

液体キセノンガンマ線検出器の開発*

東京大学素粒子物理国際研究センター

三原 智

2007年6月10日

1. はじめに

$\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験 MEG のための液体キセノンガンマ線検出器の建設がようやく終盤を迎え、その本格的運転が開始されようとしている。本稿では開発の黎明期から現在に至るまでの経緯を述べ、今後どのような進展が期待されるのかを説明する。

$\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験のために液体キセノンを使用したガンマ線検出器の使用が提案されたのは、1997年3月にスイス・ポールシェラー研究所 (Paul Scherrer Institut, PSI) で開かれたワークショップ (Workshop on a new $\mu \rightarrow e\gamma$ Experiment at PSI) にさかのぼる。このワークショップでは $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験を新たに PSI で行おうと関係者が一堂に会し、その場において東大の故・折戸周治氏が図1に示されるような液体キセノン検出器の使用を提案した[1]。液体キセノンを検出器媒体とし、液体キセノンから発せられるシンチレーション光を有感領域の周囲のすべての面に敷き詰めた光電子増倍管 (PMT) により捉え、ガンマ線のエネルギー、入射位置、到達時間を計測する検出器である。この提案が行われた後、東大、早稲田大、KEK からなる日本グループは直ちに小型のプロトタイプを製作し、測定器原理の検証実験を行った。このプロトタイプは有感領域体積 2.3 リットルを持ち、周囲に配置した 32 本の PMT によりシンチレーション光を捉えるというもので、液体窒素に

よりキセノンの液化、再凝縮を行っていた。検出器内部には 1.8 MeV (^{88}Y) までのいくつかのガンマ線ソースが配置され、それらに対する応答を調べることで検出器の性能評価を行った[2]。

この成果に基づいて、1999年 $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験を新たに PSI で行うための実験プロポーザル[3]が提出され採択された。この際、データ収集のためにビームを使用するためには、プロポーザルに明記されている実機と同程度の大きさのプロトタイプ検出器で性能を実証することが必要条件とされた。また採択直後にこの実験のための評価委員が選定され、その後ほぼ年2回の頻度で実験の進捗状況が厳しく審査されている。

こちらのプロトタイプは、初代プロトタイプがスモールプロトタイプと呼ばれたことに対して、ラージプロトタイプと呼ばれるようになった。ラージプロトタイプは図2に示すように直方体のホルダーに装着された 228 本の PMT と真空断熱層を備えたクライオスタットから構成されている。有感領域体積は 70 リットル、運転には 120 リットルの液体キセノンが使用される。キセノンの液化、再凝縮のためには液体キセノン検出器用に新たに開発したパルス管冷凍機を採用した。このラージプロトタイプを使用した開発研究により、MEG キセノン検出器の建設に必要なすべての基礎的技術が確立されたといっても過言ではない。

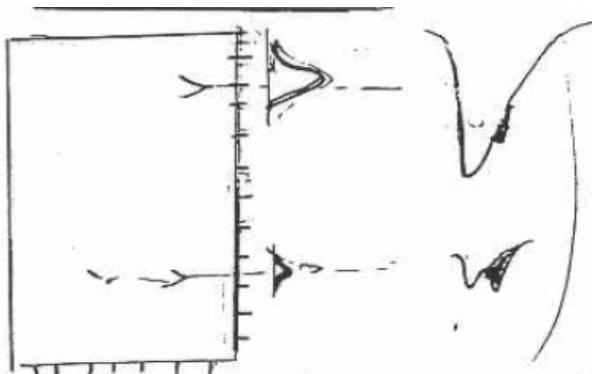


図1 1997年3月のPSIワークショップで提案された液体キセノンガンマ線検出器[1]

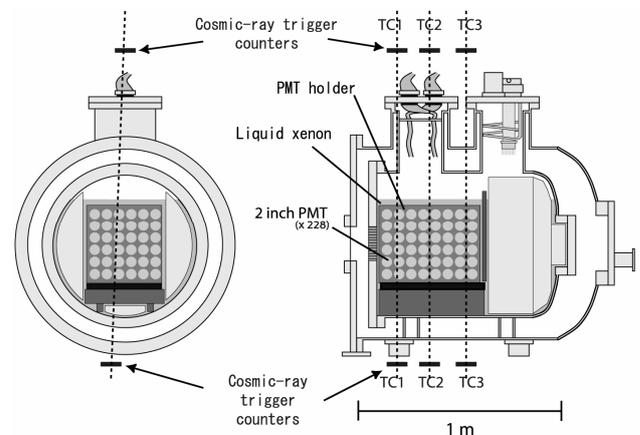


図2 液体キセノンガンマ線検出器ラージプロトタイプ

* 編集部注：三原智氏は、「PSIにおける $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験(MEG)のための大型液体キセノン検出器の開発・製作」の業績により2006年度(平成18年度)小柴賞(高エネルギー加速器科学研究奨励会主催)を受賞されました。

2. $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験 MEG

ご存知の方も多いことと期待するが、ここで PSI での $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索実験 MEG について少し説明しておこう。

現在のところ $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊については分岐比の上限値が米国ロスアラモス研究所にて行われた MEGA 実験により与えられており、90% 信頼度で 1.2×10^{-11} という値が得られている[4]。MEG はこれよりも 2 桁以上よい感度でこのモードの探索を行おうというものである。

$\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊は反応の前後でレプトンフレーバーが保存されておらず、当然のことながら標準模型の枠内では完全に禁止されている。一方、標準模型を越える理論を考えた場合、そこに新たに導入される粒子間でフレーバー保存が保たれている保証はなく、それらを通してわれわれがよく知っている通常粒子の反応にもその効果が現れる可能性は十分ありえる。すなわち、もしわれわれが $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊を発見することができれば、そのことは直ちに標準模型を超える新物理が存在することの確固たる証明となり、加えてその新物理がどのようなものであるのかに関する有力な情報を得ることができる。われわれが熟知している μ 粒子の振舞いを精緻に調べることにより、われわれの知らない高いエネルギーの世界でどのような物理現象が起こっているのかの情報が得られるわけである。

実際のところ、標準模型を超える理論として超対称性標準模型を考えた場合、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊が現在の上限値のすぐ下に現れる可能性が高く、このことは多くの理論家たちの指摘するところとなっている[5]。また、目標感度までに $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の証拠を見つけられなかったとしても、現在候補にあがっている新物理は大きく制約を受け、再考を迫られるだろう。MEG の結果がこれからの素粒子物理の方向を決定付ける大きな役割を担うことを信じて疑わない。

MEG の検出器概観図を図 3 に示す。PSI の $\pi E5$ ビームラインで供給される世界最高強度の μ^+ 粒子ビームを検出器中心に置かれた静止ターゲットで止め、そこから発する陽電子を勾配磁場を持つ COBRA 超伝導電磁石[6]と低物質量子ドリフトチェンバー、TOF カウンターからなる陽電子スペクトロメータにより検出し、液体キセノンガンマ線検出器によりガンマ線を検出する。MEG は極微の分岐比まで探索を行おうとする高計数率実験である。毎秒 $10^7 \sim 10^8$ の μ 粒子がターゲット上で静止し、それらのうちほとんどすべてが Michel 崩壊により崩壊して陽電子を放出し、一部がガンマ線をともなった放射崩壊を起こす。

液体キセノンガンマ線検出器は超伝導電磁石の外部に置かれているとはいえこの大量のバックグラウンドにさらされる。にもかかわらず、なぜセグメント化されていないのか？ 実際こういう質問を何度も受けた。コラボレータが

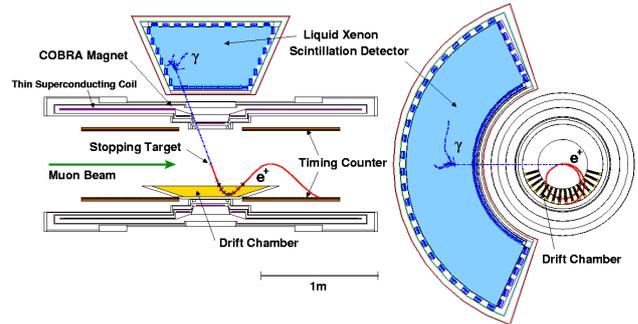


図 3 MEG 検出器セットアップ

らも受けたくらいである。通常のカロリメータならカウンターごとに読み出しが分割されており、カロリメータの中の一部が光っても別のほとんどの部分はその光を見ることはないので計数率が高くなってもある程度までは安心していられる。

MEG は稀崩壊モード探索実験なので検出器は大立体角を覆っていることが必要である。この要求を満たしながらも大量のバックグラウンドから信号 - μ 粒子の質量の半分のエネルギー (52.8 MeV) をもつガンマ線と陽電子 を選び出すためには、検出器に高い分解能が要求された。そして、そのためには情報を失わずに光を集めるということが極めて大事であった。結晶を使用したセグメント化されたカロリメータの場合を思い浮かべてほしい。ガンマ線がエネルギーを失い、そこから発せられた光が読み出しデバイスに到達するまでには何度か結晶の壁面で反射されなければならない。反射率が常にほぼ 100% ならば問題はないのであるが、実際そのような都合のよいことはなく、ガンマ線が結晶内のどこでエネルギーを落とすかによって読み出しデバイスに光が到達するまでの反射回数にばらつきが現れ分解能を劣化させる。

このため有感領域は壁のない均質なものであるべしという要請が出現した。巨大で均質な結晶が手に入れば何の問題もなかったのであるが、やはりそれは無理な相談であった。その結果、液体を検出媒体として選び、ガンマ線阻止能力の高い原子番号の大きな物質で、高計数率下でも事象の重なり (パイルアップイベント) を区別できるように信号の減衰時間の短いものが必要となった。これらの要求を満足する物質として液体キセノンはぴったりのものだったわけである。

ガンマ線が液体キセノン中でエネルギーを失うと中心波長がおよそ 178 nm のシンチレーション光が発せられる。この光を電気信号に変換するために MEG では技術的になじみの深い PMT を採用することとした。先にも述べたがなるべく情報を失わずに信号を取り出すためには、集光はせずには有感領域の端まで届いたところですべて測定するのが

一番よい。このため有感領域の周りの面を PMT で覆うのが得策であるとの結論に至った。液体キセノンは低温液体であり 1 気圧下でマイナス 108 度である。周囲の面を光電面で覆うために、シンチレーション光を通す透過窓、あるいは波長変換材を塗布した可視光用の透過窓を配置して液体の外に PMT を配置する方法も考えられたが、窓がもつ光の透過率、強度、窓による立体角の制限など、無視できない問題が予想されたため PMT を液体キセノン中に浸して運転するという構想にたどり着いた。

最後に残った問題は、このような検出器配置をとった場合でもガンマ線入射位置を精度よく再構成できるかどうかということであった。位置の再構成に PMT の光量重心を使った場合、これはほぼキセノン中でのエネルギー損失分布の重心となり、その広がりが大きいために要求性能を達成することは難しい。しかしながら、光量重心を使わずにガンマ線が入射した側（第一反応点に近い側）の PMT の光量分布だけを見るようにすれば、この分布は反応点からの立体角だけで決まるのでよい精度が得られる。当時、シミュレーションによるスタディを行っていた東大の森氏によると、このことに気づいたのは 97 年 3 月のワークショップ直前だったとのことである。このようにして最終的な検出器構想がまとまり、それまでにないタイプの検出器が提案されることになったわけである。

以下ではこのアイデアに基づいて行われてきた検出器開発の経緯を述べたいと思う。

3. 液体キセノンガンマ線検出器

液体キセノンは比重 2.95 の液体で 1 気圧では温度マイナス 108 度で安定である。液体キセノンからシンチレーション光が発せられるメカニズムはよく調べられており、励起状態のキセノン分子から発せられることが知られている[7]。発光波長はおよそ 178 nm を中心波長とする真空紫外光であり、発光の減衰時間は電子入射の場合 4.2nsec, 45nsec の 2 成分がある[8]。

液体キセノン検出器を運転するためには次のようなものが必要となる。液体キセノンを液化、再凝縮するための冷却システム、マイナス 108 度の低温下で紫外光に感度を持つ光デバイス (PMT)、液体中の不純物を取り除く純化装置、そして液体を保持しておくためのクライオスタットである。また検出器の運転を行っていない期間にキセノンを保存しておくためのストレージが必要であるのはいうまでもない。MEG では常温で保持しておくための高圧容器と液体のままキセノンを保持しておくための低温容器の 2 種類を用意している。キセノンガスはかなり高価なガスであり、しかも大量に入手することは容易ではないので、運転中は

液体を一滴たりとも失わない心構えで実験に臨まなければならない。安全の要請から圧力上昇時の逃がし弁を取り付けることが義務付けられているが、システムの中に何重にもバックアップを用意してガスを失うことなく危険を回避する方法を準備することが肝要である。

MEG の液体キセノンガンマ線検出器には、パイルアップイベントを識別し、100 psec よりも良い時間分解能を達成するという厳しい要求も課されている。このため PMT の信号を読み出すためのエレクトロニクスも実験グループ内で新たなものを開発してきた。ただし今回はそれにはふれず、リファレンスとして[9]をあげるだけにとどめる。

液体キセノンを液化、再凝縮するための冷却システムとしては KEK 低温グループの春山氏が中心となってパルス管冷凍機の開発を行ってきた。パルス管冷凍機を使用する利点は、低温部に機械的に動く部品が存在しないため振動ノイズが少なく、部品のメンテナンスをする必要がない点である。冷凍機の開発についての詳しくは[10]に説明されているのでここでは述べないが、スモールプロトタイプを運転していたころには液体窒素の間欠フローにより冷却を制御しており、必要とする冷却能力は得られていたが、液体の圧力、温度の短周期変動が顕著に現れ検出器の安定性を達成するには困難を極めていた。ラージプロトタイプを使用した開発研究を開始した際に、液体キセノン用パルス管冷凍機の一号機がクライオスタットに取り付けられ、検出器の安定性が格段に向上した。その後も最適化を施すことによりパルス管冷凍機の冷凍能力は増大し続けた。これがきっかけとなって開発が進められた春山ブランドの冷凍機は、今や世界各国に輸出され、ヨーロッパ、アメリカと各地で活躍している。まことに頼もしい限りである。

液体キセノン用 PMT の開発は浜松ホトニクス社の全面的な協力を得、いくつかの試行錯誤を繰り返しながら進められてきた。現在までに三代にわたる PMT が開発された。初代キセノン用 PMT はスモールプロトタイプでの検証実験に使用されたもので、とにかく低温で動いて紫外光に感度を持つもの、そして液体に浸した際に不感領域を増大させないように長さの短いもの、という要請があった。PMT を冷却していくと光電面物質の面抵抗率が増し[11]、光電子が放出されにくくなる。このため光電面の物質には低温での面抵抗の増加が少ないものを選定し、かつ面抵抗の増大を抑えるような工夫も施された。ベース回路は液体キセノン温度下でも大きくは特性が変わらず、かつ不純物を漏洩する心配のないもので構成した。長さを短くとどめるためにはダイノード構造にメタルチャンネルダイノードを採用した。このような構成で製作された初代 PMT はスモールプロトタイプで首尾よく成功を収めることができた。その後もラージプロトタイプによるビームテストを行いながら、

光電面物質を変更したり、面抵抗の増大を抑えるための方法を変更するなど、必要な改良を加えて開発を進め、最終バージョンである第三代目の PMT を製作するまでに至った。

PMT のベース回路設計には特に注意を要した。ベース電流を多くすると高効率率下での出力の安定性は得られるが抵抗チェーンからの発熱が多くなる。ところが冷凍機の冷凍能力には限界があるため個々の PMT からの発熱量は最小限にとどめなければならない。このためベース回路に使用する抵抗チェーンの全抵抗値は $14.2\text{M}\Omega$ と非常に大きい値を採用した。さらにダイオードの最後の二段にはツェナーダイオードによる電圧保持機能を持たせた。ツェナーダイオードは低温にするとスパイク状のノイズを発生するが、このノイズが出力ラインに乗ることを防ぐためベース回路基板上にフィルタ回路を構成した。これらは東大大学院生の久松、名取の両名が、地道に PMT とベース回路の低温での振舞いを調べたことで可能となった。

液体キセノンからシンチレーション光が発せられる過程は非可逆であるため、液体キセノン自身によるシンチレーション光の吸収はない。しかしながら電子によるレーリー散乱の影響と、不純物が混入していた場合にはそれによる吸収の影響とは回避できない。レーリー散乱では光が散乱されるだけなので、有感領域全体を覆うように PMT が配置されていればどこへ散乱されようともその光は測定される。一方、不純物による吸収がある場合には、ガンマ線がエネルギーを失った位置によって光電面までの距離が異なるために位置依存性が顕著になり、検出器の応答関数が複雑になる。不幸にもキセノンシンチレーション光の波長スペクトルは水分子による光の吸収スペクトルと大きく重なっており、検出器の真空排気中に水分が排気できずに残存しているとその影響を即座に受けてしまう。通常水分を除去するためには真空排気中に温度を上げて水分子を追い出す「焼出し」と呼ばれる工程を経ればよいのであるが、われわれの検出器の場合は内部に PMT が配置されており、それが高温を嫌うために焼出しをすることができない。真空排気中には検出器の壁に付着してなかなか取れなかった水分子が、クライオスタットが液体キセノンで満たされると液体中に溶け込んでくるのであろうと思われる。

このような状況を打開するために開発グループが最終的に達した結論は至極単純なもので、検出器をキセノンで洗浄するというものであった。キセノンに混入しても許容できる洗浄用の媒質はそもそも存在しないので到達すべき結論であったといえそうである。このキセノンによる検出器の洗浄（キセノンの純化）の試みはラージプロトタイプを使用して行われた。スモールプロトタイプでは検出器サイズが小さいために吸収の影響が顕著には現れず、不純物

による吸収が検出器性能の劣化につながるという点を完全に見落としていた。ラージプロトタイプを建設し、予想とはあまりに異なる検出器の振舞いが見られたことからこの問題に気づくこととなったのである。

純化方法の試験はラージプロトタイプを液体キセノンで満たして運転状態にし、その後クライオスタット底部から吸い上げた液体を気化させ、加熱型金属ゲッターを通すことにより不純物を除いてクライオスタットに戻した後、再度液化するという方法をとった。これにより本当に少しずつではあったが液体中の不純物を除去することに成功した [12]。図 4 右に検出器中に配置したアルファソースによるキセノンシンチレーション光を、異なる距離に配置した PMT により測定した際のそれぞれの PMT の出力の変化具合を示す。いずれの PMT も測定する光量は増えているが、線源から遠い位置に配置されている PMT の方が光量増加の割合が大きいのが見て取れる。このことは発光量が増えているのではなく発光点から測定点までの間で生じていた吸収が減少したことを如実に示している。同様の光量の増加は継続して測定していた宇宙線事象に対しても測定することができた（図 4 左）。

これにより期待通りの検出器性能を得ることに成功し、2002 年京大化研での電子ビームテスト、2003 年の産総研 TERAS でのガンマ線ビームテストで成功を収めることが可能となった。

その後、ラージプロトタイプは PSI に輸送され、そこで実機検出器の重要なキャリブレーション方法でもある π^0 中間子崩壊を使用した性能評価試験のためのビームテストに用いられた。さらにはキセノンの純化をより高速に行うために、シンチレーション光吸収の主たる原因である水の混入をすばやく除去するための新たな純化装置の試験も行われた。こちらはキセノンを気体にすることなく液体のまま循環させて、水を除去する専用のフィルターを通すことにより純化するというもので、これにより純化のスピードが以前のもものと比べて 10 倍以上も速くなった [13]。この結

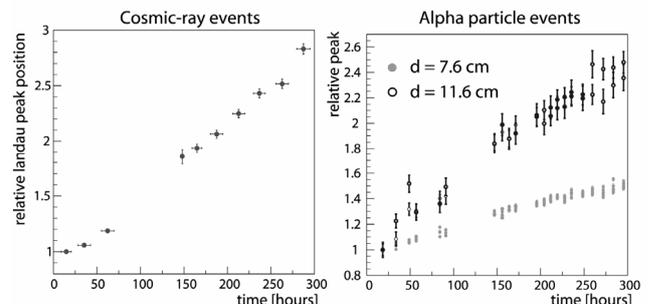


図 4 液体キセノン純化中の宇宙線事象、アルファ粒子事象に対する光量の増加具合

果、約 950 リットルの液体キセノンを使用する MEG の液体キセノンガンマ線検出器でも、十分許容できる範囲の時間内で必要な運転条件を達成する見込みが得られることとなった。

ラージプロトタイプを使用したテスト実験は数回にわたって何種類も行われた。その中からエネルギー分解能についての試験結果をまとめておこう。

産総研 TERAS の逆コンプトン散乱ガンマ線ビームライン[14]において、10 MeV, 20 MeV, 40 MeV のコンプトンガンマ線ビームを照射し、コンプトンエッジでのスペクトラムのなまり具合からエネルギー分解能を算出した。PSI では液体水素ターゲットに π^- 中間子を静止させ荷電交換反応により π^0 粒子を生成し、ターゲットをはさむようにラージプロトタイプとタグ用の NaI 検出器を配置して試験を行った。生成された π^0 粒子は実験室系で 28 MeV/c の運動量を持っているため、崩壊で生じる 2 個のガンマ線がなす開き角とエネルギーの間には相関がある。検出器前面に鉛コリメータを配置することにより開き角が 180 度に近いガンマ線だけが検出器に入射するようにし、タグ用の NaI 検出器で 54.9 MeV のガンマ線をタグするとキセノン検出器側に 82.9 MeV のガンマ線が、82.9 MeV をタグするとキセノン検出器側に 54.9 MeV のガンマ線が入射した事象を選び出すことができる。この手法は $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊のガンマ線エネルギー (52.8 MeV) に近いほぼ単色のガンマ線に対する応答を調べることができるので、本番では重要なキャリブレーションチャンネルとなっている。同じビーム、同じターゲットでさらにもう一つの単色ガンマ線が $\pi^- + p \rightarrow \gamma + n$ の反応により生成される。こちらは反対側に低エネルギーの中性子が放出されるが、ガンマ線のエネルギーが 129 MeV と高いためバックグラウンド事象がほとんどなく事象の識別は容易に行える。図 5 にこれらのテスト実験で得られた

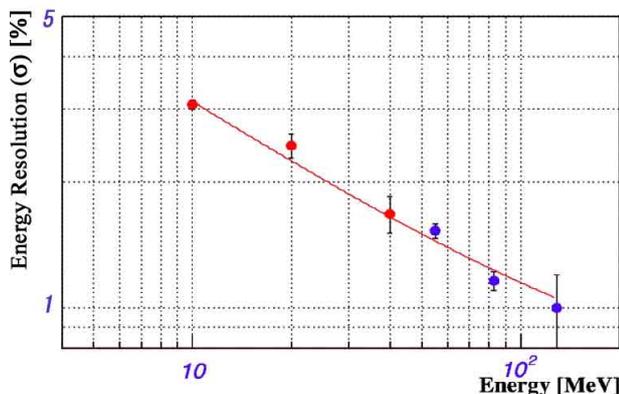


図 5 ラージプロトタイプ検出器で得られたガンマ線に対するエネルギー分解能

エネルギー分解能を入射ガンマ線のエネルギーの関数として示す。 $\mu \rightarrow e\gamma$ のシグナルガンマ線のエネルギーに近い 54.9 MeV のガンマ線に対してはシグマで $1.23 \pm 0.09\%$ という分解能が得られている。また、図からわかるように入射エネルギーが増大するにしたがって分解能が向上している。これは今後の改良によってさらに分解能を向上できる余地があるということを示しており、さらなる検出器性能の向上にむけての意欲を益々かきたえられる。

ちなみにこれらのキセノン純化試験、性能評価試験では、当時はまだ若い大学院生であった東大の小曾根、西口、澤田の活躍が非常に大きかった。検出器建設、データ収集、解析において彼らの貢献がなかったならばここまで首尾よく結果を得ることは出来なかったであろう。

最後に終盤を迎えつつある実機製作についてふれておこう。実機では 846 本の PMT がアレイに組み入れ、運転のためには約 950 リットルの液体キセノンが使用される。使用するすべての PMT はいったん液体キセノンに浸され、キセノン中での性能評価が行われた。PMT を検出器に取り付け、クライオスタットを液体キセノンで満たしてしまうとたとえ不具合があってもおいそれと交換することはできない。特にガンマ線が入射する側の PMT は重要な役割を担うので慎重な選別を迫られる。このため PMT 試験は用心の上にも用心を重ねて行った。試験にはラージプロトタイプを使用する方法と、共同実験グループのピサグループが建設した検査システムを使用する方法の 2 種類の方法をとった。すべての PMT の量子効率、ゲイン、高計数率下での振舞いを調べ、検出器中のどの位置に配置するべきかの判定を行った。ラージプロトタイプでは一度に 200 本以上の PMT を試験することができるが、形状計測(外観検査)、クリーンルーム内での PMT 装着、真空引き、キセノンの液化と液体保持、PMT 試験、そしてキセノンの回収という一連の作業を行うためには、ひとサイクルに 3 ヶ月近い時間を要した。この厄介な作業は PSI にて研究員を勤めていた岩本(現東大)をリーダーとして、日本グループの学生が大いに活躍した。

PMT アレイを挿入するクライオスタットの製作はイタリアの製作会社で行われた。基礎デザインは日本グループが行い、製作のためのエンジニアリングデザインは日伊実験グループと製作会社とが共同で進めた。形状は図 3 に示されているようにスペクトロメータ電磁石を囲むような C 型をしている。ガンマ線が入射する側の壁面は物質量を極力減らした構造でなければならない。このため容器の気密は極薄のステンレス板を溶接することにより確保し、強度はカーボンファイバーとアルミハニカムサンドイッチパネルをバックリングとして用いることにより保つという手法

をとった。サンドイッチパネルの製作はF1のボディー製作も手がけているイタリアの会社で行い、二回の失敗を経た後ようやく設計圧力まで耐えうるパネルを製作することに成功した。一方、クライオスタット製作は製作会社側との意見の衝突が度々あり難路を行くことを余儀なくされた。このため、筆者も事あるごとに滞在先のスイスからアルプスを越えて製作会社まで足を運んだ。実際、この原稿の大半もスイスとイタリアを行き来する列車の中で執筆した。図6は製作会社での最終試験の準備の様子である。この後は直ちにPSIに輸送され、実験現場での設置作業が開始される。2007年夏には本格的な運転を開始すべく実験グループ一同準備に明け暮れている。キセノンの全量は既に液化されており低温保存容器に貯蔵されている。検出器の準備が整い次第、貯蔵容器から検出器クライオスタットへの液送を行い、直ちに運転を開始することを目論んでいる。

4. おわりに

MEG液体キセノンガンマ線検出器の本格的始動がようやく時を迎えようとしている。この開発を進めている最中にはいくつもの予想だにしない問題が現れた。もちろん、それを一つずつ解決していくことは楽しい日々であったが、今思えば随分と遠回りをしてしまったような気がする。実際のところ、折戸氏による図1の提案から図6のように現実の形になるまで、10年近い年月が経過してしまった。遠くから叱咤の声が聞こえてきそうな気がしてならない。運転開始後は、キャリブレーション、長期安定性の保持といった検出器性能を引き出すための重要な仕事待ち受けている。まことに身が引き締まる想いである。

液体キセノン検出器の開発はこれにて終了というわけではもちろんない。さらなる検出器性能の向上は是非とも取り組みたい課題である。既に述べたが分解能を向上させる余地は十分にあり、新しい光デバイスの開発によりこれを実現したいと考えている。また現在の検出器では計測できないガンマ線入射方向に関する情報が得られるような改良も施したいと考えている。これを成し遂げるためには現在の光電面グラニュラリティでは無理があることがわかっていて。かといって単純に細分化しても、クライオスタットから取り出す信号線の数が増大するため、侵入熱量の増大、フィードスルーコネクタの制約など、避けられない問題があることがわかっていて。このため液体キセノン中で動作可能なエレクトロニクスを開発が必要なのではないかとも考えているが、なかなか簡単には進みそうにはない。まだまだ楽しむ余地は存分に残されていそうである。



図6 クライオスタット最終試験の準備風景

ここに述べた液体キセノンガンマ線検出器の開発を進めるにあたっては多くの方々から並々ならぬご協力をいただいた。KEKのカウンターホール実験室係、低温グループには開発研究遂行に必要な数多くの支援をいただいた。また京大化研、産総研でのビーム試験の際には関係者の方々にご尽力いただいた。この場をかりてお礼申し上げます。なお、この開発は東大の森、大谷、岩本、山田（現UCI）のスタッフメンバーに加えて、東大大学院生を中心とする学生諸君の忍耐強い努力によって支えられてきた。小曾根（現KEK）はラージプロトタイプの建設と初期の解析に多大な貢献をした。澤田は、じわじわとにじり寄るように解析を進め、すばらしい解析結果を出してくれた。西口はいつも二番打者のようなタイムリーな貢献を果たしてくれている。久松はPMT開発で大いに活躍し、現在は解析の方面での活躍がめざましい。名取、内山、西村もこれからますます活躍が期待される場所である。

皆さん、これからもどうぞよろしく。

本研究開発の一部は科学研究費補助金（特定領域研究）によって進められた。

References

- [1] S. Orito, T. Mori, and A. Maki, Workshop on a new $\mu \rightarrow e\gamma$ Experiment at PSI, March 5-7, 1997
- [2] S. Mihara *et al.*, IEEE TNS **49** (2002) 588
- [3] T. Mori *et al.*, Research Proposal to PSI, R-99.05.01, May 1999, UT-ICEPP 00-02
- [4] M. L. Brooks *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 1521-1524
- [5] **たとえば** L. Calibbi *et al.*, Phys. Rev. D **74** (2006) 116002
- [6] W. Ootani *et al.*, IEEE TAS **14** (2004) 568-571
- [7] T. Doke, Port. Phys, **12** (1981) 9
- [8] A. Hitachi *et al.*, Phys. Rev. B, **27** (1983) 5279-5285
- [9] S. Ritt, Proc. of IEEE/NSS conf. ROME2004, Oct 2004
- [10] **春山富義** 高エネルギーニュース Vol. 24 No. 1, 25-29, 2005
- [11] M. Ichige *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **327** (1993) 144
- [12] **三原智他**,低温工学, **38** (2003) 94-99
- [13] **三原智他**,低温工学, **40** (2005) 572-578
- [14] H. Ohgaki *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **455** (2000) 54-59