

液体キセノン光子検出器用小型パルス管冷凍機の開発・運転

笠見勝祐 春山富義

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

1.1 はじめに

μ 粒子の特殊な崩壊現象($\mu \rightarrow e \gamma$)を大量の液体キセノンを用いたカロリメータで捕えようとする実験が進められている。実機では 800L の液体キセノンと、液中に直接浸漬される 1000 台の光電子増倍管(フォトマル)が使用される。現在、液体キセノン 120L、フォトマル 250 台の大型プロトタイプカロリメータが製作され、種々の試験が遂行されている。このプロトタイプでは液中で動作する光電子増倍管からの発熱、そのケーブルや周囲からの低温容器への侵入熱により蒸発するキセノンガスを長期間にわたり安定して再凝縮する必要がある。

このような実験では従来液体窒素を用いて冷却する方式が一般に使用されてきた。その場合液体窒素の補給や取扱いに多大な労力を必要とし、実験者の大きな負担となっていた。冷却に冷凍機を使用した場合、運転の省力化と自動化ができるうえ運転状況の遠方監視も可能になるなど、安全面も含めての大きな利点がある。冷凍機取付け部の寸法制限や製作上の簡易さ、動作温度等を考慮して同軸の中心部に蓄冷器、外側の空間をパルス管とする同軸型パルス管冷凍機的设计、製作を行った。

今回は、実験に使用しているパルス管冷凍機の概要と運転について報告する。

1.2 大型プロトタイプ液体キセノンカロリメータとパルス管冷凍機

大型プロトタイプの外観図を Fig.1 に示す。構造は、228 本の光電子増倍管が取り付けられた光電子増倍管アレイと真空断熱層を備えた液体キセノン容器とから構成されている。検出器運転時には、アレイ全体が液体キセノンに浸るようになる。パルス管冷凍機と初期冷却用液化窒素冷却チューブが容器最上部フランジに取り付けられている。

表 1 に液体キセノンの特性を示す。液体キセノンは液相として保てる温度領域がきわめて狭い上に潜熱が非常に小さい。

このため、ごくわずかな温度変化により固体へと相転移する可能性があり、使用する冷凍機の信頼性はむろんのこと再凝縮中の温度制御も非常に重要となる。

パルス管冷凍機を一般に使われている GM 方式の冷凍機と比較した場合、低温部に可動部分が無いという長所を持っている。唯一の可動部分であるロータリーバルブも低温とは全く関係ない常温部に設置することができる。仮にロータリーバルブになんらかの異常が生じたとしても、容器内部の低温状態を保ったままでメンテナンスができる等の大きな利点がある。冷凍機に要請される温度も今回の条件には適当である。

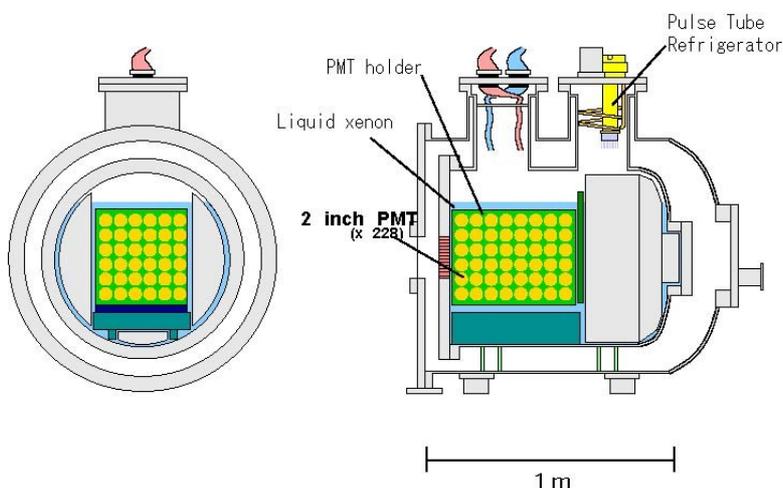


Fig.1 大型プロトタイプ LXe カロリメータ

Property		LXe	LN ₂
Saturated temperature	T (K)	164.78	77.348
Saturated pressure	P (MPa)	0.100	0.1013
Latent heat (for liquid)	ρ (J/kg) X 10 ³	95.8	199.1
Latent heat (for solid)	ρ' (J/kg) X 10 ³	1.2	28.4
Specific heat	C_p (J/kgK) X 10 ³	0.3484	2.03
Density	ρ (kg/m ³) X 10 ³	2.947	0.804
Thermal conductivity	κ (W/mK)	0.108	0.1398
Viscosity	μ (Pa-s) X 10 ⁻⁴	5.08	1.65
Surface tension	σ (N/m) X 10 ⁻³	18.46	8.8
Expansion coefficient	β (1/K) X 10 ⁻³	2.43	5.6
Temperature/Pressure at triple point	T _T (K)/ P _T (MPa)	161.36/0.0815	63.148/0.0125

表 1. 液体キセノンの特性(比較のため液体窒素の特性も載せた)

1.3 パルス管冷凍器の製作

Fig.2 に製作したパルス管冷凍機の写真を、また Fig.3 に概略図を示す。同軸パルス管の外管は 60mm、厚さ 0.5mm、長さ 180mm の薄肉ステンレス管を採用した。このパイプの中に外径 44mm のベーク筒を設置し、ディスク状のステンレスメッシュ(#300) を 860 枚積層して蓄冷器とした。蓄冷器ベーク筒と外筒の間の空間がパルス管として作用する。



Fig.2 LXe 用パルス管冷凍機

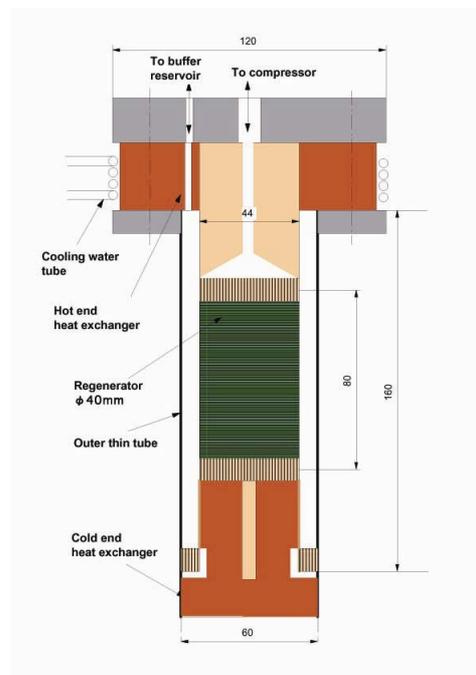


Fig.3 LXe 用パルス管冷凍機概略図

蓄冷器に使用しているステンレスメッシュはシート状の物を重ね合わせてから上下をアルミ板で固定した後ワイヤーカットによりディスク状に切り出した。出来上がったディスクには切断時に付着した細かい切粉の付着が見られたので、超音波洗浄を行いその後一昼夜乾燥させてから組立を行った。ディスクは 1000 枚以上製作し、形状の良いものだけを 860 枚採用している。製作したディスクを Fig.4 に示す。

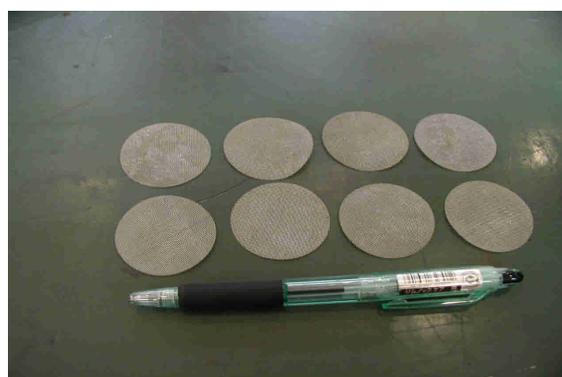


Fig.4 蓄冷器ディスクメッシュ

メッシュはシート状になったものがロール状に巻かれ納品されるため、切断後もその巻き癖が残っているので、組立時は巻き癖による隙間や折れなどがないよう十分な注意が必要となる、今回はディスク筒より外径の小さいステンレス丸棒を用意し、ディスクメッシュ

をベーク筒内に1枚入れては突きかためるという作業を入念に行った。パルス管冷凍機の製作ではこの蓄冷器周りの作業が重要かつ労力を必要とする部位である。

蓄冷器の前後には直径1mmの穴をあけたベークの整流板を取付け、両端に熱交換のための銅ブロックを付けて外筒と組み合わせる。組み立て後に気密試験を行い漏れのないこと確認してから低温端銅ブロックに再凝縮用熱交換器(フィン)をインジウムを介して取付けた。フィンの表面積は 0.1m^2 、フィンのすき間は2mmとした。この熱交換器を含めた全長は240mmである。低温端温度制御のため、白金薄膜温度計(Pt100)とフォイルヒーター(ミンコ社:70 2枚)をフィンと低温端銅ブロックの間に設置した。パルス管室温部は外径4mmの銅管に冷却水を流して冷却する。

1.4 冷凍性能試験

完成したパルス管冷凍機を小型のクライオスタットに取付け後、1000ccのバッファタンク、2.2kWのGM型圧縮機、ロータリーバルブ、循環式冷却水装置を接続した。

動作周波数2Hz、充てんヘリウムガス圧力は $\sim 1.6\text{MPa}$ 、圧縮機およびパルス管高温部の冷却には循環式冷却水装置(NESLAB社:M-75)を使用、冷却水設定温度は25とした。オリフィスバルブ調整後の冷凍能力は $70\text{W}@165\text{K}$ が得られた。

動作周波数 次にパルス管冷凍機を大型プロトタイプカロリメータへ取付けた。この時、パルス管ヘッド部・バッファタンク・ロータリーバルブ間の距離は出来るだけ短くなるように配置した。この状態で最低到達温度の動作周波数依存性を測定した。結果をFig.5に示す。

充てん圧 1.6MPa 付近では $2.0\sim 2.2\text{Hz}$ に最適周波数があると見られる。 2.2Hz 時に得られた最低到達温度は 64K であった。

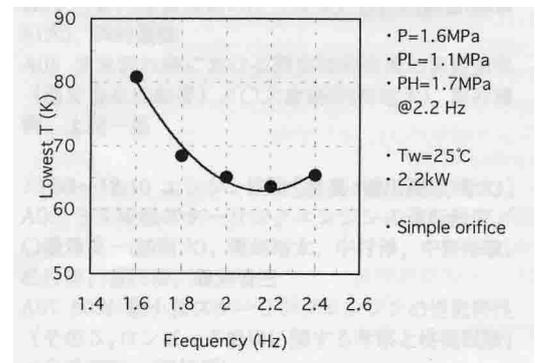


Fig.5 周波数特性

1.5 運転

大型プロトタイプカロリメータの運転手順は以下の様である。まず容器内部を真空にしたあとキセノンガスを封じ込め、液体窒素および冷凍機を起動して内部が 165K 近くになるまで24時間予冷する。この後、キセノン常時供給しながら液体窒素と冷凍機を使用し2日間かけて必要量のキセノンを液化する(100L)。予冷用液体窒素チューブと冷凍機ヘッドをFig.6に示す。液化が終了した時点で、冷凍機による定常運転へと移行する。定常運転中はコールドヘッド部を $164\sim 165\text{K}$ になるようコールドヘッド部を取付けたヒーターにより温度制御を行う。また、冷凍機故障等により内圧が上昇した場合(0.13MPa 以上)は、液体窒素による再凝縮が行われ、さらに上昇した場合は安全弁が作動するようになっている。



Fig.6 冷凍機と液体窒素冷却チューブ

大型プロトタイプカロリメータを用いる実験は18~30日間程度連続して行われる。実験中は予冷時を含めて、冷凍機は連続運転される。

1.6 大型プロトタイプカロリメータ検出器での連続運転

初回冷却運転 大型プロトタイプカロリメータ内に 100L の液体キセノン溜め後、冷凍機を運転して再凝縮による液体保持試験を 18 日間行った。運転初期の余剰冷凍能力(ヒーターでキャンセル分)は約 22W(@165K)であった。運転中の装置全体の写真を Fig.7 に、また圧縮機とチラーユニットを Fig.8 に示す。

冷凍機を起動して 3 日を経過した頃から余剰能力の劣化が始まった。その後徐々に低下したが 9 日目まではその状態で再凝縮を行うことができた。10 日目に、冷凍機を停止し、低温端の加温と低温部系内ガス置換を行った。再び冷凍機を運転したところ余剰冷凍能力は初期の 22W に回復した。その後 7 日目からわずかに冷凍能力の低下が見られたが、実験終了時までには十分な余剰冷凍能力があった。この原因を調べているが、系内ヘリウムガスの汚れや再凝縮部フィン周辺で個体キセノンが熱伝達面を覆い、熱交換効率が低下していること等によると考えられる。



Fig.7 運転中の装置全景

連続運転 これまでに行った実験により、冷凍機の積算運転時間は 3000 時間を越えている、最長連続運転は 30 日を記録している。この間、初期の運転時に見られた冷凍能力の低下が連続運転中何度か見られたが、コールドヘッド低温部を一時加温することで直ちに冷凍能力は回復している。また 50Hz から 60Hz 地域に装置を移動しての実験も行っており、この際には電源周波数変更によって圧縮機の能力が上がり冷凍能力が増大することも確認している。



Fig.8 圧縮機とチラーユニット

現在は、装置をスイス国・ポールシェラー研究所に移動して実験中である。移動に伴う電源電圧の変更のため、他社製の圧縮機(ライボルト社製)に交換しているが冷凍能力に変動は起きていない。運転開始以来、冷凍能力低下によるコールドヘッド部の加温は何度か行っているが機械的なトラブルは一度も起きていない。

1.7 今後の予定

これまでに行った実験により、パルス管冷凍機の性能と信頼性を確立することができた。現在は、 μe 探索実験用の実機に使用する冷凍能力 200W(@165K)程度の大型パルス管冷凍機の製作を進めている。

参考文献

- 1)春山他「液体キセノン粒子検出器用小型パルス管冷凍機の開発」,第5回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, No.01-30 (2001)117-118
- 2)三原他「液体キセノンガンマ線検出器の開発研究」 - ポールシェラー研究所での μ 粒子稀崩壊モード探索にむけて - ,低温工学 Vol.38 No.3 (2003) 94-99
- 3)T.Haruyama, et al., "Cryogenic Performance of a 120L Liquid Xenon Photon Calorimeter", Proceedings of ICEC19, (2003) 613-616