

液体キセノン、液体アルゴン TPCプロジェクト

第三回先端加速器推進室連合報告会

2008年12月22日、KEK、田内利明、丸山和純

本プロジェクトの目的

LXeTPC : KeV-MeV領域のガンマ線・電子の3次元位置、時間及びエネルギーの高分解能検出器・液体キセノンTPCの開発

応用分野：ガンマ線天文学、Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)、Positron Emission Tomography (PET) ; Dark matter, Double β decay experiments

エネルギー領域と物理

数10KeV ~ 数10MeV : ガンマ線天文学

10KeV : ダークマター

100KeV : 太陽ニュートリノ

数 KeV ~ 300KeV : SPECT

500KeV : PET

2.48MeV : ν_e 無しダブル β 崩壊

Summary of 1 Phase LXe

| Phase | Project | Physics | Xe weight | detector | readout | year | location | collaboration |
|-------|----------|----------------------------------|-------------------------------|------------------|---|---------------------|---|--|
| 1 | EXO | double beta | 10ton (3m ³) | TPC | x, y anode wires ; APD for lights , laser - ID | for 10 years | WIPP, NM, USA | Enriched Xenon Observator, US(SLAC), Canada, Swiss, Russia |
| | | | 1ton | | | for 5 years | | |
| | | | 200kg | | | Nov., 2006 | | |
| 1 | XMASS | DM solar ν double beta | 20ton | lights | PMT | | Kamioka | Japan, Korea, Russia |
| | | | 1ton (800kg) | | | | | |
| | | | 100kg (30 ℓ) | | | 2006 | | |
| 1 | MEG | $\mu \rightarrow e \gamma$ | 800 - 900 ℓ | lights | PMT | Nov., 2006 | PSI | Japan, Italy, Switzerland, Russia, USA |
| | | | 70 ℓ | | | 2003 | | |
| 1 | LXe-GRIT | cosmic γ | 2.4 ℓ | TPC | x, y anode wires ; PMT for lights | 1997, 1999, 2000 | NSBF (National Science Baloon Facility),NM, USA | Columbia university |
| 1 | LXe-PET | PET | 64.8 ℓ | TPC | segmented pads | 2007 (prototype) | Nantes Cyclotron | France, Japan |
| 1 | PETYA | PET | | drift chamber | anode wires or mini-strip ; PMT, APD for lights | 2002 (prototype) | Univ. of Coimbra | Portugal |
| 1 | TOF-PET | PET | 77.8 ℓ | lights | PMT | | Waseda univ., NIRS | Japan |
| | | | 12 ℓ | | | 2003 | | |
| 1 | XEPET | PET | test w/ 8.5 ℓ in 2005 | TPC | 12 seg. 96wires & 96strips/seg. | 2006-2008 | TRIUMF | CANADA |

Summary of 2 Phase LXe

| Phase | Project | Physics | Xe weight | detector | readout | year | location | collaboration |
|-------|---------------------------|-----------|----------------|----------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 2 | LXeComp/ ⁴⁴ Sc | PET | 100 ℓ | TPC | anode pads ; GPM for lights | simulation | Nantes Cyclotron | France, Israel, Japan |
| | | micro-PET | 13.8 ℓ , 6.9 ℓ | | | simulation | | |
| | | | 0.1 ℓ | | | 2005 | | |
| 2 | GEM-based | PET | | TPC | GEM | 2003 | Budker Institute | Russia |
| 2 | US patent 5665971 | PET | | TPC | | 1997 | Columbia university | USA |
| 2 | XENON | DM (WINP) | 1ton:100kgx10 | TPC | PMT, GEM | | Gran Sasso undergroun d lab | US, Italy,Portugal |
| | | | 100kg | | | design | | |
| | | | 10kg | | | 2006 | | |
| | | | 3kg | | | 2005 | | |
| 2 | ZEPLIN | DM (WINP) | 1ton (IV?) | TPC | PMT, GEM | | Boulby, UK | UK, US, Italy, Russia, Portugal |
| | | | 30kg (II) | | | 2006 | | |
| | | | 6kg (III) | | | 2006 | | |

KEK：冷凍・純化システム、PMTシステム、TPC、テスト

田内利明、真木晶弘、春山富義、田中秀治、三原智、佐伯学行
笠見勝裕(冷凍システム構築)、鈴木祥仁 (モニター:Labview)

佐賀大：TPC、TPC/PETシミュレーション、テスト

杉山 晃、東貴俊 (D2)

東大：TPCテスト

森研究室、金子大輔 (M2)

放医研：PETとしての性能仕様とシミュレーション

熊田雅之、富谷武浩、寅松千枝

横浜国大：液体キセノン基本特性

中村正吾

協力支援：KEK素核研回路室、田中真伸氏

レビュワー：宮島光弘氏 (早稲田大)、海野義信 (KEK)

LArTPC : ニュートリノ・核子崩壊 : 次世代目標

- $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ ($\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$) 振動におけるCPの破れの探索
 - θ_{13} についてはまもなく開始するT2K実験で探索
 - CPの破れの検出のためにはより大質量・高性能の遠方検出器が必要となってくる
 - 主な背景事象となる ν_{μ} からの π^0 を効率的に除去できる検出器が有利
 - 核子崩壊
 - $p \rightarrow \nu K^+$: SUSY理論では分岐比が大きいと予想
 - 寿命/分岐比 10^{34-35} 年までの探索
 - 荷電K中間子の識別能力の高い検出器が有利
- 液体アルゴンTPCはこれらの目標の達成に特化した検出器

22.5kton (水チェレンコフ、スーパーカミオカンデ) → Mton へ

100kton (LAr TPC)

高工研 素核研 ニュートリノG 丸山和純

大型液体アルゴンTPC 製作を見据えたテストス タンド開発研究

高工研 素核研 ニュートリノG

(小林隆、田中雅士、西川公一郎、
長谷川琢哉、丸山和純)

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 (ρ_l/ρ_g) | 784 | 641 | 519 |
| Fano Factor | 0.107 | 0.057 | 0.041 |
| Drift Velocity (mm/ μ sec) @ 1(5) kV/cm | 1.8(3.0) | 2.4(4.0) | 2.2(2.7) |
| Mobility (cm $V^{-1}s^{-1}$) | 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 | 1.24(visible) | 1.41 | 1.60 |
| Dielectric constant | 1.51 | 1.66 | 1.95 |

電離電子

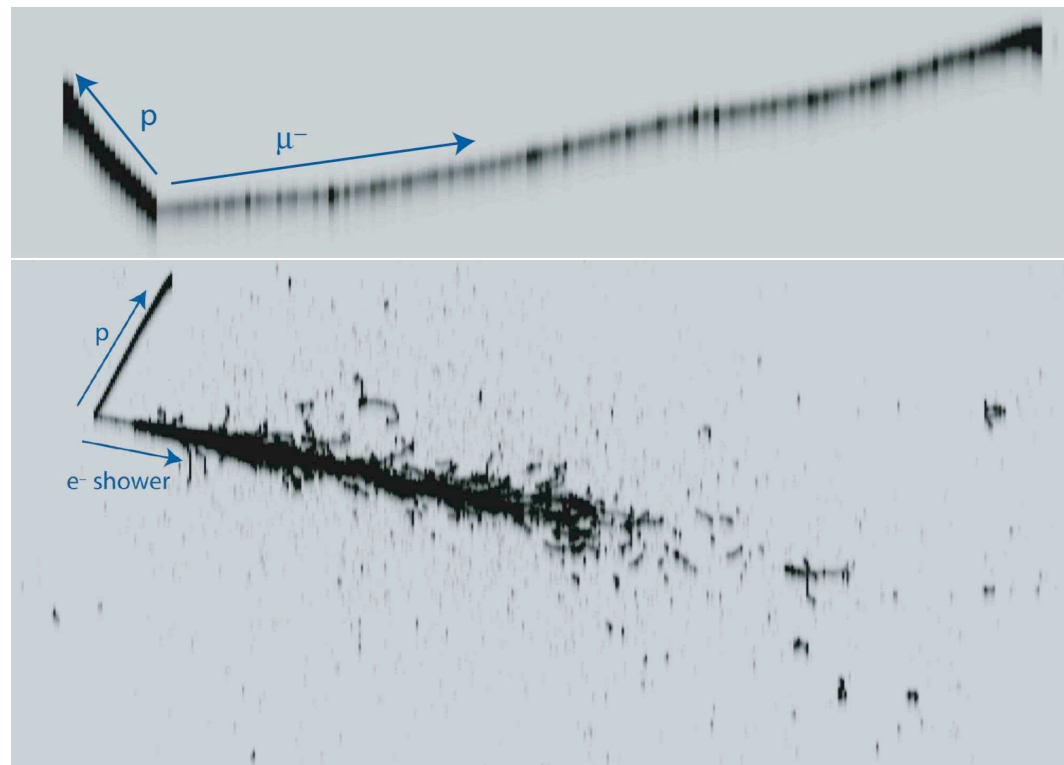
シンチ光

チェレンコフ光

共通の特徴

1. **電離電子** : TPCによる3次元位置と dE/dX
3次元イメージング (泡箱イメージ)
軌跡に沿った dE/dX による粒子の識別
2. **シンチレーション光** : 130nm(Ar)と175nm(Xe)
精密な時間情報
3. **チェレンコフ光** : エネルギー・速度の閾値
荷電粒子の識別

LAr-TPC



Typical ν_μ and ν_e QE event in liquid Argon detector ($\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$ and $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$).

LXe-TPC

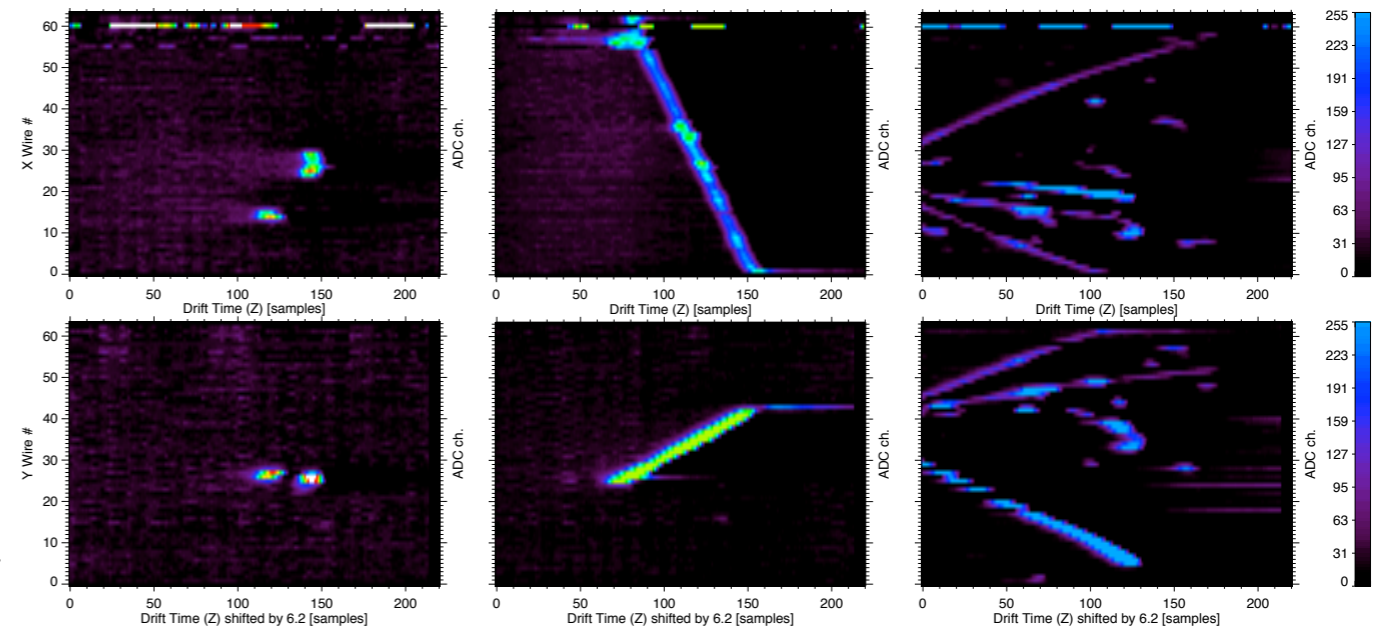


Figure 5.7: “Snapshots” of three different events in the LXeTPC recorded during the balloon flight in year 2000; for each of them the X-Z view and the Y-Z view are shown. *Left*: a 2-site γ -ray interaction. *Center*: a relativistic particle passing through the fiducial volume. Several δ -rays are visible in the X-Z view. *Right*: a more complex interaction with several particles detected in the fiducial volume. The vertex happens below the fiducial volume, i.e. at $Z < 0$.

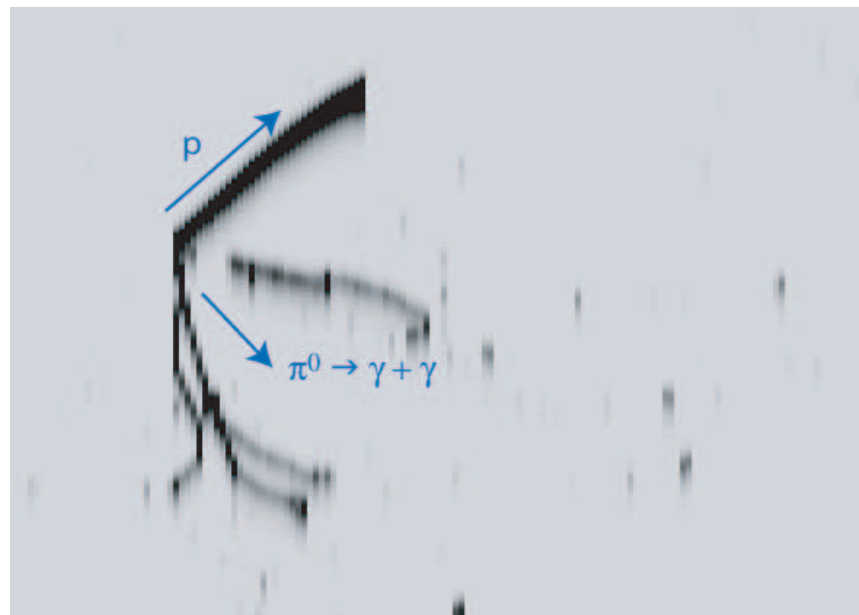


FIG. 7: Typical ν_μ NC event in liquid Argon detector ($\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p + \pi^0$).

A. Curioni, Dr Thesis, Columbia univ. 2004
(LXeGRIT)

A. Bueno et al., hep-ph/0701101v1
(ICARUS T600)

共通技術開発項目

1. 液化システム：84K (Ar) と 162K (Xe)

2. 純化システム：< 0.1 ppb；

例) 電離電子ドリフト減衰長 > 4m

3. 電離電子の検出：液中、ゼロ増幅

例) W-value = 23.3eV (Ar), 15.6eV (Xe)

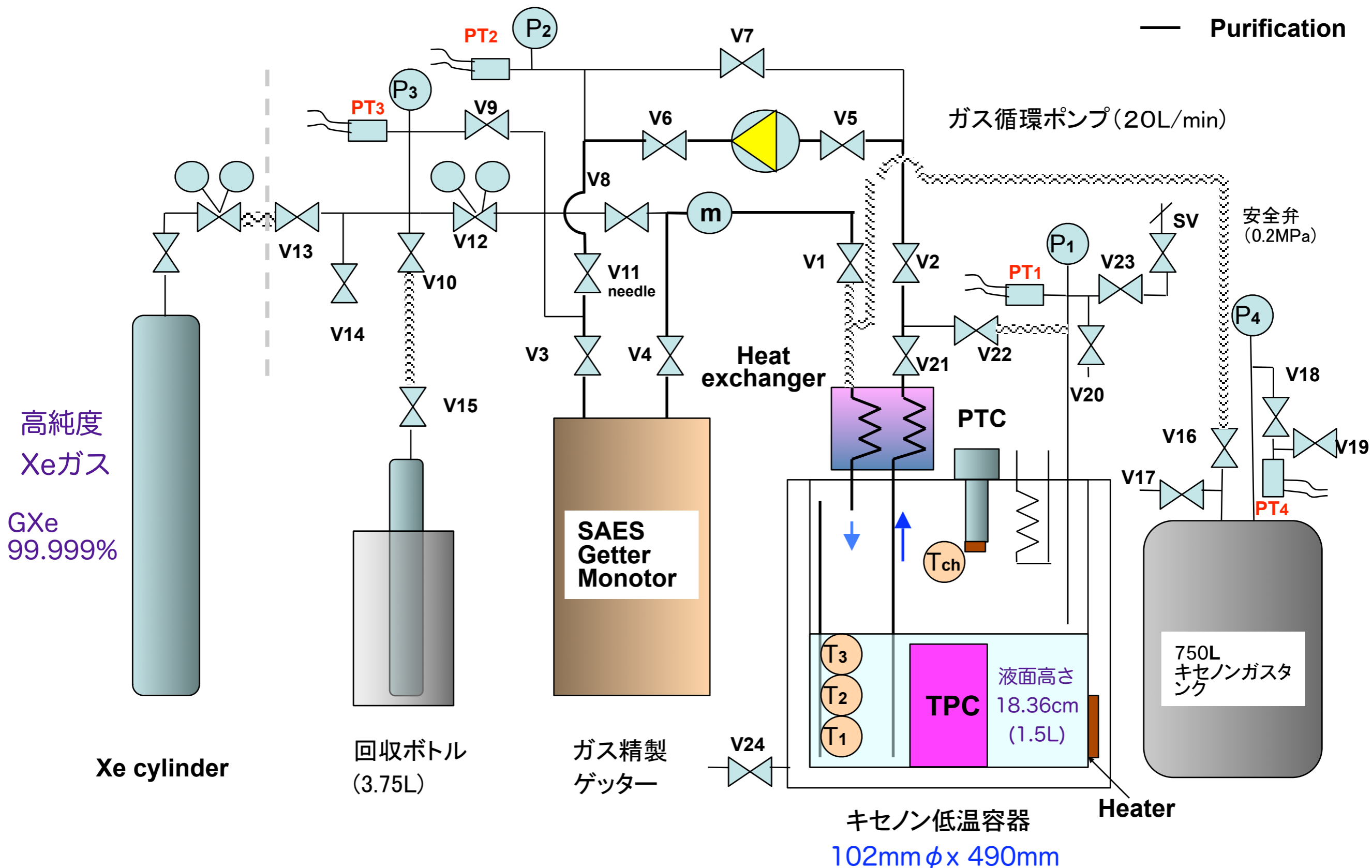
電子数/MeV = 43,000 (Ar), 64,000 (Xe)

4. 超低ノイズのアナログエレクトロニクス

LXeTPC : 液化・純化システム

June 2008

オイルフリー・ダイアフラムポンプ (エノモト) によるガス循環精製



LXe Cryogenic system at KEK

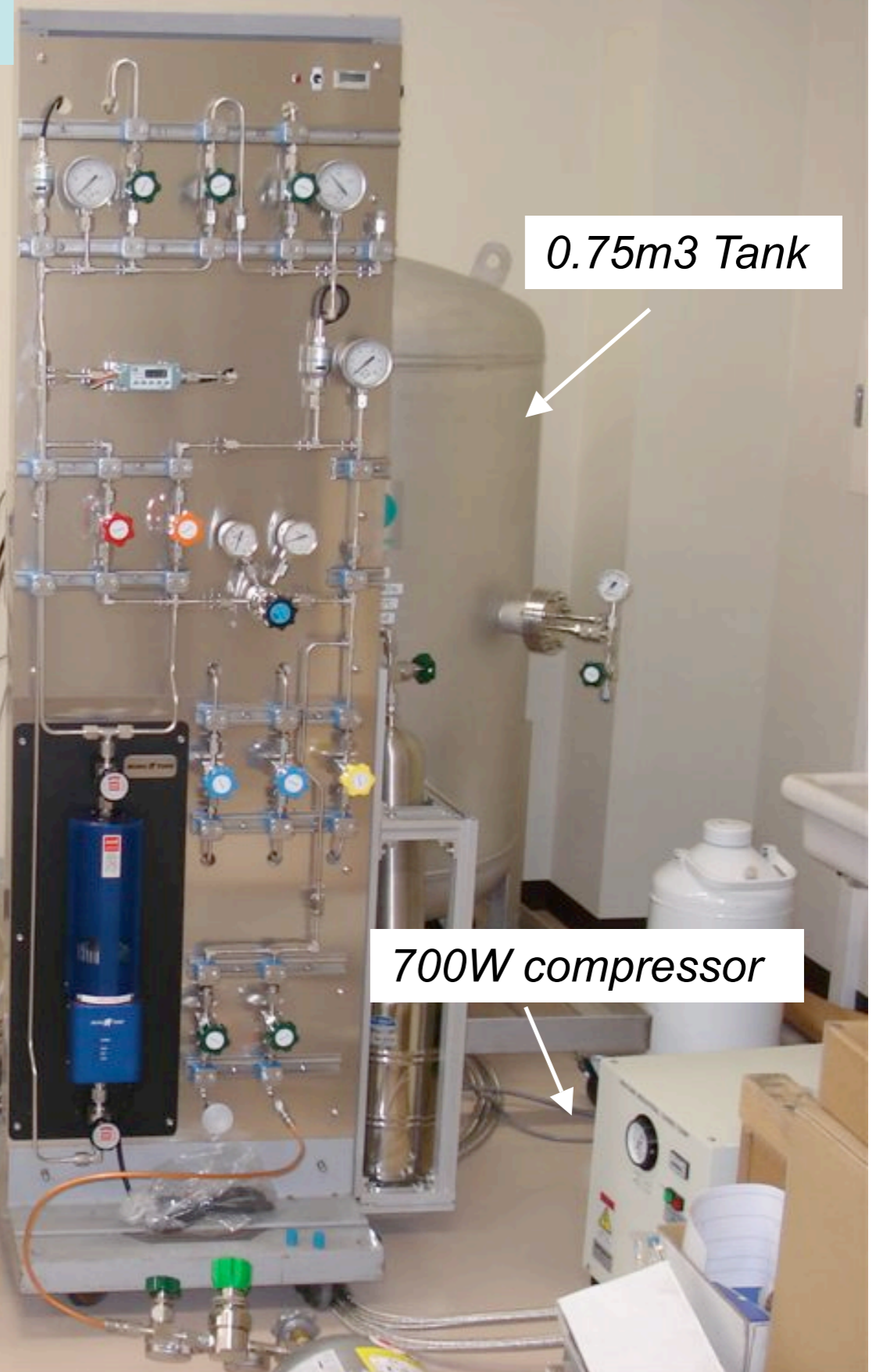
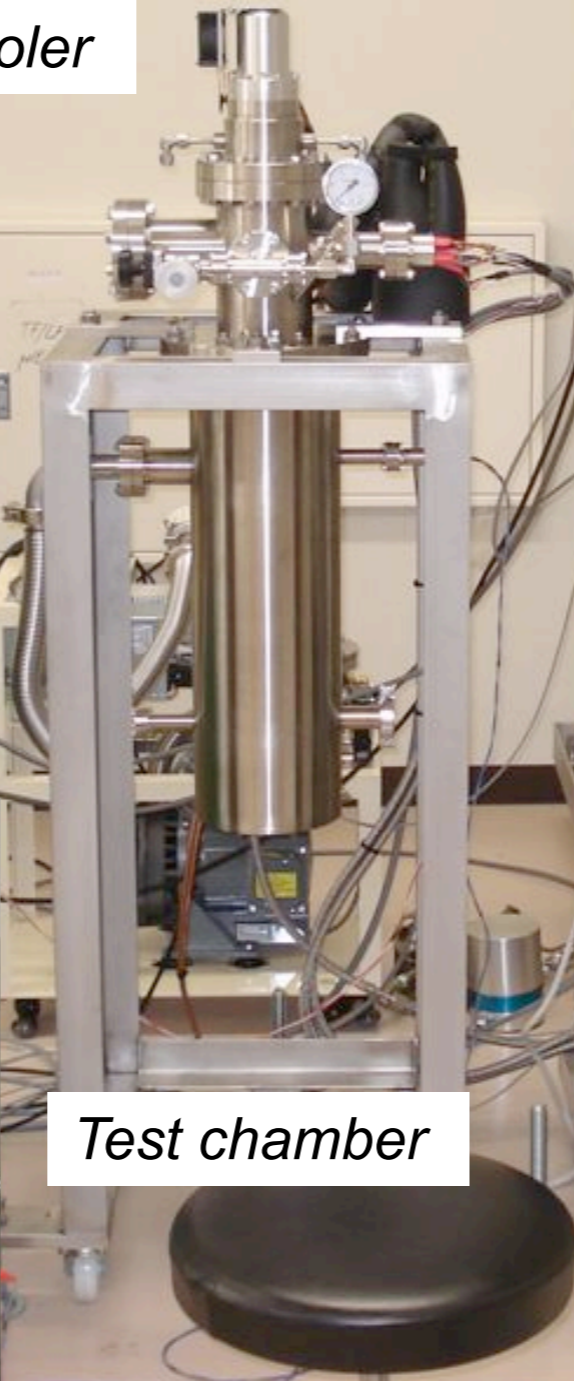
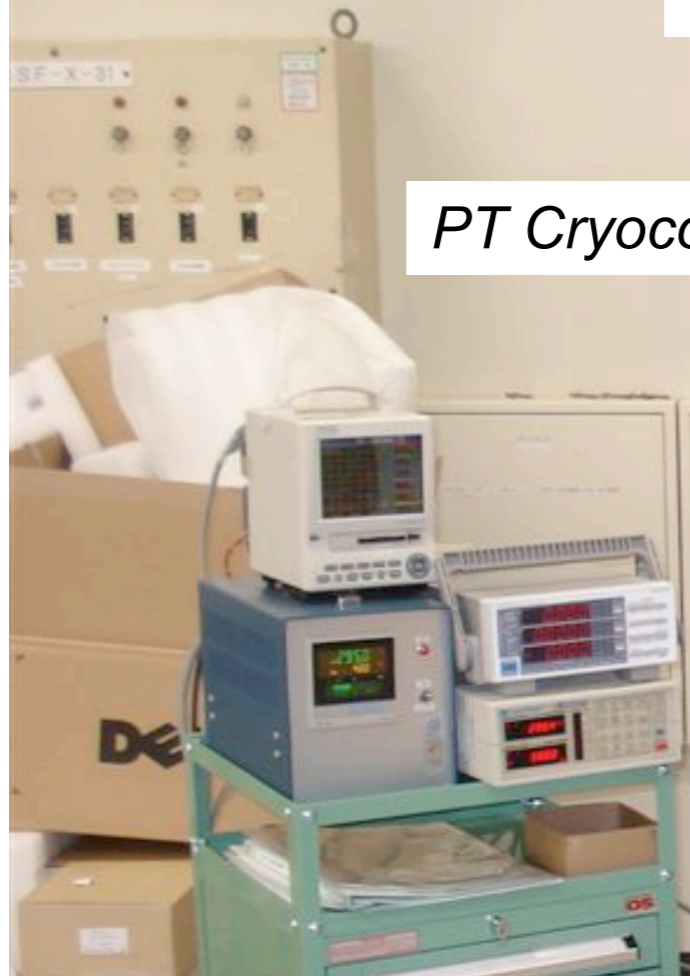
Gas handling panel

PT Cryocooler

0.75m³ Tank

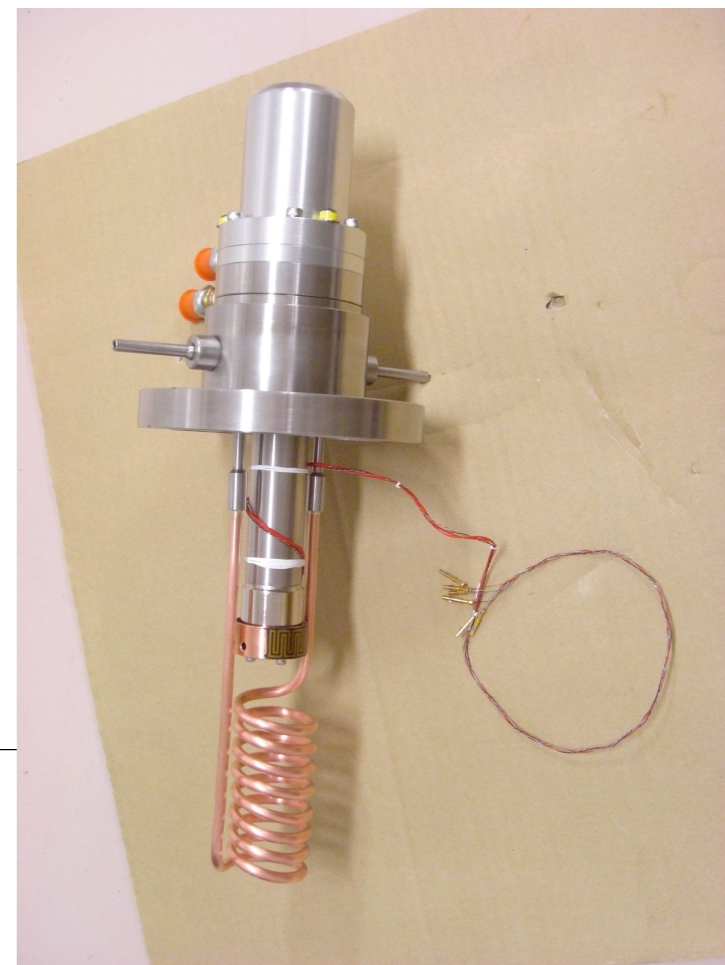
700W compressor

Test chamber

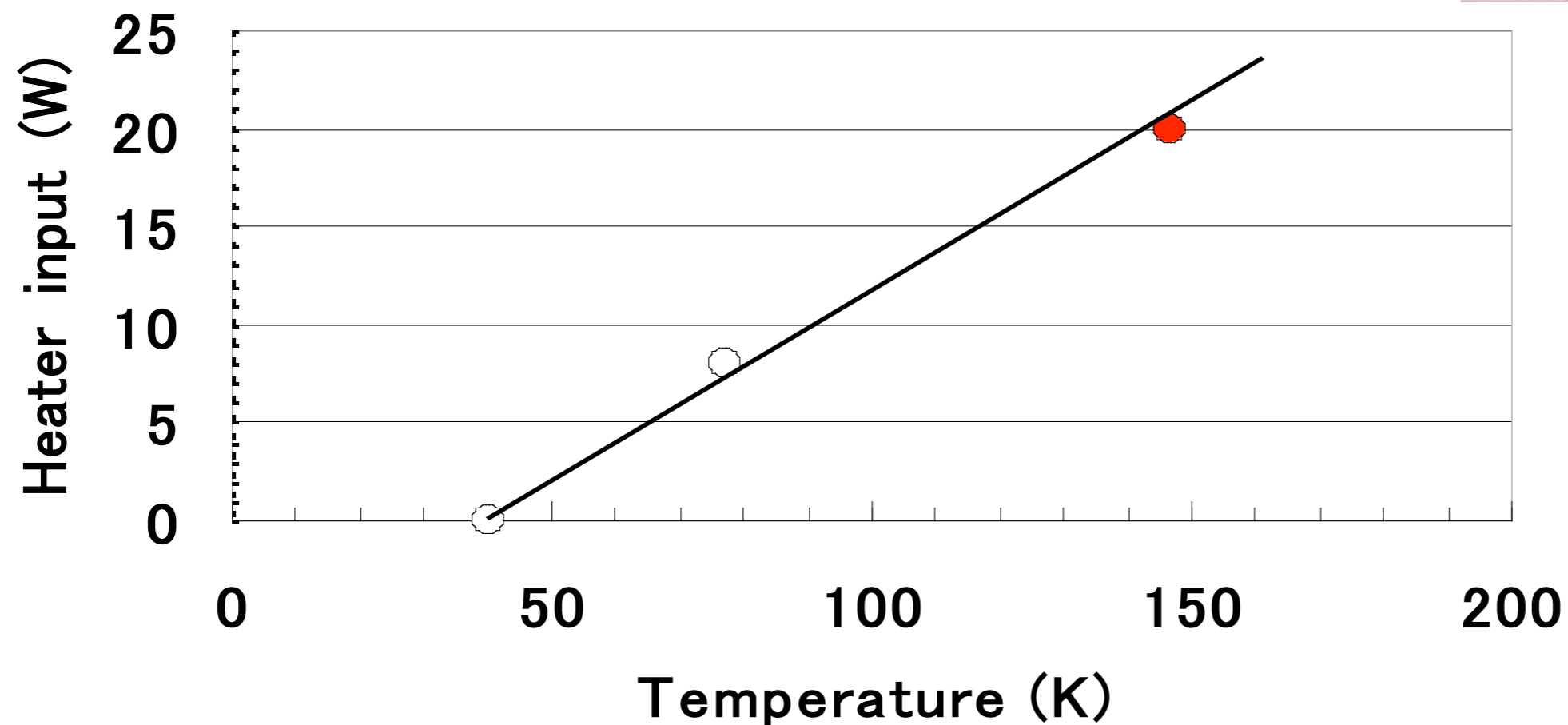


Cooling test of miniature PT Cryocooler

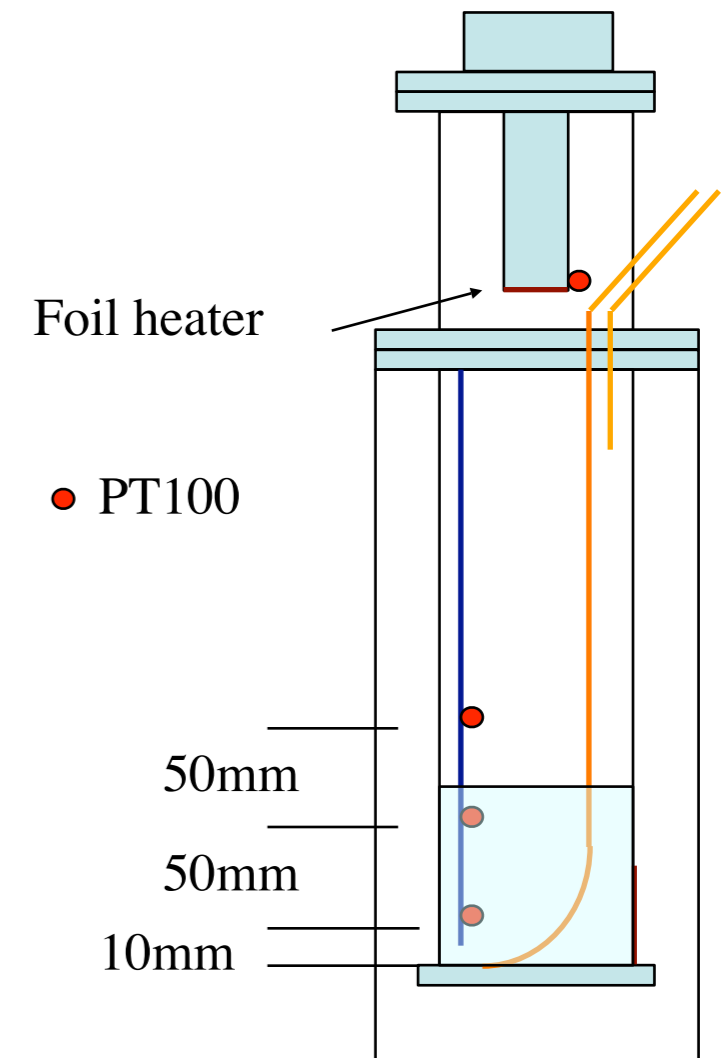
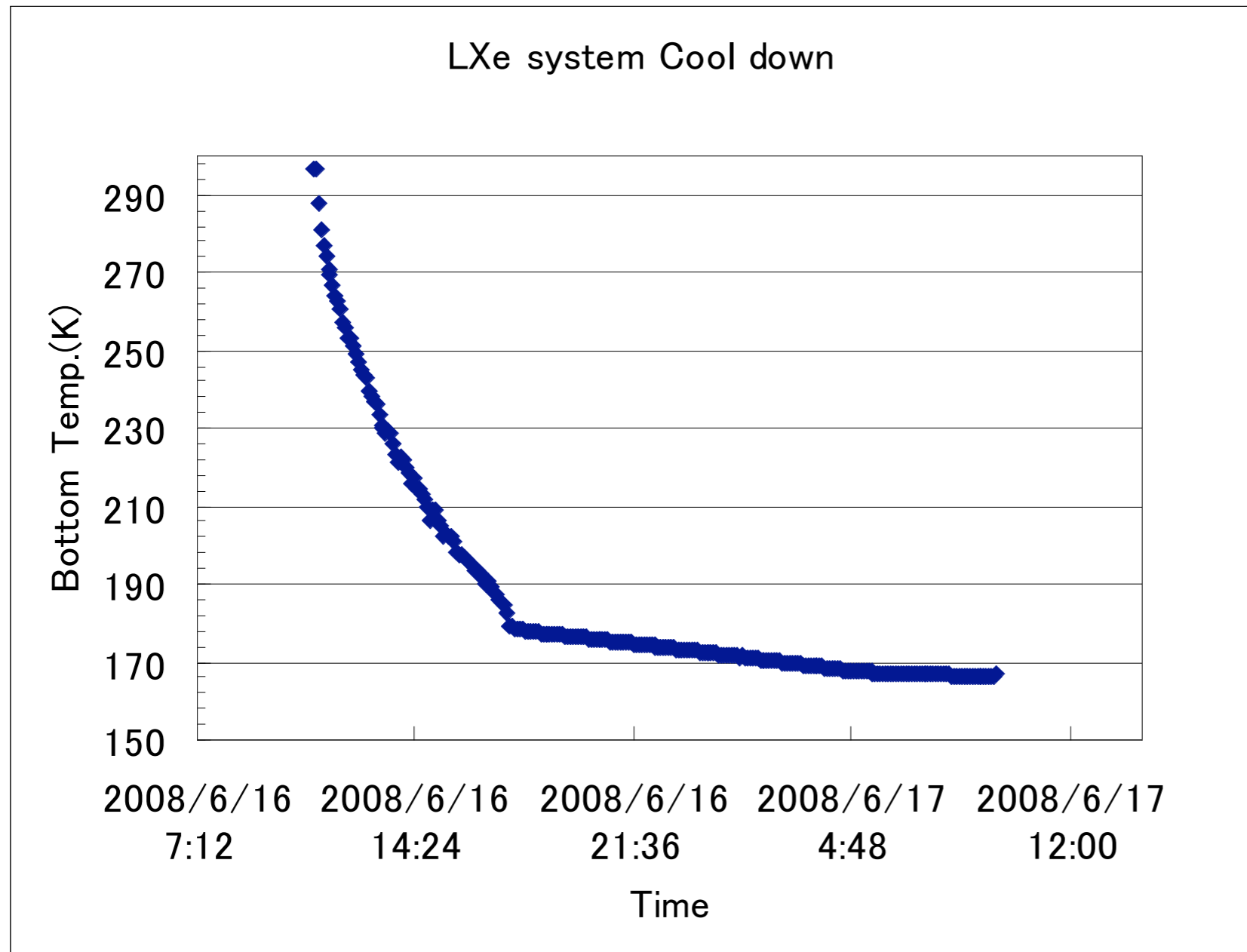
- PTR PDC08(8W at 77K:Iwatani)
- Air cooled compressor (700W at 50Hz)
- 20W at 147K confirmed → **24W at 165K**



Cooling Power PDC080 08/04/30



Cooling, Liquefaction, Pump circulation test

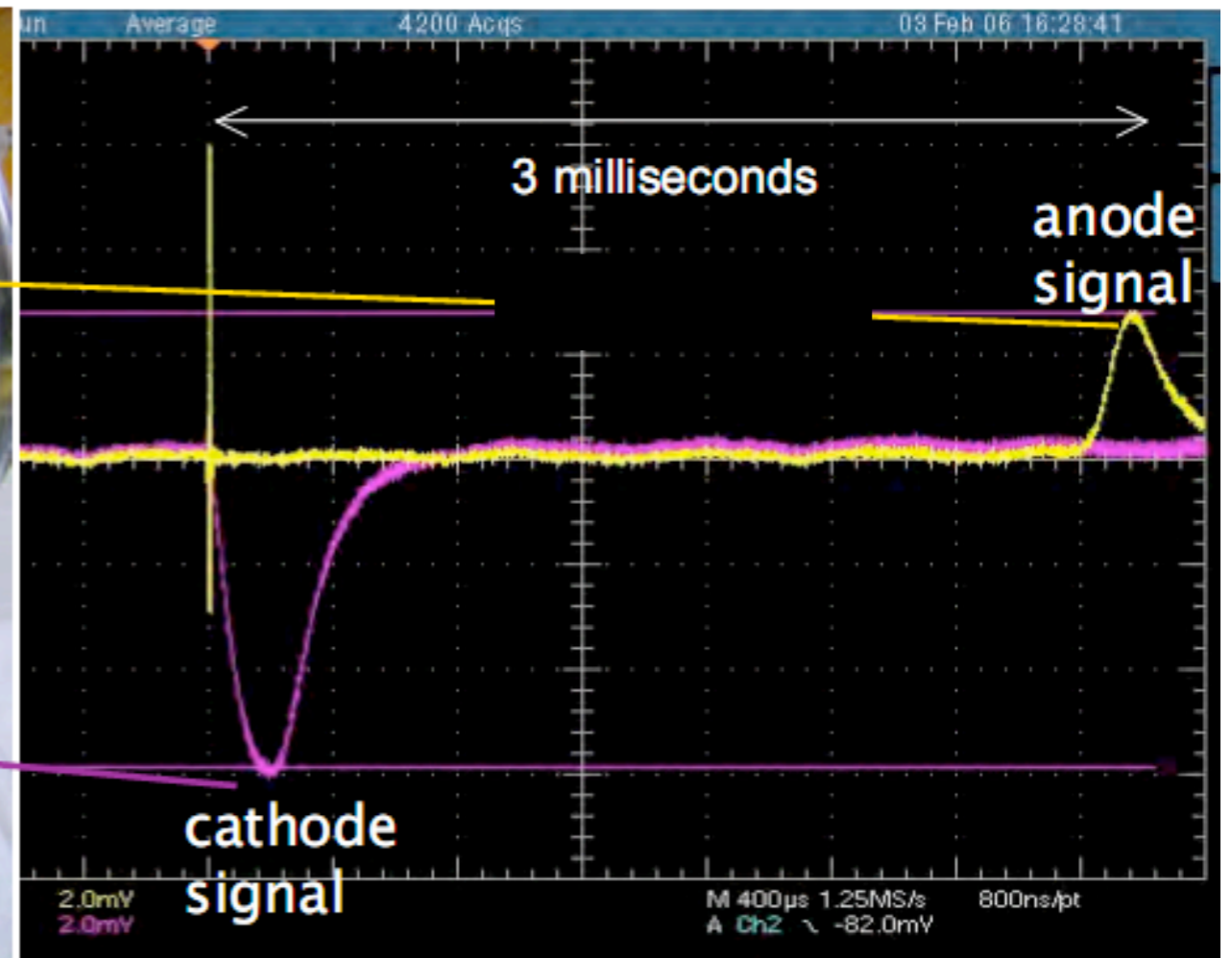
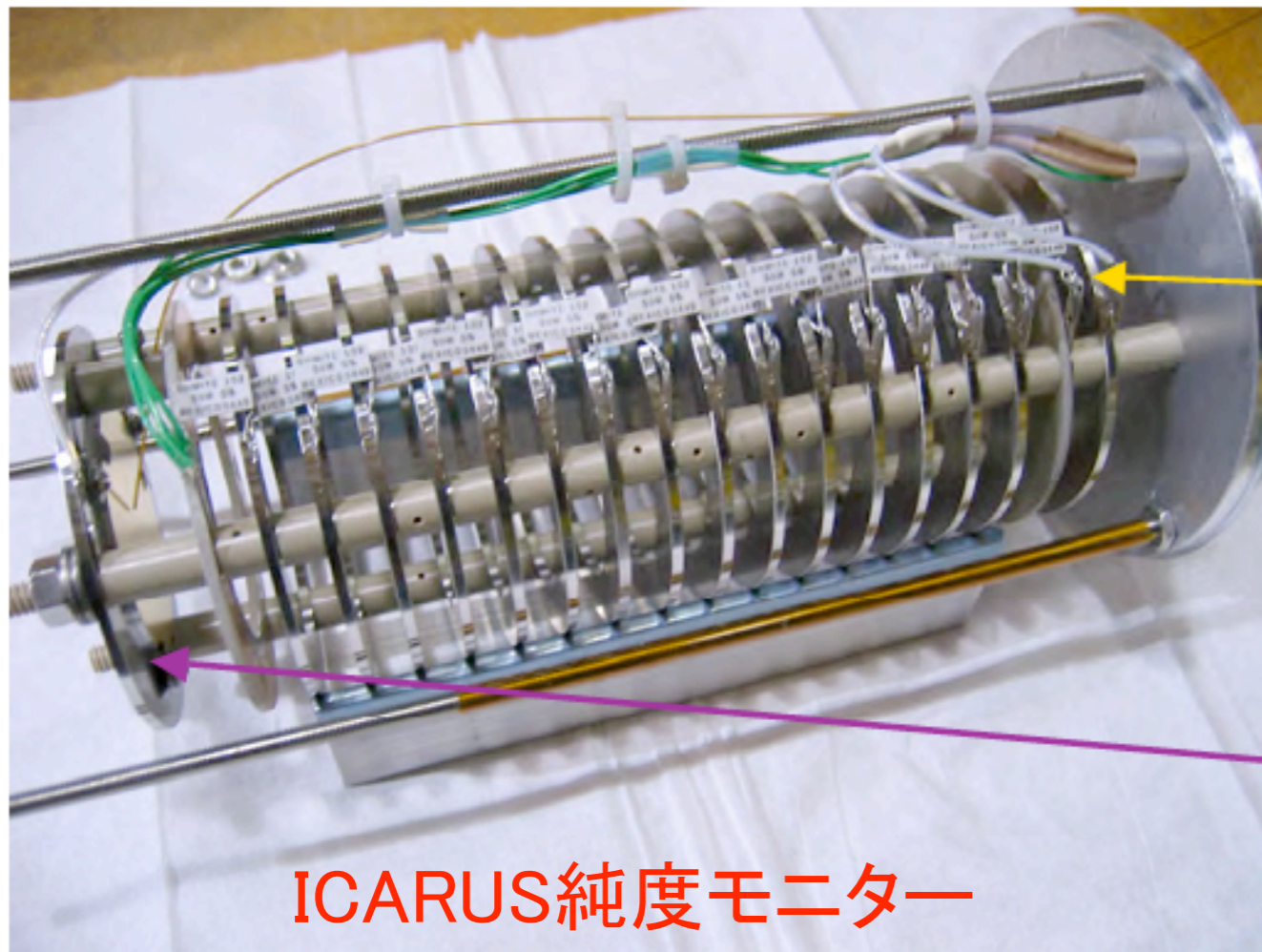


Results:

- 19 hrs for 1.2L liquefy by PT cryocooler only
- $\sim 0.16\text{L/h}$ liquefaction speed
- $\sim 2\text{ L/min}$ of pump circulation for purification

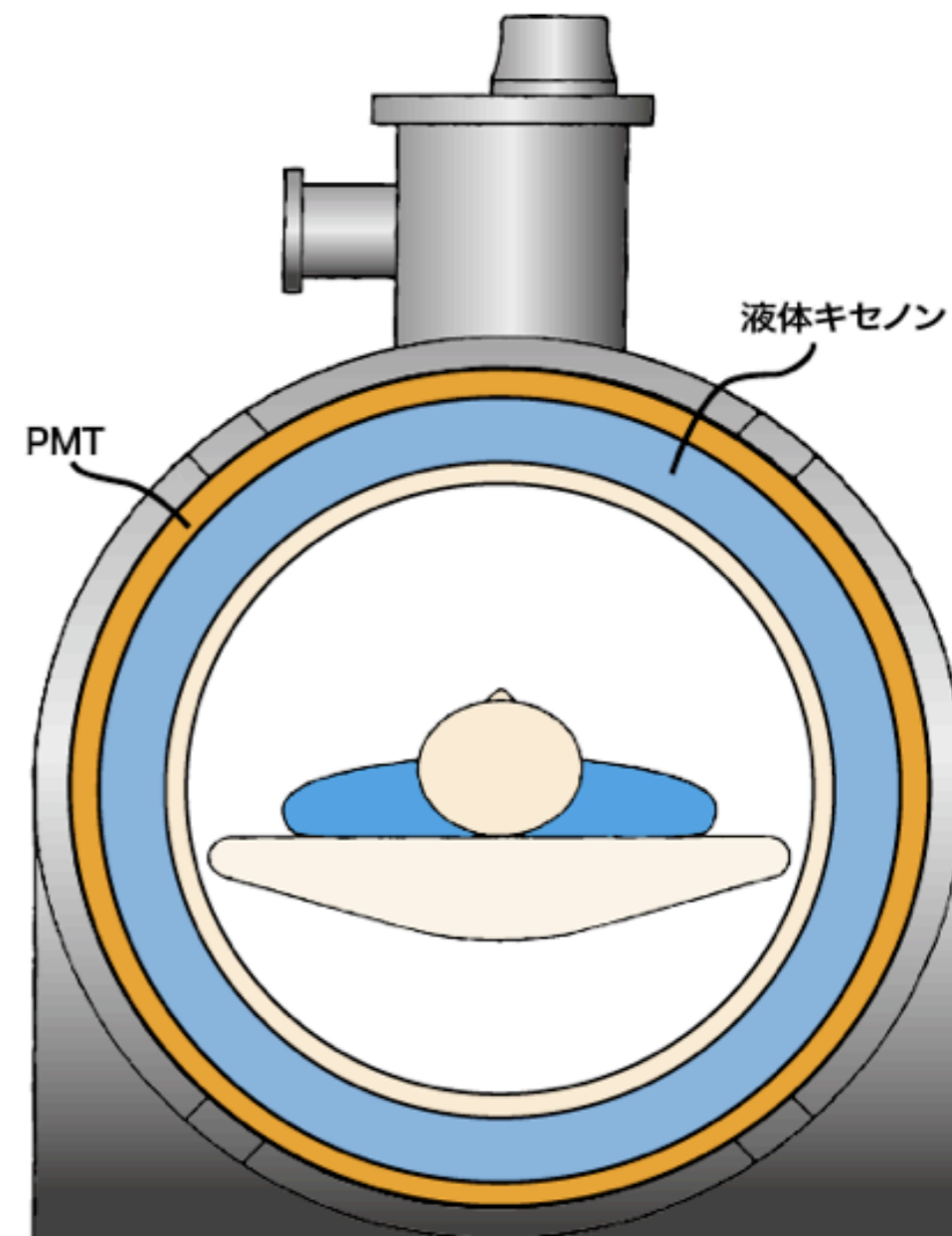
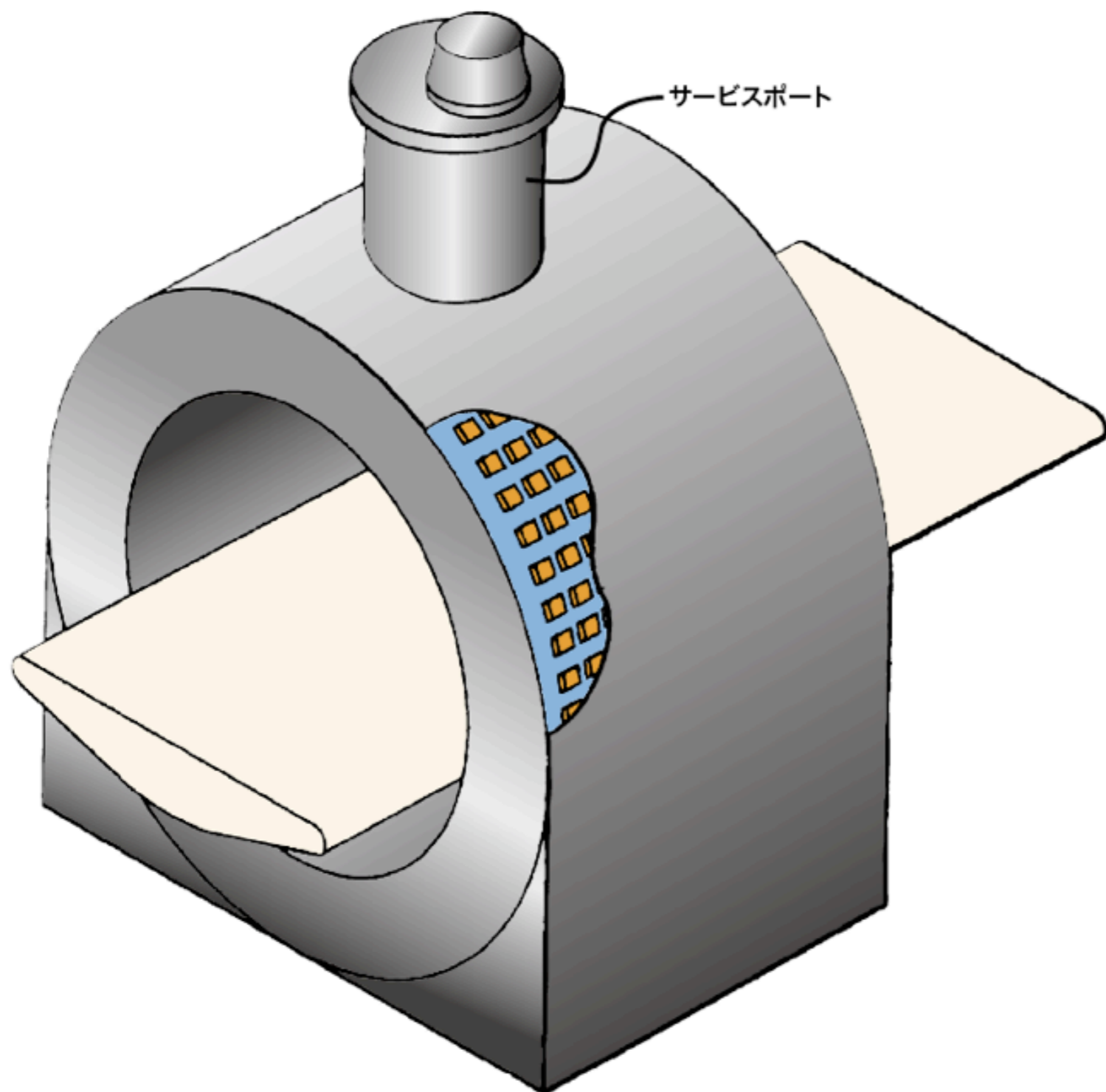
LArTPC：純度モニターシステムの開発

- カソードに置いた光電面に光をあて、大量の光電子を発生させる
- この光電子をドリフトさせてアノードから読み出す。
- カソードとアノードの信号から
 - ドリフト電子の減衰＝純度
 - ドリフト速度



LXeTPCを用いた次世代PET

TXePETイメージ



TXePET : 分割の無い液体キセノンTPC

液体Xe : 140 ℓ , 88cm内径, 48cm FOV, 9cm DOI (93% γ 線検出)

光電子増倍管: $8 \times 112 \times 2 = 1792$ 本 TPC : 電場 48kV/24cm

位置分解能(FWHM) = 2cm

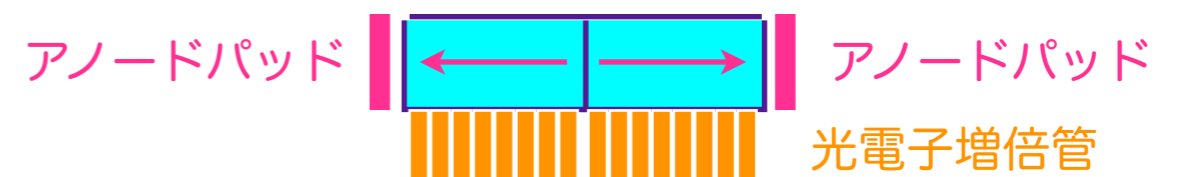
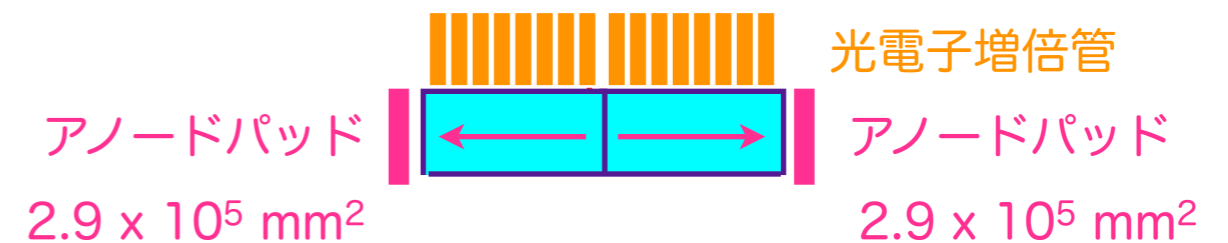
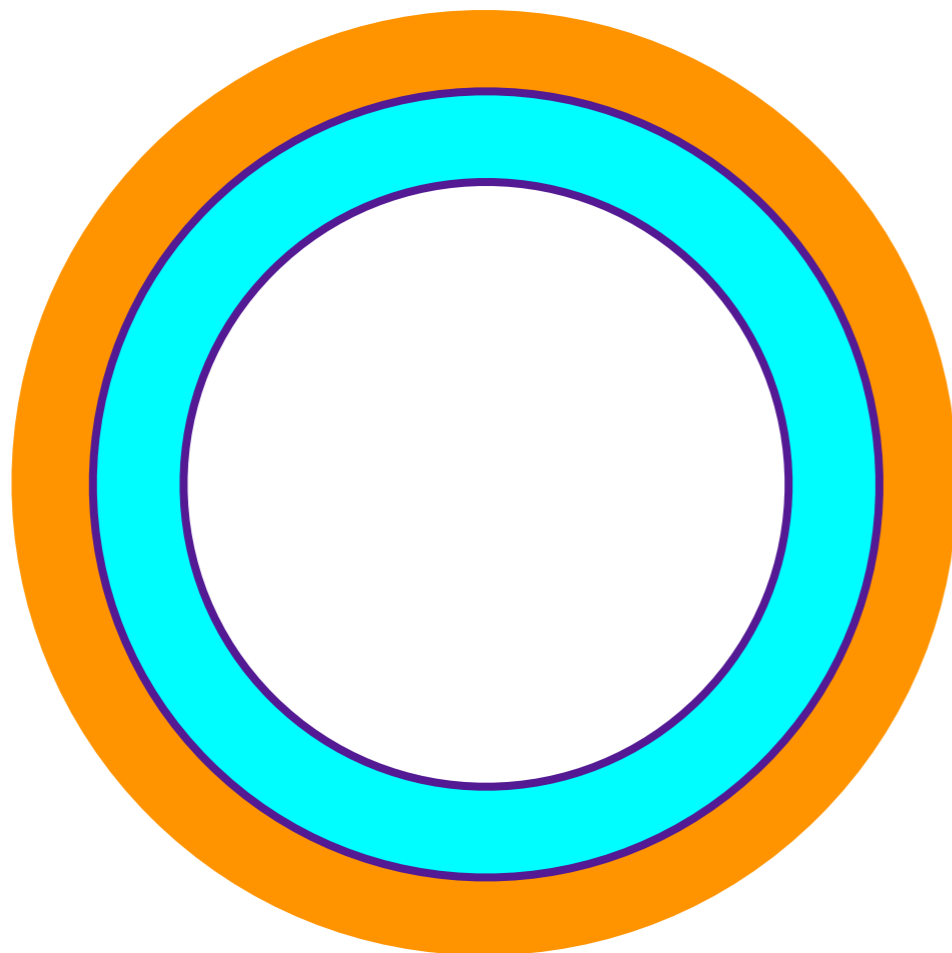
同時計測時間 = 10 nsec

TPCへのタイムスタンプ

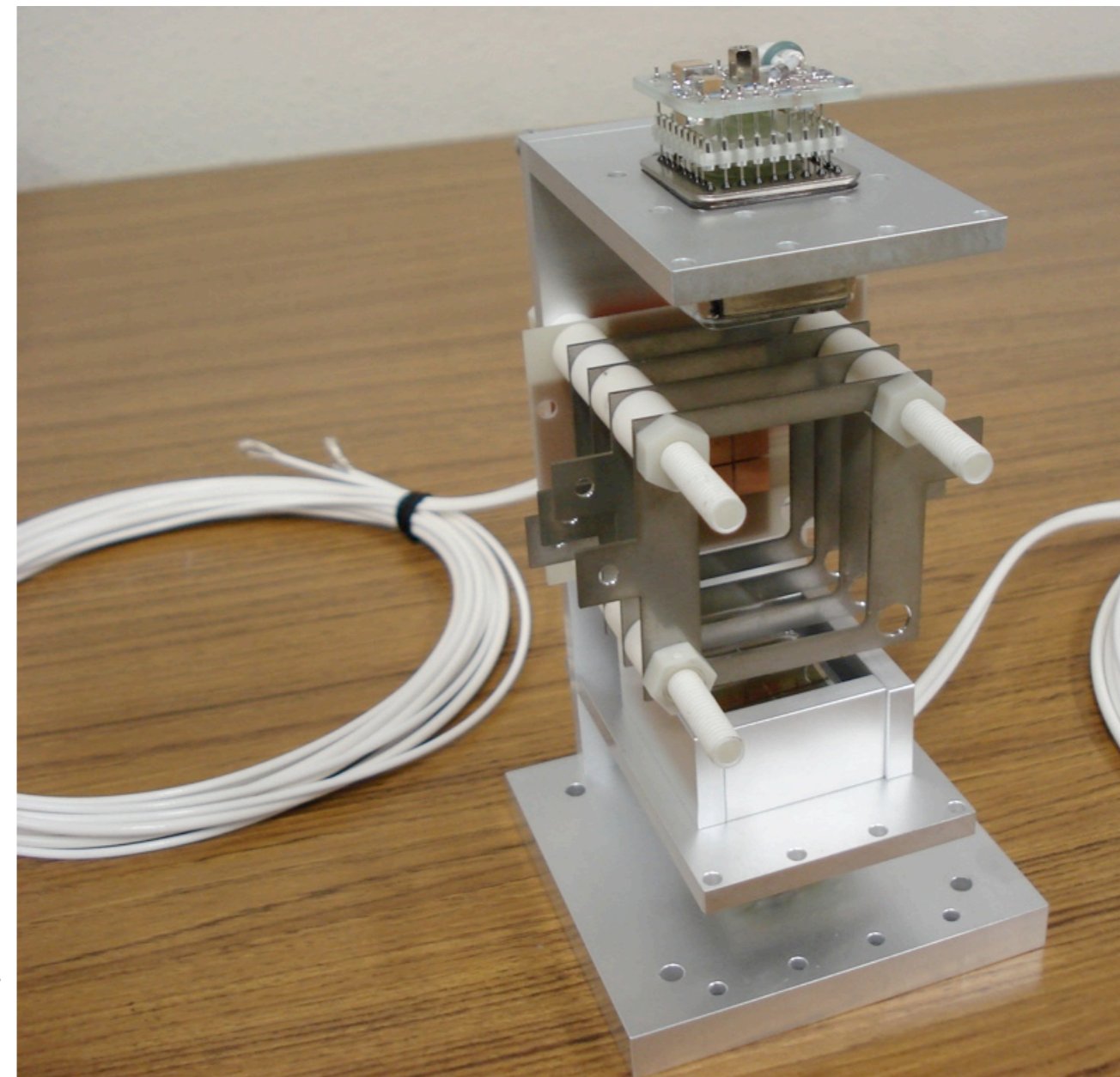
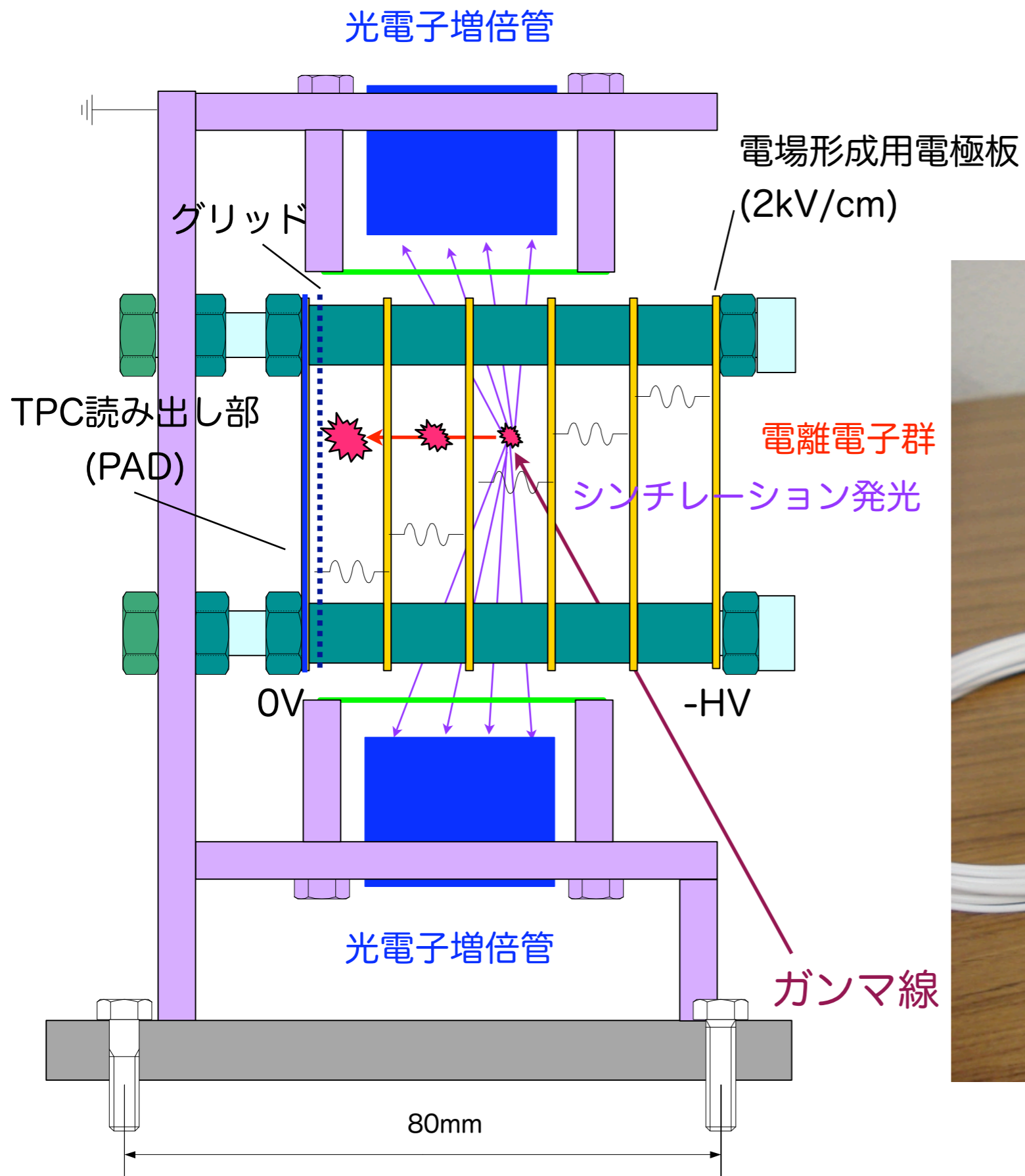
ドリフト時間 : 104 μ sec/ ± 24 cm

(ドリフト速度 : 2.3mm/ μ sec)

不感時間の無い読み出し



LXeTPC : プロトタイプで原理実証



Tek



Trig'd

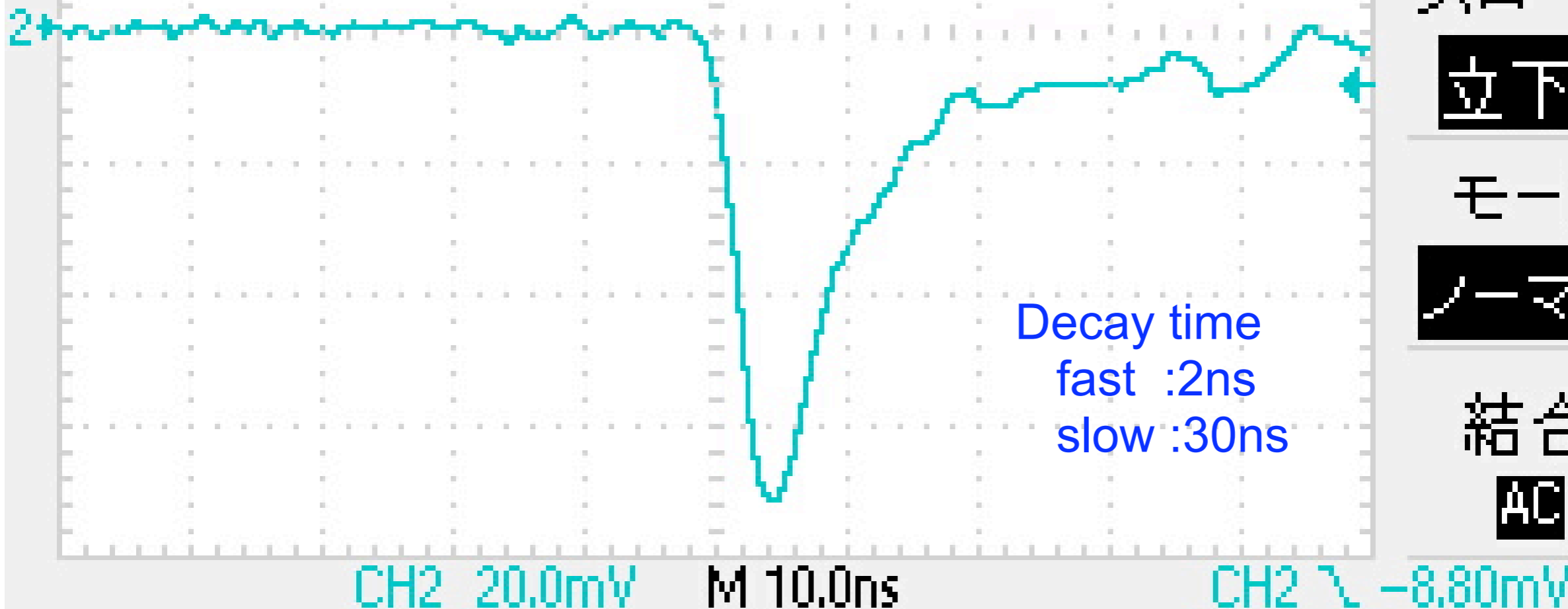
M Pos: 0.000s

TRIGGER

LXeTPC : シンチレーション光

α 線(^{241}Am , 5.49MeV)

R5900-06AL12S-ASSY in liquid Xe



Decay time
fast :2ns
slow :30ns

項目

エッジ

ソース

CH2

スロープ

立下

モード

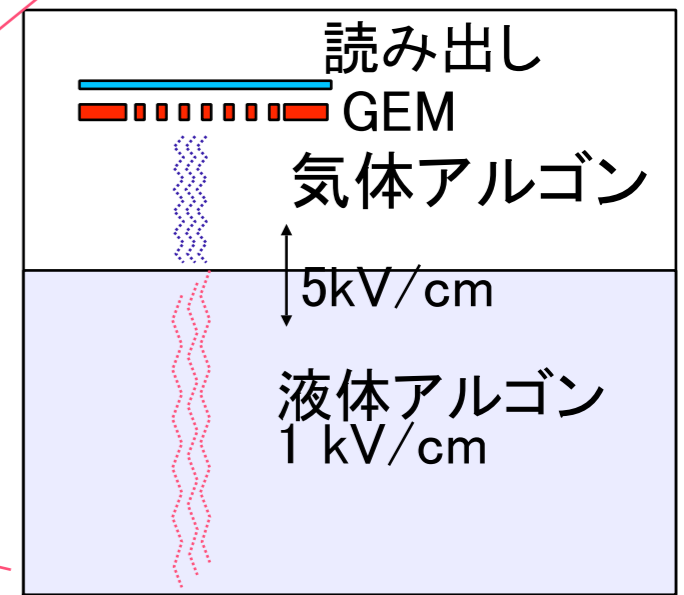
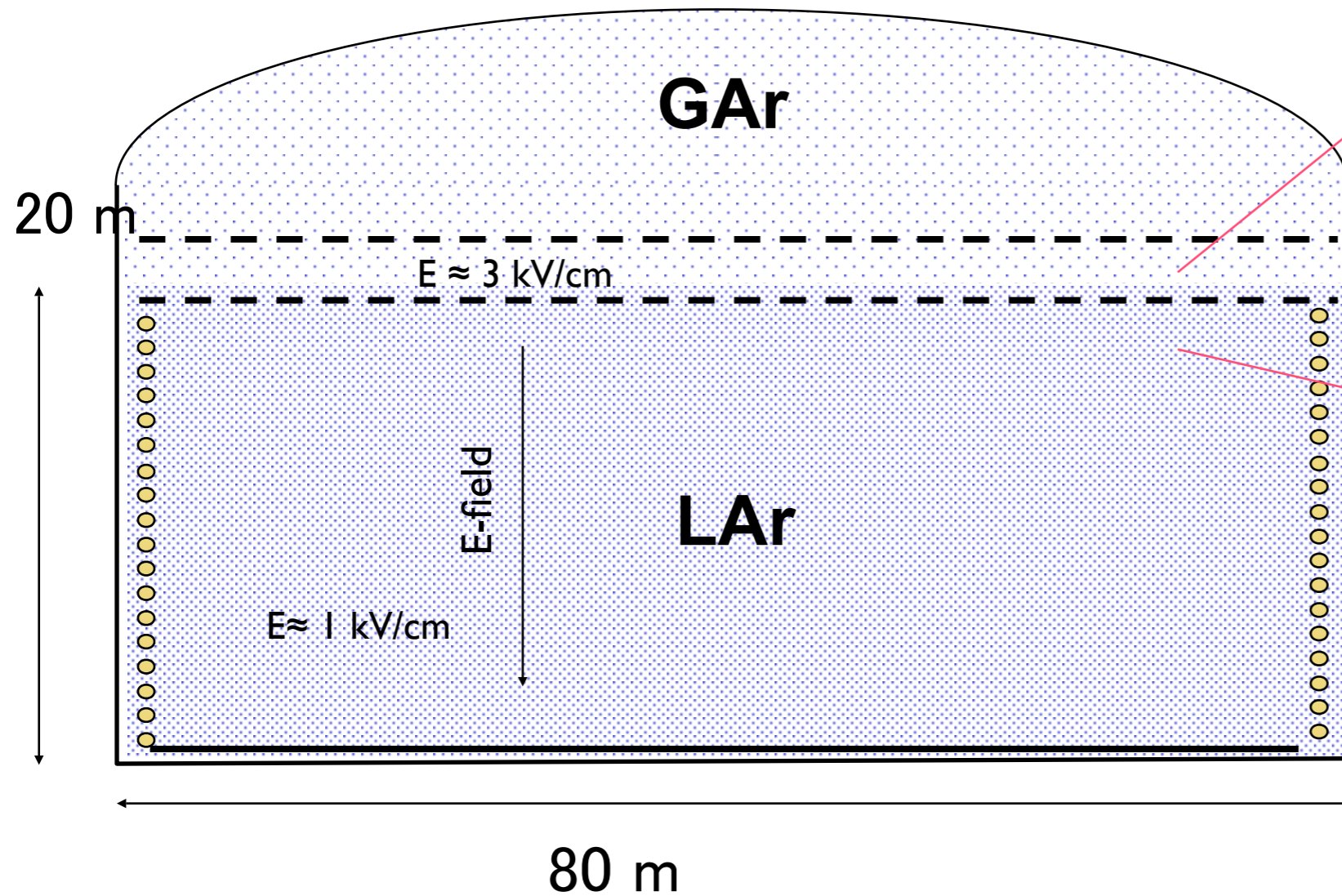
ノーマル

結合

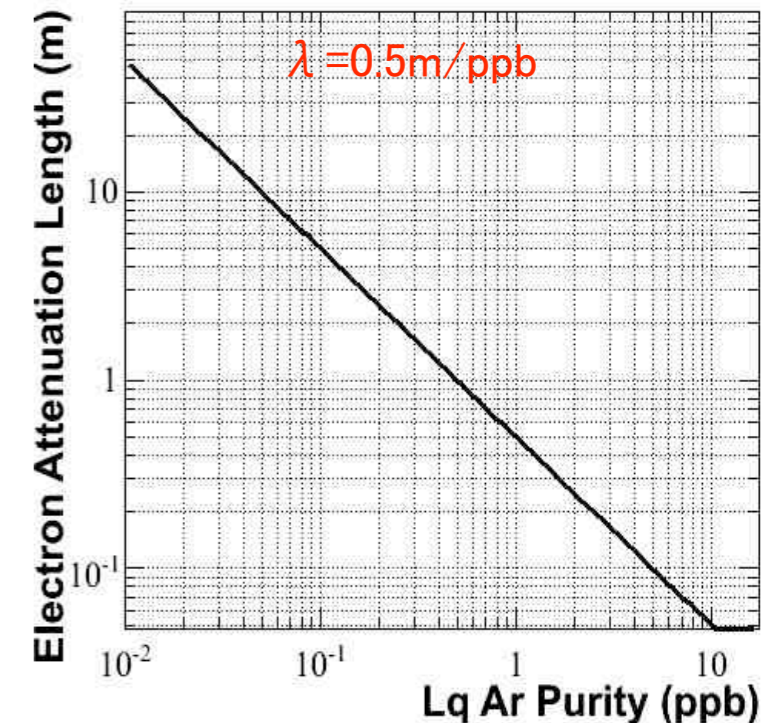
AC

現在の画面表示はA:\TEK0116.JPGに保存されます

LArTPC : 100kt検出器のイメージと研究開発



長距離のドリフトでは
信号が減衰
→ 二相読み出し



R&Dリスト:

電離電子読み出しデバイス、エレキ

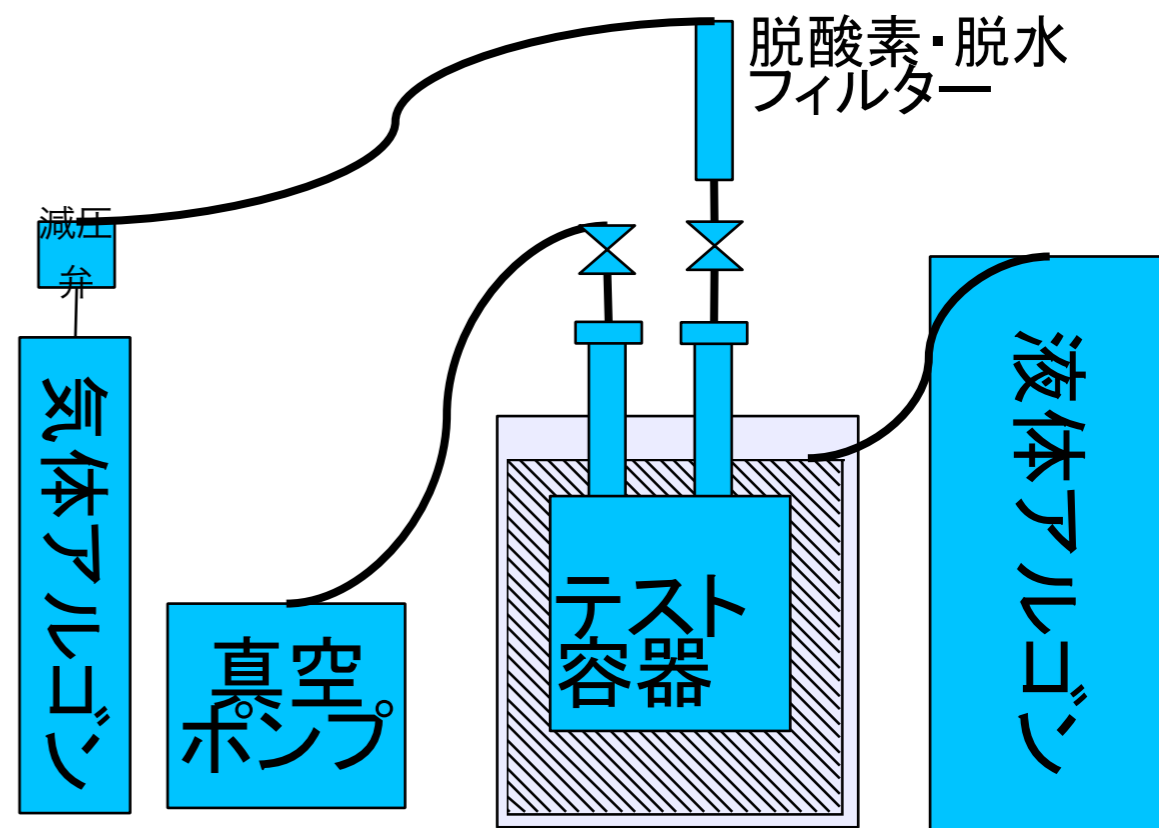
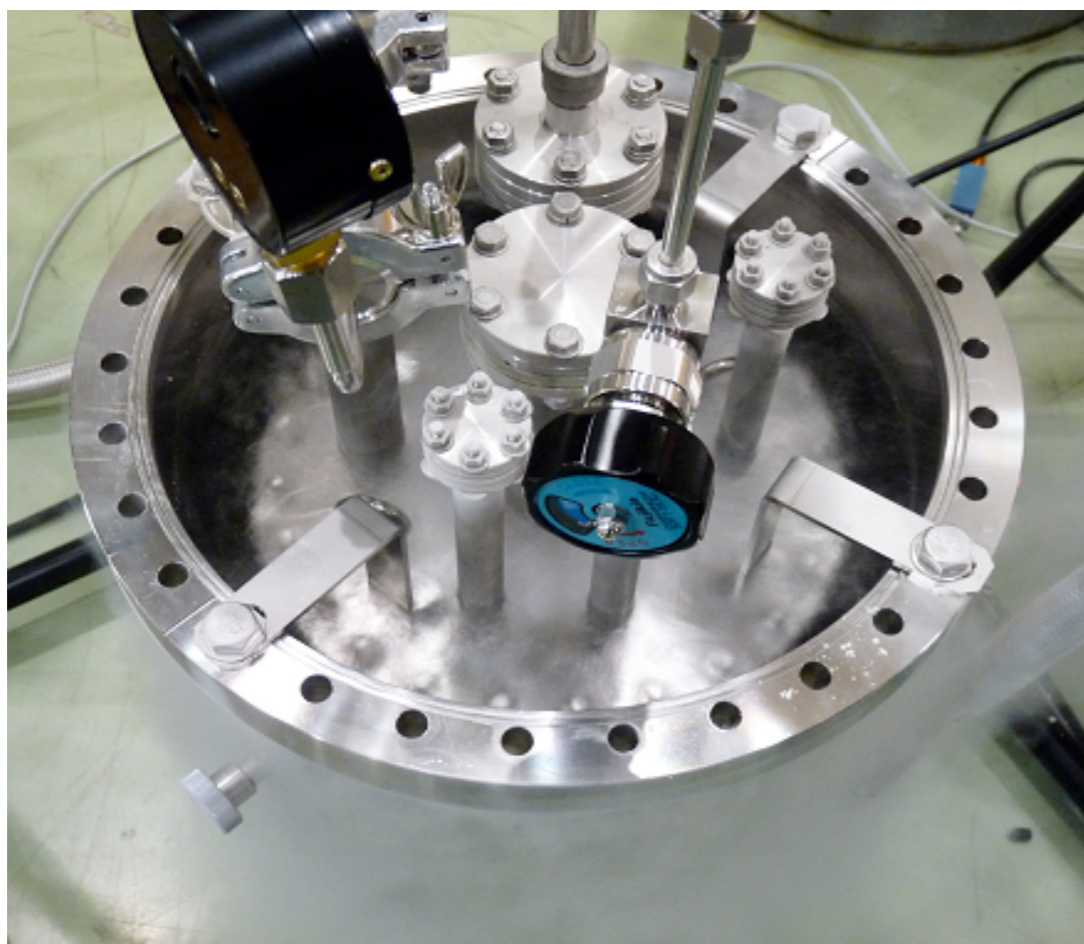
大型容器、アルゴン純化システム、低温装置、高電圧電源

シンチレーション光、チェレンコフ光の読み出し

解析テクニック、。。。

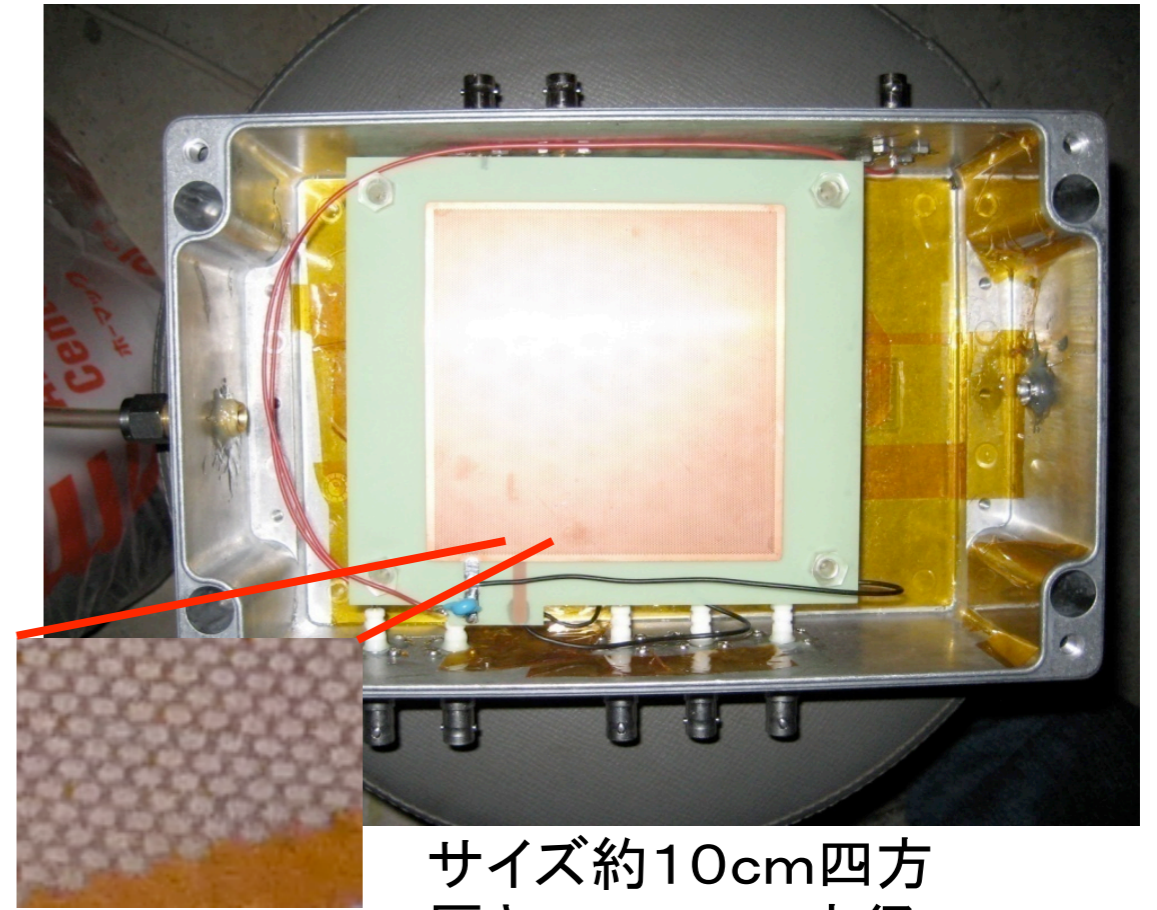
LArTPC : アルゴン純化・液化システム

- 気体アルゴンをフィルターで純化
- 20 cm ϕ \times 25cmテスト容器
- テスト容器を液体アルゴンで冷却することにより気体アルゴンを液化
- 現状
 - ➔ 約1リットル/hの液化能力を確認
 - ➔ 真空性能を評価中

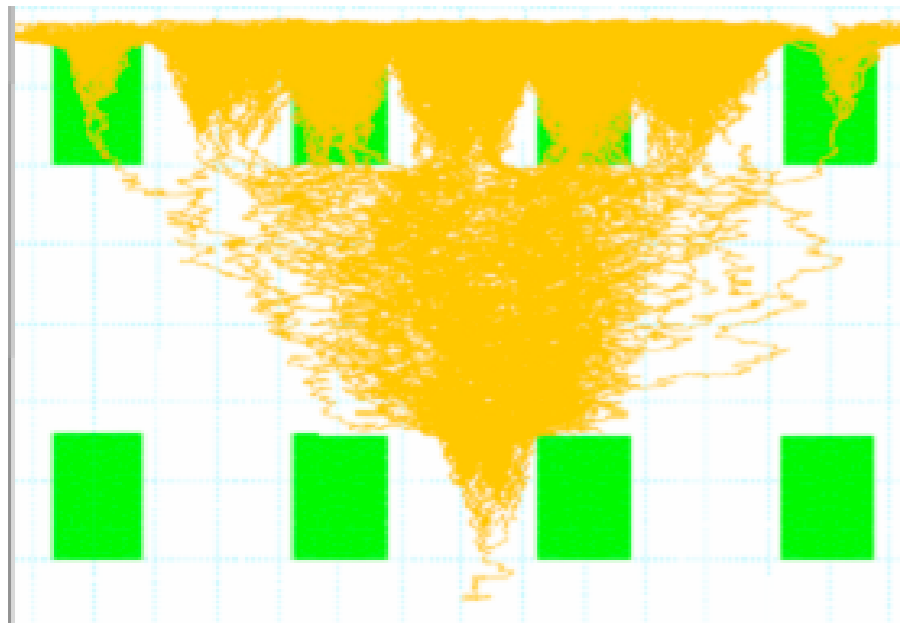


LArTPC : GEMの基本特性の研究

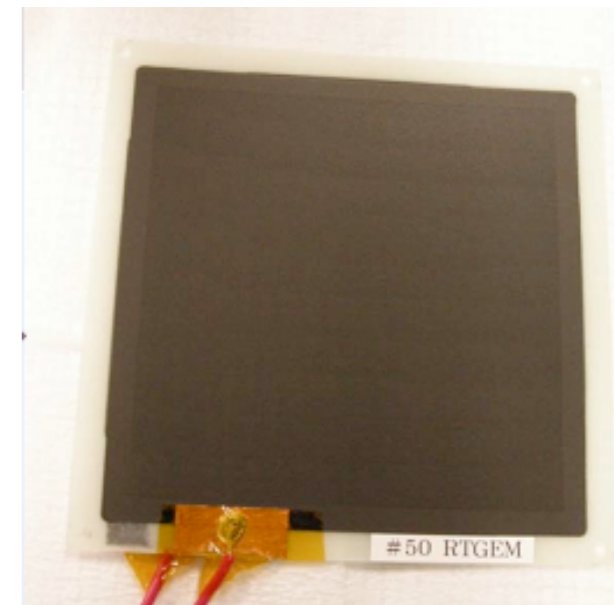
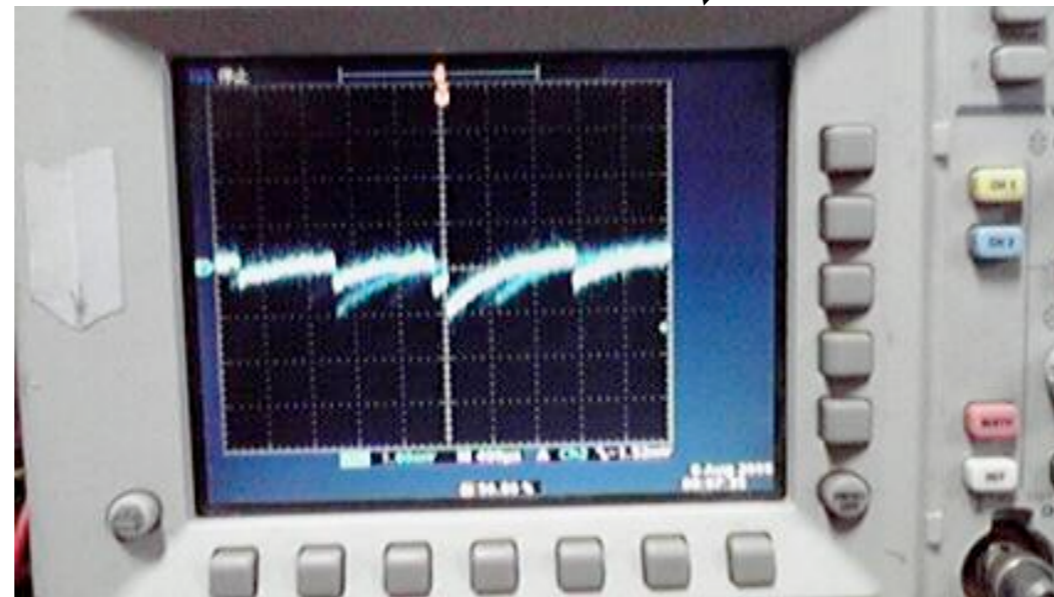
- 林栄精器製 厚型GEMを用いた研究をはじめている
 - 気体アルゴン中でAmからの α 線の信号を読み出し
- R&Dアイテムとして
 - 低温下での特性評価
 - GEM素材・サイズの最適化
 - 印加電圧・配置の最適化



サイズ約10cm四方
厚さ400 μm 、穴径300 μm
穴間隔700 μm



GEMを二枚重ねた場合の増幅シミュレーション



カーボン製電極のGEM

まとめ：知識の共有で共同研究

LXeTPC：2007年度よりスタート

- 原理実証のためのプロトタイプ研究
- PT冷凍管による液化・純化システムの完成・運転
- 電離電子信号の検出：1相、PAD読み出し
LXe中、プリアンプ(A250, 1V/pC)設置;ノイズ対策
ASICチップ設計・試作
- シンチレーション光：PMTの量子効率向上の検討

LArTPC：2008年 夏よりスタート

- 基礎技術の立ち上げ段階：テストスタンドの構築
- 電離電子信号の検出：2相、GEM読み出し(当面)
- 次のステップとして1トン程度の試験検出器の設計も考えている