

## 同位体濃縮技術の開発と実用化と放射線検出器への応用

Anawat Ritterong、吉田齊、梅原さおり、南雄人、松岡健次、時田茂樹、小川泉  
分野横断プロジェクト研究部門

### 同位体濃縮技術の開発と実用化と放射線検出器への応用プロジェクト

本研究課題では、CANDLES 計画によるニュートリノレス二重ベータ崩壊の研究に向けて、レーザー同位体分離 (LIS) による  $^{48}\text{Ca}$  同位体の濃縮システムの開発を進めている。物質優勢宇宙やレプトン数非保存といった宇宙の謎を検証する最も有力な手法の一つが、ニュートリノレス二重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) である。CANDLES (CALium fluoride for studies of Neutrino and Dark matters by Low Energy Spectrometer) 計画は、二重ベータ崩壊核種の中で最も高い Q 値 (4.3 MeV) を持つ  $^{48}\text{Ca}$  を用いて、この極めて稀な事象の探索を目的としている。CANDLES III 検出器を利用したの研究では、液体シンチレータに囲まれた高純度  $\text{nat. CaF}_2$  結晶 96 個 ( $^{48}\text{Ca}$  を 0.35 kg 含有) およびモンテカルロ (MC) シミュレーションを用いた解析により、選択された 21 個の高純度結晶から得られた  $0\nu\beta\beta$  半減期の下限は  $5.6 \times 10^{22}$  年 (90% C.L.) であることが示された [1]。

天然カルシウム中の  $^{48}\text{Ca}$  存在比はわずか 0.187% であるため、検出器感度向上には濃縮が不可欠である。全体の同位体濃縮率が 50% 以上になると、4.3 MeV 領域における SN 比は 1 を超えると期待される。しかし、カルシウムは気体化合物を持たないため、ガス拡散法や遠心分離法といった工業的規模の同位体分離法は適用できない。現在利用可能な方法は電磁分離法のみであり、年間生産量が少なく、材料コストも高い (~100 万ドル/g)。その他の方法として、クラウンエーテルを用いた化学交換法 [2, 3]、イオン交換クロマトグラフィー [4, 5]、電気泳動 [6]、レーザー同位体分離 (LIS) [7, 8] などが提案されている。

本研究ではレーザー同位体分離の開発に焦点を当てる。松岡・小川ら [7, 8] は原理実証実験により、カルシウム原子ビームに対して垂直に偏向レーザーを照射したとき、対象同位体は 422.792 nm のカルシウム吸収波長において安定な連続波発振 (rms 2 MHz 未満) を持つ光子の運動量を吸収することで、元の原子ビームから偏向されることを示した。その結果、偏向角 12.5 mrad において、 $^{48}\text{Ca}$  の分離率およびカルシウム回収率はそれぞれ最大 5.5% および 19.6% に達した。

量産化に必要な要素として、原子ビーム生成装置、照射ユニット、回収システム、監視・制御システムの開発が挙げられる。原子ビーム生成装置は福井大学により開発が進められている。単管コリメータの長さが原子ビーム形状に与える影響は文献 [8] で報告されている。さらに、空間分布の抑制とビーム強度維持のため、キャピラリーチューブ型コリメータの開発も進められている。一方、回収システムでは、最適な回収板材料の選定を目的として、小型チャンバー内でカルシウム原子ビームを照射する実験が行われている。カルシウム膜の厚さは光学測定および触針法により評価された。

将来の展開として、6つの照射ポートを備えた新しい照射チャンバーを導入し、6ポートのフル運転により年間最大 2 mol の  $^{48}\text{Ca}$  の生産を目指している(図1)。第一段階として、2 W レーザー出力で単一ポートの安定運転を実現する。原子ビーム強度および同位体分離度は飛行時間(TOF)システムにより測定される。回収システムはコンベアベルトと中央配置の回収板により自動化され、24時間連続運転が可能な設計となっている。

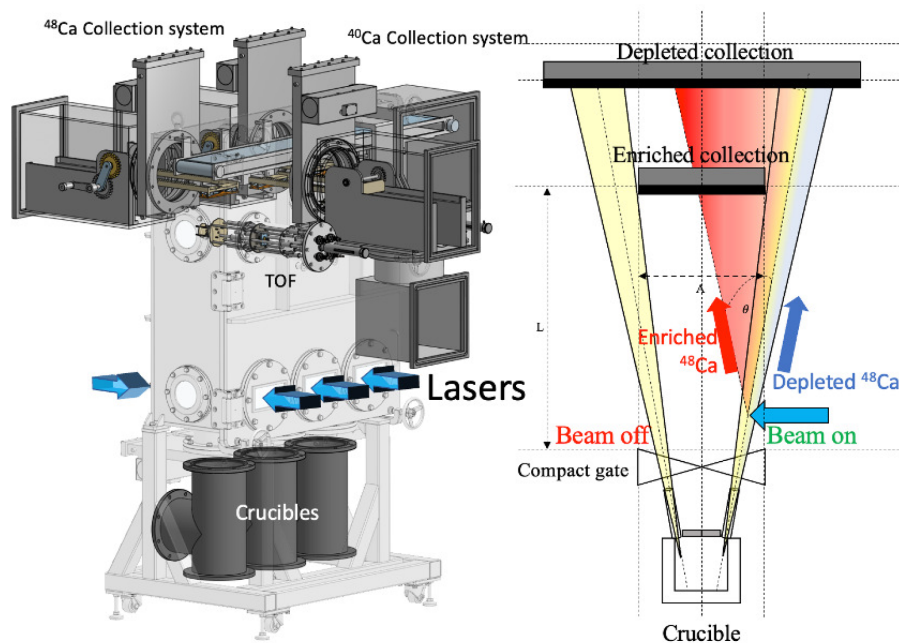


図 1 :  $^{48}\text{Ca}$  のレーザー同位体分離量産システムの模式図。るつぼ、Depleted 原子および濃縮原子の回収系、レーザーフラッジ、TOF 同位体比分析装置を含む。

参考文献 :

- [1] S. Ajimura 他, “Low background measurement in CANDLES-III for studying the neutrinoless double beta decay of  $^{48}\text{Ca}$ ,” *Physical Review D*, 103, 092008 (2021).
- [2] A. Rittirong 他, *Journal of Physics: Conference Series*, 2147, 012015 (2022).
- [3] B. Jepson and R. DeWitt, *J. Inorganic and Nuclear Chemistry*, 38, 1175–1177 (1976).
- [4] S. Umehara 他, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* (2015).
- [5] S. Nemoto 他, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 49, 425–437 (2012).
- [6] T. Kishimoto 他, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* (2015).
- [7] K. Matsuoka 他, *Journal of Physics: Conference Series*, 1468, 012199 (2020).
- [8] I. Ogawa 他, *Journal of Physics: Conference Series*, 2147, 012012 (2022).
- [9] R. W. Drever 他, *Applied Physics B*, 31, 97–105 (1983).

## 研究業績リスト

### I 査読論文

“ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊”で宇宙の謎を探る

梅原さおり、吉田 齊

日本物理学会誌第 77 巻 8 号 (2022) 514-522

[DOI: 10.1039/C4EM00339J](https://doi.org/10.1039/C4EM00339J)

Status of the search for  $^{48}\text{Ca}$  double beta decay with CANDLES

Yuto Minami, T. Kishimoto, S. Umehara, A. Rittirong, S. Yoshida 他

Proceedings of 41st International Conference on High Energy Physics (ICHEP2022),  
PoS414 (2022) 1142-1

DOI: 10.22323/1.414.1142

### II 国際会議等における発表

Laser isotope separation to study for the neutrino-less double beta decay of  $^{48}\text{Ca}$

I. Ogawa, Yuto Minami, T. Kishimoto, S. Umehara, A. Rittirong, S. Yoshida et. al.,

28th International Nuclear Physics Conference (INPC2022)

2022/9/11-9/16

Cape town, South Africa

Status of the search for  $^{48}\text{Ca}$  double beta decay with CANDLES

Yuto Minami, T. Kishimoto, S. Umehara, A. Rittirong, S. Yoshida et. al.,

International Conference on High Energy Physics (ICHEP2022)

2022/6/6--2022/6/13

Bologna, Italy

Laser isotope separation of calcium

Shigeki Tokita, S. Umehara, A. Rittirong, S. Yoshida et. al.,

Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground  
Physics (UGAP2022)

2022/6/13--2022/6/15

Tsukuba, Japan

### Ⅲ 国内会議等における発表

二重ベータ崩壊と同位体濃縮

小川泉、他

第2回研究用原子炉を用いた原子核素粒子物理学

2022年12月14-日15日

福井大学敦賀キャンパス

The status of laser isotope separation (LIS) of  $^{48}\text{Ca}$  for the study of neutrino-less double beta decay (poster)

Anawat Rittirong

第20回 同位体科学研究会

2023/3/10

東京工業大学大岡山キャンパス

### Ⅳ 著書

該当なし

### Ⅴ 受賞と知的財産

該当なし

### Ⅵ その他研究業績、発表文献

該当なし