

## ■ 研究紹介

# 液体キセノン検出器用小型パルス管冷凍機の開発

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

春山 富義

tomiyooshi.haruyama@kek.jp

2005年5月31日

## 1. はじめに

スイス・ポールシェラー研究所 (PSI) で準備中の  $\mu$  粒子稀崩壊現象を探索する MEG 実験をはじめ、大量の液体キセノンを使用して粒子検出をする実験が世界のあちこちで計画、実行されようとしている[1,2,3]。数  $l$  から数十  $l$  の液体キセノンを使った実験はこれまでも実験室で多く行なわれて来たが、優れた性質を最大限に利用し、検出器として極限の性能を求めて、数百  $l$  から千  $l$  もの液体キセノンが使われる。キセノンガスは空気液化の副産物として得られるが、年間産出量は限られており、大量のキセノンを確保することも大きな課題になる。低温の液体キセノンの性質、液体キセノン検出器の概要、新しい冷却方法としてのパルス管冷凍機の特徴、長期にわたる物理実験に最適なパルス管冷凍機の開発経過とともに、165 K 付近で大きな冷凍能力を持つパルス管冷凍機の応用についても述べる。

## 2. 液体キセノン

キセノンガスは空気中に 0.086 ppm 含まれる希ガスで、1 気圧下で 165 K ( $-108^{\circ}\text{C}$ ) まで冷えると低温の液体になる。このとき液化によって、体積はおよそ 1/500 になる。つまり 1  $l$  の液体キセノンを得るには 500  $l$  のガスが必要となる。表 1 に液体キセノンと液体窒素の性質を示したが、キセノンでは、液体が固体になるのに必要な潜熱 (融解熱) は、気体が液体になる時の潜熱 (蒸発熱) のわずか 1/100 であることに注意が必要である (表 1)。液体キセノンは冷やし過ぎるとすぐに凍って (三重点: 161 K) しまうので液体になってからの温度制御が重要となる。

表 1. 液体キセノンと液体窒素の代表的な物性値

物性値	液体キセノン	液体窒素
飽和温度 (K @ 0.1 MPa)	164.8	77.3
密度 (g/cc)	2.95	0.80
蒸発潜熱 (J/g)	95.8	199.1
融解潜熱 (J/g)	1.2	28.4

また、液体キセノンは水の約 3 倍の密度を持ち、大変重い。図 1 に示したのは、液体キセノン中に浮かんでいるアルミニウム (密度 2.70 g/cc) の固まりである。このため大量の液体キセノンを用いる場合、総重量が大きくなるので低温容器、実験装置を製作する上では注意が必要である。

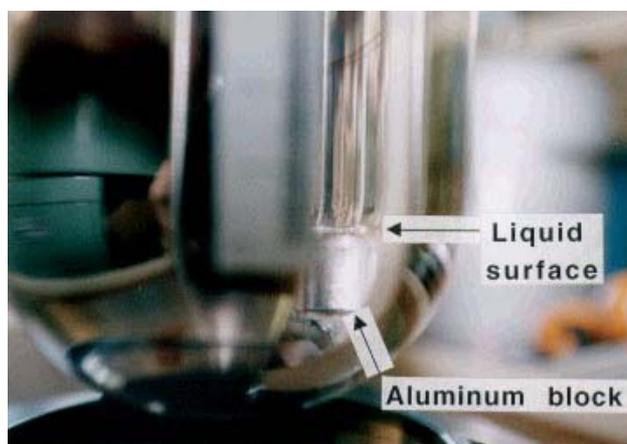


図 1. 液体キセノン中に浮くアルミニウムの固まり

## 3. 液体キセノン検出器

高いエネルギーをもつ粒子や  $\gamma$  線などが液体キセノン中に飛び込むと、キセノン原子が励起され、その原子が元の状態に戻る時、中心波長が 174 nm、半値全幅 14 nm の真空紫外光を発する。この光を光電子増倍管 (フォトマル) で検出することによって、入って来た粒子や  $\gamma$  線の様子を詳しく調べることができる。液体キセノンは一個の光子を発生させるのに必要なエネルギーが小さくて済むため、高い感度が期待でき、また応答が速いという特徴もある。さらに、密度が高いため粒子などと衝突する機会が多く、検出器として有利である。最近では液体キセノン温度でも高い性能を持つフォトマルが開発され、光をより効率よく捉えるためにフォトマルを液体キセノン中に直接浸した検出器が作られている。

このような検出器は、低温液体を保持するため真空断熱の魔法瓶構造になっていて、外部からの熱が入り難くなっているが、実験中は液体中に浸っているフォトマルの電気回路からの発熱、計測用信号線や放射による入熱があるため、冷却が必要となる。信号光の光量を精度よく測定するには液体の均一性が重要であり、液体の圧力や温度が変わると密度などに影響が出て静かな測定を行なうことが難しくなる。このため、液体キセノン検出器では圧力や温度について空間的にも時間的にも高精度な制御が要求される。

現在、 $\mu$ 粒子の $e$ と $\gamma$ への稀崩壊現象を探索する MEG ( $\mu \rightarrow e\gamma$ ) 実験や、暗黒物質を探る実験に向けて、大型の液体キセノン検出器の準備が進められている。図2に MEG 実験用のキセノン検出器の概略図を示す。この検出器では 800 l の液体キセノン中におよそ 850 本のフォトマルを沈めて、ターゲットからの $\gamma$ 線を計測する。

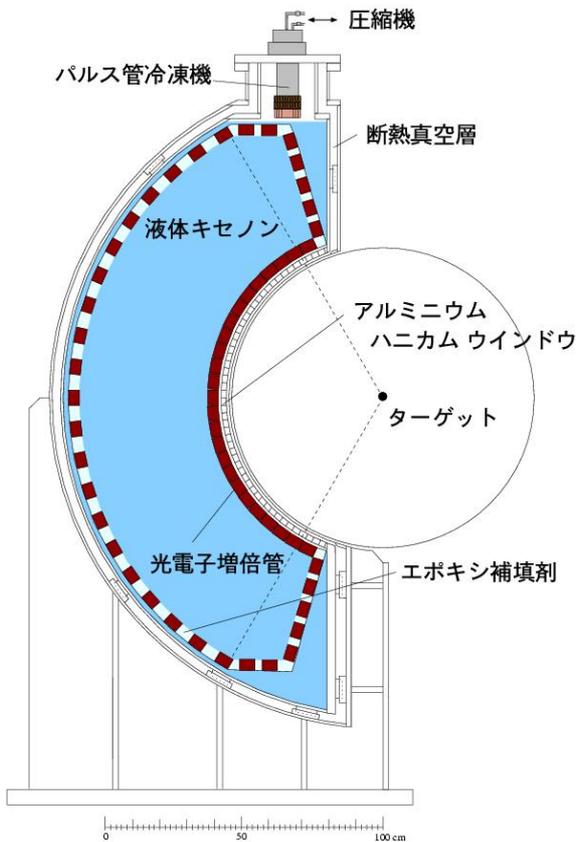


図2.  $\mu$ 粒子稀崩壊探索実験 (MEG) 用液体キセノン検出器

#### 4. パルス管冷凍機の開発

従来、小規模の実験を行なうために製作された液体キセノン検出器はキセノンの量が数 l から数十 l という比較的小型のものがほとんどであった。この場合、実験期間も短時間であることなどから、液体窒素やアルコールとの混合寒剤によって冷却する方法が用いられてきた。液体窒素の

沸点は 77 K ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) なので、キセノンを冷やすには十分な冷却能力を備えているものの、液体キセノンとの温度差が大きく、急激な冷却が行なわれるため液体キセノンの圧力や温度が大きく変動することがある。また、実験中の液体窒素の補給、低温液体の取り扱い、混合寒剤の調整には経験や熟練が必要となり、煩雑な作業が要求される。

そこで長期間にわたり圧力や温度が高精度に制御された検出器の運転を実現するため、これまでのように液体窒素などの低温寒剤を使わない方法を開発した。液体窒素に替わる冷却手段として、電気と冷却水で動作する小型冷凍機を使う方法がある[4]。小型冷凍機はその動作原理によっていくつかの方式に分けられるが、もっとも大きな技術上の相違点は冷却するために低温部で機械式ピストンを用いるか否かである。ピストンを用いる方式の代表的なものは GM 冷凍機、スターリング冷凍機であり、低温部に可動機構をまったく用いないのがパルス管冷凍機である。パルス管冷凍機は低温部に可動機構がまったくないため、振動が小さく、静かな冷却を行なうことができ、また低温部の保守作業を行なう必要もほとんどない。図3にスターリング冷凍機とパルス管冷凍機の冷却サイクルの原理を示した。

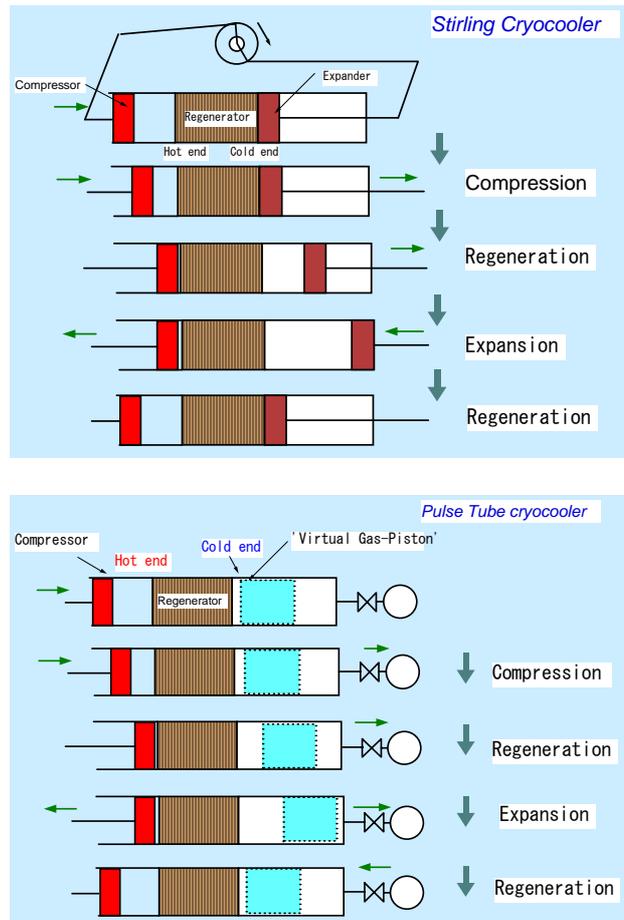


図3. スターリング冷凍機 (上) とパルス管冷凍機 (下) の動作原理

パルス管冷凍機には低温部で可動なものがない。

通常の代替フロン系冷凍機は冷媒の気化潜熱を冷却に用いるが、これらの冷凍機では作動気体の断熱膨張によって寒冷を発生する。その際、気体の圧力と変位（体積）間の位相差が重要である。スターリング冷凍機ではクランク機構などによって圧縮ピストンと膨張ピストンの位相差を機械的に作り出している。一方、パルス管冷凍機では空洞になっている金属管内の気体があたかもガスピストンのように動くことによって、圧力と変位間の位相差を作り出している。このようにパルス管の場合には、低温部分では動くものが必要ではない。

パルス管冷凍機は既に市販されているものもあるが、対象としている温度が液体窒素や液体ヘリウムなど、77Kや4.2Kといった極低温がほとんどであり、冷凍能力も数Wから数十Wと小さい。一方、前述のMEG実験用検出器の場合は、実験中にフォトマルの発熱などで約130Wもの入熱がある。また検出器が特殊な形状をしており、冷凍機の設置スペースも限られている。このため、KEKにおいて、165Kという低温としては比較的高い温度で大きな冷凍能力を持ち、また検出器の設置スペースに適合したパルス管冷凍機を開発した[5]。

このパルス管冷凍機では、165K付近での冷凍能力の最適化、コンパクトな同軸型、低温熱交換を効率的に行なう内側蓄冷器方式を採用することにより、およそ70W（2.2kW圧縮機運転時）の冷凍能力を達成した。図4に概念図を示す。

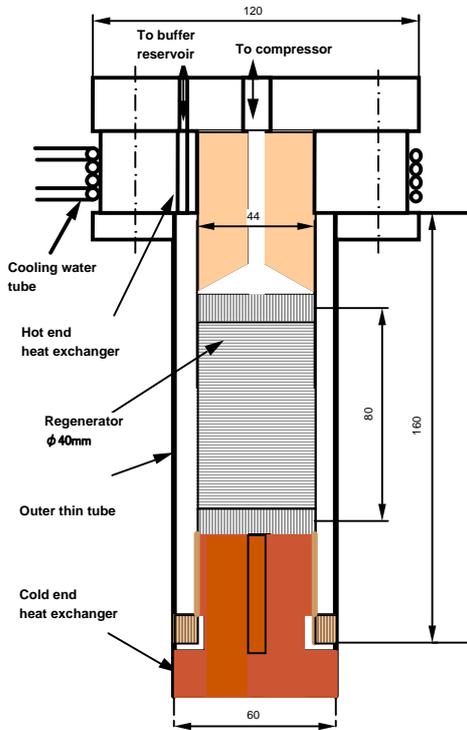


図4. KEKで開発したパルス管冷凍機（70W@165K）

さらにこのパルス管冷凍機をベースにして、岩谷瓦斯（株）の協力によって、より高い信頼性を持つ200W級の高性能パルス管冷凍機を製作した。この高性能パルス管冷凍機は、MEG実験で使用する実機の液体キセノン検出器を冷却するために用いられる（図5）。図6には、この冷凍機を6.5kWのGM型ヘリウム圧縮機で運転した時の冷凍能力の特性を示した。



図5. MEG実験実機用200W@165Kパルス管冷凍機 岩谷瓦斯（株）の協力により作製した。右下は寸法比較のためのカッターナイフである。

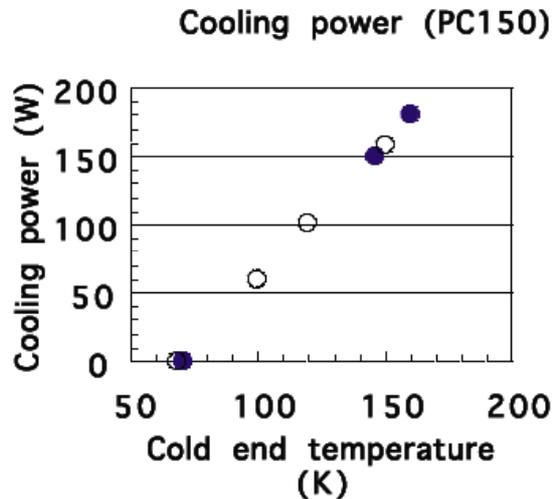


図6. 200W級パルス管冷凍機の冷凍性能（6.5kW運転）

## 6. MEG プロトタイプ検出器の無冷媒運転

MEG 実験で使用する液体キセノン検出器では、前述したように 800 l の液体キセノン中に 850 本のフォトマルが浸され、長期間にわたる実験が行なわれる。神岡に設置されているスーパーカミオカンデと同じように多くのフォトマルが液体を取り囲み、 $\gamma$ 線入射によりキセノンから発せられたシンチレーション光を検出する。MEG グループでは物理実験に先立ち、使用する液体キセノン量 120 l、フォトマル 250 本を設置した大型プロトタイプキセノン検出器を製作、日本やスイスで性能検証実験やフォトマルの校正試験を続けている[6] (図 7)。

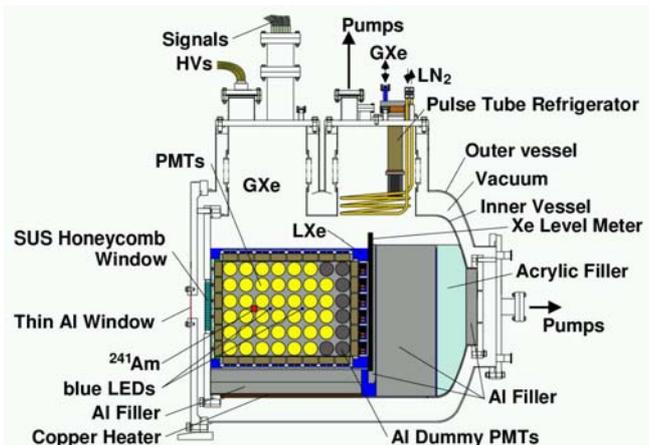


図 7. 液体キセノン 120 l、光電子増倍管 250 台の大型プロトタイプキセノン検出器

このプロトタイプ検出器には 200 W 高性能パルス管冷凍機が設置されている。数回に及ぶ検出器試験を繰り返す中で、液化手順の最適化などを行なうことにより、液体窒素をまったく使わない“無冷媒”での 42 日間に及ぶテスト運転に成功している。従来の大量の液体窒素を使用する方法では、検出器の運転中に液体キセノンの圧力が約  $\pm 0.025$  MPa、温度が約  $\pm 3$  K も変動したが、静かなパルス管冷凍機により、圧力が  $\pm 0.001$  MPa 以下、温度が  $\pm 0.1$  K 以下という好環境下での長期運転が可能となった (図 8)。

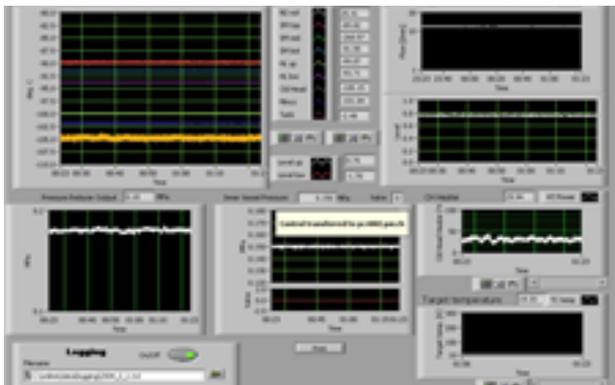


図 8. パルス管冷凍機による“無冷媒”長期連続運転中の液体キセノン温度、圧力の状態

## 7. 広がりを見せるパルス管冷凍機応用

KEK が開発し、岩谷瓦斯 (株) の協力により高い冷凍能力と高い信頼性を実現したこのパルス管冷凍機は、既に米国コロンビア大学の暗黒物質探索実験用テストチェンバーにも応用され、安定した“無冷媒運転”を実証している[7]。図 9 に液体キセノンチェンバーにパルス管冷凍機を組み込んだ様子を示す。暗黒物質探索実験ではキセノンチェンバーと冷凍機低温ヘッドを無酸素銅のフランジで隔離している。

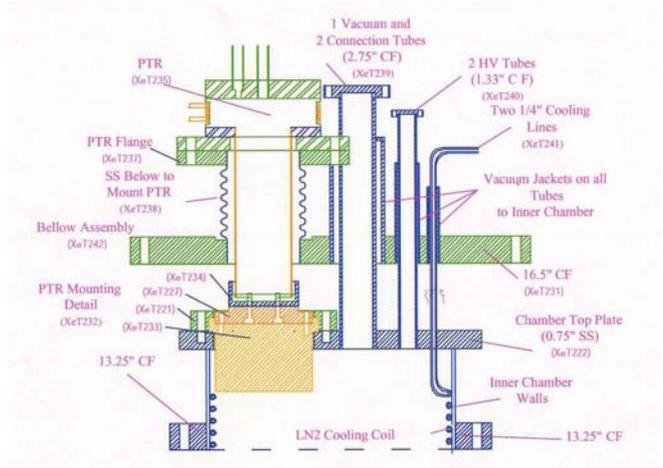


図 9. 暗黒物質探索用プロトタイプキセノンチェンバーに設置したパルス管冷凍機

高冷凍能力をもつ液体キセノン用パルス管冷凍機は、さらに PET (Positron Emission Tomography) における  $\gamma$ 線検出や、キセノンプラズマによるリソグラフィに用いられるキセノンの液化などへの応用が欧州や日本などで検討されている。また、液体キセノンではないが、165 K 付近での高い冷凍能力が評価され CERN におけるシリコン粒子検出器 (TOTEM) のテスト冷却にも応用されている。

## 8. おわりに

大量の液体キセノンを使用する最先端の物理実験を実現するため、165 K という液体キセノン温度に特化した小型パルス管冷凍機を開発した。その結果、200 W 近い冷凍能力が達成でき、従来使用していた液体窒素をまったく使わない冷却運転が可能であること、液体キセノンの高精度温度制御が可能であることなどが実証された。振動が少なく、保守が簡単であるため、長期間にわたる実験にも安定して高性能を維持できることを示すことができた。今後は、MEG 実験をはじめ、物理実験の実機として長期安定運転の実績を作り上げるとともに、より高い性能を得るため R&D を続けて行く予定である。

MEG 実験は東京大学、KEK と早稲田大学の研究者が提案し、日本を中心としてイタリア、スイス、ロシアからなる国際共同実験で、世界でもっとも強力な  $\mu$  粒子ビームを持つスイス・ポールシェラー研究所 (PSI) で 2006 年から実験が行なわれる予定である。

---

本研究開発の一部は科学研究費補助金 (特定領域) によって進められた。なお、本研究によって、筆者、笠見勝祐、井上 均 (高エネルギー加速器研究機構)、および三原 智 (東大素粒子物理国際センター)、が平成 17 年度文部科学大臣表彰科学技術賞 (研究部門) を受賞した。

## 参考文献

- [1] T. Doke, *et al.*, “Present status of liquid rare gas scintillation detectors and their new application to gamma-ray calorimeters”, *Nucl. Instru. and Meth.* **A420** (1999), pp. 62-80.
- [2] S. Mihara, *et al.*, “Development of a liquid xenon photon detector – Toward the search for a muon rare decay mode at Paul Scherrer Institute” (in Japanese), *Cryogenic Engineering* **38** (2003), pp. 94-99.
- [3] E. Aprile, *et al.*, “Xenon: A 1 tonne liquid xenon experiment for a sensitive dark matter search” *Proceedings of Xenon 01*, World Scientific, New Jersey (2002), pp.165-178.
- [4] T. Haruyama, *et al.*, “High-power pulse tube cryocooler for liquid xenon particle detectors” presented at XeSAT2005 (2005), 8-10 March, 2005, Tokyo.
- [5] T. Haruyama, *et al.*, “Development of a high-power coaxial pulse tube refrigerator for a liquid xenon calorimeter”, *Advances in Cryogenic Engineering* 49, AIP, New York (2004), pp. 1459-1466.
- [6] T. Haruyama, *et al.*, “Cryogenic performance of a 120 L liquid xenon photon calorimeter”, *Proceedings of 19th ICEC*, Narosa Publishing House, India (2003), pp.613-616.
- [7] T. Haruyama, *et al.*, “High-power pulse tube cryocooler for liquid xenon particle detectors”, *Cryocooler* **13** (2005), pp. 689-694.