

液体キセノンTPCによる
高分解能ガンマ線検出器の
開発研究（提案）

測定器開発室報告会2007、4月10日、KEK
田内利明、KEK

現在のメンバー

KEK：冷凍・純化システム、PMTシステム、テスト

田内利明、真木晶弘、春山富義、田中秀治、幅淳二

佐賀大：TPC、TPCシミュレーション、テスト

杉山 晃

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

協力支援：KEK素核研回路室、田中真伸氏

本研究の目的

keV-MeV領域のガンマ線の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

1keV : コヒーレントニュートリノ

10keV : ダークマター

100keV : 太陽ニュートリノ

数1-keV ~ 300keV : SPECT

500keV : PET

2.48MeV : ダブル β 崩壊 (Xe中)

液体キセノンの特性

γ 線や荷電粒子の通過でシンチレータ光と電離電子が生成される

シンチレータ光 (蛍光)

正確な時間, エネルギー, 位置
光電子増倍管

APD
(Avalanche Photodiodes)

電離電子

正確な位置, エネルギー
イオンチェンバー, 低ノイズ増幅器

GEM : 液体, 2相キセノン
(Gas Electron Multiplier)

511 keVの γ 線の反応 = 22% 光電効果 + 78% コンプトン散乱

22,000個光子数/511 keV, 減衰時間3nsと27nsの高速な175nmVUV光

30,000 電離電子数/511keV, 0.5mmの平均射程

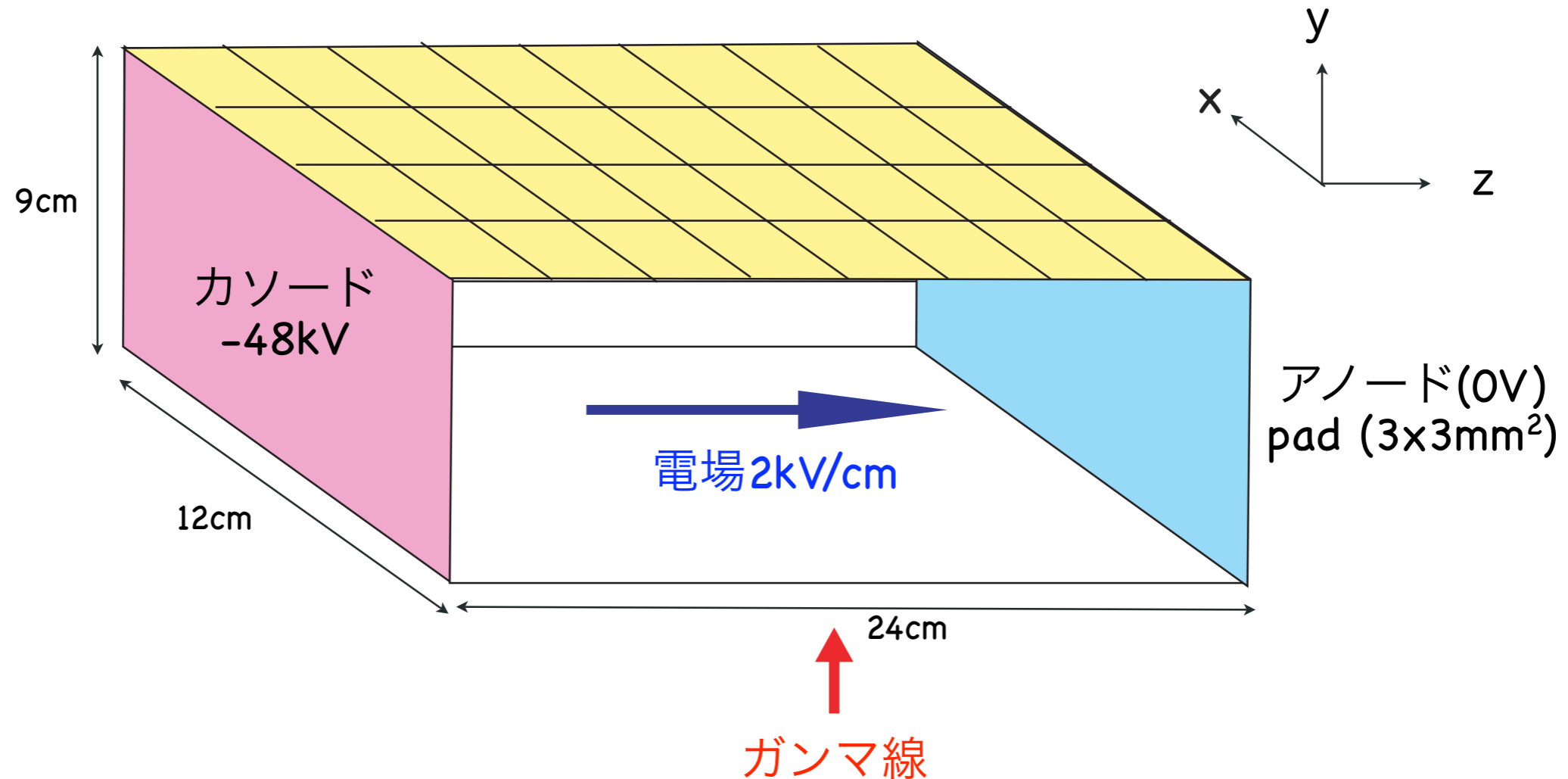
電子のドリフト速度 2.3mm/ μ s (一様電場 2kV/cm 中)

シンチレーター	GSO Gd_2SiO_5	LSO $\text{Lu}_2\text{SiO}_5(\text{Ce})$	液体キセノン
密度 (g/cm ³)	6.71	7.4	3.06
放射長 (cm)	1.38	1.14	2.77
蛍光波長(nm)	430	420	175
蛍光減衰時間(ns)	30-60	40	2, 30
相対発光量	20	40-75	100
屈折率	1.85	1.82	1.60
融点 (°C)	1950	2050	-111.75
PET用結晶 (mm ³)	2.45x5.1x30	4x4x20	自由
ドリフト速度(mm/ μs)	X	X	2.2

液体キセノンTPCの構造と特徴

光電子増倍管 (PMT) 32本

($2.8 \times 2.8 \text{cm}^2$ /本)



PMTによるトリガー (タイミング) 、 3次元位置、エネルギー測定

TPCによる3次元位置、エネルギーの精密測定

(x, y :アノードパッドと z:ドリフト時間)

高速で不感時間のない読みだし

例 1 : ガンマ線天文学 LXe-GRIT ; 1 phase

2004

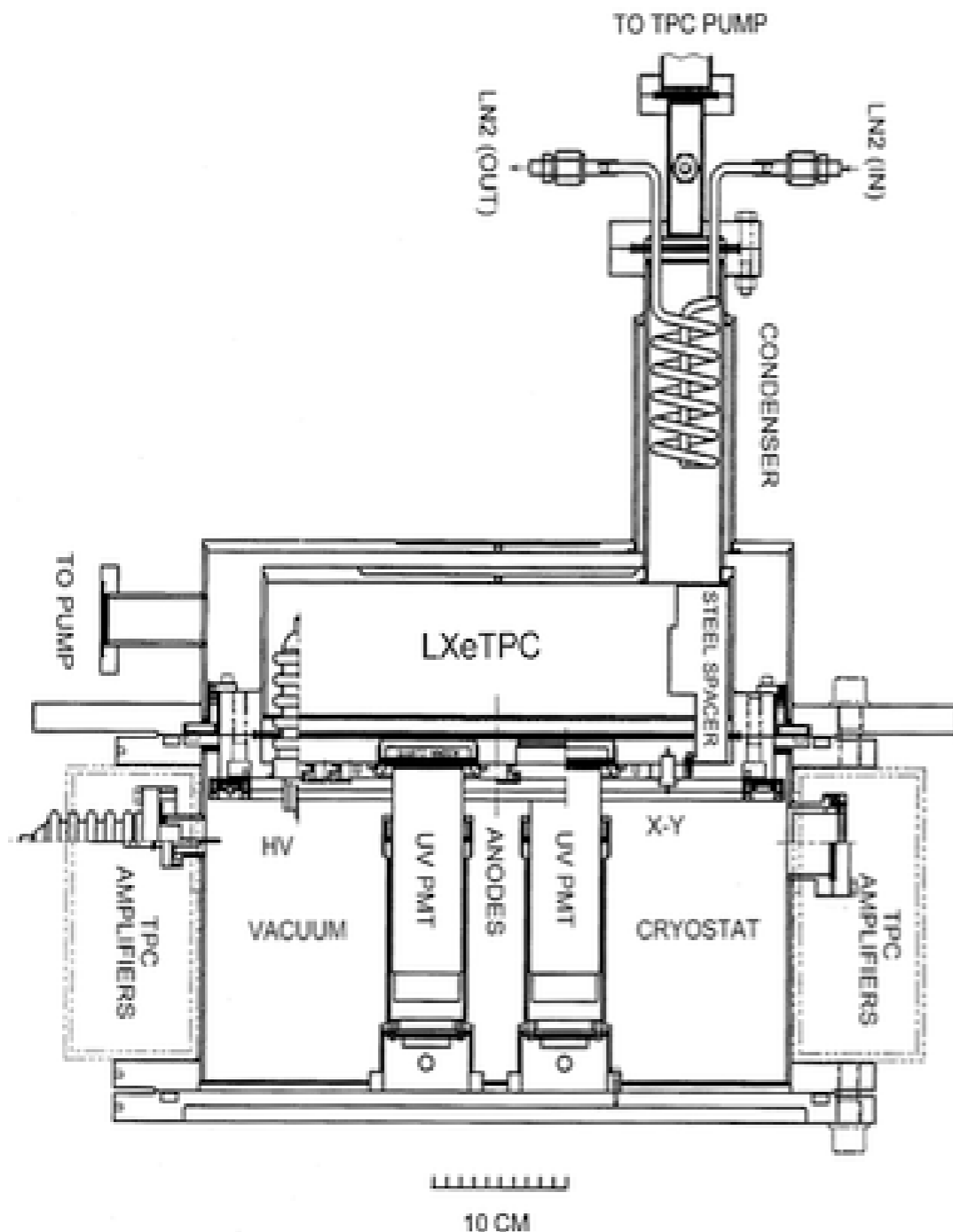
Columbia university - XENON collaboration

balloon flights(1997-2000) of the Liquid Xenon Gamma-Ray Imaging Telescope

γ energy range = 0.511 - 70MeV (e^+ - π^0)

LXeTPC (prototype of Compton telescope) with 7cm long drift

-direction of incident γ can be estimated by sequence of Compton scattering



LXeTPC : $18.6 \times 18.6 \times 7 \text{ cm}^3$ (2.4 l)

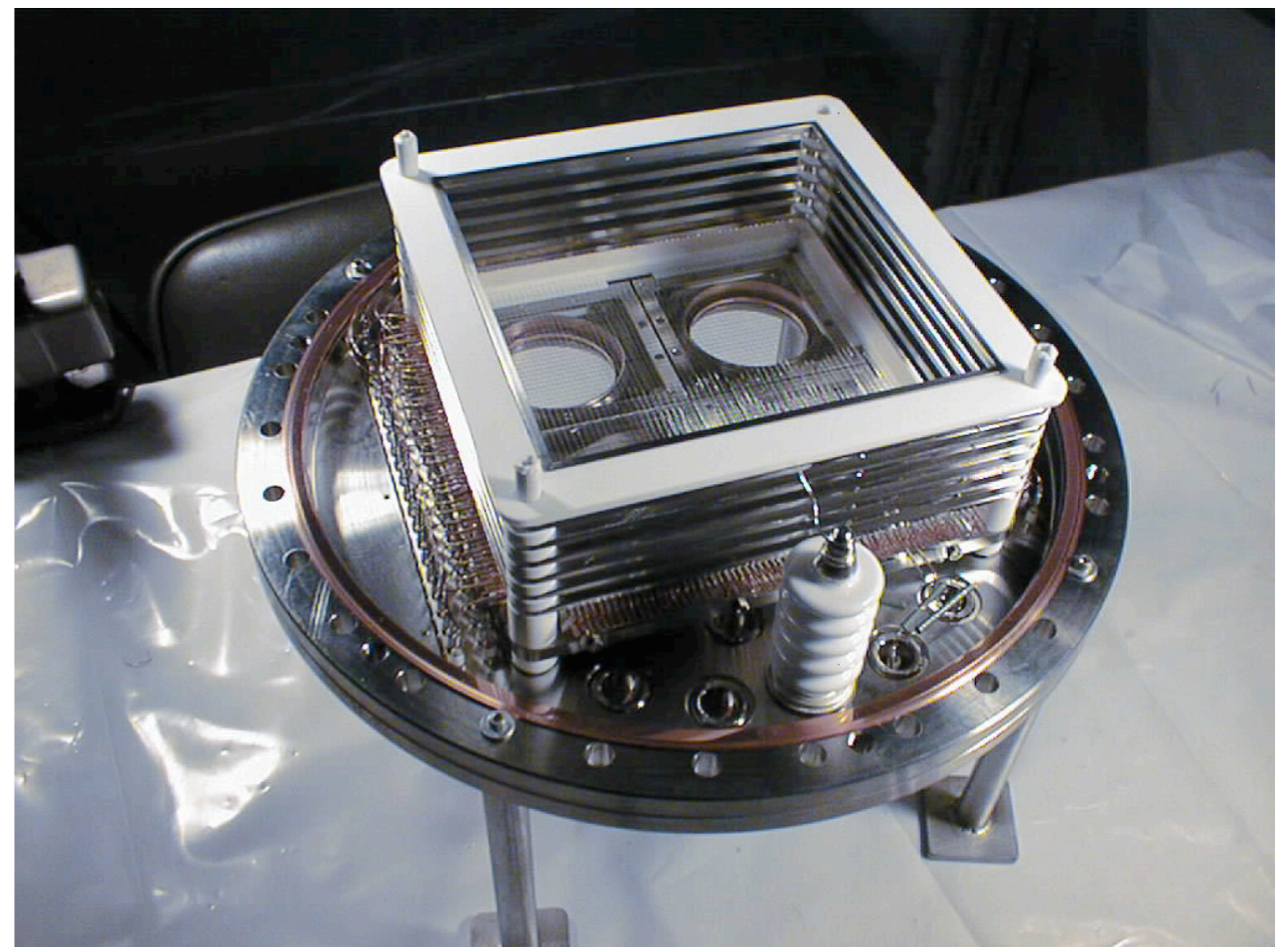


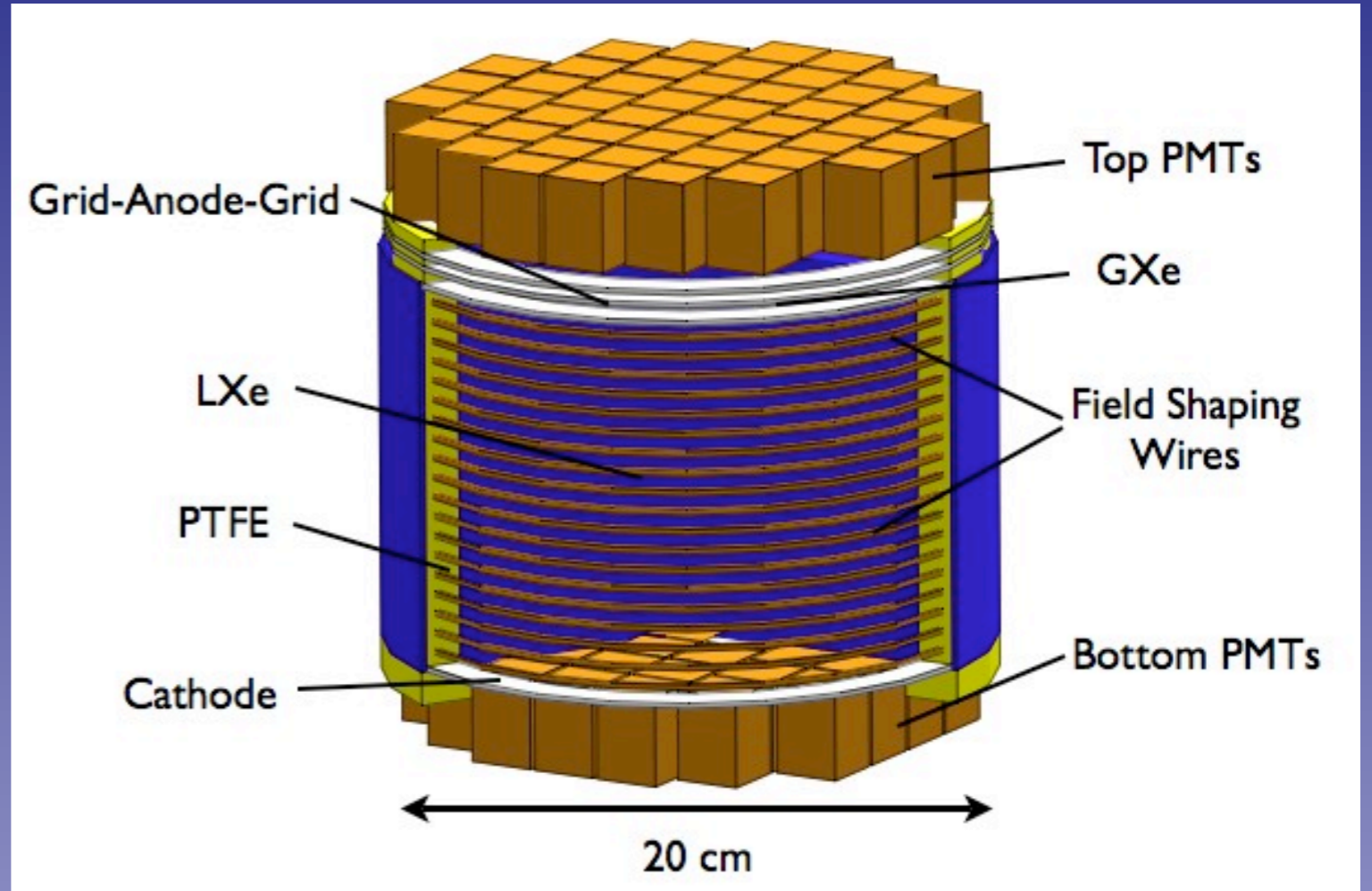
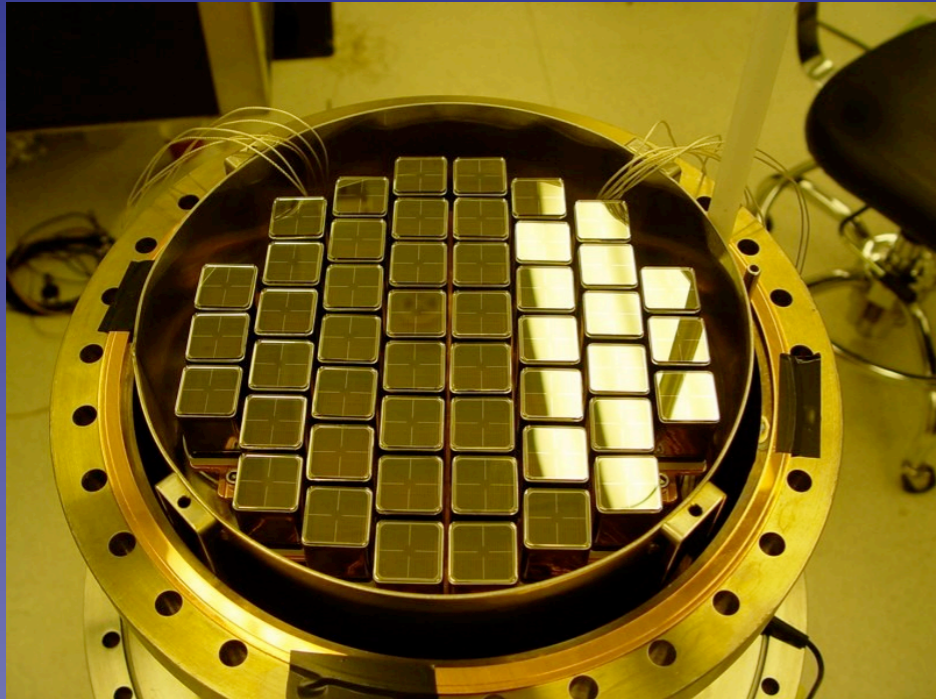
Figure 2.3: Top view of the LXeTPC with the field-shaping rings. The ceramic HV feedthrough is visible in the lower part of the picture.

例2：ダークマター

XENON-10 Detector Now at LNGS



- XENON10 now installed and being tested at LNGS (Underground laboratory Gran Sasso, Italy)
- Expect first DM search run June – August 2006



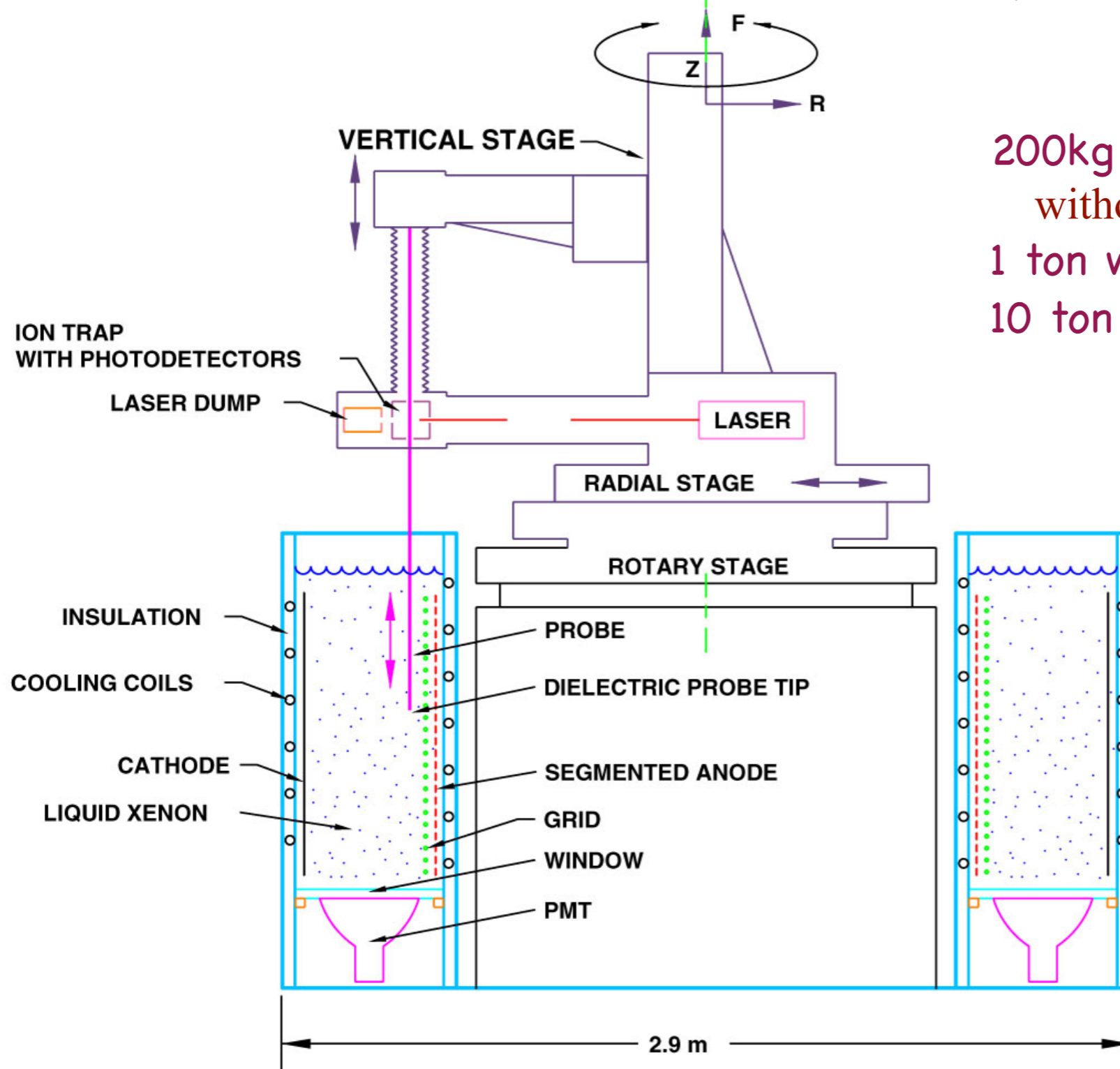
- 48 PMTs on top, 41 on bottom inside LXe
- 20 cm diameter, 15 cm drift length
- 14 kg LXe

例3：ダブルβ崩壊実験 EXO TPC ; 1 phase 2006

<http://www-project.slac.stanford.edu/exo/> ; Double β Decay

liqXe-TPC, grid and segmented anode and PMT, 10ton (3m³)

WIPP : Waste Isolation Pilot Plant Carlsbad NM, Excavated in underground salt - lower U/Th activity. ~2,000 m.w.e. depth



200kg (63l), enriched ¹³⁶Xe (80%) 2006
without Ba tagging for 2 years
1 ton with Ba tagging for 5 years
10 ton with Ba tagging for 10 years



- Extract the Barium ion from the event location (electrostatic probe)
- Deliver the Barium to a laser system for Ba¹³⁶ identification.

例 4 : PET LXe TPC PET ; 1 phase

2005

Subatech, Ecole des Mines de Nantes, IN2P3- CNRS and Université de Nantes, France 1 Service de médecine nucléaire, Hôpital de Nantes, France

1x1x9 cm³ cell ; a module of 24x60x9cm³ 9cm drift
24x60cm² anode plane segmented by 0.5x0.5mm² pads

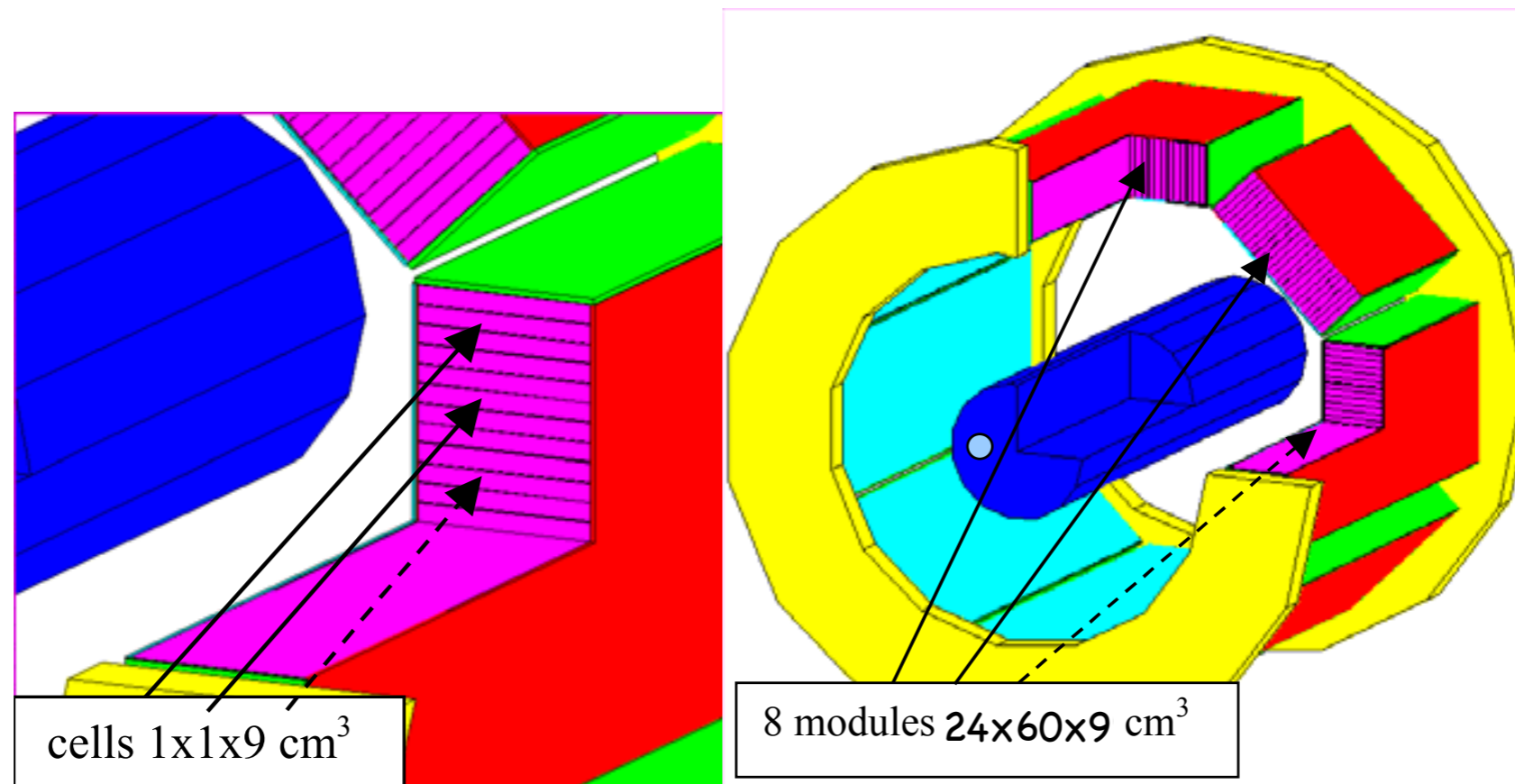


Fig. 1. GEANT3 simulation of a LXe PET camera with a NEMA NU 2-2001 phantom (right) and zoom on individual cells (left). The ¹⁸F source is homogeneously distributed in a 3 mm diameter and 70 cm length cylinder positioned at (x=4.5 cm, y=0 cm) in the transverse field of view.

250, 250 and 140 μm (FWHM) for x, y and z coordinates
for γ -conversion point

期待される性能

TPC中のドリフト距離 < 24 cm

1. 3次元位置精度 (TPC)

$$\sigma(x,y,z) = 0.2\text{mm}$$

2. エネルギー分解能 (TPC)

$$\sigma = 6\% \text{ for } E_\gamma = 511\text{keV}$$

3. 時間分解能 (PMT)

$$\sigma = 130 \text{ psec}$$

2007年度予定 (当面の目標)

1. 液体キセノン純化 (KEK パルス管冷凍機使用)

酸素、水 (シグナル減衰) そして、クリプトン等(バックグラウンド)の除去

- ppb以下

不純物除去と測定方法の確立とTPCなどの使用素材の吟味

2. 素材チェック (液体窒素中 -200°C)

HVケーブル 碍子、 (低温中での耐圧)

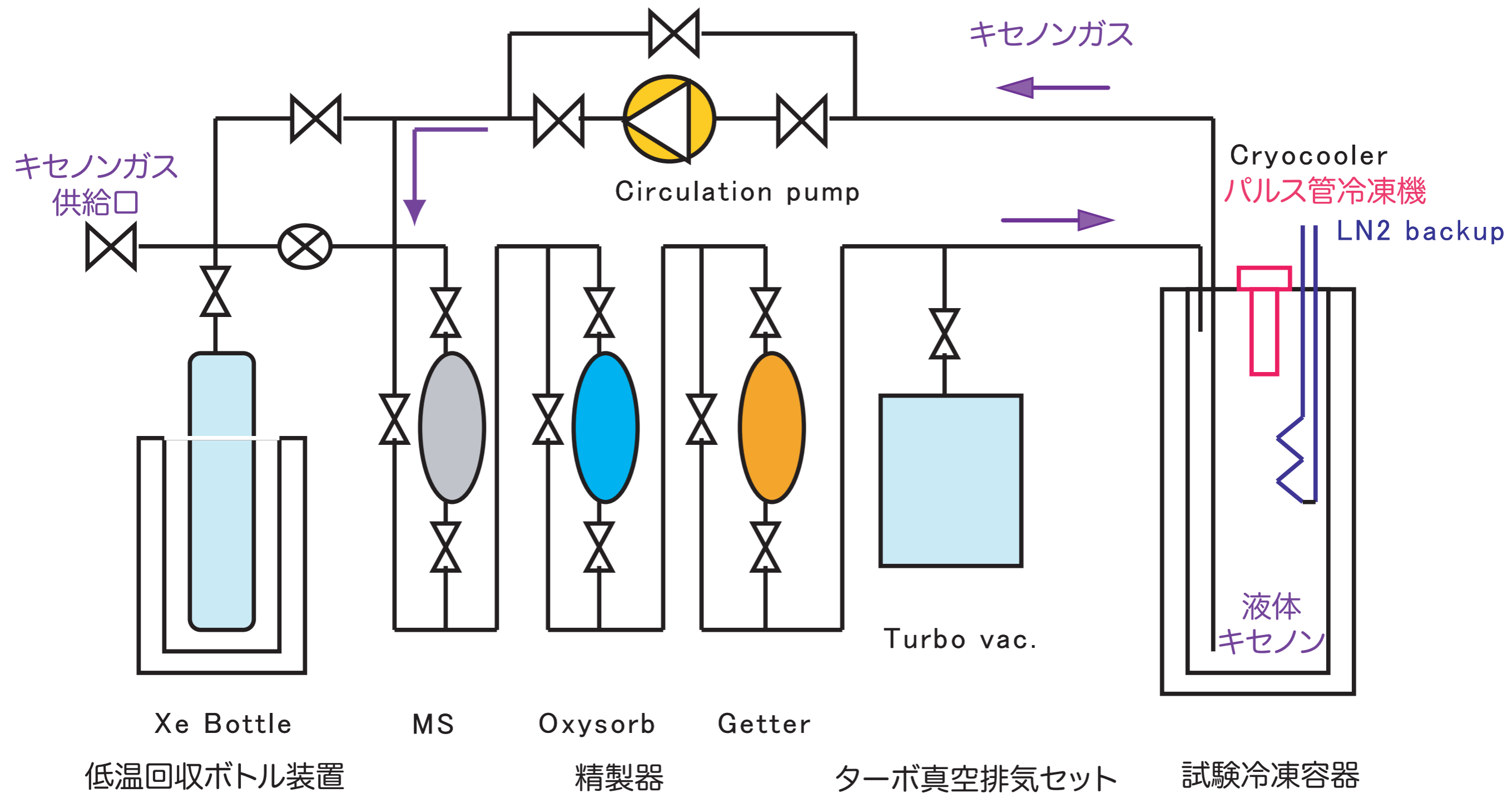
ハンダ使用の是非

コンデンサ、抵抗 (低温中の高周波特性、耐圧、温度特性)

フィードスルー

ヒートサイクルによる使用素材の劣化

ベーキング可能な材料 (必要性?)



3. ドリフト1cm程度のTPC（プロトプロトタイプ）

基本技術の習得 - テスト用冷凍容器使用

4. TPCの基本性能測定

拡散(diffusion)、減衰(attenuation)、3次元位置の測定

読みだし (ゲイン1) : アノードパッド

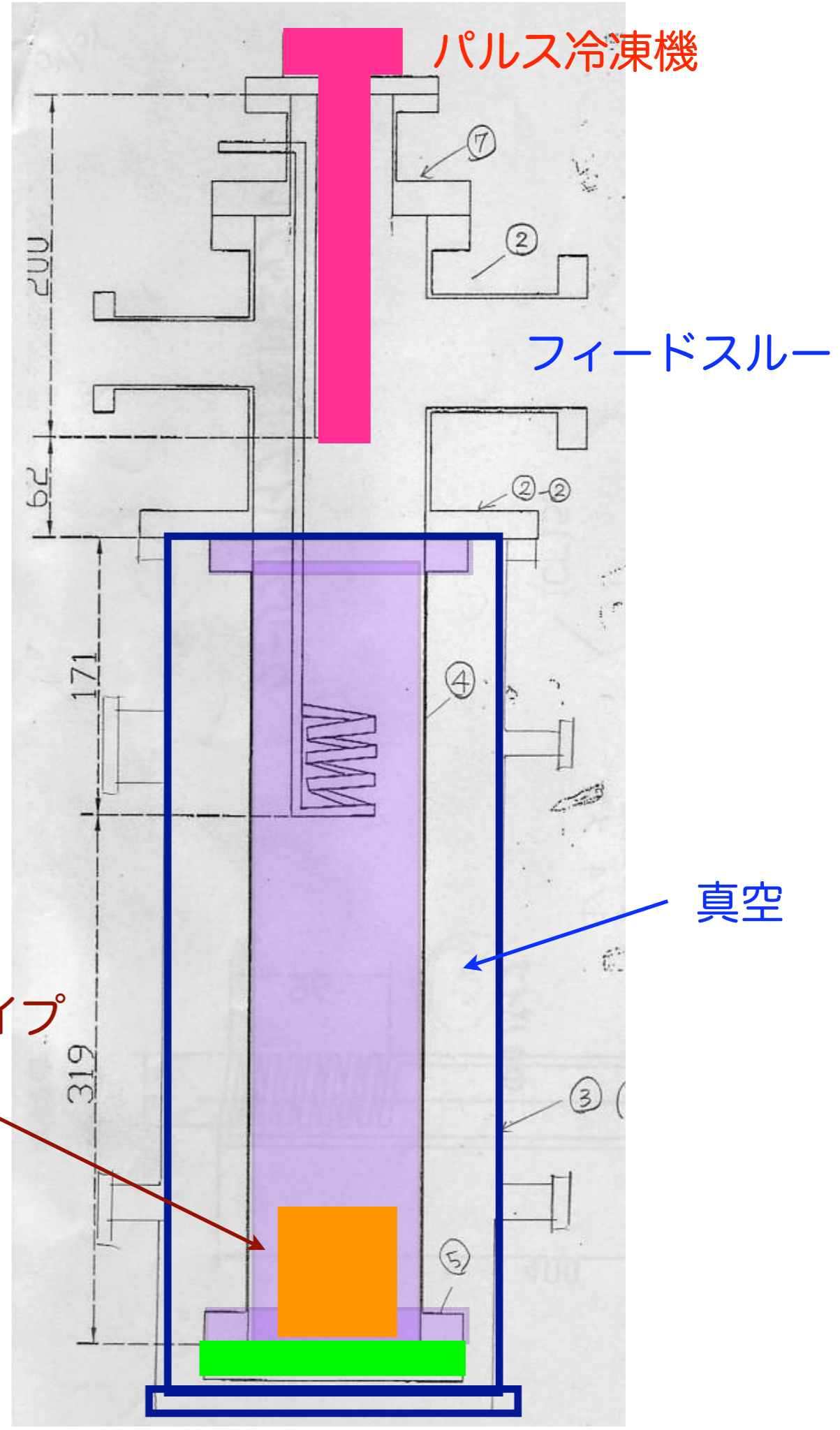
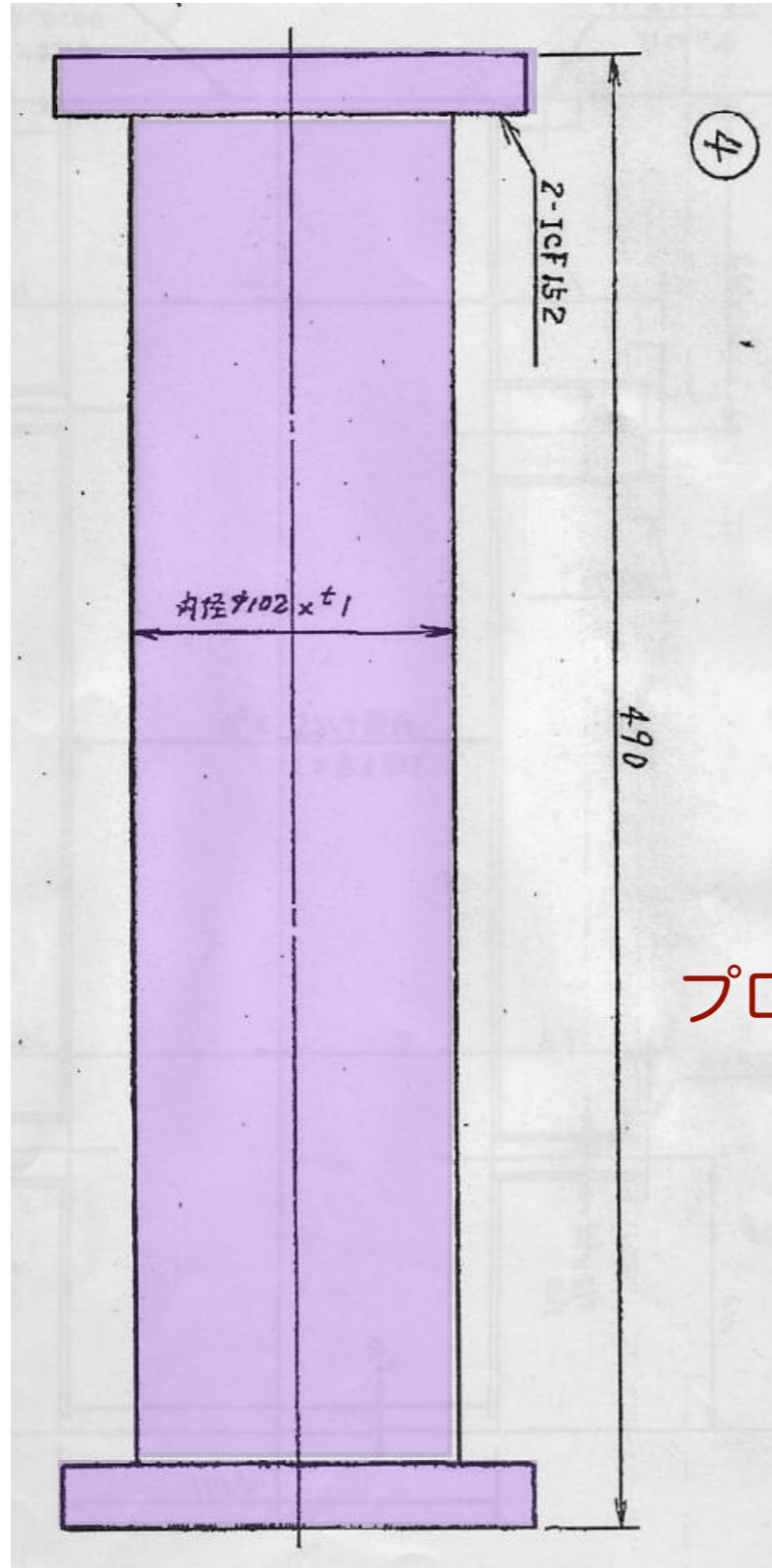
低電力低ノイズアンプのテスト（開発中のASICなど）

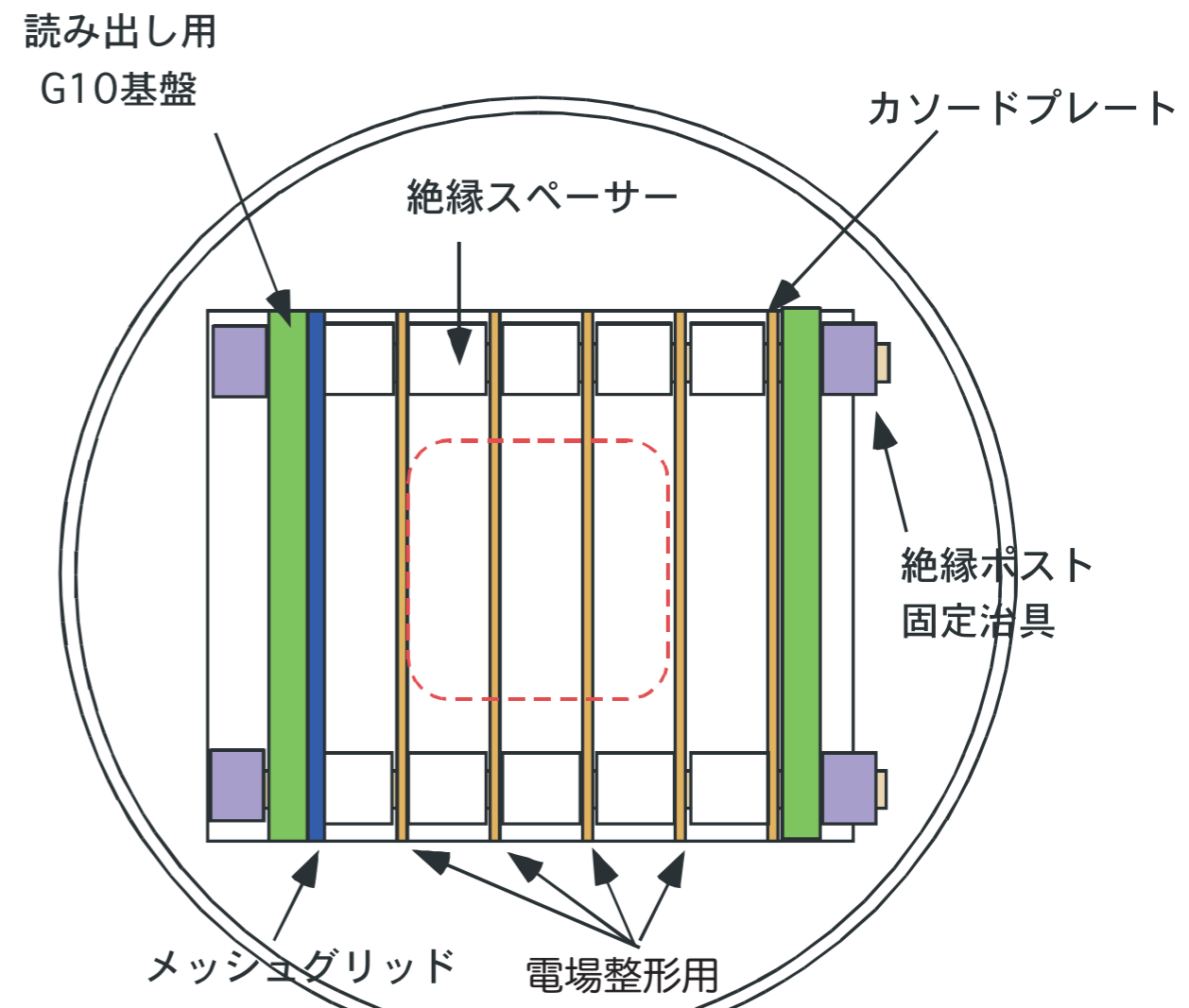
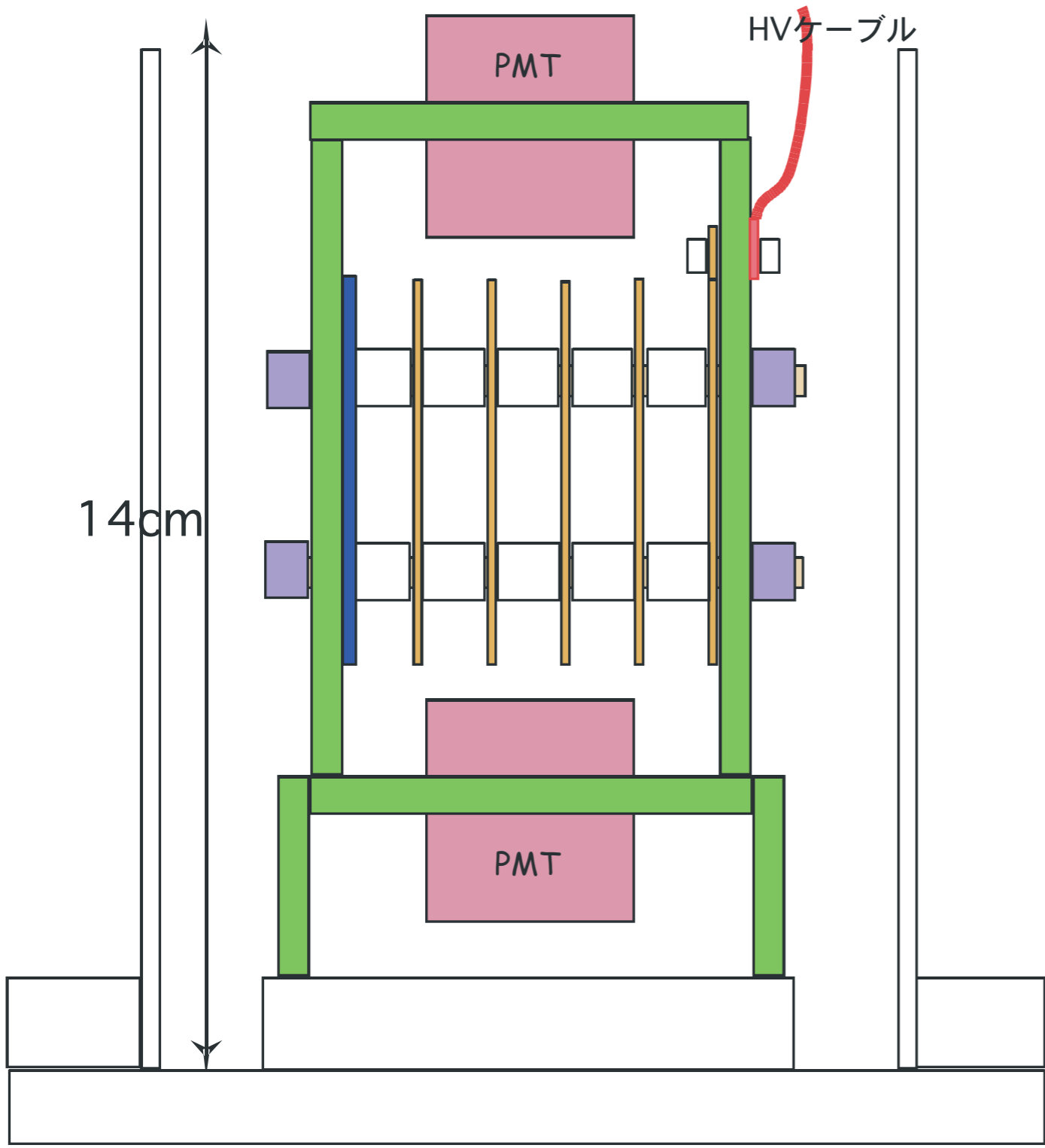
位置、エネルギー精度の較正方法（放射線源、宇宙線ミュオンなど）

シグナルのシミュレーション（電場、グリット電圧、ドリフト）

テスト用冷却容器

102mm ϕ x 490mm





2007年度スケジュール

プロトプロトタイプシステムの製作とテスト

1cm程度のドリフトTPC

2個のPMT (175nmに対して20%以上の量子効果)

4-5月設計(本体と容器への固定)

6月発注, 8月末納入, 9月組立とテスト

シミュレーションと素材試験 (液体窒素使用)

液化・冷凍・純化システム概算

	単価	数量	価格	
ターボ真空排気セット (ゲートバルブ付)	1,500,000	1	1,500,000	
精製器 (MonoTorr, NuPure)	1,500,000	1	1,500,000	
低温回収ボトル装置	200,000	1	200,000	
マイクロポンプ	150,000	1	150,000	ガスポンプ (MEG)
パーティクルフィルター	150,000	1	150,000	
弁、配管等	700,000	1	700,000	高純度対応
消耗品 (ヒーター、温度計等)	500,000	1	500,000	
計			4,700,000	

概算

2007年度

液化・冷凍・純化システム	470万円
テスト用素材	50万円
TPC プロトプロトタイプ一式	200万円
エレクトロニクス-プレアンプなど	100万円
合計	820万円

2008年度 (詳細は2007年度中の進捗状況による)

TPC プロトタイプ一式 (フィールドドケージ)	
エレクトロニクス一式	

最後に

KEKのパルス管冷凍機等の液体キセノン液化・純化の基盤技術、そして、回路室のASIC等のエレクトロニクス技術の下に、液体キセノンTPCの開発の提案をしました。

よろしくお願ひします。

