MUEGAMMA 実験用ガンマ線検出器液体キセノン容器設計計画書

平成 13 年 11 月 19 日

東京大学素粒子物理国際研究センター　三原　智
東京都文京区本郷７－３－１
TEL: 03-3815-8384
FAX: 03-3814-8806
Email:mihara@icepp.s.u-tokyo.ac.jp
高エネルギー加速器研究機構　春山　富義
つくば市大穂１－１
TEL:0298-65-5344
FAX:0298-64-2580
Email:tomiyoshi.haruyama@kek.jp

概要

MUEGAMMA 実験用ガンマ線検出器のための液体キセノン容器を製作するにあたっての設計計画をまとめる。容器設計を遂行するにあたっては本書に述べる要求事項を満足した上で、熱侵入量を最小限に抑える設計を行う必要がある。

1. MUEGAMMA 実験

MUEGAMMA 実験はレプトンレーバーを破る $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊を 10^{-14} の分岐比まで探索する実験であり、スイス Paul Scherrer Institut(PSI,http://www.psi.ch)の直流ミューオンビームを用いて行われる。MUEGAMMA 実験用実験装置の概観図を図 1に示す。実験装置は、液体キセノンガンマ線検出器、陽電子スペクトロメータから構成される。陽電子スペクトロメータは、超伝導電磁石、その内部に配置されるドリフトチェンバー、タイミングカウンターから構成されており、ミューオン粒子崩壊からのガンマ線を液体キセノンガンマ線検出器で、陽電子を陽電子スペクトロメータで検出する。現在、各検出器の開発、製作が進行中であり、2003 年夏頃の稼動開始を目標としている。

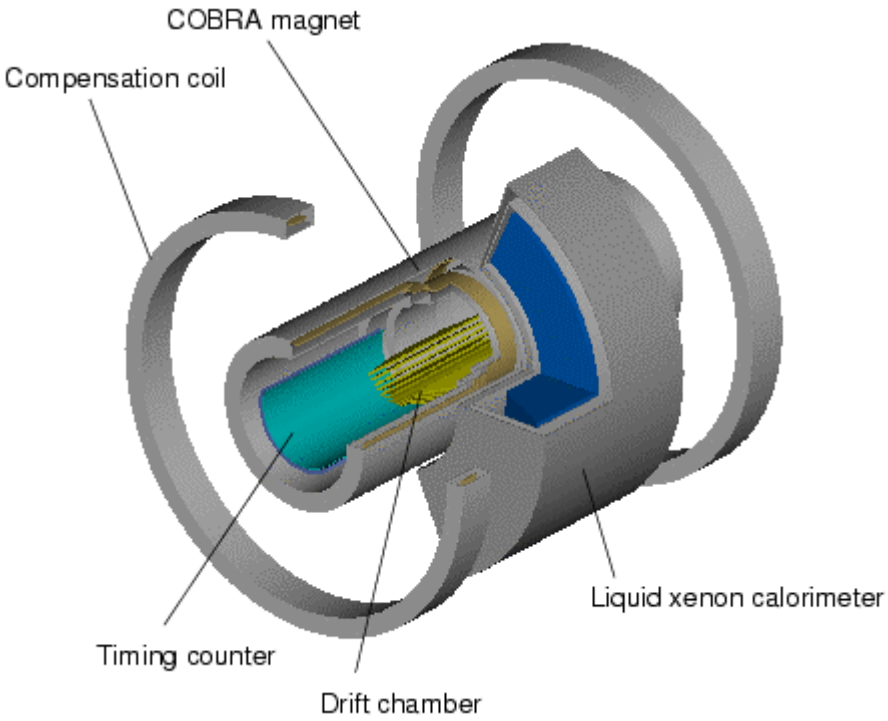

図 1　MUEGAMMA 実験用実験装置概観図

2. ガンマ線検出器

液体キセノンガンマ線検出器はガンマ線が液体キセノンに入射した際に発せられるシンチレーション光を液体キセノン中に浸した光電子増倍管で捉えることにより入射ガンマ線の

エネルギー、入射位置、到達時間を正確に計測するものである。ガンマ線検出器の概観図を図 2に示す。

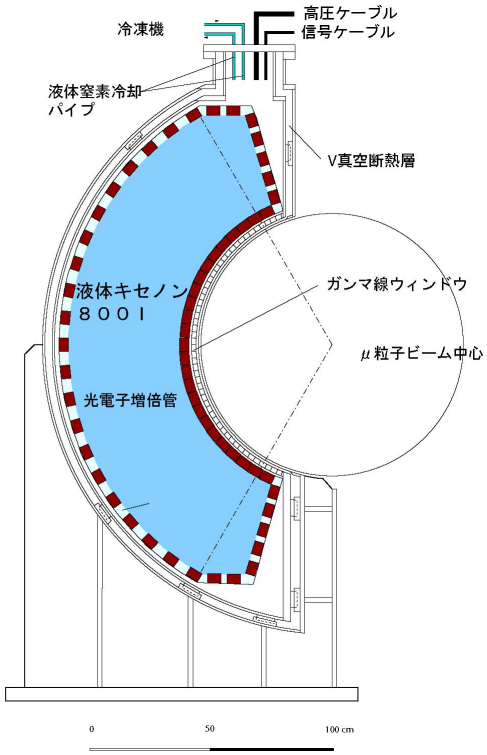

図 2　液体キセノンガンマ線検出器概観図

検出器は、液体キセノン、液体キセノン容器、光電子増倍管、高圧供給用及び信号読み出し用ケーブル、冷凍機、各種センサーから構成される。液体キセノン容器は内部に液体キセノンを蓄えた状態で検出器の長期運転を行うが、その際外部からの熱侵入量を最小限にとどめるため、容器内部を外部から真空断熱層により断熱する二重構造を持つ必要がある。また液体キセノン容器は超伝導電磁石横に配置されるため使用する材質は全て非磁性のものに限られる。

以下に設計を進めるにあたって、個々の事項について考慮に入れるべき特性について記述する。なお、記載の圧力値はすべて絶対圧力を示す。

2.1. 液体キセノン

検出器の運転にあたっては総量約 800 リットルの液体キセノンを必要とする。表 1に検出器運転環境下での液体キセノンの特性をまとめる。容器設計にあたってはこれらの特性を

十分考慮に入れて、強度、熱流入量の最適化を行うことが要求される。運転時には、容器内部はおよそ 0.1—0.12MPa の圧力に保たれるがキセノン液化時には 0.2 MPa にまで圧力が上昇する。このため容器は不意の圧力上昇にも備えて 0.3 MPa までの耐圧を持つことが要求される。

表 1　液体キセノン特性

比重	2.95
沸点	165.1K

2.2. 光電子増倍管

光電子増倍管は液体キセノンから発せられる微小なシンチレーション光を電気信号に変換するための電子機器である。検出器運転にあたっては 800 本の光電子増倍管を使用する。光電子増倍管はキセノン容器の全ての面に取り付けるホルダーに装着されるが、キセノン容器はこのホルダーの装着が 500μm 以上の精度で可能である必要がある。

2.3. 液体窒素冷却パイプ、冷凍機

キセノンの液化に際して、キセノン容器自体と光電子増倍管などの内容物を冷却し、キセノンの液化、再凝縮を行うために、キセノン容器には冷凍機取り付け可能なポートを有していること、液体窒素冷却パイプを備えていることが必要である。使用を予定している冷凍機の形状等を以下に示す。これに加えて容器には内部の温度、圧力等の信号を読み出すためのポートを有することが必要である。

表 2　取り付け予定冷凍機

形状	
重量	

また、液体窒素冷却パイプからの窒素ガスのリターンを断熱真空層内を通すことにより、容器、内容物の予冷を行うことも検討している。設計を進めるにあたってはこの点を検討事項として加える必要がある。

2.4. ガンマ線入射側ウィンドウ

ガンマ線が入射する側の面は、ガンマ線が検出器の有感領域に到達するまでに物質と反応することにより検出効率が低下することを避けるために、極力物質量を抑えた設計を行うことが望ましい。このため二重構造の外側容器のガンマ線入射側ウィンドウはアルミまたは SUS の薄板で製作する必要があり、真空断熱層を真空引きした状態で容器外部からかかる大気圧に十分耐えうる強度を有している必要がある。内側容器のウィンドウは金属ハニカムまたはカーボンファイバー製の薄板を SUS 枠内にはめ込んだものを使用する。内側容器のウィンドウは実験グループで現在開発を進めており、設計にあたってはこのウィンドウを取り付けることを想定して進める必要がある。

3. ガンマ線検出器運転過程

ガンマ線検出器運転の一連の過程は以下の手順にしたがって行われる。

① 検出器の予冷

検出器内部に液体キセノンを蓄積するにあたり、検出器内部を冷却する必要がる。冷却にあたっては、外側真空槽を十分真空引きしたのち 0.2 MPa のキセノンガスを検出器内部に封じ込めた状態で冷凍機、液体窒素パイプにより 170 K 程度まで予備冷却を行う。

② キセノン液化

冷却終了後検出器内部のガス圧が 0.2 MPa を超えないように圧力をコントロールしながら、冷凍機、液体窒素パイプによりキセノンを液化し検出器内部に 800 リットルの液体キセノンを蓄積させる。液化を行っている間は温度計、液面計により液面の監視を行う。

③ 再凝縮（検出器運転）

液化終了後、検出器運転を行う。運転にあたっては、光電子増倍管に高電圧が印可されるため光電子増倍管から熱が発生するとともに、外部からの熱流入量によって液体キセノンが蒸発しつづける。これを再凝縮し、検出器内部の温度圧力を安定状態に保つために冷凍機による再凝縮を行う。実験中の検出器運転は１年間の長期に渡ることが予想されるため、冷凍機の出力を低く押さえ液体キセノンを長期間安定に保つために、外部からの熱流入量を減らす構造を取り入れることが肝要である。

④ 回収

実験終了後、液体キセノンの回収を行う。回収にあたっては回収容器を液体窒素により冷却することにより行う。

⑤　保守作業

検出器運転の合間に光電子増倍管の交換作業を行うことが予想される。このため検出器容器は開閉可能であり、光電子増倍管の交換等のために内部へのアクセスが容易に行える必要がある。

4. 容器寸法

内側容器

内径　60 cm

外径　110 cm

全長　104 cm

ビーム軸[1]周り開き角　±65 度の位置に光電子増倍管が装着可能であること。

外側容器

内径　55 cm

外径　120 cm 以下

全長　130 cm 以下

ビーム軸周り開き角　超伝導電磁石の横に配置するため脚部も含めて±９０度の範囲に収まっていること。

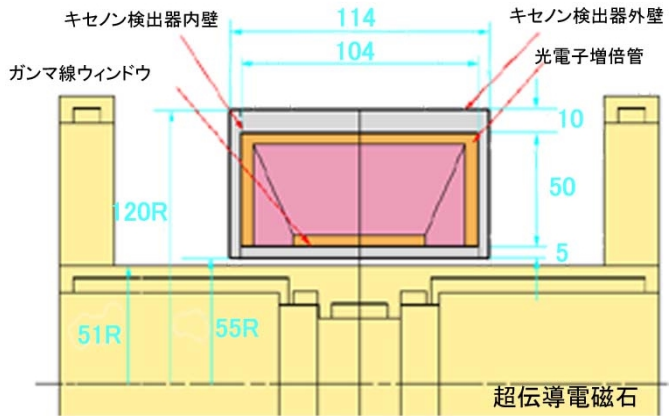

図３　ガンマ線検出器寸法図（単位ｃｍ）

5. 強度

①　容器内部、ならびに真空断熱層の真空引きが可能であること。容器内部に外圧がかか

[1] ビーム軸：超伝導磁石の中心線、ならびにガンマ線検出器の中心線

る状態（容器内部が真空状態で、断熱層が大気圧）についても検討する必要がある。

② 液化時ならびに定常運転時に 800 リットルの液体キセノンを容器内部に蓄えた状態で予想される最大圧力 0.3 MPa が内側容器にかかっても十分に耐える構造を持つこと。

③ 光電子増倍管総重量　８０ｋｇ、および光電子増倍管サポート約 200 ｋｇを容器内部に取り付けても 500μ以上のゆがみが生じないこと。

④ 車両による輸送時に想定される上下振動、横揺れに対して、輸送治具取り付けなどにより十分な補強が可能なこと。

6. 侵入熱量

容器設計にあたって上に述べた強度に対する要求を保ちながらも検出器運転時における外部からの侵入熱量を最小化するような工夫が求められる。設計を行うにあたっては、熱放射による影響、サポート、外部容器との接合部、上部フランジポートからの熱伝導による侵入熱量を計算し最小化する必要がある。

7. ガンマ線検出器設計仕様まとめ

① 外部からの熱侵入を極力抑える構造を取る必要性から外壁、内壁から構成される真空断熱構造を有すること。また容器設計にあたっては検出器運転時の侵入熱量の計算を行い、計算結果を添付すること。
② 容器冷却時にも十分な真空度を保つことができるとともに、予冷時の容器内側の圧力上昇（最大 0.3 Mpa）に耐える十分な強度を有していること。容器設計にあたっては強度計算結果を添付すること。
③ 光電子増倍管支持ホルダーが装着可能であり、500μm 以下の取り付け精度が可能であること。
④ ケーブル、冷凍機装着、各種センサー読み出しのために容器上部に次に述べる３種類のポート（内径 280 mmϕ以上）を備えていること。各ポートの詳細については後ほど調整を行う。
    1. 高電圧供給用のケーブル、信号読み出し用ケーブルを装着するためのフィードスルーコネクタを取り付けできるポート。フィードスルーコネクタは実験グループ

より供給する。

2. 冷凍機装着が可能なポート。冷凍機は実験グループが準備する。
3. 各種センサー信号読み出し用のポート。

⑤ 容器の予冷、キセノン液化を効率的に行うため液体窒素冷却パイプを備えていること。なお、この液体窒素冷却パイプは冷凍機が装着されるポートに装備されていることが望ましい。なお、液体窒素冷却パイプからの窒素ガスのリターンを断熱真空層内を通すことにより、容器、内容物の予冷を行うことも検討している。詳細については打ち合わせにより決定する。

⑥ ガンマ線入射面はガンマ線が物質と相互作用することによる検出効率の低下を防ぐために極力物質量を低減できる構造を持つ必要がある。このため入射面の内壁には実験グループで開発中の金属ハニカム（またはカーボンファイバー）製のガンマ線ウィンドウが溶接取り付け可能であること。ウィンドウは実験グループが支給する。

⑦ 車両による輸送時の衝撃に耐える構造を有すること。

⑧ 実験開始時には電磁石近辺に配置されるため使用される材質は全て非磁性物質であること。

⑨ 要求寸法を全て満足すること。

8. 開発スケジュール

検出器設計、製作にあたっての予定は以下のようである。

平成１４年　２月　設計作業終了
平成１４年　３月　検出器製作開始
平成１５年１２月　検出器製作終了
平成１５年　１月　検出器冷却試験
平成１５年　３月　スイス PSI 研究所へ輸送、光電子増倍管取り付け開始
平成１５年　４月　液化試験
平成１５年　８月　実験開始