

DEVELOPMENT OF NEW CRYOSTAT FOR LIQUID-Ar TPC DETECTOR

○ Muneyoshi Maki, Katsuyu Kasami, Masashi Tanaka, Takasumi Maruyama, Yutaka Yamanoi
 Takuya Hasegawa, Tomiyoshi Haruyama, Koichiro Nishikawa
 High Energy Accelerator Research Organization(KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A liquid argon TPC is a very useful detector for the next generation physics to search for “CP violation in lepton sector”, “nucleon decay” and “dark matter”. The hundred kton liquid argon TPC in the Okinoshima island has been proposed [1] to perform such physics in future. To check the detector performance of liquid argon TPC, especially particle IDs, we performed test beam in October 2010 using K1.1BR beamline in J-PARC hadron hall, so called T32 test-experiment.

In last T32 experiment, the prototype cryostat with size of 250 L was borrowed from MEG (Mu → E+gamma) experiment, but we had to bring it back to Europe, therefore we started to design and have produced a new cryostat for the next possible test-beam from September 2010. For the R&D on the liquid argon TPC, the good purity is indispensable, therefore the liquid circulation system and good pre-cooling system is crucial. We added the materials for those R&D improvements to the new cryostat.

We report the results of the various performance tests on the cryostat which has been performed at present in this article.

液体アルゴン TPC 検出器用クライオスタットの開発

1. はじめに

液体アルゴン TPC 検出器は、将来的に「レプトンセクターの CP の破れ」、「核子崩壊」や「暗黒物質」の探索を行う物理実験に対して非常に有望な検出器であり、将来は 100kton クラスの液体アルゴン TPC を隠岐の島へ建設する事が提案されている。

現在はその準備として、250L サイズの液体アルゴン TPC 検出器を製作し、R&Dを行っている。

2010年10月 J-PARC ハドロンホール K1.1BR ビームラインで行った T32 実験は、MEG 実験でプロトタイプとして作られた 250L サイズのクライオスタットを使用して行った。MEG 実験は、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の探索を行う実験で、現在、スイスにあるポールシェラー研究所 (PSI) にて行われている。

我々は MEG グループへのクライオスタット返還を機に、2010年9月より、MEG タイプのクライオスタットに幾つかの改良を加えたクライオスタットの製作に取掛り、現在、様々な性能試験を行っている。

アルゴン TPC の大型化に欠かせない重要ポイントの一つとして、容器内の液体アルゴンを高純度に保たなければならないという点が挙げられる。

新規製作したクライオスタットには、液体アルゴン純度を向上させる為の循環系を強化し、予冷時間短縮の為の構造を付け加えている。

ここでは新規に製作したクライオスタットの開発について報告する。

2. クライオスタット仕様

2.1 仕様

新たに製作するクライオスタットの主な仕様を表 1 に示す。クライオスタット外形寸法は、約 1230×1000×1750mm。内槽寸法は、内径 700mm、奥行き 1000mm で、容積は約 400L。容器内部の構造としては、内外槽間に真空断熱層及び断熱材を施すことにより、容器内部への熱侵入量を抑えている。

使用流体は液体アルゴンで、設計圧力は 0.5MPa ゲージとなっている。

表 1 : 250L Ar 容器製作仕様

項目	仕様	
使用流体	液化アルゴン	
設計圧力	0.5MPa(ゲージ) = 耐圧部に適用	
設計温度	-196°C ~ 70°C = 接液部に適用	
常用圧力	0.2 MPa(ゲージ) = 耐圧部に適用	
常用温度	-196°C ~ 70°C = 接液部に適用	
内容積	約 400L (ネック部を除く)	
断熱方式	真空多層断熱(スーパーインシュレーションによる)	
主要材質	容器部 SUS304	
熱侵入量	低温部 -196°C、高温部 27°C で計算し、42W 程度	
表面仕上	内槽	外面:酸洗肌、内面:EP 処理(溶接箇所は酸洗処置とする。)
	外槽	内面、外面共に酸洗肌とする。

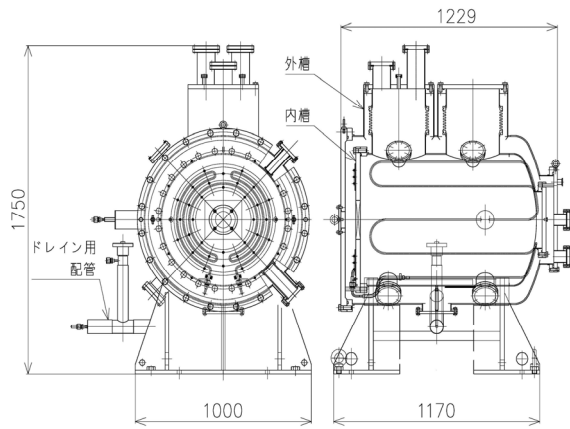


図1：250LAr 容器概観

2.2 MEG プロトタイプ容器に対する追加変更点

MEG 実験にて用いられている 250L サイズのクライオスタットに加えた、主な追加変更点を以下に挙げる。

1. 内槽胴回りへの予冷配管の追加 (図2)

内槽へ液体アルゴンを充填する際、予冷にかかる時間を短縮する為に施工。内槽胴回りおよび鏡板、フロントフランジに銅製 3/8 インチ管をはんだ付けしている。

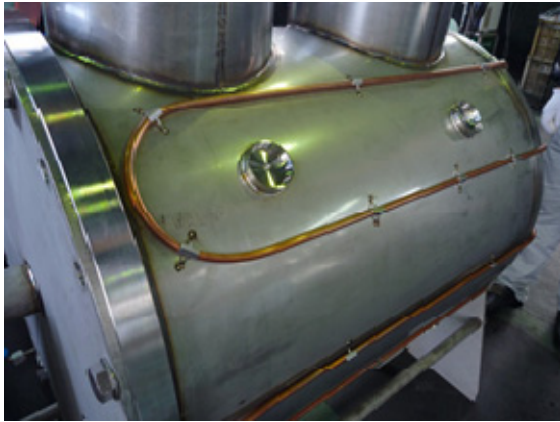


図2：内槽周り予冷管

2. ドレイン用配管追加 (図1)

ドレイン用配管は、液体アルゴンを循環する際の取り出し口として用いる。また、これまで実験終了後の不要となった液体は、自然蒸発により外部へと放出していたが、これでは内槽内が空になるまでに数日を要する為、外部放出口としても使用する。

3. 内槽浮き上がり防止用サポート追加 (図3)

内槽のみを真空引きした場合に、1~2cm 程度、内槽全体が持ち上がる。これを防止する為の措置として内槽上部に FRP サポートを施工した (4ヶ所)。サポートの取付角度は 45° で、外径 50mm、板厚 3mm。内槽との間に約 1mm の

隙間を設けている。(サポート軸方向)
内槽内が空の状態の内槽のみを真空引きした場合に、上向きにかかる力は 11.3kN で、サポート 1 本当たりにかかる荷重はおよそ 2.8kN となる。

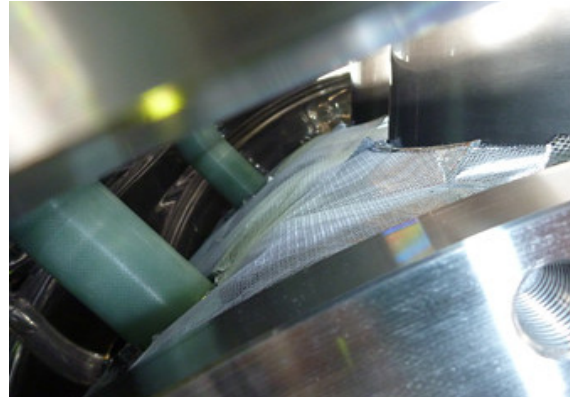


図3：内槽浮き上がり防止サポート

3. 性能検査について

3.1 熱侵入

クライオスタットの製作における、重要な設計ポイントとして、熱侵入量をどれだけ抑えるかという点が挙げられる。

本クライオスタットでは、内外槽間の真空断熱層および断熱材の挿入、ベローズ取付により内槽内部への熱侵入を低減させている。

熱侵入量内訳 (計算値)

1. 個体熱伝導 : 17W
2. 放射熱 : 96W(断熱材無しの時)
3. ガスによる熱伝導 : 2W

3.2 スーパーインシュレーション

3.1 の放射熱による熱侵入量を低減させる為の措置として、スーパーインシュレーション (以下 SI) を用いた。SI は、内槽周りに 30 層縫い付けてある。理想的に n 層の SI を施工した場合の熱侵入量計算を以下に示す^[2]。

$$Q_s = \sigma \cdot A_L \cdot E \cdot (T_H^4 - T_L^4) \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_s} + \frac{1}{\epsilon_h} - 1 + \left(\frac{2}{\epsilon_s} - 1\right)n}$$

Q_s : 熱侵入量 σ : ステファンボルツマン定数 $5.671 \times 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$ A_L : 受熱側面積 $4.2 [m^2]$ T_H : 放射側温度 $300 [K]$ T_L : 受熱側温度 $77 [K]$ ϵ_s : SI 放射率 0.06 ϵ_h : 放射側放射率 0.3 n : 30 [層]

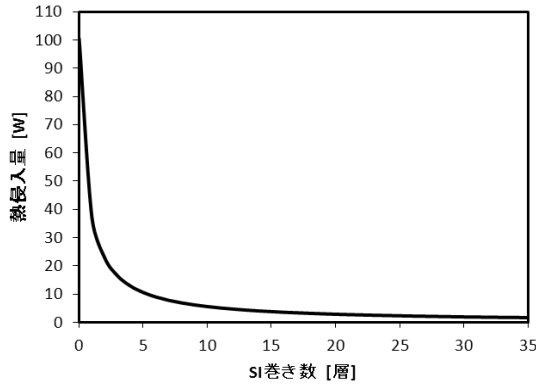


図 4 : SI 巻き数と放射熱侵入量

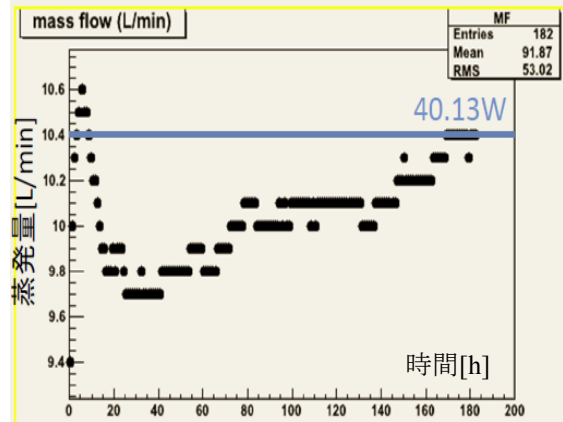


図 6 : ガス体の計量による熱侵入量測定結果

今回の製作においては、SI の巻き数を 30 層とした。30 層にした場合の放射熱による熱侵入量 Q_s は 2[W]となり、全ての熱侵入量を合計すると 21[W]となる。(図 4)

3.3 熱侵入量測定

実際の内槽容器内に対する熱侵入量を測定する為に、液体窒素を用いた蒸発量試験を行った。

手順

1. 内槽容器内に液面計 (Model 186 Liquid Level Controller:AMI) を取り付ける。
2. 蒸発ガス取り出し口に質量流量計 (azbil CMS0020:株式会社山武) および、ガスメータ (DC-2A:品川精機株式会社) を取り付ける。
3. ガス体の計量と、液体体積変化の両面から、液体窒素の蒸発量測定を行い、熱侵入量を算出する。

試験

1. 2011/6/13 19時 液面計 53cm まで液体窒素充填
2. 2011/6/21 9時 蒸発量試験終了

結果

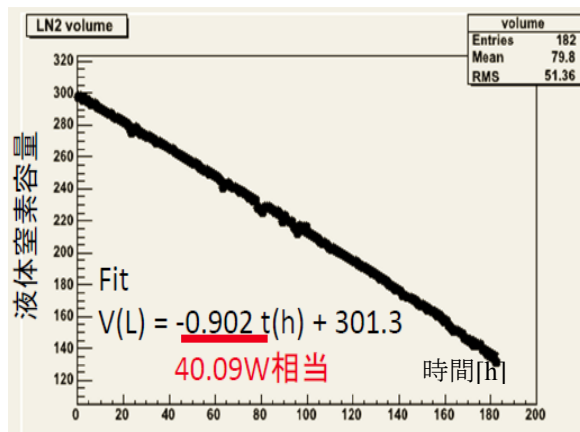


図 5 : 液体窒素体積による熱侵入量測定結果

図 5 および図 6 より、内槽容器内への実熱侵入量は 40.1W 程度であることがわかった。図 5 の液体窒素体積による熱侵入量測定は、内槽内部に設置した液面計を用いて体積変化を測定し、これをガス蒸発量に変換して熱侵入量を算出した。図 6 のガス体の計量による熱侵入量測定では、容器上部に取り付けたガス放出管の途中に質量流量計を接続して、直接ガス蒸発量を測定、熱侵入量を算出した。

設計段階における熱侵入量は 21[W]であったが、実熱侵入量と比較すると、およそ 2 倍の開きがあった。原因は SI による熱伝導が考えられる。今回施工した SI は 30 層であった。SI は重ねる層が増えるほど、計算上の熱侵入量は抑えられる。しかし、施工時に SI の積層による厚みによって、外槽との接触を避けるためにきつく締め付けた事や、SI を締め付けた事による SI 同士の接触によって、熱伝導による熱侵入量が増加した事が考えられる。このことより、設計時の放射熱による熱侵入量は、SI 同士の接触などを考慮して、計算値に対して 10 倍程度の安全率をかけておく必要がある。

SI は施工状況によって、熱侵入量が計算値と大きく異なる事が知られている。今後 SI を施工する機会があれば、熱伝導による熱侵入量を減らす為に以下の要領を取り入れたい。

1. SI 同士の接触を避ける為に、SI 積層時は、できる限り緩めに巻くようにする。
2. SI を施工しやすくする為に、SI 巻き数が 15 層を超えた辺りから、SI 巻き数に対する熱侵入量値の変化が小さくなっている事に着目して、SI 巻き数を 20 層前後にする。(図 4) もしくは、設計段階で、真空断熱層の隙間を大きくしておく。

3.4 低温リーク試験

低温状態における内槽からのリーク量が、どの程度あるのかをリークディテクタを用いて計測する。

手順

1. 液体窒素を液面計 53cm まで充填した状態で、ガスヘリウムを注入。
2. ガスヘリウムで加圧しながら、液体窒素を排

出していく過程で、ヘリウムリークディテクタ(HELEN:A-210M-LD)を用いてリーク量を測定する。
(リーク量要請 : $1.33 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)

結果

表 2 : 液面高さとヘリウムリーク量

液面計[cm]	53.0	29.5	13.8
内槽圧力[kPa,G]	16	16	18
リークレート [Pa · m ³ /s]	8.8×10^{-11}	1.3×10^{-10}	2.0×10^{-10}

リーク量要請($1.33 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)に対して、液面が低くなる過程で、リーク量が大きくなる傾向が見られた。この傾向はこれまでの実験でも、液体アルゴン充填途中もしくは、排出時において真空断熱層の真空度悪化は経験しており、満タンまで充填すればリークが止まることも経験している。これより、リークの原因は、フランジの U タイトシール部が、一様温度になっていない事により、部分的な熱歪による変形でリークを起こすと言える。

この程度のリークでは、T32 実験の経験から、液体アルゴン純度を悪化させるような問題は起こらなかった。

3.5 予冷能力試験

MEG タイプクライオスタットでの液体アルゴン充填時間は、予冷開始から、液体が溜まり始めるまでに約 5 時間、充填を完了するまでには 8 時間以上を要していた。

今回、新たに製作したクライオスタットに取付けた予冷配管を使って、予冷開始～充填完了にかかった時間は、内槽の予冷開始：液面計表示値 0cm (2011/6/13 14:40)～充填完了：液面計表示 53cm (2011/6/13 19:00)。以上より、予冷開始～充填完了に要した時間は、約 4.5 時間で、これまでよりも 2 倍程度の予冷能力向上となった。

この差は予冷過程の違いによるところが大きく関係している。予冷配管無しでは、溜まった液体の周辺が徐々に冷えながら液面が上がっていくのに対し、予冷配管に液体窒素を流してから充填すると、容器全体が低温状態になっている為、注入した液体はスムーズに容器に溜まる。

4. まとめ

- 予冷配管を施工したことにより、内槽容器液体充填完了までに要する時間が、これまでの 8 時間以上から 4.5 時間程度に短縮された。
- 内槽浮き上り防止用サポートを追加した。
- 250LAr 容器内部への熱侵入量は、40.1[W]程度であることがわかった。(SI : 30 層)
- 低温状態でのヘリウムリーク量は $2.0 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度である事がわかった。

参考文献

- [1] “A Possible Future Long Baseline Neutrino and Nucleon Decay Experiment with a 100 kton Liquid Argon TPC at Okinoshima using the J-PARC Neutrino Facility.”
A. Badertscher, et al hep-ph:0804.2111
- [2] 日本機械学会 伝熱工学資料 改訂第 5 版