

# LXeTPC : レビュー委員会への回答

## 液体キセノングループ

平成 20 年 5 月 2 日

### 1 質問 1. 該当分野の世界の状況、その中での位置づけを具体的に示すこと。

ガンマ線の反応位置のよい精度を持つものとしては、シリコンストリップを多層重ねた半導体検出器がある。十分な放射阻止能を得るためには 1 層の厚さ 0.5mm のシリコンストリップを少なくとも 100 層以上重ねる必要がある。このように、シリコンストリップを用いた検出器はコンプトン散乱の反応位置の測定に使用される。また、散乱されたガンマ線を効率よく検出するため、その周囲がカロリメータ (吸収物質) で覆われることもある。ここではシリコンは反応位置検出器 (散乱物質) となっている。この吸収物質として、シンチレータや Ge、CdTe などの重い半導体が用いられる。位置とともにエネルギーが結晶シンチレータ検出器より精度よく測定される。この組み合わせの検出器はコンプトンテレスコープと呼ばれ、ガンマ線天文学で主に用いられている [1]。一般に、半導体検出器は位置とエネルギー分解能において最高の性能をもつものである。しかし、装置の大型化に際して、多くの半導体と多くの読み出しチャンネル数が必要となり、高価なものとなる。

本グループの液体キセノン検出器 (LXeTPC) は、タイムプロジェクションチェンバー (TPC) 読み出しにより 3 次元位置を精度よく測定する。同時に、電離電子群とシンチレーション光によってエネルギーも精度よく測定できる [2]。また、本検出器は液体キセノン自身が散乱物質と吸収物質を兼ねる一様な媒質であり、比較的容易に大形化できる。データ読み出しチャンネル数も少なくでき、安価なものとなる。また、速いシンチレーション光を利用した精度よい時間分解能では半導体検出器を凌駕する [3]。

これまで、液体キセノン TPC は米国コロンビア大学、早稲田大学の研究グループによりガンマ線天文学用の検出器 (コンプトンテレスコープ) として開発研究が行われている [4, 5]。この TPC は電離電子のドリフト距離として 9cm のものである。電離電子群がアノードに到達する直前で互いに直行する wire 面を通過するとき、wire に誘起されるシグナルにより、これら wire 面での 2 次元位置が検出される。また、ドリフト時間より 3 つ目の位置座標が求められる。さらに、早稲田大学のグループは wire をすべてなくし、プリント基板の技術を用いた表裏直行するストリップ型アノード (陽極) によるシグナルの検出を試みている [6]。これら wire やストリップラインによる位置測定は射影座標で行われるため、PET などの高計数率かつ高バックグラウンドの状況下では、ゴーストヒットの除去が困難になる。

我々と同様な PET 用の液体キセノン TPC 開発研究として、LXe-TPC PET がフランス・ナンテ (Nantes) 大学の研究グループによって提案されている [7]。一つの TPC の大きさは

表 1: 液体キセノン検出器：液体の 1 相；DM は Dark Matter 探索。シンチレーション光のみ測定のもの (light) と、電荷量測定のもの (TPC, drift chamber) がある。

Phase	Project	Physics	Xe weight	detector	readout	year	location	collaboration
1	EXO	double beta	10ton (3m <sup>3</sup> )	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 $\nu$ double beta	20ton	lights	PMT		Kamioka	Japan, Korea, Russia
			1ton (800kg)					
			100kg (30 $\ell$ )			2006		
1	MEG	$\mu \rightarrow e \gamma$	800 - 900 $\ell$	lights	PMT	Nov., 2006	PSI	Japan, Italy, Switzerland, Russia, USA
			70 $\ell$			2003		
1	LXe-GRIT	cosmic $\gamma$	2.4 $\ell$	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 $\ell$	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 $\ell$	lights	PMT		Waseda univ., NIRS	Japan
			12 $\ell$			2003		
1	XEPET	PET	test w/ 8.5 $\ell$ in 2005	TPC	12 seg. 96wires & 96strips/seg.	2006-2008	TRIUMF	CANADA

24x60x9cm<sup>3</sup>(モジュール)であり、LXe-TPC PETは8個のモジュールからなっている。さらに、各モジュールはシンチレーション光の発光点の同定のため光反射壁により1 x 1 x 9cm<sup>3</sup>の直方体セルに分割された構造を持つ。電離電子はこの9cm方向(Z)にドリフトする。24x60cm<sup>2</sup>のアノードは0.5x0.5mm<sup>2</sup>のpadsからなっている。彼らのグループには日仏協力AIL事業として、KEKより春山らが参加している。

カナダのTRIUMFでもXEPETが開発されている。インターネット上の情報では2006年から3年間のR&Dとして、小動物用のPETを開発している。このPETは12個のセクターが円筒状に配置されている。TPCのドリフトは半径方向で、シンチレーション光はエンドキャップ面に設置されたHPDで検出される。

これら液体キセノンを用いた検出器は、田内により測定器開発室勉強会(2006年7月12日)で報告された[8]。これらのまとめを表1、表2に示した。

主なPETの性能比較を表3に示す。この表中赤字で書かれたものは開発研究中のPETである。TXePETの感度(sensitivity)、雑音等価計数率(NECR)の値は早稲田大(現放医研)の錦戸氏らのグループの液体キセノンTOF-PET(LXeTOF PET)[3]のものを下に評価したものである。この表から、液体キセノンを使用するPETとして開発中のものは、我々のTxepETの他に、前述のNates大学のLXeTPC PET[7]とTRIUMF(UCB)の( $\mu$ -)XEPET、ポルトガルのCoimbra大学のPETYA(1 TPCユニット=10x50x60mm<sup>3</sup>, 10mmドリフト)[9]、そして早稲田大学のLXeTOF PET(PMTのみ使用、2光子の時間差,TOFの測定による同時計測線上位置の同定)である。

これらの中で、液体キセノンが分割されていないTPC検出器はTXePETのみである。また、

表 2: 液体キセノン検出器：液体と気体の 2 相；液体キセノン中で電離された電荷を気体相に移動してガス増幅で呼び出している。ただし、電荷量の直接測定ではなく増幅中のシンチレーション光を検出している。

Phase	Project	Physics	Xe weight	detector	readout	year	location	collaboration
2	LXeComp/ <sup>44</sup> 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 underground 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		

TPCのドリフト方向を体軸方向(z方向)にしていることも唯一である。このことにより、以下のような利点を有する。

1. ドリフト方向に向って一様な断面形状を有し、一様電場の形成が容易である。
2. 円周方向にモジュール化する必要が無く、シームレスな配置が可能であり、感度の向上に貢献する。
3. 体軸方向中央に高電圧陰極を配置することにより、陰極の両サイドにドリフト領域が形成され、比較的低い電圧で体軸方向に広い領域を覆うことが可能である。
4. 将来MRIとの併用によるMRI - PETを考えた場合、体軸方向の磁場は、電離電子群のドリフトと矛盾せず、むしろ、位置測定精度を改善するなど、有利な点が考えられる。

我々のTXePETは、DOI分解能を極めた次世代のPETとして、高画質(位置分解能)、高感度など最高の性能が期待される。

## 2 質問2. 何を、何年で、いくらかけて、どうしたいか、また実現展望のビジョンを明確に示すこと。

以下に示す研究計画は来年度以降の外部資金獲得も念頭と置いたものである。

表 3: 主な PET の性能比較表

Product		Crysal/Radiation material	fiducial volume		position resolution			Slice pitch	energy res.	sensitivity		NECR by NEMA NU 2-2001			Solid angle	Area	Rate	
designer	name	size	inner diameter	field of view	tangentially	radially DOI	axial (z)	z	511 keV	NEMA NU2-2001	NECR	at radiation dose (20Φ x70(20)L)	scatter fraction	point source		15MHz in total		
		x, z, y in mm	cm	cm	mm	mm	mm	mm	%	cps/kBq	%	keps	kBq/ml	%	cm <sup>2</sup>	Hz/cm <sup>2</sup>		
<b>PET/CT</b>																		
GE	ADVANCE	BGO	4, 8.1, 30	67.2	15.2	7	30	7.3, 8.4	33		0	37.6	10	44.8	0.221	3207.3	4676.8	
GE	Discovery ST Elite	BGO	6, 6, 30	55	15.2	4.25	30	4.8	3.27	8.5	0.85	80	12	36	0.266	2625.0	5714.2	
Siemens	ECAT EXACT HR+	BGO	4.39, 4.05, 30	65.3	15.5	4.3	30	4.1		8.98	0.898	27.3(79.2)	6.3(12.5)	37	0.231	3178.2	4719.7	
Siemens	biograph 16 HI-REZ	LSO	4, 4, 20	58.5	16.2	3.5	20	3.12	2	10	4.92	0.492	84.77	28.73	34.1	0.267	2975.8	5040.7
Philips	Gemini GXL (TF)	GSO(+Zr)	4, 6, 20 (30)	56	18	4.9-5.5	20	5.0-6.1	4	8.5	8	0.8	70	11	35	0.306	3165.1	4739.2
Shimadzu	SET-3000GCT	GSO	2.45, 5.1, 30	66.4	25	2.45	30	5.1	2.6		19	1.9	60	9.8	50	0.352	5212.4	2877.8
Toshiba	Aquiduo PCA-7000B	LSO	4, 4, 20	58.5	16.2	3.5	20	3.12	2	10	4.92	0.492	84.77	28.73	34.1	0.267	2975.8	5040.7
<b>PET</b>																		
Hamamatsu	SHR-92000	BGO	2.9, 6.3, 20	60	68.5					9.72	0.972	113.6	10.5	31.4	0.752	12905.4	1162.3	
Nantes univ.	LXeTPC PET	Liq.Xe	10, 10, 90 (93%)	60	60	0.25	0.14	0.25	13.8			70	1.5	54.5	0.707	11304.0	1327.0	
Coimbra univ.	PETYA	Liq.Xe	10, 50, 60 (73%)			0.8	2.0-5.0	0.8	15-17									
NIRS	LXeTOF PET	Liq.Xe	segmentation?	80	24	3.7		3.7	16	35	3.5	150	10		0.287	6028.8	2488.1	
KBK-NIRS	TXePET	Liq.Xe	no segmentation	88	48	1.64	1.64	1.2	16	70	7	300	10		0.479	13263.4	1130.9	
<b>Brain PET</b>																		
CERN	brain HPD-PET	LSO	3.2, 200(z), 3.2	35	10	1.9	1.9	4.5	7.5	4	0.4	130		30.4*	0.275	1099.0	13648.8	
NIRS	jPET-D4	GSO	2.9, 2.9, 7.5x4	25.6	26	2.5	7.5	2.5	16	7.1	0.71	154	11	39.7	0.713	2090.0	7177.1	
CPS	HRRT	LSO-LYSO	2.1, 2.1, 7.6x2	31.2	25	2.4-2.9	7.6	3.0-4.0	17	4.5	0.45	140	13	40	0.625	2449.2	6124.4	
Univ. Pennsylvania	G-PET	Anger-logic GSO	4, 4, 10	30	25.6	4	10	5	18	4.79	0.479	60	7.4	39	0.649	2411.5	6220.1	
Hamamatsu	SHR-1200(2400)	BGO	2.8(1.4), 6.55, 30	33	16.3	2.9	30	2.9							0.443	1689.0	8881.0	
Hamamatsu	SHR-12000	BGO	2.8, 6.55, 30	50.8	16.3	2.9	30	2.9							0.306	2600.0	5769.1	
<b>Small Animal PET</b>																		
UVP Bioluminescence	microPET II	LSO	0.975, 0.975, 12.5	16	4.9	1.17	12.5	1.42		22.6	2.26	235	2.35		0.293	246.2	60932.0	
SCETI, Univ. of Ferrara	YAP-PET	YAP	2, 2, 30	4	4	1.8	30	1.8	14.5	18	1.8	90	16.6MBq		0.707	50.2	298566.9	
Oxford Positron	Quad HIDAC	HIDAC		17	28	1	1	1		18	1.8	100	0.2	30-40	0.855	1494.6	10035.9	
raytest	ClearPET	LYSO-LaYAP	2, 2, 10x2	22.5	11	1.25-2	10	1.25-2	30	38	3.8				0.439	777.2	19301.3	
LIP	RPC-PET	RPC		6	10	0.5	0.5			21	2.1	318	2.63		0.857	188.4	79617.8	
Philips	MOSAIC	GSO		12.8	11.9	2.1-2.5				5.7	0.57				0.681	478.3	31362.1	
GE	eXplore Vista	GSO/LYSO	1.55, 1.55, 10	6.7	4.7	1.56		1.74		41.4	4.14				0.574	98.9	151701.2	
Siemens	FOCUS 220	LSO	1.5, 1.5, 10	19	7.6	1.3-2.5	10		18	40	4				0.371	453.4	33082.2	
Advanced MI	LabPET7.2	LYSO/HPD	1, 1, 10	11	7.2	1.1	10								0.548	248.7	60316.5	
Gamma Medica	X-PET	BGO		10	11.6	2		2		83	8.3				0.757	364.2	41181.6	
Joseph Fourier univ.		Liq.Xe	2, 2, 50(z)	8	5	1	1	8							0.53	125.6	119426.8	
UBC (D.Bryman)	μ-XEPET	Liq.Xe				0.8	0.8	0.8		200	20							
Joseph Fourier univ.		Liq.Xe	50(z) DOI	30	20		2.1			18	1.8				0.555	1884.0	7961.8	
Hitachi co./Hokkaido univ.		CdTe	x,x.15 x3	8		2	15		5.2									
Tohoku univ.		CdTe	1,1.1,1.5 x 2	6.4	2.6	0.75	5											

今後 3 年間の研究期間では、エネルギー、位置、時間分解能など基本的な性能を検証する。少なくとも次世代 PET に必要な性能、すなわち 511keV ガンマ線に対して、エネルギー分解能の 16% (FWHM)、3 次元位置分解能の 1mm (FWHM) を達成する。このように、本研究は液体キセノン TPC 検出器が次世代 PET として実用化されるための基礎的データを与える。また、エネルギー分解能をさらに向上させれば、ガンマ線天文学用の検出器としても十分な性能をもつものとなる [10]。

従来のフルスケール PET 感度の少なくとも 10 倍を達成するため、PET 視野にあたる TPC のドリフト距離の最終目標を 24cm とする。光電子増倍管 (PMT) は早稲田大学グループにより液体キセノンシンチレーション光測定用に開発され、その量子効率で最高性能を持つ浜松ホトニクス製 R5900-06AL12S-ASSY を使用する。これの断面積は 3cm x 3cm の正方形である。十分な ROI 測定性能評価のため、PMT の配列はドリフト方向に 8 個、それに直行するほうこうに 4 個、すなわち 8 x 4 のマトリックスとなり、PMT 総数は 32 本である。入射ガンマ線進行方

向にあたる液体キセノンの厚さは、511keV ガンマ線の93%が反応を起こす9cmとする。その反応の割合は、78%がコンプトン散乱で残りの22%が光電効果である。したがって、本研究目的であるPETの基本性能の実験的検証に必要なTPCの容積は $24 \times 12 \times 9 \text{cm}^3$  (2.6 )となる。

この大きさのTPCの製作と性能評価が本研究の最終成果となるが、次のように段階的な方法を採用する。今年度に、4 x 2のPMTマトリックス配列で半分のドリフト距離12cmのプロトタイプTPCを製作し、TPCの基本構造を確立する。来年度にはTPC本体とパイプライン方式によるエレクトロニクスシステムの製作を行う。再来年度には、8 x 4のPMTマトリックス配列のTPCを完成させ、本研究の目的を達成する。

## 2.1 平成 20(2008) 年度の計画

まず、4 x 2 PMT マトリックス配列のプロトタイプを製作する。ここでTPCでの液体キセノンの厚さは既存の圧力容器に収められるように10cmである。TPCの主要構成部品で一様電場形成を行うカソード、フィールドケージ、グリッド、アノード、そしてそれらを支える構造体の構造・冷却試験を行う。典型的な電場の強さは2kV/cmである。次に、液体キセノン中でのTPC性能試験を以下のような課題について実行する。

1. フィールドケージからの漏れる電場によるPMTへの影響(信号出力の均一性など)PMT周辺を金属メッシュで覆う電場シールドの効果の測定と評価
2. 標準ガンマ線源(購入済)、線源などを使用し、アノードシグナルの電場強さ依存性測定
3. 電離電子の再結合率の電場依存性の測定と評価から電場の強さを最適化する [11, 12]
4. 電離電子のドリフト中の電荷減衰の測定：不純物(O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>Oなど)混入比のppbレベルでの直接測定は困難。M.Ichigeらによると、0.1ppb以下で、2m以上の減衰長が得られる [13]。
5. シンチレーション光と電離電子のそれぞれによるガンマ線のエネルギー分解能：これら2つの分解能間の相関も調べる。
6. コリメートした標準ガンマ線源とアノードパッド(3x3mm<sup>2</sup>)による位置分解能：パッドサイズの最適化を検討する。
7. 電離電子の拡散率(diffusion)の測定：T.Dokeらによると、24cmドリフト時に  $\approx 1\text{mm}$  程度である [14]。

上記の結果を踏まえて、TPCの最終設計を行う。平行して次年度製作するエレクトロニクスシステムの設計を開始する。まず、製作する上で必要なシステムの性能仕様をまとめる。

## 2.2 平成 21(2009) 年度の計画

前年度の最終設計に基づき、TPC本体を製作する。このとき、図1に示すような真空容器も製作する。まず、真空容器単体で純化・冷凍機システムに接続し、容器内に液体キセノンが

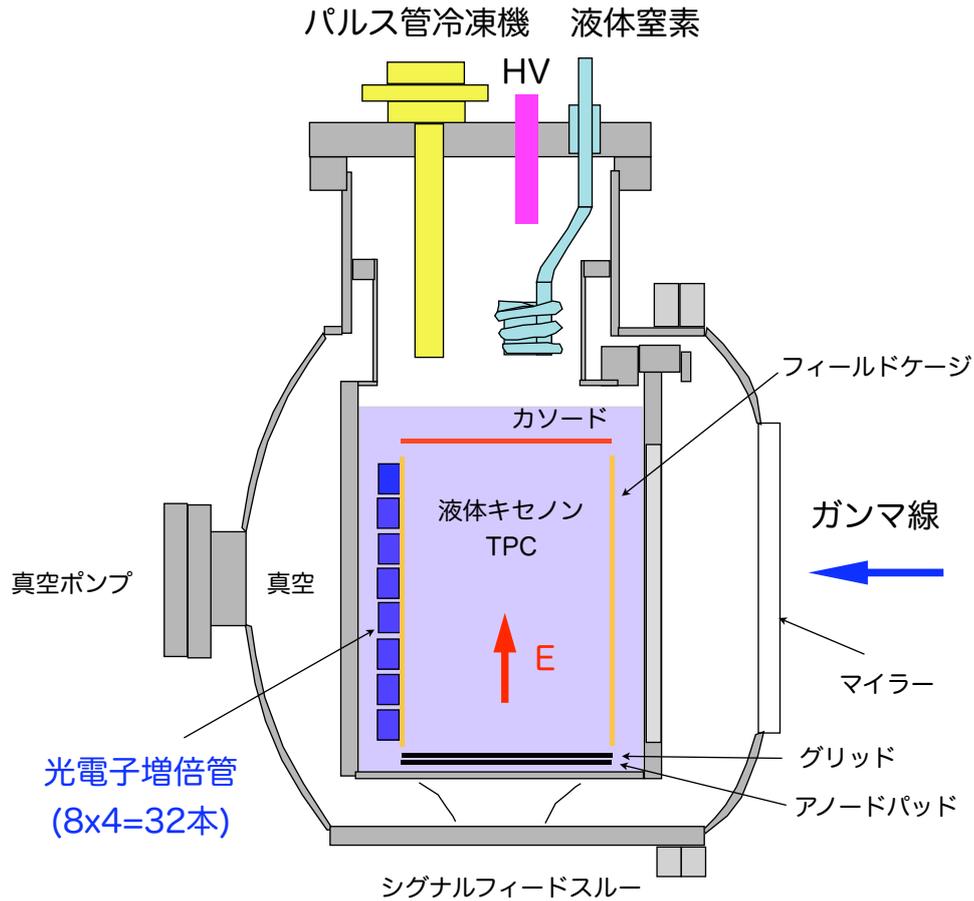


図 1: 液体キセノン用真空容器の概念図。外部よりガンマ線を入射するためマイラーウィンドウを有する。

満たされるのを確認する。次に、TPC を挿入し、2 倍のドリフト距離での前年度と同様な性能試験を行う。

図 2 に概要を示したパイプライン処理に基づくエレクトロニクスシステムの詳細設計と製作も行う。光電子増倍管と TPC アノードからのシグナルは不感時間なく高速デジタル化が行われ、フィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ (FPGA) で四則演算などの高速デジタル処理により、それぞれのエネルギーと位置情報が計算される。それらの情報は高速メモリ (SRAM) に書かれる。コンピューターでシンチレーション光の発光時刻と ROI 情報より、TPC での電離電子シグナルからの精密な 3 次元位置情報が計算される。メモリ上の情報は発光時刻から全ドリフト時間経過後 (約 100  $\mu$  秒/24cm) に上書きされることが可能である。

### 2.3 平成 22 年 (2010) 度の計画

残りの光電子増倍管 24 本を購入し全システムを完成する。液体キセノン TPC 検出器としての基本的な性能試験 (diffusion 係数、シグナル減衰率、エネルギー分解能、位置分解能の測定) を全有効領域で行い、それらの領域内分布、一様性などを解析する。エレクトロニクスシステ

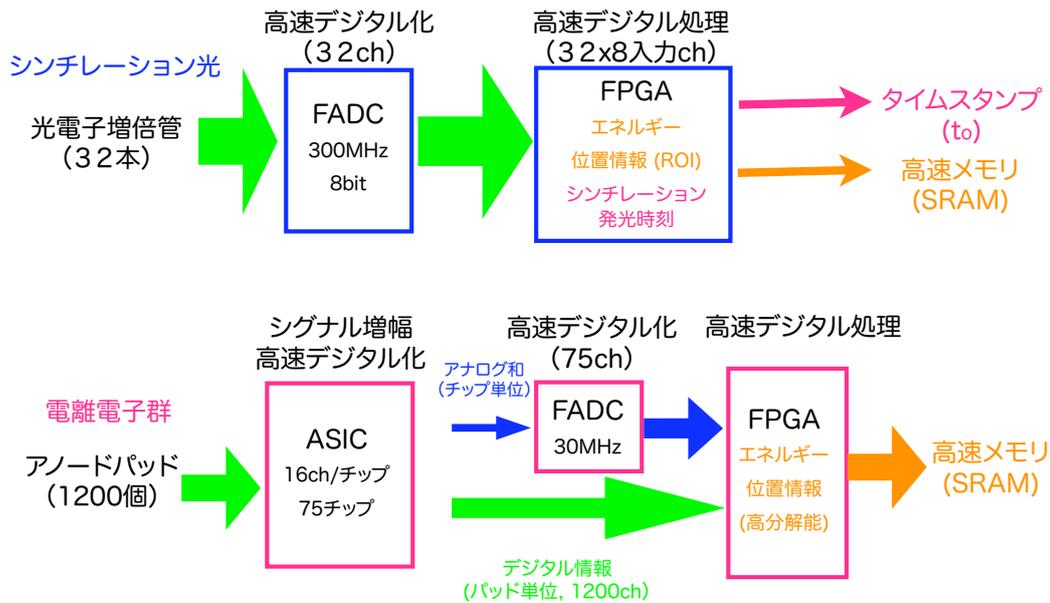


図 2: エレクトロニクスシステムの概要。シンチレーション光の情報 (ROI 情報)、電離電子の情報 (精密位置、エネルギー情報) をそれぞれ FPG A 技術を用いてオンボードでパイプライン処理する。

ムでは、不感時間のない読み出しが達成されていることを確認する。その実証として強度の強いガンマ線源を使用する予定であるが、少なくとも、エレクトロニクスの各々の部分での時間損失を測定し、総合的に不感時間を評価する。

## 2.4 予算 (概算)

開発研究 3 年間の年度ごとの概算を以下の表にまとめた。

表 4: 平成 20(2008) 年度

項目	単価 (円)	数量	価格 (円)
TPC 本体	1,800,000	1	1,800,000
PMT 用 HV 電源	235,000	3	705,000
PMT	175,000	8	1,400,000
エレクトロニクス	2,000,000	1	2,000,000
液体キセノン液化・純化システム関係		1	
計			6,275,000+ (液体 Xe 関係)

表 5: 平成 21(2009) 年度

項目	単価 (円)	数量	価格 (円)
TPC 本体	3,000,000	1	3,000,000
TPC 真空容器	2,300,000	1	2,300,000
エレクトロニクス	3,200,000	1	3,200,000
液体キセノン液化・純化システム関係		1	
計			8,500,000+ (液体 Xe 関係)

表 6: 平成 22(2010) 年度

項目	単価 (円)	数量	価格 (円)
PMT	175,000	24	4,200,000
エレクトロニクス	3,200,000	1	3,200,000
液体キセノン液化・純化システム関係		1	
計			7,400,000+ (液体 Xe 関係)

### 3 質問3. 現アクティブメンバーリスト(新規参入含む)とその内訳・貢献度を示すこと(司令塔、デザイナー、試験、ユーザー)

貢献度の目安として FTE の値を示した。

田内利明 (KEK) : 0.1FTE : 研究の総括および、データ収集システム

真木晶弘 (KEK) : 0.1FTE : 光電子増倍管システムおよび液体キセノンでのシンチレーション光検出カミオカンデ型カロリメータを有する MEG 実験グループのメンバーで液体キセノンシンチレーション光シグナルの特性と ROI の算出方法に豊富な知識がある。

春山富義 (KEK) : 0.1FTE : 液体キセノン純化及び冷凍システム。高性能のパルス管冷凍機の研究開発をリードし、MEG 実験の純化・冷凍システムも担当している。

笠見勝裕 (KEK) : 0.2FTE : 冷凍システム構築の実働

鈴木祥仁 (KEK) : 0.2FTE : 冷凍システムモニター用の Labview システムを作成。将来は制御システムに発展させる。

田中 秀治 (KEK) : 0.2FTE : TPC システムの製作及びシステム試験 : 数多くのガスチャンバーの製作を行った豊富な経験を有する。

三原智 (KEK) : 0.1FTE : 2008 年度より参加。MEG 実験で活躍中で液体キセノン検出器の豊富な経験

杉山晃 (佐賀大) : 0.05FTE : TPC システムそして ASIC 設計 : ガス TPC のための GEM や MICROMEAS による読み出しの開発研究での豊富な知識

東貴俊 (D2) : 1 FTE : 博士論文予定。

中村正吾 (横浜国大) : 0.05FTE : 液体キセノン基本特性の評価。

熊田雅之 (放医研) : 0.1FTE : PET としての性能仕様とデータ解析 : 放医研で重イオン加速器利用によるがん治療の豊富な知識より、次世代 PET としての性能評価を遂行

富谷武浩 (放医研) : 0.01 FTE : PET への実用化とデータ解析

寅松千枝 (放医研) : 0.01 FTE : PET シミュレーションによる性能の最適化

上記のように、大学院生の参加が現在一人と、一番の問題は人手不足 (実働) である。

- 4 質問 4. 各グループから測定器開発室 (室長) および KEK に対する希望 (予算以外について) (コーディネーションの仕方、アーカイブ、共通資産として希望等) 明確なものがあれば示すこと。

予算項目かもしれないが、外国旅費の支給があればよい。

- 5 質問 5. マンパワーに関して、もしこの専門家がいればブレイクスルーができるという明確なものがあれば示すこと。

KEK 素核研エレクトロニクスグループの協力支援を強く希望している。特に、今年度よりエレクトロニクスの設計を開始する予定のため、グループ内にもエレクトロニクスの専門家がぜひ必要である。DAQ プロジェクトのトリガーレス読み出しシステムの R&D グループと協力出来るとよいと思う。

PET としてのシミュレーションによる性能の最適化も急務であるが、放医研での業務のため、担当者がこれに時間の避けないことが前年度であった。このことが今年度も続いたら、新たな人材を捜さなければならない。大学院生の修士および博士論文のテーマにもなりうるので『公募』したい。

- 6 特別質問 : PET へ向けたロードマップを示すこと

PET 開発を最終目標としているため、産学による共同開発研究が必要である。共同研究として、液体キセノン TPC の PET 本体と不感時間無しの読み出しエレクトロニクスシステムの開発研究の 2 つが独立に必要なかもしれない。

PET としての最小システムが完成し、下記に示した技術設計書作成に必要な開発研究の終了する 2011 年から実用化に向けて産学協同開発研究を行いたい。

そのために必要な TXePET の製作・製品化を前提とした技術設計書 (TXePET-TDR) には以下の項目が含まれる。

1. ハードウェア設計：『真空』容器、TPC 本体（フィールドケージ、グリッド、PMT 支持構造）、パッド構造、フロントエンドエレクトロニクス（パッド上に設置）
2. シミュレーション：GATE (GEANT4) などによる性能評価とパラメータの最適化
3. エレクトロニクスシステム：パイプライン（トリガーレス）読み出し・オンライン処理
4. 事象の再構成法
5. イメージング化のアルゴリズム
6. スケジュール（製品化への開発計画）
7. 年次予算

最初の PET 『製品』として、小動物用の  $\mu$ -TXePET を想定している。これの規模として、内径（外径）は 20cm（40cm）で体軸方向の長さは 24cm である。

前章を含めてロードマップとして、

- 2008 年：2x4PMT システム-10cm ドリフト TP の基本試験、エレクトロニクスシステムの仕様・設計、とともに、外部資金獲得のための申請、シミュレーション
- 2009 年：TXePET の基本単位として 4x8PMT システム-20cm ドリフト TPC の設計・製作、そして、エレクトロニクスシステムの設計・製作、シミュレーション
- 2010 年：TXePET 基本単位の完成とその性能評価試験（パイプライン読み出し、事象の再構成、設計方針の実証）とまとめ
- 2011 年：TXePET-TDR 作成・完成と産学共同研究申請（パートナー企業決定）
- 2012 年： $\mu$ -TXePET の製作開始

とまとめることができる。ここで、イメージング化のアルゴリズムの TXePET での最適化は産学協同研究として企業の分担とすることを想定している。

## 参考文献

- [1] T.Tanaka et.al., Development of a Si/CdTe semiconductor Compton telescope, Proc. SPIE, vol. 5501 (2004),229-240
- [2] E.Conti et. al., Correlated fluctuations between luminescence and ionization in liquid xenon, Physical Review B68 (2003) 54201

- [3] F.Nishikido et.al., Performance of Prototype Liquid Xenon Scintillation Detector System-for Time-of-Flight Type Positron Emission Tomography with Improved Photomultipliers, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44, No.7A (2005) 5193-5198
- [4] E.Aprile et.al., The electronics read out and data acquisition system for a liquid xenon time projection chamber as a ballon-borne Compton telescope, NIM A412 (1998) 425-436.
- [5] E.Aprile et. al., The LXeGRIT Compton Telescope Prototype: Current Status and Future Prospects, SPIE 4851 (2002) 140, astro-ph/0212005
- [6] 瀧澤京子他、ストリップ型陽極を用いた宇宙ガンマ線用液体 XeTPC の開発 II、日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学)
- [7] J.P. Cussonneau et al., Simulation and evaluation of a new PET system based on liquid xenon as detector medium, Proceedings of the 2nd International Workshop on Applications of Rare Gas Xenon to Science and Technology (XeSAT2005), p 35, Waseda University, March 8-10, 2005, Waseda MediaMix Publishing Co.
- [8] 田内利明, "Liquid Xe Detectors", 測定器開発室勉強会, 平成 18(2006) 年 7 月 12 日, KEK : <http://www-jlc.kek.jp/tauchi/index/LXeTPC/homepage/report.htm>
- [9] V. Solovov et al., NIM A477 (2002) 184-190
- [10] Larger ACT Collaboration (Steven E. Boggs et al.), The Advanced Compton Telescope Mission (NASA Vision Mission Concept Study Report), New Astron.Rev.50 (2006) 604-607.
- [11] S.Kubota et al., PR B20(1979)3486-3496
- [12] E.Aprile et al., NIM A307(1991)119-125
- [13] M.Ichige et al., NIM A333 (1993) 355
- [14] T.Doke et al., NIM 196 (1992), 87