

ニュートリノは神の粒子か？

— 神岡地下 1000 m で進む $0\nu\beta\beta$ 発見への挑戦 —

筑波大学

飯田 崇史

tiida@hep.px.tsukuba.ac.jp

東北大学

尾崎 秀義, 石徹白 晃治

ozaki@awa.tohoku.ac.jp, koji@awa.tohoku.ac.jp

2020 年 (令和 2 年) 10 月 30 日

1 はじめに

1.1 神の粒子ニュートリノ？

“神の粒子”といえ、一般的には 2012 年に LHC で発見されたヒッグス粒子のことを指すのだろう。しかし、我々はニュートリノも神の寵愛を受けた特別な粒子であると信じている。

ニュートリノは素粒子標準理論で記述されるフェルミオンの中で唯一電荷をもたない中性の粒子であり、その質量は未だ測定されていないが、他のフェルミオンと比較して異常なほど小さいことが分かっている。標準理論ではフェルミオンはヒッグス場との湯川結合で質量を獲得しているとされる。しかし、1957 年に発表された Goldhaber らの実験結果によれば、ニュートリノは左巻き (反ニュートリノは右巻き) しか存在せず、ラグランジアンに右巻きと左巻きを質量がつなぐ通常のディラック質量項 ($m_D \bar{\nu}_R \nu_L$) を、未発見の右巻きニュートリノを仮定しないと組むことが出来ない。そのため標準理論ではニュートリノの質量はゼロであると考えられてきた。しかしながら、日本の Super-Kamiokande や KamLAND、カナダの SNO によって、ニュートリノ振動が発見された。もしニュートリノに質量がなく光速で走っていれば、フレーバー状態の時間発展は起こらないだろう。すなわち、ニュートリノ振動の発見によって、ニュートリノが小さいながら質量を持つことが明らかになったのだ。現在では、ニュートリノに質量があるにも関わらず左巻きしか観測されていないことや、その質量が極めて小さいことなどから、ニュートリノが粒子と反粒子の区別がないマヨラナ粒子であるとする説が有力視されている。

マヨラナ粒子は、エンリコ・フェルミをしてアインシュタイン、ディラックを超えてニュートン、ガリレオ級の天才と言わしめた、イタリア人物理学者エttore・マヨラナが 1937 年に提唱した。ニュートリノは電荷がないため、粒子反粒子の区別が単純ではない。我々は β^- 崩壊で出てくるものを反ニュートリノ、 β^+ 崩壊で出てくるものをニュートリノと呼んでいるに過ぎず、単にカイラリティの違いを見ているだけとも言える。もしニュートリノがマヨラナ粒子であれば、粒子と反粒子をつなぐ新しいマヨラナ質量項 ($m_L \overline{(\nu_L)^c} \nu_L$) を左巻きのみで導入できる。右巻きに対しても同様のことがいえるので、マヨラナ粒子では左巻きと右巻きに異なる質量を対応させることが可能となる。そして質量行列の対角化によって、極めて軽い左巻きニュートリノと、極めて重い (それゆえに未発見の) 右巻きニュートリノという、標準理論で説明困難なニュートリノの特異性を説明するのに都合の良い結果を自然に導いてくれるのだ。これは、シーソー機構と呼ばれ 1970 年代に柳田らによって提唱された。マヨラナニュートリノが支持される理由の一つである。

また、極めて重い右巻きニュートリノは宇宙極初期に崩壊するが、その際、CP の破れによって反レプトンへ多く崩壊することで、宇宙全体のレプトン数に非平衡を生み出した可能性がある。ここで作られた負のレプトン数が、スファレロン過程やインスタントン効果といった、バリオン数 - レプトン数 (B-L) を保存する反応を通して、バリオン数へ変換され、宇宙の物質反物質の非平衡を生み出すレプトジェネシスというシナリオが有力な説の一つとなっている。物質優勢宇宙の謎を解くカギは、神の粒子ニュートリノが握っているのかもしれない。

1.2 ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊

先に述べた通り、様々な状況証拠がニュートリノがマヨラナ粒子であることを示唆している。ニュートリノのマヨラナ性を検証する現実的に唯一の方法は、ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊 ($0\nu\beta\beta$) の観測である。 $0\nu\beta\beta$ は同じ原子核内で2つの β 崩壊が起こり、片方から放出された反ニュートリノがマヨラナ質量項を介してニュートリノに転換し、もう一方の中性子に吸われ電子のみを放出する過程である。この反応は前後でレプトン数を保存しておらず標準理論を超えた反応であり今のところ発見されていない。ニュートリノを伴う二重 β 崩壊 ($2\nu\beta\beta$) は、弱い相互作用の2次の過程として起こり得る反応で、実際に複数の原子核で観測されている。 $0\nu\beta\beta$ の崩壊率は、ニュートリノの有効マヨラナ質量 ($\langle m_{\beta\beta} \rangle$) の二乗に比例する。二重 β 崩壊測定感度は、 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ を使って表すことが多い。ニュートリノの質量の階層モデルによって縮退、逆階層、順階層の領域に分けられる(図1)。縮退領域はこれまでの実験結果からほぼ排除されており、現在進められている次世代実験の目標は、逆階層領域を完全に探索することである。さらに感度を高めて順階層領域を測定するには、検出器の技術革新が必要となってくる。

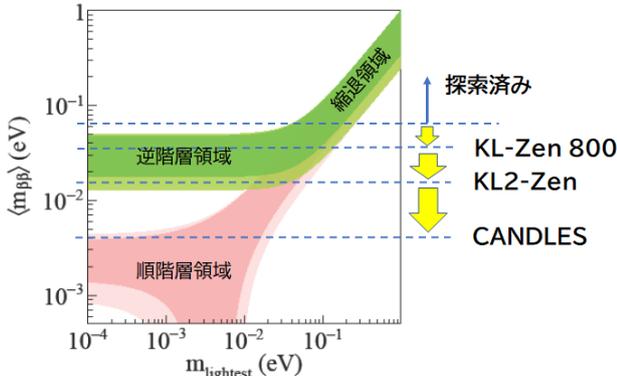


図1: 縦軸: $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ 、横軸: 最も軽いニュートリノ質量。振動実験によって色のついた領域に制限される。点線は本稿で紹介する各実験の目標感度を示している。

実験の感度を高めるためには、(1) 大量の二重 β 崩壊標的原子核を用いて、(2) 極低バックグラウンドの測定環境において、(3) 高エネルギー分解能の検出器で実験を行う必要がある。(3)に関しては、究極のバックグラウンドとして $2\nu\beta\beta$ が存在し、高感度を目指して大量の標的を用意すればするほど大きな壁として立ちふさがる。ニュートリノの持ち去るエネルギーで見分けるしかないため、とにかく高エネルギー分解能な検出器が必要なのである。また、 $0\nu\beta\beta$ の半減期からニュートリノ有効質量を求めるには、原子核の遷移行列を必要とするが、ここに数倍程度の理論的不定性が伴うため、様々な

標的原子核で実験を行うことも重要である。日本でもいくつかの実験提案がなされており、過去の高エネルギーニュース等でも紹介されている。より詳細な $0\nu\beta\beta$ の理論的背景や、世界における探索の現状については、興味があれば [1] を参照されたい。

本稿では、その中で岐阜県神岡の地下 1000 m に大型の検出器を構築し、実際に $0\nu\beta\beta$ 探索実験を行っている KamLAND-Zen と CANDLES に焦点を当てて、その現状と将来展望についてご紹介したい。KamLAND-Zen は濃縮が容易な ^{136}Xe を標的として、現時点で世界最高感度での探索を実現しており、最終的には逆階層領域を探索しつくす計画である。一方の CANDLES は二重 β 崩壊核中で Q 値が最大である ^{48}Ca を標的として、順階層領域までの探索を実現しようとする野心的な計画である。

2 KamLAND-Zen

2.1 序章

KamLAND-Zen は、KamLAND (**K**amioka **L**iquid **S**ciintillator **A**nti-**N**eutrino **D**etector) で行う $0\nu\beta\beta$ 探索で、東北大学が主導する。KamLAND は、およそ 1 kton の液体シンチレータ (LS) を用いた LS 検出器である(図2参照)。直径 18 m の球形ステンレスタンクには、1325 本の 17 インチ光電子増倍管 (PMT) と 554 本の 20 インチ PMT が取り付けられている。LS を保持する 13 m パルーンの外側は光らないバッファオイルで満たされており、PMT などに含まれる放射性不純物からの高レートな γ 線でトリガーがかからないようになっている。球形ステンレスタンクの外側は、マインガード¹を施しただけの空洞を 3.2 kton の純水で満たして水チェレンコフ光検出器にしている。宇宙線のミュオン Veto 検出器であると同時に、検出器の温度コントロールや外の岩盤から来る中性子を遮蔽する役割がある。この外水槽検出器は KAMIOKANDE から再利用した PMT の半分以上が長期使用のため故障していたので、2016 年に宇宙線ミュオンの検出効率を回復、向上させる目的で刷新している。KamLAND は、反ニュートリノ検出器として建設され、原子炉からの長基線ニュートリノ振動の観測をはじめ地球ニュートリノの観測などの成果を上げている。

2011 年からは、その KamLAND でも最もきれいな中心部を使って $0\nu\beta\beta$ の探索を行っている。ニュートリノ検出器でニュートリノを出さない新物理を探索することとなったのである。我々は、KamLAND に適し

¹マインガードは落石・漏水・岩盤からの放射性物質の混入を防ぐためのポリウレタン製の被覆材である。

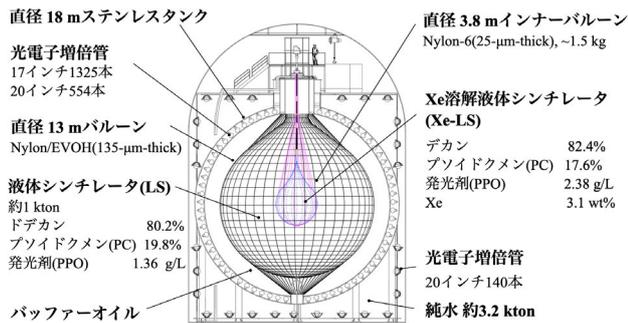


図 2: KamLAND-Zen 検出器の図。

た二重 β 崩壊核として ^{136}Xe を使用している。Q 値が 2.458 MeV と高く、KamLAND では自然放射線による背景事象のほとんどないエネルギー領域になっている。Xe は、特に困難なく LS に溶かし込むことができる上に、真空引きで脱気回収できる。希ガスで、化学的にも不活性であるため保管や輸送にもすぐれ、濃縮法や精留による純化方法も確立されている。 ^{136}Xe の $2\nu\beta\beta$ は長寿命でエネルギー分解能による信号領域への染み出しを少なく抑えられるメリットもある。“Xenon” と “Zero-neutrino” さらにその稀な事象を待つ実験の姿勢を“禅”に例えて“KamLAND-Zen”と名付けられた。KamLAND-Zen では、半減期 10^{26} 年以上という非常に稀な事象を探索するために、大量の原子核を使うことと、背景事象となる放射性不純物を徹底的に排除することに努めている。世界でも激しい競争が広がられている $0\nu\beta\beta$ 探索で、KamLAND-Zen は $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ に対して最も厳しい制限を与えている実験となっている。KamLAND-Zen はここ何年も世界最高感度の実験として君臨し続けているが、その道のりは決して順風満帆とは行かなかった。

2.2 KamLAND-Zen 400

2.2.1 第一フェーズ

KamLAND-Zen は、 ^{136}Xe を約 90%濃縮した Xe 約 316 kg を用いてスタートした。2011 年から 2012 年までの期間を第一フェーズと呼んでいる。第一フェーズでは、図 3 のようなエネルギースペクトルが得られた。 $0\nu\beta\beta$ の見えるべき領域に何か別なピークが見えていた。エネルギースペクトルの違いや反応数が多いことから $0\nu\beta\beta$ ではないようであった。データをためてスペクトルや崩壊のレートなどを調べていくと ^{110m}Ag の崩壊であることが判明した。Ag 混入の原因は明らかではないが、我々は東日本大震災による福島原発事件の放射性降下物、または、Xe 空輸中の宇宙線による原子核破碎を

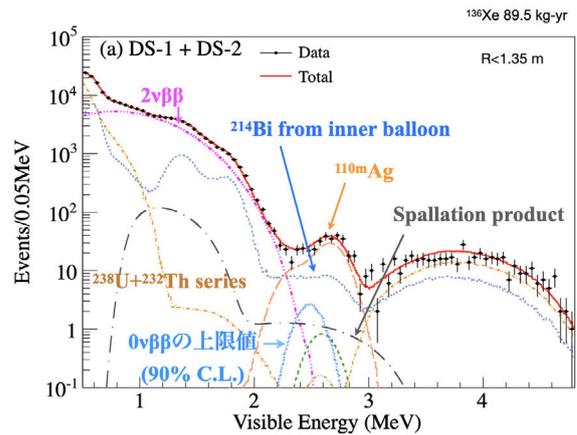


図 3: 第一フェーズのエネルギースペクトル。[2] のものを一部改変している。 ^{110m}Ag が $0\nu\beta\beta$ 領域に大量に存在してしまっているのがわかる。

疑っている。この予期していなかった ^{110m}Ag を取り除くために LS と Xe ガス両方の純化作業を行った。

2.2.2 第二フェーズ

途中、火災とその復興のための延々と続く掃除作業を経て、2013 年より純化後のデータ収集を再開した。この間に Xe 量を約 380 kg まで増やしている。2015 年の 10 月までデータを取得しており、この期間を第二フェーズという。Xe-LS 内側の感度の良い領域のエネルギースペクトルは図 4 になる。蒸留純化のかいあって Ag が少なくなっているのがわかる。この第二フェーズまでの ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 半減期に対する結果 ($T > 1.07 \times 10^{26}$ yr) がいまでも $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ の世界で最も厳しい制限である。この時のデータに含まれる $0\nu\beta\beta$ 探索領域における背景事象は、エネルギー分解能により染み出した $2\nu\beta\beta$ 、Xe-LS 保持容器のフィルム表面に付着した ^{238}U の娘核である ^{214}Bi 、宇宙線ミュオンの原子核破碎でできる不安定核 (^{10}C など) の崩壊であった。先に述べた通り、 $2\nu\beta\beta$ の染み出しを抑えるには、エネルギー分解能の向上が必須であり、検出器の大改造が必要となる。そこで、我々の次なる目標は、大改造を必要としない、ターゲットである Xe の倍増とフィルムの ^{238}U の削減、 ^{10}C の除去となった。

2.3 KamLAND-Zen 800

2019 年 1 月より稼働中の KamLAND-Zen 800 は、KamLAND-Zen 400 の Xe-LS 保持容器である透明なインナーバルーン (以下 IB) を容積 2 倍にして、Xe 量も約 2 倍にした実験である。KamLAND-Zen 400 の経験を活かしてさらに綺麗な IB の製作をした。

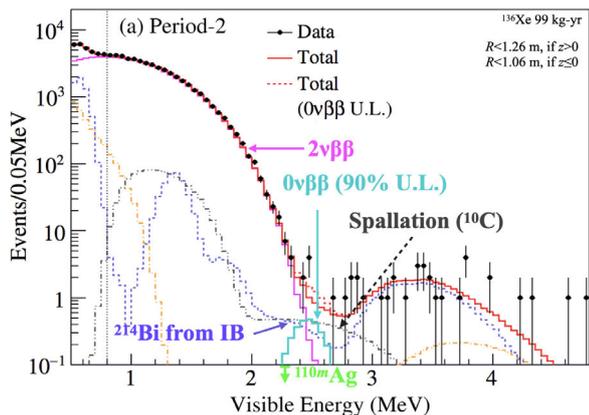


図4: 第二フェーズで得られたエネルギースペクトル ([3]より一部改変)。 ^{110m}Ag の崩壊事象が減少していることがわかる。

2.3.1 検出器のアップグレード

我々は、KamLAND-Zen 400 が終了してすぐに KamLAND-Zen 800 へと移行できるように入念に準備を進めていた。IBは、天井一帯に取り付けられた $0.15\ \mu\text{m}$ 径以上の粒子を通さない ULPA フィルタにより塵一つない“スーパークリーンルーム”で我々研究者の手によって製作された。放射性不純物の混入を徹底的に減らすために選定された素材で作った非常に薄いナイロンフィルム ($25\ \mu\text{m}$) を溶着して作っている。放射性不純物を含む“汚れ”の一番の原因は、そこで作業する人の人体や衣類である。“汚れ”をクリーンルーム内に持ち込まない、IBに付着させないために様々な工夫を凝らした。図5を見ていただきたい。今回は、作業中に人の肌が露出していたが、今回のIB作成では完全に人肌が出ないようにしている。他にも、スーパークリーンルーム内でクリーンスーツからさらに密閉度の高いクリーンスーツへと着替えた。さらに、クリーンルームに入る人は、日常タバコを吸うことや、当日の化粧や整髪料、日焼け止めを使用することを禁止されるといった徹底ぶりであった。多くのユーザーがいる東北大学のクリーンルーム施設でも我々の“綺麗さ”に対する執念は異常に映っていたように思う。

外水槽検出器を刷新してすぐの2016年には1度目のIBを導入したが、ダミー液体シンチレータ(ダミーLS)を注いでIBを膨ませたところ、LSのリークが発見された。リークを示す兆候はいくつかあった。はじめは、IB付近のLSが“めらめら”しているというのでリークを疑い始めた。IBの重量を測っているロードセルの値の減少、IB体積中の ^{222}Rn 崩壊数の寿命カーブからのズレ、カメラの映像など様々な方角から検証を行い、どれも~数十L/日のLSリークを示していた。決め手となったのは、ダミーLSから成分の違う外側のKamLAND-LS



Zen 400

Zen 800

図5: クリーンルームでのIB製作の様子。左はZen 400用を製作時のもの手溶着機で溶着している。右はZen 800用を製作時の様子で、半自動溶着機を使っているのがわかる。また、ゴーグルの装着など汚れを出さないための工夫が見てとれる。

の成分が検出されたことであった。幸いにもXeを溶かし込む前だったため大事には至らずに済んだ。引き上げたIBには溶着線部分に数カ所穴が空いていた。インストール前にはHeガスを用いたリーク検査により穴がないことは確認できていたので、その後の作業中に穴が空いたことになる。原因は、IBの溶着が不十分だったのだと考えている。実際に引き揚げたIBからサンプルをとって強度を測定したところ一部の強度は期待していたよりも低かった。

研究室総動員で2017年から再びIBの製作に取り組んだ。新たに開発した半自動溶着機で溶着の温度や圧力、時間などのパラメータを徹底的に調査して強度の高い溶着方法を確立する一方で、効率的にIBを洗うための装置も開発した。また、冬場にも作業を行い早急にIBを完成させるために湿度をコントロールするためのミスト発生装置を導入した。静電気があるとフィルムに“汚れ”が付着しやすくなる。これまでは静電気を避けられる湿度の高い夏場を選んで作業していたのである。2017年の秋にはIBの溶着は終わったが、溶着部分に予想していたよりも遥かに多くのピンホールができてしまっていた。ピンホールの場所をHeガス検出器を用いて特定して塞ぐ、IBの“手術”がその後何ヶ月も続いた。2018年の5月に晴れてIBを検出器内にインストールできた。KamLAND上部にある直径50cmの穴から畳んだIBを挿入した。作業中IBを保護する“さやフィルム”が絡まってKamLANDの中から取り出せなくなるなど冷や冷やす場面はあったものの無事インストールに成功した。 $0\nu\beta\beta$ に感度の高い部分を背景事象の多いIBから離れたXe-LSの内側部分だけに制限してしまっていたIBフィルム上の ^{238}U は、Zen 400の約1/10の削減に達成していた。

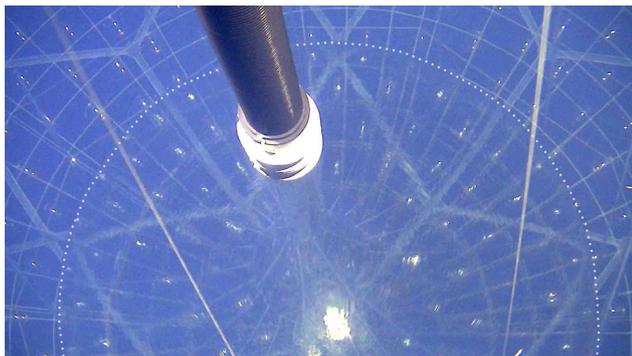


図 6: Xe 溶解後の IB のカメラ撮影による写真。バルーンの縁 (点線) で菱形のフレームが歪んでいるのが見える。

2.3.2 LS の蒸留純化、Xe 導入

幸いにも IB にリークの兆候は見られなかったが、IB を膨らませたダミー LS には ^{232}Th が約 10^{-15} g/g-LS と予想していたよりも多く入っていた。Th 系列の ^{212}Bi - ^{212}Po の連続崩壊は、遅延同時計測と 2 波形を検出する解析で事象同定し、取り除くことができる。しかし、崩壊の時間差が短い (<10 nsec) ものは 2 つの事象が一つとして観測されてしまう。この時の合計エネルギーは $0\nu\beta\beta$ の領域に侵入してくるので背景事象となる。そこで Xe を溶解する前に LS の蒸留純化を行うことに決めた。1 度目の蒸留純化では期待したほど Th が減っていなかった。どこか我々の知らない Th 供給源があるのではと頭を悩ませ、発光剤である PPO の突沸などを疑った。LS 蒸留塔や PPO 蒸留塔、配管などをブソイドクメンで洗浄する、配管中のフィルターを交換するなどできることを全て行い再度蒸留純化すると、Th はなんとか要求値以下まで減ってくれていた。その後 Xe を溶かし込んでいき、約 2 ヶ月かけた IB 体積 2 周分の LS 循環により、約 745 kg 溶かし込むことができた。蒸留純化や Xe 溶解中もデータは取り続けて、データ解析により IB 中の ^{222}Rn 量をモニターすることで LS の様子を確認した。また、定期的にカメラで写真も撮って様子を確認した。図 6 が Xe 溶解後の写真である。Xe を溶かし込むと LS の屈折率が変わるのでバルーンの裏側が歪んで見える。

2.4 解析技術の発展

KamLAND-Zen の大きな利点の一つとして、ソースの役割を果たす二重 β 崩壊核 (^{136}Xe) が LS に溶け込んでいるおかげで、二重 β 崩壊と背景事象の切り分けが可能であることがある。Xe-LS には ^{238}U や ^{232}Th などの放射性不純物が混入してしまう。それらは背景事象となる ^{214}Bi の崩壊や ^{212}Bi - ^{212}Po のパイルアップ事象を引き起こす。また、宇宙線ミュオンにより作られる不安定

原子核の崩壊も重大な背景事象となっている。しかし、Xe-LS 中でのそれらの事象も反応場所やエネルギーを検出でき、他の事象との相関を用いて事象同定してデータから除去することができる。KamLAND-Zen 400 では宇宙線ミュオンによる ^{10}C が $0\nu\beta\beta$ 領域に重なる Q 値 (3.64 MeV) をもち半減期が 19 秒ほどあるため、厄介な背景事象であった。KamLAND における LS を通る宇宙線ミュオンのレートは約 0.2 Hz ほどあるため、ミュオンが来るたびにデータを数分間 Veto するわけにはいかない。そこで原子核破碎の際に生成される中性子を使う。デッドタイムフリーの電子回路 (Module for General Use Rapid Application, 略称 MoGURA) により LS 中の水素原子核が中性子捕獲した際に放出する 2.2 MeV ガンマ線を捉える。宇宙線ミュオン (1)、中性子捕獲 (2)、不安定核の崩壊 (3) の時間空間相関を用いた 3 事象遅延同時計測で除去することができる。それに加え、新たにシャワーの情報を使った除去手法を開発した。宇宙線ミュオンを起源とした電磁シャワーやハドロンシャワーで不安定原子核が生成される。宇宙線ミュオンのトラックに沿ったエネルギー損失を計算することで、シャワーが起こった点を見つけることができる。それにより中性子捕獲の代わりにシャワーを使った除去が可能となった。中性子捕獲の情報を使わないため、2 つの除去手法を独立に使うことができ、その結果、 ^{10}C の崩壊は約 95% 以上の除去を達成した。これにより ^{10}C の背景事象は、現在の解析では無視できるくらいに少なくなる見込みである。

長寿命崩壊核

徹底して背景事象を除いた結果、宇宙線ミュオンが Xe 原子核を破碎してできる不安定核も無視をできない寄与をもつようになってきた。図 7 は、原子核破碎による背景事象生成のイメージ図である。実際は、不安定核の娘核の崩壊が背景事象になることもあるため、解析は以下の手順で行なった。まず、FLUKA をもちいて宇宙線ミュオンによる Xe 原子核破碎で生成される不安定原子核をシミュレーションする。その後、崩壊のデータベース (ENSDF) と Geant4 を用いたシミュレーションで、娘核への崩壊を追うことで背景事象の見積もりを行うことができた。その結果、Xe 原子核破碎による不安定核の崩壊は 30 種類以上の原子核が小さな寄与をもつことがわかった。それらは、半減期が数百秒から数日以上のもので長寿命のものが多くあり、合計すると ROI (Region of Interest) に年間約 8 事象/ton-Xe/0.1 MeV ほどと、大幅な削減を達成した ^{10}C の崩壊 (1.5 事象/ton-Xe/0.1 MeV 以下) よりも多くなってしまっている。Xe 原子核破碎の特徴として、不安定核

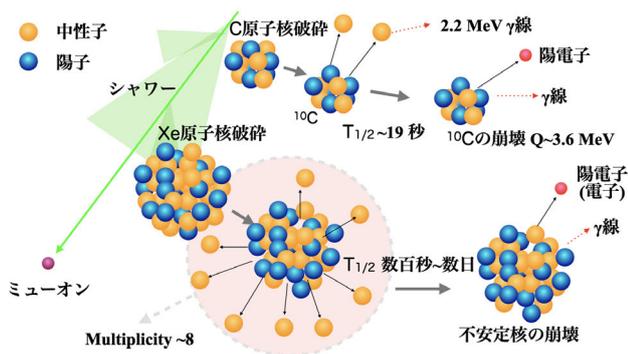


図 7: 原子核破碎背景事象のイメージ図。

の生成時に大量の中性子を放出することがわかった。そこで中性子の数 (Multiplicity) を用いたタグ方法を開発した。また、幸いにも Xe の原子核破碎でできる長寿命崩壊核のほとんどは γ 線を伴う崩壊である。そのためニューラルネットワークを用いた事象識別 (PID) は非常に強力な背景事象除去方法となる。二重 β 崩壊の β 線は LS 中を走ることなくポイントライクになる一方で、 γ 線を伴う崩壊は γ 線が LS 中を走り散乱され、ぼやけた光り方になる。この PMT のヒット時間分布で見てもわずかな違いをニューラルネットワークを用いることで識別が可能になってきている。現在の背景事象との戦いは、 $2\nu\beta\beta$ の染み出しとこの Xe 原子核破碎による長寿命崩壊核とのものになっている。

2.5 アップデート計画

2.5.1 KamLAND-Zen 800 のアップデート

$2\nu\beta\beta$ の染み出しは有限のエネルギー分解能のために、 $2\nu\beta\beta$ の観測エネルギーの一部が $0\nu\beta\beta$ の予想観測エネルギーに重なることが原因である。改善のためには、エネルギー分解能を向上させる必要がある。現在の KamLAND-Zen 800 のエネルギー分解能は光子統計で決まっている。間が悪いことに、KamLAND の PMT は老朽化のために増幅率が低下して解析に使えなくなる本数が日々増えている。

この問題を緩和、または改善するために電子回路で減った分の増幅率を補うための改良を進めている。この試みは比較的上手く行きそうで、エネルギー分解能に与える影響の定量的評価が現在進行形で進んでいる。

Xe の原子核破碎でできる長寿命崩壊核に関しては、中性子の Multiplicity が重要であることは先に述べた。実験的には、中性子の検出効率を限りなく 100% に近づけることが重要となる。宇宙線ミュオン直後の中性子イベントを検出するには、PMT のオーバーシュートとアフターパルスが問題となる。先に述べた MoGURA システムではアナログ的なベースライン安定化回路とア

フターパルスに対応した特殊なトリガーを導入することで、 $84 \pm 1\%$ の検出効率を実現した。しかし、この検出効率はまだ十分でない。どうしてもオンボードの信号処理ではミュオン直後がアフターパルスに埋もれてしまう。そこで、我々は MoGURA システムを全面的にアップデートすることでこの問題に対応する予定である。新しい MoGURA システムではフロントエンド電子回路に Xilinx 社の Radio frequency System-on-Chip (RFSoc) を使う予定である。RFSoc は高速 ADC、高速 DAC、大規模 FPGA やリアルタイム CPU を合わせたものであり、シリアルトランシーバーで高速通信も可能である。そこで、高速トランシーバーを活かしてミュオンイベント直後は $100 \mu\text{s}$ 程度の波形データを後段へ送り、オフラインでの高度な解析で中性子を探すことを計画している。さらに、高速 DAC を活かすことで、デジタルフィルターを使ったベースラインの安定化も考えている。

現在までのところ、試作フロントエンド電子回路が完成している。既存電子回路と比べて RFSoc のおかげで実装密度が大きく下がったことに改めておどろいた。このような新しい MoGURA システムを KamLAND-Zen 800 期間中に導入することを目指して、鋭意準備を進めている。

2.5.2 KamLAND2-Zen

2.5.1 で述べた電子回路での増幅機能実装が上手く行っても、エネルギー分解能は KamLAND 初期までしか戻らない。抜本的に、 $2\nu\beta\beta$ の染み出しを低減するには、さらなる光電子数増加によるエネルギー分解能の向上が必要不可欠である。現在、大発光液体シンチレーター、集光ミラーと高量子効率 20 インチ PMT の組み合わせで光電子数を 5 倍にして、エネルギー分解能を 4.0% から 2.5% (@2.5 MeV) まで向上させる KamLAND2 と KamLAND2 による $0\nu\beta\beta$ 探索である KamLAND2-Zen を計画している。5 年の観測でニュートリノの有効質量に換算して 20 meV までの $0\nu\beta\beta$ 探索が可能となる見込みである。

基本計画にプラスして IB をシンチレーション素材で作ることも考えている。IB 素材に含まれる ^{238}U 系列の ^{214}Bi の崩壊による背景事象を低減できる可能性がある。 ^{214}Bi は Q 値 3.2 MeV で β 崩壊する。このエネルギーは ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ と重なる。 ^{214}Bi の崩壊で作られる ^{214}Po は半減期 $164 \mu\text{s}$ で α 崩壊する。LS 中であれば、遅延同時計測で ^{214}Bi の β 事象をタグできる。しかし、 α 線が IB から LS に飛び出ないと、反応が見えない。この確率が 50% 程度と見積もられている。 α 線の検出効率をあげるために、IB 素材をシンチレーション素材で作るのである。実験室での評価では 99.7% の α 線の検出効率を見込んでいる [4]。

一方で、シンチレーション素材で IB を作ると新しい問題が発生する。現在、シンチレーション素材としてポリエチレンナフタレート (PEN) フィルムを最有力候補と考えている。ただ、PEN フィルムの吸収波長が LS の発光波長と重なってしまう。そのために、LS に波長変換剤を入れることが必要不可欠で、最適な波長変換剤の選別を進めている。また、 α 線が見えるということから IB 中の ^{212}Bi - ^{212}Po のパイルアップ事象が問題となる。この問題に対しては、PEN の発光と LS の発光の定数数が大きくことなることから、波形識別が可能と考えている。こちらも、その実証に向けて現在取り組んでいる。

KamLAND2 で使う新しい技術を実証するために、小型プロトタイプ検出器の開発を進めている。この検出器では光量増大を実現することに加え、低放射能分析や NaI を使った暗黒物質探索のプラットフォームにも利用することを計画している。

2.5.3 さらになる展望

KamLAND2 初期には難しいが、上部の PMT を集光ミラーとマルチアノード PMT で構成する撮像装置に置き換えることも計画している。2.4 の最後で述べた β 線と γ 線の違いを、撮像装置による反応点の広がりを実験的に検出することで、高い精度で β/γ 線識別を目指している。

また、その頃には Hyper-Kamiokande が動き出すことが予想される。そうすれば、Super-Kamiokande が空くと考えられる。KAMIOKANDE の前例にならって、Super-KamLAND-Zen という計画も面白いかもしれない。

3 CANDLES

CANDLES (CAlcium fluoride for the study of Neutrinos and Dark matters by Low-Energy Spectrometer) は、大阪大学を中心としたグループが推進している ^{48}Ca をターゲットに用いた二重 β 崩壊実験である。KamLAND-Zen が ^{136}Xe を溶かした LS を用いているのに対して、CANDLES はフッ化カルシウム (CaF_2) という無機シンチレータ結晶を用いて、そこに含まれる ^{48}Ca の二重 β 崩壊を測定する。現在、神岡地下に CANDLES-III という検出器を構築して実験を行っている (I と II は地上での R&D 用の小型実験)。

3.1 ^{48}Ca の二重 β 崩壊

^{48}Ca の Q 値は 4268 keV で、全二重 β 崩壊原子核の中で最大である。自然界に存在する U や Th の崩壊系列には、単独でこれ以上のエネルギーを持つ γ 線や β 線

は存在しない。そのため、Q 値の高さは低バックグラウンド実験を行う際に重要なカギとなりうる。我々はこの最大の Q 値という利点を生かし、バックグラウンドフリー測定の実現を目指している。

一方で ^{48}Ca 同位体の自然存在比は 0.187% と極めて小さい上に、現在のところ有効な同位体濃縮の技術が存在しないという問題もある。そのため、 ^{48}Ca を用いた研究を本格的に進めているのは、世界的に見ても CANDLES だけである。しかし、これは見方を変えれば、同位体濃縮さえ確立すれば同じサイズの装置で一気に 500 倍もの大ボリュームが可能ということである。

$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ への実験感度を 10 倍にしようとする、バックグラウンドが存在している場合、1 万倍のボリュームが必要となる。バックグラウンドフリーの状態であれば、これが 100 倍で済む。我々の戦略としては、ひとまず大型検出器でのバックグラウンドフリーを実現し、そこに並行して同位体濃縮の方法を開発してボリュームを 500 倍にすることで、一気に他の先行実験をまくってやろうという考えである。さらに CaF_2 結晶を極低温にして熱と光を同時検出する新技術を確立することで、高いエネルギー分解能と高い粒子識別能の両立を実現し、順階層領域に切り込んでいくことを目指している。

3.2 CANDLES-III 検出器

岐阜県の神岡地下実験施設内の実験室 D、KamLAND 実験エリアのすぐ近くに CANDLES-III 検出器がある (図 8 左)。一辺が 10 cm 角の無添加 CaF_2 結晶を 96 個用いており、その総重量は 305 kg である。一般的に CaF_2 をシンチレータとして用いる場合、Eu という物質を添加して発光量を高める。我々が無添加の CaF_2 を用いている理由は、カメラのレンズとして用いられるほど透明度が高く、検出器の大型化に適しているからである。無添加 CaF_2 結晶は発光波長が 280 nm と短いため、結晶の周りには厚さ 5 mm の波長変換層を設けて、PMT の感度波長である 420 nm に変換している。図 8 右の写真は、結晶に紫外光を照射したときのものであるが、波長変換層によって紫色の光に変換されているのが分かる (モノクロ印刷版をお読みの方は、WEB 上の PDF も御覧いただくと幸いです)。また、結晶内部の放射性不純物は実験の主要なバックグラウンド源になるため、Th 系列で数〜数 10 $\mu\text{Bq}/\text{kg}$ の高純度な結晶を用いている。

96 個の結晶は直径 1.4 m × 高さ 1.4 m のアクリルタンクに吊り下げられ、そのタンク内には LS を充填する。アクリルタンクは直径 3 m × 高さ 4 m のステンレス製水タンク内に設置され、 CaF_2 と LS のシンチレーション光は水タンク内面に取り付けられた 10 インチ、13 インチ、

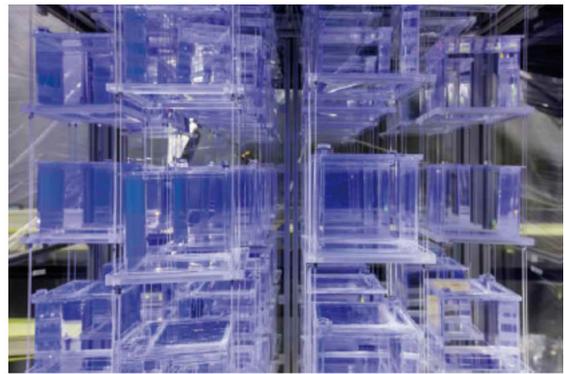
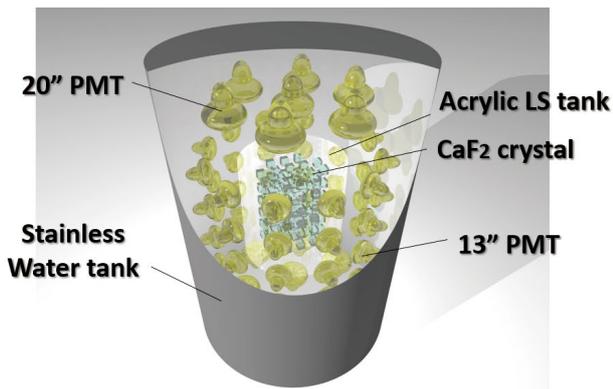


図 8: 左が検出器の概念図。右はブラックライトを照射した CaF_2 結晶の写真。

20 インチの PMT 計 62 本で観測する。PMT の前面には集光用ライトパイプが取り付けられており、CANDLES 実験の観測光電子数は電子エネルギー換算で 1000 光電子/MeV となっている。これは KamLAND-Zen と比べると 2 倍以上である。

ここで、 CaF_2 のシンチレーション光は発光時定数が $1 \mu\text{s}$ 程度なのに対し、LS の発光時定数は 10 ns 程度である。二重 β 崩壊で出る β 線は結晶内部で発生し、その飛程も短いため CaF_2 のみを発光させる。一方で外からくる γ 線等のバックグラウンドは、LS の層を通る際に一部のエネルギーをコンプトン散乱で落とす。この場合、LS のするどい発光が波形の先頭に現れるため、波形解析を行うことで γ 線起源のバックグラウンドを大きく低減することが出来る (図 9)。

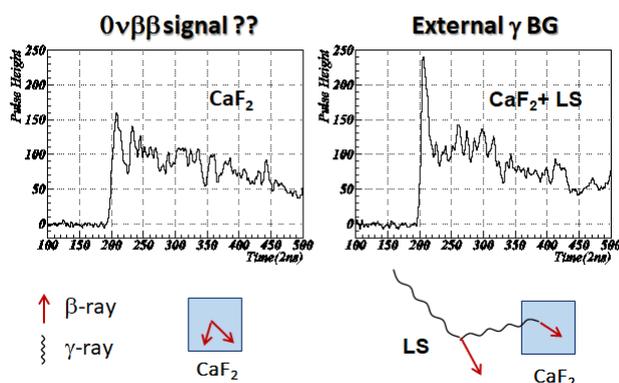


図 9: 左は CaF_2 結晶内部と思われる事象の例で、右は外から来た γ 線が一部のエネルギーを LS で落とすと考えられる事象の例。上は、FADC で得られたそれぞれの信号波形、下は事象の概念図である。

CaF_2 結晶の発光量は温度に依存することが分かっており、我々の測定結果によると温度が 1°C 下がると発光量は約 2% 増える。そのため、実験室内は冷凍機によって冷風を送って室温をおよそ 2°C に保っており、検出器の中心部はおよそ 4°C で、その変動は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内に抑えている。

3.2.1 謎のバックグラウンド源を解明せよ

CANDLES-III は検出器や DAQ のアップグレードを経て、2013 年からバックグラウンドスタディのためのデータを取得していた。数か月におよぶデータには、残念ながら波形解析でバックグラウンドをのぞいた後でも、Q 値付近、そして Q 値以上の領域にバックグラウンドが存在していることが分かった。それ以前からも高いエネルギーの領域に何かあることは気づいていたが、ちゃんとスタディできるほどのデータはなく、きっと統計のいたずらだろうと深く考えずにいた。統計を増やしたデータを“こころの目”で見ていると、なんとなく 7.5 MeV 付近にピークのような構造が見えてきた。 ^{56}Fe の原子核が中性子を吸うと、 (n, γ) 反応で 7.6 MeV の γ 線が出るということが知られている。我々は、高エネルギー側のバックグラウンドの正体が、検出器を作るステンレスや実験室周囲の岩盤等の物質が環境中性子を吸った際にでる γ 線ではないかと当たりをつけた。そして、実際に実験室 D に ^{252}Cf の中性子線源を持ち込んで、その真偽を確かめることにした。

実験室 D は東京大学宇宙線研究所の管理下にあり、安全管理は厳格に行われている。しかも隣の実験室 C には暗黒物質探索の XMASS 実験が鎮座しており、実際に中性子線源を持ち込むのには、いくつかのハードルを越える必要があった。暗黒物質探索では我々と異なる数 keV の低エネルギー領域を探索する必要がある。しかも極低バックグラウンドが実験の生命線となるため、中性子なんぞ使われて XMASS の検出器に放射性同位体が作られてバックグラウンドになったらどうするんだ、ということである。筆者は XMASS のミーティングに足しげく通って、実験手順や XMASS 実験への影響の見積もりなどを説明した。実験を行う前後数日の間には、実際に数十通におよぶメールのやり取りを安全管理の担当者たちと行った。そして苦勞の甲斐あって、実験室 D での中性子線源使用が認められた。

いざ中性子線源を検出器のそばに置いてデータを取っ



図 10: シールド工事の様子。

てみると、高エネルギー側のバックグラウンドレートが一気に増加した！ しかもスペクトルの構造も予想通りで、我々の仮説が正しいことが証明された [5]。長年不明であったバックグラウンドの正体が、ついに明らかになったのだ。

3.2.2 シールド構築の苦労話

バックグラウンドの素性が分かったので、次はそれを遮蔽する必要が出てきたのだが、ここでまた壁にぶつかった。仮に鉛を検出器の周りに積んだとして、それで岩盤からくる γ 線は防げるが、鉛内側のステンレス水タンクが中性子を吸って出す γ 線は防げないのではないかな？ そもそも鉛を置く十分なスペースがあるのかな？ 水やLS、窒素等の配管をどう避けるのかな？ 中性子を吸収するような物質を使うと人体への毒性や、ステンレスの腐食は大丈夫かな？ 我々はそんな喧々囂々の議論と緻密なシミュレーションを重ね、タンクの周りに7~12 cmの厚みの鉛を設置し、さらに中性子断面積が大きいホウ素を含む5 mm厚のシートをタンク内外に配置することで、 γ 線と中性子の両方を防ぐことに決定した。

作るとなれば人手がいる。3 m × 4 mのタンクの周りを、総重量60トン以上の鉛(!)で覆うのである。毎日のように4トントラックで鉛が運ばれてきた。タンク側面には多くの配管があるため、現場合わせて鉛を削りながら積んでいった。水タンクの底面には鉛をぎっしり敷き詰め、防水かつ中性子遮蔽のために、上からホウ素入りの液状シリコンゴムを流し込み硬化させた。あまりに腰を曲げての作業が多く、筆者は人生初のぎっくり腰になってしまった。鉛が終われば、シリコンゴムシートを鉛の外側とタンクの内側に接着する作業だ。ナイロンシートで覆って防水し、接着がはがれないように慎重に、配管部分などは形状を加工しながら作業を行った。これら一連の作業の多くを、共同研究者たちで行っ

た(図10)。多くの関係者のご協力に心より感謝したい。

2015年3月にシールドの構築作業を始めてから、完成検査を終えるまでには、約一年の歳月が流れていた。ようやく完成したシールドの効果を確認するため、筆者は再び中性子線源を実験室Dに持ち込んだ。もちろん、その際にも多くの苦労があったことは言うまでもない。中性子線源を照射したときの、シールド前後でのエネルギースペクトルを図11に示す。横軸はCANDLESで観測されたエネルギーであり、青がシールド前、赤がシールド後である。シールド前に見える7600 keV当たりのピークが、 ^{56}Fe の(n, γ)事象で、9000 keV付近の構造は、 ^{58}Ni の(n, γ)事象である。シールド後には、それが大幅に減少しているのが分かる。7600 keV付近のピークの事象数から、およそ1/70に低減されたと見積もられた。これはモンテカルロシミュレーションによる我々の予想とほぼ一致した。

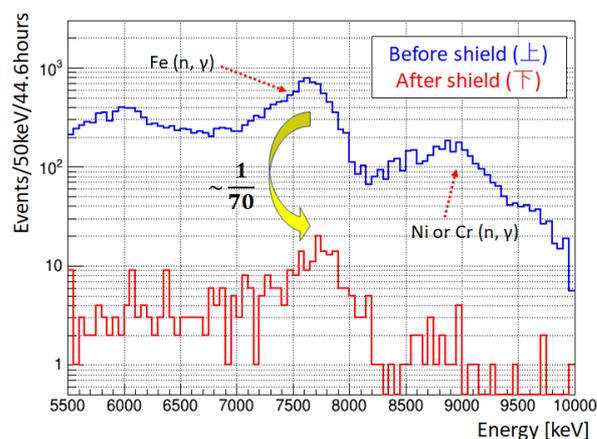


図 11: 中性子線源を照射したときのシールド前後のエネルギー分布。縦軸は時間でノーマライズされている。

若干話は逸れるが、この(n, γ)事象は、Q値に入り込んでくるバックグラウンドとして非常にやっかいであったが、その一方で現在ではエネルギー較正のためのツールとして活躍している。 ^{48}Ca のQ値は4268 keVと高いため、通常入手可能な γ 線源ではエネルギー較正が困難である。そこで我々は、 ^{28}Si の(n, γ)事象で放出される3539 keVと4934 keVの二本の γ 線を用いて、Q値のエネルギー較正を行うシステムを開発した。興味のある方は、ぜひ論文 [6] をご一読いただきたい。

3.3 測定の現状

多くの人々の努力によって、ついに不明であったバックグラウンドを解明し、その対策も行った。そして2016年、いよいよ二重 β 崩壊実験のためのデータ取得を開始した。2016年末までの試運転で得られた131日程度のデータに対し、波形解析などのカット前後のスペクト

ルを図 12 に示す。シールド後の主要なバックグラウンド源は、結晶内部の放射性不純物（Th 系列の ^{208}Tl の $\beta + \gamma$ 崩壊）である。結晶の不純物濃度には個性があるため、解析によってきれいな結晶だけを選べばこのバックグラウンドは大きく低減可能である。上がほぼ全ての結晶（発光量が少なかったり、不純物が多くて使えなかった 3 個を除き 93 個）に対して、下が Th 系列の不純物量が $10 \mu\text{Bq/kg}$ 以下の高純度結晶 21 個を選んだ場合である。実際にきれいな結晶だけを選んだ場合では、4268 keV 付近の Q 値領域の観測バックグラウンド数でゼロを達成した [7]。大型の実験でバックグラウンドフリーを実現できたことは、将来の高感度実験につながる大きな成果である。

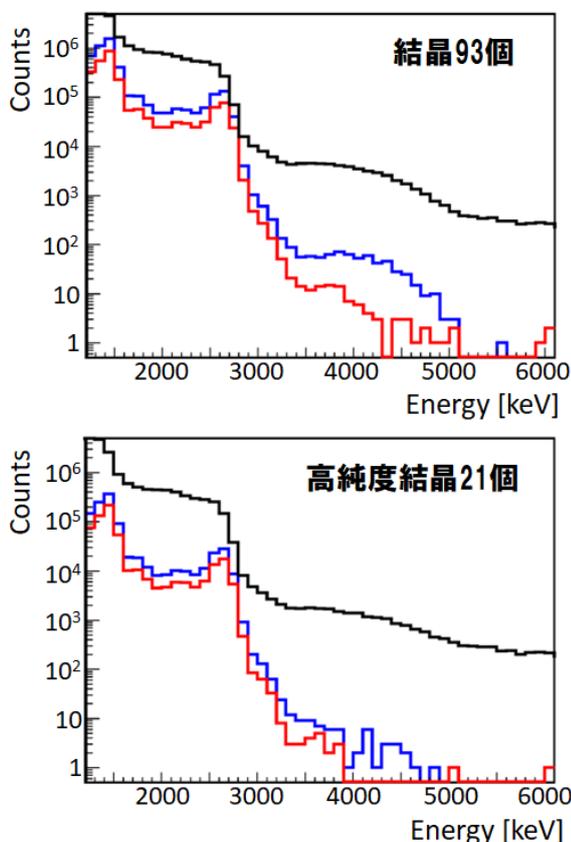


図 12: CANDLE-III の 131 日分の測定データから得られたエネルギー分布。上の図は 93 個の結晶を用いた場合、下の図は $10 \mu\text{Bq/kg}$ 以下の高純度結晶を選んだ場合である。また、図中のヒストグラムは上から、カットなし（黒）、LS 発光事象の除去後（青）、Th 系列の ^{208}Tl に関するカットをかけた後（赤）である。

その後、二重 β 崩壊探索のために 2 年以上の長期データ取得を行い、そのデータの解析を鋭意進めている。さらに、不純物の多い結晶たちをきれいなものに交換する作業なども行われた。これらの結果は、そう遠くない将来にご報告出来るものと思っている。

3.4 次世代計画に向けた R&D

我々は、CANDLES-III 検出器を用いた二重 β 崩壊研究と並行して、将来に向けた超高感度化のための R&D を行っている。

^{48}Ca の自然同位体存在比は、わずか 0.187% しかないため、高感度化のためには同位体濃縮が不可欠である。今のところ、全ての結晶に含まれる ^{48}Ca を足し合わせても、わずか 350 g にしかない。KamLAND-Zen 800 が 745 kg の Xe を用いていることを考えると、桁違いに少ないわけで、まさに“濃縮なくして CANDLES なし”と言っても過言ではあるまい。濃縮を難しくしている原因は、常温で気体の化合物が存在していないことである。そのため、U や Xe のように遠心分離法を用いることが出来ない。我々は独自にクラウンエーテル樹脂を使用した化学的手法とレーザーを用いた光学的手法、さらにはイオンの移動度の差を用いた電気泳動法、等を用いた濃縮法の R&D を進めている。電気泳動法では 6 倍の濃縮度を達成しており [8]、さらに濃縮度を高めるための改良や大量生産のための大型化を行っている。

さらに、高エネルギー分解能を実現するため、 CaF_2 結晶を 10 mK 程度の極低温に冷却し、放射線によって生じる熱と光を同時検出する技術を開発している。この技術が完成すると、Q 値で現在より一桁ほど良い 0.5% (FWHM) という高いエネルギー分解能が可能となる。また、熱量と光量の割合が放射線の種類によって異なるため、高い粒子識別能も同時に得られる。この技術はシンチレーティングボロメータと呼ばれ、海外でも盛んに研究が行われている。我々は、冷凍機や信号読み出しに高い技術を持つ韓国 IBS と共同で研究を進めている。 CaF_2 結晶内での位置依存性を除けばエネルギー分解能はほぼ期待通り得られており、電子と α 線の粒子識別が可能であることも示された [9]。

筆者は濃縮とボロメータという二つの高感度化のための技術を確立し、いつの日か、数十トンスケールの超大型、超高分解能な検出器を用いて順階層領域で $0\nu\beta\beta$ を発見することを夢見ている。

4 おわりに

本稿は、世界をリードする神岡における二重 β 崩壊研究をまとめたものである。様々なトラブルに見舞われた KamLAND-Zen 800 であるが、多くの共同研究者や技術者たちの活躍のおかげで、現在安定してデータ収集を行なっている。近々新しい結果を発表予定となっているので期待してお待ちいただきたい。また、KamLAND2-Zen や CANDLES での高感度 $0\nu\beta\beta$ 探索の準備へ向けた R&D が急速に進んでいる。果たしてニュートリノは

この宇宙に物質を生み出した“神の粒子”なのか？ その答えは、近いうちに $0\nu\beta\beta$ の発見によって明らかになるのかもしれない。

最後に、本稿は KamLAND-Zen と CANDLES の研究の一部を、KamLAND-Zen 共同研究者内の尾崎と石徹白、CANDLES 共同研究者内の飯田がまとめ執筆した。共同研究者の皆様には改めて感謝申し上げたい。

参考文献

- [1] M. J. Dolinski, A. W. Poon, and W. Rodejohann, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **69**, 219 (2019).
- [2] A. Gando, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 062502 (2013).
- [3] A. Gando, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 082503 (2016).
- [4] S. Obara, Y. Gando, K. Ishidoshiro, *PTEP* 2019 (7), 073H01.
- [5] K. Nakajima, T. Iida *et al.*, *Astropart. Phys.* **100**, pages 54-60 (2018).
- [6] T. Iida *et al.*, *Nucl. Inst. and Math. A* **986**, 164727 (2020).
- [7] S. Ajimura *et al.*, arXiv:2008.09288 (2020).
- [8] T. Kishimoto *et al.*, *PTEP* 2015 (3), 033D03.
- [9] K. Tetsuno *et al.*, *J. Phys. Conf. Ser.* **1468**, 012132 (2019).