

KamLAND-Zen 実験

東北大学ニュートリノ科学研究センター

丸藤 祐仁 井上 邦雄

gando@awa.tohoku.ac.jp

inoue@awa.tohoku.ac.jp

2011年10月31日

1 ニュートリノレス二重 β 崩壊

1.1 背景

ニュートリノ振動研究の進展により、ニュートリノ質量構造の理解は大きく進んだ。カムランド実験も原子炉反ニュートリノ振動の測定により Δm_{21}^2 という質量の2乗差のパラメータを2.6%という高精度で測定しており、ニュートリノ振動研究に大きく貢献している。ニュートリノ振動現象はニュートリノが質量を持つということの決定的な証拠であり、ニュートリノ質量を0と仮定している標準理論を越えた枠組みを必要とする。同時に宇宙論や β 崩壊の研究から来る質量の上限は、他のクォークやレプトンと比べてニュートリノが桁違いに軽いことを示しており、ニュートリノが質量を持ちしかも特別軽いという二重の問題を突きつけている。一方で、これまで左巻きのニュートリノと右巻きの反ニュートリノしか発見されていないという状況にあって、有限の質量の存在は、右巻きのニュートリノや左巻きの反ニュートリノという状態に対して2つの選択肢を与える。ディラックかマヨラナかである。ニュートリノがディラック粒子であるなら、右巻きのニュートリノは左巻きのニュートリノと同質量であり、相互作用が弱いため未だ発見されていないということになる。一方、マヨラナ粒子であるならば、右巻きのニュートリノは実は右巻きの反ニュートリノであり、すなわちニュートリノと反ニュートリノは同じものということになる。こちらを選んだ場合自由度として右巻きのニュートリノを別個に定義することができ、たとえば大統一スケールに近い非常に重い質量を与えることも可能である。このような大質量のニュートリノの導入は、シーソー模型を通して軽いニュートリノ質量を説明することができる。同時に、ニュートリノのマヨラナ性はビッグバン以降の宇宙に物質を生き残らせるために必要なバリオン数とレプトン数の差($B-L$)の破れを明に含んでおり、シーソー模型で導入した重いニュートリノの崩壊を通して、宇宙にバリオン数を生成するレプトジェネシス理論が有力な理論のひとつとして議論されている。

ニュートリノのマヨラナ性というものが、宇宙・素粒子の大問題である「軽いニュートリノ質量」および「宇宙物質優勢」という2つの謎に対して知見を与える非常に重要な

性質であるにもかかわらず、これまで確実な証拠は得られていなかった。マヨラナ性を調べるためには、たとえば電子ニュートリノを打ち込んで、反電子ニュートリノの反応が発生するかを調べれば良いのだが、この場合もともとニュートリノの断面積が小さい上にたった $1/2(m/E)^2$ ほどの確率しかない逆向きの回転による反応を調べなければならない。しかし、うまい手法があって、二重 β 崩壊を起こす特別な原子核を選べば(図1左)、原子核内という非常に小さい空間に2つのニュートリノを同時に生み出すことができる。マヨラナ性があるなら、この2つのニュートリノが対消滅することも可能である(図1右)。対消滅の頻度は、ニュートリノの有効質量の2乗に比例することから、「ニュートリノレス二重 β 崩壊(以下 $0\nu 2\beta$)」を発見すればニュートリノのマヨラナ性を証明でき、その頻度からニュートリノの絶対質量を知ることができる。今のところはこれがマヨラナ性を探る唯一現実的な手法である。ちなみに、マヨラナ質量でなくても標準理論を越えた物理で $0\nu 2\beta$ を引き起こすことは可能であるが、幸いにもそのようなファイマンダイアグラムに外線をいくつか加えてやるとマヨラナ質量を作るダイアグラムに書き換えることができる。すなわち $0\nu 2\beta$ の発見はマヨラナ性の証明とできることがわかっている[1]。

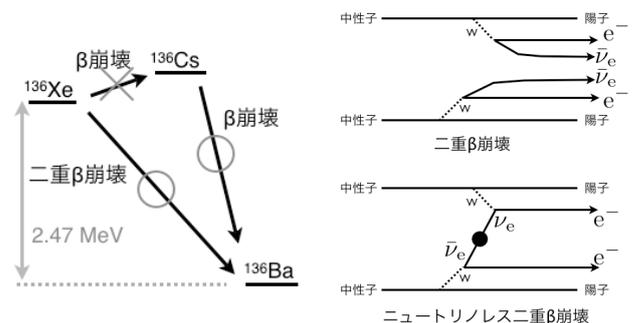


図1 二重 β 崩壊核のエネルギー順位(左)と二重 β 崩壊のファイマンダイアグラム(右)

その物理的重要性に動機づけられた精力的な探索にもかかわらず確実な証拠はこれまで得られていない。唯一 ^{76}Ge を使った測定で320 meV程度の質量で 6σ 以上の信号を得たと指摘するもの[2](ここではKKDCクレームとよぶことにする)がある。しかしKKDCクレームは、疑わしいバックグラウンドの候補があることやその信号の振る舞いに多くの

疑念が残されており、検証が待たれる。一方、これまではどの程度の有効質量を目標に実験装置を設計すればよいかという明確な指針がなかったが、ニュートリノ振動の研究から、質量階層構造として、3種類が同程度に重い縮退構造(60 meV以上)、2つが相対的に重い逆階層構造(20 meV ~ 60 meV)、1つが重い標準階層構造(20 meV以下)の3種類の階層構造が考えられるようになり、明確な目標設定が可能となった。現在の主要なプロジェクトはKKDCクレイムにとどまらず、まずは縮退構造をカバーし、なおかつ逆階層構造に感度を持つ拡張性を設計の基本としている。軽い有効質量にまで感度を持つためには二重 β 崩壊核も大量に必要となる。 10^{26-28} 年の寿命を探索するには、これまで10kg程度だった質量を100kg ~ 1000kgに増やす必要がある。

1.2 カムランド禪

大量の物質を使って希な現象を探るといのは陽子崩壊探索やニュートリノ検出と似通ったものであるが、二重 β 崩壊の Q 値が4.3 MeV以下であることも考えると、さらに極低放射能環境という特性が必要となる。反ニュートリノ観測で成果をあげてきたカムランドは、1000トンの液体シンチレータを有した極低放射能環境を実現しており、 $0\nu 2\beta$ 探索にうってつけの環境と考えられる。その特性を活かすためには、不要な構造物を導入しないで済むようにする必要があるが、キセノン136は液体シンチレータに可溶(3 wt%)であり、遠心分離による濃縮や純化の手法が確立しているという特徴がある。キセノン136の Q 値は2.476 MeVであるが、 Q 値の高い放射性物質としてしばしば問題になる ^{214}Bi や ^{212}Bi はPoとの遅延同時計測で除去できること、カムランドを巨大なアクティブシールドと考えるならば、 ^{208}Tl は2.615 MeVと0.583 MeVの γ 線に加え β 線も放出されエネルギーが問題にならないくらい高くなることから、非常に素性が良いことが予想される。次に考察すべきバックグラウンドは宇宙線の原子核破砕反応による ^{10}C や太陽ニュートリノ事象、通常二重 β 崩壊($2\nu 2\beta$)ということになる。前の2つは体積に比例するものなので、S/N比を高めるためには、同位体濃縮したキセノン136をできるだけ高濃度で溶かすことが有効である。一方、 $2\nu 2\beta$ からのバックグラウンドを低減するにはエネルギー分解能を高めるほかないが、キセノン導入部分の発光量だけを増加させてしまっただけでは、ミニバルーンすぐ外でも反応した ^{208}Tl のバックグラウンドが低いエネルギーに見えてしまいせっかくの素性の良さをそいでしまうことになる。

このような考察のもと、ミニバルーン内に、自然存在比8.9%のキセノン136を90%以上に同位体濃縮し液体シンチレータに可能なだけ溶かして導入するという手法を選んだ(図2)。発光量はキセノンを溶かした状態でカムランド

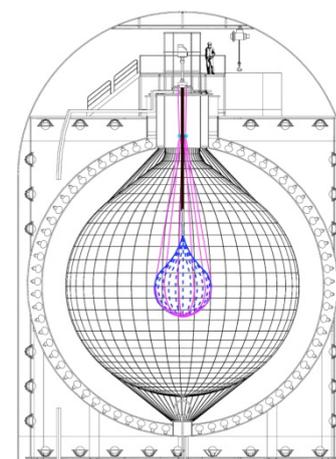


図2 KamLAND-Zen 検出器の概略図

の液体シンチレータと揃える。ミニバルーンに負荷をかけないように密度も揃える必要がある。詳細は後で述べるが、ミニバルーンが放射性物質を含んでいては元も子もないので、純度の高いものを薄くして物質量を減らすとともに、Bi-Poの同時計測がある程度成立するように α 線が出てくるほど薄いものが望ましい。当然薄いバルーンは製造も導入もすべて難しくなるが、その困難も後で述べる。また、 ^{10}C 対策は新たな電子回路を開発・導入することでも行っている。 ^{10}C が生成するとき90%以上の高い確率で中性子も生成されるので、ミュオン・中性子・ ^{10}C の3重同時計測で識別するために1GHzのフラッシュADCを用いたデッドタイムフリー電子回路(MoGURA)が稼働している。

プロジェクトは2段階に進めることにした。いち早く縮退構造をカバーし、最終的に逆階層構造をカバーする。縮退構造をカバーする感度を2年程度で達成するには400kgのキセノンが必要となるが、光量はカムランド程度で良いことがシミュレーションで判明していた。設計時点では $2\nu 2\beta$ の半減期は 10^{22} 年以上と非常に長く、その分エネルギー分解能に対する要求も緩かった。EXO実験が $2\nu 2\beta$ の半減期としてこれまでの実験的制限と5倍も食い違う 2.11×10^{21} 年の半減期を報告[3]した時はびっくりしたが、比較的影響は小さく、縮退構造をカバーするのに3~4年かかるという程度で済んだ。2年なら80 meV程度の感度になると見積もっているが、エネルギー分解能向上に対する要求が高まったことは間違いない。

このプロジェクトをKamLAND-Zenと命名した。Zero neutrino double beta decay searchを意味しているが、カムランドのその後という意味の“then”とも、Xenonとも響きが近いので選んだ。ニュートリノ検出器でニュートリノがでないことを探るといふ雰囲気も込めて、日本語では「カムランド禪」と名乗ることにした。最近欧米では漢字がはやっておりロゴに禪の文字を入れたところグループ内ではなかなか好評



である。観測は9月に始まり良質なデータが蓄積されているが、ここではデータについては触れないので、近いうちに発表されるであろう論文に期待して欲しい。

1.3 将来計画

是非将来のことも紹介させて欲しい。光量を増加させるには、先に述べた理由でカムランドの液体シンチレータの光量も増やす必要がある。これは大規模な作業になるので、ついでに光電子増倍管に集光のためのウィンストンコーンも取り付けられることを計画している(図3)。液体シンチレータを標準的な光量のものにするのと合わせて2.5倍の光量増加が見込まれ、 $2\nu 2\beta$ の影響を10分の1以下にできる。同時に上部導入口を拡大することで、各種の機器を導入できるようにするつもりである。 $0\nu 2\beta$ が発見されたなら、高統計だけでなく各種の原子核でも測定することが重要である。原子核行列要素の不定性の低減にとどまらず背景となる物理を探る上でも有効と考えられる。また、NaIを沈めて暗黒物質探索のようなことも可能になると期待している。この計画をKamLAND2-Zenと呼んでいるが、KamLAND2-Zenでは、1000kgの同位体濃縮キセノンを約1.8気圧の圧力(深さ10mある)で溶かすことで、濃度を高めて体積に比例するバックグラウンドを低減することを考えており、逆階層構造をカバーする20meV程度の感度を見込む。

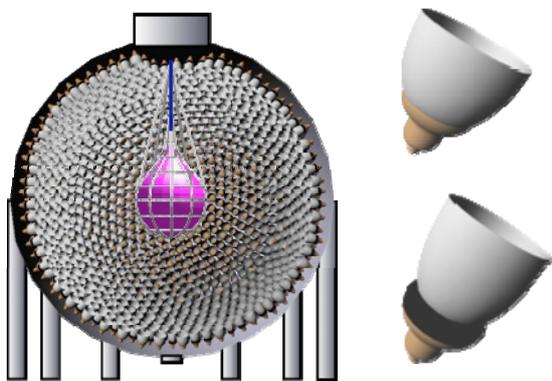


図3 KamLAND2-Zen(左)とウィンストンコーン型反射板を取り付けた光電子増倍管(右)の概略図

並行してさらに挑戦的な開発も行っており、ミニバルーンのフィルムがシンチレーション光を発するようにし、BiPoの識別効率を大幅に上げる開発や、イメージング技術を用いたマルチパーティックスの識別による ^{10}C や γ 線由来のバックグラウンドの大幅な低減を図る開発も行っている。これらを組み合わせれば標準階層構造に切り込むことも夢ではない。これらの改良案のうち、高圧で溶かすことでキセノンの濃度を高める工夫はコスト対効果が高いため、KamLAND2-Zenに移行する前の中間段階として800kgのキセノンを溶かしたフェーズを考えており、現在手持ちの450kgからさらに調達を進めている。このフェーズでは、

逆階層構造の半ば程度に相当する30~40meVの感度を達成できると見積もっている。

以上、大まかな計画を述べたが、以下ではKamLAND-Zen稼働までの開発や作業を紹介しようと思う。

2 液体シンチレータ

KamLAND-Zen計画が始まるにあたって、最初に検討しなければならなかったのは液体シンチレータとミニバルーンの開発である。これらは相互に条件を制限しあうが、まずはKamLAND-Zen用液体シンチレータから紹介したい。

2.1 キセノン溶解液体シンチレータ(Xe-LS)

カムランド内部に沈めるミニバルーンは、前述したように薄いフィルムで作成するため大きな力がかかると破れてしまう恐れがある。そのため、ミニバルーンの内側と外側でほぼ同じ密度差にする必要があり、その最大値は0.1%、吊り紐とミニバルーン本体にかかる全重量で約13kgと見積もっている。しかしカムランドで使用している液体シンチレータにキセノンを溶解すると密度が大きくなり、この密度差を相殺するために液体シンチレータを構成しているブソイドクメン(20%)とドデカン(80%)の比率を変えようとすると発光量が落ちる。そしてミニバルーン内外で発光量が異なると見かけ上のエネルギーの不一致が起こり、バックグラウンドの見積もりなどが困難になることからアクティブシールドとしての性能が落ちる。以上より、キセノンが溶け、密度差がなく、発光量も同じシンチレータを開発する必要があった。

地道な開発研究の結果、ドデカン(N12)の代わりにデカン(N10)を使用することでブソイドクメン18%を確保したままキセノン溶解後の密度変化を抑え、キセノン溶解時に発生する約10%の発光量の減少は発光材であるPPOの量を2.7g/lに増やすことで対処した。なお、このキセノン溶解液体シンチレータ(Xe-LS)のキセノン溶解度は3.1wt%である。また、この液体シンチレータについては透過率の測定や長期の使用に耐えられるかどうかなどの確認もすべて行われている。

2.2 Xe-LS用液体シンチレータの純化

カムランドの低放射能環境は、液体シンチレータの純化によって達成されている。KamLAND-Zenで使用するブソイドクメン・デカン・PPOも同様に、すべてカムランドで保持している蒸留装置を用いて純化され、ウラン・トリウム・カリウム・鉛・希ガスなどが除去されている。その後それぞれを混合して液体シンチレータを作成、さらに窒素パーズ塔を用いてラドン・クリプトン・アルゴンなどの希ガスを除去した後、キセノン溶解液体シンチレータ作成のためにキセノン溶解・回収装置(キセノン装置)に送られる。

2.3 Xe-LS の作成

Xe-LS は、液体シンチレータにキセノンバブリングで溶かし込むことで作成する。図 4 はキセノン装置の概略を表すが、液体シンチレータへのキセノン導入、およびキセノン溶解液体シンチレータからのキセノン回収が行えるようになっている。また、ミニバルーンへの送液・排液のコントロールも行い、送液密度の精度は 0.005 ~ 0.01% まで確認可能となっている。

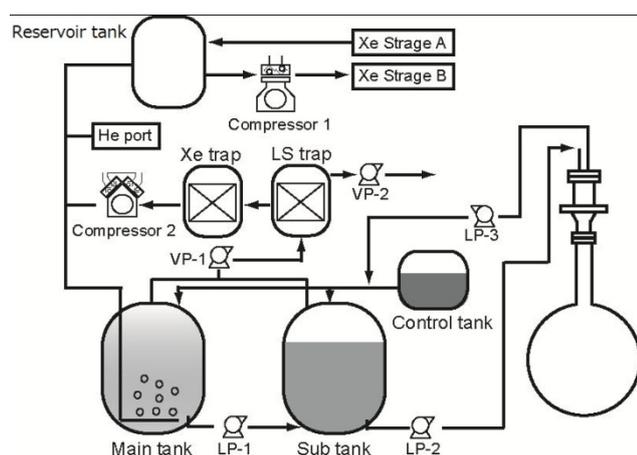


図 4 キセノン装置の概略図

Reservoir tank に保持されたキセノンガスは、Main tank に送られて液体シンチレータをバブリングする。一方、キセノンガスを液体シンチレータから取り出す時には、真空脱気とヘリウムによるバブリングによってガスが抽出され、LS trap で揮発した液体シンチレータを、Xe trap の液体窒素温度によってキセノンガスを凝固して回収する。Sub tank と Control tank は最終的に送り出す液体シンチレータの密度調整などに使用される。この装置での Xe-LS のキセノンガス濃度は、元々のガス重量の差、タンク圧力、Xe-LS の密度の測定から 3 重のチェックが行われ、回収時の欠損量についても 0.01% ~ 0.001% (ヘリウム量に依存する) となっている。

3 ミニバルーン

ミニバルーンの基本デザインは図 5 のように各部分に分かれており、上からコルゲート管、接続管、ミニバルーン本体である直管部・コーン部・バルーン部、そしてこれらを吊っている紐となっている。それぞれについて紹介していきたい。

3.1 接続管

ミニバルーン最上部のナイロン製コルゲート管(フレキ管)は、空間的な制限によりインストール時に曲げる必要があるため使用されている。また、液面との境目で内外の圧力差に耐えるのに十分な強度を持ち、ミニバルーンの吊り紐の方向を変えるガイドリングなどが取り付けられている。しかし重量としては大きいため、放射性不純物の観点から有効体積付近まで使用することは出来ない。そこでフィルムで作成した直管部 1.5m が接続され、ここからミニバルーン本体となる。

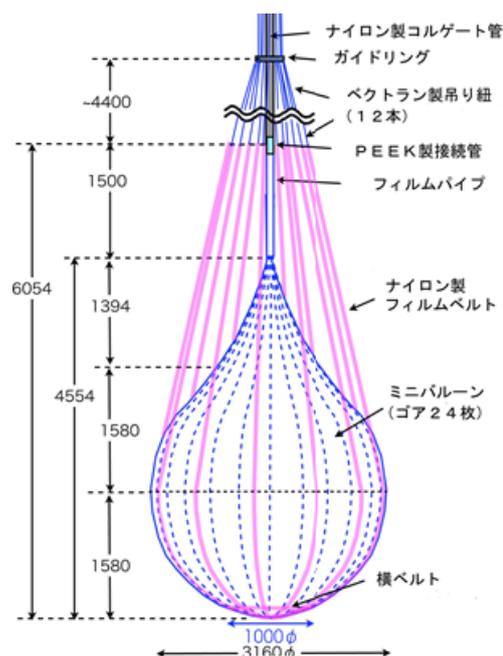


図 5 ミニバルーンの詳細

24 枚のフィルムを組み合わせた球形部は、コーン部を通して直管部へと接続される。有効体積から十分離れた箇所からはナイロン製のコルゲート管が使用され、十分な強度を保っている。

3.2 ミニバルーン本体

直管部から球形のミニバルーンへの接続は、ラップ型のコーン部を用意し、出来るだけ力が集中することのないようにしている。球形部分は使用するフィルムの幅の制限により 24 枚の舟形のフィルムをつなぎ合わせて作成し、南極部分については 24 角形のシートを用意して舟形部分と接続している。コーン部と南極部を用意したのは、溶着不良の原因となる複数枚同時の溶着、フィルムの熱変化の原因となる複数回の溶着を避けるとともに、点ではなく線での溶着をおこなうためである。

カムランド内部でのミニバルーンは 12 本の吊り紐によって支えられ、基本的には直管部に重量がかかることがないように考えられている。この吊り紐はミニバルーンからは分かれており、荷重の偏りによってミニバルーンフィルムを引っ張ったりしないようになっている。特に心配したのがインストール後の送液時に部分的な紐の位置の偏りが起きた場合であり、この場合、紐だけでなく本体へダメージを与えかねない。しかし多少紐がずれても上部で長さを調整すれば安定するという判断のもと、本体と紐は切り離すことにしている。

ミニバルーンの詳細は以上であるが、コーン部の導入以外基本的なデザインは検討を始めた当初から大きくは変わっていない。一方、使用するフィルムや吊り紐についてはプロジェクト開始時から様々な検討と開発研究が行われたため、少し詳しく紹介したい。

3.3 フィルムに求められる条件

現在のカムランドバルーンの実験から、エパール¹とナイロンフィルム(ナイロン 6)が使用可能ということは当初から分かっていた²。しかしカムランドバルーン用フィルムは上記2種類のフィルムを接着剤でラミネートした135 μm の5層膜であり、放射性不純物の観点などからそのまま使用することは出来ない。また、放射性不純物が含まれていたとしても解析的に除去できる可能性を残したいなどの観点から(図6)、今回必要とされた条件は以下の7つである。

- 強度が十分であること
- 光透過率が95%以上
- キセノンガスが透過しないこと
- 放射能含有率がウラン・トリウムで 10^{-12}g/g 程度以下であること
- カリウム 40 の含有量が 10^{-11}g/g (通常のカリウムで約 10^{-7}g/g)以下
- Tag1 の観点から25 μm 以下の厚さ
- 放射性不純物を出来るだけ混入しないように、接着剤を使用せず溶着で製作可能であること

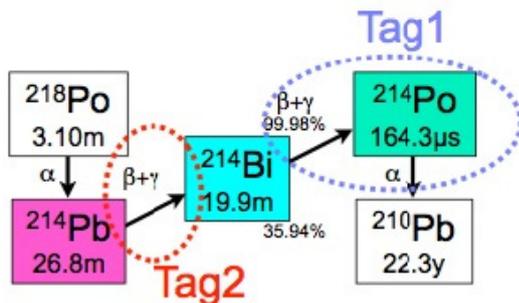


図6 フィルム中バックグラウンドの除去方法

^{214}Bi 系列の放射性不純物が含まれていた場合、Tag1, Tag2によって解析的な除去が可能となる。しかしTag1については後発信号の α 線がフィルム外へ透過する必要があり、25 μm 以下の厚さの場合、50%以上のバックグラウンドが除去可能となる。また、Tag2については1時間程度の時間幅での遅延同時計測となることから、他の放射性不純物含有量が十分に低い必要がある。

まず低バックグラウンド実験の要である各素材の放射性不純物量はどうかと分析してみると、エパールはカリウムが多い、ナイロンはウラン・トリウムが要求に満たないということが判明した。カリウム 40 はTag2が使用可能かという観点から重要になるのに対し、ウラン・トリウムは直接信号領域のバックグラウンドになるためより要求が厳しい。一方でエパールはガスバリア性に優れるため、この時点での第一候補はエパールフィルム単層膜となった。

そこで、ために直径80cmの1/4スケールバルーンを製作してみたところ、そもそも製作段階で裂けやすく、バルーンになってからも手触りがパリパリしており、壊れやすいことは一目で判断出来るものであった。結局このバルーンは次から次へと穴が開き、水を使ったテストに使用することも出来ずにお蔵入りとなった。ちなみに、バルーンを溶着してくれた職人さんはもうこのフィルムでの製作は勘弁してほしいと言っていたそうである。

3.4 ナイロンフィルム

エパールが使用できなくなれば残るのはナイロンとなるが、そもそもナイロンは接着剤を使用せずに熱溶着するのが難しいという欠点を抱えていた。フィルムの会社に溶着する方法を問い合わせると、そもそもナイロン単層膜で使用することはほとんどなく、他の素材との多層膜にした後で融点の低い素材のほうで溶着するのが通常の使い方のため、ナイロン単層については分からないというのが多数であった。とはいえ、多数の小さなペレットから一度溶解して一枚のフィルムになっているからには方法はあるはずと思っていたところ、バルーンの製作を依頼していた会社からナイロンを溶着出来る機械があるらしいと連絡があった。何度か視察してもらったところ、ナイロンの融点である225度以上を設定できる溶着機械を特注すれば溶着できそうとのことで、機械の開発から技術の確立まで進めてもらえることになった。

ナイロンフィルムのもう一つの問題である放射性不純物であるが、各社のサンプルを取り寄せてもまったく要求に満たないため市販品を使用するのは不可能と判断し、特注品を作成してもらえるかの検討が始まった。通常ナイロンフィルムは食品や医療向けとして使用するために、加工しやすさや破れにくさ、効率的に生産出来るかなどに主眼を置いて開発されているが、放射性不純物という概念は当然ない。そこで加工のどの段階で放射性不純物が混入するのか判断するために、各社のナイロン素材であるペレットを集めるところから始まった。

一言でペレットといっても各社それぞれの特徴があり、同じ会社でも何かを入れる・入れないで違いがある。おおまかに分類すると、ただのナイロン素材、有機滑材を入れたナイロン素材、有機滑材と無機滑材を入れたナイロン素材、これらに各社独自の充填剤を入れた素材となる。それぞれの素材を集めて分析してみると、フィルム表面に凹凸を付けることでロールにフィルムを巻きつけやすくし、表面をすべすべにするために充填する無機滑材が主要な放射性不純物元であることが判明した。メーカーに無機滑材はどのようなものか聞いてみると「石ころのようなもの」と返答があるくらいで、それならウラン・トリウムが含まれていても納得できるというようなものであった。

¹ エパールという馴染みがないように思われるが、ガスバリア性が高いフィルムとして知られ、EVOHという表記で香料の入っている化粧品のチューブなどに使われている。

² 他にテフロンフィルムについても検討したが、伸びやすいなどの特性があり、今回の検討からは外してある。

ナイロンを選定するために分析を行ったウラン・トリウム・カリウムの、ナイロンペレットの含有量は表1の通りとなっている。取り寄せたペレットは国内外複数社にわたり、公表の確認が取れていないため名前は伏せてある(下線は KamLAND-Zen で使用したものを表している)。

表1 ナイロン原料の放射性不純物濃度 (10^{-12} g/g)
カリウムについては、表の数値からカリウム 40 の自然存在比 0.0117% を元に検討をおこなった。

ペレット会社	ウラン	トリウム	カリウム
<u>A社(台湾)</u>	0.6	1.1	1.3×10^4
B社(日本)	< 0.1	< 0.1	2.5×10^3
C社(ドイツ)	0.8	< 0.1	6.0×10^3
D社(オランダ)	1.0	15.0	1.5×10^3
E社(無機滑材あり)	6.8×10^3	3.2×10^4	2.6×10^6
E社(無機滑材なし)	86	5.0×10^2	$< 1.0 \times 10^5$
F社(無機滑材あり)	1.2×10^2	2.7×10^2	$< 1.0 \times 10^5$
F社(無機滑材なし)	< 5	< 5	$< 1.0 \times 10^5$

次に、ペレットからフィルムを製造する過程で放射性不純物が入っていないか確認する必要がある。フィルムの製造については、東洋紡績株式会社のご協力により、テストプラントを使用した特注品として製作していただいた。製品になったフィルムの分析結果は表2の通りである。

表2 ナイロンフィルムの放射性不純物濃度 (10^{-12} g/g)
カッコ内は表1のペレット会社を示し、「洗浄後」は分析会社による超純水洗浄を行ったサンプルを示す。

会社(ペレット会社)	ウラン	トリウム	カリウム
東洋紡(A社, 洗浄前)	9	11	$< 1.0 \times 10^5$
<u>東洋紡(A社, 洗浄後)</u>	2	3	2×10^4
東洋紡(B社, 洗浄前)	20	28	$< 1.0 \times 10^5$
東洋紡市販品	24	420	$< 1.0 \times 10^5$
G社市販品	150	590	1.2×10^6

表2を見ると、より低バックグラウンドのペレットを使用したものがフィルムでも低バックグラウンドというわけではない。これについては装置の洗浄方法や洗浄に使用した溶剤などの分析も含めて調査したが、現在のところ理由は判明していない。筆者は、「東洋紡(B社)」を作成したのが冬であったため、フィルムを流している間に静電気で環境中の埃を巻き込んだのではないかと疑っている。テストプラントといっても巨大な工場をクリーン化するのは不可能であるため、湿度の高くなる春にもう一度作成してもらう依頼をしていたのだが、東日本大震災の影響で、残念ながらもう一度作成していただくことは叶わなかった³。とは

³ 震災後、操業停止した東日本の工場生産分を補うため、このテストプラントでは製品用プラントと同様に24時間体制でおにぎり

いうものの、KamLAND-Zen で要求されるレベルにはほぼ達していると考えられたため、「東洋紡(A社)」を使用することで計画を進めることにした。

次に無機滑材の入っていないフィルムがバルーンを製作するうえで問題があるか確認する必要がある。KamLAND-Zen で使用するフィルムは、二軸延伸のナイロンフィルムという、溶かしたペレットをフィルム状にした後、縦・横それぞれに延伸し、分子構造を揃えて強化しているものである。そのため引っ張っても伸びず、測定した破断強度は4.9kgf/cmである。この数値は、ミニバルーンを製作した時に内外の密度差が約6%まで耐えられるものであり、0.01%の精度を保ち、最大0.1%程度の密度差までコントロールする我々の装置では十分な強度である⁴。その他納品されたフィルムを確認してみると、無機滑材がないため滑りにくく、張り付きやすいというデメリットがあるものの、強度など基本的な物性については通常品と変わらないことが確認された。むしろ液体シンチレータ中のフィルム透過率は、光電子増倍管にもっとも感度のある波長400nmで99.4%±0.3%という通常品よりも非常に優れたものであった。

最後に液体シンチレータ中のキセノンガスが、フィルムを透過するかどうかを確認する必要がある。キセノンガスを溶解した液体シンチレータと溶解していない液体シンチレータをフィルムで遮断し、長期間放置しガス透過率測定を行ったところ、通常の液体シンチレータ側のキセノン含有率は感度以下となり、ミニバルーンに換算した場合でも5年間のキセノン損失量は1.3kg以下と見積もられている。

3.5 吊り紐

フィルムが選定できたのはいいものの、ミニバルーンを吊るための紐も考えなければならない。KamLAND 実験開始前に、現在の KamLAND バルーン用ロープ選定のために各紐の放射性不純物量一覧を作成してあるが、この表を見ても KamLAND-Zen で使用可能なものは見当たらないため、紐についても開発する必要があった。

最初に、フィルムを製作してもらう前述の会社に不純物を含まないナイロン紐の作成が可能か問い合わせた。しかし紐の組みやすさを考えているため、素材の段階から潤滑剤が入っていること、糸から紐を組む時には潤滑剤がさらに必要となるため、低バックグラウンドのものは不可能と

など被災地に送る食料品のラッピング用フィルムを作成していたそうである。

⁴ といいつつ、実は自明ではない。高分子素材で作成した風船は、その曲率の変化点と溶着の偏りから応力集中が起きる可能性があり、理想値まで耐えることは難しい。一方でカムランド建設時に何度か行っているバルーン破壊試験より、理想値の1/10の力で破壊が起きたことはないため、今回は10倍の余裕を見て一応の基準としている。

の回答であった。その他バックグラウンドの観点と液体シンチレータに耐える素材を同時に兼ね備える素材は見つからなかったため、バルーンに接する箇所だけナイロンフィルムからベルトを作成し、吊り紐の一部とすることにした。

これまで見てきたようにミニバルーンの素材についてはそれぞれ検討を進めてきたが、製作した場合のデザイン上の不具合、取扱いの注意点などは実際にテストしてみないとなかなか分からない。プラスチック素材は金属と違い、数値的な強度に問題がない場合でも、少しでも弱いところがあるとそこから一気に破壊に向かう可能性もある。これら個々からの検討では予測できない不具合を洗い出すため、本番用のミニバルーンを製作する前にテストバルーンを製作し、製作工程からインストールまで一連のテストを行うことにした。

4 ミニバルーンインストールのリハーサル

KamLAND-Zen の概要は、今ある KamLAND 検出器に、キセノン 136 を溶かした液体シンチレータを入れたミニバルーンを沈める、という一見とてもシンプルで簡単そうなものである。しかしこれまで述べたように、バルーンのフィルム一つとってもこれまでの経験はあまりあてになっていない。それではバルーンを沈めるのは簡単なのだろうかと考えてみると、やはりそうはいかない。様々な検討の結果、以下のような条件が必要であることが分かった。

- (1) KamLAND の開口部は約 50cm であり、バルーンは筒状に保持しなければ通り抜けることができない。そして通り抜けた後は膨らまなければならない。ちなみにバックグラウンドの観点から、KamLAND 内部に物が放置されるのは論外。また、カムランドの液体シンチレータを抜くことも、カムランドバルーンに対するダメージと保持タンクの問題から論外。
- (2) ナイロン自体は液体シンチレータよりも比重が大きい。しかしミニバルーン内部を真空に引いてダメージを与えるわけにはいかないため、微量のパーズ用窒素が残存し、浮力の元となる。そこでミニバルーンを沈めるためには何かしらのおもりが必要となる。工夫したおもり、もしくは少し重い液体シンチレータをおもり代わりに検討する。
- (3) バルーン挿入直後の外部からの圧力(真空パック状態と呼んでいる)による破損を避けるため、間髪を入れずに送液し、拡張する。

- (4) バルーン挿入時の破損などをあらかじめ調べるため、挿入直後はキセノンを溶解していない液体シンチレータ(ダミー液シン)を送液して測定を行う。その後、キセノンを溶解した液体シンチレータと入れ替える。
- (5) (4)を実現するには密度差をつけてミニバルーン内に層を作り、ダミー液シンと混ざらないようにしなければならない。

(1)についてはミニバルーンを折りたたんでカバーフィルムを巻き、これらを押さえる紐の開発が進められ、(5)については蒸留を用いた純化作業の経験から 0.02% 程度の密度差で層が出来ると予想された。これを確認するため 1/4 スケールのポリエチレンバルーンを用いた実験では問題がないことが確認されたが、本番とは送液速度などの違いがある上、(2)についてはバルーン内部に残存する気体の量でどの程度のおもりが必要となるか分からない。このような観点からも、実物大のテストバルーンを用いたリハーサルが必要となった。

このテストでは、柏市の株式会社アトックス・技術開発センターにある、原子炉压力容器の一部を模した模擬ウェルと呼ばれるプールを使用させていただいた。通常は原子炉压力容器の除染機のテストなどに使用されるプールであるが、実物大のミニバルーンを入れた後でも外部から形状を確認するのに十分な大きさを有している。

一回目のリハーサルは 2010 年 5 月末から 10 日間にわたり行われた。まだフィルムの選定が済んでいない段階であったため、より簡単に作成できるポリエチレン製を使用し、バルーンの基本的なデザインの確認と、挿入テストを中心として行われたが、テスト内容自体は二回目と重複するところが多いため本稿では割愛する。その後、一回目のテストを元に様々な準備を進め、2010 年 12 月下旬から 2011 年 1 月まで約一ヶ月をかけた二回目のリハーサルを行った。今回は KamLAND-Zen で使用するフィルムでバルーンを作り、周辺の機器も本番用を用意した最終テストとなった。以下様々なテスト項目について説明したい。

4.1 インストールテスト

ミニバルーンはカムランドの中心開口部を通り抜けることができるよう折り畳まれ、外側に何枚かに分かれたフィルムを巻きつけられ、さらにこれらを細いメッシュシートで縛られている。メッシュシートには細いナイロンピンが刺さっており、カムランド開口部から引っ張るとピンが抜け、メッシュシートおよびカバーシートが開く構造になっている(図 7)。



図7 折り畳まれ、フィルムカバーが巻きつけられているミニバルーン(左図)。フィルムカバーを押さえるメッシュシートと、メッシュシートを閉じているナイロンピン(右図)。

インストールテストの第一段階では、細長い状態に保たれたミニバルーンを、水を基準に $+0.4\%$ の密度差をつけた140リットルの砂糖水を重りとして徐々に送液しながら沈めるところまでおこなった。次にピンとメッシュシートを引き上げ、さらに次々とカバーフィルムを回収したが、何本もの紐が絡まることもなくすべて水槽上部で回収できることが確認された(図8)。最後に、固定配管へのミニバルーンの接続、および固定配管に設置してあるロードセルに12本の吊り紐を固定したところでインストールテストは無事終了となり、問題のないことが確認された。



図8 インストールの様子(左上)と水中に投入後のミニバルーン(右)。およびフィルムカバーを上部から取り除いている様子(左下)。

実をいうとこのテストは前回のリハーサルも含めて全部で3回行い、そのうちの1回は見事に失敗している。ミニバルーンの投入速度と送液の速度のバランス、後部でのバルーン送りのタイミング、そして重りの種類などの条件設定と、何よりエキスパートチームの育成が重要だと身に染みたテストであった。

4.2 入れ替えテスト

バルーンをインストールし、 $+0.02\%$ の密度差をつけたダミー液シン代わりの砂糖水でバルーンを拡張した後、上部に食品添加物である赤玉2号で赤く着色した、密度差をつけていない水を送液して直管部の拡張と層ができるかの

テストを行った。直管部の拡張は、送液チューブの挿入と、今後必要となるキャリブレーションツールの挿入のためのテストである。この時、バルーン内部はどのようになっているか確認するため移動式水中カメラを使用していたのだが、そのスクリーンの水流でミニバルーンが揺れ壁に接触するなど過酷な条件となったのだが、層自体はまったく崩れることもなかった。結果的に、一度出来た層はなかなか崩れないということが分かった。

次に底から $+0.04\%$ の青色砂糖水を送液し、上部から排液する入れ替えテストを行ったが、本番で使用する 150 l/hr で問題なく層を作成することができ、そしてその層を保持したまま入れ替えを行えることが確認できた(図9)。

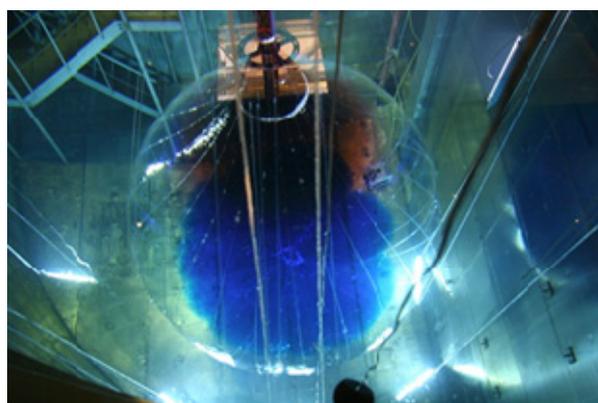


図9 水槽内のバルーン

上部の灰色(赤)は $\pm 0.0\%$ 、中部の透明な部分は $+0.02\%$ 、下部の灰色(青)は $+0.04\%$ の密度差をつけている。

最後に $+0.04\%$ の層に $+0.02\%$ を送液し、層を積極的に崩すテストを行ったが、残念ながら層は崩れず、 $+0.04\%$ の層とその上部に元々ある $+0.02\%$ の層の間に新たに層が出来てしまった。温度変化によって密度を調整した上での層崩しもおこないたかったが、残念ながら温度調整できる大型機器を持ち込むことはできなかったため、これについてはテストができなかった。しかし液体シンチレータは使用温度付近での温度による密度変化が $0.08\%/^{\circ}\text{C}$ と大きいため、本番では層崩しができないことを前提にしつつ、全力は尽くすという方針とした。いずれにせよ結論としては、 0.02% の密度差を設定すれば層を作るのは問題ないというテスト結果であった。

このリハーサルでは、他にも吊り紐とロードセルの調整方法のテスト、半分の吊り紐で荷重を支えるテスト、疑似キャリブレーション装置の挿入テスト、緊急時に使用するポンプの種類のテストなど様々なテストが行われたが、いずれも実験開始前後で反映することが出来るデータを取得することができた。このテスト結果をもとに、インストール本番に向けた作業手順が確立し、いよいよ本番という段階へと進んだ。

5 ミニバルーンの製作

5.1 環境

ミニバルーンの製作は、埃に含まれるごくわずかな放射性不純物の混入も避けるためスーパークリーンルームで行った。通常クリーンルームは 0.5 ミクロンの埃でクラスを計算するが、このスーパークリーンルームは、0.1 ミクロンの埃でクラス 1 以下という聞いたことのないような環境を保持している。このような環境の中では何を持ち込んでも汚染源となるため、クリーンバックされた手袋を使用している。バルーンフィルムを触る時には必ず超純水で手を洗い、さらに自然乾燥もしくは窒素で水を吹き飛ばしてから作業に入るという手順を常に心がけた。使用する道具もすべて洗剤での油除去、エタノールでのワイピング、超純水洗浄を経たものを使用し、毎日午前の作業開始前は窒素で吹くという手順を徹底した。

なお余談であるが、本プロジェクトで使用する大小様々なネジは、すべてネジ頭の油を除去するため洗剤と歯ブラシを使用して徹底的に磨き、その後エタノール・超純水での超音波洗浄を行っている。もちろん他の道具についても同様である。何かを始める度に洗浄から始まり、一生分の洗浄をやったという声が何度か聞かれた。ちなみにカムランド建設時も同じような声が聞こえたこと、使用する洗剤は 10 年前からマジックリンである事を追記しておきたい。

5.2 フィルム洗浄

前出の表 2 のフィルムの分析より、純水洗浄を行った場合は放射性不純物濃度が下がることが判明したため、本番用のフィルムは超純水を用いた超音波洗浄を行った(図 10)。

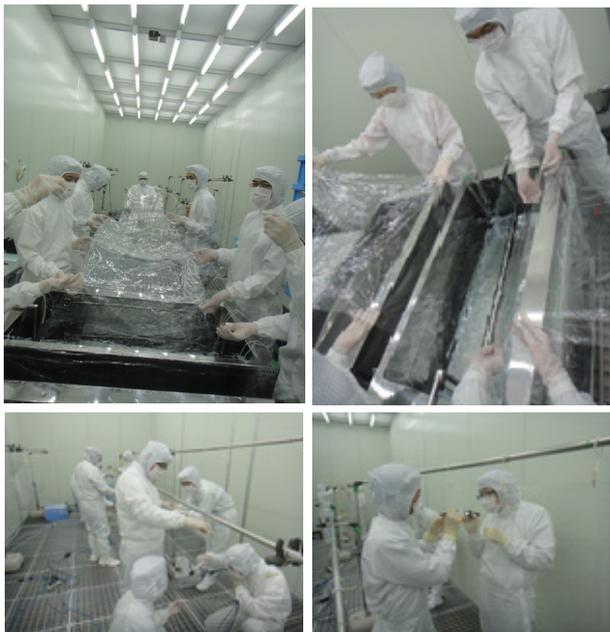


図 10 超純水を用いたフィルムの超音波洗浄(左上, 右上), 窒素を用いた乾燥(左下)とライトを当てながらのキズ・ゴミ・ピンホールチェック(右下)。

行う前は言い出した本人も効果があるのか疑問だったが、洗浄後に残った水にライトを当ててみるとかなりの細かい埃が浮かんでおり、効果があると期待されるものであった。

超純水洗浄を行ったフィルムは直後に窒素で水分を吹き飛ばして乾燥され、ライトを照らしながらキズ、ピンホール、埋め込まれているゴミのチェックを行ってから最終的に使用されるフィルムとして選択されている。これらの作業が終わったフィルムは窒素で満たされた箱に詰められ、カットされるまで保存されている。

5.3 溶着作業

ミニバルーンは、舟形に切り出したゴアと呼ばれるフィルムを約 30 cm 間隔で溶着していくという方法で製作された。バルーンは球形であること、そして直径約 3 m という大きさになるため据置の装置を使用することはできず、溶着バーに職人さんが体重をかけてスイッチを押すという、文字通り手の感覚による職人技で進められた(図 11)。



図 11 溶着作業。一人が溶着線を合わせて溶着バーをセットし(左)、もう一人の職人さんが溶着する(右)。

5.4 リークテストと補修作業

すべての溶着作業が完了した後、溶着不良箇所や目で確認出来ないピンホールやキズなどのチェックのため、ヘリウムリークテストをすべての溶着部分およびフィルムの全表面に対して行った。結果としては、フィルム本体についてのリーク箇所はなかったが、溶着部分については無視できないリークが発見された。構造的に 2 回以上溶着する必要のある箇所や、入り組んでいて溶着バーの一部分だけを使用する必要のある箇所など、リークがあるだろうと予想されている部分は予想通りの結果となった。あらかじめ用意していた液体シンチレータに耐性のある接着剤を用い、補修のスペシャリストがほぼすべての作業を行うことで、すべてのリーク箇所の補修に成功している⁵。

⁵ カムランドではしばしばアイディアや職人技を発揮し、いい仕事をしたとみんなが認める学生・研究者へのオマージュとして名前がつくことがある。今回は「中田補修」と呼ばれている。

5.5 出荷と道具の洗浄作業

約2ヶ月にわたるミニバルーン製作が無事終了した後、バルーンは専用の箱に入れられ、さらに窒素で密封された袋に詰められて搬送されている(図12)。



図12 最後の梱包作業に立ち会った面々とミニバルーンが詰められた密封箱

しかし実はこのクリーンルームでの作業はこれで終了ではない。バルーンがある時には、スペースの都合上行えなかったカムランド内部に挿入する照明・カメラ・ワイヤー・紐・テフロン配管・継ぎ手・カムランドに接続するフランジ、その他諸々の道具の洗浄作業が連日深夜まで行われた。

6 ミニバルーンインストール

6.1 作業環境

神岡鉱山内へ持ち込んだバルーンだが、インストール前の準備と確認などで、ミニバルーンを解放状態で保持する必要がある。カムランド検出器上部のドームはすでにクラス2000程度の環境ではあるが、クラス1の環境で製作したものをそのままの環境に放置するわけにはいかない。そこで今回のインストールのために、特別にクリーンルームを設置した。さらに神岡に集結したメンバーが純水を使用した掃除を徹底的に行ったところ、作業中も含めてクラス10~100の環境を保つことが出来た。

6.2 カメラと照明の設置

カムランドは球形バルーンの中心部のみにしか内部挿入口がなく、その開口部はカワシマフラッパーと呼ばれるブラックシートによって光学的に外部と切り離されている。また、内部に設置しているカメラも主に光度不足によって使用できていない。しかし狭い開口部でバルーンを痛めないようにインストールし、ミニバルーンの拡張を確認しながら送液するにはカメラで確認しながらゆっくりと作業を行う必要があるため、最初に照明とカメラ(図13)を投入した。



図13 Webカメラ2台を使用し、側面および底面を確認できる監視装置(左)とアクリルで封じられたLED照明(右)。

2001年の建設終了後、上記理由もありカムランド内部を見た人は居ない。半分以上は初めての経験、そしてインストールに必要なカメラが無事に挿入できて使用可能なのだろうかという不安の入り混じった中でインストール作業はすすめられた。そしていよいよフラッパーをカメラが抜けた瞬間、何か点のようなものが見え始めた。それが光電子増倍管に反射した光であること、その周りのステンレス構造体とカムランドバルーンの紐が確認出来た瞬間、どこからともなく歓声と拍手が巻き起こった。まだインストール作業の第一歩、しかしながらチームが一体となり、この作業は成功すると確信できた一瞬であった。

6.3 ミニバルーンインストール

照明とカメラがインストールされた後は、いよいよミニバルーンの投入である。細長くたたまれてカバーが巻きつけられているミニバルーンは全長14mに及ぶため、十数人がかりでミニバルーン本体を支え、有機ガスマスクを付けた開口部周辺のメンバーが内部挿入の速度をコントロールし、後方のメンバーが移動と送液のコントロールを行いながらインストール作業を進めた(図14)。

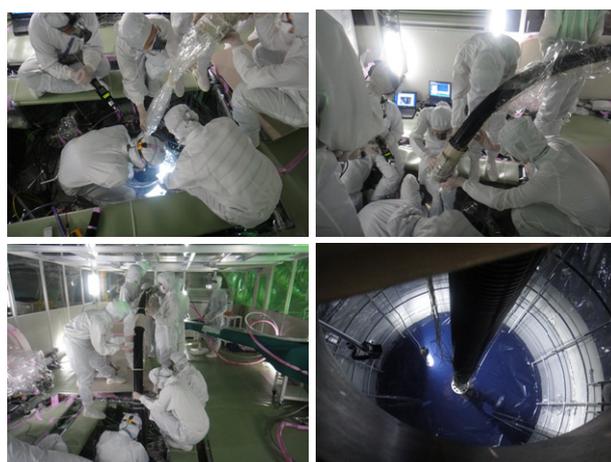


図14 ミニバルーンのインストール作業
カムランド開口部へのミニバルーン投入(左上)、同コルゲート管投入(右上)、後方部の送り込み(左下)とインストール後の開口部からカムランド内部方向を見た写真(右下)。

インストールテストと同様、おもり代わりに0.4%の密度差をつけた液体シンチレータを5リットルずつ送液し、気相部と置き換わった部分を沈めるといった作業を繰り返し約2時間をかけて注意深くインストール作業を行った。

作業はリハーサルに参加したエキスパートチームが要所を固めたこともあり、インストールはスムーズにそして予定通り進み、無事にカムランド内部に設置することができた。

6.4 カバーの取り外しとフランジの取り付け

ミニバルーンインストール後、折り畳まれているミニバルーンを押さえているナイロン製カバーを取り外さなければならない。リハーサルと同様、ナイロン製のピンを引っ張ることでメッシュシートを外し、その後は紐がくりつけられているそれぞれのカバーを上から順番に引き上げ、バルーンが自由に拡張できるようにした。一時、ピンが外れないなどトラブルにも見舞われたが、最終的には問題なく作業が終了した。

バルーンカバーが取り除かれた後、投入用のフランジから固定用のロードセルの付いたフランジを取り付け、バルーンの吊り紐をロードセルへ接続する作業に移った。このロードセルは、ダミー液シンと Xe-LS の入れ替えの際の重量変化の確認と、長期的な安定性の確認、場合によっては吊り紐の破断などの確認に使用されるため、非常に重要な装置となっている(図 15)。



図 15 固定用フランジとロードセル

固定用フランジ(左)は、重量測定装置のロードセル、気相部ライン、送液ラインが取り付けられ、今後上部に較正装置が取り付けられる。ロードセル(右)には、吊り紐の固定と巻き取り用のギア型ラチェットが取り付けられ、約 2mm 間隔での位置変更が可能となっている。

6.5 ダミー液シンの送液と循環

各種取り付けが終わった後、いよいよダミー液シンの送液が始まった。バルーンの様子を見ながら送液・バルーン拡張を行うために、バルーン監視・送液側コントロール・オリジナル液体シンチレータ送りの 3 パートについて 24 時間体制でシフトを組み作業が進められた。それぞれ状況に応じて液体シンチレータの密度・温度を微調整しながら進められたが、最終的に +0.15% の密度差の液体シンチレータを 17 m³ 送液し、無事に拡張することに成功した(図 16)。



図 16 送液直後のミニバルーン直管部(左)と拡張後の直管部・コーン部の接続部(右)。

拡張の判断は送液コントロール側の積算流量と、カムランド内部のカメラ装置でのコーン部の張り具合を見ておこなった。これは、拡張の判断でもっとも分かりやすいとリハーサルで確認していたからである。

リハーサルの経験から、最初に投入した +0.4% の液体シンチレータ 93 リットルが底に溜まっていると考えられた。そこで、カムランドで使用している液体シンチレータは 1 度で 0.08% の密度変化を起こすため、約 5 度冷やして底から送液し、上部から排液して循環させれば 0.4% の層を崩すことができる。その他微小な密度の層が出来ていると考えられたため、3 日間循環を行い、約 2 回転分に相当する量を循環させた。ミニバルーン内部には、ステンレス配管表面から流入してくるラドンがわずかに含まれるが、このラドンをトレーサーとすることでミニバルーン内部の液の流れが把握できる。そこでデータ収集を行い、このラドン事象をリアルタイムで解析することで攪拌が成功しているか確認した。このような確認は、すでに動いている検出器を使用し、解析ツールが用意されている実験の強みである。なお、数日間のラドンの確認、およびコーン部のカメラでの確認において明確なリークは確認されていないため、最後の段階であるキセノン溶解液体シンチレータとの入れ替えに進んだ(図 17)。

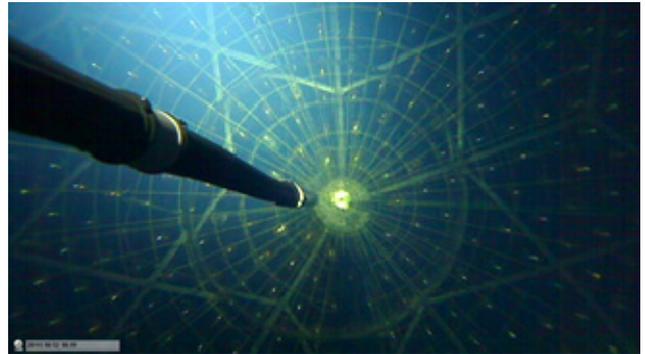


図 17 ミニバルーン拡張後のカムランド内部の写真

6.6 Xe-LS の送液

Xe-LS の送液は、キセノン装置の main tank と sub tank の容量より 700 リットルごとのパッチ送液となっているが、sub tank から送液している間に main tank で Xe-LS 作りを行っているため、ほぼ連続的に送液が行われた。送液は 150 l/hr で、これは Xe-LS 作りで規定されている。Xe-LS は +0.035% の密度で、攪拌時と同様に底から送液・上部から排液され、ダミー液シンとの密度差は 0.02% と予定通りの数値となっている。

Xe-LS 中のキセノンガスが抜けてきたりしないのかとよく聞かれるが、送液開前に Xe-LS に泡がないかサイトグラス代わりのテフロンチューブで確認し、送液開始直後は内部カメラでミニバルーン内に泡が立ち上ってこないか確認しながら送液を継続したが、一度も泡、つまりキセノンガ

スが立ち上ってくる様子が見えなかった。また、データ収集によるラドンの分布の確認においても、きれいに Xe-LS とダミー液シンの境界線が見えている。この境界を見ながら順調に入れ替え作業は進み、予定通りの液量の送液が完了した。

一方で、ミニバルーンから戻ってきたダミー液シン中のキセノンガスをガスクロマトグラフによってチェックしていたのだが、徐々にキセノンガス量が増えてきているのが確認された。少し密度差を上げる、温度を下げるなどの対策を行ってみたが、送液体積が増えるにつれ、この増加が止まることはなかった。現在のところ、排液中になぜキセノンガスが含まれてしまったのかは判明していない。この結果、予定では 390kg のキセノン溶かす予定であったが、最終的に約 330kg のキセノンがミニバルーン内部に導入されている。残りの 60kg は排液中のダミー液シンから回収し、現在計画している KamLAND-Zen pressurized Xenon, KamLAND2-Zen で使用する予定となっている。最後に最終調整と密度のムラを直すため、ダミー液シンと同様に攪拌用の循環を行い、いよいよ KamLAND-Zen のデータ収集が始まった。

7 おわりに

実質的に KamLAND-Zen 計画が開始してから約 2 年、自分ではありえないと思えるようなスピードで計画が進み、世界中で進められている二重 β 崩壊探索実験と肩を並べ、KamLAND-Zen 実験がスタートした。これを実現できたのは、数々のトラブル・困難を乗り越えてきた共同研究者たちの活躍によるものである。特に博士課程の学生たち、渡辺は種々のパートに対しリーダーシップを発揮し、竹本は注意が必要な仕事を地道に乗り越え、丸藤(亜)は R&D の頃から全体をよく把握した仕事を行い、吉田はリスクを乗り越える仕事と明るい雰囲気作りをしてくれた。他に修士の学生たちも中心となって幾多の困難を乗り越えてくれた。心から感謝したい。

9 月末に数々の作業を終え、本原稿を執筆している 10 月末現在、KamLAND-Zen は順調にデータ収集をおこなっている。著者たちもデータを確認することが楽しみな毎日であるが、一日も早く結果を公表できるよう引き続き全力を尽くして取り組んでいる。また、すでに次期計画である KamLAND-Zen pressurized Xenon, KamLAND2-Zen に向けた開発研究もリスト作りが進められ、実際に動き出すのを待っている段階である。カムランドの極低放射能環境を活かした新たな研究対象も模索しており、広い連携研究または参加を期待している。

参考文献

- [1] J. Schechter and J. W. F. Valle, Phys. Rev. D **25**, 2951-2954 (1982).
- [2] H. V. Klapdor-Kleingrothaus and I. V. Krivosheina, Mod. Phys. Lett. A **21** 1547 (2006).
- [3] N. Ackerman *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 212501 (2011).