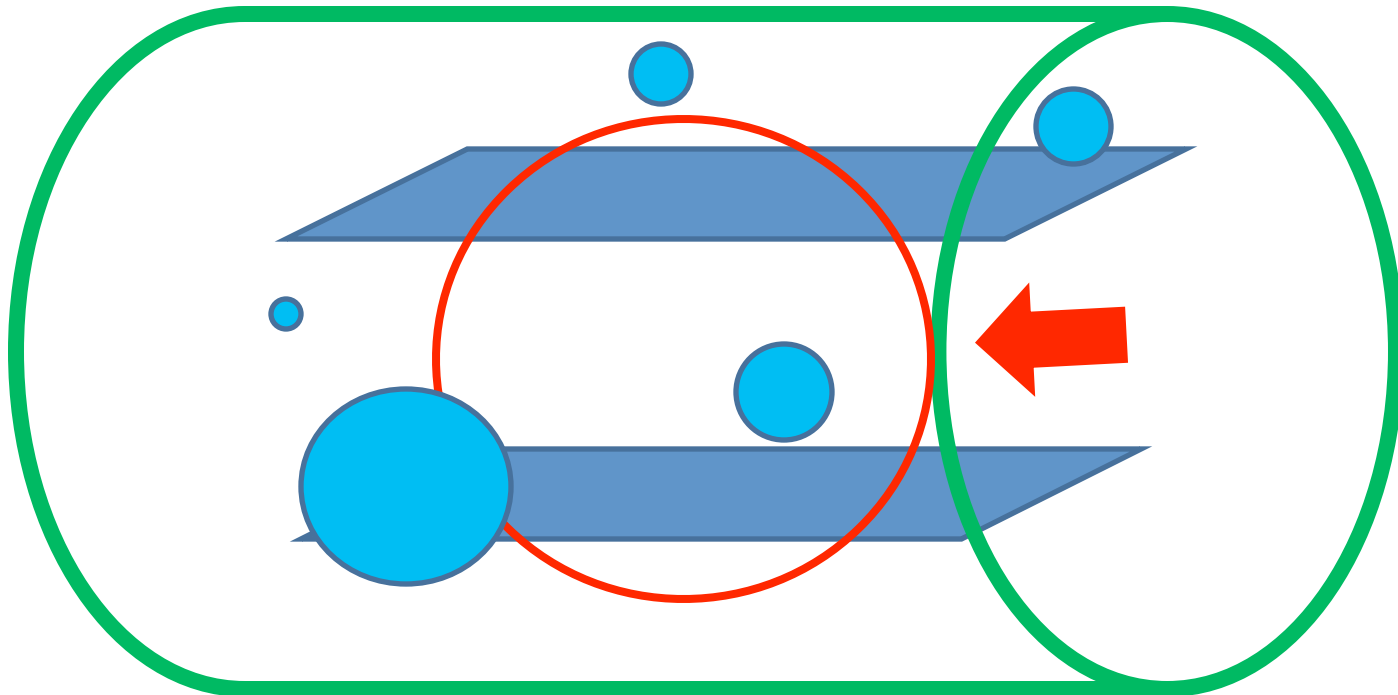


深さ方向の位置精度で最終イメージの精度が左右される。

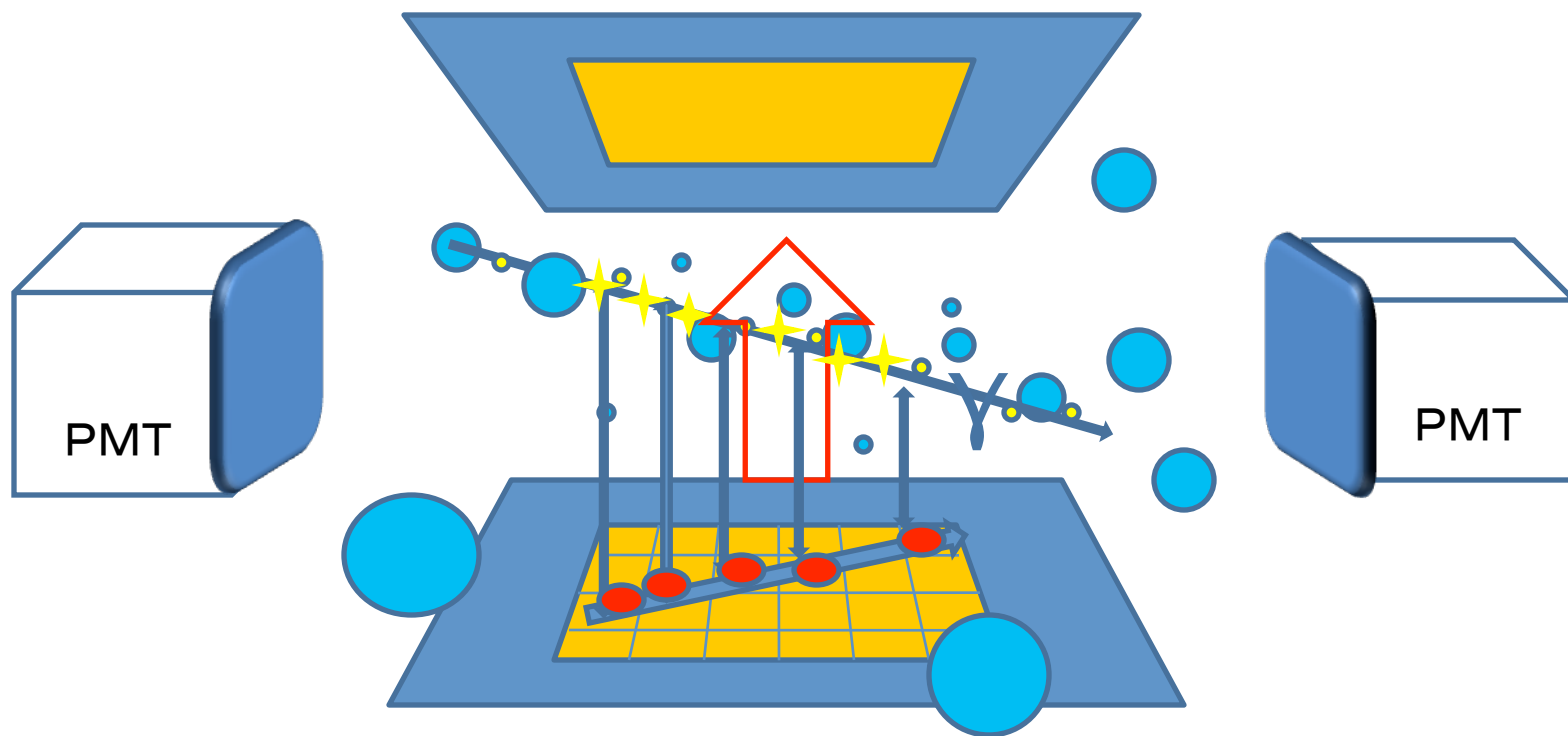
三方向に精度があるTPC

# TPCの原理

- ガスで満たされた容器の中に2枚金属プレートの電極



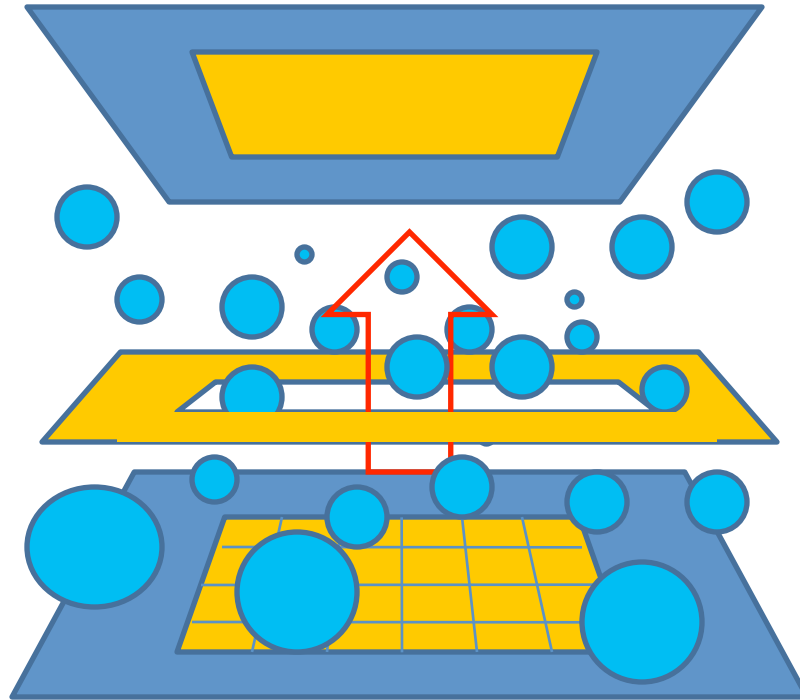
# TPCの原理





# 電場を整えることが重要

特に液体キセノンはガスにくらべ密度が高く、電子がドリフトする時の拡散が大きくなる



# 他のPETより何が優れているのか

3次元位置測定器が可能→深さ方向に対する測定可

液体キセノンによる蛍光の読み出し

高速計測

高分解能(位置、エネルギー)

| PET camera | Activity (kBq/ml) | Sensitivity – Net Trues<br>(cps/Bq/ml) | Spatial cut<br>(spatial resolution<br>FWHM) (mm) | Energy resolution<br>(FWHM) |
|------------|-------------------|--|--|-----------------------------|
| BGO        | 3                 | 30                                     | 10 (~7)  | 26.7                        |
| LXe        | 0.4               | 190                                    | 3 (~1.7)   | 13.8                        |

Table 1: Performances of the proposed LXe-TPC PET compared to a standard BGO PET camera.

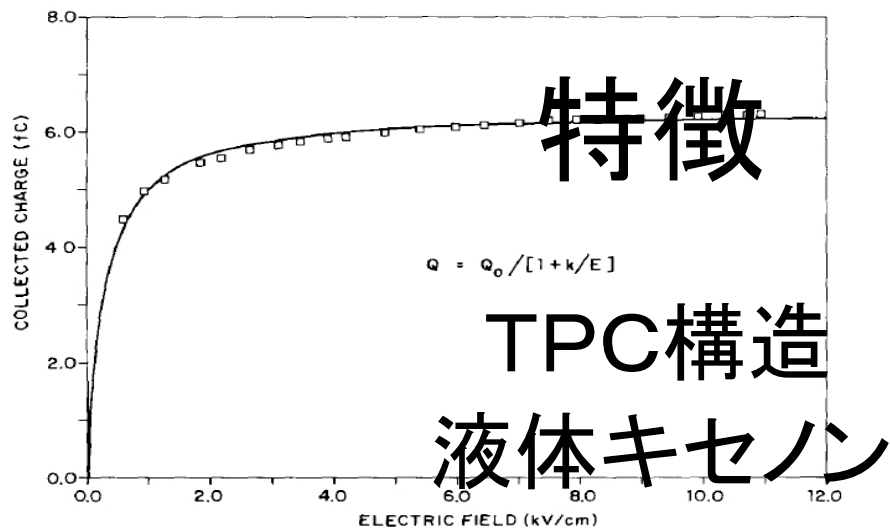


Fig. 7. Collected charge (in fC) for the 976 keV electrons as function of drift field. The solid line is a fit to the data, based on columnar recombination theory.

## 問題点

液体キセノン温度-108℃

低温下での動作  
高電場(2kV/cm)  
不純物の影響

Generally, the use of plastics should be kept to a minimum due to their high gas permeability and high desorption rates compared with metals, glass and ceramics. In spite of this, plastics are often used in vacuum systems because of their insulating properties, elasticity, low radioactivity, and affordable price.

PTFE (Teflon DuPont) has self-lubricating properties, a relatively low outgassing rate, is a good electrical insulator, and can be used at higher temperatures than other plastics. High permeability makes PTFE unsuitable as a part of the vacuum envelope.

Nylon has self-lubricating properties but a high outgassing rate and a high adsorption rate for water is a drawback.

PVC has a high outgassing rate but does find application for rough vacuum lines and temporary connections such as to a leak detector.

Polyethylene may be usable if well outgassed. It is inherently low-background material with high electric strength. In the UK the polymer is called *polythene*. The main disadvantage is its relatively low melting temperature.

# 材料に関する吟味

## インシュレータ

- ポリアミドやナイロンはアウトガスや水分の吸収などがみられるので不適當
- ポリエチレンはよくアウトガスされていては、よい材料となりえる
- G10ガラスエポキシなどは加工しづらく最初に高いアウトガスがみられる。
- テフロンやセラミックなどはアウトガスが低い

実際に冷却してみて試してみる。

どれだけの強度のものか実際に手にとって確認。

# 絶縁体材料

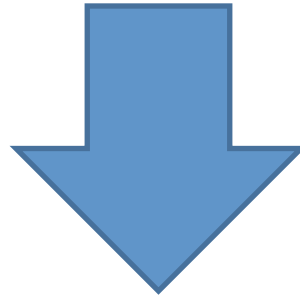
| 材料名            | 引張強さ                 | 絶縁破壊の強さ   | 熱膨張率                     | 吸水率      |
|----------------|----------------------|-----------|--------------------------|----------|
|                | [N/mm <sup>2</sup> ] | [kV/mm]   | [× 10 <sup>-5</sup> /°C] | [%]      |
| ・ PEEK         | 91                   | 17        | 1.1～5.0                  | 0.14     |
| ・ エポキシガラス      | 35.5～103             | 9.8～15.7  | 3.0～5.0                  | 0.04～0.2 |
| ・ ポリアセタール      | 68.6～83.3            | 15.7～19.7 | 8.1                      | 0.25     |
| ・ MCナイロン       | 78～96                | 19        | 9                        | ～2.0     |
| ・ ベークライト(布系)   | 45～65                | 8～14      | 1.0～4.0                  | 0.4～1.75 |
| ・ フッ素樹脂 (PTFE) | 20～35                | 19.7～23.6 | 10                       | 0        |
| ・ 超高分子ポリエチレン   | 18～24                | 26.8～28.0 | 7                        | ～0.01    |

# 金属材料

| 属及び鋼       | 密度                | 硬さ  | 引張強さ              | 伸び | 融点        | 熱伝導率    | 熱膨張率             | 固有電気抵抗<br>10 <sup>-6</sup> |
|------------|-------------------|-----|-------------------|----|-----------|---------|------------------|----------------------------|
|            | g/cm <sup>3</sup> | Hv  | N/mm <sup>2</sup> | %  | °C        | cal/cm  | 10 <sup>-6</sup> | ohm-cm                     |
|            |                   |     |                   |    |           | /sec/°C | 1/°C             |                            |
| SUS304     | 7.93              | 150 | 600               | 60 | 1400~1450 | 0.039   | 17.3             | 72                         |
| アルミニウム     | 2.7               | 25  | 100               | 30 | 660       | 0.57    | 23.5             | 2.69                       |
| 金          | 19.32             | 26  | 110               | 30 | 1063      | 0.7     | 14.1             | 2.3                        |
| 銀          | 10.49             | 26  | 220               | 40 | 961       | 1       | 19.1             | 1.6                        |
| 銅          | 8.96              | 46  | 220               | 50 | 1083      | 0.94    | 17               | 1.673                      |
| 鉛          | 11.36             | —   | 30                | —  | 327       | 0.082   | 29               | 20.6                       |
| ニッケル       | 8.9               | 96  | 490               | 40 | 1453      | 0.21    | 13.3             | 6.844                      |
| 白金         | 21.45             | —   | 250               | 10 | 1769      | 0.17    | 9                | 10.6                       |
| チタン        | 4.51              | 120 | 410               | 40 | 1668      | —       | 8.9              | 55                         |
| チタン合金(6-4) | 4.43              | 310 | 980               | 15 | 1594      | —       | 8.8              | 171                        |
| 真鍮(7:3)    | 8.5               | 50  | 200               | 38 | 910       | 0.2     | 18               | 3. 2~5                     |

# 整電部試験

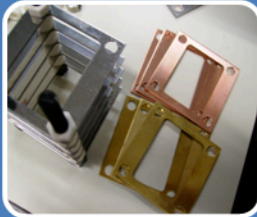
整った電場を得るためには  
整電電極の歪みを  
最小に抑える必要がある



- 考えた組み立て方で、どの程度歪みが生ずるか
- 低温に冷やした際にどの程度歪むのか
- そもそも電場をかけることができるのか
- 材料によるアウトガス

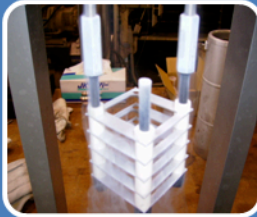
検証

# 実験方法



## 構造試験

- ネジ付スペーサ[組み立てA]
- 全ネジ・ナット[組み立てB]
- ロッド・セットカラー[組み立てC]



## 冷却変形試験

- 組み立て方別冷却試験
- 模擬ケーブル冷却試験
- メッシュ冷却試験

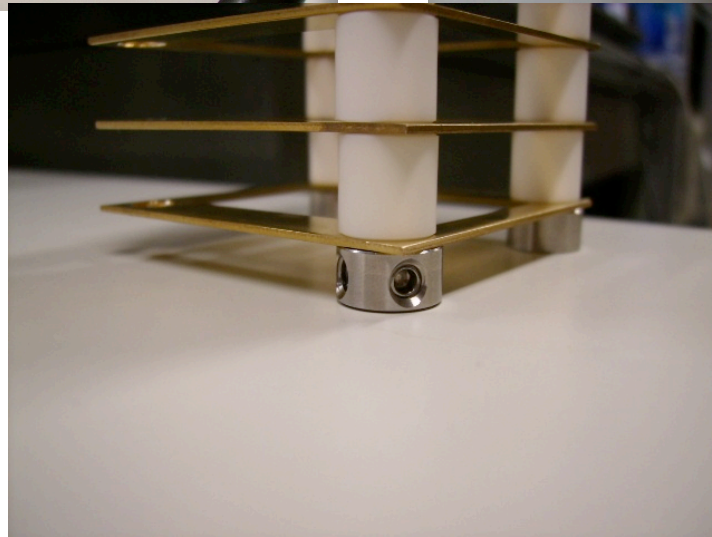
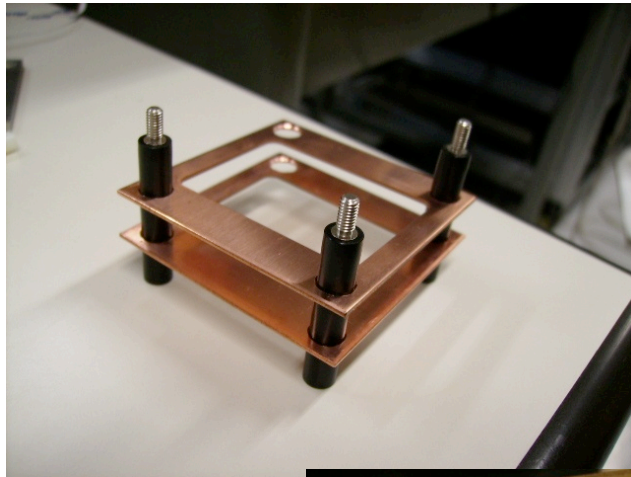


## 電場試験

- 冷却時の抵抗別電場試験
- 冷却時の金属別電場試験
- 冷却時の抵抗接続方法別電場試験



# 構造試験 (組み立て)



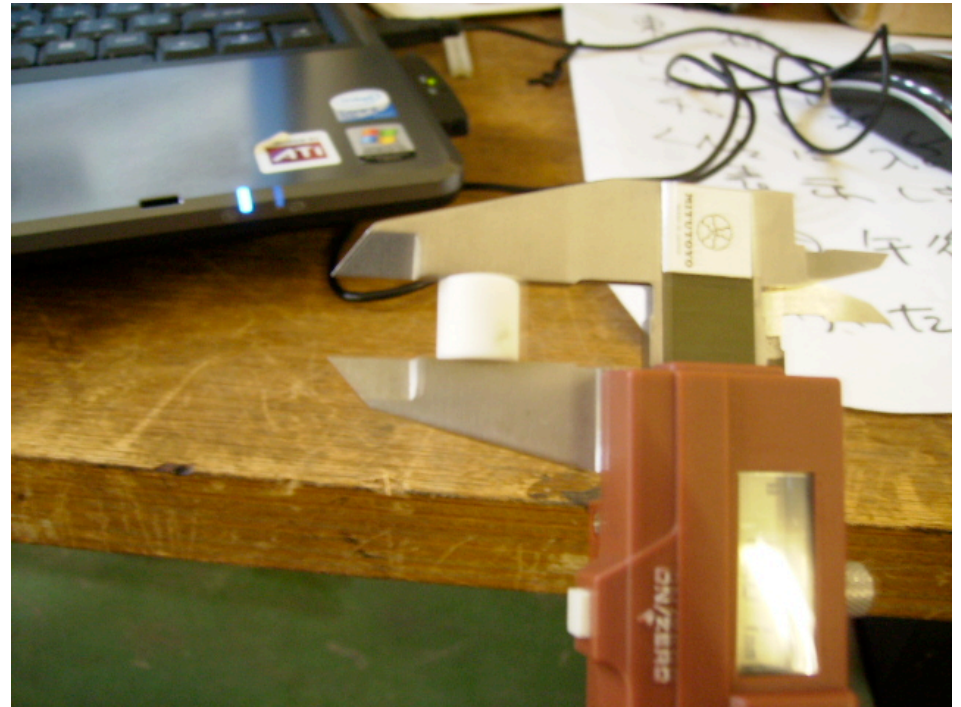
# 組み立てる前に

- スペーサーの吟味

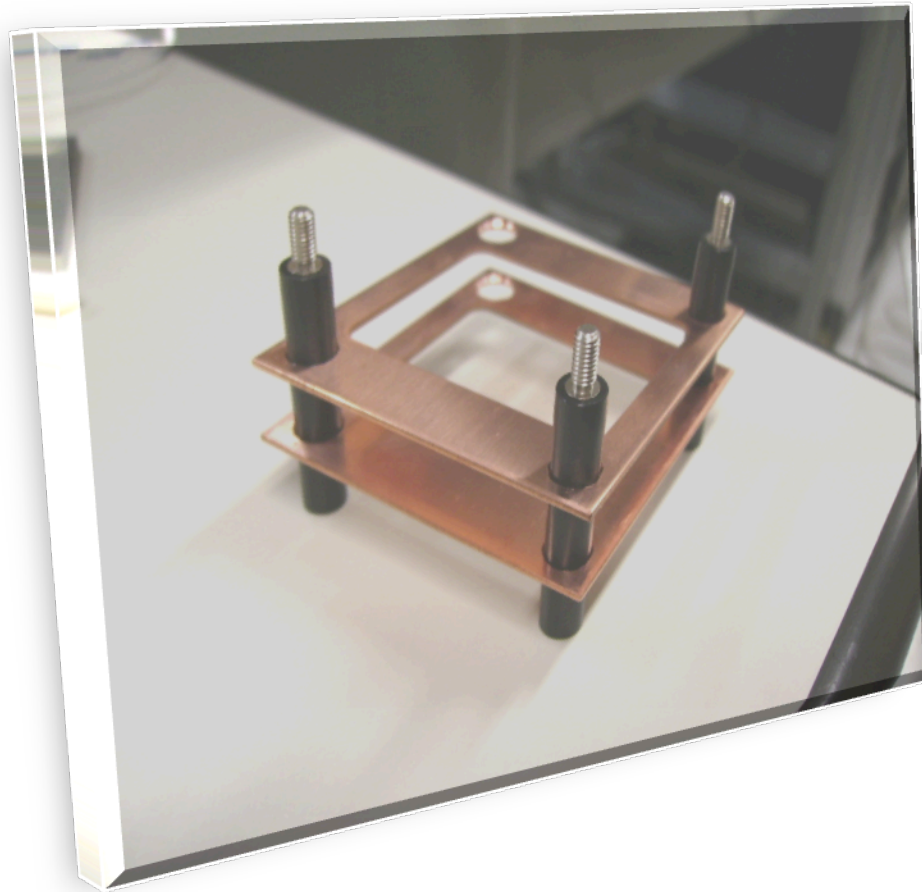
## スペーサーの長さが不揃い

構造上スペーサーがフレーム間の幅を決定するので、スペーサーの長さを揃えることが重要。

スペーサーの長さを一個ずつノギスで測り、長さ別に分類する。あまりに不揃いである場合には、ヤスリなどで削り調整する。

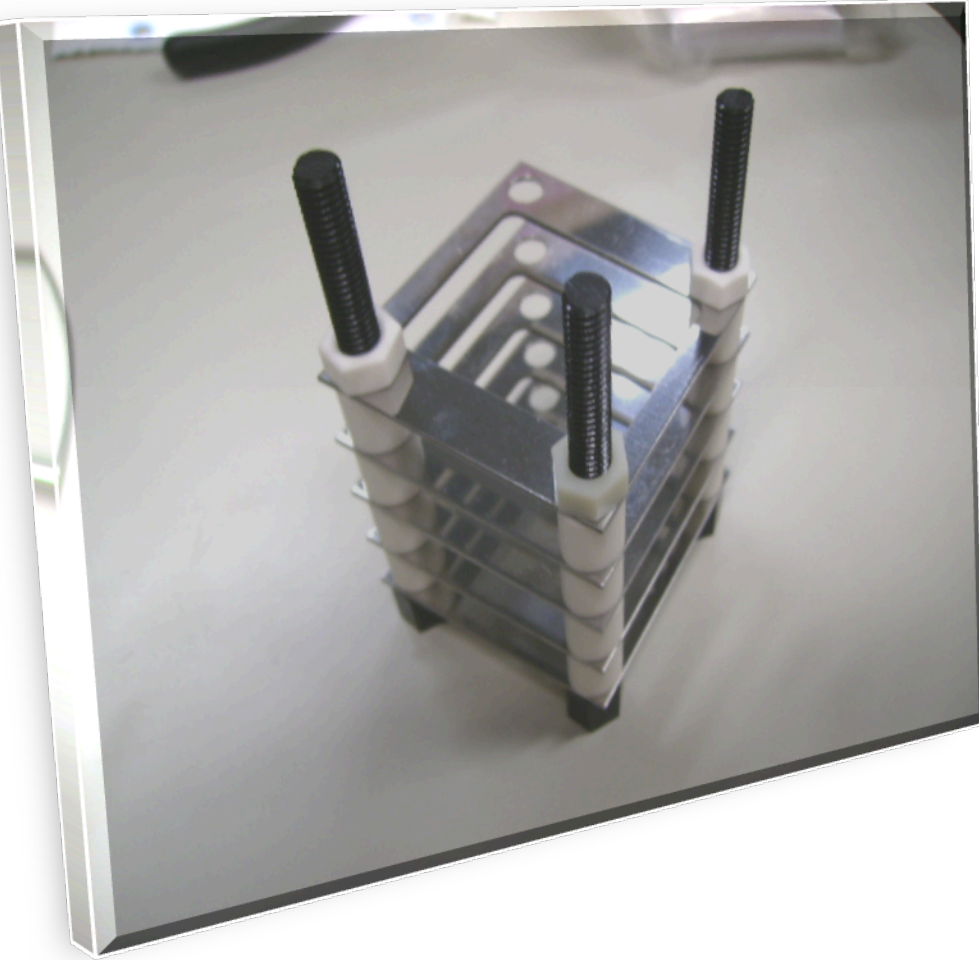


# 組み立てA



1. ネジ付スペーサーの上にフレームを載せる。  
(3ヶ所、1個は捨て穴。)
2. そのフレームをさらにネジ付スペーサーで留める。
3. 再びフレームを載せ、同じ動作を繰り返す。(五段)
4. 最後はM3のナットで締める。

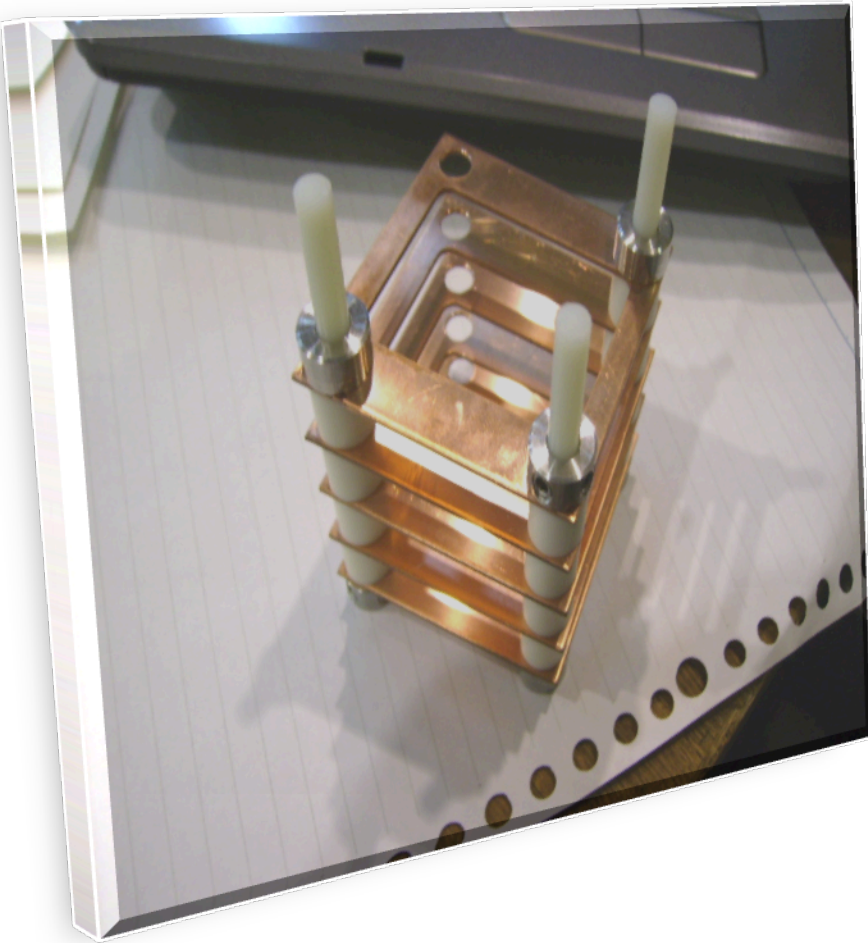
# 組み立てB



1. 金属フレームに全ネジを通す。
2. スペーサーを全ネジに通す。
3. その上に再びフレームを全ネジに通し、同様の作業を繰り返す。(5段)
4. 最後はナットで固定。



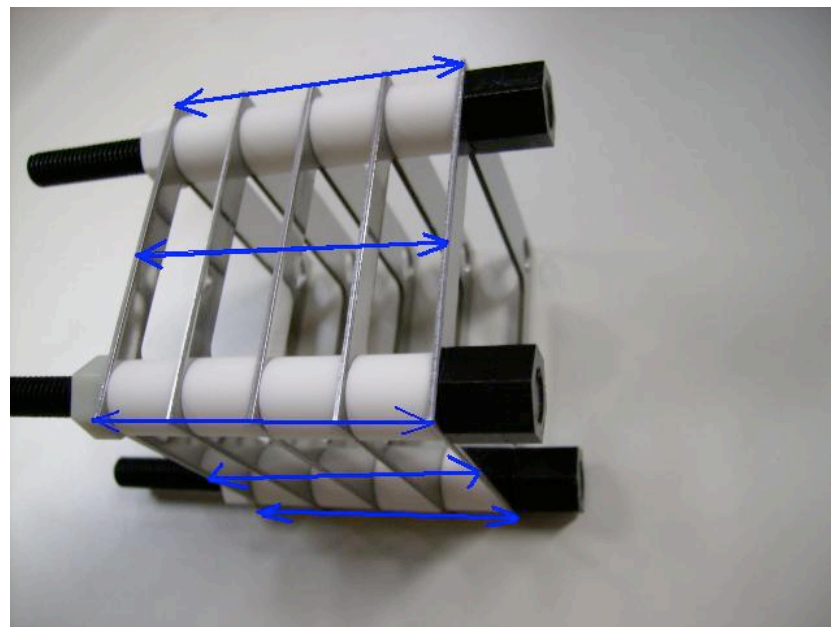
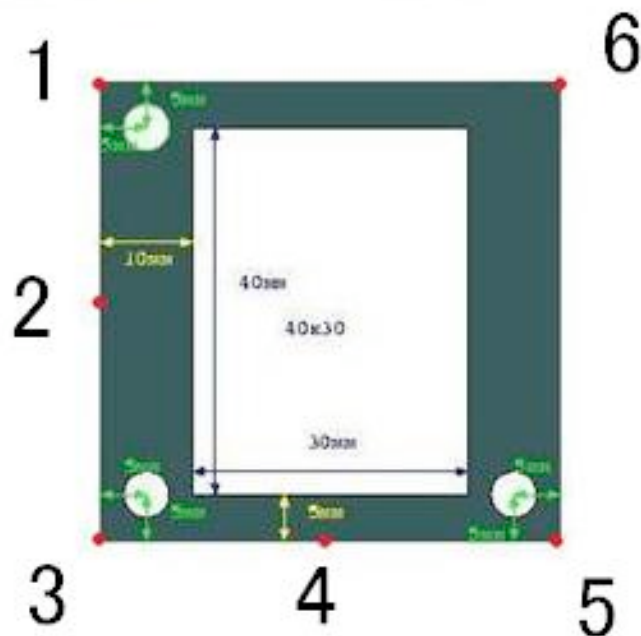
# 組み立てC



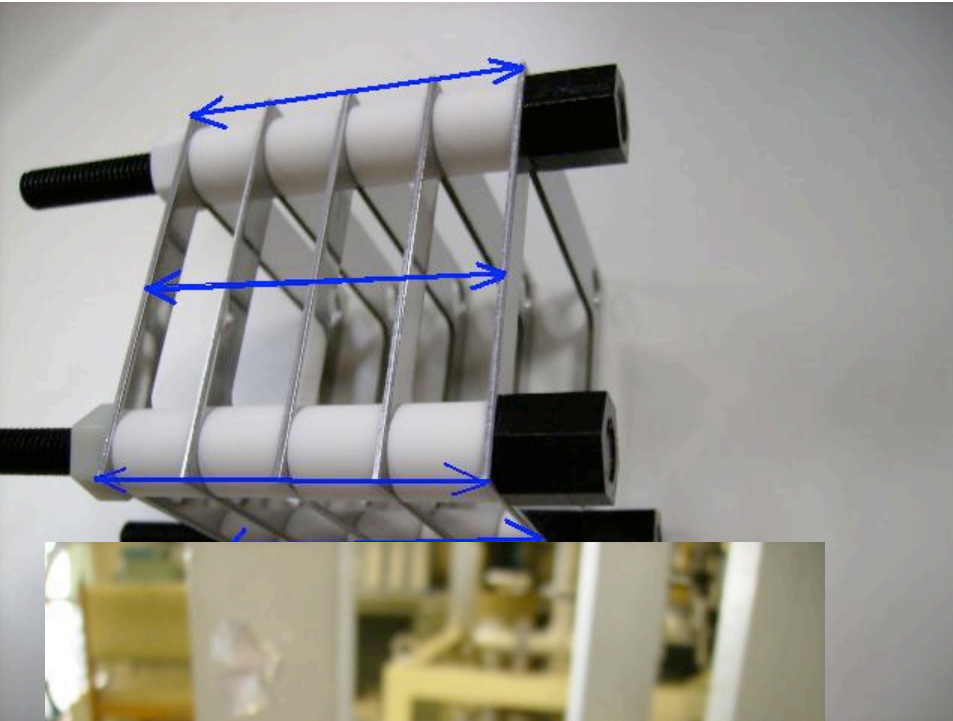
1. ロッドをセットカラーで留める。
2. その上にフレームを載せる。
3. スペーサーを通す。
4. その上にフレームを載せ  
同様の手順で積み重ねる。  
(5段)
5. 最後はセットカラーで留める。

# 組み立て試験

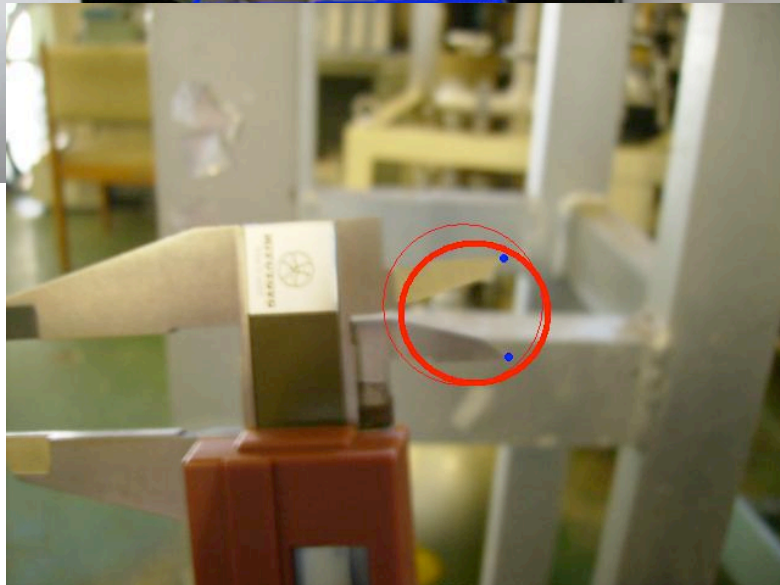
- 記録方法                      位置を以下のように決める。



# 形状の測り方



青線で示した部分  
(スペーサー端から  
スペーサー端まで)の長さを  
ノギスで測る。



ノギスの刃先をスペーサと  
フレームの付け根に  
垂直に当てて測る

# 記録

- 記録は以下のような表に記入

| A      | B              | C         | D | E | F | G |    |
|--------|----------------|-----------|---|---|---|---|----|
|        | 組み立てB(ナット:レニー) |           |   |   |   |   | 電極 |
|        | 材質             | レニー(φ6mm) |   |   |   |   |    |
|        | 位置             | 1         | 2 | 3 | 4 | 5 |    |
| 電極間の長さ | 最初             |           |   |   |   |   |    |
|        | 取り出し直後         |           |   |   |   |   |    |
|        | 1サイクル          |           |   |   |   |   |    |
|        | 取り出し直後         |           |   |   |   |   |    |
|        | 2サイクル          |           |   |   |   |   |    |
|        | 取り出し直後         |           |   |   |   |   |    |
|        | 3サイクル          |           |   |   |   |   |    |
|        | 取り出し直後         |           |   |   |   |   |    |
|        | 4サイクル          |           |   |   |   |   |    |
|        | 取り出し直後         |           |   |   |   |   |    |
|        | 5サイクル          |           |   |   |   |   |    |
|        | 取り出し直後         |           |   |   |   |   |    |
|        | 6サイクル          |           |   |   |   |   |    |
|        | 取り出し直後         |           |   |   |   |   |    |
|        | 7サイクル          |           |   |   |   |   |    |
|        | 取り出し直後         |           |   |   |   |   |    |



# 冷却試験

- 組み立て方別冷却試験

組み立て方別に温度サイクルを行い歪みが生じるか否かを試験する。

- 模擬ケーブル冷却試験

温度サイクルを行いケーブルに変形が見られないかなどを調べる。

- メッシュ冷却試験

温度サイクルを行い、変形・太鼓腹にならないかどうかをチェックする。

# 冷却試験の方法

- 常温→低温（液体窒素温度）→常温の**温度サイクル**を行う。
- 常温時の**形状**と低温から出してすぐの**形状**を測る。
- 10サイクルほど行っても大丈夫か否かを見る。

# 温度

- 常温の一回目の測定は、室温と同じ温度（組み立てすぐの温度）とし、二回目以降は表面についた霜がすべて水滴に変わるまでの温度とする。（約10分）
- 低温（液体窒素温度）は液体窒素につけ、沸騰が収まるまで待てば満たされる。（約1分）

温度計も準備したので実際に温度も見る。

# 電場試験

- 冷却時の抵抗別電場試験  
抵抗の違いによる電場試験。
- 冷却時の金属別電場試験  
金属の種類による電場の違い
- 冷却時の抵抗接続方法別電場試験  
(今回は、行わない。接続方法は別途検討。)

# 記録

- 記録は以下のような表に記入。

| A | B     | C          | D | E | F    | G | H |
|---|-------|------------|---|---|------|---|---|
|   | 組み立てA | ネジ付スペーサ材質: |   |   |      |   |   |
|   | 位置    | 1          | 2 | 3 | 4    | 5 | 6 |
|   | 長さ    |            |   |   |      |   |   |
|   | 歪み    |            |   |   |      |   |   |
|   | 平面性   |            |   |   |      |   |   |
|   | コメント  |            |   |   |      |   |   |
|   |       |            |   |   |      |   |   |
|   | 組み立てB | ナット材質:     |   |   | ネジ材質 |   |   |
|   | 位置    | 1          | 2 | 3 | 4    | 5 | 6 |
|   | 長さ    |            |   |   |      |   |   |
|   | 歪み    |            |   |   |      |   |   |
|   | 平面性   |            |   |   |      |   |   |
|   | コメント  |            |   |   |      |   |   |
|   |       |            |   |   |      |   |   |
|   | 組み立てC | ロッド材質:     |   |   |      |   |   |
|   | 位置    | 1          | 2 | 3 | 4    | 5 | 6 |
|   | 長さ    |            |   |   |      |   |   |
|   | 歪み    |            |   |   |      |   |   |

# 材料の組み合わせ

材料の組み合わせは以下の4通り

|          | レニーネジ | FRPネジ |
|----------|-------|-------|
| レニーナット   | ？     | ？     |
| セラミックナット | ？     | ？     |

# 日程

本日

試験内容の打ち合わせ

14:00～

組み立て試験

明日

冷却試験・電場試験

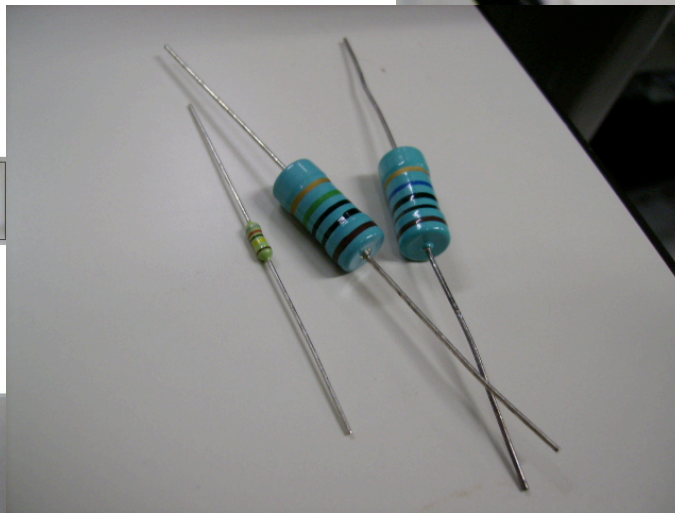
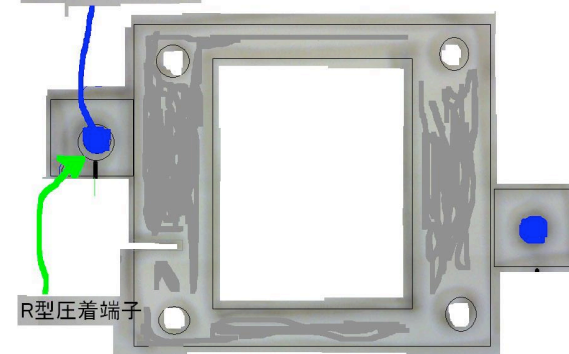
# 抵抗の取り付け方

- 抵抗の端に圧着端子を圧着する。
- ネジとナットで固定



ネジとナットで締める。

R型圧着端子





おまけ

Table 1.5: Physical properties of noble liquids (adapted from Ref. (98)).

|  | LAr      | LKr      | LXe      |
|--|----------|----------|----------|
| Atomic Number $Z$                              | 18       | 36       | 54       |
| Atomic Weight $A$                              | 39.95    | 83.8     | 131.3    |
| Density (g/cc)                                 | 1.39     | 2.45     | 3.06     |
| Melting Point $T_m$ (K)                        | 83.8     | 115.8    | 161.4    |
| Boiling Point $T_b$ (K)                        | 87.3     | 119.8    | 165.1    |
| Critical Temperature $T_c$ (K)                 | 150.7    | 209.5    | 289.7    |
| Critical Pressure $P_c$ (atm)                  | 48.3     | 54.3     | 57.64    |
| Critical Density (g/cc)                        | 0.54     | 0.91     | 1.10     |
| Volume Ratio ( $\rho_l/\rho_g$ )               | 784      | 641      | 519      |
| Fano Factor                                    | 0.107    | 0.057    | 0.041    |
| Drift Velocity (mm/ $\mu$ sec) @ 1(5) kV/cm    | 1.8(3.0) | 2.4(4.0) | 2.2(2.7) |
| Mobility (cm V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ) | 525      | 1800     | 2000     |
| Radiation Length (cm)                          | 14.3     | 4.76     | 2.77     |
| (dE/dx) (MeV/cm)                               | 2.11     | 3.45     | 3.89     |
| Liquid Heat Capacity (cal/g-mole/K)            | 10.05    | 10.7     | 10.65    |
| W-value (eV) (ionization)                      | 23.3     | 18.6     | 15.6     |
| W-value (eV) (scintillation)                   | 19.5     | 15.5     | 14.7     |
| Wavelength of Scintillation Light (nm)         | 130      | 150      | 175      |
| Decay const.                                   |          |          |          |
| fast (ns)                                      | 6.5      | 2        | 2        |
| slow (ns)                                      | 1100     | 85       | 30       |
| Refractive index @ 170 nm                      | —        | 1.41     | 1.60     |
| Dielectric constant                            | 1.51     | 1.66     | 1.95     |

| シンチレータ                   | Liq. Xe | Nal:TI          | GSO              | BGO               | LSO             | LGSO    | LYSO | LaBr <sub>3</sub> |
|--------------------------|---------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|---------|------|-------------------|
| 密度(g/cm <sup>3</sup> )   | 3.06    | 3.67            | 6.71             | 7.13              | 7.4             | 6.5–7.3 | 7.25 | 5.29              |
| 蛍光減衰時間(ns)               | 2, 30   | 230             | 30–60            | 300               | 42              | 40–100  | 41   | 100               |
| 蛍光出力(相対値)                | 80      | 100             | 20–24            | 10–12             | 40–80           | 40–80   | 80   | 100               |
| 発光波長 $\lambda_{em}$ (nm) | 175     | 415             | 430              | 480               | 420             | 420     | 420  | 380               |
| 屈折率(at $\lambda_{em}$ )  | 1.60    | 1.85            | 1.85             | 2.15              | 1.82            | 1.82    | 1.81 | 1.9               |
| 放射線強度(gray)              |         | 10 <sup>3</sup> | >10 <sup>6</sup> | 10 <sup>2–3</sup> | 10 <sup>5</sup> |         |      |                   |
| 吸収潮解性                    | なし      | 強い              | なし               | なし                | なし              | なし      | なし   | あり                |
| 放射性                      | なし      | なし              | なし               | なし                | あり              | あり      | あり   | なし                |
| 融点(°C)                   | –111.6  | 651             | 1950             | 1050              | 2150            | 2100    | 2100 | 783               |
| へき開                      | なし      | なし              | (100)面           | なし                | なし              | (100)面  | なし   | なし                |
| 育成方法                     | —       | BR              | CZ               | CZ, BR            | CZ              | CZ      | CZ   | BR                |