	研究代表者	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授 清水 格（しみず いたる） 研究者番号:10400227
	研究課題 情報	課題番号：22H04934 キーワード：ニュートリノ、素粒子実験、実験核物理 研究期間：2022年度～2026年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

宇宙誕生直後、超高温・超高密度の状態から同じ量だけ生成された物質（粒子）と反物質（反粒子）は宇宙進化の過程で対になって消滅すると考えられるが、現在の宇宙には物質だけが残されている。この「宇宙物質優勢の謎」は素粒子・宇宙の大問題の1つであり、素粒子の一種であるニュートリノの性質の理解が解決の鍵となると期待されている。ニュートリノは中性の素粒子であり、粒子と反粒子の区別のないマヨラナ粒子である可能性があるが、未だに実験的に実証されていない。このマヨラナニュートリノが理論物理学であるエttore・マヨラナによって提案されたのは80年以上も前のことだが、近年のニュートリノ振動の観測によってニュートリノ質量が発見されたため、その質量の起源に関わるマヨラナニュートリノの実証は決定的に重要な意味を持つことになった。ニュートリノのマヨラナ性を証明する唯一現実的な方法はニュートリノの放出を伴わない二重ベータ崩壊の検出であると考えられており、さらに崩壊率が測定できれば3種類のニュートリノ質量に関わるニュートリノ有効質量も決定される。このため、二重ベータ崩壊の実験的研究の進展が重要視され、世界中で次世代大型実験が計画され激しい競争状態にある。検出器の極低放射線環境と拡張性において非常に優れた性能を発揮し、世界の実験をリードするKamLAND-Zen実験では、745 kgの同位体濃縮キセノン（Xe）を液体シンチレータに溶かし込み、マヨラナニュートリノ質量の高感度検証（図1）を行う。

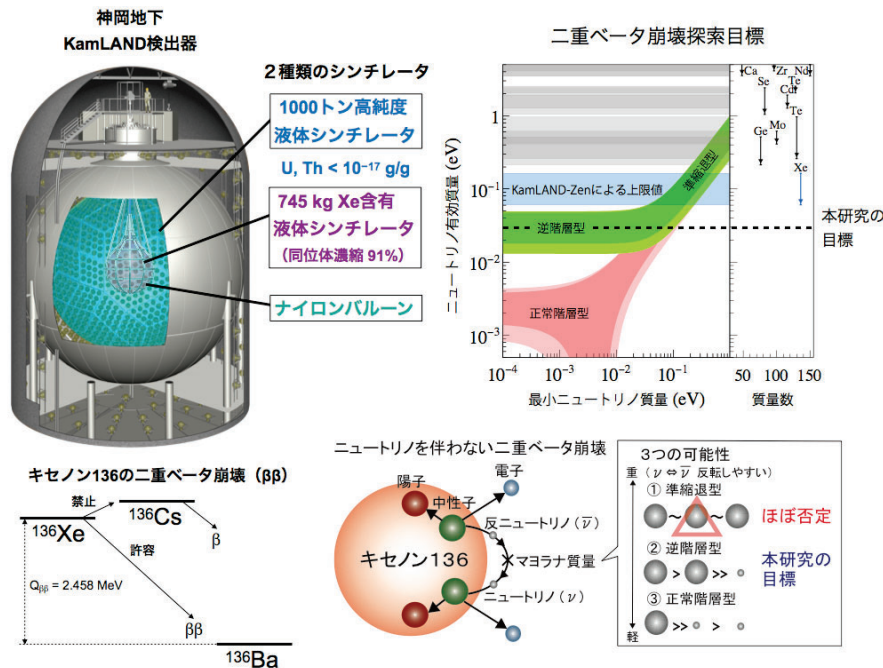


図1 マヨラナニュートリノ質量検証のイメージ図

●KamLAND-Zen実験

KamLANDでは約1,000トンの液体シンチレータを用いた極低バックグラウンドのニュートリノ実験を実現しているため、液体シンチレータに二重ベータ崩壊核であるキセノン136を添加することで、世界最高感度でのニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索が達成できた。高純度の大容量液体シンチレータが放射線に対するシールドの役割を果たすため、他の検出器に比べると環境放射線のレベルが桁違いに小さく、またナイロンバルーンの入替えによる検出器の拡張が容易であることが利点である。2011年に行った最初の探索（KamLAND-Zen 400）ではナイロンバルーンの製作過程で混入した微量の放射性不純物が主要なバックグラウンド源となったが、キセノンと液体シンチレータの純化による削減に成功している。2019年からはキセノン136の量を倍増させ、さらにナイロンバルーンをクリーン化した改良実験（KamLAND-Zen 800）を開始した（図2）。

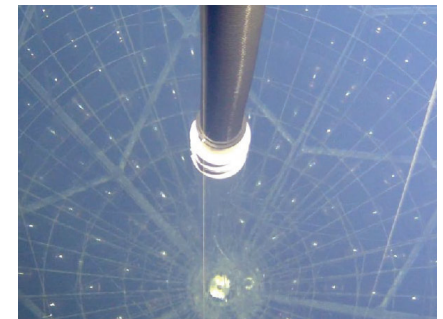


図2 KamLAND-Zen検出器内部の写真

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

KamLAND-Zenでは世界最高の低放射線環境を実現したが、現行の検出器の性能ではニュートリノの放出を伴わない二重ベータ崩壊の探索感度は最大のバックグラウンド源となる宇宙線ミューオン起源の長寿命核（図3：左）と通常の二重ベータ崩壊によって制限されてしまう。原子核反応モデルを用いた詳細なシミュレーションによる核破砕生成の予測（図3：右）では、バックグラウンドに関わる全ての長寿命核の崩壊においてガンマ線放出を伴い、短寿命核に比べ中性子生成数が大きくなること示唆されている。そこで、シンチレーション光撮像装置を利用した粒子識別能力向上と長寿命核と強く関連する多重中性子のタギングによる除去効率改善を行い、長寿命核のバックグラウンド量を大幅に削減する。本研究で行う改良が実現すれば、マヨラナニュートリノ質量に対する感度で約30 MeV程度までの探索を行うことによって、逆階層型の本格的な検証が可能になる。また、KamLANDにおいて将来計画している検出器の高性能化（大質量液体シンチレータ、集光ミラー、高効率光電子増倍管によるエネルギー分解能改善）が実現すれば、通常の二重ベータ崩壊のバックグラウンド量も大幅に削減できるため、約20 MeV程度までの探索により逆階層型全体をカバーすることができる。この探索が実現すれば、ニュートリノの質量階層構造は決定され、信号を検出し質量値が得られた場合はニュートリノのマヨラナ性を証明したことになり、素粒子・宇宙の研究全般に高い波及効果をもたらすと期待される。

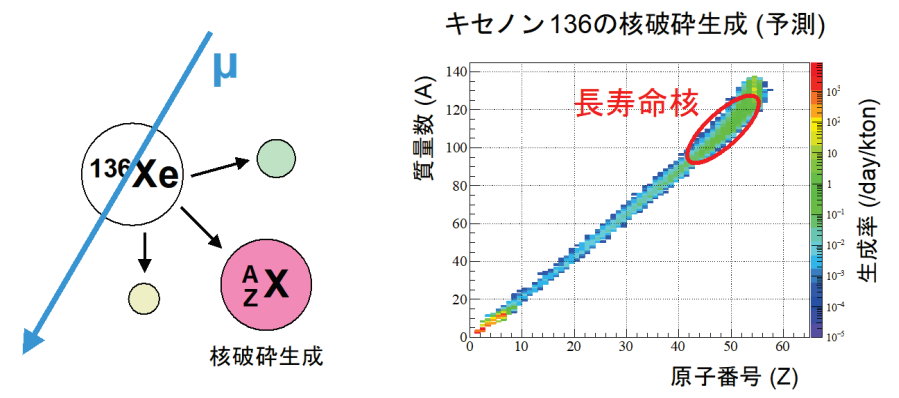


図3 キセノン136の核破砕生成