

**多チャンネルシンチレーション検出器を用いた
GeV イオンの質量分解分光法の開発**
Development of mass-resolved GeV-ion spectroscopy
with multi-channel scintillation detectors

安部 勇輝¹⁾, 郡 英輝¹⁾, 時安 敦史²⁾, 金崎 真聡³⁾, 田中 周太⁴⁾, 諫山 翔伍⁵⁾,
桐山 博光⁶⁾, 近藤 康太郎⁶⁾, 南 卓海¹⁾, 境 健太郎¹⁾, 浅井 孝文³⁾, 田口 智也¹⁾, 姫野 公輔¹⁾,
小田 和昌¹⁾, 鈴木 蒼一郎¹⁾, 二階堂 颯佳¹⁾, 小野 晴樹¹⁾, 倉本 恭誓¹⁾, 酒井 優一¹⁾,
田中 崇寛¹⁾, 安井 稔遥¹⁾, Harihara Sudhan Kumar²⁾, 大西 直文²⁾, 鍛冶 賢志³⁾, 田邊 寛之³⁾,
井上 千裕³⁾, 望月 政一郎³⁾, 尾崎 玲於奈³⁾, 豊永 啓太³⁾, 前川 馨³⁾, 富田 健太郎⁷⁾,
Wei-Yen Woon⁸⁾, Che-Men Chu⁸⁾, Kuan-Ting Wu⁸⁾, Chun-Sung Jao⁸⁾, Yao-Li Liu⁹⁾, Zechen Lan¹⁾,
余語 覚文¹⁾, Alessio Morace¹⁾, 太田 雅人¹⁾, Tatiana Pikuz¹⁾, 小平 聡⁶⁾,
早川 岳人⁶⁾, 福田 祐仁⁶⁾, 蔵満 康浩¹⁾

Yuki ABE, Hideki KOHRI, Atsushi TOKIYASU, Makoto KANASAKI, Shuta TANAKA, Shogo ISAYAMA, Hiromitsu KIRIYAMA,
Kotaro KONDO, Takumi MINAMI, Kentaro SAKAI, Takafumi ASAI, Tomoya TAGUCHI, Kosuke HIMENO, Kazumasa ODA,
Soichiro SUZUKI, Fuka NIKAIIDO, Haruki ONO, Kiyochika KURAMOTO, Yukichi SAKAI, Takahiro TANAKA, Toshiharu YASUI,
Harihara Sudhan KUMAR, Naofumi OHNISHI, Kenji KAJI, Hiroyuki TANABE, Chihiro INOUE, Seichiro MOCHIZUKI,
Reona OZAKI, Keita TOYONAGA, Kaoru MAEGAWA, Kentaro TOMITA, Wei-Yen WOON, Che-Men CHU, Kuan-Ting WU,
Chun-Sung JAO, Yao-Li LIU, Zechen LAN, Akifumi YOGO, Alessio MORACE, Masato OTA, Tatiana PIKUZ, Satoshi KODAIRA
Takehito HAYAKAWA, Yuji FUKUDA and Yasuhiro KURAMITSU

¹⁾大阪大学 ²⁾東北大学 ³⁾神戸大学 ⁴⁾青山学院大学 ⁵⁾九州大学 ⁶⁾量研機構
⁷⁾北海道大学 ⁸⁾台湾国立中央大学 ⁹⁾台湾国立成功大学

(概要)

本研究では J-KAREN レーザーを用いた GeV イオン加速の原理実証を目的とし、トムソンパラボラなどの既存の計測手法では診断の難しい高エネルギーイオンを計測する手法を確立する。多層シンチレータを用いた単一粒子計数法に基づく計測手法により、レーザー駆動の多種混交イオンビームの計測レンジを sub-GeV~GeV 領域まで拡張するとともに、測定結果をリアルタイムに返す診断システムの構築を目指す。加速器施設を拠点として行われてきた昨年度までの計測器開発を経て、今年度は同計測器の本格的な運用試験を開始し、J-KAREN レーザー施設で行われたイオン加速実験において、50 MeV 級の高エネルギーイオンのリアルタイム計測に成功した。

キーワード：レーザーイオン加速，高エネルギー粒子計測，シンチレータ

1. 目的

【研究背景と本研究の目的】

高出力レーザーを用いたイオン加速の技術は癌治療や同位体生成のほか、慣性核融合や高エネルギー物理学実験への応用を目指して研究がなされている。かつては「100 MeV の壁は超えられない」と言われたレーザーイオン加速も、ここ数年でようやく 100 MeV 突破の兆しが見え始め、さらには GeV 級のイオン加速を可能にする手法まで提案されるほどに進歩した[1-3]。また、半導体励起固体レーザーの技術発展により、パワーレーザーはシングルショットの時代から高繰り返し実験の時代へと変革しつつあり、レーザー粒子加速の実用的な応用展開が見えつつある[4]。一方で、粒子計測の技術についてはこの 10 年大きな進展がなく、GeV 級イオンビームの診断の難しさが当該研究における実験検証の進展を妨げている。特に、レーザー粒子加速実験では、電子や陽子、炭素・酸素

イオンなど様々な粒子が複合的に加速される場合が多く、高強度 X 線や電磁パルスに晒される環境下でこれらの「複合量子ビーム」の粒子識別を行いながらエネルギー測定を行うことは容易ではない。特に GeV イオンの計測となると、既存の計測手法（トムソンパラボラ、固体飛跡検出器等）では検出感度や粒子識別精度が深刻な課題となり、依然として有効な計測手段がないのが現状である。こうした中で、高繰り返し実験ならではの計測手法によって、レーザー実験における GeV 級イオン計測を可能にするのが本研究の目的である。

本研究で開発する計測手法は単一粒子計数法を基本原理としており、多層シンチレータを用いて粒子の飛行時間（Time-of-flight : TOF）計測と波高分析を同時に行う。これにより、粒子の速度とエネルギー付与の関係からその核種（質量）を同定し、各種ごとにエネルギー計測を行うことができる。現在までに、放射線医学総合研究所の重粒子線加速器 HIMAC や東北大電子光学研究センターの電子加速器 ELPH を利用して、GeV イオンに対する高い検出感度とエネルギー分解能、粒子識別精度を確認し、本手法による GeV 領域での多核種同時エネルギー分析の有効性の実証に成功している [5, 6]。今年度は同計測器を J-KAREN の短焦点チャンバーエリアに導入し、レーザー実験での本格的な運用試験を開始した。

2. 方法

J-KAREN の短焦点チャンバーで行われたイオン加速実験において、本計測器の運用試験を行った。図 1 のように、 $10 \times 10 \times 1$ cm のプラスチックシンチレータを 3 層構造にし、ターゲットから 5.45 m 離れた位置にあるビームダンパーの上に設置した。ターゲットで加速されたイオンは計測ポートの真空窓 ($200 \mu\text{m}$ 厚のベリリウム箔) を通過して大気中を伝搬し、シンチレーション検出器に到達する。それぞれのシンチレータに接続された光電子増倍管から出力される時間波形をオシロスコープで記録した。グラフェンベースのナノ薄膜を用いた高純度炭素イオン加速実験 (PI: 蔵満康浩, 大阪大学) や極低温水素クラスターを用いた準単色陽子線生成実験 (PI: 福田祐仁, QST) において、高エネルギーイオンのリアルタイム計測を実施した。実験では、実際の計測環境下でのイオンのフラックスや、レーザー照射時に発生する高強度 X 線やその散乱・二次粒子の影響を評価することで、より高精度で実用的な計測器構成の検討を行った。

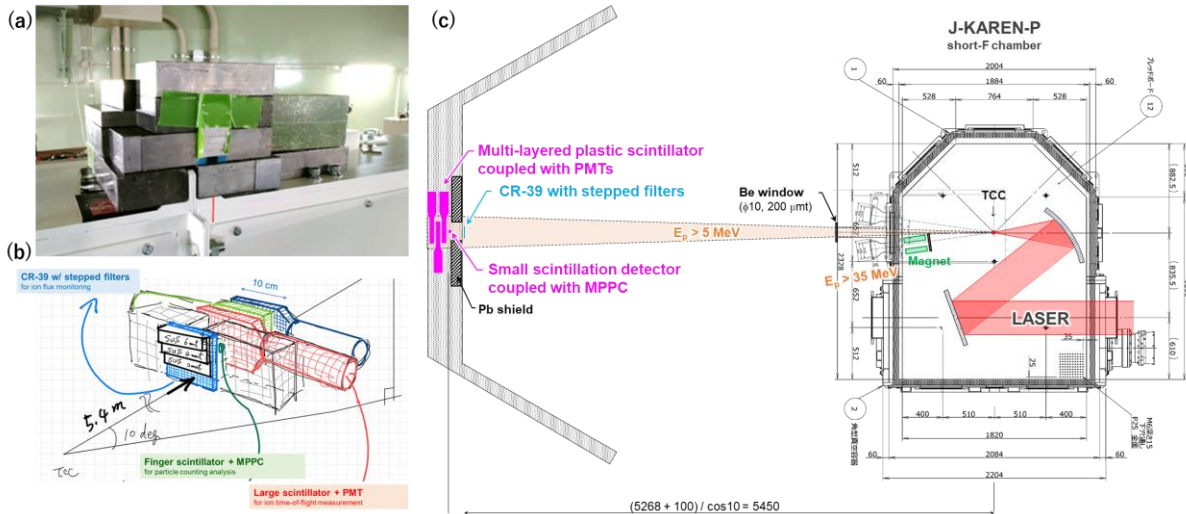


図 1 実験セットアップの概略図。(a) 計測器外観と (b) 内部の計測器構成, (c) 計測器設置位置。

3. 結果及び考察

多層シンチレーション検出器の導入により、核子当たり 50 MeV 級のイオンのリアルタイム計測に成功した。今回導入した計測器はイオンの最大エネルギーの評価において特に有効であり、レーザーやターゲットに関する様々なパラメータサーベイが可能になった。シンチレータを多層構造にしたことで、粒子の飛行速度と飛程の関係から最大速度を持つ粒子の核種同定まで行えるようになった。多層シンチレーション検出器で計測されたイオンの最大エネルギーは、既設のトムソンパラボラの計測結果よりも高い傾向にあり、これまでの実験で見過ごされてきた高エネルギー粒子の存在が示唆される結果となった。この結果は 100 MeV 突破を目指すレーザーイオン加速の研究を大きく後押しするものであり、計測立体角を大きくとれるシンチレーション検出器の導入によって初めて確認された事実である。一方で、今回のセットアップではレーザ

ー 1 パルス当たり 10^3 個程度のイオンが検出器に入射することが分かり、単一粒子計数法を用いた詳細な核種弁別とスペクトル評価を行うためには、検出器上での粒子束を現状の 1/1000 未満に減らす必要があることが分かった。これについては検出器のセグメント化が有効な対策法となる。セグメント化により、計測立体角を犠牲にすることなく、個々の検出器要素への入射粒子数を減らすことができる。また、実験では計測の障害となる高強度 X 線や電磁ノイズの影響を評価し、その具体的な対策法を検討した。高強度 X 線の対策においてもシンチレータのセグメント化が有効であることから、現在は高速応答の液体シンチレータを用いたピクセルアレイ検出器の開発を進めており、次年度以降も継続的な実験検証を行いたいと考えている。

4. 引用(参照)文献等

- [1] R. Matsui *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, 014804 (2019).
- [2] S. Isayama *et al.*, Phys. Plasmas **28**, 073101 (2021).
- [3] Y. Kuramitsu *et al.*, Sci, Rep. **12**, 2346 (2022).
- [4] Y. Abe *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **93**, 093523 (2022)
- [5] Y. Abe *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **93**, 063502 (2022). (※本研究に関する今年度の業績)
- [6] T. Minami *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **93**, 113530 (2022). (※本研究に関する今年度の業績)