

カムランド実験

原子炉ニュートリノ欠損現象の発見に至るまで

東北大学大学院理学研究科附属 ニュートリノ科学研究センター

白井 淳平 shirai@awa.tohoku.ac.jp
 末包 文彦 suekane@awa.tohoku.ac.jp
 井上 邦雄 inoue@awa.tohoku.ac.jp

2003年3月16日

§ 1. はじめに

昨年12月、カムランド実験グループは原子炉ニュートリノの欠損現象を見つけたと発表した。それはニュートリノ質量の新たな証拠を強く示唆し、これからのニュートリノの研究に強烈なインパクトを与えるものである。

カムランド (KamLAND; Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector) は世界最大 (1,000 トン!) の液体シンチレーター検出器を用いた高感度低エネルギーニュートリノ検出実験である。原子炉ニュートリノ、太陽ニュートリノ、地球ニュートリノなどを検出しニュートリノの謎に挑戦するとともに、新たな研究領域の開拓を目指す実験である。検出器は岐阜県神岡町の鉱山の地下 1,000 メートルに位置する。そこは、かつて小柴東大教授率いるカミオカンデ実験が行われた場所であり、スーパーカミオカンデ検出器から歩いて5分のところにある。

実験は1997年に検出器の開発、建設準備がスタートし、4年後の2001年液入れを行い、昨年1月より第一の目的である原子炉ニュートリノの検出実験が始まった。11月には物理の結果がまとまり、翌12月に発表した。解析の詳細はすでに論文として出版され[1]、東北大学ニュートリノ科学研究センターのホームページでも紹介されている[2]。ここでは、かつて本誌[3]に掲載された1999年4月以降、検出器の建設からデータ解析、物理の結果に至るまでを平易に解説する。

§ 2. カムランド建設

検出器概要

カムランド検出器(図1)の主要部は3,000m³のステンレス球形タンク(直径18m)に収納されている。中心部には1,000トンの液体シンチレーターが直径13mのバルーンに満たされ、厚さ2.5mのパラフィンオイル層の中に多数の紐で吊られている。液体シンチレーターの中でニュートリ

ノ反応が起こるとシンチレーション光が発生し、タンク内壁に据え付けられた1,325本の新型(17インチ)光電子増倍管と554本の旧カミオカンデ光電子増倍管(20インチ)で捕えられる。そのタイミングとヒット数から反応点とエネルギーが計測される。ステンレスタンクの外側は純水で満たされ周囲の岩盤からの環境放射線を遮蔽するとともに、225本の旧カミオカンデ光電子増倍管が設置されチェレンコフ検出器として宇宙線ミュオン識別に用いられる。以下、前回の報告[3]以降の主な建設作業について述べる。

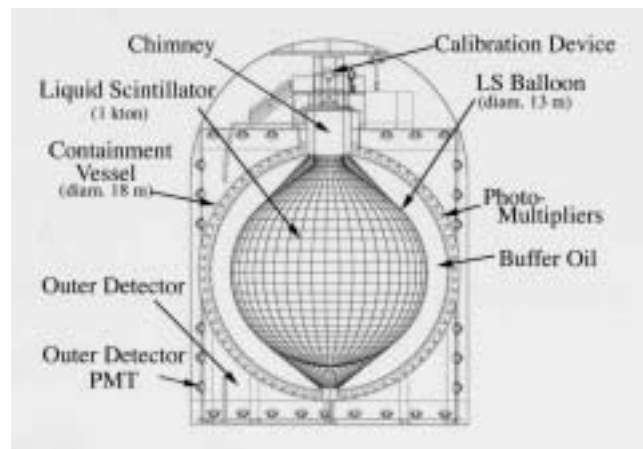


図1 カムランド検出器

液体シンチレーター

液体シンチレーター(以下液シン)の成分は前回の報告時点でほぼ決定されていた。すなわち、ドデカン(80%)+ブソイドクメン(20%)+PPO(発光剤ダイフェニルオキサゾールの略 1.5g/l)である。またバッファオイルとして、ドデカン(約50%)+イソパラフィンオイル(約50%)も同時に必要となる。液シンは1,200m³、バッファオイルは1,800m³必要であるため、結局1,860m³のドデカンと、900m³のイソパラフィンと、240m³のブソイドクメンと、1.8トンのPPOが必要である。

次の課題は、いかに質のよい素材を入手し、その質を保ちながら多量の液体シンチレーターとバッファオイルを製造するかであった。液体の透明度は、ごく少量の不純物の混入で台無しになってしまう可能性がある。特にカムランド用液シンのように 10メートル以上の光減衰長が要求される場合、細心の注意を払う必要がある。一旦カムランド検出器の中に入れてから、液シンの品質が悪いことが判明しても、もう取り返しがつかない。そのため、材料の選定、輸送、取り扱いに関しては、考えうる限りの安全策を講じた。

オイル類の選定に関しては、色々検討した結果、国内産のものになった。これは海外からの輸入では船による運搬となり、その際品質の劣化が予想されたことなどが理由である。オイルは鉄の錆に触れると劣化するので、生産現場からカムランドまでの運搬は、内部を徹底的に洗浄したステンレス製のタンクローリー（パラフィンオイル用）とドラム缶（ブソイドクメン用）を使用した。

液体シンチレーターの素材の中では、固体である PPO が一番不純物の含有量が高いと予想されていた。PPO も様々なメーカーのものをテストしたが、品質は製造メーカーにより実に様々で、最終的には、日本のメーカーの製品が一番よいことが分かった。しかしカムランドが必要とする 1.8 トンの PPO を短い期間内に製造するためには、新しいプラントの建設が必要であり、そのため値段が非常に高くなるということで、このメーカーからの購入は諦めざるを得なかった。そこで、市販レベルの試薬で、二番目に性能のよかった海外の大手製薬会社と交渉し、特殊な純化を施した PPO を開発した。いろいろなタイプの純化方法で純化したサンプルを送ってもらい、東北大でその溶液の光透過率や放射性同位元素含有量のテストを繰り返し、最終仕様を決定した。この結果、日本のメーカーの PPO に遜色のない PPO を比較的安価に入手することに成功した。

さて、新しい PPO の大量生産が始まり、初期のバッチが納品され始めた矢先、カムランドアメリカグループから「待った！」の声がかかった。彼等が独自にこちらとは別の方法で初期バッチの PPO の放射性元素含有量を測定した結果、異常に大きな値が出たのである。こちらでも同じものを測定していて問題はなかったので、「そんなはずはない」と思ったが、結果は結果なので、万一のことを考えて急遽製造メーカーに連絡して、生産を一時ストップすることにした。メーカーから、サンプルを取り寄せて調べたりしている内に、これ以上生産再開が遅れると予定内に納入は完了出来ない旨の連絡が来た。もともと納期は、カムランド建設のスケジュール中、PPO が必要になるギリギリのタイミングに設定していたので、この納期が遅れると、全体のスケジュールが遅れてしまうことになる。じりじりしてい

る内にアメリカ側より、「再測定の結果、前回見られた多量の放射性元素は、今回見られなかった。」旨の連絡が届いた時は、心底安堵した。なお彼等の最初の測定で何故大きな値が出たのかは、今もって分かっていない。

さて、後の章で述べるように、純化装置内で液体シンチレーターとバッファオイルを製造し、純化の後、検出器への液入れを行った。バルーンの真上に位置する検出器最上部のアクリル製フランジからは、液シンを通して 18メートル下のバルーン底部の直径 34 センチのステンレス製フランジを見ることが出来るのであるが、液シンの液位が上がって来ても、この底部フランジがきれいに見え続け、その透明度を肌で感じられたことは感動ものだった。また、実際のデータの解析の結果、ウラン・トリウム・カリウムの量も目標より何桁も少ないことが確認出来たときは、大きなハードルをさらにもう一つ越えることが出来たという気分であった。

この液シンによるカムランドでの光収集量は、開発段階で測定していた 150 photo-electron (pe)/MeV を大きく上回り、300pe/MeV にもなることが確認された。その原因は、液シンの発光量を測定した小規模なシステムでは測定出来なかった液シン中での再発光や散乱の効果が大きいためと考えられる。予定の倍の光収集量が得られたことにより、エネルギー分解能は、設計値の 1.4 倍よくなり、予期せぬボーナスをもらった感じである。

...などと言うような解説を大きな顔をしてここで書くことが出来るのは、この液シンが十二分の性能をもっていることが分かったからである。それまでは、実はヒヤヒヤの連続であったことを申し添えます。

光電子増倍管

2000 年 5 月にステンレス球形タンクが完成すると、光電子増倍管の取り付け作業が始まった。日本、米国、中国の共同研究者 30 人余りが毎日地下で作業を行った。カムランド専用に開発した 17 インチ光電子増倍管はパラフィンオイルに浸かるため、プリーダー回路部分は油に耐性のある充填材と接着剤が使われているが、水への耐性はなく水で濡らすことができない。取り付けには旋回足場を使う方法などが考えられたが、金額的に折り合わないため、水を張って浮き足場上で作業する方法が取られた。光電子増倍管を濡らしてはならないので、満杯の状態から徐々に水を抜いていき上から下に取り付けた（図 2）。

これを追ってラドンの拡散を防止するためのアクリル板が光電子増倍管を覆うように取り付けられていく。このため作業はいったん取り付けってしまったところには後戻りできない。ケーブルはタンク上部（チムニー）の穴から取り

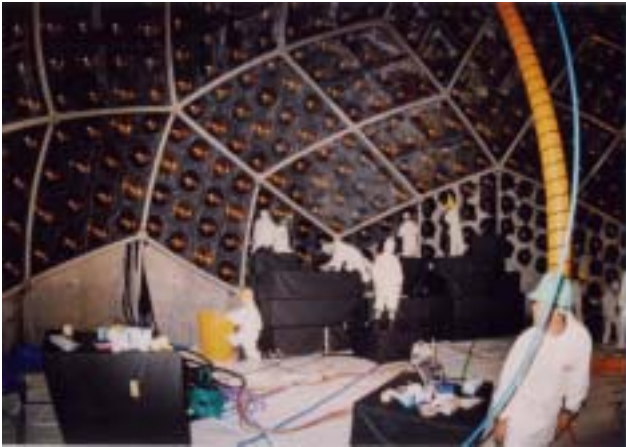


図 2. タンク内での光電子増倍管取り付け作業

出すデザインだが、ケーブルを這わすこともままならないわけで、ケーブルを通して引き上げるためのガイドチューブを水面の低下にあわせて張り巡らせていった。光電子増倍管のケーブルは耐オイル性の必要からテフロン被覆のケーブルが使用されている。このテフロンケーブルが硬いことも作業を難しくした。

作業が進むにつれ、ガイドチューブの長さは 30 メートルにもなった。最後は 180kg のホイスト 2 台に動滑車を使って信号線と HV 線の 16 対の束を引き上げるといふ大変な作業となった。最も距離が長い 5 本の引き上げでは 2 本がつまってしまうハプニングもあり、冷や汗ものであった。アクリル板の取り付けも大変だった。一辺約 2.7m のダイヤモンド型をした大きなアクリル板は、厚さがわずか 3mm であっても割れやすい。チムニー部の直径 3m の穴からの搬入、タンク内での据え付け作業は緊張の連続であった(図 3)。赤道より下の作業ではアクリル板の端にまったく手が届かなくなったが、共同研究者の中にはロッククライミングの専門家もいて、本格装備で作業が行われた。



図 3. ラドン遮蔽用アクリル板の取り付け作業

チムニー部のノズルから、読み出しエレクトロニクスや、高電圧発生装置へのケーブリングでは、ノズルの出口で 4,000 本近くのケーブルの気密を保たなくてはならない。このため、ケーブルのベッドを作り、そこを接着剤やコーキング剤で何重にも塗り固めた。出口の先は、各テフロンケーブルに延長ケーブルを取り付け(テフロンケーブルは値段が高いので出来るだけ短くしている)、上に行ったり下に行ったり、狭いところを通ったりしているケーブルトレイの上を這わせるのである。運悪くケーブル敷設作業中に導通が悪くなったケーブルが発見されると、すでに敷設されている何百本ものケーブルの下から悪いケーブルを掘り出さなくてはならない。これもまた大変な作業であった。

ここまでは、ちょっとした工夫で乗り切れたが、カムランド建設で本当に辛かった作業は、クリーニングであった。「1g の塵も残すな」という目標のもと、全員でステンレスタンク内面をはじめ、ボルト、ナットなど、あらゆるものを徹底的にクリーニングした。特に、ステンレスタンクを溶接した時に使用した溶接棒のフラックスには、多量のウラン、トリウムが含まれているので、溶接の際にタンク内面にこびりついたフラックスからバッファオイル内にそれらの放射性元素が溶け込む恐れがあった。これを取り除くためにもタンク内面の洗浄は本質的に重要であった。

直径 18m のステンレスタンクの内面をすべてクリーニングするのは並大抵の労力ではない。最も効果的な洗剤を探し求めてあれこれと試した結果が「台所マジックリンとキッチンスポンジ」であった。キッチンスポンジを使ってこの洗剤で何度も洗い、純水ですすぎ、アルコールで磨くという作業を延々と繰り返した。全員がゴシゴシと手を動かした総延長はなんと 1,000km! 一生分の掃除をしたという、全員疲労困憊であった。とにかく、クリーニングに関しては、至るところで偏執狂的に打ち込んだ。そのかいもあってか、実験が始まってから分かった純度(あまりにきれいで、カムランド本体でしか純度が分からない!)は原子炉ニュートリノ検出に要求される純度を 3 桁以上上回る高い純度であることが分かった。作業は 9 月には終了し、バルーンインストールへとバトンタッチした。

バルーン

カムランド検出器の中で一番特徴的なものは、やはり直径 13 メートルのバルーンであろう。厚さ 135 ミクロンの透明フィルムで作った風船の中に 1,000 トンの有機液体を漏れないよう保持しなければならない。このサイズは気象観測用ガス気球の標準から言うと小さい部類に入るが、なんと言っても保持すべき物質量が千倍もあり、その安全性の確保には、多大の注意が払われた。また多少の漏れは気球ならば許されるが、カムランドバルーンの場合、何年に

もわたって使用されるため、少しでも漏れがあると、やがて外部のバッファオイルが発光を始め、致命的なことになる。

前回の報告までに、バルーンの素材はほぼ決定されており、直径 90cm のプロトタイプが製作された。その後、直径 4.3 メートルのテストバルーンを 3 個、本番サイズの直径 13 メートルのテストバルーンを 1 個製作・テストして、本番に臨んだ。特に思い出深いのは、二個目の 4.3 メートルのテストバルーンの強度試験で、予想よりもかなり低い圧力で首の部分で破れてしまったことである。破れた瞬間、目の前が真っ暗になったが、カムランドバルーンの技術顧問である西村純先生の「テストの時点で破れたのは、むしろ幸いであった」とのお言葉に励まされ、カムランドバルーン技術評価委員の先生方の協力を得て、原因究明と対策を行った。そして三つ目の 4.3 メートルテストバルーンでは、予想を十分上回る強度を持つバルーンの製作に成功した。

最終的なフィルムは、XL+ON+ON+ON+XL の多層フィルムとなった。ここで、ON は、厚さ $25\mu\text{m}$ の 2 軸延伸ナイロンフィルム、XL は厚さ $13\mu\text{m}$ の 2 軸延伸のポリビニルアルコールフィルムである。これらの素材の特徴については、前回の報告に詳しい。

実機バルーンの製作は、2000 年の 10 月から 12 月までかかった(図 4)。フィルムの溶着作業は、プロの技術者が、25cm ずつ高周波の「こて」を溶着線に沿って押し付けることにより行う。東北大側の作業も、溶着部分の検査と補強、作業の段取り、大きくなったバルーンの引き回し、クリーンルームの掃除、ケブラーロープの取り付けなど結構ある。毎週月曜の早朝に工場のある那須まで行き、金曜の夜に仙台に帰るという生活を繰り返した。翌年 1 月から 4 月まで、タンク内設置(図 5)を行い、5 月から液入れが始まった。那須から神岡までバルーンを運ぶトラックが途中接触事故を起こすなどのアクシデントもあったが、幸い大きな障害にはならなかった。バルーンのタンク内設置は、まず畳まれたバルーンをタンク底部に降ろし、44 本の吊りロープを一本一本重さ測定用のロードセルに引っ掛け、首部を引き上げ、空気でバルーンを膨らませる... という手順で行われた。バルーン設置の後、窒素ガス製造装置を使い、バルーン内部を窒素に置換し、液入れが始まるのを待つこととなった。

実は、那須の工場ではバルーンを畳んだとき、防塵用靴カバーが一つ行方不明になっている。もしかしたら、バルーンのどこかに紛れ込んで、今もバックグラウンドを出しているかも知れない。



図 4. 完成間近のバルーン

バルーンを吊るすケブラー紐の取り付け作業(2000年12月)



図 5. 検出器タンク内のバルーン据え付け作業

タンク上部の穴(チムニー)に向かってケブラー紐とともに引き上げられていくバルーン(2001年1月)

純化装置

カムランドの液体シンチレーターはプソイドクエメン(1,2,4-トリメチルベンゼン)を4倍のパラフィンオイル(ドデカン)で希釈し発光剤(PPO)を $1.5\text{g}/\ell$ の割合で溶かしたものである。原料の液体は工業的に精製され安価、大量に入手できる。放射性不純物は極めて少なくウラン、トリ

ウムは誘導プラズマ質量分析器の検出限界に近い 10^{-13} g/g のレベルであった。原子炉ニュートリノ（反電子型ニュートリノ）の検出は、液体シンチレーター中の自由陽子との逆ベータ崩壊反応 ($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$) を利用する。反応でできた陽電子の信号（プライマリー信号といい、反ニュートリノのエネルギーから 0.8MeV 少ない値）と、中性子が約 0.2 ミリ秒遅れて別の陽子に捕獲されるときに出る 2.2MeV のガンマ線（遅延信号という）を捕らえることにより、バックグラウンドを厳しく排除できる。しかし実験に要求される液体シンチレーター 1g 中の放射性不純物の量はウラン、トリウムで 10^{-14} g/g 以下、 ^{40}K （PPO に含まれる）で 5×10^{-16} g/g であるので、さらに純化する必要があり、超純水を使った液液抽出法を用いた[4]。これは 300 トンの液体シンチレーターを使って ^7Be 太陽ニュートリノ検出を目指すイタリアの BOREXINO グループが開発した純化法であるが、何のことはない、超純水でオイルを“洗う”のである。水分子のもつ分極性でオイル中の金属分子を吸着除去するのである。抽出後の液は水分や酸素を除去する目的で窒素パージを行う。しかし本当にとれたかどうか確認するのは容易ではない。また、プソイドクーメンに PPO を加えただけの BOREXINO と違い、カムランドのは混合液体である。純化の効果の確認、装置のデザインと最適化には大変な時間と労力を要した。

装置は液体シンチレーター系とバッファオイル系の二系統からなり、それぞれ独立に液液抽出、窒素パージを行う。検出器に液を入れた後も液を循環させヶ月弱で一巡するスピードで純化できるよう、 $2 \sim 3\text{m}^3/\text{h}$ の速度で液を循環する設計である。検出器の状況に応じて効率の良い純化をするため、どのような液循環にも対応できるよう工夫されている。純化に必要な超純水、窒素ガスの供給と循環系、付属のタンク、配管類からなるシステムはちょっとしたプラントといえるもので、カムランドエリア入口部に分岐する奥行き 50m の坑道は装置で一杯になった。

なお、カムランド検出器で使用された物質はその選定の際に放射性不純物含有量のチェックがなされ、そのため 500 以上の測定が行われた。

システムクリーニング

純化装置の建設で大きな問題となったのが大小 11 のタンクと付属のポンプ、4 本の抽出/パージ塔、検出器タンクに至る多数の配管、数百個のバルブ、フィルターハウジング、計器類を含む全システムの清浄度の確保であった。システムを構成する部材は液体シンチレーターに侵されないよう、テフロンとナイロン以外はすべてステンレス製である。接液面は、電解研磨や充分細かい研磨をやればよいのは無論だが、予算的にとても無理なのでそこそこの研磨で

済ますしかなかった。これが裏目に出た。タンクや大型の配管の表面は、見た目はきれいでも拭き取りチェックで多量の研磨材がこびりついていることが分かった。研磨材は実験の敵であるウランやトリウムを多量に含む。このため特別チームを編成し、メーカーに出向いてアセトンとアルコールによる研磨材落としの擦り拭きが延々と行なわれた。またステンレス材に微量ながら含まれるウランの崩壊で表面からしみ出すラドンが新たなバックグラウンドになる恐れがあるため、液体シンチレーター系のタンクの内面はバルーンと同じ素材のラドンを通さない膜（エパール膜）を貼り付け、大型の直管はステンレス端管付きのナイロンチューブを考案し、これを挿入して溶接した（図 6）。この大作業も特別チームがメーカーに出掛けて行なった。



図 6. 純化装置でのラドンしみ出し防止策

液体シンチレーター用タンク内でのエパール膜貼り付け作業（接着剤を塗っているところ）（上）と、配管に挿入するステンレス端管付きナイロンチューブ（下）。ナイロン表面に静電気防止用アルミ箔を貼りつけた後、挿入する。

引き続きカムランドの現場では分岐坑道へのシステムの設置工事が行われ、予定通り 2000 年 3 月には完了した。残念ながら取り付け部品のチェックや現場工事の清浄度管理

が行き届かず、設置後の拭き取りチェックでとても使用に耐えないことが判明した。結局、スタッフ、研究員、大学院生で塔、配管など外せるものはすべて分解し、洗剤と純水でブラシ洗浄を行い、アルコール拭きをした。すべてのタンクも再び入念に洗浄を行った。配管はその上でフッ酸入りの薬液を循環させて洗浄、最後に純水を通しフィルターでトラップした埃を顕微鏡で数えてチェックした。バルブ、ポンプ類はメーカーに送り、分解しアルコールと純水で洗浄した。パラフィンオイル搬入用の5台のタンクローリー、プソイドクーメン搬入用のステンレスドラムも液入れ前に研究者がそれぞれのメーカーに出向いて洗浄、清浄度をチェックした。一連の大作業は2000年の夏から翌年3月まで続いたが、装置の復旧組み立て、消防検査、装置試運転を経て、PPO(1.8トン)のプソイドクーメン(10m³)への溶かし込み作業と、液入れ前の純化装置運転による前純化など必要なすべての作業が5月初旬に完了、連休後の液入れに間に合わせる事ができた。

液入れ

クリーニングに続き、検出器への液入れは2001年5月の連休明けに始まった。液体シンチレーターとバッファオイルの製造に必要なノルマルパラフィンとイソパラフィンは毎朝2~3台の大型ローリーで純化装置エリアまで運ばれてくる。光透過率のチェックを行った後、ノルマルパラフィンの半分は液体シンチレーター用タンクへ、残りはイソパラフィンとともにバッファオイル用タンクに入れられ攪拌される。液体シンチレーターの調合は、プソイドクーメンと高濃度PPO入りプソイドクーメン(10m³)から毎日の必要量を液体シンチレーター用タンクに注入、ノルマルパラフィンと混合、攪拌して行う。そして液液抽出と窒素パーズを行ないながら検出器(バルーン)に押し出す。並行してバッファオイルも攪拌し、同じ純化プロセスを経て検出器に押し出す。厚さわずか135ミクロンの検出器バルーンに余計な力がかからぬように、バルーン内外の液面差を数mm以内に保ちつつ、細心の注意を払いながら液入れは行われた。液の温度を一定に保つため、検出器の外水槽への注水も並行して行われた。液入れ作業は10名の研究者が連日入坑、重作業の毎日が続いた(図7)。ローリーからのオイル受け入れタンクの容量は限られており、その日のノルマはやり遂げないといけない。翌朝には次のローリーがやってくる。作業が深夜に及ぶことも度々であった。ステンレスタンクの内部にはCCDカメラシステムが設置され、いろいろな角度からバルーンを監視できるようになっている。液入れ中は、液の動きや液面が着実に上がって行く様子を見るのが楽しみであった。緊張の半年が過ぎ、2001年10月検出器は予定通り満タンになった。



図7. 液入れ作業中の純化装置エリア

奥行き50mの分岐坑道で液体シンチレーターとバッファオイルは調合され、純化された後100m離れた検出器に押し出される。

データ収集システム

カムランドのフロントエンドエレクトロニクスは、LBLが開発した、ATWD (Analog Transient Waveform Digitizer) と呼ばれるチップが使用され、約1.5nsの間隔で波形情報が記録される。一つのPMTには、二つのATWDが用意されており、トリガーが来ると、その内の一つがAD変換を行っている間、もう一つが次に来る信号を待つことで、時間的に接近した二つの信号に対しても不感時間が生じないようにしている。波形情報を記録するため、データ量は一日当たり150GBと膨大である。そのため、神岡から仙台台へのデータの転送は、15年前のカミオカンデの時と同じく、データテープを宅急便で送っている。

トリガー用エレクトロニクスは、スタンフォード大学により開発された。トリガーの判断は各PMTのヒット情報をFPGA (Field Programmable Gate Array) チップでハード的に処理して行われる。必要ならば、かなり高度なことも出来るが、現在はヒットしたPMTの数を利用して、エネルギーシールド約0.7MeVの主トリガーと、主トリガーの後1msの間、エネルギーシールドを約0.4MeVに下げる遅延トリガーを使ってデータを取っている。

イベントビルダープログラムおよびデータ収集ソフトウェア(KINOKOシステム)の開発と計算機の整備、そして検出器の安全性や状況(バルーンの重さや液系の温度、液位など様々な情報)を一括管理するモニターシステムは東北大が担当した。

データ収集システムは2001年秋に一部準備が整い、11月には宇宙線ミュオンが検出され、チューニングの後、2002年1月22日データ採取が始まった。

§ 3. 解析 (キャリブレーション、系統誤差、バックグラウンド)

カムランド実験は公式には 2002 年 1 月 22 日がスタートとなっているが、解析に使ったデータは 3 月 4 日からである。電子回路のハンダ付け不良などで使えないデータが多かったためである。修理の結果、最終的には 1,325 本の 17 インチ光電子増倍管のうち、不具合は 3 本にまで減った。不良率 0.2% はこれまでの 20 インチ光電子増倍管と比べると格段によい。これはパフアオイルが優れた絶縁物で、それに浸かっている光電子増倍管はたとえブリーダー回路に液漏れがあっても放電しないためと思われる。

キャリブレーション

検出器のキャリブレーションは週一回チムニー部の穴から放射線源を入れることで行っている。

エネルギーも位置の再構成も、この中心軸上では非常によくコントロールできていることはすぐに分かった(図 8a)。しかし、中心軸から離れたらどうかという不安がある。この不安を最小限にできるように検出器は球対称になっているのだが、球形にしたために中心軸上以外ではキャリブ

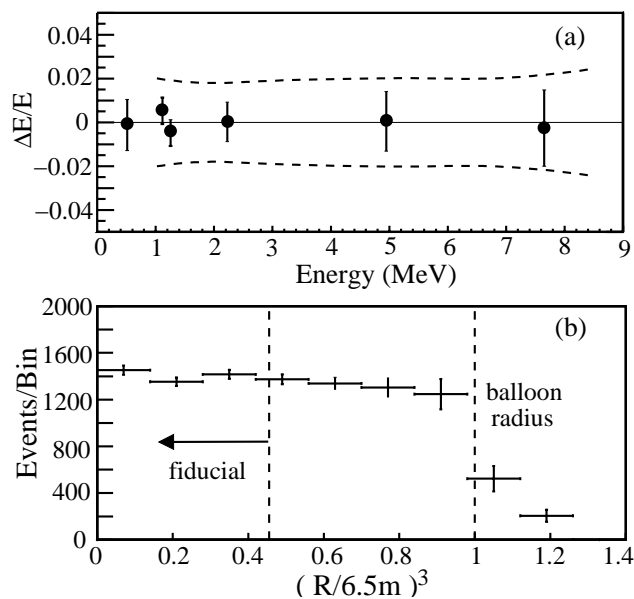


図 8. (a) 放射線源を用いた中心軸上でのエネルギーキャリブレーションの結果

再構成されたガンマ線エネルギーのずれの真のエネルギーに対する比を表す。

(b) 宇宙線ミュオンによる原子核破砕反応による中性子信号の位置分布

再構成された位置の中心からの距離 R とバルーンの半径 6.5m との比の 3 乗をプロットした。

レーションができないという事態に陥った。将来的にはロボットアームや潜水艦などを使って至るところでキャリブレーションを行う計画もあるが、手持ちのデータで何か手はないかというところである。

実際に役に立ったのは、0.3Hz で検出器を貫く宇宙線ミュオンがたまに起こす原子核破砕反応であった。実はこれが最も大きなバックグラウンドなのだが、キャリブレーションにはうってつけであった。この反応で生成された中性子が陽子や炭素原子に捕獲され放出されるガンマ線は、エネルギーも正確に分かっており検出器内でほぼ一様に分布しているので、エネルギーの位置依存性の確認や、有効体積 (検出器中心から半径 5m 以内) の決定に利用できる。全体積と有効体積の比と、全イベント数と有効体積内に再構成されたイベント数の比を比較することで有効体積の誤差を見積もった (図 8b)。これには十数 MeV に及びエネルギーのベータ崩壊核なども利用できた。現在最も大きな系統誤差はこの有効体積の決定精度 (4.1%) である。しかしこの誤差は原子核破砕反応の統計誤差に因っており、データの蓄積によりさらに向上する。詳細は省略するが、2.6MeV 以上の原子炉ニュートリノの反応数に対する系統誤差は 6.4% となっている。

バックグラウンド

原子炉ニュートリノの検出に使う逆ベータ崩壊反応は、陽電子信号と中性子捕獲信号の遅延同時計測によってバックグラウンドを厳しく排除できるという非常に優れた特徴を持っている。それでも偶発同時計測によるバックグラウンドが問題にならないようにするには、放射性不純物をウランやトリウム濃度で 10^{-14} g/g 以下にしなければならない。ちなみに、今後の観測計画にある太陽ニュートリノの観測では 10^{-16} g/g が必要である。この厳しい要求を満たすために、偏執狂的にクリーニングにこだわったわけである。ウランやトリウムの量は崩壊系列の下流にある $Bi \rightarrow Po \rightarrow Pb$ の崩壊連鎖を使って同定することができる。その結果カムランドが達成した純度は、ウランで 3.5×10^{-18} g/g、トリウムでは 5.2×10^{-17} g/g で目標をはるかに超える充分なものであった。また ^{40}K はシングルヒットのスペクトルを調べた結果、徴候は見えず 2.7×10^{-16} g/g 以下であることが分かった。おかげで、原子炉ニュートリノの解析に使うエネルギーでは偶発同時計測によるバックグラウンドは無視できるものとなった。

バックグラウンドの寄与で大きいものは、原子核破砕反応でできたベータ崩壊核のうち、中性子の放出を伴うものと、検出器外でミュオンが弾き飛ばした高エネルギーの中性子が検出器に到達し、陽子を反跳させる場合である。これらは、どちらも遅延同時計測にかかる。どちらもミュ

ーオンに起因したもので、検出器を突き抜けたミュオンを振る舞いを調べた。その結果、十分小さいことが分かった。実は、もっとも大きなバックグラウンドは、地球内部のウランやトリウム崩壊系列で生じる反電子型ニュートリノである。これ自体、ノーベル賞につながった「ニュートリノ天文学」に対抗して「ニュートリノ地球物理学」と呼べる新しい研究分野を切り開く興味深い反応なのであるが、原子炉ニュートリノの観測にあっては単にもっとも大きなバックグラウンドである。しかも、新しい研究分野と呼べるだけあって、その量は、地球物理屋さん曰く「まったく分かりません」となっている。幸い、プライマリー信号の検出エネルギーで2.5MeV以下なので、2.6MeV以上を解析に使うことで、これは排除できる。

§ 4. 解析結果 (e^+ エネルギー分布、排除/許容領域)

ここで紹介するのは、3月4日から10月6日までのデータである。それは145.1日のlive timeで162ton・yrに相当する。解析の結果得られたプライマリー信号(陽電子)のエネルギースペクトルを図9に示す。誤差棒付きの点が観測データである。

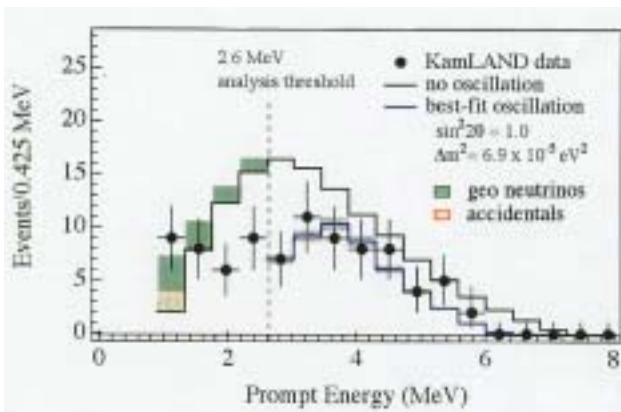


図9. プライマリー信号 (e^+) のエネルギースペクトル
誤差棒付きの点が観測データ。上側のヒストグラムはニュートリノ振動がない場合の原子炉ニュートリノによる予測スペクトル。下側のヒストグラムは振動を仮定した場合の2.6MeV以上の観測データに対する最適ヒストグラム(系統誤差を陰影で示した)。上側のヒストグラムで2.6MeV以下の陰影をつけた部分は適当なモデル[5]を仮定した場合の地球ニュートリノの寄与とバックグラウンドを示す。

0.9MeV ~ 8MeVでのイベント数は86であり、このうち地球ニュートリノの影響を受けない2.6MeV以上のものは54イベントであった。さらにエネルギーの高いところは、いくつかのモデルに制限を与えるのに有用なのだが、今のところは伏せておく。バックグラウンドは、0.9MeV以上では 2.9 ± 1.1 イベント(ただし地球ニュートリノは、適当な

地球のモデル[5]を仮定するとニュートリノ振動がない場合9イベントと予測される)で、2.6MeV以上では 0.95 ± 0.99 イベントであった。

一方期待される原子炉ニュートリノイベントの数は、次のようにして計算された。東北大学では、日本にあるすべての発電用原子炉から、時々刻々の熱出力と核燃料の燃焼度などのデータの提供を受けている。燃焼度からその燃料中の ^{235}U や、 ^{239}Pu などの量を知ることが出来、熱出力から核分裂頻度を計算することが出来る。一方各核分裂元素の一回の核分裂当たりのニュートリノスペクトルは、論文として発表されており、過去の原子炉ニュートリノ実験で2%程度の精度で実験値と合うことが確認されている。韓国の原子炉によるニュートリノ束の寄与は2.5%程度あるが、その時間変化はweb上で公開されている発電データを利用した。

このようにして計算されたニュートリノ量の時間変化とカムランドのlive timeを照らし合わせ、時間で積分し、逆ベータ崩壊反応の反応断面積と有効領域内にある自由陽子の数と事象選択の効率をかけて、エネルギーで積分すると、期待される原子炉ニュートリノイベント数は、 124.8 ± 7.5 (0.9MeV以上)、 86.8 ± 5.6 (2.6MeV以上)になった。2.6MeV以上で比をとると、

$$\frac{N_{obs} - N_{bg}}{N_{expected}} = 0.611 \pm 0.085(stat.) \pm 0.041(syst.)$$

である。明らかにニュートリノが減少していることが分かる。この有意さはポアソン統計を使うと99.95%となる。

長い原子炉ニュートリノの研究で、ついにニュートリノ欠損の証拠が見つかったのである(図10)。しかもこれは太陽ニュートリノ問題を説明する大混合角解を再現し、それ以外の解をすべて排除する。30年来の永きにわたった太陽ニュートリノ問題が、ついに、しかも地上実験によって解決したことになる(図11)。

わずか6年ほど前、カムランド計画が始まった頃は、誰もが小混合角解が最も自然であると考えていた。この意味において、カムランド計画は、決して順風の中で出発したものではなかった。しかし、検出器の建設が進むにつれて、太陽ニュートリノの実験的確からしさは徐々に大混合角解に移って行った。そしていよいよ蓋を開けてみたら、当初は不自然だと考えられていた大混合角解が実際は正しかったのである。

ここから何か教訓を得ることが出来るのではないだろうか。

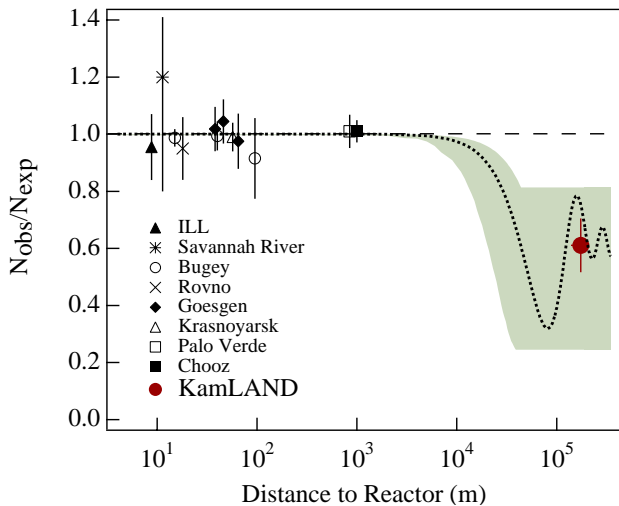


図 10. これまでの原子炉ニュートリノ振動実験の結果

観測された反ニュートリノの数とニュートリノ振動がないとした場合の予測値との比。横軸は原子炉からの距離。カムランドの距離は各原子炉のニュートリノフラックスの重み付きの平均距離。点線と影を付けた部分は太陽ニュートリノ観測実験での大混合角解の最適値と 95%CL 領域に相当する予測値。

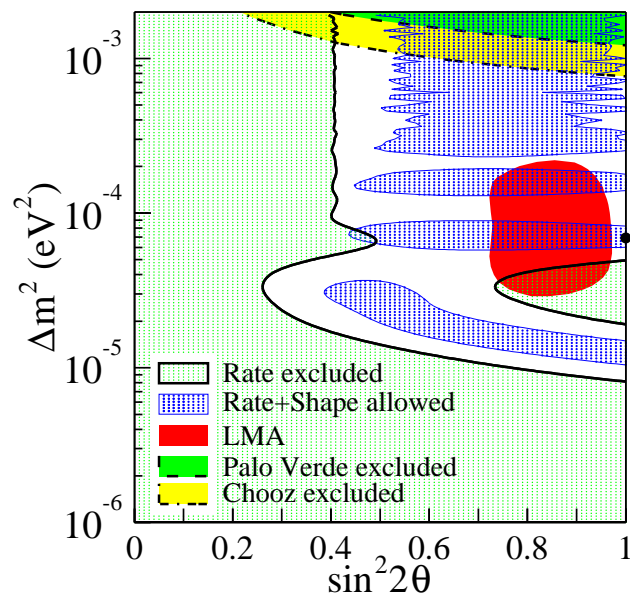


図 11. カムランドの原子炉ニュートリノ欠損から排除されるニュートリノの質量 2 乗差と混合角領域

太陽ニュートリノ欠損問題を解決する解のうち、大混合角解以外は 95%CL で排除される。エネルギースペクトルの形状を含めた場合の 95%CL 許容領域も示した。点は 2.6MeV 以上の観測スペクトルから求めた最適値 ($\sin^2 2\theta = 1.0, \Delta m^2 = 6.9 \times 10^{-5} \text{eV}^2$)。上部の 2 本の破線より上は最近の原子炉ニュートリノ実験 (CHOOZ と Palo Verde) による排除領域。

さて、ニュートリノ振動パラメータが決まったことで、ニュートリノはまさに情報を伝える道具として利用できるようになり、真の意味での「ニュートリノ天文学・天体物理学」が可能になったともいえるのではないだろうか。また、今後「ニュートリノ地球物理学」への応用も可能である。

カムランドの結果は、ニュートリノ欠損だけではない。エネルギースペクトルを利用することで、大混合角解はさらに小さくなり、二つのバンドが許されるようになる。これらは、LMA1, LMA2 と呼ばれている。まだ二つの解が残っていると言われるかもしれないが、ここから先は精密測定の話であろう。これまで 4 桁から 6 桁にわたって許されていたニュートリノ質量の 2 乗差が、せいぜいファクター 4 になったのだから。2.6MeV 以上でスペクトルの解析を行えば、ニュートリノ振動の最適値が求まる。それは $\sin^2 2\theta = 1.0, \Delta m^2 = 6.9 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ であった。ただし、混合角の感度はあまりなく、0.9MeV 以上のデータすべてを使うと $\sin^2 2\theta = 0.93$ になる。また、三世代混合を考慮するとさらに混合角の誤差は大きくなってしまう。いずれのエネルギー閾値でも許容領域に大差がないことから、低いエネルギーまで矛盾のないデータが取れていることが分かる。2.6MeV 以下のデータを含めて解析するときは、地球ニュートリノの数をまったくのフリーパラメータにするのだが、同時に地球ニュートリノの最適値も求めることができる。結果はウラン起源 4 イベント、トリウム起源 5 イベントである。しかし、5% の確率で 0 でもよいという統計量なので、いまのところは、地球ニュートリノのヒントが見えているという程度の控えめの発言にしておく。この量が有限値として観測できれば、いよいよ「ニュートリノ地球物理学」の幕開けとなるわけである。

§ 5. カムランドの今後

カムランドは、計画が始まった 1997 年から予定通り 5 年目で実験を開始した。この世界最大の液体シンチレーター検出器は、反電子型ニュートリノをほぼバックグラウンドフリーで検出することに成功し、7 ヶ月分のデータで原子炉ニュートリノの欠損現象を初めて観測した。最も自然な解釈は反電子型ニュートリノの振動現象の発見であり、CPT 保存を仮定すれば太陽ニュートリノの振動解が大混合角解以外にはないことが確定し、ニュートリノの質量 2 乗差がさらに制限されることを示している。今後データの蓄積により統計が上げれば、エネルギースペクトルに振動特有の歪みがさらにはっきり確認され、振動パラメータのより正確な値が決まるであろう。それはレプトンセクターの牧-中川-坂田 (MNS) 行列の決定に向かう今後の研究に大きく寄与するものである。

またカムランドの検出スペクトルは、地球反ニュートリノの検出がまさに手に届くところまで来たことを示す。統計がたまりプライマリー信号のスペクトルの 2.5MeV 以下にウラン/トリウム系列特有の角が見えれば、しめたものである。

カムランドはさらに低エネルギーの⁷Be太陽ニュートリノの検出による標準太陽模型の精密検証に向けた準備を始めている。その検出は電子との弾性散乱による単一事象であり、原子炉ニュートリノ検出でバックグラウンド落としに絶大な威力を発揮した遅延同時計測は使えない。現在 1MeV 近傍以下の単一事象で支配的なのは、ラドン崩壊の末裔である長寿命の放射性鉛 (²¹⁰Pb、半減期 22.3 年) と大気中に存在する放射性クリプトン (⁸⁵Kr、核燃料再処理などで発生、半減期 10.8 年) であり、これらを徹底的に除去すべく、R&D が進められている。

カムランド実験は旧カミオカンデ検出器の大改造から始まった。800 本の 20 インチ光電子増倍管はカムランドの中で今も活躍中である。昨年度のノーベル賞に輝いた小柴先生をはじめ、ご協力いただいた関係諸先生方に深く感謝いたします。また、カムランド建設期の数々の困難を乗り越えることができたのは、東北大ニュートリノセンターおよび機器開発・研修室の技官の方々の全面的な協力の賜物であり、ここに深く感謝いたします。

本稿を終えるにあたり、神岡鉱山をはじめ、カムランドの建設にご協力いただいた企業各社、神岡消防署、地元神岡町の皆様、そして原子炉運転データを提供していただいた東京電力はじめ、各電力会社の皆様に感謝します。

カムランド実験グループ

東北大（鈴木厚人、白井淳平、末包文彦、井上邦雄、古賀真之、古野貢一郎、三井唯夫、元木正和、石原賢治、Jesse Goldman、Brian Fujikawa、岸本康宏、畠山衆一郎、中村健悟、玉江京子、高山知明、花田博光、中嶋 隆、中嶋 實、清水一男、岩本敏幸、小川 洋、榎本三四郎、田島 治、渡辺秀樹、池田晴雄、川口哲司、木下秀展、中嶋 享、坂部辰行、伊藤和嘉子、江口宏司、川島恒彦、清水 格、前田達郎、池田 清、小関陽太郎、大和田憲太郎、多田健一）、

アラバマ大、カリフォルニア大学バークレイ校、ローレンスバークレイ研究所、カリフォルニア工科大、ドレクセル大、ハワイ大、ルイジアナ大、

ニューメキシコ大、スタンフォード大、テネシー大、トライアングル原子核研究所、デューク大、ノースカロライナ大、中国高能研

参考文献

- [1] K. Eguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90**, 021802 (2003).
- [2] http://www.awa.tohoku.ac.jp/KamLAND/index_j.html
- [3] 末包・白井・井上・古野, 高エネルギーニュース **18-1**, pp9-25 (1999).
- [4] J. B. Benzinger *et al.*, Nucl. Instr. Meth. **A417**, 278 (1998).
- [5] R. S. Raghavan *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80**, 635 (1998).