

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 Rittirong、吉田齊、時田茂樹、小川泉、梅原さおり、松岡健次

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

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) は、レプトン数非保存やニュートリノのマヨラナ性を検証する極めて重要な物理過程である。特に ^{48}Ca は、二重ベータ崩壊核種の中で最大の Q 値 (4.23 MeV) を有し、自然放射線バックグラウンドを大きく上回るエネルギー領域で測定可能であるため、極めて有望な候補核種である。しかし、 ^{48}Ca の天然存在比は 0.187% と極めて低く、大規模実験のためには同位体濃縮が不可欠である。本研究では、レーザー同位体分離 (Laser Isotope Separation: LIS) を用いた ^{48}Ca の大規模生成システムの開発を目的とし、原子ビーム、レーザー、回収系、大規模装置の 4 つの要素技術の高度化を進めている。

カルシウム原子は波長 422.792 nm の光を吸収し、同位体ごとに数百 MHz 程度の同位体シフトを有する。この周波数差を利用して特定同位体のみを選択的に励起することが可能である。励起された原子は光子の運動量を受け取り、元の原子ビームから横方向に偏向される。この現象を利用したものが偏向法 (deflection method) であり、大量処理に適した同位体分離手法である。

高出力単一周波数レーザーシステムの開発：図 1 にインジェクションロッキング方式によるレーザーシステムの構成を示す。本システムでは、外部共振器レーザー (EC-LD) をマスター光源とし、その光を分岐して複数のファブリ・ペロー型レーザーダイオード (FP-LD) に注入する構成を採用している。この方式により、単一周波数の維持と出力の増大が同時に実現される。実験では 24 台の FP-LD を使い、合計約 2 W の出力を達成している。図 2 に、マスターおよびスレーブレーザーの波長安定性を示す。Pound-Drever-Hall (PDH) 法を用いたフィードバック制御により、スレーブレーザーの周波数はマスターに対してロックされる。その結果、周波数変動は 1 MHz 以下に抑制されており、カルシウム原子ビームのドップラー幅 (約 60 MHz) に比べて十分に小さい。この性能は、同位体選択励起に必要な分解能を満たしており、LIS に適した光源であることを示している。

図 3 に、レーザー照射の有無におけるカルシウム同位体の空間分布を示す。TOF 検出器を z 方向に走査することで、原子ビームの空間分布が測定されている。レーザー照射時には同位体ごとに異なる偏向が観測され、特に軽い同位体ほど大きな変位を示す。これは同位体シフトに基づく選択励起および光圧による偏向の結果である。これは ^{48}Ca 分離の原理実証として重要な成果である。今後は、単一ポートでの安定運転の確立を経て、多ポート化および高出力化によりトン規模生産への展開を目指す。

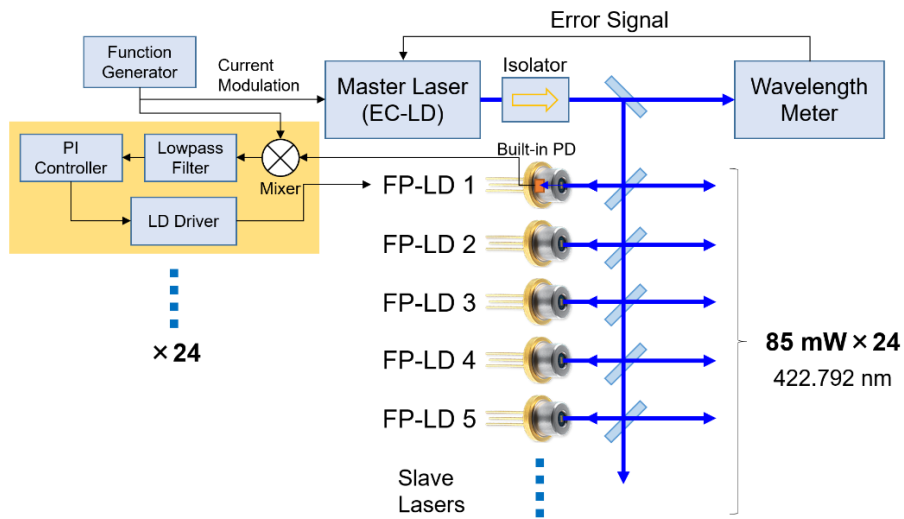


図 1 : インジェクションロック方式による 24 台のファブリ・ペロー型レーザーダイオード (FP-LD) からなる高出力レーザーシステムの構成図

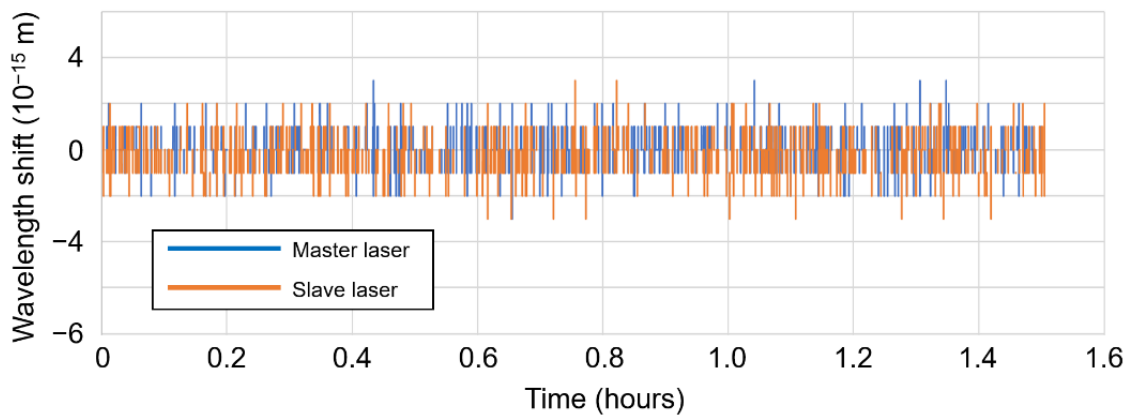


図 2 : マスターレーザーおよびスレーブレーザーの波長 (周波数) の時間変動

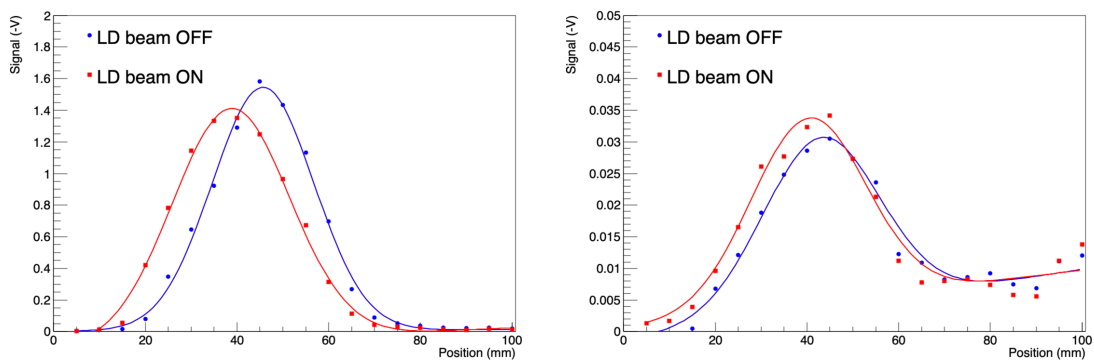


図 3 : レーザー照射の有無におけるカルシウム同位体 (^{40}Ca および ^{44}Ca) の空間分布

研究業績リスト

I 査読論文

The status of ^{48}Ca production by laser isotope separation for the study of neutrino-less double beta decay

A. Rittirong, S. Umehara, K. Matsuoka, Y. Minami, S. Yoshida, I. Ogawa, T. Hiraiwa, J. Nakajima, R. Yuhaku, M. Tozawa, S. Tokita, H. Niki, H. Okuda, M. Uemukai and N. Miyanaga
Proceedings of Science444 (2023), 1174.

DOI: 10.22323/1.444.1174

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

I. Ogawa, T. Hiraiwa, J. Nakajima, R. Yuhaku, M. Tozawa, H. Niki, S. Tokita, N. Miyanaga, M. Uemukai, A. Rittirong, S. Umehara, K. Matsuoka and S. Yoshida
Journal of Physics.: Conference Series 2586 (2023) 012136

DOI: 10.1088/1742-6596/2586/1/012136

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

Y. Minami *et al.*

Proceedings of Science 414 (2023) 1142

DOI:10.22323/1.414.1142

II 国際会議等における発表

Development of Laser Isotope Separation (LIS) System for ^{48}Ca Toward the Study of Neutrinoless Double Beta Decay of CANDLES (Poster)

Anawat Rittirong

International Symposium on Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics (UGAP2024)

2024/3/4-3/6

Tohoku University, Sendai

Low Temperature Detector Development for Underground Researches

Sei Yoshida

International Symposium on Unraveling the History of the Universe and Matter

Evolution with Underground Physics (UGAP2024)

2024/3/4-3/6

Tohoku University, Sendai

Development of Laser Isotope Separation (LIS) for ^{48}Ca toward the Study of Neutrinoless Double Beta Decay by CANDLES (Poster)

Anawat Rittirong

Double beta decay and underground science (DBD23)

2023/12/01-12/03

Wikoloa, Hawaii, United States

Current status and future prospects of the CANDLES experiment

S. Umehara

6th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (Hawaii2023)

2023/11/26-12/01

Wikoloa, Hawaii, United States

Development of Laser Isotope Separation (LIS) for ^{48}Ca toward the Study of Neutrinoless Double Beta Decay by CANDLES

Anawat Rittirong

6th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (Hawaii2023)

2023/11/26-12/01

Wikoloa, Hawaii, United States

Ⅲ 国内会議等における発表

該当なし

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