

2025年度量子医科学研究所
HIMAC 利用研究成果報告書
(発表会用暫定版)

II. 物理・工学

2025 Annual Report of the
Research Project with Heavy Ions
at QST-HIMAC

2026年6月
June, 2026

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
量子医科学研究所

National Institute of Radiological Sciences National Institutes for
Quantum and Radiological Science and Technology
9-1 Anagawa 4-chome, Inage-ku, Chiba 263-8555, JAPAN

2026年5月22日

HIMAC 利用研究成果報告書（発表会用暫定版）について

- これは HIMAC 利用研究成果報告書の草稿で、発表会の配布資料(ダウンロード版)をかねています。
- 掲載順序は、まず班毎に分け、次にプログラムの発表順に並べています。但し、掲載されたプログラム（右上に日付あり）以降の変更は反映されていません。
- 都合により開催後日発表になった課題については最後に課題番号順に掲載しています。
- 第一分冊が生物、第二分冊が物理・工学です。
- 各分冊の初めに目次があり、ページ数が掲載されています。目次のタイトルは、課題のタイトルのままですので、報告のタイトルと違っている場合もあります。課題番号は一致しています。
- 課題番号から掲載ページ数を調べるには、各分冊の最後にある索引をご利用下さい。

研究報告書最終版について

- 研究成果は、暫定版では課題毎に掲載されていますが、最終版では巻末にまとめて表示します。
- 送付いただいた原稿の一部で、
 - 電子ファイル大幅に乱れておりプリントと一致しない、
 - 課題番号等の記載が間違っている、
 - 図が表示できない、といった問題点がありました。訂正可能な間違いはこちらで修正いたしました。今回の草稿で修正ミスが発見された場合、6月26日（金）までにご連絡いただければ、最終版で訂正を行います。ただし、原稿の全面的な差し替えは、原則、お断りします。

「2025年度HIMAC利用研究成果発表会日程表（案）」

日時：2026年6月1日（月）～6月2日（火）

開催方式 Web開催

日付	6月1日(月曜日)	6月2日(火曜日)
時間	生物	物理・工学
	挨拶、9:50 - 10:00	挨拶、9:50 - 10:00
10:00	課題番号 001-404	A 治療
	10:00 - 10:50	10:00 - 10:40
	休憩	休憩
11:00	課題番号 105-111	B 放射線と化学反応
	11:00 - 11:50	10:50 - 11:30
		休憩
12:00	昼休み	C 加速器ビーム利用の新展開
	11:50 - 12:50	11:40 - 12:30
13:00	課題番号 401-407	昼休み
	12:50 - 13:30	
	コーヒーブレイク	D 様々な検出器の開発 I
14:00	課題番号 302-405	13:30 - 14:10
	14:00 - 14:50	休憩
15:00	休憩	E 様々な検出器の開発 II
	課題番号 501-503	14:20 - 15:00
16:00	15:00 - 15:30	休憩
		F 宇宙観測の為の測定器
17:00		15:10 - 15:50
		休憩
		G 原子核の研究と検出器の開発
		16:00 - 16:40

「2025年度HIMAC利用研究成果発表会プログラム（案）、生物班」

日時： 2026年6月1日（月）9時50分～15時30分（予定）
 場所： Web会議

6月1日（月） June 1 (Mon)

9:50 - 10:00 開会の挨拶

	口頭発表	報告書 ページ
課題番号 001-404		
10:00 - 10:10	セッション準備（座長：小久保年章）	
10:10 - 10:20	25HJ001 稲庭拓 新規重粒子線治療の実現に向けた臨床前動物実験 Preclinical in-vivo experiments for developments of novel heavy-ion radiotherapy	3
10:20 - 10:30	25HJ102 下川卓志 高LET粒子線による放射線抵抗性脳腫瘍の治療を目指した基礎研究 High-LET Radiation for Radioresistant Glioma Therapy: A Basic Research Investigation	7
10:30 - 10:40	25HJ103 舟山知夫 三次元培養した伴侶動物がん細胞の放射線感受性解析 Radiation Sensitivity Analysis of 3D Cultured Cancer Cells from Companion Animals	11
10:40 - 10:50	25HJ404 島田幹男 組織オルガノイドにおける重粒子線の生物効果比の評価 Evaluation of the biological effect ratio of heavy-ion beams in tissue organoids	14
10:50 - 11:00	休憩	
課題番号 105-111		
11:00 - 11:10	セッション準備（座長：平山亮一）	
11:10 - 11:20	25HJ105 佐井星 難治性癌に対する重粒子線照射と薬剤併用による基礎研究 Basic research on heavy ion beam irradiation and drug combination for refractory cancer	17
11:20 - 11:30	25HJ108 高草木洋一 超偏極 ¹³ C-MRIを用いた重粒子線照射による腫瘍内代謝変化の評価 Evaluation of effect of heavy ion irradiation on tumor metabolism by using hyperpolarized ¹³ C-MRI	21
11:30 - 11:40	25HJ110 高橋豊 重粒子線が誘導する免疫応答の解明と免疫治療との併用効果の検討 Elucidation of immune responses induced by heavy ion irradiation and evaluation of its combination with immunotherapy	23
11:40 - 11:50	25HJ111 武島嗣英 光子線と重粒子線の抗腫瘍免疫応答の比較 Comparison of Antitumor Immune Responses Induced by Photon and Carbon Ion Radiotherapy	26
11:50 - 12:50	昼休み	
課題番号 401-407		
12:50 - 13:00	セッション準備（座長：日裏剛基）	
13:00 - 13:10	25HJ407 平山亮一 低酸素細胞に関する粒子線基礎生物研究 Basic biological research on hypoxic cells using particle beams	28

13:10 – 13:20	25HJ401	余語克紀	重粒子線誘発のDNA損傷を指標としたがん治療線量の修飾薬剤の探索 DNA Damage-Based Dose Modifiers for Heavy-Ion Therapy	31
13:20 – 13:30	25HJ201	網野真理	「重粒子線を用いた根治的不整脈治療の開発」 — 心臓放射線照射による心不全の新規治療開発に向けた基礎的研究 — Basic research for the development of new treatment of heart failure by cardiac irradiation	34
13:30 – 13:40	25HJ202	若月優	重粒子線による高精度量子メス治療（マイクロサージェリー）技術開発と適応拡大に関する研究 Research for development of microsurgery by high-precision carbon-ion radiotherapy	37
13:40 – 14:00			コーヒーブレイク	
		課題番号 302-405		
14:00 – 14:10			セッション準備（座長：笠井清美）	
14:10 – 14:20	25HJ302	森田明典	細胞死制御剤による粒子線防護効果のマウス個体レベルでの検討 Evaluation of cell death regulatory agents for protecting particle beam-irradiated mice	40
14:20 – 14:30	25HJ303	間宮大晴	ブラッグピーク近傍の重粒子イオンによる致死DNA損傷誘発メカニズムの解明 Understanding the mechanisms of lethal DNA damage induced by heavy ions near the Bragg peak	43
14:30 – 14:40	25HJ403	中野敏彰	重粒子線照射により生じるDNA損傷と細胞死の相関の解明 細胞死経路の制御によるがん治療の最適化 Heavy-ion radiation-induced DNA damage dictates cell death pathways: Toward optimized cancer therapy through cell death modulation	46
14:40 – 14:50	25HJ405	Takata Kei-ichi	高LET誘発DNA損傷の修復過程におけるPOLQ活性の追跡 Tracking POLQ activity during repair of high-LET-induced DNA damage	49
14:50 – 15:00			休憩	
		課題番号 501-503		
15:00 – 15:10			セッション準備（座長：小西輝昭）	
15:10 – 15:20	25HJ501	下川卓志	イオンビームによる微生物・植物への変異導入を利用した 基礎研究プラットフォームの構築 Development of a Fundamental Research Platform Based on Ion Beam Mutagenesis	52
15:20 – 15:30	25HJ503	藤田知道	コケ植物胞子体の宇宙放射線耐性限界の調査およびDNA修復・放射線耐性の分子機構の研究 Study on the Upper Limits of Cosmic Radiation Tolerance and Molecular Mechanisms of DNA Repair and Radiation Tolerance in Moss Sporophytes	56

※一課題の発表時間は7分、討議3分を予定

開催期間中に発表できない課題

成果発表会後日に録画発表

25HJ104	関原和正	治療抵抗性がんに対する重粒子線治療の新展開：薬物療法との併用効果と腸内細菌叢の役割の解明 New Developments in Carbon Ion Radiotherapy for Treatment-Resistant Cancers: Elucidating the Combined Effects with Systemic Anticancer Therapy and the Role of the Gut Microbiota.	61
25HJ106	Ebner Daniel Keith	Advanced multiomic analysis of DNA Damage, Metabolic, and Immunotherapeutic Inhibitors with Heavy-Ion Radiotherapy	64
25HJ107	Tinganel i Walter	The CANTO Project (Circulating cANcer cells and meTastases fOrmation)	67
25HJ112	小嶋光明	重粒子線すだれ状照射による抗腫瘍効果と正常組織障害軽減効果に関する基礎研究 Basic biological research on the antitumor effect and the reduction of normal tissue damage by special fractionated heavy particle beam irradiation	70
25HJ203	Prezado Yolanda	Heavy ion minibeam radiation therapy: safety and efficacy studies	73
25HJ402	PORCEL Erika	Radioamplification effect of nanoparticles study on 3D cell models	76
25HJ408	松尾陽一郎	粒子線によるDNA損傷と突然変異誘発機構の分子レベルでの解析 Molecular analysis of ion beam-induced DNA damage and mutations.	79

2026/5/22

「2025年度HIMAC利用研究成果発表会プログラム（案）、物理・工学班」

日時： 2026年6月2日（火）9時50分～16時40分（予定）

場所： Web開催

6月2日（火） June 2 (Thu)

時間	セッション	内容	報告書 ページ
9:50 - 10:00		開会の挨拶	
		口頭発表 治療	
10:00 - 10:40	セッションA	(座長：田中創大) セッション準備	
	25HH001 坂間誠	重粒子線治療照射法に関する総合的研究 General Study on Heavy Charged Particle Irradiation System for HIMAC Clinical Trial	85
	25HH008 寅松千枝	重粒子線照射野イメージングのためのOpenPET装置開発 に関する研究 Development of OpenPET for Irradiation Field Imaging in Carbon Ion Therapy	88
	25HH033 山口充孝	二次電子制動放射線計測による粒子線イメージング手 法の開発 Development of Particle Beam Imaging Method Using Secondary Electron Bremsstrahlung Measurement	93
10:40 - 10:50		休憩	
10:50 - 11:30	セッションB	放射線と化学反応 (座長：松葉俊哉) セッション準備	
	25HH022 Kim Sunghwan	Calibrations of Advanced Particle dosimeter and Spectrometer for Heavy Ions in Space Radiation	96
	25HH013 上野恵美	炭素線照射した脂質中に生成するフリーラジカルの定 量とその反応進行過程の解析 Quantification of Free Radicals Generated in Lipids by Carbon-Ion Irradiation and Analysis of Their Reaction Kinetics	99
	25HH019 小林正規	超音波エコーを利用した水中における重粒子線飛跡可 視化の研究 Example of Report on the Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC	101
11:30 - 11:40		休息	
11:40 - 12:30	セッションC	加速器ビーム利用の新展開 (座長：北村尚) セッション準備	
	25HH002 新藤浩之	Society5.0に向けた革新的耐宇宙線デバイス技術の開 発 Development of Innovative Radiation-Hardened Device Technologies toward Society 5.0	104
	25HH004 小林憲正	重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成 とその変成 Formation and alteration of organic compounds in possible space environments by heavy ion bombardment	106

25HH012	牧野高紘	炭化ケイ素パワー半導体のイオン誘起過渡応答測定 Single Event Transient Pulse Measurement on SiC Power Devices	109
25HH024	小林和淑	放射線環境下で発生する電圧変動を活用したデバイスモデルパラメータ最適化手法の構築 Development of a Device Model Parameter Optimization Method Utilizing Voltage Fluctuations in Radiation Environments	110
12:30 - 13:30		昼休み	
13:30 - 14:10		セッションD	
		様々な検出器の開発I (座長：片桐健) セッション準備	
25HH031	Vladimir Pan	In field and Out of Field Dose Profile from Therapeutic Hadron Therapy Beams at HIMAC facility	112
25HH003	山内知也	高感度飛跡検出器開発を目指したイオントラック構造と応答特性に関する基礎データ集の確立 Fundamental data collection on ion track structure and response characteristics for the development of high-sensitivity track detectors.	118
25HH005	寺沢和洋	位置有感比例計数管の重イオンに対する応答 Response of a position-sensitive tissue-equivalent proportional chamber to heavy ions	121
14:10 - 14:20		休息	
14:20 - 15:00		セッションE	
		様々な検出器の開発II (座長：古場裕介) セッション準備	
25HH006	中竜大	超微粒子原子核乾板によるナノスケールの放射線飛跡検出器の高度化と展開 Research and Development of Super-fine Grained Nuclear Emulsions as Nano-scale Tracking Device	124
25HH014	石川正純	BaTiO ₃ 強誘電体を用いた線量測定におけるLET依存性の検証 Evaluation of LET dependence in dosimetry with BaTiO ₃ ferroelectrics	127
25HH028	榊泰直	重粒子線による輝尽性蛍光体検出器および蛍光体検出器のLET依存性に関する研究 Example of Report on the Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC	130
15:00 - 15:10		休息	
15:10 - 15:50		セッションF	
		宇宙観測の為の測定器 (座長：福田茂一) セッション準備	
25HH011	Ploc Ondrej	Novel Dosimetry System for Mixed Radiation Fields in Aerospace Applications	133
25HH020	Karel Marsalek	Human Space Exploration - The Radiation risks and novel new detector developments	137

25HH027	Park Inchun	気象衛星ひまわり後継機搭載用宇宙放射線計測装置の 開発と評価 Development and Performance Evaluation of Space Radiation Monitor for the Himawari-10 Satellite	140
15:50 – 16:00		休憩	
16:00 – 16:40		セッションG	
		原子核の研究と検出器の開発 (座長：高田栄一) セッション準備	
25HH009	森口哲朗	反応断面積測定に向けた固体重水素標的の開発 Development of Solid Deuterium Target for Reaction Cross Section Measurements	142
25HH015	大田晋輔	ガスアクティブ標的による核物質の物性研究 Study of matter property of the nucleonic system using gaseous active target	147
25HH029	三原基嗣	動的核偏極法による不安定核の磁気双極子モーメント 測定 Measurement of Magnetic Dipole Moments of Unstable Nuclei by Means of Dynamic Nuclear Polarization	152

・講演時間は講演7分+質疑応答3分

開催期間中に発表できない課題 成果発表会後日に録画発表

25HH007	George Stuart P	Measurement of Isotopic Light Ion Cross Sections with a Nuclear Fragment Spectrometer	157
25HH010	RAFFY Quentin	Dose-rate effects with accelerated ions: Experimental investigation and Simulation of water and biomolecules radiolysis	162
25HH016	Benton Eric R	Atmospheric Ionizing Radiation Detector Development	165
25HH018	今井伸明	重イオン位置感応型検出器の開発 Development of a Heavy-Ion Position-Sensitive Detector	168
25HH030	安部勇輝	レーザーイオン加速によるGeV級イオンビーム生成の実 証に向けた 高エネルギーイオン診断法の開発 High-energy ion diagnostics for demonstrating GeV-scale ion beam generation by laser-driven ion acceleration	171

物理 · 工学班
Physics and Engineering

重粒子線治療照射法に関する総合的研究

General Study on Heavy Charged Particle Irradiation System for HIMAC Clinical Trial (25HH001)

坂間誠、米内俊祐、水野秀之、稲庭拓、武居秀行、水島康太、田中創大

中路拓、松葉俊哉、増田孝充、笠松幸生、野村友祐、佐藤 眞二、宮武立彦、米村美紀、藤森康平 ほか

M. Sakama, S. Yonai, H. Mizuno, T. Inaniwa, H. Takei, K. Mizushima, S. Tanaka,

T. Nakaji, S. Matsuba, T. Masuda, K. Kasamatsu, Y. Nomura, S. Sato, T. Miyatake, M. Yonemura, K. Fujimori *et al.*

H005 is aimed at conducting experimental studies to further improve ongoing carbon-ion radiotherapy (CIRT) and develop multi-ion radiotherapy (MIRT) at QST-HIMAC. This year, we have studied the following research topics: Dose response measurements of human-derived cancer cells to helium, carbon, oxygen, and neon ion beams, Measurement of basic data for clinical trials of heavy ion micro-surgery, Development of a method for measuring the effect of heavy ion irradiation using three-dimensional cultured cancer cells, Research on beam quality measurements using SOI detectors for MIRT QA, Demonstration experiment of Arc irradiation using a head and neck phantom, Research and development of an optimal mesh ripple filter for heavy ion therapy and so on.

1. 研究の目的とバックグラウンド

本課題は量子科学技術研究開発機構 QST-HIMAC で行っている重粒子線がん治療の高度化に資するため、加速器から供給されるビームの特性を明らかにするための研究開発、治療用ビームを評価するための線量・線質評価法の研究開発、治療関連システムのコミッショニング、治療用ビームの QA 方法の研究開発を行うことを目的とする。治療用ビームを用いた実験によって治療の高精度化・最適化に必須となる情報を取得する。

2. 前年度の主な結果

昨年度は主に以下の研究テーマについて実施を行い、学術論文、学位論文等で報告した。

- 1) 重粒子線に対する蛍光ガラス線量計 (RPLD) の応答特性評価
- 2) マルチイオンビームに対する電離箱線量測定の高精度化に関する研究
- 3) 腫瘍を模した球状体積に対する炭素線超高線量率照射 (FLASH 照射) の実証実験
- 4) マルチイオンビームに対する線エネルギー付与分布測定のための SiC/Diamond 検出器の開発
- 5) メッシュリプルフィルタ (mRiFi) を用いたビーム線源データ測定

3. 今年度の研究内容と成果

今年度取り組んだ研究テーマは以下の通りである。

- 1) 人由来がん細胞のヘリウム線、炭素線、酸素線、ネオン線に対する線量応答測定
- 2) 重粒子線マイクロサージェリーの臨床試験に向けた基礎データ測定
- 3) 三次元培養がん細胞を用いた重粒子線照射効果測定法の開発
- 4) マルチイオン治療 QA のための SOI 検出器を用いた線質測定に関する研究
- 5) 頭頸部ファントムを用いた Arc 照射の実証実験
- 6) 重粒子線治療用最適メッシュリプルフィルタの研究開発

本稿では、2)、3) について報告する。

【重粒子線マイクロサージェリーの臨床試験に向けた基礎データ測定】

微小疾患を対象とする重粒子線マイクロサージェリーの臨床試験に向けた基礎データを取得することを目的として、実験値をもとに、炭素 (C) イオンおよびネオン (Ne) イオンビームのモンテカルロシミュレーションによるビームモデリングを行った。測定は QST 治療室 G において実施した。収束電磁石のビームパラメータを調整して細径化したイオンビームを用い、アイソセンターに設置したスクリーンモニター (ISO-SCN) および水槽内に設置した同心円電離箱により、ビームプロファイルおよび各水深における横方向線量分布を測定した。208.02 MeV/u の C イオンおよび 281.5 MeV/u の Ne イオンについて、ISO-SCN における測定ではビーム幅 (ガウス分布で近似した際の標準偏差 (σ)) はそれぞれ約 1.66 mm および約 1.50 mm であり、水平方向および垂直方向で概ね同程度の値であることが確認された。図 1 に同心円電離箱で測定したビーム幅 (σ) の深度分布を示す。ビームモデリングにはモンテカルロコード PHITS を用いた。測定結果を再現するため、実験と同一体系を構築するとともに、エネルギーやエネルギー分散等の線源パラメータを調整することで、実験結果を再現する条件を決定した。今後は、他の入射エネルギーのビームについても実測を行うとともに、臨床での使用が検討されている他

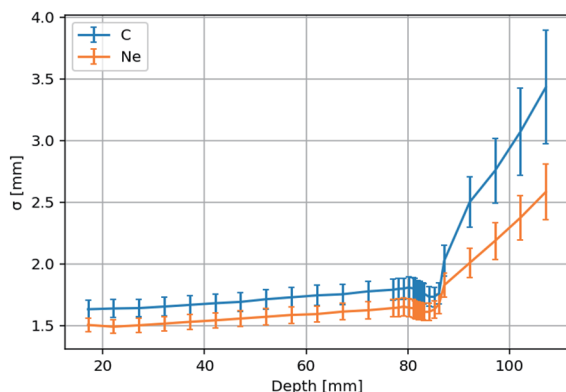


図 1 : 同心円電離箱で取得したビーム幅 (ガウス分布で近似した際の標準偏差 (σ)) の深度分布

のエネルギーに対して、実測を補完する手段としてビームモデリングが可能かを検討していく予定である。

【三次元培養がん細胞を用いた重粒子線照射効果測定法の開発】

重粒子線のがん細胞殺傷効果を検証するために、多くの細胞実験が行われている。一般的に使用される二次元培養された細胞は必ずしも実際の腫瘍の状態を模擬しないという点が長い間課題として指摘されている。二次元培養に比べて *in vivo* の環境を再現しやすいとされる三次元培養に着目し、三次元培養したがん細胞 (スフェロイド) の体積推移を指標に粒子線照射効果を測定するシステムを構築し、炭素線照射を通して実証実験を行った。画像撮影とスフェロイドの輪郭抽出の二段階からなる、照射効果評価システムを構築した。体積推移を指標にして照射効果が測定可能であることを実証するために、HCT116 細胞のスフェロイドに炭素線を照射した。照射は拡大ブラッグピーク (SOBP) を用いて実施し、線量は 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 15 Gy とした。照射後に構築したシステムで体積推移導出を実施した。図 2 にシステムで得られたスフェロイドの相対体積の推移を示した。高線量ほど体積の増加が遅延しており、開発したシステムで体積推移を指標とした照射効果測定ができることが実証された。

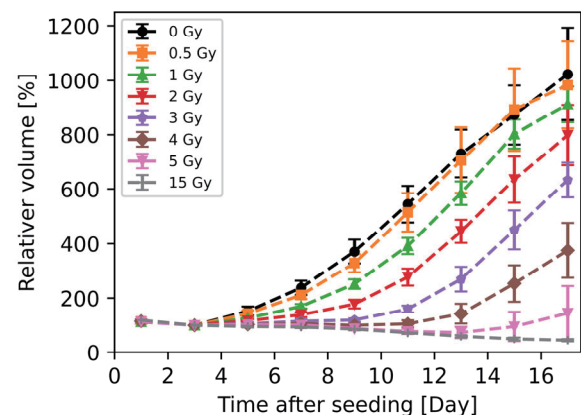


図 2 : SOBP 中心で照射した HCT116 細胞のスフェロイドの相対体積推移。

QST

【学術論文】

- Taku Inaniwa, Makoto Sakama, Sung Hyun Lee, Taku Nakaji, Nobuyuki Kanematsu, Linh T Tran and Anatoly Rosenfeld: Evaluation of diamond and silicon detectors for linear energy transfer measurements of therapeutic helium, carbon, oxygen, and neon ion beams, *Phys. Med. Biol.* 70 235029 (2025)
- Hideyuki Takei, Reiko Imai, Takamitsu Masuda, Katsumi Aoki, Taku Nakaji, Yusuke Nomura, Asami Inomata, Yui Suzuki, Taku Inaniwa: Possibility of increasing linear energy transfer in multi-ion radiotherapy for bone and soft tissue sarcomas, *Med Phys.* 52:e18097. (2025)
- Urago Y, Sakama M, Sakata D, Katayose T, Chang W.: Monte Carlo-calculated beam-quality and perturbation correction factors for helium-, carbon-, and neon-ion beams. *Med Phys.* 52:e70024. (2025)
- Koki Kasamatsu, Takashi Shimokawa, Takamitsu Masuda Chizuru Tsuruoka, Takamitsu Morioka, Tatsuhiko Imaoka, Shinji Sato, Saaya Suzuki, Kota Mizushima, Sodai Tanaka, Toshiaki Kokubo, Taku Inaniwa,: Ultra-high dose rate carbon-ion irradiation does not preferentially spare normal tissue in the gastrointestinal tract, *Med Phys.* 52:e70139. (2025)

【学会発表】

- Sodai Tanaka, Development and implementation of mesh ripple filter for multi-ion therapy, The 129th Scientific Meeting of the Japan Society of Medical Physics, Yokohama, 2025.4
- Koki Kasamatsu, Development of spheroid growth evaluation system and mathematical model to investigate the efficacy of radiation therapy, The 129th Scientific Meeting of the Japan Society of Medical Physics, Yokohama, 2025.4
- Taku Inaniwa, Effects of intra-tumoral cellular heterogeneity of oxygen partial pressure on biological effectiveness of hydrogen-, helium-, carbon-, oxygen-, and neon-ion beams, The 129th Scientific Meeting of the Japan Society of Medical Physics, Yokohama, 2025.4
- Makoto Sakama, 頭頸部がん患者に対する強度変調粒子線治療への Dual energy CT を用いた阻止能比の影響, The 130th Scientific Meeting of the Japan Society of Medical Physics, Kashiwa, 2025.9
- 増田孝充, 生体のミクロな低酸素環境が放射線による細胞死に与える影響の評価, The 130th Scientific Meeting of the Japan Society of Medical Physics, Kashiwa, 2025.9
- Taku Inaniwa, Effects of radiobiological 5Rs on carbon-ion radiotherapy for stage-I non-small cell lung cancer, The 130th Scientific Meeting of the Japan Society of Medical Physics, Kashiwa, 2025.9
- Koki Kasamatsu, Takashi Shimokawa, Takamitsu Masuda, Saaya Suzuki, Shinji Sato, Sodai Tanaka, Yusuke Nomura, and Taku Inaniwa, “Development of the method to quantify biological effectiveness of carbon ions using 3D-cultured tumour cell”, IUPESM World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2025, 2025年9月, Adelaide, Australia
- Koki Kasamatsu, 超高線量率炭素線照射がマウスの急性腸管障害と晩期肺障害に及ぼす影響 The 130th Scientific Meeting of the Japan Society of Medical Physics, Kashiwa, 2025.9

重粒子線照射野イメージングのための OpenPET 装置開発に関する研究
Development of OpenPET for Irradiation Field Imaging in Carbon Ion Therapy
(25HH008)

山谷泰賀^a、Akram. Hamato^a、HanGyu Kana^a、田久創大^a、寅松千枝^a、錦戸文彦^a、佐藤眞二^a、
田島英朗^a、辻厚至^a、脇坂秀克^a、吉田英治^a、稲庭拓^a
T, Yamaya^a, A. Hamato^a, H. G. Kana^a, S. Takyu^a, C. Toramatsu^a, F. Nishikido^a, S. Satoh^a,
H. Tashima^a, A. Tsuji^a, H. Wakizaka^a, E. Yoshida^a, T. Inaniwa^a

Abstract

The OpenPET geometry is our original idea to visualize a physically opened space. The major target is in-beam PET, which is a method for *in-vivo* beam range verification in particle therapy. Range verification PET is based on imaging positron (β^+)-emitting nuclides that are produced through nuclear fragmentation reactions between the therapeutic beam and the irradiated tissue. These β^+ -emitting nuclides are washed out mainly through blood flow. Tumor blood flow is closely related to factors such as oxygenation and is regarded as an important indicator for predicting treatment response. In the 2024 HIMAC experiment, a ^{12}C ion beam was irradiated to a tumor rat model, then range-verification-PET was performed by our custom made total-body small animal PET system (TBS-PET). The washout rate map derived from kinetic analyses of range-verification PET images showed a clear correlation with the hypoxia PET image obtained by ^{18}F -FAZA administration. In the 2025 HIMAC experiment, we performed repeated measurements and confirmed that the 2024 result was reproducible. This study supported the concept of the washout-based tumor vascular diagnosis evaluation.

Clinical research (jRCTs032220746) has been conducted for the range verification of carbon-ion therapy using the online PET system OpenPET¹, since 2023. The analysis methods established through our small animal studies have been applied to the clinical data, and the current status of this analysis is also reported.

1. 研究の目的とバックグラウンド

我々は、世界初の開放型 PET 装置「OpenPET」¹のアイディアを 2008 年に提案し、その応用の一つとして粒子線治療における照射野イメージングの実現を目指してきた。2013 年までは小型の OpenPET 試

作機を用いてイメージングの実証実験を行い、良好な結果を得ることに成功した。その後ヒトサイズの試作機の開発を開始し、2014 年度には 2 リングタイプのヒトサイズ DROP (dual-ring OpenPET)の実験、2015 年度には 1 リングタイプのヒトサイズ SROP (single-ring OpenPET)の実験を行い、ファントムや小動物を用いたコンセプト実証に成功した。さらに近年では Whole gamma imager (WGI)と名付けた、OpenPET の内側に検出器リングを追加することでコンプトンカメラの原理による付加的な情報を得るイメージング手法の開発に着手し、照射野イメージングへの応用研究も進めている。2023 年度までに OpenPET の治療室(QST 病院、照射室 E)への導入が終了し、2023 年 7 月より「オンライン OpenPET による患者体内の重粒子臨床応用研究」(jRCTs032220746)の開始に至った。現在も患者データを取得中であり、臨床応用に即し、解析手法の開発、そして粒子線照射により生体内で自然発生する陽電子放出核種の生物学的洗い出し効果 (washout 効果)の補正と応用に関する研究を重点的に進めている。

2. 昨年度までに得られている結果

OpenPET による臨床応用研究において、昨年度までに 9 名分の頭頸部がん治療患者の撮像データを取得した。OpenPET による照射野イメージと治療計画シミュレーションによる線量分布との位置合わせ手法、照射フラクション毎の画像の変化の解析手法の開発に至った。

washout 効果においては、血管状態の異なる腫瘍ラットモデルに対する重粒子線照射実験により、血管新生・低酸素・壊死など、腫瘍の血管状態が washout 速度に反映されることを明らかにした²。これは臨床におい

て washout 速度係数が腫瘍の診断指標になる可能性を示唆する。この結果を受け、腫瘍ラットモデルに対し、飛程検証 PET と低酸素マーカージェットによる PET との比較検証を行った。HIMAC 生物照射室にて ^{12}C を腫瘍に照射後、高感度小動物全身撮像 PET(TBS-PET) (Fig.1 (a-1))³により飛程検証 PET 撮像を行った。更に、非密封線源を扱えるポジトロン棟に移動し、 ^{18}F -FAZA 投与後、高分解能小動物 PET(Mirai-PET) (Fig.1 (a-2))⁴撮像により腫瘍酸素状態を評価した。 ^{12}C 照射により発生する ^{15}O 、 ^{11}C イオンが体内で複数の化学形となる事を考慮し、1組織コンパートメントモデルによる動態解析を行った。そして、組織から血管への透過係数 (k_2 値) を導出した。

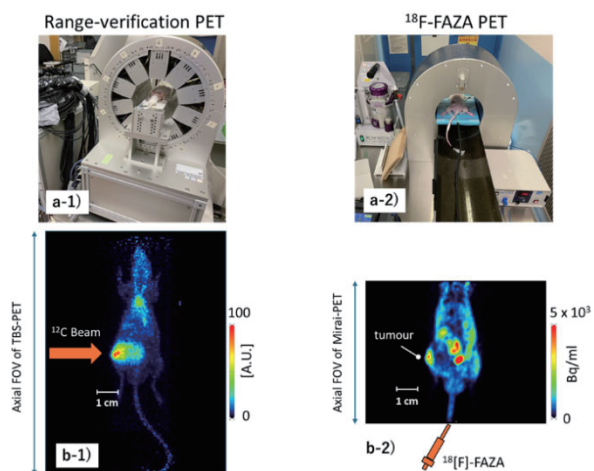


Fig 1. Comparison study. (a-1) Setup of the range-verification PET and (a-2) the hypoxia ^{18}F -FAZA PET. (b-1) Reconstructed image acquired by TBS-PET after ^{12}C irradiation and (b-2) by Mirai-PET with ^{18}F -FAZA administration (30 min summation).

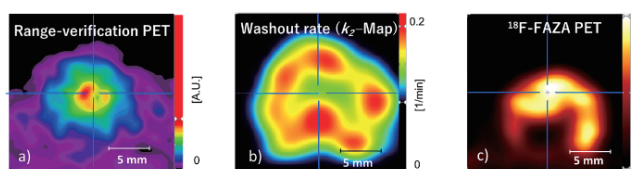


Fig 2. Heterogeneous structure of the tumor. (a) Tumor image (30-min summation) and (b) washout rate mapping (k_2 -map), obtained from the beam-monitoring PET experiment. (c) Tumor image obtained with the hypoxia ^{18}F -FAZA PET experiment.

Fig.1 (b-1)に飛程検証 PET、Fig.1 (b-2)に ^{18}F -FAZA PET の積算画像を示す。Fig.2 に腫瘍領域の(a)飛程検証 PET、(b) k_2 -Map、(c) ^{18}F -FAZA PET を示す。これらは典型的な固体腫瘍の構造を示し、腫瘍中心部は照射により生成 β^+ 放出核種の残留かつ低い k_2 値が見られ、壊死領域を示す。その領域を囲むように ^{18}F -FAZA の集積が観察され低酸素

領域が存在している。腫瘍辺縁部は k_2 値が高く、血管新生が盛んな増殖領域である。この解釈は病理切片からも裏付けられた。

3. 今年度の研究内容

今年度は、昨年度の結果の再現性を確認するため、6匹の低酸素腫瘍ラットモデルに対して飛程検証 PET(^{12}C 照射)と低酸素 PET(^{18}F -FAZA 投与)の比較実験を実施した。

また、OpenPET による臨床応用研究において、更に6名分の患者データを取得した。そして患者データを用いてこれまで基礎研究により確立してきた washout 解析手法の臨床応用を試みた。

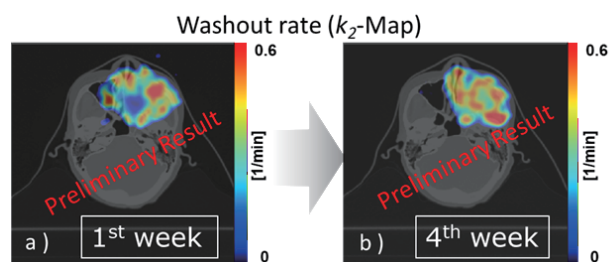


Fig 3. Washout rate mapping (k_2 -map) for patient data at (a) the first week and (b) the fourth week.

4. 今年度の研究成果と解析結果

腫瘍ラットモデルに対する飛程検証 PET と低酸素 PET 実験の結果、6匹すべてのサンプルにおいて昨年度と同様、 k_2 -Map が腫瘍内の血管構造を示す傾向が確認された。この結果は washout 速度の変化が腫瘍の診断指標に利用できる可能性を示している。

また、患者データの解析結果として、1週目と4週目の k_2 -Map を Fig 3 に示す。4週間に渡る重粒子線治療の初期と後期で k_2 -Map に変動が見られ、腫瘍の血流状態が変化していることが示唆されている。腫瘍の血流状態は、治療計画への反映や予後予測のための重要な情報となり得る。今後、20名を目標に臨床研究を進めるとともに、 k_2 -Map の変動とフォローアップのデータとの関連性を検証していくことが課題である。

参考文献

- [1] Yamaya T, et al.: Phys. Med. Biol. 53, 757–73, 2008.
- [2] Toramatsu C, et al.: Phys. Med. Biol. 67, 2022.
- [3] H. G. Kang, et al., SNMMI, 62, (Supp. 1) 1148, 2021.
- [4] Ishikawa T et al 2024 IEEE NSS, MIC and RTSD Conference

a. 量子科学技術研究開発機構 量子医科学研究所

2025 業績リスト(25HH008)

(原著論文等)

- 1. Correction and utilization of the washout effect in range-verification PET for particle therapy**
Toramatsu Chie, Yamaya Taiga, Kanno Iwao
Radiological Physics and Technology, 2026-01, DOI:10.1007/s12194-025-01000-2
- 2. Prediction of tumour hypoxia status from the washout of positron emitters in beam-monitoring PET: carbon-ion irradiation to tumour rat models**
Chie Toramatsu, Hidekatsu Wakizaka, Hideaki Tashima, Hitomi Sudo, Go Akamatsu, Taiyo Ishikawa, Han Gyu Kang, Chie Seki, Iwao Kanno & Taiga Yamaya
EJNMMI research (2026).
- 3. In-beam range determination using an OpenPET system for helium, carbon, oxygen, and neon ion beams**
Jiyao Sun, Masuda Takamitsu, Tashima Hideaki, Toramatsu Chie, Hamato Akram, Yamaya Taiga, Tanaka Sodai, Kasamatsu Koki, Stewart Biedeman Mein, Inaniwa Taku
Physics in Medicine & Biology, 70(22), 225005-1 - 225005-13, 2025-11, DOI:10.1088/1361-6560/ae1544
- 4. Range verification of a ^{10}C ion beam: Feasibility of Compton imaging of 718 keV gamma rays**
Hamato Akram, Tashima Hideaki, Takyu Sodai, Iwao Yuma, Akamatsu Go, Hangyu Kang, Obata Fujino, Nishikido Fumihiko, Katia Parodi, Yamaya Taiga
Range verification of a ^{10}C ion beam: Feasibility of Compton imaging of 718 keV gamma rays
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research - section A, 1083(171105), 1 - 12, 2026-03, DOI:10.1016/j.nima.2025.171105
- 5. Development of an ultrasensitive small animal PET with 4-layer DOI detectors for sub-second dynamic rodent imaging**
Hangyu Kang, Tashima Hideaki, Wakizaka Hidekatsu, Akamatsu Go, Iwao Yuma, Toramatsu Chie, Yamaya Taiga
Development of an ultrasensitive small animal PET with 4-layer DOI detectors for sub-second dynamic rodent imaging
Physics in medicine and biology, 70(12), 125014 - 19, 2025-06, DOI:10.1088/1361-6560/ade112
- 6. OpenPET による重粒子線がん治療イメージング**
田島 英朗, 寅松 千枝, 岩男 悠真, 浜戸 アクラム, 赤松 剛, Kang Han Gyu, 田尻 稔, 水野 秀之, 小藤 昌志, 伊川 裕明, 篠藤 誠, 山谷 泰賀
OpenPET による重粒子線がん治療イメージング
MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, 43(1), 3 - 10, 2025-05, DOI:10.11409/mit.43.3

(Proceedings 等)

- 1. First Patient Study of In-Beam OpenPET for Range Verification in Carbon-Ion Therapy**
Tashima Hideaki, Toramatsu Chie, Akram Mohammadi, Iwao Yuma, Akamatsu Go, Hangyu Kang, Nishikido Fumihiko, Tajiri Minoru, Mizuno Hideyuki, Koto Masashi, Yamaya Taiga
IEEE NSS MIC RTSD, IEEE NPSS, 2024-11-01
- 2. High-Sensitivity PET Imaging Of Positron Emitters Produced By ^{12}C Irradiation: Rat Model study**
Toramatsu Chie
62nd ANNUAL PTCOG CONFERENCE & 4th PTCOG-AO MEETING, PTCOG, 2024-06-14
- 3. Utility of total-body PET in monitoring carbon ion therapy: Demonstration in rat**
Toramatsu Chie, Wakizaka Hidekatsu, Tashima Hideaki, Akamatsu Go, Yamaya Taiga
PSMR 2024, Nicola Belcari, 2024-05-22
- 4. Dual-panel geometry for PET-guided therapy to be enabled by super-fast detector: simulation study**

Yamaya Taiga, Ishikawa Taiyo, Akamatsu Go, Tashima Hideaki, Nishikido Fumihiko, Takahashi Miwako, Toramatsu Chie, Iwao Yuma, Hashimoto Fumio, Ryosuke Ota, Sun Il Kwon, Simon R. Cherry
PSMR2024, Nicola Belcari, 2024-05-22

5. First clinical results of in-beam OpenPET at HIMAC

Tashima Hideaki, Toramatsu Chie, Akram Mohammadi, Iwao Yuma, Akamatsu Go, Hangyu Kang, Nishikido Fumihiko, Tajiri Minoru, Mizuno Hideyuki, Koto Masashi, Yamaya Taiga
6th SNU-QST Workshop on Nuclear Medicine Imaging Science and Technology, Seoul National University (SNU), 2024-05-16

6. Intra-tumoral biological washout-rate distribution in range-verification PET: a preliminary rat study with a ¹²C-beam

Toramatsu Chie, Wakizaka Hidekatsu, Tashima Hideaki, Akamatsu Go, Seki Chie, Sudo Hitomi, Yamaya Taiga
International Conference on Radiological Physics and Technology (ICRPT), 2024-04-12

(学会及び研究会口頭発表等)

[口頭発表]

1. Prediction of tumour hypoxia by range-verification PET in particle therapy: Proof-concept in rats

Toramatsu Chie
2025 IEEE NSS MIC RTSD, Hiroyuki Takahashi, 2025-11-06

2. Visualization of Irradiation Field in Carbon-Ion Therapy By OpenPET: Preliminary Analysis of Clinical Data

Yamaya Taiga, Tashima Hideaki, Toramatsu Chie, Akram Mohammadi, Iwao Yuma, Akamatsu Go, Hangyu Kang, Tajiri Minoru, Mizuno Hideyuki, Koto Masashi, Ikawa Hiroaki, Shinoto Makoto
AAPM 67th Annual Meeting&Exhibition, the American Association of Physicists in Medicine, 2025-07-29

3. Radiopharmaceutical-free hypoxia imaging in particle therapy by means of range-verification PET: a feasibility rat study

Toramatsu Chie
63rd Annual Meeting of the Particle Therapy Cooperative Group (PTCOG 63), Marco Durante, 2025-06-04

4. Total-Body Small-Animal PET with 4-Layer DOI Detectors Enabled for Sub-Second Dynamic Imaging

Hangyu Kang, Tashima Hideaki, Wakizaka Hidekatsu, Akamatsu Go, Iwao Yuma, Toramatsu Chie, Yamaya Taiga
2025 IEEE NSS MIC RTSD, IEEE Nuclear & Plasma Sciences Society, 2025-11-07

5. Sub-second dynamic rat imaging with an ultrasensitive small animal PET scanner

Hangyu Kang, Tashima Hideaki, Wakizaka Hidekatsu, Akamatsu Go, Iwao Yuma, Toramatsu Chie, Yamaya Taiga
The 86th JSAP Autumn Meeting 2025, The Japanese Society of Applied Physics, 2025-09-09

6. Development of a high-resolution, portable, and axially long small animal PET with TOF-DOI detectors

Akamatsu Go, Ishikawa Taiyo, Yoshida Eiji, Ito Shigeki, Iwao Yuma, Tashima Hideaki, Wakizaka Hidekatsu, Toramatsu Chie, Mizuma Hiroshi, Seki Chie, Nagai Yuji, Okauchi Takashi, Minamimoto Takafumi, Yamaya Taiga
SNMMI 2025 Annual Meeting, SNMMI, 2025-06-23

7. Clinical demonstration of OpenPET: a full-ring in-beam PET for range verification in carbon-ion therapy

Yamaya Taiga, Tashima Hideaki, Toramatsu Chie, Akram Mohammadi, Iwao Yuma, Akamatsu Go, Hangyu Kang, Tajiri Minoru, Mizuno Hideyuki, Koto Masashi, Ikawa Hiroaki, Shinoto Makoto
63rd ANNUAL PTCOG CONFERENCE, PTCOG63, 2025-06-06

[ポスター発表]

1. In-beam range determination using an OpenPET system for helium, carbon, oxygen, and neon ion beams

Jiayao Sun, Masuda Takamitsu, Tashima Hideaki, Toramatsu Chie, Hamato Akram, Yamaya Taiga, Tanaka Sodai, Kasamatsu Koki, Stewart Biedeman Mein, Inaniwa Taku
IEEE MIC, IEEE, 2025-11-07

2. Radiopharmaceutical-Free Assessment of Tumor Vasculature Condition in Particle Therapy By Means of Range-Verification PET: A Feasibility Rat Study

Toramatsu Chie, Wakizaka Hidekatsu, Tashima Hideaki, Akamatsu Go, Hangyu Kang, Seki Chie, Sudo Hitomi, Iwao Yuma, Yamaya Taiga
AAPM 67th Annual Meeting&Exhibition, the American Association of Physicists in Medicine, 2025-07-27

3. Sub-second and Sub-0.5 mm Resolution PET with DOI Technology for Preclinical Research

Hangyu Kang, Tashima Hideaki, Akamatsu Go, Iwao Yuma, Wakizaka Hidekatsu, Toramatsu Chie, Higuchi Makoto, Yamaya Taiga
第65回 日本核医学会学術総会, 日本核医学会学, 2025-11-13

二次電子制動放射線計測による粒子線イメージング手法の開発

Development of Particle Beam Imaging Method Using Secondary Electron Bremsstrahlung Measurement

(25 HH033)

山口充孝^a、津田路子^a、長尾悠人^a、矢部卓也^a、神谷富裕^a、カンハンギョ^b、
水野秀之^c、坂間誠^c、田中創大^c、若月優^c、河地有木^a

M. Yamaguchi^a, M. Tsuda^a, Y. Nagao^a, T. Yabe^a, T. Kamiya^a, H. G. Kang^b,
H. Mizuno^c, M. Sakama^c, S. Tanaka^c, M. Wakatsuki^c and N. Kawachi^a

Abstract

We developed a slit-type secondary electron bremsstrahlung (SEB) camera for real-time range verification of therapeutic carbon-ion beams. The camera combines a tungsten knife-edge slit collimator (1 mm width × 40 mm length) with a GAGG(Ce) scintillator array (~20 × 20 × 1 mm³) and a TOFPET2 ASIC readout, achieving approximately 10-fold higher detection sensitivity than our previous pinhole-type camera. Performance was evaluated at the HIMAC biological irradiation room on December 17, 2025, using a 290 MeV/u ¹²C beam with 2 × 10¹⁰ ions per irradiation. PMMA range shifters (0–40 mm) were inserted in an acrylic water phantom to vary the beam range. The 1D SEB projection profiles clearly reflected beam range variations. A profile-shift-based range estimation algorithm achieved an RMSE of 0.56 mm over the full 0–40 mm range-shift span. Statistical analysis further indicated that, with approximately 10-fold improvement in detection sensitivity, range estimation uncertainty of ~3 mm (1σ) would be achievable with 10⁷ ions per irradiation—a realistic near-term target for clinical monitoring. These results demonstrate the feasibility of SEB-based real-time range monitoring and suggest clear directions for further development toward clinical application.

1. 研究の目的とバックグラウンド

粒子線がん治療において、Bragg ピークを病巣に正確に一致させるためにビームの体内飛程をリアルタイムに可視化する技術が強く求められ

ている。本研究では、治療照射と同時に発生する二次電子制動放射線 (Secondary Electron Bremsstrahlung: SEB) の検出による非侵襲的なビームイメージング手法の開発を目的とする。SEB は照射と同時に発生・検出が可能であり、比較的 low エネルギーで検出が容易なため装置の小型化に適している。ピンホール型 SEB カメラを用いた先行研究により、センチメートルオーダーの飛程変化を SEB 投影像から検出できることが示されてきた [1-4]。本年度は感度を約 10 倍向上させるため、スリット型 SEB カメラを新たに開発し、HIMAC にてその性能評価を実施した。

2. 今年度の研究内容

2025 年 12 月 17 日に HIMAC 生物照射室にてビームタイムを実施した。ビーム条件は炭素イオン線 (¹²C, 290 MeV/u) とし、入射粒子数は 1 照射あたり 2 × 10¹⁰ 個 (照射時間 60 秒) とした。ターゲットはアクリル製水ファントムとし、PMMA レンジシフタ (RS) を段階的に挿入して飛程を変化させた (0-10 mm: 1 mm ステップ、10-40 mm: 10 mm ステップ)。スリット型 SEB カメラをビーム軸から約 56 cm の距離に設置し、SEB の投影像とバックグラウンドをあわせて取得した。スリットコリメータおよび実験セットアップの外観を図 1 に示す。

3. 今年度の研究成果と解析結果

図 2 に SEB カメラにより得られた像のビーム軸方向の 1 次元投影プロファイル (1 cm ステップ) を示す。RS の増加による入射エネルギーの低下 (飛程の短縮) に伴い、プロファイルの左側のエ

ッジがビームの進行方向と逆方向にシフトする変化が明確に得られた。

飛程推定では、RS = 20 mm を基準プロフィールとしてプロフィールシフト法 [3] を適用し、0-40 mm の全レンジシフト範囲で RMSE = 0.56 mm の精度を達成した (表 1)。

臨床照射条件での推定不確かさを評価するため、取得データから統計的に低統計プロフィールを生成して解析した (表 2)。 10^8 ions では既に $1\sigma = 2.9$ mm と目標精度 (2 mm) に近い結果が得られた。より少ない粒子数 (10^7 ions) でのモニタリングを当面のターゲットとした場合、約 10 倍の感度向上によって同程度の精度が達成できると見込まれる。今後は装置の感度向上と、スキヤニング照射条件下での性能評価を進める予定である。

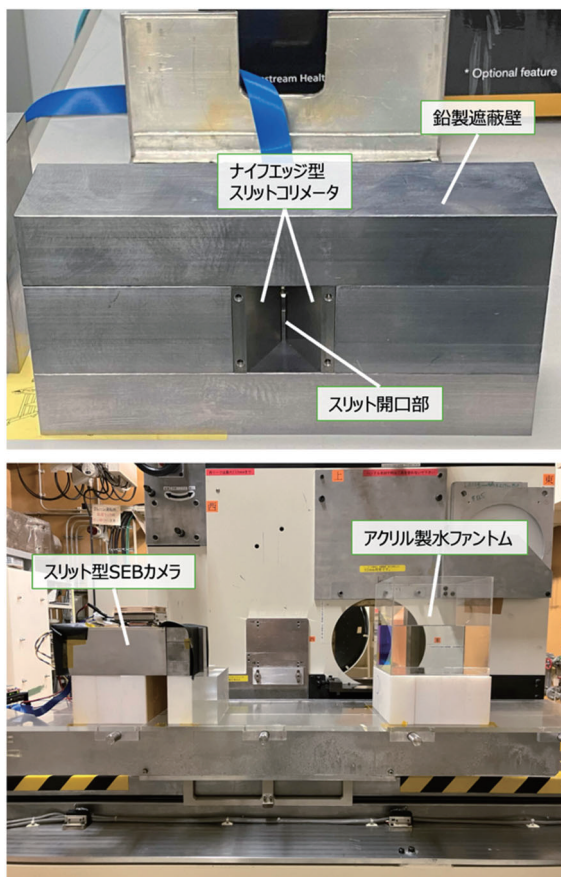


図 1. (上)タングステン製ナイフエッジスリットコリメータ。中央に幅 1 mm のスリット開口部が見える。(下)HIMAC 生物照射室における実験セットアップ。照射台の中央に水ファントムを設置し、ビーム軸に対して 90 度の方向にスリット型 SEB カメラを配置した。

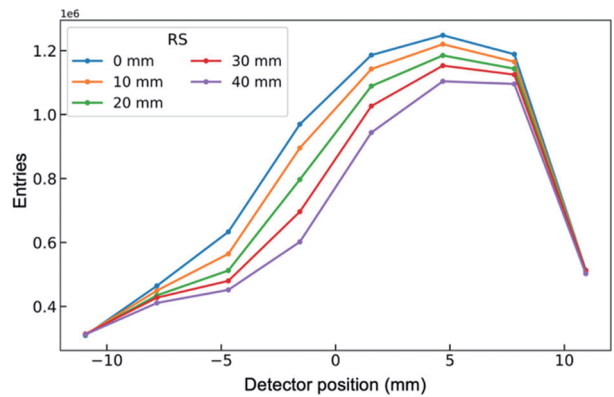


図 2. レンジシフト量を変えた際の 1 次元 SEB プロファイル (1 cm ステップ)。RS の増加 (飛程の減少) に伴い、プロフィールの左側のエッジがビームの進行方向と逆方向にシフトする。

表 1. 飛程推定結果 (RMSE = 0.56 mm)

RS (mm)	Shift (a.u.)	推定 RS (mm)
0	0.477	0.37
10	0.248	10.48
20	0.000 (ref)	20.24
30	-0.308	30.72
40	-0.630	39.74

表 2. 低統計での飛程推定不確かさ

入射粒子数	平均不確かさ (mm)	平均 RMSE (mm)
10^6	25.8	25.8
10^7	8.1	8.0
10^8	2.9	3.0

参考文献

- [1] M. Yamaguchi et al., Phys. Med. Biol. 63, 045016 (2018).
- [2] M. Yamaguchi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 64, 027001 (2025).
- [3] M. Tsuda et al., Jpn. J. Appl. Phys. 64, 047001 (2025).
- [4] T. Yabe et al., Phys. Med. Biol. 70, 115003 (2025).

^a QST 高崎量子技術基盤研究所

^b QST 量子医科学研究所

^c QST 病院

研究成果一覧

課題番号：25HH033

課題名：二次電子制動放射線計測による粒子線イメージング手法の開発

申請者（千葉地区研究協力者）：山口 充孝（水野 秀之）

(1) 原著論文

なし

(2) 国際研究集会などの Proceedings

なし

(3) 学会及び研究会の口頭発表、ポスター発表も含む

- Michiko Tsuda, Mitsutaka Yamaguchi, Yuto Nagao, Han Gyu Kang, Takuya Yabe, Eiji Yoshida, Taiga Yamaya, Makoto Sakama, Hideyuki Mizuno, Naoki Kawachi, Hiroshi Watabe: Feasibility study of secondary electron bremsstrahlung imaging with a knife-edge slit camera for range verification in carbon-ion therapy, 27th International Workshop on Radiation Imaging Detectors (iWoRID 2026), Ghent, Belgium, 2026.6.
- Mitsutaka Yamaguchi, Yuto Nagao, Michiko Tsuda, Han Gyu Kang, Takuya Yabe, Eiji Yoshida, Taiga Yamaya, Makoto Sakai, Mutsumi Tashiro, Yong-Gen Yin, Tomihiro Kamiya, Hiroshi Watabe, Naoki Kawachi: High count-rate SEB beam imaging for real-time monitoring in particle therapy using a GAGG:Ce detector and TOFPET2 ASIC, 27th International Workshop on Radiation Imaging Detectors (iWoRID 2026), Ghent, Belgium, 2026.6.

(4) その他（解説、単行本など）

なし

(5) 学位論文（博士論文、修士論文、卒業研究）

なし

Calibrations of Advanced Particle Dosimeter and Spectrometer for Heavy Ions in Space Radiation (25HH022)

Sunghwan Kim^a, Uk-Won Nam^b, Sukwon Youn^c, Woohyeong Seol^b, and Jongdae Sohn^b

^aCheongju University, ~~Department of Radiological Science~~, Cheongju 28503, Republic of Korea; ^bKorea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Republic of Korea; ^cSeoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

Abstract— This annual report summarizes heavy-ion calibration activities for the Advanced Particle Dosimeter and Spectrometer (APDS), a charged-particle module of the Lunar Vehicle Radiation Dosimeter for lunar surface radiation measurements. Following the FY2024 Engineering Model (EM) campaign, an additional HIMAC campaign was conducted in FY2025 for the Qualification Model (QM) to verify the reproducibility of the LET calibration under equivalent detector architecture and operating conditions. The FY2024 EM campaign used He, C, Si, and Fe ion beams and established the basic LET-channel response over a broad range. The FY2025 QM campaign used He, C, and Fe beams in the HIMAC BIO room under low-flux pulse-mode operation. The detector count rate was maintained at approximately 50–100 pps, and stable count-mode LET measurements were obtained without noticeable pile-up. The measured responses were in good agreement with beam information from HIMAC and with Monte Carlo-based expectations. These results confirm that the calibration procedure validated in the EM campaign remained applicable to the QM and support preparation for the final Flight Model calibration.

1. Background and Objectives

The lunar surface radiation environment is dominated by galactic cosmic rays (GCRs) and solar energetic particles (SEPs), and LET-based dosimetry is essential for evaluating both biological risk and detector response. APDS was developed as a stacked Si–CsI–Si detector system to measure charged-particle LET spectra together with proton energy spectra on the lunar surface or in lunar orbit [1], [2]. The detector concept also builds on earlier silicon photodiode performance studies for particle dosimeter and spectrometer development [3]. The front silicon sensors cover low- and high-LET regions, while the CsI and rear silicon sensor extend the response to higher deposited energies and proton spectroscopy. The purpose of the HIMAC campaign is to validate the LET response and heavy-ion characteristics of APDS under controlled beam conditions and to establish a reliable calibration basis for the final Flight Model.

the corresponding energies were C 332.0 MeV/u, Fe 418.2 MeV/u, Si 445.2 MeV/u, and He 145.2 MeV/u. PMMA degraders of different thicknesses were used to vary the incident LET at the detector. The EM campaign showed good linear relationships between measured peak channels and LET values derived from simulation, providing the principal calibration basis for APDS. The 2024 campaign also included response evaluations of the D3 CsI sensor, the D4 silicon sensor, and VETO-related characteristics. The heavy-ion LET calibration procedure and its consistency with simulation were later summarized in an IEEE Transactions on Nuclear Science paper [1].

3. Activities and Results in FY2025

The FY2025 campaign was conducted for the QM in the HIMAC BIO room on June 30–July 2, 2025. The campaign used He 150 MeV/u, C 400 MeV/u, and Fe 500 MeV/u beams; the delivered energies were He 144.0 MeV/u, C 387.5 MeV/u, and Fe 424.1 MeV/u. As in the EM campaign, PMMA degraders (0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, and 128 mm in combination) were used to modulate the LET range. The measurements were performed in pulse mode with a beam diameter of about 10 cm. Because APDS measures LET in count mode, low-flux operation was essential to suppress pile-up. During the beam tests, the current was adjusted so that the detector count rate remained at approximately 50–100 pps, and a representative monitored operating point of 49 pps was recorded with a plastic scintillation flux counter.

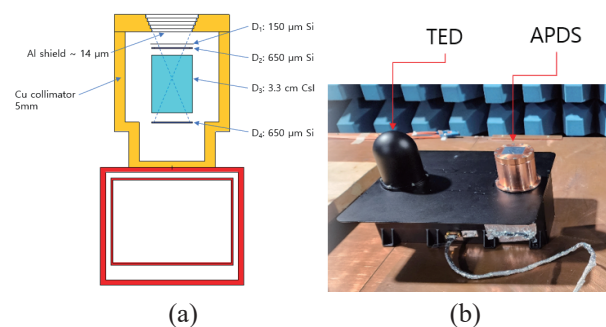


Fig. 1. (a) Conceptual Block Diagram and (b) Photograph of the Space Radiation Detector in the 2025 HIMAC experiment.

2. Summary of the Previous Year

In FY2024, the EM was calibrated in the HIMAC BIO room using C 350 MeV/u, Fe 500 MeV/u, Si 490 MeV/u, and He 150 MeV/u beams. Under actual beam delivery,

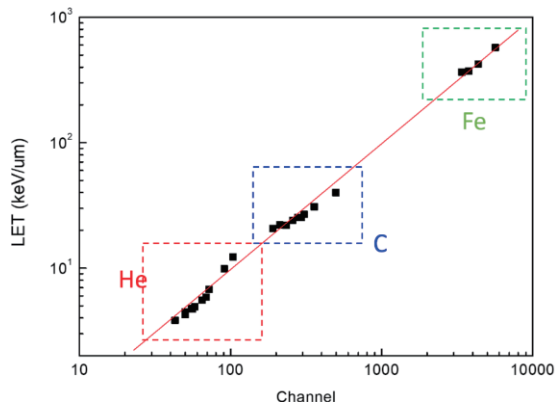


Fig. 2. LET calibration curve of the QM model obtained in the 2025 HIMAC experiment.

Figure 2 presents the QM LET calibration curve obtained in the FY2025 campaign. The He, C, and Fe datasets cover low-, intermediate-, and high-LET regions continuously, indicating that the same calibration concept established in the EM campaign remained valid for the QM hardware. The measured LET responses were generally consistent with the HIMAC beam information and with Monte Carlo-based expectations. Accordingly, the main significance of FY2025 was not to establish a new measurement principle, but to demonstrate reproducibility of the calibration method at the QM level using the same detector concept, gain strategy, PMMA-based LET modulation, and low-flux operating scheme.

4. Technical Interpretation for FM Design

The FY2024 and FY2025 results should be interpreted together when defining the final FM configuration. First, the 2024 EM campaign showed that the APDS D1 LET calibration was highly linear and that the D3(CsI) and D4(Si) channels could provide particle-response information beyond the primary LET measurement. Second, the $650\ \mu\text{m}$ Si branch may saturate for some very high-energy-deposition Si and Fe conditions, the scintillator channel requires final proton-beam validation because of quenching, and VETO counts depend on incidence angle and detector asymmetry. These results identify the design and analysis items to be finalized before FM delivery [1], [2].

Within that framework, the value of the FY2025 QM experiment is that it verified reproducibility of the detector behavior under beam conditions already known to be meaningful. The QM campaign did not show evidence of unexpected operational instability, and the measured LET trend remained aligned with beam information and Monte Carlo results. For FM preparation, this means that the validated low-flux operating window, the heavy-ion measurement sequence, and the basic interpretation of low-LET He points and higher-LET C and Fe points can be adopted with confidence. The remaining work is therefore concentrated on optimization rather than on redefinition of the detector concept.

5. Future Plans

The next step is calibration of the final upgraded Flight Model. The FM uses the same basic detector principle, structure, and signal-processing approach as the EM and QM units; therefore, the beam conditions and analysis procedures already validated in FY2024–FY2025 can be transferred directly to the FM stage. Future work will focus on final gain optimization, completion of heavy-ion response maps, and execution of the FM calibration campaign under the same low-flux HIMAC conditions. In addition, proton-beam verification of the scintillator response remains important for final validation of energy reconstruction because scintillator quenching depends on particle type and energy.

From the mission perspective, the verified QM behavior is important because LET-based dosimetry on the lunar surface must operate over wide particle and energy ranges while preserving stable low-rate counting. The 2024–2025 campaigns together now provide a practical chain of evidence: the EM campaign established the underlying calibration architecture across a broad heavy-ion range, and the QM campaign showed that this architecture can be reproduced in upgraded hardware under realistic HIMAC operations [1], [2]. This reduces technical risk for the FM stage and improves confidence in eventual derivation of absorbed dose, dose equivalent, and charged-particle spectral information during lunar surface operations. In addition, on-orbit operation of a related Si-based dosimeter has already demonstrated the practical derivation of dose-related quantities in space, further supporting the mission relevance of the present detector development [4]. The requested final FM campaign should therefore be viewed as a closing calibration step rather than an exploratory experiment.

References

- [1] S. Youn, U.-W. Nam, S. Kim, B. Kim, H. Kim, H. Park, W.-K. Park, J. Sohn, C. K. Sim, Y.-J. Choi, I. Jun, and S.-J. Ye, "Calibration of Silicon-Based Detectors to Measure Lunar Surface Particles Using Heavy Ion Beams," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 72, no. 11, pp. 3587–3596, 2025.
- [2] S. Youn, *Development of Si-based Particle Detectors to Measure Space Radiations in Low-Earth Orbit and Lunar Surface*, Ph.D. Dissertation, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University, Feb. 2026.
- [3] B. Kim, U.-W. Nam, S. Kim, S. Youn, W.-K. Park, J. Sohn, H. J. Kim, S.-W. Lee, J. Hwang, S.-J. Ye, I. Jun, and Y.-J. Choi, "A Study on the Performance of a Silicon Photodiode Sensor for a Particle Dosimeter and Spectrometer," *Sensors*, vol. 21, no. 23, 8029, 2021.
- [4] U.-W. Nam, W.-K. Park, S. Youn, J. Kwak, J. Sohn, B. Moon, J. Lee, Y.-J. Choi, J. Kim, S. Kim, H. Kim, H. Park, S.-J. Ye, H. Park, and T. Jang, "Initial Results of Low Earth Orbit Space Radiation Dosimeter on Board the Next Generation Small Satellite-2," *Journal of Astronomy and Space Sciences*, vol. 41, no. 3, pp. 195–208, 2024.

List of Publications for HIMAC Annual Report (25HH022)

1. Journal publications with peer review

S. Youn, U.-W. Nam, S. Kim, B. Kim, H. Kim, H. Park, W.-K. Park, J. Sohn, C. K. Sim, Y.-J. Choi, I. Jun, and S.-J. Ye, "Calibration of Silicon-Based Detectors to Measure Lunar Surface Particles Using Heavy Ion Beams," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 72, no. 11, pp. 3587–3596, 2025.

2. Dissertation

S. Youn, *Development of Si-based Particle Detectors to Measure Space Radiations in Low-Earth Orbit and Lunar Surface*, Ph.D. Dissertation, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University, Feb. 2026.

炭素線照射した脂質中に生成するフリーラジカルの定量とその反応進行過程の解析
Quantification of Free Radicals Generated in Lipids by Carbon-Ion Irradiation and Analysis
of Their Reaction Kinetics
(25HH013)

上野恵美^a、荘司好美^b、伊藤紘^b、中西郁夫^b、松本謙一郎^a
M. Ueno,^a Y. Shoji,^b H. Ito,^b I. Nakanishi,^b and K. Matsumoto^a

Abstract

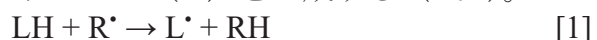
Just as radiation ionizes water molecules, it also ionizes lipid molecules, resulting in the formation of lipid free radical species (L[•]). Generation of L[•] is simply a trigger of lipid peroxidation chain reactions. However, the radiation-induced generation of L[•] and its subsequent reactions in the lipid phase has not been well investigated.

Fresh and aged corn oil samples were irradiated with 128 Gy X-ray or carbon-ion beam at several different LET (13, 20, 40, 60, 80, and >100 keV/μm) under aerobic or hypoxic conditions. The yields of TBARS induced in corn oil samples were measured.

Radiation-induced TBARS generation in fresh corn oil was not observed. TBARS generation in aged corn oil was slightly increased by irradiation. Since LET-dependent increasing of TBARS generation was reported in an experiment using liposome system, water-derived free radicals are probably required for TBARS generation.

1. 研究の目的とバックグラウンド

細胞は細胞質と細胞膜で形成されており、すなわち水相と油相によって構成されている。生体膜脂質は細胞の乾燥重量の5~10%を占め、細胞構造を維持するだけでなく、膜タンパク質が機能するための場でもある。生体膜脂質には不飽和脂肪酸が多く含まれ、その活性メチレン基に存在する水素原子は、ヒドロキシルラジカル (•OH) やヒドロペルオキシルラジカル (HO₂•) などのフリーラジカル種 (free radical species: FRS) によって容易に引き抜かれる。FRS (R[•]) は不飽和脂肪酸から水素原子を引き抜き、脂質フリーラジカル (L[•]) を生成する (式1)。



L[•]は酸素 (O₂) と反応して脂質ペルオキシルラジカル (LOO[•]) を形成する (式2)。さら

に、LOO[•] は周囲の不飽和脂肪酸分子から水素原子を引き抜き、脂質ヒドロペルオキシド (LOOH) を生成するとともに新たな L[•] を生成する (式3)。このようにして脂質過酸化の連鎖反応が開始される。



そのため生体膜脂質は、酸化ストレスの主要な標的として広く認識されている。

放射線が水分子を電離するのと同様に、脂質分子も電離され、その結果として L[•] が生成する。L[•] の生成は、前述したような脂質過酸化連鎖反応 (式1~3) を引き起こす。しかしながら、放射線によって誘発される L[•] の生成およびその後の脂質相における反応については、これまで十分に研究されてきたとは言い難い。放射線の主要な標的分子は長らく DNA と考えられてきたが、近年、放射線の生物影響を理解する上で生体膜脂質の脂質過酸化の重要性が増している。放射線によって誘導される化学反応が生物学的影響へ進行する過程を理解するためには、L[•] の定量的測定と化学量論的な反応解析が必要である。

2. 昨年度までに得られている結果

2020年度の19H426課題ではリポソーム懸濁液、つまり水と油が共存する状態に炭素線を照射し、脂質膜中に生じたTBARS (チオバルビツール酸反応性物質) を測定した。その結果、LETが大きくなるにつれて脂質の過酸化生成が多くなる傾向が見られたが、大気条件下と低酸素条件下での照射では差が見られなかった。

2021年度は、EPRスピンプローブ法を応用して放射線によりコーン油中に生成するL[•]の検出を試みた。安定ニトロキシルラジカルである carboxy-PROXYL を含むコーン

油に、低酸素条件下で放射線を当てた時に生じる carboxy-PROXYL の EPR シグナルの減衰量に基づいて、コーン油中に生じた L[•] 量を評価した。その結果、L[•] 生成量は X 線よりも LET の低い炭素線が多く、また炭素線では LET の増加とともに L[•] 生成が減少することが分かった。しかし反応溶液が不安定でその定量は困難であった。

そこで 2022 年度は、 α -phenyl-*N*-t-butylnitron (PBN) をスピントラップ剤として EPR スピントラップ法による L[•] 生成の検出を試みた。スピントラッピング法では L[•] の定量が可能になり、スピンプローブ法と同様に、L[•] 生成量は X 線よりも LET の低い炭素線が多く、また炭素線の LET の増加とともに少なくなる結果が得られた。

2023–2024 年度は、X 線および炭素線がコーン油中に生成する L[•] の局所生成濃度の評価を試みた。その結果、L[•] の局所生成濃度は、どの場合も 338 mM 以上 (1.7 nm 以下の分子間距離に相当) であることが予想された。

3. 今年度の研究内容

本研究では、コーン油に炭素線を照射して生じる TBARS を定量した。

開封後 3 年以上経過した比較的古いコーン油と開封後 1 年未満の比較的新しいコーン油を用意し、酸素透過性の PE 製の袋にコーン油をそれぞれ約 600 μ L 封入した。低酸素の照射条件では、PE 製の袋に封入した試料を酸素吸収剤および酸素指示薬とともに更に酸素非透過性の加工を施された PE 製の袋に封入した。試料に X 線あるいは LET の異なる (13, 20, 40, 60, 80, >100 keV/ μ m) 炭素線 (290 MeV/nucleon) を照射した後、チオバルビツール酸 (TBA) による比色法により TBARS を測定した。

コーン油試料 150 μ L をエタノール・ジエチルエーテル (1:1) 混合溶媒 600 μ L で希釈した。希釈したコーン油試料 200 μ L に、8.1% SDS 200 μ L、20%酢酸 1.5 mL、0.67% TBA 1.5 mL を加えて混合し、95 $^{\circ}$ C で 60 分間加熱した。試料を氷冷した後、室温で milli-Q 水 1.0 mL と *n*-ブタノール・ピリジン (15:1) 混合溶液を加えて激しく振盪して、

TBARS と TBA の反応で生じた赤色色素を *n*-ブタノール・ピリジン側へ抽出した。1000 \times g で 30 分間遠心し、上層 (*n*-ブタノール・ピリジン) を取り 532 nm の吸光度を測定した。標準赤色色素のモル吸光係数 1.56×10^5 M⁻¹cm⁻¹ を用いて試料中の TBARS 量を換算し求めた。

4. 今年度の研究成果と解析結果

比較的新しいコーン油試料では、照射後の TBARS 生成が殆ど生じなかった (Fig. 1 上)。比較的古いコーン油では、元々の TBARS 量が新しいものに比べて多く、また、照射後に若干ではあるが TBARS 量の増加する傾向が見られた (Fig. 1 下)。リポソームの系では LET に依存する TBARS 生成の増加が明らかに観察できたが、今回、新しいコーン油では TBARS 生成が確認できず、古いコーン油でも TBARS 生成の増加は若干であり、LET 依存性も明確でないことから、TBARS 生成には水中に生成する FRS の何らかの関与が必要であろうと考えられた。

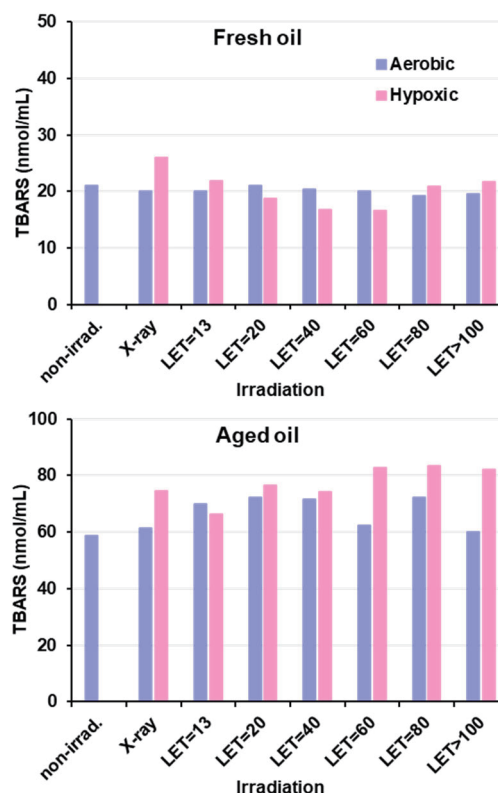


Fig. 1. Amounts of TBARS generated in fresh or aged con oil samples irradiated by X-ray or carbon-ion beam.

- 放医研規制科学障害分子機構
- 量子生命研量子生命スピン量子レドックス

超音波エコーを利用した水中における重粒子線飛跡可視化の研究
Example of Report on the Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC
(25HH019)

小林正規^a、奥平修^a、鹿園直哉^b、森林健悟^b、寺沢和洋^c、小平聡^d

M. Kobayashi^a, O. Okudaira^a, N. Shikazono^b, S. Kodaira^b and K. Terasawa^c

Abstract

We investigated the interaction between heavy-ion beams and pulsed ultrasound in water. Previously, 500 MeV/n iron (Fe) ion irradiation at HIMAC revealed bright, point-like echoes near the Bragg peak. We proposed a model where radiation-induced microscopic voids serve as cavitation nuclei that grow during the negative-pressure phase of ultrasound. This work was published in JJAP, demonstrating quantitative agreement between a probabilistic model and experimental data.

To further validate this mechanism, we conducted comparative experiments using a carbon (C) ion beam at Yamagata University. Unlike the Fe-ion experiments, no significant echo signals were observed. We attribute this difference to the lower Linear Energy Transfer (LET) of C-ions. The energy density deposited by C-ions at the track end is likely insufficient to form "voids" large enough to exceed the cavitation threshold under the applied ultrasound pressure. These results strongly suggest that radiation-induced cavitation is an LET-dependent threshold phenomenon, providing critical insight into the physical processes occurring at the end of heavy-ion tracks.

1. 研究の目的とバックグラウンド

本研究の目的は、水中を通過・停止する重粒子線が引き起こす電離相互作用以外の物理現象、特に微小気泡（キャビテーション核）の生成メカニズムを解明し、これを利用した飛跡の可視化技術を確立することである。これまでの研究により、HIMACの鉄（Fe）イオンビーム照射時にブラッグピーク付近で特異な輝点状エコーが観測されているが、その発生条件の詳細な検討が必要とされている。

2. 昨年度までに得られている結果

昨年度は、水中を通過する重粒子線がその停止点（ブラッグピーク）付近で引き起こす物理現象を解明するため、HIMACにおける鉄（Fe）イオン照射実験の結果を体系化し、その成果を学術雑誌 Japanese Journal of Applied Physics (JJAP) に発表した（論文タイトル：Visualization of Heavy Ion Particle Bragg Peaks in Water by Ultrasound Imaging）。主要な成果は以下の通りである。

① 鉄イオン照射による輝点エコーの観測と可視化

500 MeV/n の Fe イオンビームを水中に照射し、診断用パルス超音波（3.5 MHz）を同期させて重畳した結果、超音波画像上のブラッグピーク付近において、特異な輝点状のエコー（Bright-spot echoes）が繰り返

し観測されることを確認した。輝点の発生密度分布は、線量計で測定したブラッグカーブと良好な一致を示し、超音波によって重粒子線の停止位置をリアルタイムで画像化できる可能性を実証した。

② 放射線誘起キャビテーション核の物理モデルの構築

本現象のメカニズムとして、重粒子が水中で停止する直前の極めて高いエネルギー付与（LET）により形成されるナノスケールの「微小空洞（voids）」が、超音波パルスの負圧位相においてキャビテーション核として機能し、急速に成長・崩壊することで音響信号を発するという物理モデルを提案した。

③ 確率論的アプローチによる定量的検証

提案したモデルの妥当性を検証するため、ビームの停止分布と超音波負圧領域の空間的・時間的な重なりに基づく確率論的な計算を行った。その結果、1フレームあたりの輝点発生数の推定値（約 2.4 個）は、実験データ（約 3.7 個）とオーダーにおいて一致した。これにより、本現象が特定のエネルギー付与条件（高 LET）と超音波の負圧条件の相互作用に起因することを定量的に裏付けた。

3. 今年度の研究内容および成果

今年度は HIMAC と山形大学東日本重粒子センターで実験を行った。

3. 1. HIMAC での実験

HIMAC では、Fe ビーム粒子を使って、フラックスを細かく変更して超音波エコー画像の Fe 粒子による輝点を計数できるように（つまり、隣の輝点と重ならない程度にばらついているように）見える条件を探してフラックスに対する輝点の数を比較できるようなデータを取得した。それらの結果については、前年度報告した内容（参考文献 1）と併せて IDL のライブラリで用意されている輝点を検出する関数を使った輝点計数プログラムで超音波エコー動画をフレームに分解して 1 フレームごとに輝点の計数を行った（図 1）。この結果は参考文献 2) で報告した。その中でビームフラックスとの比較の結果を考察して、超音波エコー画像中の輝点は、一個の Fe ビーム粒子が、超音波診断装置が発する超音波パルスの負圧部分で止まってブラッグピークに相当する大きなエネルギー付与によるものだと、文献 1) の内容について放射線化学分野の先行研究を引用して考察を深めて定量的に評価した。その内容は引用文献 3) で報告している。

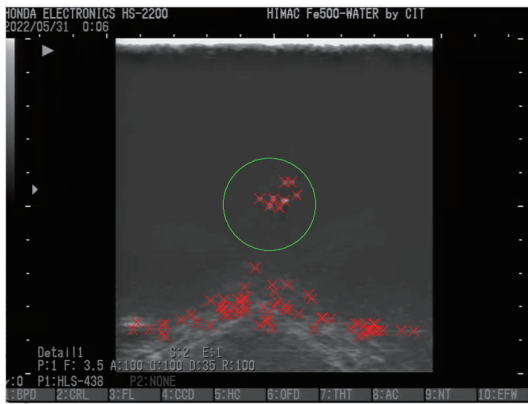


図1 超音波エコー画像中の輝点を検出プログラムで検出した画像例。赤いXが検出された輝点。

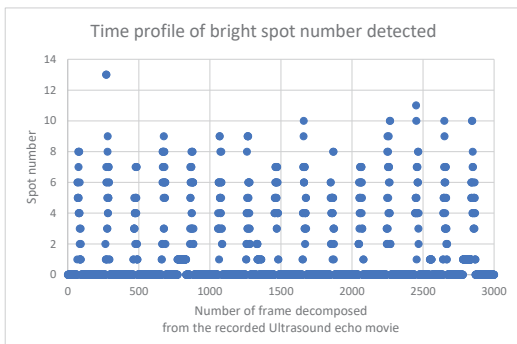


図2.検出された輝点の数を時系列に並べた図。ビーム強度のプロファイルに一致している。

3. 2. 山形大学での実験

一方で、山形大学の東日本重粒子センターでは炭素ビームを HIMAC 実験と同様に水槽に照射して超音波エコー画像を取得した。ビーム条件はエネルギーが 290MeV/u、ビームスポットは 2~8mmφ、ビーム強度は $1.4E+7 \sim 5.7E+8$ pps の間に変化させながら照射した。しかしながら、結果として HIMAC での Fe ビーム粒子に見られた輝点は全く観測されなかった。



図3 山形大学東日本重粒子センターの加速器を使った実験風景。

4. 今後の展望

今後は、鉄粒子と炭素粒子の中間の LET を持つアルゴン粒子ビームを用いた照射実験を計画している。本研究のこれまでの結果から、放射線誘起キャビテーションの発生には LET に依存したしきい値の存在が強く示唆されている。アルゴン粒子での検証により、エコー信号の有無や発生頻度の変化を詳細に評価することで、核形成に資する境界条件を特定し、現象の物理的メカニズムのさらなる解明を目指す。

謝辞

本研究は、国立放射線医学総合研究所 (NIRS) の「千葉重イオン医療加速器 (HIMAC)」を活用した共同研究プロジェクト「NIRS-HIMAC 重イオン研究プロジェクト」の一環として実施されました。加速器の運転を担当して下さったスタッフの皆様を中心に感謝申し上げます。また、本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (助成番号: JP21K18148) の支援を受けて実施されました。

参考文献

- 1) K. Moribayashi, H. Matsubara, Y. Yonetani, and N. Shikazono, AIP Conf. Proc. 2756, 030001 (2023).
- 2) Kobayashi M., Okudaira O., Shikazono N., Terasawa K., Kodaira S. and Okada N. Proc. the 46th Symp. Ultrasonic Electronics (Kunibiki Messe (Shimane Prefectural Convention Center), Matsue, Shimane, Japan, 12–14 November, 2025) 3P2-3
- 3) M. Kobayashi et al., Japanese Journal of Applied Physics 64(3) 03SP26-03SP26 (2025).
- 4) Masanori Kobayashi et al 2026 Jpn. J. Appl. Phys. 65 02SP20

-
- a. 千葉工業大学
 - b. 量研量子生命科学研究所
 - c. 慶応義塾大学
 - d. 量研放射線医学研究所

覧 (原著論文等)

- ・ Masanori Kobayashi, Osamu Okudaira, Naoya Shikazono, Kazuhiro Terasawa, Satoshi Kodaira, Nagaya Okada, Quantitative analysis of Fe ion interactions with the negative pressure phase of ultrasound pulses in water, Japanese Journal of Applied Physics 65(2) 02SP20, 2026年月31日.

(Proceedings等)

なし

(学会及び研究会口頭発表等)

- ・ 小林正規、奥平修、鹿園直哉、寺沢和洋、小平聡、岡田長也、「超音波イメージングによる水中の粒子線飛跡の可視化」、第46回超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム (USE)、2025年11月12日 [水] ~ 14日 [金]、くにびきメッセ (島根県松江市) 講演番号 3P2-3.

(その他)

なし

(学位論文)

なし

Society5.0 に向けた革新的耐宇宙線デバイス技術の開発
Development of Innovative Radiation-Hardened Device Technologies
toward Society 5.0
(25HH002)

古嶋 樹希也^a、土屋 佑太^a、竹内 浩造^a、坂本 敬太^a、岩田 愛美^a、高橋 美沙^a、
鈴木 隆博^a、新藤 浩之^a、牧野 高紘^b、岩田 佳之^b、村上 健^b
J. Furushima^a, Y. Tsuchiya^a, K. Takeuchi^a, K. Sakamoto^a, M. Iwata^a, M. Takahashi^a,
T. Suzuki^a, H. Shindou^a, T. Makino^b, Y. Iwata^b, and T. Murakami^b

Abstract

We conducted heavy-ion irradiation testing on atom switch-based Field-Programmable Gate Array (AS-FPGA) under high-temperature conditions to evaluate its resistance to atom switch rupture. As a result, atom switch rupture was not observed. Heavy-ions irradiation has been revealed that the radiation effect of AS-FPGA.

1. 背景と研究目的

Society5.0 に向けて衛星搭載機器の技術革新が進む中で、我々は衛星、宇宙科学・探査、宇宙輸送の各分野で、より挑戦的なミッション達成のため戦略的に重要になる計算機デバイスやパワーデバイスの技術開発を進めている。昨年度までの報告では、世界でまだ知見の少ない化合物半導体 (SiC、GaN) の照射効果の観測と破壊メカニズムの解明の研究状況を紹介します[1]。本研究では、パワーデバイスの他に計算機デバイスの研究も進めており、本稿ではこの計算機デバイスに関する HIMAC を活用した新しい成果が得られたので報告する。計算機デバイスでは、AI やエッジコンピューティング等で処理能力向上のため、半導体微細化が進められているが、一方で駆動電圧の低下や、トランジスタ・メモリセルの蓄積電荷量減少によって放射線影響を受けやすくなってきている。

国産の新しい宇宙用半導体デバイス技術として最近着目しているのが、銅イオンの架橋形成・切断によって半導体デバイス内部の配線接続・切り離しを繰り返し行うことが出来る、原子スイッチと呼ばれる技術である。この模式図を図1に示す。原子スイッチは、ルテニウムと銅でポリマー固体電解質を挟んだ構造となっており、ここにある一定の電圧を印加することで接続・切り離しの状態を変化させることが出来る。この原子スイッチを応用した半導体デバイスがナノブリッジ FPGA (Field programmable Gate Array の略。図2) である。このデバイスでは、従来からよく知られる SEL (Single Event Latchup の略。内部の寄生サイリスタが放射線による発生電荷でオンし、大きな電流が流れ続け、最終的には焼損に至る事象) の他に、原子スイッチ部に放射線粒子が衝突することによる破断や溶融、一過性のトランジェントノイズ発生により意図せずスイッチ部の状

態が変化することなどが懸念される。当研究チームでの過去の論文報告[2]では、常温 (25℃) での実験結果にとどまっているが、前述の影響は高温条件でより発生しやすいと予想され、この検証が必要である。本報告では、この高温環境下でのナノブリッジ FPGA の重イオン耐性評価を行い、発現する事象の識別と解析を行った。

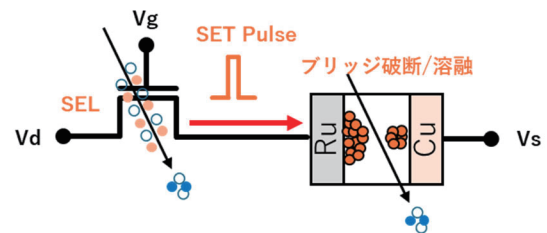


図1 原子スイッチ回路で懸念される放射線影響

2. 今年度の研究内容

2-1. 対象デバイス

本研究での評価対象であるナノブリッジ FPGA (図2) は、65nm CMOS プロセスを用いて製造され、トランジスタ上層部のスイッチ素子として多数の原子スイッチが埋め込まれた構造になっている (図3)。このデバイス構造の評価では、配線層、原子スイッチ、トランジスタ部をすべて貫通させ、かつデバイス内部での LET 変化もなるべく小さくなるような充分な飛程 (最低でも 100um 超) をもつ重粒子が必要であり、HIMAC での照射が不可欠である。

2-2. 重粒子照射試験条件

本試験で使用した核種を表1に、実験条件を表2に示す。照射中は、デバイスの電源電流値の変化や、回路機能の変化をモニタし、これらによって SEL の発生やナノブリッジ部での異常発生有無を識別することとした。

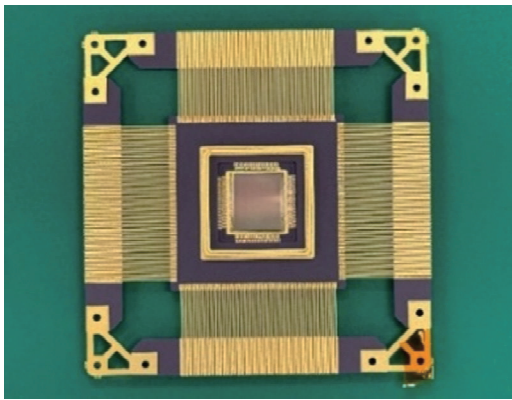


図2 ナノブリッジFPGA (NBS6503H)

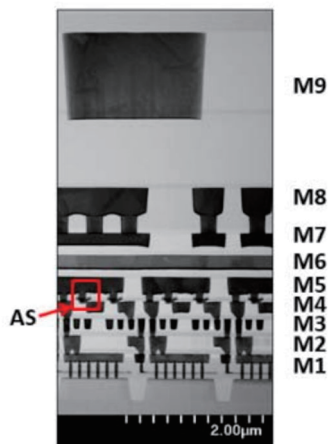


図3 ナノブリッジ部の断面 SEM[3]

2-2. 重粒子照射試験条件

本試験で使用した核種を表1に、実験条件を表2に示す。照射中は、デバイスの電源電流値の変化や、回路機能の変化をモニタし、これらによってSELの発生やナノブリッジ部での異常発生有無を識別することとした。

表1 使用核種

核種	エネルギー [MeV]	LET@チップ表面(Si) [MeV/(mg/cm ²)]	飛程(Si) [μm]
Xe	4166	34.2	380
	8124	22.5	1010
	22040	11.7	4990

表2 試験条件

No.	デバイス温度 [°C]	LET(Si) [MeV/(mg/cm ²)]
1	85	34.2
2	85	22.5
3	85	11.7
4	65	11.7
5	45	11.7
6	24	34.2
7	24	22.5
8	24	11.7

2-3. 重粒子照射試験結果

重粒子照射の結果、すべての条件において、照射

後の回路動作も正常に保たれており、このことから、懸念されたナノブリッジ部の破断や溶融、誤書き込みは、高温条件下でも発生しないことを確認した。

一方、SELに関しては、図4に示すような特性で観測された。SELは、従来からよく知られている通り、温度依存性が観測され、高温ほど発生断面積が大きくなる傾向が分かる。また、LET上昇に伴い増大した反応断面積の最大値（飽和反応断面積）は $5.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{device}$ であり、この面積は、ナノブリッジFPGAに内蔵されているBRAMと呼ばれるメモリ回路部の面積 $1.6 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ に相当し、このことから、SELはBRAM回路部で発生したものと分析された。

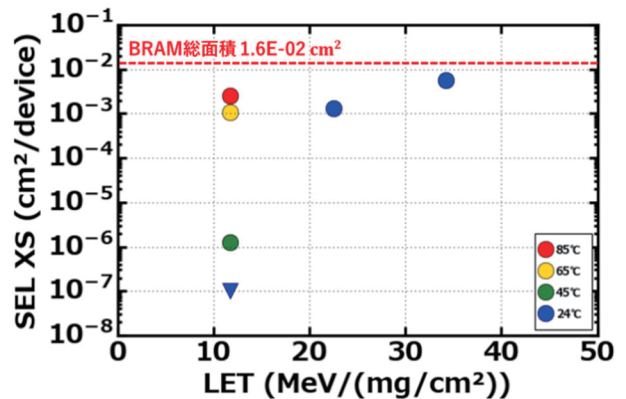


図4 LET vs SEL 発生反応断面積

3. まとめ

ナノブリッジFPGA (NBS6503H) に対して重粒子照射試験を実施し、高温環境下での照射効果の識別と解析を行った。その結果、懸念されたナノブリッジ部の破断や溶融、誤書き込みは観測されず、宇宙空間での使用に問題は無いことが確認された。SELに関してはBRAM回路部に限定的に観測され、このことから、実用化に向けてはBRAM部でのSELを抑制する対策を講じるが必要と分析された。

最後に、実験実施で技術支援いただいた三菱テクニカ殿、また、HIMACでの実験機会をいただいたQST量子医科学研究所殿に厚く御礼申し上げます。

4. 参考文献

- [1]. M. Iwata et al., IEEE Trans Nucl Sci, vol.72, No.8, 2025
- [2]. K. Takeuchi et al., IEEE Trans Nucl Sci, vol.66, No.7, 2019
- [3]. R. Nebashi et al, 30th Int. Conf. on Field-Programmable Logic and Applications (FPL), 2020

- a. 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門
Research and Development Directorate, JAXA
M. Iwata was formally with JAXA
- b. 量子科学技術研究開発機構 量子医科学研究所
Institute for Quantum Medical Science, QST

重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成とその変成
Formation and alteration of organic compounds in possible space environments
by heavy ion bombardment
(25HH004)

小林憲正^{a,b}, 癸生川陽子^b, 中島幹二^b, 柴田裕実^c, 小平聡^d

K. Kobayashi^{a,b}, Y. Kebukawa^b, K. Nakajima^b, H. Shibata^c and S. Kodaira^d

Abstract

A wide variety of bioorganic compounds, including amino acids, have been detected in carbonaceous chondrites and carbonaceous asteroids. Several hypotheses have been proposed for the formation of these organics. One possible scenario is their formation in the ice mantles of interstellar dust particles. In this study, we irradiated ice mixtures of HCHO, CH₃OH, NH₃, and H₂O (interstellar ice analogs) with carbon ions (290 MeV/u) from HIMAC. Amino acid precursors were detected, and their molecular weights were estimated to be on the order of ~1000. This result strongly suggests that amino acids are not formed via the Strecker synthesis pathway under these conditions, but rather through complex precursors with relatively large molecular weights formed in interstellar ice. It would be of interest to examine the roles of such interstellar-originated complex organics in reactions occurring within the interiors of asteroids in the early solar system.

1. 研究の目的とバックグラウンド

炭素質コンドライトや、小惑星 Ryugu や Bennu からサンプルリターンされた試料中にアミノ酸・核酸塩基・糖などが検出され、それらと地球上での生命の誕生との関連が議論されている。これらの生体有機分子の生成の場としては、分子雲中の星間塵アイスマントル中や小惑星内部などが考えられる。前者の場合は宇宙線や紫外線、後者の場合は、²⁶Al からのガンマ線や熱などが重要なエネルギーと考えられる。近年、後者を模擬した実験で、HCHO, CH₃OH, NH₃, H₂O の混合溶液に γ 線を照射することにより、アミノ酸前駆体(Kebukawa et al., 2022)や糖(Abe et al., 2024)が効率的に生成することがわかった。一方、星間を模擬して CO, NH₃, H₂O 混合気体に陽子線照射した場合、高分子態のアミノ酸前駆体が生成する(Takano et al., 2004)。これを HCHO, CH₃OH, NH₃, H₂O 混合溶液に加えると、生成するアミノ酸(前駆体)の量や多様性が大

幅に増すことが示された(Ikeda et al, 2006)。つまり、星間で生成した有機物が小天体内での有機物生成にも大きく影響することが示唆された。

本研究では、分子雲中の星間塵アイスマントル中で宇宙線により生成するアミノ酸前駆体について、より星間に近い環境での模擬を行うため、模擬星間塵アイスへの重粒子線照射を行い、生成物のキャラクタリゼーションを行った。

参考文献

Abe, S. et al., *ACS Earth Space Chem.*, **8**, 1737-1744 (2024).

Ikeda, I. et al., *Int. J. Astrobiol.*, in press (2026).

Kebukawa, Y. et al., *ACS Cent. Sci.*, **8**, 1864-1871 (2022).

Takano, Y. et al., *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **77**, 779-783 (2004).

2. 前年度までにえられている結果

模擬星間物質(メタノール・アンモニア・水の混合溶液)に室温、もしくは液体窒素温度で炭素ビーム(290 MeV/u)などを照射した。生成物を酸加水分解後、アミノ酸分析システムによりアミノ酸の定量を行ったところ、各試料からグリシンなどのアミノ酸の前駆体(加水分解後にアミノ酸となる分子)の生成が確認された。混合溶液の組成を、より星間塵環境に近づけた実験では、メタノールやアンモニアの濃度を下げることによりグリシンのG値は減少するものの、モル比 10:1:37 のものでもグリシンの生成が確認できた。液体窒素温度(固相)での照射によっても、室温での照射の場合と同様、アミノ酸前駆体の生成が確認された。アミノ酸前駆体の候補にはアミノニトリル類やヒダントイン類が提唱されてきたが、重粒子線照射物中でのこれらの生成は限定的であることがわかった。

3. 今年度の研究内容(下線部が本年実施したHIMAC照射実験)

1) 模擬星間アイスへの種々の炭素線照射によるアミノ酸前駆体合成とその解析:

実際の星間塵アイスマントルの組成を参考

に、種々の組成の CH_3OH , HCHO , NH_3 , H_2O の混合溶液を液体窒素中で凍結したものへの炭素線(290 MeV/u)照射を行った。吸収線量は 13-14kGy である。その生成物の解析を陽イオン交換 HPLC などにより行った。

2) 有機物の重粒子線照射に対する安定性:

星間での有機物の安定性を評価するため、ヒドロキシカルボン酸類(乳酸など)への重粒子線照射(吸収線量 14kGy)を行い、その安定性を評価した。

4. 今年度の研究成果と解析結果

1) 模擬星間アイスへの種々の炭素線照射によるアミノ酸前駆体合成とその解析:

CH_3OH , NH_3 , H_2O の混合物(モル比 1:1:2.8)のを液体窒素(77K)中で凍結し、炭素線(290 MeV/u)照射を行った。生成物をそのまま分析した場合、痕跡量のアミノ酸しか検出されなかったが、加水分解後には種々のアミノ酸が定量された。

加水分解前の試料を、限外濾過膜(分画分子量 2000)で分離し、上層・下層を加水分解後に分析したところ、両者から種々のアミノ酸が検出された。このことは、重粒子線照射により分子量 1000 を超えるような高分子態のアミノ酸前駆体が生成したことを示す。

氷の組成を、初期太陽系の種々の環境を想定したものにした実験も行った。たとえば、2.4-2.8 AU では、 CH_3OH および NH_3 の雪線内のため、これらの割合が減少するため、氷の組成を $\text{HCHO}:\text{CH}_3\text{OH}:\text{NH}_3:\text{H}_2\text{O}=2.4:2.34:0.9:100$ とした。炭素源、窒素源のモル分率が低くなるため、生成するアミノ酸(前駆体)量は減少するが、種々のアミノ酸の生成が確認できた。このことは分子雲内部のみならず、初期太陽系内においても太陽をとりまく円盤内で宇宙線によりアミノ酸前駆体が生成しうることを示す。

2) 有機物の重粒子線照射に対する安定性:

星間での有機物の安定性を調べるため、モデル化合物としてポリヒドロキシカルボン酸類(ポリ乳酸など)を用いた。重粒子線照射(炭素線, 14 kGy)の他、 γ 線照射、紫外線照射も行い、比較したところ重粒子線の効果が大きいことがわかった。このことは、有機物の惑星間移動を考える時、宇宙線の影響を考慮する必要があることを示唆する。

5. 今後の展望:

従来、分子雲内部での有機物生成に関して、主に紫外線の効果が考慮されてきた。しかし、

われわれの一連の重粒子線照射実験により、銀河宇宙線が有機物(特にアミノ酸前駆体)生成において重要な働きをする可能性が強く示唆された。さらに、アミノ酸の生成機構は、これまで想定されていた Strecker 合成(HCN , アルデヒド類, アンモニアの 1:1:1 反応によるアミノニトリル類が生成)ではなく、直接、高分子態(分子量~1000)の前駆体が生成することが示された。このことは、小分子同士の反応により、徐々に大きい分子ができていくという、これまでの化学進化過程と異なる反応過程を考える必要があることを、強く示唆する(Kobayashi, 2025)。

高分子態のアミノ酸前駆体は、遊離のアミノ酸よりも宇宙環境で安定である(Kobayashi et al., 2022)。太陽系生成時に小天体に取り込まれた有機物の中に星間起源の高分子態有機物が含まれていたことは十分想定される。今回重粒子線照射で作成した高分子態アミノ酸前駆体を、模擬小惑星内部物質に加えて反応(γ 線照射など)させることにより、隕石や小惑星中にみられる有機物が生成するかどうかを調べることを計画している。

現在、私たちが手にする隕石や小惑星物質は、その生成から 45 億年以上たっており、その後、放射性核種の壊変による放射線などにより分解や変成が起きたと考えられる。つまり、約 40 億年前の初期地球に届けられた隕石有機物は、現在の隕石有機物とは大きく異なる可能性が考えられる。今後、約 40 億年前の隕石有機物の復元が重要なテーマと考えられる。

一方、初期地球大気中でも、若い太陽からの高エネルギー粒子の働きにより、大量のアミノ酸前駆体が生成することが模擬実験により示された(Kobayashi et al., 2026)。生命の誕生に用いられた地球外有機物と地球由来有機物との比率や関係を調べる必要がある。

参考文献

- Kobayashi, K., *J. Interdiscip. Assoc. Liberal Arts Sci. Musashi Univ.*, **2**, 27-40 (2025).
Kobayashi, K. et al., *Astrobiology*, **21**, 1479-1493 (2021).
K. Kobayashi, et al., *Astrophys. J. Lett.*, in press (2026).

- a. 横浜国立大学大学院工学研究院
b. 東京科学大学理学院
c. 神戸大学
d. 量研機構

研究成果一覧(25HH004)

(1) 原著論文

1. Space Exposure of Amino Acids and their Precursors during the Tanpopo Mission, K. Kobayashi, H. Mita, Y. Kebukawa, K. Nakagawa, T. Kaneko, Y. Obayashi, T. Sato, T. Yokoo, S. Minematsu, H. Fukuda, Y. Oguri, I. Yoda, S. Yoshida, K. Kanda, E. Imai, H. Yano, H. Hashimoto, S. Yokobori, A. Yamagishi, *Astrobiology*, **21**, 1479-1493 (2021) (Open Access).
2. ホスファターゼ活性を用いた極限環境試料中の微生物活動評価, 小林 憲正¹, 佐藤修司, 伊藤有希, 中本早紀, 栗塚泰平, 高野淑識, 大林由美子, 金子竹男, 癸生川陽子, 小川麻里, 吉田聡, *Viva Origino*, **49**, 7 (13 pp.) (2021) (Open access).

(3) 学会及び研究会の口頭発表

1. Reactive Molecular Dynamics Simulation on Fundamental Process of Synthesis of Amino Acid Precursor, H. Nakamura, M. Murai, K. Kobayashi, M. Kobayashi, S. Saito, *Japan Geoscience Union Meeting 2025*, Chiba, May 27 (口頭発表).
2. Reconstruction of Bioorganic Compounds in Early Solar System Bodies: Formation and Alteration of Organic Compounds in Meteorite Parent Bodies, K. Kobayash, I. Ikeda, T. Kikuchi, R. Futami, I. Yoda, Y. Kubota, Y. Kebukawa, *Japan Geoscience Union Meeting 2025*, Chiba, May 25-30 (ポスター).
3. 地球外に水と生命を探す, 小林憲正, 第 15 回シンポジウム「持続可能な水道システムの確立」, 横浜, 2025 年 8 月 28 日 (招待講演).
4. 初期太陽系の隕石有機物の復元: 星間および隕石母天体内での前生物合成実験からのアプローチ, 小林憲正, 池田伊吹, 中島幹二, 菊池智紀, 二見涼太, 癸生川陽子, 依田功, 日本地球化学会第 72 回年会, 仙台, 2025 年 9 月 17-19 日 (口頭発表).
5. 小天体の水質変質や模擬星間環境で生成するアミノ酸前駆体を含む複雑有機物のキャラクターゼーション, 中島幹二, 癸生川陽子, 小林憲正, 奥住聡, 中澤風音, 藏暁鳳, 西内久美子, 上野雄一郎, 依田功, 柴田裕実, 小平聡, 日本地球化学会第 72 回年会, 仙台, 2025 年 9 月 17-19 日 (ポスター).
6. Experimental Reconstruction of Meteoritic Organic Compounds Brought to the Early Earth, K. Kobayashi, I. Ikeda, K. Nakajima, T. Kikuchi, R. Futami, I. Yoda, Y. Kebukawa, H. Shibata, H. Mita and S. Yokobori, *EANA 2025 Conference*, Lisboa, Portugal, October 21-24, 2025 (口頭発表).
7. 化学で探る生命の起源と地球外生命, 小林憲正, 日本量子医科学会第 5 回学術大会, 福岡, 2025 年 11 月 14 日 (招待講演).
8. 放射線・放射光により探る生命の起源, 小林憲正, 第 39 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム市民公開講座, 仙台, 2026 年 1 月 10 日 (招待講演).

(4) その他

1. 地球外生命, 小林憲正, 中公新書, 中央公論新社 (2021.12) 274 pp.
2. 生命と非生命のあいだ, 小林憲正, 講談社, (2024.5) 302 pp.

(5) 学位論文

1. 中島幹二: Characterization of complex organic matter synthesized in simulated aqueous small body and interstellar ice environments, 修士論文, 東京科学大学理学院 (2025).

炭化ケイ素パワー半導体のイオン誘起過渡応答測定
Single Event Transient Pulse Measurement on SiC Power Devices
(25HH012)

牧野 高紘^a、原田 信介^b、小野田 忍、大島 武^a、米内 俊祐^a
T. Makino^a, S. Harada^b, S. Onoda^a, T. Ohshima^a, and S. Yonai^a

Abstract

Wide bandgap semiconductors such as SiC are promising for radiation-hard power devices, and we have investigated single-event effects in SiC MOSFETs, revealing strong dependence on gate structure. Using a high-speed measurement system, transient currents induced by heavy-ion irradiation were directly observed, and gate-structure-dependent charge dynamics are being clarified through comparative analysis of trench and planar MOSFETs.

1. 研究背景と目的

炭化ケイ素 (SiC) をはじめとするワイドバンドギャップ半導体は、超低損失な次世代パワーデバイスや、宇宙・原子力・加速器施設などの過酷環境で使用される極限エレクトロニクスへの応用が期待されている。我々はこれまで、SiC 半導体デバイスにおける放射線照射効果の解明と耐放射線性向上技術の確立に向けた研究開発を進めてきた。

特に、高エネルギー粒子の単一入射によってデバイスの誤動作や破壊を引き起こすシングルイベント現象に着目し、MOS (Metal Oxide Semiconductor) 構造を有する SiC パワー MOSFET における単一イオン誘起破壊の物理過程解明を進めてきた。その結果、単一イオン誘起破壊現象はデバイス構造に強く依存し、プレーナー型ゲート構造に比べてトレンチ型ゲート構造を有する MOSFET の方が高電圧動作時において高い耐破壊性を示唆する知見を得ている。

さらに昨年度は、アナログ周波数 15 GHz 級の高速測定系を構築し、イオン入射に伴うトレンチ型 MOSFET からの過渡電流の直接観測を行った。その結果、過渡応答は 10~20 ns 程度の時間スケールで収束すること、また観測された波形が相似形を示すことから、電荷の増幅はイオン入射直後の極めて短時間領域で進行していることが示唆された。2025 年度は、プレーナー型 MOSFET のからの過渡電流の直接観測を行い、過渡電流波形のゲート構造依存性を明らかにする。

2. 今年度の研究内容

共同研究を行っている産業技術総合研究所で開発したプレーナー型ゲート IE-MOSFET (Implantation Epitaxial MOSFET) に注目し、重イオンビーム入射に伴うイオン誘起過渡電流観測を試みた。

オフ状態の MOSFET に Xe 290 MeV/u を照射し、ドレインでのイオン誘起過渡電流をモニタした。イオン照射中、ゲート・ソース電圧を 0V とし、1.5kV 印加可能なバイアスティー(アナログ周波数帯域 15GHz)を介してドレインに電圧を印加しつつ、アナログ帯域 1GHz を持つオシロスコープを用いイオン誘起過渡電流をモニタした。1つの電圧条件につき 100パルス程度の信号を取得し、入力信号の振幅、過渡現象の時間幅を観測した。

3. 実験結果、今後の課題

ドレイン電圧を 400V として、ドレインの過渡電圧測定を行った結果、過渡現象の時間幅は 10-20 ns 程度と、従来のトレンチ型ゲート MOSFET での測定結果と同様であった。取得した波形は、波高の差はあれほとんどが相似計であった。現在、測定波形の詳しい解析を行っており、詳細な結果は報告会・今後の論文に譲る。

謝辞

本研究の一部は、共同研究体「つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション (TPEC)」の事業として行われた。

^a 量子科学技術研究開発機構

^b 産業技術総合研究所

放射線環境下で発生する電圧変動を活用したデバイスモデルパラメータ最適化手法の構築 Development of a Device Model Parameter Optimization Method Utilizing Voltage Fluctuations in Radiation Environments (25HH024)

小林和淑^a、古田潤^b、中島隆一^a、中本耀^a、松本新大^a、谷口宗太郎^a、万代周平^a

K. Kobayashi^a, J. Furuta^b, R. Nakajima^a, H. Nakamoto^a, A. Matsumoto^a, S. Taniguchi^a

and S. Mandai^a

Abstract

This study aims to develop a high-precision Single Event Transient (SET) pulse model for radiation-hardened design. This year, we verified the measurement environment using a 65 nm bulk process. By accounting for energy attenuation in the ion chamber's acrylic cap, the Xe beam energy and Linear Energy Transfer (LET) were accurately determined. The results showed high consistency with measurement data obtained at another facility, validating our estimation method. These 65 nm data will serve as a baseline for future current-source modeling. Our future work will focus on collecting extensive SET data for a 22 nm process to realize a high-precision model applicable to diverse radiation environments.

1 Research Objective and Background

The purpose of this study is to develop a high-precision Single Event Transient (SET) pulse model to optimize device model parameters for radiation-hardened design. As semiconductor processes shrink, the impact of soft errors caused by SET pulses has become a significant concern. Therefore, it is essential to accurately evaluate these effects during the circuit design stage. This research aims to establish a modeling method that can precisely reproduce SET pulse widths in various radiation environments, contributing to the development of highly-reliable integrated circuits.

2 Summary of Results in FY2024

The research in FY2024 was conducted under a separate research project. We encountered difficulty in identifying the beam energy of Xe ions due to the influence of the acrylic cap on the ion chamber. This cap is used to protect the Al-Mylar entrance window of the chamber. However, its presence caused energy attenuation and led to a discrepancy between the estimated Linear Energy Transfer (LET) and the experimental results. This experience highlighted the importance of considering the cap to accurately determine the energy and LET.

3 Research Activities in FY2025

Accurate identification of beam characteristics is essential for developing a high-precision SET pulse model. From the results in FY2024, we accurately determined the Xe beam energy by accounting for the ion chamber's acrylic cap. Using a 65 nm bulk SET pulse measurement circuit, we verified the measurement setup and obtained a comprehensive dataset for SET pulse modeling.

4 Experimental Overview at HIMAC

The overview of the heavy ion irradiation conducted at HIMAC in FY2025 is as follows:

- Ion species: Xe
- Energy: 290 MeV/u
- Target: Semiconductor chips equipped with an SET pulse width measurement circuit
- Beam time: 8 hours and 30 minutes

5 Results and Analysis

5.1 Energy Estimation

Using SRIM (the Stopping and Range of Ions in Matter)^[1] and accounting for attenuation in the acrylic cap, the energy before passing through the binary filter (BF) was determined to be 188.6 MeV/u. Furthermore, after passing through a BF with a water-equivalent thickness of 10.818 mm, the energy was approximately 21.6 MeV/u. The range in air corresponding to this energy is 390 mm.

5.2 Measurement Circuit and Results

To verify the energy estimation by SRIM, we measured SET pulse width distributions by varying the BF thickness and the position of the irradiated chip. Multiple types of SET pulse sources were used for the measurement. A Time-to-Digital Converter (TDC), shown in Fig. 1, was used to record the SET pulse widths.

Table I shows the estimated LET and the measured peak pulse widths for each condition of BF thickness and chip position. Under the condition of BF = 10.818 mm (water-equivalent), almost no SET pulses were observed at distances of 430 mm or more behind the reference position, making it impossible to identify the peaks. This result is consistent with the SRIM calculation, which estimated the range of Xe ions in air to be 390 mm from the reference position. Additionally, Fig. 2 plots the relationship between LET and SET pulse width distribution for two different types of SET pulse target circuits (Type A and B). The peak pulse width increases with increasing LET as the BF becomes thicker.

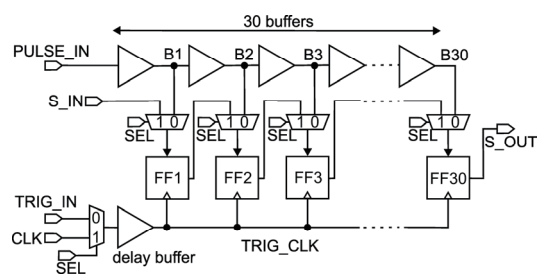


Fig. 1 : TDC. It converts the input pulse widths into digital values and stores them.

Table I : Dependence of SET pulse width on BF water equivalent thickness and distance from the reference position. LET was estimated using SRIM.

BF [mm]	Distance [mm]	LET SRIM [MeV·cm ² /mg]	Peak SET width [ps]
7.081	0	15.9	245
9.361	0	22.4	280
10.491	0	33.1	333
10.491	100	35.5	350
10.491	200	38.1	350
10.491	290	41.4	350
10.818	0	42.5	350
10.818	10	43.0	350
10.818	100	47.5	385
10.818	200	55.3	315
10.818	290	65.5	385
10.818	430	-	-

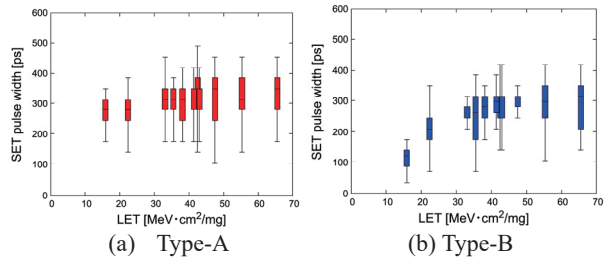


Fig. 2 : Relationship between LET and SET pulse width distribution.

Furthermore, the measurement results obtained at HIMAC (LET = 42.5 MeV·cm²/mg) were compared with results from another facility (RARiS^[2]) conducted under similar measurement conditions (LET = 40 MeV·cm²/mg, Kr). To evaluate the susceptibility to SET pulses, we calculated SET Cross-Section (CS) defined by Eq. (1).

$$CS [cm^2/target] = \frac{N_{SET}}{N_{target} \times N_{ion} \left[\frac{ions}{cm^2} \right]} \quad (1)$$

where N_{SET} is the number of measured SETs, N_{target} is the number of SET targets, and N_{ion} is particle fluence.

Figs. 3 and 4 show the measured pulse width distributions. As shown in Fig. 3, the distributions are consistent in both shape and peak position. Since the pulse width depends on LET, this result demonstrates the validity of the LET estimation using SRIM. On the other hand, as shown in Fig. 4, the CS at HIMAC was smaller than that at RARiS, with the total CS approximately 2.2 to 2.6 times smaller. This discrepancy is likely caused by secondary particles generated when the Xe beam passed through the BF. Table II shows the particle distribution at the scintillator position calculated using PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)^[3]. The ratio of Xe ions was only 43.7%. Most of the secondary particles generated were protons and alpha particles. These particles have low LET and rarely cause SETs. Therefore, the influence of secondary particles on the SET pulse width distribution is relatively small. However, it is possible that these particles were counted by the scintillator. The smaller CS at HIMAC suggests that the beam fluence was overestimated.

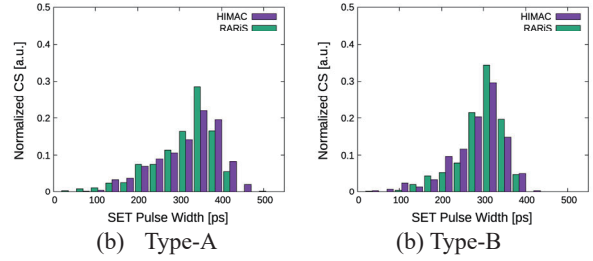


Fig. 3 : Comparison of SET pulse width distributions normalized by total CS between HIMAC (Xe) and RARiS (Kr)^[2].

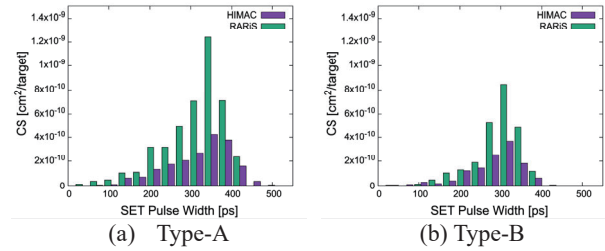


Fig. 4 : Comparison of SET pulse width distributions between HIMAC (Xe) and RARiS (Kr)^[2].

Table II : Particle ratios at the scintillator position obtained from PHITS.

Particle	Ratio
¹³² Xe	43.7%
Proton	45.5%
Deuteron	5.9%
Alpha	4.2%
³ He	0.6%
Others (⁶ Li- ¹² C)	0.1%
Total	100%

6 Summary

This year's work successfully concluded the environment verification and data collection for the 65 nm process, providing a solid foundation for high-precision SET modeling. These 65 nm data will be used to establish a baseline for current-source modeling techniques, which is essential for our future work on more advanced nodes. The results of this beam characterization and 65 nm verification have been submitted to the RADECS 2026 conference and are currently under review. In FY2026, we will shift our focus to the 22 nm bulk process. By applying the modeling methodology refined through our 65 nm research and utilizing an improved scintillator setup to minimize secondary particle counts, we aim to realize a sophisticated SET pulse model applicable to advanced technologies in diverse radiation environments.

References

- [1] James F. Ziegler, et al., Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B, 2010.
- [2] Jun Furuta, et al., IEICE Trans. Electron., 2024.
- [3] Tatsuhiko Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol., 2024.

a. 京都工芸繊維大学 工芸科学研究科

b. 岡山県立大学 情報系工学研究科

In field and Out of Field Dose Profile from Therapeutic Hadron Therapy Beams at HIMAC facility (25HH031)

J. Vohradsky¹, V. A. Pan¹, M. M. Roberts¹, L. T. Tran¹, D. Bennett¹, M. Povoli², A. Kok², H. Mizuno³, T. Nakaji³, S. Matsuba³, A. Ishikawa³, S. Tanaka³, M. Muramatsu³, T. Inaniwa³, and A. B. Rosenfeld¹

¹Centre for Medical Radiation Physics, University of Wollongong, Wollongong, Australia

²SINTEF, Oslo, Norway

³Research Centre for Charged Particle Therapy, National Institutes for Quantum Science and Technology, Inage, Japan.

Abstract

In this work, a 3D silicon-on-insulator (SOI) microdosimeter was investigated during high LET ion irradiation using a 500 MeV/u ⁵⁶Fe ion therapeutic beam. The new MicroPlus2 probe is compared to its predecessor in these experiments, for active layer thicknesses of 2, 5, 10, 20, and 50 μm . The multi-channel ASIC readout electronics aimed for space application is also compared to multiple MicroPlus probes for out-of-field measurements. The results demonstrate the performance of the SOI microdosimeter when measuring high LET particles, with some attributing low energy events observed in the extremely low energy region. However, these events did not substantially affect the microdosimetric spectra nor the \bar{y}_D values. This demonstrates that the SOI microdosimeter with its improved readout electronics (MicroPlus2) is suitable for high LET ion QA applications and an ASIC can be used for the simultaneous readout of multiple SOI microdosimeters.

1. Purpose and Background

Microdosimetry is an extremely useful technique for estimating the RBE in unknown mixed radiation fields, typical of heavy ion therapy. While the absorbed dose is routinely measured with an ionisation chamber, microdosimetric quantities, such as the dose-averaged lineal energy (\bar{y}_D) or dose-averaged lineal energy transfer (LET_D), need to be measured with high spatial resolution for RBE prediction. The gold standard detector for microdosimetry is the tissue equivalent proportional counter (TEPC), however TEPCs are not ideal for routine clinical microdosimetry due to pile up in high-dose rate clinical therapeutic beams. A new mini TEPC with a smaller sensitive volume was successfully developed to overcome this [1], but both types of TEPCs still have several limitations such as high operating voltage, gas supply and wall effects.

The Centre for Medical Radiation Physics (CMRP), University of Wollongong, introduced the concept of SOI microdosimeters, based on micron-sized cylindrical sensitive volumes (SV) in an array. The SVs in the microdosimeter mimic the dimensions of cell nuclei and require less than 10V bias supply. CMRP has developed multiple generations of microdosimeters on silicon-on-insulator (SOI) substrates which have been successfully tested and summarised by Rosenfeld (2016) [2]. The latest development of SOI microdosimeters at CMRP is the 3D array microdosimeter (called the “mushroom” microdosimeter) fabricated using 3D MEMS technology at SINTEF MiNaLab, Norway. This latest design provides improvements in charge collection efficiency (CCE) and well-defined SVs through 3D detector technology compared with previous generations that used planar technology [2]. The well-defined SVs demonstrate minimal charge sharing and much more improvement in terms of low energy event reduction.

Currently, ions such as He, C, O, and Ne are being used in clinical scenarios of multi-ion therapy treatment plans [3]. Si, Ar, and Fe ions were also investigated to link to space applications associated with GCR particle sources. When measuring these high LET ions, especially for low energies, events with very low energy were observed. These low

energy events may deteriorate the real signal and result in underestimation of the microdosimetric quantities used to determine RBE. This must be investigated to address if any effects by low energy events are observed in microdosimetric measurements with high LET ions using the SOI microdosimeters.

This work focuses on investigating the response of the SOI microdosimeter to Fe ions when the microdosimeter was placed behind different thicknesses of PMMA layers.

2. Materials and Methods

A. Structure of 3D “Mushroom” Microdosimeter

The 3D trenched-planar Mushroom SOI design used in this study features 2, 5, 10, 20, or 50 μm thin active layer cylindrical sensitive volumes [4] [5]. There are 40×40 SVs connected in parallel, and the diameter of each SV is 18 μm , with a total active area of 2×2 mm² [5].

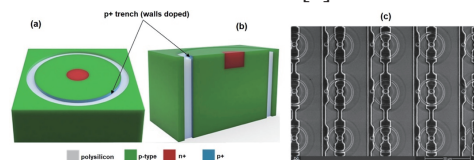


Fig. 1: Trenched-3D Mushroom with planar core SV: (a) Schematic of single SV, (b) Cross-section schematic, (c) SEM image of SV array [4].

The silicon surrounding the cylindrical volumes has been etched away to form the 3D SV structure, with a planar n+ inner core produced by ion implantation. The SV is surrounded by an outer trench with p+ doped walls, which has been filled with polysilicon [4]. This trench acts to isolate adjacent SVs, providing well-defined geometry and allowing no charge collection between SVs (which was observed minimally in previous generations) [5]. Another improvement in this design is the addition of p-stop implantation, connected to the p+ doping of the cylindrical trench. This allows conformal charge collection to the SV during high-intensity irradiation, by avoiding the effect of positive charge build-up in a field oxide layer above the p-stop between SVs [6].

B. MicroPlus2 Probe

The new microdosimetric probe, named the MicroPlus2 Probe, was developed at CMRP in which the microdosimeter is inserted. The MicroPlus2 probe connects the arrays of the Mushroom microdosimeter to the low noise spectroscopy-based readout charge sensitive preamplifier (CSA). The new MicroPlus2 Probe now features a built-in pulse shaping amplifier, integrated on-board in the PCB. This addition is a significant improvement over its predecessor, which greatly simplifies the setup process and reduces noise.

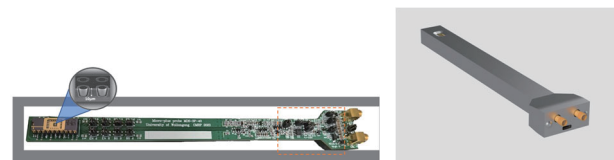


Fig. 2: a) MicroPlus2 Probe with SOI microdosimeter inserted. Built-in shaping amplifier indicated in orange region. b) CAD render of MicroPlus2 Probe inserted in rectangular sheath.

With the microdosimeter placed in the MicroPlus2 Probe, it can be inserted into a dedicated sheath. The sheath material is made using tissue equivalent resin, with different sheath

options prepared for various applications. These include cylindrical and rectangular sheaths, with options for open/closed window, depending on whether the application is in free air or water. The sheaths are wrapped with aluminium tape to reduce any external RF noise pick-up by the microdosimeter.

C. Irradiation Facility at the Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC), Japan

In this experiment, mono-energetic ^{56}Fe ions with initial energy of 500-MeV/u were used to irradiate the microdosimeter at HIMAC, Japan. The primary aim of the experiment was to compare the response of a new ASIC readout electronics system used with multiple SOI microdosimeters of different thicknesses (2, 5, 10, 20, and 50 μm) with that of 4- MicroPlus probes connected to similar types of SOI microdosimeters under the same high LET field conditions and operating simultaneously.

The microdosimeters were connected to respective MicroPlus probes, which output to the TechnoAP APG7400B USB-MCA4 and Amptek 8000D MCA. The MicroPlus probes were mounted in free-air, facing the beam on the central axis. PMMA range shifters upstream allowed measurements along the BP in water equivalent thicknesses (WET). Four SOI microdosimeters were connected to ASIC readout electronics and signals were digitised and processed by a Galao board. Up to 32 detectors can be connected to the ASIC readout however only 4 channels were tested in this experiment.

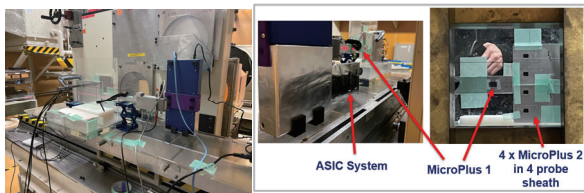


Fig. 4: Experimental setup at HIMAC Bio Beamline for central axis measurements. MicroPlus v1 probe is inserted in a single sheath, detector is 29 mm lateral from the central axis. 4x MicroPlus 2 probes are inserted into 4-probe sheath, detectors are 29 mm lateral from the central axis. ASIC based DAQ system were placed at the same location to compare with 4-probes setup.

3. Results and Discussion

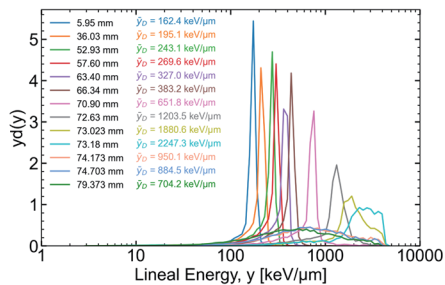


Fig. 5: The microdosimetric spectra response of the 10 μm thick active layer Mushroom microdosimeter connected to MicroPlus v1 at various WET depths to 500 MeV/u ^{56}Fe ion. The spectra were converted from silicon to tissue.

Fig. 5, 6 show the microdosimetric spectra obtained with the SOI 10 and 20 μm thick, respectively. It can be observed that at the BP region and distal part of the BP, lineal energies of up to 4000 keV/ μm were recorded experimentally. The observed expansion of the microdosimetric spectra to higher y-values for 10 μm SOI is explained by particles passing through the 10 μm SOI (crossers) while stopping in 20 μm at the distal part of the BP (stoppers) but still divided by 20 μm thickness. The main improvement of the MicroPlus2 probe is ability to record much lower energy events (due to lower noise threshold).

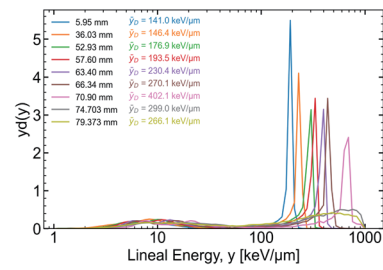


Fig. 6: The microdosimetric spectra response of the SOI 20 μm thick active layer Mushroom microdosimeter with MicroPlus2 at various WET depths to 500 MeV/u ^{56}Fe ion converted from silicon to tissue.

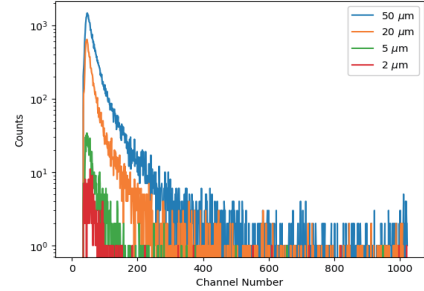


Fig. 7: MCA spectra acquired using ASIC readout system at the BP WET depth and a lateral distance of 10 cm from the 500 MeV/u ^{56}Fe beam edge utilizing the 50, 20, 5 and 2 μm thick SOI Mushroom microdosimeter.

Fig. 7 shows the MCA spectra acquired using the new ASIC system utilizing 4 of the available 32 channels. SOI microdosimeters with thicknesses of 50, 20, 5 and 2 μm were inserted into the system and the system was placed at the BP WET position, 10 cm laterally out-of-field of the primary 500MeV/u ^{56}Fe beam edge.

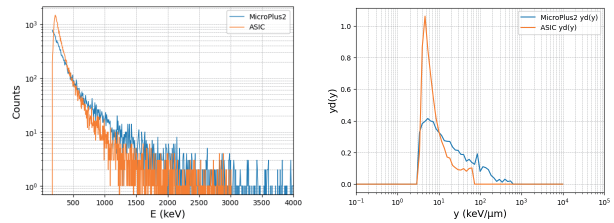


Fig. 8: a) MCA and b) microdosimetric spectra acquired using the MicroPlus2 system (blue) and ASIC system (orange) utilizing the 50 μm thick SOI Mushroom microdosimeter 10 cm laterally out-of-field at the BP WET depth of the 500 MeV/u ^{56}Fe beam.

Fig. 8a shows the MCA spectra acquired using the 50 μm with the MicroPlus2 and ASIC system and Fig. 9b shows the corresponding microdosimetric spectra. It can be seen that the spectra acquired with the ASIC system is truncated at ~ 3 MeV, which is the end of the linear dynamic range of used ASIC. Because of this, events above 3 MeV have not been observed.

4. Conclusions

The results demonstrate the performance of the SOI mushroom microdosimeters when measuring high LET particles (up to 4000 keV/ μm), with minimal attributing low energy events observed in the extremely low energy region.

A proof-of-concept study of the new ASIC systems aimed for space radiation monitoring for radiation protection of astronauts, demonstrated the feasibility of simultaneously measuring signals from SOI microdosimeters with different sensitive volume (SV) thicknesses, each connected to a dedicated ASIC channel, in a low dose rate mixed radiation field typical of the space radiation environment. This approach enables coverage of a wide dynamic range of LET events associated with solar particle events (SPE) and galactic cosmic rays (GCR), while also improving measurement statistics for more accurate dose equivalent monitoring. Further characterization of the system is still required.

References

- [1] Conte et al., Phys. Medica, vol. 64, pp. 114-122, 2019.
- [2] A. B. Rosenfeld, Nucl. Instrum. Meth., Phys. Res. A, vol. 809, pp. 156-170, 2016.
- [3] T. Inaniwa, Phys. Med. Biol, vol. 62, no. 12, pp. 5180-5197, 2017.
- [4] Tran et al., Appl. Sci., vol. 12, no. 1: 328, 2022.
- [5] James et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 66, no. 1, pp. 320-326, 2019.
- [6] James et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 67, no. 1, pp. 146-153, 2020.
- [7] Pastuovic et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B., vol. 458, pp. 90-96, 2019.
- [8] Ziegler et al., Nucl.Instrum.MethodsPhys.Res.B.,vol.268,no.11-12, pp. 1818-1823, 2010.

List of Publications and presentations

I. Publications

1. **Vladimir A Pan**, Alessio Parisi, David Bolst, Jesse Williams, Taku Inaniwa, Michael Jackson, Verity Ahern, **Anatoly B Rosenfeld**, **Linh T Tran**, “*Comparative study of a microdosimetric biological weighting function for RBE10 modeling in particle therapy with a solid state SOI microdosimeter*”, *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 70, No. 1, Jan., 2025. doi: 10.1088/1361-6560/ad9f1c
2. **D. J. Bennett**, **V. A. Pan**, **J. Vohradsky**, **L. T. Tran**, D. Wagenaar, B. Bergmann, H. Cintas, P. Smolyankiy, R. Sykora, T. Slavicek, Z. Kohout, J. Poder, A. Perevertaylo, I. Anokhin, **A. B. Rosenfeld**, “*Calibrating p-i-n Diodes for Displacement Damage Monitoring in a Space Radiation Environment*”, in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 72, no. 4, pp. 1159-1164, April 2025, doi: 10.1109/TNS.2025.3549051.
3. A. Waets, N. Emriskova, R. Garcia Alia, K. Klimek, **V. Pan**, **A. Rosenfeld**, **L. Tran**, **J. Vohradsky**, A. Kok, M. Povoli, P. Nieminen, U. Schneider “*Microdosimetry of Very-High-Energy Heavy Ion Beams for Electronics Testing Using Silicon-on-Insulator Detectors*”, *IEEE Trans. on Nucl.Sci.*, vol. 72, no. 8, pp. 2513-2518, Aug. 2025. doi: 10.1109/TNS.2025.3550471.
4. Yoo SH, Sedliarou I, MacDiarmid JA, Brahmabhatt H, Han S, Kim KB, **Tran LT**, **Rosenfeld AB**, Kim EH, Lin YH, Tan WS, Cheah YY, Wong RX, Looi WS, Ho S, Han KB, Yeo P, Djeng SK. “*Proton boron capture therapy: microdosimetry and treatment planning study with boron*”, *Front Oncol.* Oct 2025. doi: 10.3389/fonc.2025.1615241.
5. Emanuele Maria Data, **James Vohradsky**, Benjamin James, **Vladimir Pan**, David Bolst, Marco Donetti, Silvia Molinelli, Simona Giordanengo, Anna Vignati, Susanna Guatelli, Marco Petasecca, Michael Lerch, Angela Kok, Marco Povoli, Michael Jackson, Verity Ahern, **Anatoly Rosenfeld**, **Linh T. Tran**, “*Comparison of LEM and MKM based RBE-weighted doses from microdosimetric measurements with silicon 3D microdosimeter*”, *Physica Medica*, Volume 136, 2025.
6. Cynthia Meouchi, Sandra Barna, **Anatoly Rozenfeld**, **Linh T. Tran**, Hugo Palmans, Giulio Magrin, “*Microdosimetry of a clinical carbon-ion pencil beam at MedAustron - Part 1: experimental characterization*”, *Zeitschrift für Medizinische Physik*, 2025.
7. S. Barna, C. Meouchi, A.F. Resch, G. Magrin, D. Georg, **Anatoly Rozenfeld**, **Linh T. Tran**, H. Palmans, “*Microdosimetry of a clinical carbon-ion pencil beam at MedAustron, Part 2: Monte Carlo simulation*”, *Zeitschrift für Medizinische Physik*, 2025.
8. Villads Jacobsen, **Vladimir A Pan**, **Linh T Tran**, **James Vohradsky**, Jonas Bønnelykke, Cecilie Schmidt Herø, Jacob G Johansen, Anders Tobias Frederiksen, Brita Singers Sørensen, Morten Busk, Wolfgang AG Sauerwein, **Anatoly B Rosenfeld**, Niels Bassler, “*In-vitro and microdosimetric study of proton boron capture therapy and neutron capture enhanced proton therapy*”, *Phys. Med. Biol.*, 2025.
9. **Linh Tran**, Cristina Oancea, Satoshi Kodaira, David Bolst, **James Vohradsky**, Carlos Granja, Jan Jakubek, Jaroslav Šolc, Elisabeth Bodenstein, Sebastian Gantz, Jörg Pawelke, Lukas Marek, **Anatoly Rosenfeld**, “*Review of solid-state detectors for out-*

of-field dosimetry and microdosimetry in particle therapy”, Radiation Measurements, Volume 182, 2025, doi: 10.1016/j.radmeas.2025.107386.

10. **J. W. Archer**, E. G. Villani, M. Gazi, **J. Vohradsky**, **V. A. Pan**, S. Peracchi, Z. Pastuovic, M. M. Roberts, D. Hynds, S. Guatelli, M. Petasecca, M. L. F. Lerch, D. Bortoletto, **L. T. Tran**, **A. B. Rosenfeld**, “*Characterisation of the Effects of Radiation Damage on Low Gain Avalanche Diodes for Low-LET Microdosimetry*”, IEEE Transactions on Nuclear Science, 2025, doi: 10.1109/TNS.2025.3607912.
11. **A. M. Bani Hani**, D. Hill, **V. Pan**, **J. Vohradsky**, **D. Bennett**, D. Bolst, S. Peracchi, M. Povoli, A. Kok, S. H. Lee, H. Mizuno, T. Nakaji, S. Matsuba, A. Ishikawa, S. Tanaka, M. Muramatsu, D. Sakata, T. Inaniwa, T. Squire, G. Ryder, D. Officer, G. Wallace, **L. T. Tran**, and **A. B. Rosenfeld**, “*Investigation of Graphene as a Shielding Material for Space Environments*”, IEEE Transactions on Nuclear Science, March 2026. doi: 10.1109/TNS.2026.3660310
12. **D. J. Bennett**, **V. A. Pan**, **J. Vohradsky**, **L. T. Tran**, K. Aoki, T. Nakaji, H. Mizuno, H. Takei, T. Inaniwa, A. Pervertaylo, I. Anokhin, M. Petasecca, S. Guatelli, M. Lerch, J. Poder and **A. B. Rosenfeld**, “*P-I-N diodes for Displacement Damage Monitoring in a Heavy ion Space Radiation Environment*”, IEEE Transactions on Nuclear Science, March 2026. doi: 10.1109/TNS.2026.3674920
13. **D. J. Bennett** et al., “*Effect of Partial Volume Irradiation in p-i-n Sensors for NIEL Monitoring*”, under review for publication in IEEE Trans Nuc Sci, 2026.

II. Presentations

1. **Linh Tran**, **Vladimir Pan**, **James Vohradsky**, Dirk Wagenaar, Pietro Pisciotta, MJ van Goethem, Francesco Romano, Stefan Both, Taku Inaniwa and **Anatoly Rozenfeld**, “*SOI microdosimetry for particle therapy*”, MMND-ITRO conference, Sydney, February 2025.
2. **James Vohradsky**, **Vladimir Pan**, **Daniel Bennett**, Villads L. Jacobsen, David Bolst, Stefania Peracchi, Zeljko Pastuovic, Susanna Guatelli, Marco Petasecca, Michael L. F. Lerch, Marco Povoli, Angela Kok, Taku Inaniwa, **Linh T. Tran** and **Anatoly B. Rosenfeld**, “*Investigation of the SOI microdosimeter for high LET ion measurements*”, MMND-ITRO conference, Sydney, February 2025.
3. **Vladimir Pan**, et al, “*Moon habitat study with an SOI Microdosimeter*”, MMND-ITRO conference, Sydney, February 2025.
4. **Vladimir Pan**, et al, “*Verification of LETd optimized IMPT plans in a CIRS 731-HN phantom using an SOI microdosimeter*”, PTCOG conference, June, 2025
5. **James Vohradsky**, et al, “*Tissue Equivalency optimisation study of SOI MicroPlus2 microdosimetry probe*”, PTCOG conference, June, 2025
6. **Linh Tran**, et al, “*Solid State microdosimetry for particle therapy: 25 years of developments at Centre for Medical Radiation Physics*”, PTCOG conference, June, 2025.
7. **Linh Tran**, et al, “*SOI Microdosimetry and its application in particle therapy*”, (invited talk): SSD conference, Mexico City, June 2025.
8. **Vladimir Pan**, et al, “*Evaluation of an SOI microdosimeter for a GCR Simulator at*

- GSP*”, SSD conference, Mexico City, June 2025.
9. **James Vohradsky**, et al, “*Experimental Evaluation of MOSFET and SOI Microdosimeters for Boron Neutron Capture Therapy Applications*”, SSD conference, Mexico City, June 2025.
 10. **Daniel Bennett**, et al, “*P-I-N Diodes for Displacement Damage Monitoring in a Heavy ion Space Radiation Environment*”, IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC), Nashville, July 2025.
 11. **James Vohradsky**, **Matthew M. Roberts**, **Vladimir A. Pan**, Naonori Hu, Ilia Filipev, **Daniel Bennett**, Angela Kok, Marco Povoli, Alex Pogosov, Susanna Guatelli, Klaudiusz Jakubowski, Joseph Bevitt, Mitra Safavi-Naeini, **Linh T. Tran**, and **Anatoly B. Rosenfeld**, “*CMRP development of silicon-based neutron detectors for application in reactor and accelerator-based neutron therapy*”, (invited talk): Tsukuba conference, October 2025.
 12. **Matthew M. Roberts**, et al, “*Development of a simple, silicon based, dose equivalent neutron dosimeter for radiation protection purposes through GEANT4 modelling*”, Australian Institute of Physics (AIP) conference, Wollongong, December, 2025.
 13. **Allegra Villar**, et al, “*Characterisation of angular response in an improved tissue-equivalent microdosimetry probe for proton therapy applications*”, Australian Institute of Physics (AIP) conference, Wollongong, December, 2025.
 14. **Matthew M. Roberts**, et al, “*Microdosimetric Response of the MicroPlus-2 Probe to Ne Ion Beams for Multiple Ion Therapy*”, MedPhys conference, Sydney, December 2025.
 15. **A. M. Bani Hani**, et al, “*RBE verification of Helium ion beam for particle therapy*”, MedPhys conference, Sydney, December 2025.

III. Dissertations

1. **Matthew M. Roberts**, “*Development of a dose equivalent neutron dosimeter for radiation protection purposes through GEANT4 modelling*”, Honours Thesis, University of Wollongong, Australia, submitted December 2024.
2. **Allegra Villar**, “*Characterisation of angular response in an improved tissue-equivalent microdosimetry probe for proton therapy applications*”, Honours Thesis, University of Wollongong, Australia, submitted December 2025.
3. **A. M. Bani Hani**, “*The Applications of Microdosimetry in Particle Therapy Quality Assurance and Space Radiation Protection for Astronauts*”, PhD Thesis, University of Wollongong, Australia, submitted February 2026.

高感度飛跡検出器開発を目指したイオントラック構造と応答特性に関する基礎データ集の確立
 Fundamental data collection on ion track structure and response characteristics for the
 development of high-sensitivity track detectors
 (25HH003)

山内 知也^a、山田 怜央^a、勢一 隼人^a、木本 敦^a、能澤 毅成^a、廣瀬 敦^a

金崎 真聡^a、楠本 多聞^b、北村 尚^b、小平 聡^b

T. Yamauchi^a, R. Yamada^a, H. Seiichi^a, A. Kimoto^a, T. Nozawa^a, Y. Hirose^a,
 M. Kanasaki^a, T. Kusumoto^b, H. Kitamura^b, and S. Kodaira^b

Abstract

A series of response studies has been carried-out on PET, PC, PI and PADC as etched track detectors, paying a special attention on each detection threshold. Structural modification of latent tracks around the detection thresholds were examined by FT-IR spectrometry. It found to be difficult to apply the conventional model for the detection threshold to the response of PADC, in which the etchable conditions appear intermittently along ion tracks. In the cases of PET, PC and PI, the segments that were etchable and those that were not had a boundary as a single point on the latent track, which is able to understand to be the detection threshold.

1. 研究の目的とバックグラウンド

高分子系エッチング型飛跡検出器の利用は 1960 年代には開始されていた。1970 年代の終わりに、ポリアリルジグリコールカーボネート (PADC) が数 MeV の陽子線も記録する高感度飛跡検出器であることが見出され、宇宙線被曝線量や中性子線線量計測のために現在も利用されている。我々が、PADC 検出器の有するどのような分子構造上の特徴がそのような高い感度を実現させているのかについて興味をもち、放射線損傷という意味でのイオントラック構造とエッチング型飛跡検出器としての応答特性、並びに両者の関係について、系統的に評価する研究に着手してから既に四半世紀以上が経過した。

PADC の検出感度の高さは、それ以前の検出器素材であったビスフェノール A ポリカーボネート (PC) やポリエチレンテレフタレート (PET)、そして、ポリイミド (PI:

Kapton&UPILEX) と比べて群を抜いている。エッチング試験とともに赤外線分光を中心とする分析的研究を進めてきたが、損傷構造にはヒドロキシル基が含まれていることが明らかになった。分光分析を真空環境下で行う装置上の工夫を凝らし、ヒドロキシル基の定量分析方法を確立した。図 1 に示すように、未照射の PADC 中にはヒドロキシル基は存在しない。新たな端点にヒドロキシル基が生まれているとの仮説の下で、実験的研究を展開してきている。イオントラックに沿ったエッチング速度がヒドロキシル基生成密度と高い相関を有することを突き止めた。イオン種やエネルギーが異なってもヒドロキシル基生成密度が同じであれば、トラックエッチング速度は同等な値になる。化学的パラメータでエッチング速度を記述するモデルを確立しつつある。

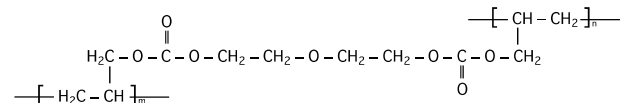


図 1 PADC の繰り返し単位構造。

2. 昨年度までに得られている結果

PC や PET、PI (Kapton&UPILEX) ではそれぞれの閾値においてははっきりとしたエッチピットが見える。しかし、PADC では数十 μm のエッチング後にも光学顕微鏡下で直径が 1 μm 程度しかなく、明確な像を結ばない構造がある ("Dwarf etch-pit" と名付けた)。垂直入射では $V_i > V_b$ の場合、すなわち、 $V = V_i / V_b > 1$ の時にエッチピットが生まれる。PET や Kapton、UPILEX では閾値で、例えば、 $V = 1.6$ といった明確な値を持つ (B ion in PET)。PADC では $V = 1.004$ といったかなり小さな値が登場する (H in PADC)。感度

が高いということは、底の浅いエッチピットを作る能力を PADC の構造が有していることを意味する。繰り返し構造の中心にあるエーテルが一個の電子によって切断され、続く電子のヒットによってカーボネートエステルが二酸化炭素の放出を伴って失われる。そして、新たな端点としてヒドロキシル基が生まれるが、このような損傷がイオントラックの径方向に 2 つ以上含まれるようになるとエッチピットは生まれる。同様の議論はイオン軸方向にも適用され、損傷が隣り合う繰り返し構造で連続して生まれていないとエッチピットは生まれないのかも知れない。これが新しい仮説となっている。エッチピットを形成する LET 条件下のヒドロキシル基生成挙動と高エネルギープロトンやガンマ線等のエッチピットを作らない放射線照射時のヒドロキシル基生成挙動を比較する必要があった。

3. 今年度の研究内容

1) 中エネルギー照射室において、大気中で PADC 薄膜 (15 μm 厚) にプロトン、He、C、Ar イオン (6 MeV/n) を照射した。同一の PADC 薄膜試料においてエーテル基の減少量とヒドロキシル基の生成量を決定し、両者の相関を評価した。

2) エッチング型固体飛跡検出器のエッチピット成長挙動には、伝統的に 2 速度モデルが使われるが、バルクエッチングの進展は「ホイヘンスの原理」に基づいて説明される。2 次元波動方程式に基づいてエッチング前の表面とエッチピット先端から球面波が連続して放出される計算モデルを作成し、水素同位体についての適用可能性を報告する論文を投稿した (査読中)。

3) イオン照射に対する参照実験としてガンマ線照射を行い、イオン照射時とは異なる損傷構造モデルを提案した (査読中)。

4. 今年度の研究成果と解析結果

PADC 検出器については、プロトンと He から Xe イオンまでの照射実験によって、エーテル損傷量とヒドロキシル基生成量との間にほぼ 1:2 の定量的関係があることを見出していた。トラックのコア半径に着目すると検出閾値よりも阻止能が大きな領域では、径方向に複数繰り返し構造単位が損傷

を受けていると評価されていた。分光分析が与える結果であり、イオントラックに沿った平均値であり、局所的な構造についての議論に進むことができていなかった。そのために、径方向の損傷の広がりや繰り返し構造内に限られ、軸方向についてのそれぞれの損傷間の距離が十分に保たれているような条件下での実験を行うこととした。検出閾値から大きく離れ条件である 30 MeV と 65 MeV プロトンの実験でもこの比率を確認した (図 2、TIARA)。これにより、繰り返し構造内においてエーテルが損傷を受けた後に新たな端点にヒドロキシル基が生成していることが明確になった。新たな損傷モデルを提案した (図 3)。ガンマ線についてはこの比率が 1:1 になることを別途確認しており、それに特有の損傷構造モデルについても提案を行っている。

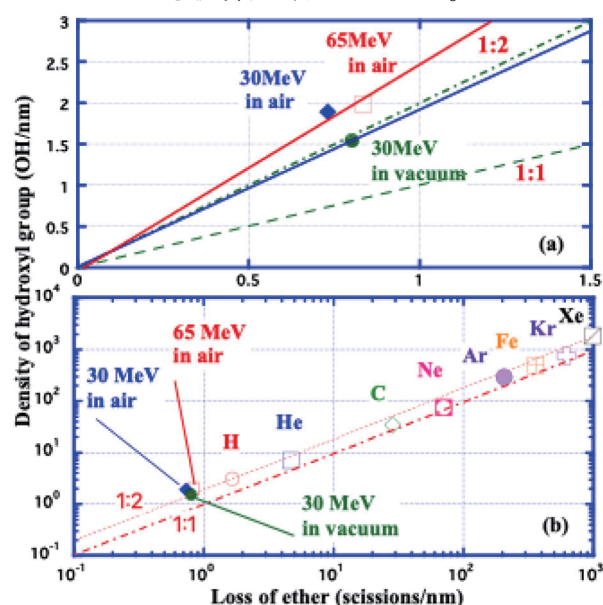


図 2 イオントラックにおけるエーテル損傷密度とヒドロキシル基生成密度の相関。

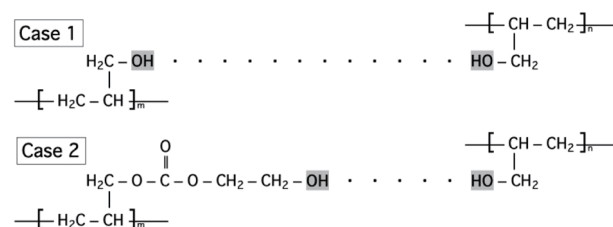


図 3 プロトントラック中に形成される孤立した損傷構造のモデル。

- a. 神戸大
- b. QST

研究成果一覧 (25HH003)

(原著論文等)

- Reo Yamada, Atsushi Kimoto, Hayato Seiichi, Shunto Sadamitsu, Daisuke Kohinata, Masato Kanasaki, Tamon Kusumoto, Hisashi Kitamura, Satoshi Kodaira, Sachiko Tojo, Tomoya Yamauchi, Enhanced bulk-etch-rate of gamma irradiated PADC detector expressed by the radiation chemical yield of hydroxyl group, *Radiation Measurements*, **191**, 107584. (2026).
- Tomoya Yamauchi, Reo Yamada, Atsushi Kimoto, Hayato Seiichi, Shunto Sadamitsu, Daisuke Kohinata, Masato Kanasaki, Ichiro Sasaki, Shigeki Watanabe, Noriko S. Ishioka, Nobumasa Miyawaki, Isolated radiation damage created along un-etchable tracks in PADC consists of two hydroxyl groups, *Radiation Measurements*, **187**, 11157. (2026).

(Proceedings 等)

(学会及び研究会口頭発表等)

- 能澤 毅成、山田 怜央、木本 敦、廣瀬 結己、藤乗 幸子、武藤 俊哉、金崎 真聡、山内 知也：ガンマ線照射による PADC 中不飽和結合の増加、第 73 回応用物理学会春季学術講演会、東京科学大学大岡山キャンパス、2026 年 3 月 16 日。
- 勢一 隼人、金崎 真聡、山内 知也：エッチング型飛跡検出器のエッチング過程のシミュレーションと水素同位体検出への応用、第 38 回固体飛跡検出器研究会、神戸大学、2026 年 3 月 26 日。
- 木本 敦、金崎 真聡、山内 知也：真空紫外線が PADC 検出器の特性に及ぼす直接及び間接効果の定量的研究、第 38 回固体飛跡検出器研究会、神戸大学、2026 年 3 月 27 日。
- 山田 怜央、木本 敦、勢一 隼人、能澤 毅成、廣瀬 結己、小日向 大輔、貞光 俊斗、楠本 多聞、小平 聡、藤乗 幸子、武藤 俊哉、金崎 真聡、山内 知也：PADC 検出器中ヒドロキシル基生成密度によるトラック及びバルクエッチング速度の記述、第 38 回固体飛跡検出器研究会、神戸大学、2026 年 3 月 27 日。
- 能澤 毅成、山田 怜央、木本 敦、廣瀬 結己、藤乗 幸子、武藤 俊哉、金崎 真聡、山内 知也：ガンマ線照射による PADC 中不飽和結合の増加、第 38 回固体飛跡検出器研究会、神戸大学、2026 年 3 月 27 日。
- 廣瀬 結己、能澤 毅成、山田 怜央、木本敦、金崎 真聡、楠本 多聞、小平 聡、山内 知也：PADC 検出器中イオントラックにおけるエーテル損傷とヒドロキシル基生成の相関、第 38 回固体飛跡検出器研究会、神戸大学、2026 年 3 月 27 日。
- 貞光 俊斗、小日向 大輔、木本 敦、勢一 隼人、山田 怜央、金崎 真聡、小平 聡、山内 知也、Yvette Ngono-Ravache、楠本 多聞：極低温その場観察型赤外線分光による PADC 中潜在飛跡形成過程の研究、第 38 回固体飛跡検出器研究会、神戸大学、2026 年 3 月 27 日。
- 山田 怜央、小日向 大輔、貞光 俊斗、木本 敦、勢一 隼人、楠本 多聞、金崎 真聡、小平 聡、藤乗 幸子、山内 知也：PADC 検出器中に形成される放射線損傷におけるエーテル基損失量とヒドロキシル基生成量との関係、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会、名城大学天白キャンパス、2025 年 9 月 10 日。
- 木本 敦、金崎 真聡、山内 知也：真空紫外線が PADC 検出器の特性に及ぼす直接及び間接効果の定量的研究、第 86 回応用物理学会秋季学術講演会、名城大学天白キャンパス、2025 年 9 月 10 日。

(その他)

(学位論文)

- 木本 敦：真空紫外線 PADC 検出器の特性に及ぼす直接及び間接効果の定量的研究、修士論文、神戸大学大学院海事科学研究科 (2025)。
- 山田 怜央：PADC 検出器中ヒドロキシル基生成密度によるトラック及びバルクエッチング速度の記述、修士論文、神戸大学大学院海事科学研究科 (2025)。
- 勢一 隼人：エッチング型飛跡検出器のエッチング過程のシミュレーションと水素同位体への応用、修士論文、神戸大学大学院海事科学研究科 (2025)。

位置有感比例計数管の重イオンに対する応答

Response of a position-sensitive tissue-equivalent proportional chamber to heavy ions

(25HH005)

寺沢和洋^{a,c}、岸本祐二^b、佐々木慎一^b、高橋一智^b、窪田雅弓^b、
身内賢太郎^d、永松愛子^c、中西大樹^c、藤田康信^c、会田圭祐^e、福山誠二郎^e、小平聡^f

K. Terasawa^{a,c}, K. Aida^c, Y. Fujita^c, S. Fukuyama^c, Y. Kishimoto^b,
S. Kodaira^f, M. Kubota^b, K. Miuchi^d, A. Nagamatsu^c, D. Nakanishi^c, S. Sasaki^b, K. Takahashi^b

Abstract

Response of the space dosimeter PS-TEPC for helium beam was obtained and was compared with simulated data. Through this experiment, data of detection efficiency for helium particles, which had not been available, were able to be obtained. It was found that the detection efficiency for heavy particles heavier than helium was nearly 100 %.

1. 研究の目的とバックグラウンド

これまでに実時間計測可能な国産の宇宙放射線線量計として、宇宙放射線線量実時間計測装置 RRMD-III (Real-time Radiation Monitoring Device-III)¹⁾ や、生体組織等価・位置有感比例計数管 PS-TEPC (Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber)²⁾ を開発し、スペース・シャトルや国際宇宙ステーション (ISS, International Space Station) 内での実測実証を果たしてきた。今後、より長期的な実測の運用として、月・火星等への有人宇宙飛行・滞在の際の実時間計測装置としてのインフラ化を目指している。

被曝線量は、吸収線量と LET の関数として与えられる線質係数の積としての線量当量 (或いはその類型) で評価している。従って、LET の実測がその本質で、物理量として実測可能なのは、LET と吸収線量であり、LET が実測できれば、吸収線量、線質係数、線量当量が全て揃うことになる。また、実測の対象となる LET の範囲は広く (水換算で、0.2 ~ 1000 keV/μm)、定常的な被曝対象となる銀河宇宙線のエネルギー帯のピークは sub-GeV/n 付近であることから、宇宙放射線の模擬粒子 (主に陽子から鉄まで) として、HIMAC から供給される粒子が適しており、そのまま HIMAC 施設を利用する理由となる。

被曝線量としては、太陽フレアに伴う粒子の寄与や地球周回低軌道上の場合には、放射線帯粒子 (陽子) の寄与も加わる。

また、それら荷電粒子線が宇宙船の船壁や搭載物と相互作用し、2 次粒子として発生する中性子の被曝線量も付加される。

被曝線量率は、地表での自然被曝と比較しておおよそ 2 桁高く、太陽活動や地磁気圏内外といった条件にも依存するが、1 mSv/d のオーダーである。但し、超大型太陽フレア発生時はこの限りではない。

これまでの実測例としては、NASA が標準検出器として採用している、Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC)³⁾ や前述の RRMD-III (Si 位置検出器の組み合わせ) 等を利用した例が存在する。

TEPC は文字通り、生体組織等価ガス・物質で検出器内部を構成し、中性子への感度が相対的に高い一方で、位置検出機能がないため、粒子の入射方向の一様等方性を仮定した場合の、有感領域内の粒子の経路長分布における平均値から近似的に LET (y

分布) を求めている。この近似的な LET は、単位は LET と同じでもその物理的な意味は全く異なる。測定精度としては、検出器自身の統計誤差 (エネルギー分解能) だけに留まらず、検出器の幾何学的な形状に依存した系統誤差 (円筒形で 51%、球形で 35%)⁴⁾ も重ね合わさることになる。

その結果、被曝線量限度から導かれる宇宙滞在期間は、誤差がない場合と比べ、実質的に半減する。それ以前に、NCRP-142 等の推奨 (検出器依存で $\sigma = 30\%$ 以内)⁵⁾ をそもそも達成できていない。

一方、RRMD-III については、LET 実測精度については十分といえるが、TEPC と異なり、中性子に対する感度が期待できない。そこで、両線量計の特徴 (生体組織等価性と位置有感性) を活かした PS-TEPC の開発を本課題で開始した²⁾。

検出器は、気体 3 次元飛跡検出器 (Time Projection Chamber, TPC) で、LET を実時間で実測することで線量データを得ることができる。電荷収集用の電極として、Micro-Pixel Chamber (μ -PIC)⁶⁾ を用い (比例計数管として働く各ピクセルから付与エネルギーと位置情報を得る)、検出器内の構成物 (ドリフトケージや電極) として、生体組織等価物質を使用し、検出媒体として、生体組織等価ガスを封入している。

本課題で、まだ行われたことのない、 μ -PIC を用いた検出器の (重) 荷電粒子に対する応答を調べるところから始め、ISS での軌道上実証を行った後、地上への回収を果たし、検出器全体として劣化や物理的損傷等の有無について調べている。更に、長期安定運用に向けて、電極をはじめ、検出部、データ取得部の改良を行っている。これまでの開発の流れについて以下に述べる。

2. 昨年度までの取り組みと結果

面積が 100×100 mm² の大きさの既存の μ -PIC を用いた検出器に対して、初の重粒子照射をした結果、阻止能の計算と比較して妥当な付与エネルギーの平均値を得た⁷⁾。続いて、搭載性を考慮した小型 μ -PIC (25×25 mm²) を新たに開発し、原子番号が小さく低 LET で、より測定条件の厳しい H ビームについても検出に成功した。更に導電性の生体組織等価プラスチック製ドリフトケージを開発し、生体組織等価性を高めた。

線量計測のためには既存の高位置分解能は不要で、400 μm ピッチの電極で隣り合う 4 本を接続し、x-y 面でそれぞれ 64 本あるストリップの読み出しを 16ch (全体で 32ch) とした。

当初、経験のある Ar ベースガス (Ar: 90%, C₂H₆:

a. 慶應義塾大学・医学部 (Keio Univ.)

b. 高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター (KEK)

c. 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

d. 神戸大学大学院・理学研究科 (Kobe Univ.)

e. (株) エイ・イー・エス (AES Co. LTD.)

f. 量子科学技術研究開発機構 (QST)

10%) を使用していたが、メタンベースの生体組織等価ガス (CH₄: 64.4%, CO₂: 32.4%, N₂: 3.2%の混合ガス) の使用も開始し、いずれの場合も前述の 30% 以内の精度を達成できる見込みとなった^{8,9)}。

また、搭載化に向け実機を想定した Bread Board Model (BBM)、Flight Model (FM) を開発、同等の測定精度を達成し¹⁰⁾、ISS に搭載、初期データから LET 分布、放射線カウントのグローバルマップ等を取得し、過去の実測例との比較も行った。

地上へ FM を回収し、ガス封入後、3 年経過後の基礎データ、 μ -PIC のゲインマップ取得も行った。火星への往復を想定すると、3 年以上安定動作させることが検出器開発の一つの目安となるが、3 年半以上、ガス交換を行っていない状態で、Proton 230 MeV に対する信号取得に成功、更に、マシントイム中のガス置換後の照射については、打ち上げ前と同等のエネルギー分解能を得ることができた。

μ -PIC については改良型 (後述) の設計・試作を行い、基礎実験 (α 線源による測定) の結果、既存品に比べ、2~3 倍のガスゲインが得られる見込みとなった。更に、各粒子ビームの照射により、宇宙機内で使用時の印加電圧として低電圧側から高圧側までのガスゲインデータの取得も行い、同等の結果を得ている。

3. 今年度の研究内容

昨年度に引き続き、試作品の μ -PIC (既存品から材料や電場の漏れ等を改良し、ガスゲインの向上を目指した改良型) を用い、He ビーム照射を行った。項目 1 で述べたように、実測対象となる LET 範囲は広く、H、He、C、Si、Ar、Fe あたりの粒子を照射できると、LET 値に対してほぼ桁毎に応答を評価す

ることが可能となるが、He に対してのデータはこれまで取得できておらず、今年度実施した。

FM の PS-TEPC は、Detector Unit (DU、検出部) 2 つと Control Unit (CU、制御部) 1 つで構成され、DU のうちの 1 つを改良型 μ -PIC へ交換している。使用したガスはメタンベースの生体組織等価ガスである。また回路系については、小型化・軽量化の検討試作も一部行っている。

4. 今年度の研究成果・解析結果と今後

Fig.1 に生物照射室にて取得の He 230 MeV/n ビームに対する付与エネルギー分布 (a) と、LET 分布 (b) を示す。阻止能の計算値 (平均値とシミュレーションで分布を想定) と HIMAC ビームによる実測値を利用することで、RRMD-III の際のエネルギー校正と同様に、取得データから、放射線源からの α 線の応答と合わせて、広範囲のエネルギー (LET) 校正を行うことができる。

またエネルギー分布と合わせて、粒子の検出効率についての実測も行い、過去の C や Fe のデータと合わせて、He 以上についてはほぼ 100% の効率であることがわかった。

次年度以降、回路系・検出部容器について、小型・軽量・省電力モデルの検討・試作も更に行い、また解析法として、新たに ToT 法 (Time over Threshold 法) も採用し、これまで活かすことのできなかつたデータについても、再度取得し解析を行っていく予定である。

宇宙機搭載モデルについては、その都度、実機毎に照射実験・エネルギー校正をフライト直前に行う必要があり、また、付随する比較対象、或いは相補的な検出器 (PADLES や D-Space など) の校正・開発用としても、併せて照射を行っていく。

謝辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構、(財) 日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクト、「研究提案募集 (RFP)」、宇宙環境利用科学委員会研究班 WG/RT より継続して研究を行っております。また、高エネルギー加速器研究機構の共同開発研究課題として研究を行っております。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) T. Doke et al., *Radiat. Meas.*, 33 (2001) 373.
- 2) K. Terasawa et al., *KEK Proc.*, 2005-12 (2005) 63.
- 3) G.D. Badhwar et al., *Radiat. Res.*, 139 (1994) 344.
- 4) T. Doke et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43 (2004) 3576.
- 5) *NCRP Report No.142, Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements*, (2002).
- 6) A. Ochi et al., *Nucl. Instr. and Meths.*, A471 (2001) 264.
- 7) T. Nagayoshi et al., *Nucl. Instr. and Meths.*, A581 (2007) 110.
- 8) K. Terasawa et al., *KEK Proc.*, 2011-8 (2011) 189.
- 9) Y. Kishimoto et al., *Nucl. Instr. and Meths.*, A732 (2013) 591.
- 10) Y. Kishimoto et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, 59 (2020) 016333.

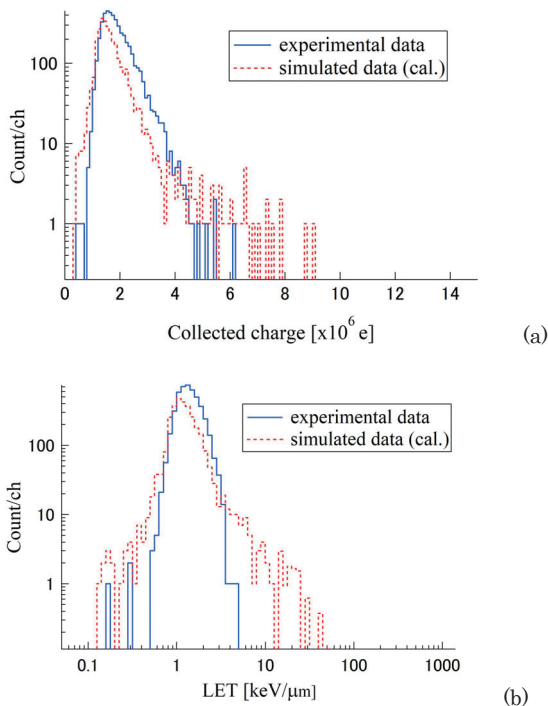


Fig.1 (a) Distribution of collected charge (a) and LET (b) for 230 MeV/n helium beam irradiation in an experiment and a simulation, respectively.

研究成果一覧 (25HH005)

(Proceedings 等)

- Y. Kishimoto., Kubota M., Takahashi K., Saito K., Sasaki S., Terasawa K., Miuchi K., Nagamatsu A., Sasaki S., A. Higashino S., Namai R., Kodaira S.: Development of the space dosimeter PS-TEPC, Space Utilization Research 40 (2026) in press.
- Kubota M., Kishimoto Y., Saito K., Takahashi K., Sasaki S., Terasawa K., Miuchi K., Nagamatsu A.: The development of the space dosimeter PS-TEPC for the use in Gateway space station, Space Utilization Research 39, (2025) 1-4. (昨年度分でも記載しましたが、番号等確定しましたので、再掲しました。印刷物も提出致します)

(学会及び研究会口頭発表等)

- 高橋一智、岸本祐二、齋藤究、佐々木慎一、窪田雅弓、寺沢和洋、身内賢太郎、東野聡、生井凌太、永松愛子:位置有感型生体等価比例計数箱(PS-TEPC)の小型・軽量・省電力化に向けた DAQ システム開発、日本原子力学会 2026 年春の年会、熊本城ホール、2026.3.12
- 岸本祐二、窪田雅弓、高橋一智、齋藤究、佐々木慎一、寺沢和洋、身内賢太郎、東野聡、生井凌太、永松愛子、小平聡:宇宙放射線線量計 PS-TEPC の開発、第 40 回 宇宙環境利用シンポジウム、宇宙科学研究所(オンライン併用)、2026.3.2.
- 高橋一智:PS-TEPC の月周回有人拠点搭載に向けた DAQ 開発、マイクロパターンガス検出器 (MPGD) & アクティブ媒質 TPC 合同研究会、岩手大学、銀河ホール、2025.12.19
- Kubota M., Kishimoto Y. , Saito K., Takahashi K., Sasaki S., Terasawa K., Miuchi K., Nagamatsu A., “Application of the Time over Threshold Method to the Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC)”, IEEE NSS MIC RTSD, Yokohama, Japan, 2025.11.

(その他)

- 寺沢和洋:宇宙長期滞在とSDGs ~宇宙放射線の立場から~、慶應義塾大学、教養研究センター、2025.11.17
- 寺沢和洋:宇宙長期滞在と宇宙放射線、~最広のサステナビリティ・最狭のサステナビリティ~、2025・SDGs塾生会議、慶應義塾大学、日吉キャンパス、2026.6.26.
- 岸本祐二、永松 愛子:宇宙旅行に超行きたい！でも宇宙放射線は大丈夫？【JAXA×KEK】、ニコニコ超会議 2025、幕張メッセ、国際展示場、2025.4.26

超微粒子原子核乾板によるナノスケールの放射線飛跡検出器の高度化と展開
Research and Development of Super-fine Grained Nuclear Emulsions as Nano-scale
Tracking Device
(25HH006)

中 竜大^a, 浅田貴志^a, 石原大樹^a, 染谷一輝^a, 陳夏姫^b, 水谷尚貴^b, 小平 聡^c

Tatsuhiro Naka^a, Takashi Asada^a, Daiki Ishihara^a, Kazuki Someya^a, Mizuntani Naoki^a, Chin Natsuki^b,
Satoshi, Kodaira^c

Toho University^a, Nagoya University^b and QST^c

Abstract

Nuclear emulsion is a solid-state tracking detector with extremely high spatial resolution. In particular, the Super Fine-Grained Nuclear Emulsion, known as the Nano Imaging Tracker (NIT), achieves the highest spatial resolution among such detectors, with the ability to image at the nanometer scale. This technology has been applied to a wide range of research fields, including dark matter searches, neutron detection, radiation therapy, and more. For calibration and performance evaluation, heavy ion beams from HIMAC are employed. During this fiscal year, we approached the development of new method to directly evaluate of AgBr(I) crystal sensitivity to high – and low velocity heavy ion for understanding the radiation effect in the material. This method is important for understanding of detection mechanisms, especially non-trivial effect for low velocity ions with O(100) km/s.

In this studies, we established the method and obtained result for Si ion beam with HIMAC was approximately consistent with previous studies. Further investigation is now on progress.

1. 研究の目的と背景

原子核乾板は、荷電粒子の飛跡を高解像度に記録できる銀塩感光材料である。本研究グループでは、原子核乾板を構成するハロゲン化銀結晶(AgBr(I))を数 10nm まで微細化した超微粒子原子核乾板 (Nano Imaging Tracker:NIT)の独自開発を成功させ、世界で最も高い空間分解能を誇る固体飛跡検出器の開発を実現してきた。現在、宇宙における暗黒物質の探索プロジェクト、中性子計測プロジェクト、重イオンセラピーにおける二次反応精密測定など NIT を用いたさまざまな実験プロジェクトが推進または提案されており、それに伴うさまざまなデバイス技術の高度化、さらに NIT に記録された飛跡の光学イメージング技術の開発等、さらなる研究開発が進められている。HIMAC の重イオンビームは、NIT の特性や性能の評価に関する基礎研究において重要なツールとなっている。また、現在、並行して進めている鉱物を放射線飛跡検出器として用いるプロジェクトが進んでおり、その一環で鉱物中の放射線飛跡検出性能評価も進めている。これら、広い意味での固体中の放射線物性というのは、近年、改めてこれらの理解が今後の宇宙素粒子物理学において重要であるという認識が高まっており、それに関連したさまざまな研究展開を進めている。

2. 昨年度までに得られている結果

これまで、重粒子イオンビームの飛跡検出を行う中で、NIT を構成する AgBr(I)結晶の感度特性について、従来の想定に反し、高電離の重粒子が 70nm 程度の AgBr(I)を貫通した際の結晶感度（ここで、感度とは、AgBr(I)に潜像核と呼ばれる銀のクラスターが形成され、現像によって可視化可能となった結晶の割合）が、阻止能の増加に対しても一定以上の効率にはならないことを見出している。HIMAC のイオンビームは、光速度に近い放射線であるが、上記特性は、速度が光速度の 1/1000 程度、すなわち、電子のボーア速度程度の放射線に対しては、阻止能機構が根本的に異なってくるため、同等の特性を見出されるかは自明ではない。これは、NIT のみならず、鉱物中に記録された損傷飛跡に対しても同様の議論があり、阻止能機構と固体中での放射線物性の共通理解が重要である。

NIT について、昨年まで、高速重イオン飛跡の AgBr(I)感度は概ね理解は進んできたが、低速重イオンに対しては、その評価法が完全に定まっておらず、共通指標での比較ができていなかった。

3. 今年度の研究内容

NIT に対して、低速重イオン評価との共通比較を行うための新たな試料構造と解析法を検討し、テスト実験を行った。低速重イオン評価における難しさは、その飛程が 1 μ m 以下となるため、これまで行っていた HIMAC イオンビームでの飛跡を構成する現像銀の線密度 (Grain Density : G.D.) を測定する手法を直接適用できない。一方で、単純なイオン数密度では、一つのイオン飛跡に対して、複数の AgBr(I)結晶を貫通するため、その換算が難しくなる。そのため、今回は、非常に薄い NIT 膜を用いて、イオンが貫通する AgBr(I)結晶数が 1 個以下になるようにすることで、信号の計数測定のみで感度測定を行うことを提案した。また、この時の AgBr(I)の密度とその分布は、走査型電子顕微鏡で撮像して行うことで、その光学像から幾何学的にイオンが AgBr(I)結晶をいくつ貫通したかを評価するための手法開発を行った。また、イオンの入射母数については、イオン感度が十分高い 200nm の結晶を用いることで担保を行う。

4. 今年度の研究成果と解析結果

まず、薄いNIT膜の塗布手法についての手法開発を行い、電子顕微鏡でのAgBr(I)結晶撮像と合わせて検討を行った。通常、NITは、ゲル化したNIT乳剤を基板に一定の体積で塗布し、乾燥厚40~60 μm 程度になるように調整するが、今回、NIT一層の厚みを0.1 μm まで薄くするため、水による希釈度で調整することで塗布を行った。実際の試料に対して、SEMによるAgBr(I)結晶分布の画像を図1に示した。

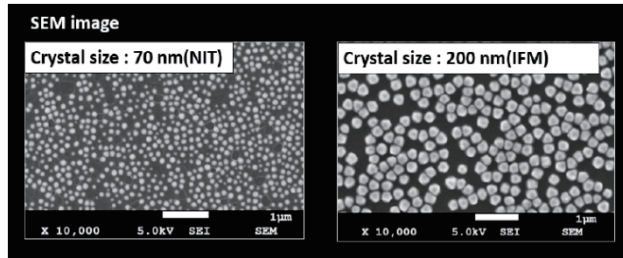


図1. 作成した薄膜原子核乾板のSEM画像。左図：超微粒子原子核乾板(NIT)、右図：200nmのAgBr(I)結晶で構成された原子核乾板

結晶分布は、完全に様でない部分があり、乾燥等の影響によるボイド領域が見られることがわかったが、ほぼAgBr(I)結晶が一層に分布した試料を作成することができている。この実際の結晶撮像画像から入射イオンが平均的に何個貫通するかの幾何学的分析を行った。イオン照射分布を乱数として分布させたとき、入射イオン数に対して約30%の効率で入射されることがわかった。

最終的な1イオンに対するAgBr(I)の感度は、以下の方法で検討を進めている。まず、本研究は、70nmのAgBr(I)結晶を持つNITの検出感度を評価することが目的であり、これは、100nmを切る超微粒子結晶の非自明な放射線物性効果を検証することを目的としているが、一方で、200nm程度のサイズでは、本研究で用いる高LETの放射線に対しては100%に近い感度が出ることを期待されるため、200nm結晶感度を基準とした相対感度の評価を進める。もう一つは、入射イオンの母数から一イオンに対する絶対感度を出すことであり、このために、検出器の構造の影響が小さいCR39を用いることも進めている。

HIMACで照射したSi(290MeV/u)に対する評価において、通常原子核乾板でのビーム密度が $3 \times 10^7/\text{cm}^2$ に対して、上記結晶貫通率から $9 \times 10^6/\text{cm}^2$ 、最終的に図2のように現像銀として光学顕微鏡によって検出された密度が $5 \times 10^6/\text{cm}^2$ より、暫定結果として結晶が約55%程度であることが評価されており、これは、G.D.法で導出した結果(K. Saeki et al., Bull. Soc. Photogr. Imag. Japan. (2024) Vol. 34 No. 2: 9–14)と概ね矛盾ない値である。さらに高LETのFe(500MeV/u)も試料を作成しており、現在、評価を

進めている。これまでの試料分析と矛盾した低い値となっている。

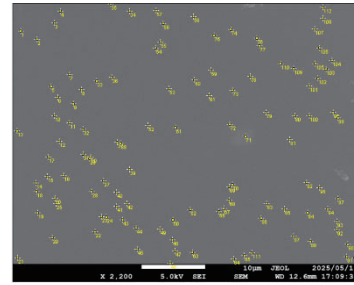


図2. Si(290MeV/u)によって生成された現像銀の光学顕微鏡画像。黄色いマークは、カウントされた事象を画像処理によってつけられた目印。

さらに高LETのFe(500MeV/u)も試料を作成しており、現在、評価を進めている。並行して、低速イオンビームを同様の手法で評価を進めているが、この結果は、これまでの試料分析と矛盾した低い値となっている。この原因は、現在のNITの標準的な増感手法であるハロゲンアクセプター(HA)増感の媒質量の依存性が効いている可能性があり(この解釈が正しいとすると、これ自体重要な知見であるが)、総合的な現象論を議論するための系統的な不定性についての理解を進めているところである。

5. その他の研究状況

本報告において、十分な紙面がないため詳細は割愛するが、NITに記録されたイオンビームの電荷識別に向けた画像処理開発も進んでおり、新たに光学顕微鏡システムの立ち上げを進めている。現行のシステムは、低エネルギー飛跡に特化したシステムが導入されているため、新規マシンを構築し、高エネルギーイオンビームの分析をできるシステム構築を目指している。また、昨年度報告したNITの高感度化に関する化学処理手法の開発については、現在、論文を準備中であり、近く投稿予定である。また、上記で触れた鉱物中の飛跡分析についても理解が進み、特に、カンラン石でのFeイオン飛跡の検出は確認され、ここから飛跡形成閾値の理解を進めているところである。カンラン石の場合、飛跡検出閾値が高いため、HIMACの500MeV/uをそのまま入射しても検出はされず、Binary Filter (BF)によって減速を行った。BFが88.81mmから検出が可能になったが、このときのエネルギーをPHITS等による推定を行っているがシミュレーションによる不定性について検討を進めている。

- a. 東邦大学
- b. 名古屋大学
- c. QST・放医研

研究成果一覧 (25HH006)

1) 原著論文

なし

2) Proceedings

なし

3) 口頭発表

- [1]. [招待セミナー] Astrocent Seminar "The Paleo Detector - Rare Cosmic-ray Search via Fossil Damage Tracks in Ancient Mineral" 2026年4月13日 AstroCent, Warszawa, Poland
- [2]. Tatsuhiko Naka, "Ultra-heavy Dark Matter Detection with the Paleo Detector", MDvDM'25, Karlsruhe Institute and Technology, Germany, 14-17 April, 2026 (talk on 16)
- [3]. 芝田龍輝、中竜大「原子核乾板おける画像解析を用いたイオンビーム飛跡の電荷識別」第2回若手研究会・第11回極低放射能研究会合同ポスター発表、2026年3月4、5日（発表5日）、神戸大学
- [4]. 水谷直貴、中竜大、齊京一成、二村翔大、加藤丈典、橋口未奈子、伊神洋平「鉱物が持つ放射線飛跡検出能力を生かした未知宇宙線および超重暗黒物質の探索」、学術変革領域第2回若手研究会 2026年3月4、5日（発表5日）、神戸大学
- [5]. 第35回日本MRJ年次大会「鉱物を用いた暗黒物質および稀な銀河宇宙線の探索」、2025年11月12日 北九州国際会議場(招待講演)
- [6]. 陳夏姫、中竜大、星野靖、小平聡、「核的阻止能が優勢な速度領域のイオンに対する超微粒子原子核乾板の感度測定」、日本物理学会第80回年次大会 2025年9月16-19日（発表16日）、広島大学
- [7]. 水谷尚貴、中竜大、二村翔大、加藤丈典、伊神洋平、村瀬孔大、廣瀬重信、「鉱物飛跡検出器による超重未知粒子探索プロジェクト EURECApd (2) ～隕石中の超重元素宇宙線解析に向けた重イオン電荷識別法の研究」、日本物理学会第80回年次大会 2025年9月16-19日（発表17日）、広島大学
- [8]. 陳夏姫、中竜大、「非相対論的な速度をもつ炭素イオンに対する超微粒子原子核乾板の感度測定」第68回放射線化学討論会、2025年9月24日～25日、理化学研究所
- [9]. 染谷一輝、中竜大、浅田貴志、石原大樹「超微粒子原子核乾板における低エネルギー陽子に対する溶解物理現象効果の検証」、2025年5月31日-6月1日（発表6月1日）、東京工芸大学

4) その他（解説、単行本など）、

なし

5) 学位論文（博士論文、修士論文、卒業研究）

石原大樹 「超微粒子原子核乾板を用いた暗黒物質直接探索のための酸化反応を用いたノイズ低減手法の開発」、修士論文（2025年度）、東邦大学大学院理学研究科

染谷一輝「高輝度イメージングを目的としたPQ系溶解物理現象の基礎特性の評価」修士論文（2025年度）、東邦大学大学院理学研究科

BaTiO₃ 強誘電体を用いた線量測定における LET 依存性の検証 Evaluation of LET dependence in dosimetry with BaTiO₃ ferroelectrics (25HH014)

石川 正純^a、泉 駆^b、陳 心逸^b、稲庭 拓^c
M. Ishikawa^a, K. Izumi^b, X. Chen^b, and T. Inaniwa^c

Abstract

This study evaluates the feasibility of using barium titanate (BaTiO₃) multi-layer ceramic capacitors as dosimeters for proton and heavy-ion therapy. Previous work demonstrated that BaTiO₃ capacitance decreases linearly with X-ray dose due to crystal structure changes. This research investigates the response to C-12 (290, 400 MeV/u) and He-4 (150 MeV/u) beams using a custom real-time measurement system. Results show that BaTiO₃ dosimeter readings align well with ionization chamber measurements in low-LET regions (below 150 keV/μm for C-12). However, a significant sensitivity drop—to approximately 60%—occurs near the Bragg peak for C-12. This degradation is attributed to the high effective atomic number ($Z_{eff} \approx 45$) and mean excitation energy ($I \approx 350$ eV) of BaTiO₃, which causes energy-dependent response variations similar to those seen in silicon detectors. Despite these challenges, the study suggests that by estimating LET during spot-scanning irradiation, correction factors could be applied to achieve accurate dosimetry in particle therapy.

1. 研究の背景と目的

当研究室では、チタン酸バリウム (BaTiO₃) を誘電体とする積層セラミックコンデンサの静電容量が高エネルギーX線の照射線量に応じて減少することを発見し、Gy オーダーでの線量が正確に測定できることを明らかにした[1]。光子線照射による静電容量変化は、電子のはじき出しによる結晶構造変化に起因すると予想しているが、粒子線を照射した場合には、物理的な結晶構造破壊による静電容量の減少が生じる可能性が考えられる。そこで本研究では、陽子線や重粒子線を照射した場合の静電容量変化を評価することにより、BaTiO₃ 誘電体を用いた線量計 (以下、BaTiO₃ 線量計とする) による陽子線・重粒子線への線量測定の適用可能性について検討してきた。2023 年度に試験的採択課題として Fe-56 (500 MeV/u) での予備実験を行い、ブラッグピーク付近において著しい応答低下が見られたものの、ビームを直接入射した際の線量は X 線と同等の値として測定された。また、アニーリングによる繰り返し測定も可能であったことから、比較的 low LET 粒子であれば BaTiO₃ 線量計を用いた粒子線の線量計測が可能ではないかと考えた。そこで本研究では、マルチイオンビーム粒子線治療における線量測定を視

野に入れ、C-12 および He-4 に対する BaTiO₃ 線量計の応答特性を評価することを目的とする。特に、LET (Linear Energy Transfer) 依存性を評価することで、測定可能な粒子種について検討する。

2. 装置と方法

今年度の共同利用申請では、C-12 (290, 400 MeV/u) および He-4 (150 MeV/u) のビームを用いて実験を実施した。Fig. 1 に実験体系の写真を示す。粒子線照射に伴う静電容量変化について、静電容量の時間変化を含めて測定するために、自作の静電容量測定装置を用いてリアルタイム測定を実施した。測定基板にはコンデンサ素子が 1.3 mm ピッチで 5 個配置されており、同時に 5 チャンネルのデータ測定が可能となっている。静電容量変化と照射線量の変換については、10MV-X 線を用いて 0~100Gy の範囲で素子ごとに校正を行い、粒子線線量測定にそのまま適用した。

BaTiO₃ 線量計による測定の妥当性を評価するために、平行平板形電離箱線量計 (PTW 社製 Markus chamber) による同じ場所での測定結果と比較した。照射条件は照射野を 3cm×3cm とし、SOBP は使用せずに単エネルギー粒子を入射して、PMMA 製バイナリレンジシフタを用いて水等価厚 0~150 mm の範囲で測定を行った。

基礎検討のために実施した初回の実験 (C-12 400 MeV/u) において、ブラッグピーク付近を重点的に測定した結果、電離箱線量計との比較で LET に応じた応答変化が確認されたため、2 回目の実験 C-12 (290 MeV/u) ではブラッグ曲線全体が把握できる広い範囲での測定を実施した。また、3 回目の実験では、He-4 (150 MeV/u) を用いて低 LET 領域での線量計応答を調べた。

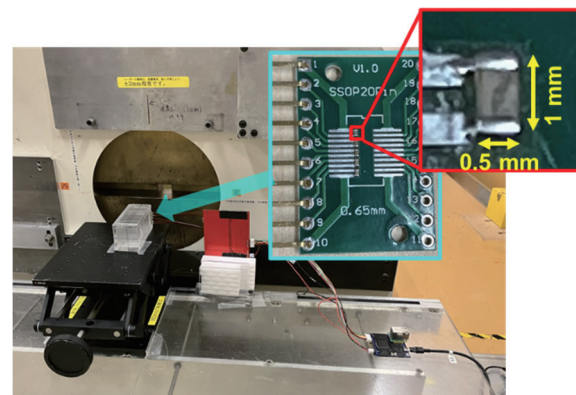


Fig. 1 BaTiO₃ 線量計による実験体系

3. 測定の結果と解析

Fig. 2 に C-12 (290 MeV/u)で照射を行った際の BaTiO₃ 線量計および電離箱によるブラッグ曲線測定結果を示す。Fig. 2 から、水等価厚 130 mm までは BaTiO₃ 線量計による測定値と電離箱線量計測定値が比較的一致することが確認できたが、ブラッグピーク付近では応答が 6 割程度まで低下することが確認された。また、測定位置における水等価厚から SRIM を用いて C-12 のエネルギーおよび LET を推定し、測定値と比較した結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 から、150 keV/μm 以下 (約 20 MeV 以上) のエネルギーでは、電離箱線量計とほぼ同等の検出器応答となったが、それ以上の LET (約 20 MeV 以下) では、検出器応答が著しく低下する傾向にあることが確認された。

続いて、Fig. 4 に He-4 (150 MeV/u)で照射を行った際の BaTiO₃ 線量計および電離箱線量計によるブラッグ曲線測定結果を示す。Fig. 4 から、ブラッグピーク直前までは BaTiO₃ 線量計による測定値と電離箱線量計測定値が比較的一致することが確認できた。また、Fig. 5 に示す水等価厚と LET の関係からも、BaTiO₃ 線量計と電離箱線量計の LET 依存性はほぼ同等であることが確認された。このことは C-12 において 150 keV/μm 以下の領域において検出器応答が電離箱線量計と同等であることと矛盾しない。

ブラッグピーク付近における感度低下については、いくつかの要因が考えられるが、主たる要因として、BaTiO₃ は実効原子番号が約 45、密度 6.02 g/cm³ であり、空気に比べて高原子番号かつ高密度であることが挙げられる。稲庭らの報告[2]によると、シリコン検出器の検出器応答には平均励起エネルギー (*I* 値) が大きく依存していることが示されている。BaTiO₃ の *I* 値は 350 eV 程度と推測されることから、シリコン (*Z*=14, *I*=173 eV) と比較しても、BaTiO₃ は実効原子番号、平均励起エネルギーが非常に高いことから、感度低下は原理的に避けることができないと推測される。さらに、BaTiO₃ 線量計は積算型の線量計であるため、event by event での信号弁別が困難であることから、SOBP のような異なる LET 粒子が混在する場での線量評価は非常に困難であることが予想される。

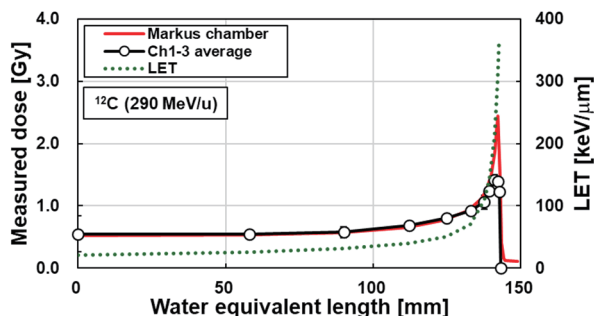


Fig. 2 ¹²C (290 MeV/u)照射時のブラッグ曲線

しかし、単色ビームを用いるスポットスキニング照射であれば、ビームエネルギー毎での線量測定が可能であるため、測定時の LET を推測することができれば、測定値に補正が可能かもしれない。次年度の共同利用研究では、計測値から LET を推定する方法についても検討したいと考えている。

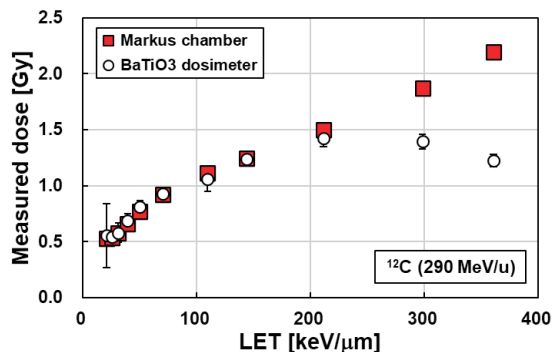


Fig. 3 ¹²C (290 MeV/u)の LET と測定値の関係

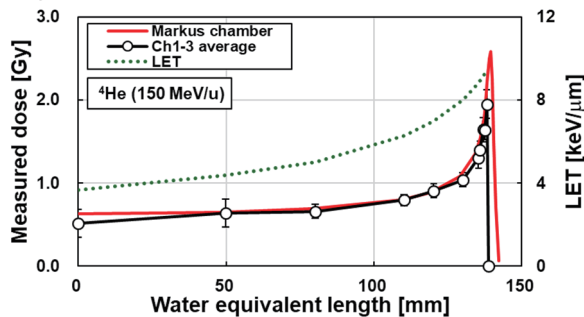


Fig. 4 ⁴He (150 MeV/u)照射時のブラッグ曲線

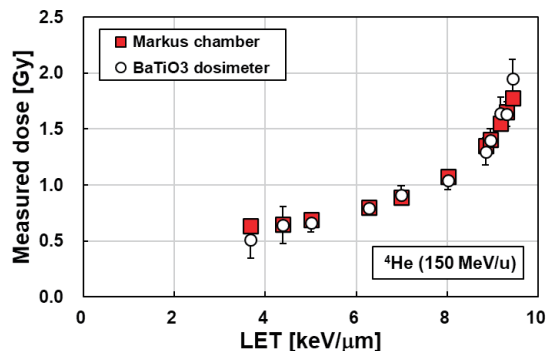


Fig. 5 ⁴He (150 MeV/u)の LET と測定値の関係

参考文献

- [1] Y. Kuga *et al.*, "Feasibility study on a novel tiny dosimeter using a barium titanate capacitor," *J Radiat. Res* **61**, pp. 34-43 (2019)
- [2] T. Inaniwa *et al.*, "Evaluation of diamond and silicon detectors for linear energy transfer measurements of therapeutic helium, carbon, oxygen, and neon ion beams," *Phys. Med. Biol.* **70**, 235029 (2025)

^a 北大保健科学研究院

^b 北大医理工学院

^c 量研機構放医研

研究成果一覧(25HH014)

1. 石川 正純、濱野 毅、山中 将史、後藤 伸一「BaTiO₃ コンデンサ線量計を用いた粒子線のリアルタイム線量測定の基礎検討」第 129 回日本医学物理学会学術大会(2025.4.10-13)横浜

重粒子線による輝尽性蛍光体検出器および蛍光体検出器の LET 依存性に関する研究
Example of Report on the Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC
(25HH028)

西内満美子^a、榊泰直^{a,b}、宮武立彦^c、青木宜篤^{a,b}、木内康一^{a,d}、Daideepkumar Balusu^{a,e}
Mamiko Nishiuchi^a、Hironao Sakaki^{a,b}、Tatsuhiko Miyatake^c、Atsunobu Aoki^{a,b}、Koichi
Kiuchi^{a,d}、Daideepkumar Balusu^{a,e}

Abstract

We use imaging plates (IPs) to measure ion energies in laser-driven particle beam experiments, which requires accurate knowledge of the IP response for various ion species. While ions of the same species and energy are generally expected to produce identical signals, measurements with 6 MeV/u Xe ions revealed a clear dependence of the IP signal on the ion charge state.

1. 研究の目的とバックグラウンド

量研・関西研では、レーザー駆動重イオン加速器の実現に向け、高強度レーザーを行い、炭素等の重粒子線の加速効率およびビーム品質向上を目指している。この実験では、レーザーによって加速される様々な核種およびエネルギーの重イオンを、トムソンパラボラ分光器と輝尽性蛍光体検出器の組み合わせで核種とエネルギーを検出するが、その際に必要な輝尽性発光性蛍光体内部の発光のメカニズムの詳細はそれほど明らかではない。

本研究においては、以前のマシンタイムによって得られたデータを解析することで得られた知見(同一核種・同一エネルギーのイオンであっても、価数が異なることで、 dE/dx 値が異なる)の背景にある物理過程を明らかにすることで、輝尽発光性蛍光体の発光解析モデルの精度を上げ、既存の粒子輸送モデルに反映させることを目標とする。これにより、レーザー駆動型イオン加速の研究分野においてはイオンの核種とエネルギーの高精度の診断が可能となる。

2. 昨年度までに得られている結果

我々が通常トムソンパラボラ分光器との組み合わせで用いる輝尽性蛍光体検出器は、FujiFilm 社製 IP-SR 型のものである。この IP を、HIMAC 中エネルギー・ビーム照射室のビームラインにて、アルゴンイオン、酸素イオン、鉄イオンをそれぞれ 2.6, 4.3, 6.0 MeV/u のエネルギーで IP に対して水平に照射し、データからフェーディング効果の定性式(下記の(1)式)の構築を行う試みを続けてきた。

$$Q(E) = \int_0^x dx \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + KB \cdot \frac{dE}{dx}} \quad (1)$$

S : シンチレーション発光効率

KB : クエンチング効果係数

dE/dx : IP への付与エネルギー

その結果、今までの HIMAC を用いた重イオン(C, Fe, Xe)照射実験により、 $Z \geq 6$ の重イオンでは IP 応答がエネルギー付与量に対してほぼ線形であり、Birks 則によるクエンチング効果は無視できることが分かった。この結果、元素ごとの個別校正を必要としない普遍的な応答モデル

$$Q(E) = \int_0^x S \frac{dE}{dx} dx \quad (2)$$

- $Z = 6$ (C) から $Z = 54$ (Xe) まで
- dE/dx が $0.1 \text{ MeV}/\mu\text{m}$ を超える高阻止能領域

において有効であることが示された。

この上記の考察結果には、各重イオンの価数の依存性はないものとして導出しているが、IP で計測される発光量は、入射する際のイオンエネルギーだけでなく、エネルギーを一定にした状態でも、入射時のイオン価数の違いで発光輝度が異なる現象があるように見受けられた。

3. 今年度の研究内容

今年度は、上記の「エネルギーを一定にした状態でも、入射時のイオン価数の違いで発光輝度が異なる現象」が統計的に正しいものであるかどうか、また、もしそうだとした場合は、その要因はいったい何なのか、を明らかにすることを目的として実験を行った。

4. 今年度の研究成果と解析結果

今年度用いた照射条件としては、HIMAC の中エネルギー・ビーム照射室において、イメージングプレート(IP)上で単一のイオントラックが識別できる程度の低フルエンス条件でイオン照射を行った。

照射対象としてはキセノンの 2.6、4.3、6.0 MeV/u の三つのエネルギー条件を設定した。各エネルギーを固定したうえで、電荷状態を系統的に変化させ、キセノンでは 37~46 価の範囲で

照射を行った。

同一エネルギーにおいてイオンの価数を変化させた場合、観測される発光輝度の差は極めて小さいことが分かっている。一方で、IP-SR 型のイメージングプレート(IP)は表面に保護層を有しているため、イオン照射によって付与されたドーズに対する輝尽性蛍光体そのものの応答を直接評価する際に、不確定な影響が加わる可能性がある。

そこで本研究では、表面保護層を持たない IP-TR 型 IP を用いることとした。さらに、IP-SR における保護層の影響を評価する目的で、ポリイミド(厚さ 7.5 μm)で表面を覆った領域を意図的に作製し、保護層の有無による信号応答の違いを比較できるようにした。

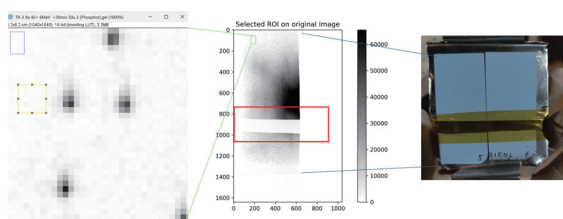


Fig. 1 Experimental setup of Imaging Plate.

単一のイオン衝突によって生成されるイベントは、IP 上では 1 ピクセルに限定されず、複数ピクセルにわたって広がって観測される(図 1)。そこで本研究では、1 つのイオン衝突による信号強度を、中心ピクセルを含む 7 \times 7 ピクセル領域の信号を積算することで評価した。

また、測定に含まれる、さまざまな要因に起因するバックグラウンド成分を除去するため、各イベントの直近の周辺領域からバックグラウンドレベルを決定し、これを差し引いた。

さらに、データを注意深く精査し、複数のイオン衝突によって重なったイベントを除外した上で、イベントごとの信号量に基づくヒストグラムを作成し、その分布の中心値および誤差を求めた。

得られた結果を Fig.2 に示す。Fig.2 は、6 MeV/u の Xe ビームについて、電荷状態を 37、42、46 価と変化させた場合の IP 信号量をプロットしたものである。その結果、誤差範囲を考慮しても、37 価のデータのみが、他の電荷状態と比較して有意に高い信号量を示すことが明らかとなった。

ところが保護膜を模擬するために IP-TR 上にポリイミド 7.5 μm のフィルムで表面をカバーした領域からの信号は、価数の違いによる信号値の顕著な違いは見られなかった。これは、本当に信号値に違いがないというよりは、統計不足により、データが大きな統計エラーを示すものである可能性が高く、次のマシンタイムにおいて再度計測を試みたいと考える。

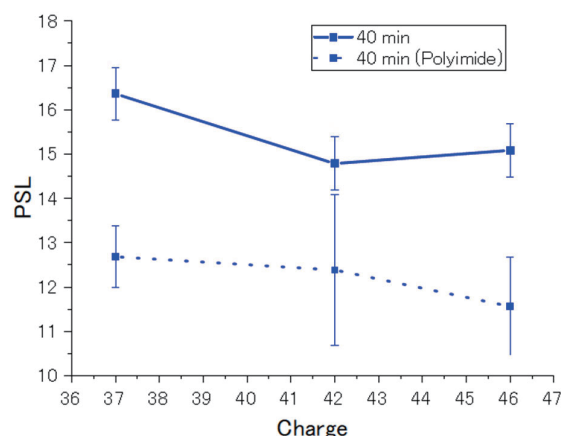


Fig. 2 PSL value dependency on different charge states, for 6 $\left[\frac{\text{MeV}}{\text{u}}\right]$ Xe beam. Solid line is the data from IP - TR, while the dotted line is from IP - TR covered with Polyimide 7.5 μm film.

現在この計測結果の背景にある物理を調査中である。この原因の背景にある物理の可能性として考えられるのは、①価数違いによるクエンチング効果の違い、②平衡電荷の効果によるもの(6MeV/u の Xe イオンの平衡電荷は+37)、等があげられる。現在これらの可能性を含め、原因の調査を行っている。

5. まとめ

HIMAC からの Xe ビーム(2,4,6MeV/u)の価数を変えることでイメージングプレートに照射し、価数の違いによって信号量の顕著な違いがあることを確認した。今後物理モデルなどの検討から、この背景にある物理メカニズムを明らかにすることで、モデル化を行い、既存の粒子輸送モデルに反映させることをめざす。

a.QST 関西研、 b.九州大学、
c.QST 放医研、 d.九州大学、 e.インド工科大学ハイデラバード校

研究成果一覧 (25 HH028)

査読論文等

なし

Proceeding 等

なし

受賞等

なし

Annual Report for 25HH011 in FY 2025

Novel Dosimetry System for Mixed Radiation Fields in Aerospace Applications

O. Ploc^a, M. Kákona^a, I. Ambrožová^a, M. Sommer^a, J. Šlegl^a, M. Lužová^a,
O. Velychko^a, M. Davidková^{a,b}, H. Kitamura^c, S. Kodaira^c

^a Nuclear Physics Institute of the CAS, Czechia, ^b National Radiation Protection Institute, Czechia,

^c National Institutes for Quantum Sciences, Japan

Abstract

In FY2025 (March 2026), we conducted one successful experiment at HIMAC using 160 MeV hydrogen beam. The experiment was essential for the development and validation of the PARDAL dosimetry system—an advanced hybrid detector tailored for space applications, particularly in LEO and deep-space environments. Our main focus was to characterize detector response over an extended energy range and validate LET measurements in silicon and tissue-equivalent materials using high-LET ions. These results support the system's readiness for future satellite deployment.

1. Background and objectives

The PARDAL (PAricle Radiation Detector At Low-earth orbit) project aims to deliver precise, energy-resolved dosimetry for ionizing radiation in space. The detector integrates silicon diodes and scintillators to provide time-resolved spectra of LET, absorbed dose, and dose equivalent. Extending the measurable energy range of the system is crucial for capturing the wide variety of particles encountered in space.

In FY2024, the awarded HIMAC beamtime (C 400 MeV/u and Ne 400 MeV/u) allowed us to characterize and validate the performance of our upgraded readout system and assess LET measurement capabilities under known conditions.

2. Materials and methods

The PARDAL project aims to deliver precise, energy-resolved dosimetry for ionizing radiation in space. The detector integrates silicon diodes and scintillators to provide time-resolved spectra of LET, absorbed dose, and dose equivalent. Extending the measurable energy range of the system is crucial for capturing the wide variety of particles encountered in space.

In FY2025, the awarded HIMAC beamtime (H 160 MeV) allowed us to characterize and validate the performance of our upgraded readout system and assess neutron measurement capabilities under known conditions.

3. Summary of previous years

Our HIMAC-related activities began in FY2023, when we were granted beamtime on April 24th, 2023, using a 150 MeV/u helium beam in the BIO exposure

room. This session served as the initial validation of the PARDAL system components.

Low-fluence irradiations with variable PMMA filter thicknesses and incidence angles were performed for individual subsystems—CTED (Combined Tissue Equivalent Detector), LABDOS (standalone silicon diode system), and Liulin (a legacy dosimetry instrument). These tests aimed to assess basic functionality, energy response, and angular dependence under well-controlled conditions.

Additionally, LET measurements were carried out with CTED at HIMAC using Si (290 MeV/u), N (350 MeV/u), and Ar (500 MeV/u) beams. The objective was to verify the LET response of both silicon and plastic scintillator channels. While the silicon detector yielded reliable LET values, the scintillator channel showed signs of signal oversaturation. Despite this, we successfully extracted a “LET equivalent” by normalizing the signal amplitude with respect to track length.

For each ion, the calculated LET in polyethylene (as a tissue-equivalent material) and silicon was compared with the experimentally determined “LET equivalent” obtained from the scintillator and silicon diode detectors. The results demonstrated a consistent proportionality between the measured “LET equivalent” and the expected LET values, confirming the detector's ability to distinguish ion species based on their energy deposition characteristics.

Building on these initial validation experiments, significant progress was achieved in FY2024 through two dedicated HIMAC campaigns using high-energy heavy ion beams—carbon (400 MeV/u, July 2024) and neon (400 MeV/u, March 2025). These experiments enabled further validation of the PARDAL system over an extended LET and energy range and marked a transition from component-level testing to system-level performance characterization under conditions relevant for space radiation environments.

A key advancement was the upgrade of the silicon detector readout electronics, which significantly extended the measurable deposited energy range up to approximately 100 MeV. This represents a substantial improvement over the previous configuration and is essential for capturing the wide spectrum of particle energies encountered in space.

Experimental validation with heavy ion beams confirmed reliable detector response across a broad dynamic range, from approximately 40 keV to 30 MeV of deposited energy. This extended sensitivity enhances the capability of the PARDAL system to

accurately characterize both low-energy and high-energy particles, which is critical for comprehensive dosimetry in mixed radiation fields typical of space missions.

These results demonstrate the successful evolution of the PARDAL system from initial functional

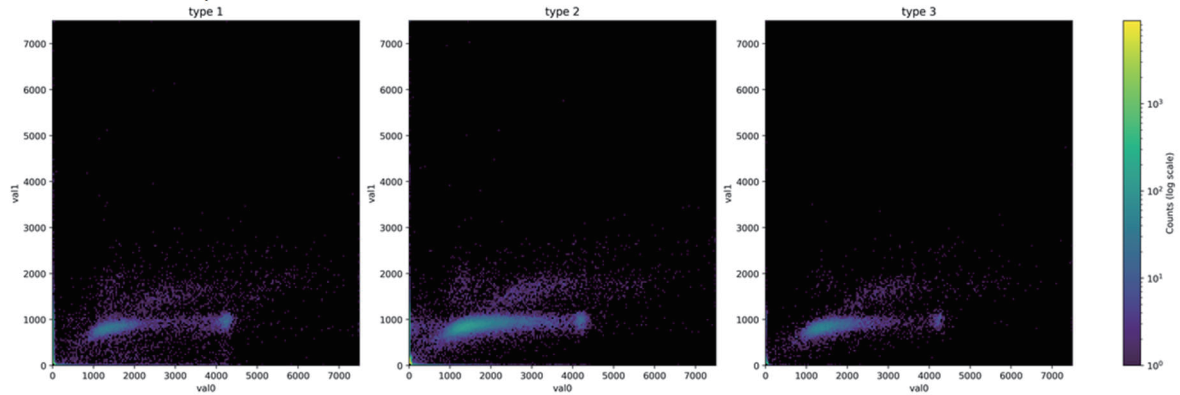


Figure 1. Signal registered with the silicon PIN diode in H 160MeV beam for three types of analysis detection..

4. Results in FY2025

March 2026: H 160 MeV in HIMAC BIO
Instruments: TPX2, TPX3, 4x Spacedos (2x large PIN diode, 2x small PIN diode) + conversion layers ^6LiF .

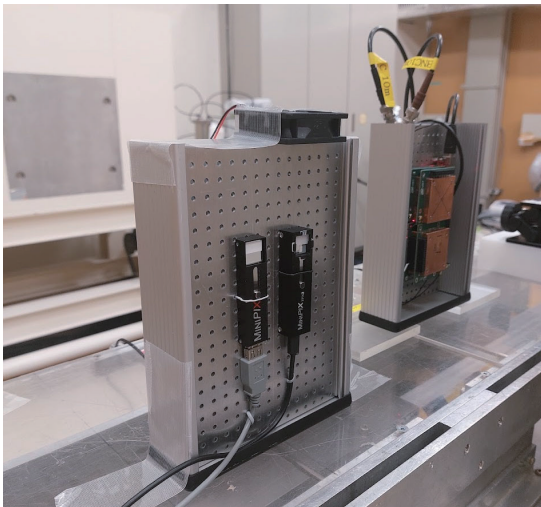


Figure 2. Si-detectors at test positions of the HIMAC BIO exposure room.

In FY2025, our experimental focus extended from primary heavy ions to the investigation of radiation fields generated by proton interactions, with particular attention to secondary particles produced along the beam path. This scenario is directly relevant to space applications, where interactions of primary cosmic rays with spacecraft structures and human tissue lead to the production of complex mixed radiation fields, including neutrons and secondary charged particles.

The experiments were performed using a 160 MeV proton beam in the HIMAC BIO exposure room. The PARDAL system was operated in configurations sensitive to both charged particles and neutron-induced signals, including the use of ^6LiF conversion layers for indirect thermal neutron

validation toward a robust, high-dynamic-range dosimetry instrument suitable for deployment in complex radiation environments, including low Earth orbit and deep space.

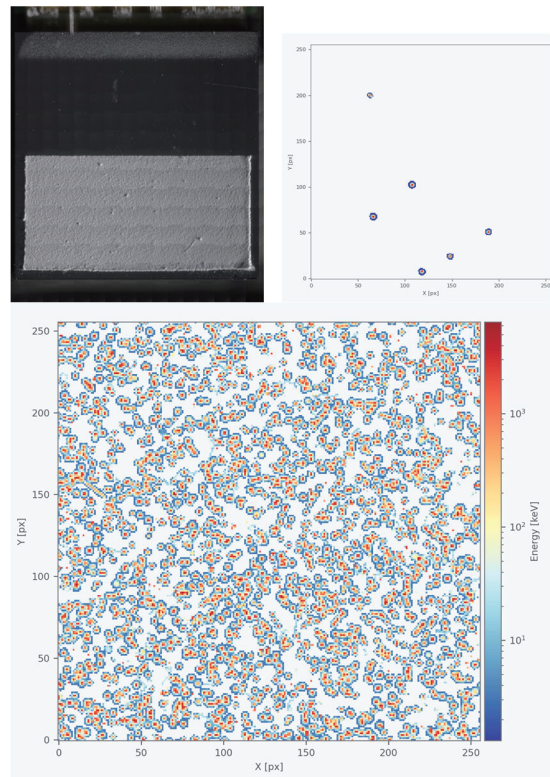


Figure 3 Clusters detected with the TPX2 pixel detector. Top: detector placed outside the beam; bottom: detector positioned behind the Bragg peak.

Track imaging with the Timepix (TPX2) detector enabled visualization of individual interaction events. When positioned outside the beam (Runs 1–6, total acquisition time 104 minutes), only five thermal neutron-induced events were detected via the $^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ reaction. This indicates a low flux of thermal neutrons under these conditions.

In contrast, when the detector was placed behind the Bragg peak region, a significantly higher density of clusters was observed, corresponding to secondary charged particles produced by proton interactions in the medium.

The position of the Bragg peak was independently measured by HIMAC staff using an ionization chamber and determined to be at 165.02 mm H₂O, in good agreement with the experimental configuration.

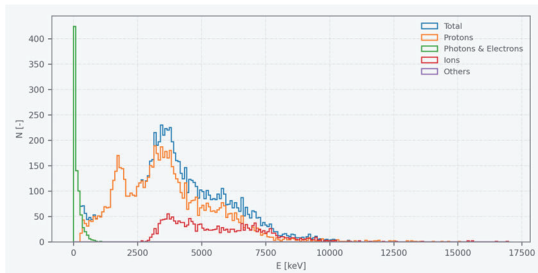


Figure 4. Energy spectra obtained with the TPX2 detector in the region behind the Bragg peak (Run 17, 168.01 mm H₂O), separated by particle type based on cluster shape analysis.

The TPX2 detector, using its cluster shape recognition algorithm, allows classification of detected events into particle categories: photons/electrons, protons, and heavier charged particles (“ions”). The measured spectra show clear differences between these components. The photon/electron contribution dominates at low deposited energies, while proton-like events extend to higher energies. A third component classified as heavy ions is also observed; however, in the present configuration this contribution is likely influenced by event pile-up and overlapping tracks rather than true heavy ion presence.

These results demonstrate the capability of pixel detectors to distinguish different components of the mixed radiation field based on track morphology and deposited energy. It should be used for the PIN diode Spacedos detector recognition algorithm.

4. Conclusions

The FY2025 HIMAC campaign extended the experimental validation of the PARDAL system from primary ion measurements to more realistic mixed radiation fields generated by proton interactions. Using a 160 MeV proton beam, we investigated both secondary charged particles and neutron-induced signals under controlled conditions relevant to space radiation environments.

The use of the ${}^6\text{LiF} \rightarrow {}^6\text{LiF}$ conversion layer enabled detection of thermal neutrons; however, the measured number of neutron-induced events was low, indicating that the thermal neutron component in the given experimental configuration is limited. This highlights the need for further optimization of detector placement and conversion layer geometry for efficient neutron detection.

At the same time, measurements performed with the TPX2 detector behind the Bragg peak clearly demonstrated the presence of a complex field of

secondary charged particles. The ability of the Timepix detector to classify events based on cluster shape provides a powerful tool for separating different radiation components. The observed spectral distributions confirm sensitivity to photons/electrons and protons, while the apparent heavy-ion component suggests limitations of the classification algorithm under high flux conditions, particularly due to pile-up effects.

Overall, the experiment confirmed that semiconductor-based and pixel detectors can effectively characterize mixed radiation fields produced by proton interactions, which are highly relevant for space dosimetry. Future work will focus on improving neutron detection efficiency, refining particle classification algorithms, and combining multiple detector systems to achieve more accurate decomposition of radiation field components.

Acknowledgment

The work was supported by HIMAC project H377.

List of the publications

Ploc, O., Sommer M., Kákona M., Šlegl J., Lužová M., Velyčková H., Ambrožová I., Kákona J., Dvořák R., Olšovcová V., Stránský V., Versaci R., Horváth D., Kubančák J., Langer R., Trompier F., and Kodaira S. (2026) Experimental Verification of the ESADOS Helio-centric Potential Model Using Airborne Measurements from the REFLECT2 Flight. *Radiation Effects and Defects in Solids*, ACCEPTED.

Ploc, O., Pánek, J., Lobaz, V., Hrubý, M., Kákona, M., Šlegl, J., Ambrožová, I., Chvátíl, D., Kodaira, S., Gallus, P., & Vondráček, V. (2025). Radiation testing of polymer materials with stable transparency for space applications as a protective layer over satellite photovoltaic panels. *Radiation Effects and Defects in Solids*, Advance online publication. DOI: 10.1080/10420150.2025.2598787

Šlegl, J. (2025). Influence of cosmic rays on ionization in the atmosphere during thunderstorms (Doctoral dissertation, Czech Technical University in Prague). Czech Technical University in Prague. <http://hdl.handle.net/10467/125664>

Vernetto, S., Vigorito, C. F., Kákona, M., Dvořák, R., Kodaira, S., Cirilli, S., ... & Zanini, A. (2025). Performance of the LABDOS01 spectrometer in dosimetric measurements. *Radiation Physics and Chemistry*, 113031.

Mishev, A. L., Kodaira, S., Kitamura, H., Ploc, O., Ambrožová, I., Toloček, R. V., ... & Inozemtsev, K. O. (2023). Radiation environment

in high-altitude Antarctic plateau: Recent measurements and model studies. *Science of the Total Environment*, 890, 164304.

Kákona, M., Ambrožová, I., Inozemtsev, K. O., Ploc, O., Toloček, R. V., Sihver, L., ... & Shurshakov, V. A. (2022). SPACEDOS: an open-source pin diode dosimeter for applications in space. *Radiation Protection Dosimetry*, 198(9-11), 611-616.

Sommer, M., Granja, C., Kodaira, S., & Ploc, O. (2022). High-energy per-pixel calibration of timepix pixel detector with laboratory alpha source. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1022, 165957.

Kákona, M., Šlegl, J., Kyselová, D., Sommer, M., Kákona, J., Lužová, M., Štěpán, V., Ploc, O., Kodaira, S., Chroust, J., John, D., Ambrožová I., Krist, P. (2021). AIRDOS—open-source PIN diode airborne dosimeter. *Journal of Instrumentation*, 16(03), T03006.

Human Space Exploration – The Radiation risks and novel new detector developments (25HH020) – Annual Report FY2025

T. Berger^a, K. Marsalek^a, B. Przybyla^a, M. Kasemann^a, M. Rohde^a,
D. Matthiä^a, H. Kitamura^b, S. Kodaira^b

Abstract

In FY2025 during the **HIMAC research project H474**, DLR was awarded two beam times: **Kr400** in June 2025 and **Fe500** in Feb. 2026. Both were carried out in the HIMAC BIO facility. These irradiations substantially contributed to the development of detector technologies planned for human space flight, focus on deep space exploration and subsequently for cancer radiation therapy.

The two beam times were used for finalizing the development of a single-channel **position-sensitive linear energy transfer (LET) spectrometer M-42 POSITION** and for the operational assessment of two novel active DLR detector systems the **M-42 BIG I and II** under penetrating radiation.

1. Introduction

In FY2025 two H474 beam times were carried out. The dates and ions are provided in Table 1.

Table 1: HIMAC beam time (ions and energies)

Run	Date	Ion	Energy (MeV/n)	Room
1	2026-02-23	Fe	500	BIO
2	2025-06-24	Kr	400	BIO

2. M-42 POSITION

The M-42 POSITION detector (*Figure 2*) is a new development by DLR. It is a system capable of detecting not only the deposited energy of each incoming particle but also its incident **position**. This is achieved by a **position sensitive diode** rather than a pixel detector (as it is the usual case). It promises to be a **low-power** alternative to pixel detectors. Our aim is to be able to use this detector in a telescope configuration. The telescope configuration will then be able to determine the incident angle and track length of a particle, allowing the Linear Energy Transfer (LET) to be calculated.

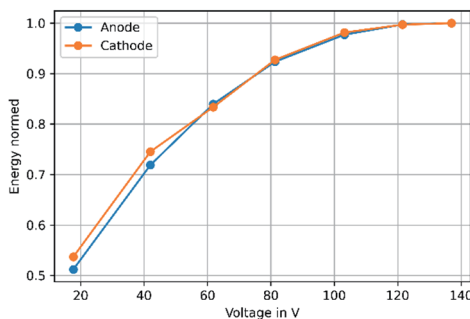


Figure 1: M-42 POSITION: measured deposited energy dependence on bias voltage, Kr400.

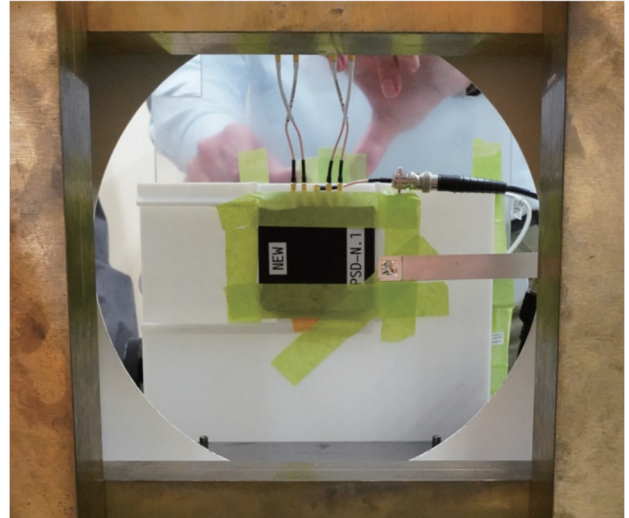


Figure 2: M-42 POSITION at the irradiation table at HIMAC-BIO.

In FY2025 the M-42 POSITION, equipped with updated analogue electronics, underwent characterisation regarding the dependence of deposited energy on detector bias voltage. The bias voltage sensitivity of the sensor diode used was characterized by changing the bias voltage during the irradiation and comparing the measured deposited energy. The results showed that with a bias voltage between 120V and 140V, the measured energy only varies by 0.3% - *Figure 1*.

Using a pinhole collimator, the exact spatial resolution of the collimator holes was possible - *Figure 3*. counts per area 110MeV to 130MeV

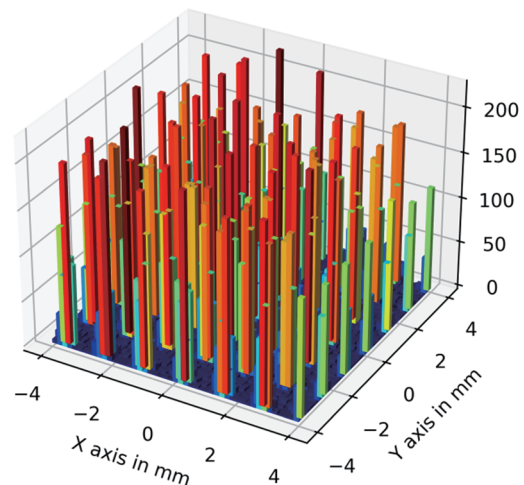


Figure 3: DLR M-42 POSITION: measured point-spread function using a pin-hole collimator, Fe500.

3. M-42 BIG I and II

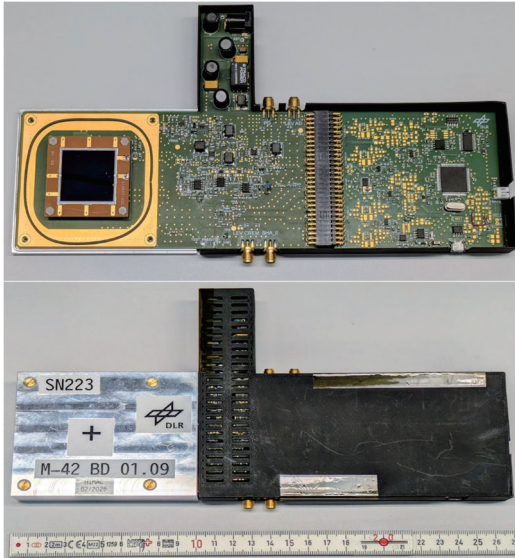


Figure 4: M-42 BIG I unit

The **M-42 BIG I** is a detector system developed by the DLR which features a silicon radiation sensor with a large surface area (see *Figure 4*). The device encompasses an advanced and fine-tuned analog electronics, processing the detector signal in **one signal chain** that covers a wide dynamic range. This eliminates the need to combine two (like e.g. the DLR-RAMIS device) or three separate dynamic ranges. This system in current configuration covers an **energy range up to 500 MeV**. In the course of FY2025 the M-42 BIG was upgraded (also thanks to the HIMAC irradiation campaigns) to the **M-42 BIG II**. This new system can recover from signal pulses caused by high energy depositions in the detector fifteen times faster and **eliminates the need for a peak detector** – a signal-processing unit known from legacy nuclear electronics systems that usually **negatively influences** the system **linearity**.

During irradiation of the very first version of M-42 BIG II in June 2025 (Kr400) the system performance was overall good. Nevertheless, we identified a discrepancy between the energy-deposition spectra recorded with the previous instrument - *Figure 5*.

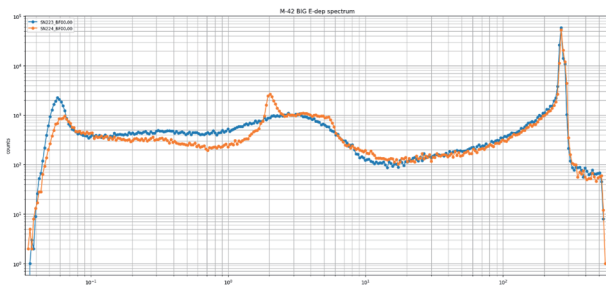


Figure 5: Orange M-42 BIG II distorted energy-deposition spectrum compared with our previous detector M-42 BIG I (blue). **Kr400**, June 2025.

This behaviour was not present during electronics tests in our laboratory, as we cannot completely mimic all processes, particularly within the detector and the front-

end electronics. The **real-world irradiations are necessary** for identifying the **root cause** of the system behaviour of the newly developed signal-processing chain. In FY2026, we will verify our hypothesis regarding the root cause and will evaluate steps to mitigate this adverse behaviour.

Figure 6 compares energy deposition spectra of Fe500 recorded by the upgraded device M-42 BIG II at two different particle rates. The clear peaks are proofing the **high energy range of the device**. This comparison led to better understanding of the underlying processes in the detector signal chain and helped to develop an alternative approach that will be evaluated in FY2026.

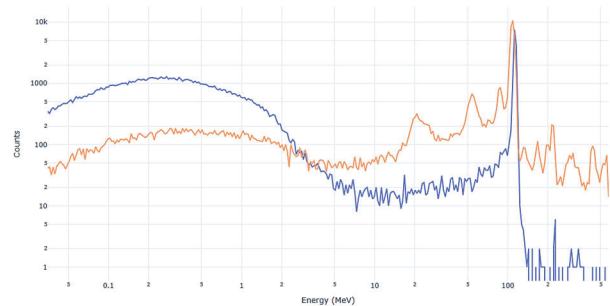


Figure 6: M-42 BIG II energy deposition spectra of Fe500 (Feb. 2026). Blue: 100 particles/cm²/spill, orange: ca. 6000 particles/cm²/spill.

4. Conclusion and Outlook

The HIMAC beam times of H474 enabled us to develop a completely new type of position sensitive detector, the **M-42 POSITION**. The outcome of the HIMAC irradiation will lead to a future system consisting of two such detectors working as a telescope, which will act as a LET spectrometer. The underlying working principle has recently been patented by the DLR. For the characterisation of the future telescope system, penetrating radiation will be crucial.

M-42 BIG has successfully proven increased detection surface area together with the upgraded dynamics. Improvements in terms of detection at elevated count rates are deemed necessary, to take the larger surface area of the detector into account. This requirement gains importance, as we envisage the use of the M-42 BIG II as a reference instrument for treatment planning and beam monitoring in cancer treatment.

Overall, the results gathered during FY2025 at HIMAC enabled the development of novel radiation detector systems with heritage from space missions and with the aim of applying these systems for Earth-based applications in cancer therapy and radiation protection dosimetry.

^aDLR, Germany; ^bQST-NIRS, Japan.

Human Space Exploration – The Radiation risks and novel new detector developments (25HH020) – Annual Report FY2025

T. Berger^a, K. Marsalek^a, B. Przybyla^a, M. Kasemann^a, M. Rohde^a, D. Matthiä^a, H. Kitamura^b, S. Kodaira^b

^aDLR, Germany; ^bQST-NIRS, Japan.

The relevant outcome of the results for our HIMAC Research projects and from previous HIMAC Research projects which helped in the characterization of the relevant detectors has been published in:

M.J. Losekamm, T. Berger, P. Hinderberger, M. Kaseman, T. Kendelbacher, C. Kuehnel, K. Marsalek, D. Matthiä, L. Meyer-Hetling, S. Paul, T. Poschl, B. Przybyla, M. Rohde, M. Wirtz and H.J. Zachrau (2025) First Results from the RadMap Telescope. Proc. 39th International Cosmic Ray Conference (ICRC2025) 15 – 24 July 2025, Geneva, Switzerland <https://doi.org/10.22323/1.501.0073>

The following presentations were given in relation to instruments tested at HIMAC within the relevant HIMAC research projects at the WRMISS (<https://www.wrmiss.org>) in Cologne, Germany, September 2025

- Thomas Berger et al. “DOSIS and DOSIS 3D – active and passive radiation measurements in Columbus from 2009 – 2025”
- Moritz Kasemann et al. “Update on the DLR M-42 instrument family and future missions”
- Maximilian Radenhäuser et al. “Almost 2500 days in space – the RAMIS radiation detector on the DLR Eu:CROPIS mission”
- Matthias Meier et al. “Between Sea Level and the ISS: Radiation Measurements in the SAA Region at Flight Altitudes II”

気象衛星ひまわり後継機搭載用宇宙放射線計測装置の開発と評価

Development and Performance Evaluation of Space Radiation Monitor for the Himawari-10 Satellite (25HH027)

Park Inchun^a、大辻 賢一^a、滑川 拓^a、齊藤 慎司^a

I. Park^a, K. Otsuji^a, T. Namekawa^a, S. Saito^a

Abstract

The space radiation environment in geostationary orbit is an important factor for space weather forecasting. The National Institute of Information and Communications Technology (NICT) is developing Radiation Monitors for Space weather (RMS) for installation on Himawari-10 satellite.

In particular, the proton measurement system is designed to detect protons in the energy range of 10 MeV to 1 GeV by combining a silicon semiconductor detector with a Cherenkov photon detection system. This approach aims to significantly extend the measurable energy range compared to the instruments currently onboard geostationary satellites

The developed engineering model (EM) is evaluated by irradiating it with proton beams of known energies to characterize its detection performance. From the experiments, we found the defects from the EM detectors, and it could manage by further experiments. In addition, irradiation tests are conducted on the electron measurement system, which targets radiation belt electrons, to assess proton contamination effects.

1. 研究の目的とバックグラウンド

情報通信研究機構は、宇宙間の環境を計測・予測する宇宙天気予報を実施している。宇宙利用の拡大に伴い、宇宙放射線は人工衛星の劣化や帯電・放電のどの障害の原因となるため、継続的な監視が重要である。現在、日本上空の静止軌道では、ひまわり-8・9に搭載された SEDA (Space Environment Data Acquisition monitor) により陽子・電子のエネルギースペクトルが取得されているが、測定エネルギーレンジ(陽子 20-80 MeV、電子 200 keV-1 MeV) はアメリカの静止軌道衛星 GOES と比較して限定的であり、エネルギー分解能にも改善の余地がある。

この課題に対し、NICT は次期ひまわり衛星向け宇宙環境計測装置 RMS の開発を進めている。RMS は陽子線計測装置 (RMS-p) と電子線計測装置 (RMS-e) で構成され、測定レンジはそれぞれ 10 MeV~1 GeV、50 keV~6 MeV へと大幅に拡張されている。RMS-p は積層シリコンを用いた新たなエネルギー弁別手法で 500MeV までの高エネルギー陽子検出、また、チェレンコフ光を用いた GeV 陽子検出器が開発されている。また、RMS-e ではエ

ネルギー帯域ごとに検出器を分割することで帯域かつ高感度な測定を実現する設計としている。

このような検出器の性能を確かめるためには地上での試験が必要であり、HIMAC 高エネルギー粒子線加速器は RMS の計測エネルギーを試験できる施設として適するだけでなく、過去の物理実験の実績から検出器性能確認のための安定的な実験が可能な場所である。

今年度の試験は衛星に搭載する PFM (Proto Flight Model) 製造の前に行う EM (Engineering Model) に対する試験で、前に行われた照射試験の補足とともに PFM の性能評価の基準・手法を確立することが目的である。また、RMS-p(Hi)および、RMS-e の陽子線に対する応答の計測試験も行なった。

2. 昨年度までに得られている結果

RMS の開発過程においては、HIMAC を含む高エネルギー粒子照射施設を用いた性能評価試験を実施してきた。特に 2023 年 11 月には、HIMAC 生物照射室において RMS-p(lo)検出器を用いた陽子線照射試験を実施した。160 MeV の陽子線をバイナリフィルターにより減速させ、検出器の測定範囲内の広がったエネルギースペクトルを照射、シミュレーション結果との比較を行うことで、検出器のエネルギー応答およびスペクトル性能が設計通りであることを確認した。

• Determination of linearity of detector

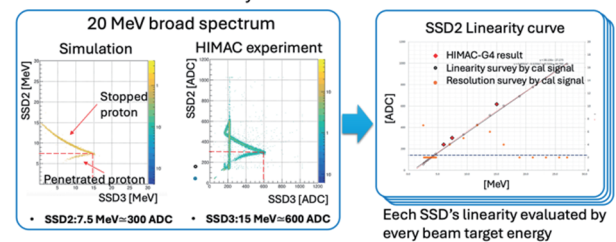


図 1: RMS-p lo の HIMAC 照射結果によるエネルギー線形性の解析。SSD 間のエネルギーを 2 次元ヒストグラムで比較し、連続スペクトルから得られる特徴とシミュレーションの結果から線形性を抽出

一方で、この照射試験では開発における課題も明らかとなった。具体的には、8 層構成の半導体検出器 (SSD) のうち 1 層に故障が発生し、信号処理過程でノイズの混入が見られた。その結果、各

層単独での性能評価は可能であったものの、入射陽子線のエネルギーを全層で完全に計測する評価には至らなかった。また、HIMAC 照射試験後に実施された改修作業によってセンサの特性に変化が生じ、EM 完成時点で健全性を保っている SSD について、改めて性能を再評価する必要性が生じた。これらの結果を踏まえ、RMS は 2025 年度から PFM の設計・製造・開発段階へ移行する計画であり、PFM の性能評価基準および評価手法を確立することが喫緊の課題となっている。

3. 今年度の研究内容

今回の照射試験では前回 SSD の不具合があった EM RMS の改修後の性能評価が主な目的とし、この結果を基に 2026 年度から製造される PFM に対する性能評価の手順確立とその基準を定めることに研究の焦点を合わせている。また、以前実施できなかった他の機器 (RMS-p(hi), RMS-e) にも陽子線を照射し、その応答の確認を行なった。照射試験のセットアップは前年度の照射と同じセットアップの EM RMS を用いて生物照射室で行われ、ビームは 100MeV の陽子線を PMMA バイナリフィルターで減速させたものを使用した。バイナリフィルターは 9 つの組み合わせで、通過したビームのピークがそれぞれ 0, 20, 23, 27, 30, 35, 40, 50, 100 MeV になるように調節が行われた。また、回転ステージを用いて斜め入射や視野角外からの入射に対する応答についても試験を行なった。

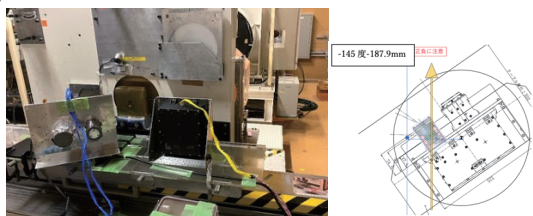


図 2: 試験セットアップの様子。回転ステージに載せて背面 (-145°) から照射準備中の RMS-p(左)とビーム通過予想図(右)

4. 今年度の研究成果と解析結果

本照射試験では、RMS-p (lo) および RMS-e を対象として陽子線照射試験を実施し、検出器応答および判別ロジックの動作確認を行った。まず RMS-p (lo) については、全 SSD が健全な状態であることを確認した上で陽子線照射試験を行い、SSD からの応答が得られることを実験的に確認した。各 SSD の反応を前回と同様、2次元ヒストグラムでシミュレーションと比較し解析することでリニアリティの検証手法を確認した。(図 3) さらに、取得した測定データをエネルギー弁別ロジックに入力した結果、想定通りのエネルギー弁別が可能であることを確認した。(図 4) 一方で、ノイズや二重写しパターンに起因すると考えられる誤判定事象が一部で認められたため、これらについては PFM 段階において対策を講じる予定

である。

また、RMS-e の照射試験では、RMS-e の向きを変化させながら陽子線を照射し、各条件における SSD からの応答を確認した。その結果、いずれの照射条件においても SSD は陽子に対して適切に応答し、e/p 判定ロジックにより陽子が想定通り正しく判別されていることを確認した。以上の結果から、両システムともに陽子線照射に対する基本的な検出性能および判別機能が有効であることが示された。

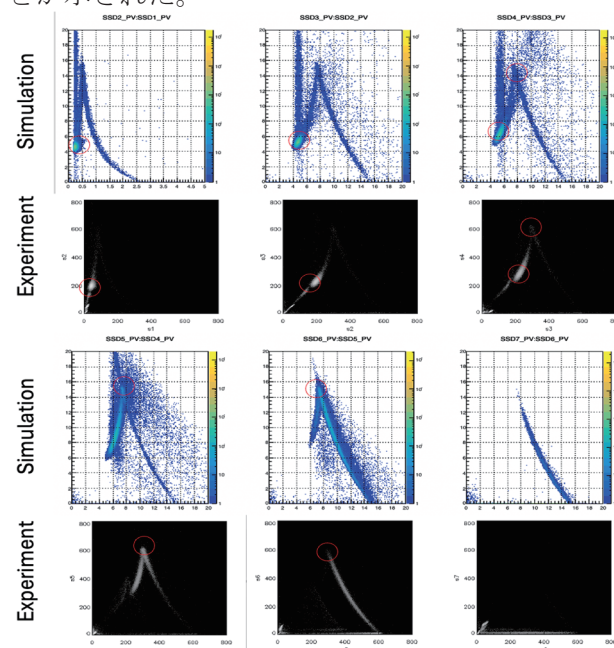


図 3: RMS-p(1o)に 20MeV 陽子線を照射したときの各 SSD 別 2 次元ヒストグラムの実験とシミュレーションの比較。赤丸いところの特徴でエネルギーと ADC 値を比べる。

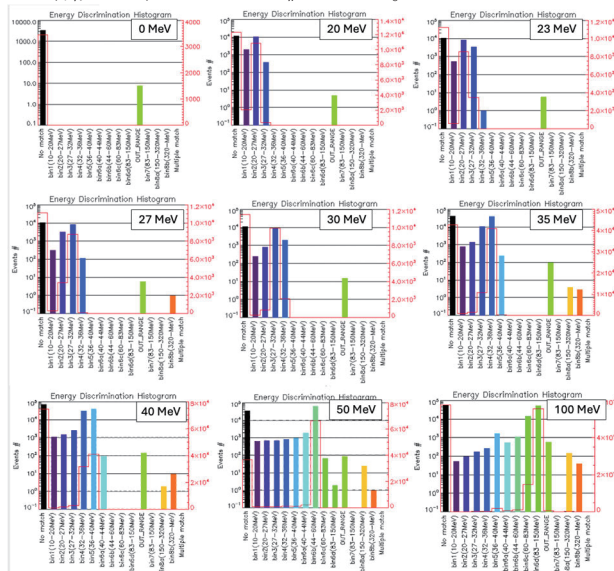


図 4: RMS-p(1o)各エネルギーの陽子が入射した場合のエネルギーヒストグラム応答

a. 情報通信研究機構(NICT)

反応断面積測定に向けた固体重水素標的の開発
Development of Solid Deuterium Target for Reaction Cross Section Measurements
(25HH009)

森口哲朗^a、小沢顕^a、矢野朝陽^a、三河美紗希^a、三井真音^a、小林颯人^a、

岩本怜^a、齊藤義仁^a、北川敦志^b、佐藤眞二^b

T. Moriguchi^a, A. Ozawa^a, A. Yano^a, M. Mikawa^a, M. Mitsui^a, H. Kobayashi^a,
R. Iwamoto^a, Y. Saito^a, A. Kitagawa^b and S. Sato^b

Abstract

We are developing a solid deuterium target (SDT) for reaction cross section (σ_R) measurements. In FY2025, we measured a reaction rate between the SDT and a ^{12}C beam. The present results suggest a feasibility of the SDT for σ_R measurements.

1. 研究の目的とバックグラウンド

反応断面積 (σ_R) とは弾性散乱を除く原子核反応の反応確率であり、原子核の核半径の導出にとって、 σ_R 測定は有効な実験手法とされている。この手法の原理は、核半径が大きい (小さい) ほど σ_R も大きく (小さく) となると直感的に理解できる。特に、原子核の陽子分布半径 (r_p) と中性子分布半径 (r_n) を別々に導出することは、中性子物質などの非対称核物質の研究にとって重要である。理論的には、 r_p と r_n を精度良く導出する手法として、陽子標的と重陽子標的を用いた σ_R 測定が提案されている [1]。これは陽子-陽子と陽子-中性子で核子間の相互作用が異なることに基づく。我々のグループでは陽子標的として、既に σ_R 測定に特化した固体水素標的 (SHT) を開発した [2]。現在、我々はこの SHT の発展として、固体重水素標的 (SDT) の開発を進めている。令和 7 年度の実験は、開発中の SDT にイオンビームを照射し、反応標的としての有効性を確認することを目的とした。

2. 今年度の研究内容

図 1 は SDT システムの写真である。約 10 K に冷やした銅製の標的セルに常温の重水素ガスを約 180 Torr で供給することにより、円筒形の固体重水素 ($\phi 50 \times 50 \text{ mm}^3$) が作られる。作製中、ビーム窓となるカプトン膜が差圧によって膨れることを抑えるために、

標的セルにはカプトン膜を覆う追加のセルが取り付けられており、重水素ガスと等圧のヘリウムガスが流せるようになっている。図 1 のように、標的セルの上部は SDT が作られ、標的セルの下部は標的の無いバックグラウンド測定で利用される。標的セルは輻射シールドで囲まれ、真空チェンバー内に入れられる。真空チェンバーは昇降機に設置されているので、昇降機を上下させることで、SDT を溶かすことなく、短時間で標的有り無しを切り替えることができる。図 2 は実験で使用した SDT の写真である。標的の上部から伸びる影のように見えるものは SDT 作成中に発生する亀裂である。

実験は生物照射実験室で行われ、HIMAC からの核子あたり 400 MeV の ^{12}C ビームを SDT に照射した。標的の上流と下流には、それぞれ、プラスチックシンチレーションカウンターとイオンチェンバーを設置し、SDT への入射粒子数と出射粒子数を計数した。イオンチェンバーは 9 枚のアノード電極を有し、3 枚ずつを 1 つの信号としてまとめることで、計 3 つの信号を読み出すことができる。

3. 今年度の研究成果と解析結果

図 3 は SDT に ^{12}C ビームを照射した時に、イオンチェンバーで得られた信号の相関である。炭素同位体やボロン同位体のピークが確認できる。入射した ^{12}C と図 3 に示す炭素同位体の粒子数比から求めた反応率は、標的なし測定で得られたバックグラウンドを差し引くと約 8%であった。統計誤差を考慮すると、この結果は予想値と一致する。これは、図 2 に見られる SDT の亀裂が σ_R 測定に大きな影響を与えないことを示唆し、本研究により開発中の SDT が σ_R 測定における反応標的として有効であることを示し

ている。また、令和7年度の実験では、反応率の位置依存性を確認するために、コリメータを用いて、SDTの異なる位置にもビームを照射した。詳細な解析は現在進行中である。今後は、SHTとSDTを用いた σ_R 測定を進め、 r_p と r_n の導出を試みる。

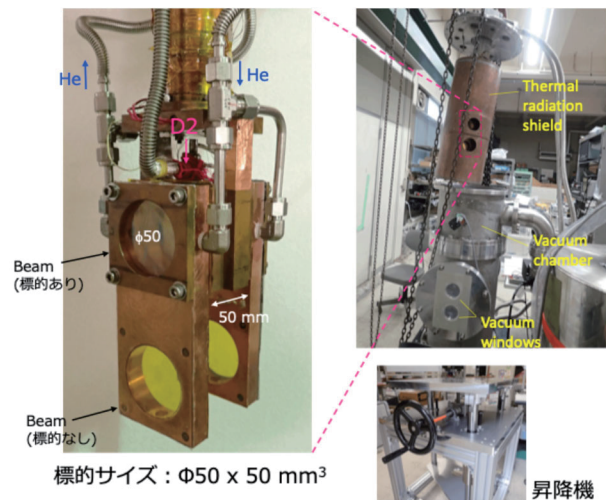


図1: 固体重水素標的(SDT)の標的セル(左)、真空チェンバー(右上)、昇降機(右下)の写真。

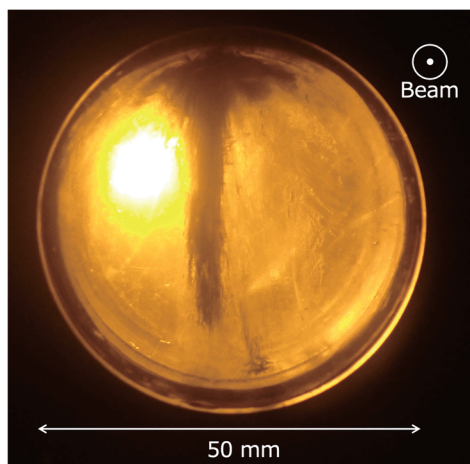


図2: 実験で使用したSDT。

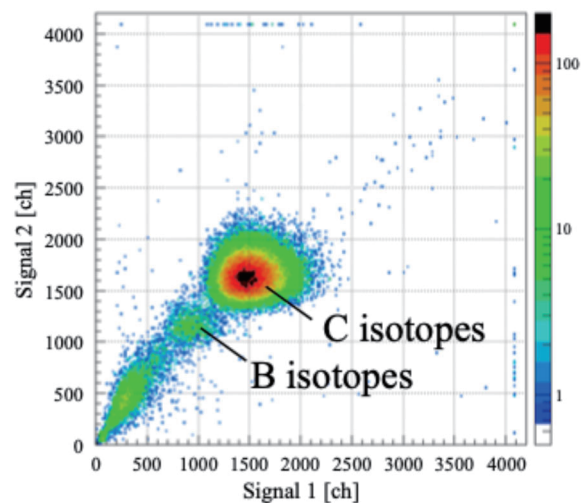


図3: ^{12}C をSDTに照射した時に得られたイオンチェンバーからの信号の相関。

参考文献

- [1] W. Horiuchi et al., Phys. Rev. C 102, 054601 (2020).
- [2] T. Moriguchi, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 624, 27 (2010).

- a. 筑波大学 数理物質系
Univ. of Tsukuba
- b. 量子医科学研究所
QST

(1) 原著論文

1. G. Takayama, M. Fukuda, M. Tanaka, M. Fukutome, M. Takechi, T. Suzuki, A. Homma, D. Nishimura, T. Moriguchi, D. S. Ahn, A. Aimaganbetov, M. Amano, M. Amitani, H. Arakawa, H. Baba, S. Bagchi, K.-H Behr, N. Burtebayev, K. Chikaato, H. Du, T. Fujii, N. Fukuda, C. Fukushima, H. Geissel, T. Hori, S. Hoshino, R. Igosawa, A. Ikeda, N. Inabe, K. Inomata, S. Ishitani, K. Itahashi, T. Izumikawa, D. Kamioka, N. Kanda, I. Kato, I. Kenzhina, Z. Korkulu, Y. Kuk, K. Kusaka, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, D. Nagae, S. Nakamura, M. Nassurlla, K. Nishimuro, K. Nishizuka, N. Noguchi, M. Ohtake, T. Ohtsubo, S. Omika, H. J. Ong, K. Onishi, A. Ozawa, A. Prochazka, S. K. Sakhiyev, H. Sakurai, C. Scheidenberger, Y. Shimizu, T. Sumikama, S. Suzuki, H. Suzuki, R. Taguchi, H. Takeda, Y. Tanaka, Y. Tanaka, I. Tanihata, Y. Togano, T. Wada, K. Wakayama, S. Yagi, T. Yamaguchi, R. Yanagihara, Y. Yanagisawa, A. Yano, K. Yasuda, K. Yoshida, T. K. Zholdybayev, Interaction- and charge-changing cross sections for neutron-rich $^{63-80}\text{Cu}$ isotopes toward the derivation of neutron skin thickness, Nuclear Physics A, 1065, 123261(5 pages) (2025).

(2) 国際研究集会などの Proceedings

なし

(3) 学会及び研究会の口頭発表、ポスター発表

1. 森口哲朗, “加速器と不安定核研究”, KEK-day, 筑波大学 (2026年3月19日).
2. Hayato Kobayashi, Tetsuaki Moriguchi, Akira Ozawa, Daiki Nishimura, Masaomi Tanaka, Miki Fukutome, Soshi Ishitani, Ryo Taguchi, Gen Takayama, Asahi Yano, Kazuhiro Adachi, Hidetada Baba, Shun Endo, Mitsunori Fukuda, Naoki Fukuda, Yi He, Yuto Ichinohe, Chinami Inoue, Rinon Kageyama, Yuta Kikuchi, Nobuyuki Kobayashi, Kensuke Kusaka, Keita Maeda, Kento Matsuyama, Shin'ichiro Michimasa, Mototsugu Mihara, Misaki Mikawa, Maoto Mitsui, Daisuke Nagae, Satoru Nishizawa, Masao Ohtake, Takashi Ohtsubo, Claudio Santonastaso, Rena Sasamori, Fubuki Sato, Toshiya Shimamura, Yohei Shimizu, Hiroshi Suzuki, Takeshi Suzuki, Hiroyuki Takeda, Shoko Takeshige, Koki Tezuka, Yasuhiro Togano, Kohei Watanabe, Takayuki Yamaguchi, Yoshiyuki Yanagisawa, Keigo Yasuda, Ibuki Yasuda, Masahiro Yoshimoto, Wei Yu, “Nucleon Removal Cross Sections of ^{90}Sr Using a Thick Solid Deuterium Target”, RIBF Users Meeting 2026, RIKEN Nishina

- Center, Wako, Saitama (Mar. 4-5, 2026).
3. 小林颯人, “固体重水素標的を用いた核子剥離断面積”, TRIP UC 元素変換 実験グループ研究会, 朱鷺メッセ及び新潟大学五十嵐キャンパス、新潟 (2026年3月2-3日).
 4. 三井真音, “陽子過剰 Ca 同位体の荷電変化断面積の測定”, TRIP UC 元素変換 実験グループ研究会, 朱鷺メッセ及び新潟大学五十嵐キャンパス、新潟 (2026年3月2-3日).
 5. 矢野朝陽, “Xe ビームを用いた固体水素・重水素標的の一様性の評価”, TRIP UC 元素変換 実験グループ研究会, 朱鷺メッセ及び新潟大学五十嵐キャンパス、新潟 (2026年3月2-3日).
 6. Kobayashi Hayato, Moriguchi Tetsuaki, Ozawa Akira, Nishimura Daiki, Tanaka Masaomi, Fukutome Miki, Ishitani Soshi, Taguchi Ryo, Takayama Gen, Yano Asahi, Adachi Kazuhiro, Baba Hidetada, Endo Shun, Fukuda Mitsunori, Fukuda Naoki, He Yi, Ichinohe Yuto, Inoue Chinami, Kageyama Rinon, Kikuchi Yuta, Kobayashi Nobuyuki, Kusaka Kensuke, Maeda Keita, Matsuyama Kento, Michimasa Shin'ichiro, Mihara Mototsugu, Mikawa Misaki, Mitsui Maoto, Nagae Daisuke, Nishizawa Satoru, Ohtake Masao, Ohtsubo Takashi, Santonastaso Claudio, Sasamori Rena, Sato Fubuki, Shimamura Toshiya, Shimizu Yohei, Suzuki Hiroshi, Suzuki Takeshi, Takeda Hiroyuki, Takeshige Shoko, Tezuka Koki, Togano Yasuhiro, Watanabe Kohei, Wei Yu, Yamaguchi Takayuki, Yanagisawa Yoshiyuki, Yasuda Keigo, Yasuda Ibuki, Yoshimoto Masahiro, “One-proton Removal Cross Section of ^{90}Sr Using a Thick Solid Deuteron Target”, Joint Symposium on Nuclear Data and ERATO TOMOE project in 2025, JAEA Tokai Mirai Base, Ibaraki (Nov. 19-21, 2025).
 7. Mitsui Maoto, Moriguchi Tetsuaki, Ozawa Akira, Nishimura Daiki, Tanaka Masaomi, Taguchi Ryo, Takayama Gen, Yano Asahi, Adachi Kazuhiro, Amitani Mei, Baba Hidetada, Fukuda Mitsunori, Fukuda Naoki, Fukushima Chihaya, Fukutome Miki, Ichinohe Yuto, Ishitani Soshi, Ito Nao, Inoue Chinami, Kageyama Rinon, Kikuchi Yuta, Kitagawa Naoyuki, Kobayashi Hayato, Kusaka Kensuke, Matsuyama Kento, Michimasa Shin'ichiro, Mihara Mototsugu, Mikawa Misaki, Nakamura Yuki, Nishizawa Satoru, Ohtake Masao, Ohtsubo Takashi, Sasamori Rena, Shimamura Toshiya, Shimizu Yohei, Suzuki Takeshi, Suzuki

- Hiroshi, Takeda Hiroyuki, Takiura Kazuki, Tezuka Koki, Togano Yasuhiro, Tomioka Nao, Tsujisaka Tasuku, Watanabe Kohei, Yamaguchi Takayuki, Yanagisawa Yoshiyuki, Yasuda Keigo, Yoshimoto Masahiro, Zhang Hanbin, “Measurement of charge-changing cross sections of $^{38-43}\text{Ca}$ ”, Joint Symposium on Nuclear Data and ERATO TOMOE project in 2025, JAEA Tokai Mirai Base, Ibaraki (Nov. 19-21, 2025).
8. Moriguchi Tetsuaki, Nishimura Daiki, Tanaka Masaomi, Fukutome Miki, Ishitani Soshi, Taguchi Ryo, Takayama Gen, Yano Asahi, Adachi Kazuhiro, Amitani Mei, Baba Hidetada, Endo Shun, Fukuda Mitsunori, Fukuda Naoki, Fukushima Chihaya, He Yi, Ichinohe Yuto, Inoue Chinami, Ito Nao, Kageyama Rinon, Kikuchi Yuta, Kitagawa Naoyuki, Kobayashi Hayato, Kobayashi Nobuyuki, Kusaka Kensuke, Maeda Keita, Matsuyama Kento, Michimasa Shin'ichiro, Mihara Mototsugu, Mikawa Misaki, Mitsui Maoto, Nagae Daisuke, Nakamura Yuki, Nishizawa Satoru, Ohtake Masao, Ohtsubo Takashi, Ozawa Akira, Santonastaso Claudio, Sasamori Rena, Sato Fubuki, Shimamura Toshiya, Shimizu Yohei, Suzuki Hiroshi, Suzuki Takeshi, Takeda Hiroyuki, Takeshige Shoko, Takiura Kazuki, Tezuka Koki, Togano Yasuhiro, Tomioka Nao, Tsuzisaka Tasuku, Watanabe Kohei, Wei Yu, Yamaguchi Takayuki, Yanagisawa Yoshiyuki, Yasuda Ibuki, Yasuda Keigo, Yoshimoto Masahiro, Zhang Hanbin, “Measurement of Interaction Cross Sections in the RIKEN TRIP-S³CAN program”, Joint Symposium on Nuclear Data and ERATO TOMOE project in 2025, JAEA Tokai Mirai Base, Ibaraki, (Nov. 19-21, 2025).
 9. T. Moriguchi, “Measurements of Reaction Cross Sections with a Solid Hydrogen Target and Development of the Target System”, International Symposium Commemorating the 40th Anniversary of the Halo Nuclei (HALO-40), Beijing, China (Oct. 12-18, 2025).

(4) その他

なし

(5) 学位論文

1. 三井真音、陽子過剰 Ca 同位体の荷電変化断面積の測定、修士論文、筑波大学数理物質科学研究群物理学学位プログラム (2026)

ガスアクティブ標的による核物質の物性研究

Study of matter property of the nucleonic system using gaseous active target (25HH015)

S. Ota^a, F. Endo^b, H. Shibakita^c, N. Kobayashi^a, L. Wickremasinghe^a, F. Furukawa^a, S. Nishioka^c, R. Kojima^d,
N. Imai^d, R. Tsuchiya^e, R. Yokoyama^d, E. Takada^f

Abstract

We are developing the active target CAT-M to investigate the bulk properties of nuclear matter through the property, in particular the incompressibility, of the atomic nuclei. In order to evaluate the finite system effect to the nuclear property, the systematic measurement of inelastic scattering on both stable and unstable nuclei are required. The CAT-M is employed in the measurement for the unstable nuclei. In the present study, to further improve measurement accuracy and high-rate data acquisition capability, we continued the study for the reduction of ion backflow, which causes electric-field distortion due to space-charge effects under high-intensity heavy-ion beams, and carried out beam tests of a newly developed streaming readout waveform digitizer, SAMIDARE. Data analysis is currently ongoing, and this report summarizes the current status of the ion backflow studies and the first heavy-ion beam irradiation test of SAMIDARE.

Understanding the equation of state (EOS) of nuclear matter is fundamental to elucidating the properties of finite nuclei and neutron stars. In particular, experimental constraints on the isospin-dependent incompressibility $K\tau$ are important, and require systematic measurements of the isoscalar giant monopole resonance (ISGMR) over a wide range of nuclei, including unstable ones. To achieve this goal, we have been developing the active-target time projection chamber CAT-M. In previous studies, we have achieved ISGMR measurement for Kr-86 at HIMAC by installing a dipole magnet inside the recoil TPC in CAT-M, we successfully suppressed background events caused by a large amount of the delta electrons. A tiny TPC (Beam TPC) was recently introduced, which is located as close as the recoil TPC, to measure the beam position and direction precisely. In the present fiscal year, our research focuses on two major themes: (1) studies of ion backflow (IBF) in the TPC gas amplification stage, (2) performance tests of a newly developed streaming-readout waveform digitizer, SAMIDARE, using heavy-ion beam irradiation.

The CAT-M consists of a Beam TPC for beam tracking, a Recoil TPC and silicon detectors for recoil particle tracking, and dipole magnets for suppressing delta electrons. In both the Beam and Recoil TPCs, ionization electrons produced by charged particles injecting the field cage are transported by a uniform electric field formed, multiplied by THGEMs [5], and collected by readout electrodes. Particle trajectories are reconstructed from the measured drift times and hit positions. However, ion backflow—ions generated during the gas multiplication process and drifting back into the field cage—induces electric-field distortions that degrade tracking accuracy. In the Recoil TPC, such distortions can result in trajectory shifts of approximately 1° in the center-of-mass system, corresponding to energy shifts of about 1 MeV in the excitation-energy spectrum. In addition, the previously adopted data acquisition system for the CAT-M has been discontinued, requiring the development of a new readout system. To address these issues, we conducted experiments to evaluate ion backflow using two types of THGEMs with different hole configurations and to assess the performance of the newly developed waveform digitizer, SAMIDARE.

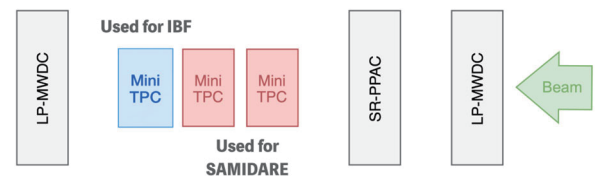


Figure1: Experimental setup. Two Beam TPCs were used for SAMIDARE tests and one for IBF measurements. Two LP-MWDCs and a SR-PPAC were used for position reference with a DAQ independent of SAMIDARE.

The experimental setup is shown in Fig. 1. Three Beam TPCs are located between two LP-MWDCs and one SR-PPAC, which gives the reference tracking detectors for the beam trajectory. Each Beam TPC consists of a field cage, a multiplication stage, and readout electrode. In this experiment, we used a 3-stage stack comprising two Normal THGEMs and one Flower THGEM, alternately layered at 2 mm intervals.

The negative voltage was applied to the readout electrode by a N1470 (CAEN) voltage supplier, and the current monitor output voltage was

recorded by a V1740 (CAEN) waveform digitizer. The current from the cathode plate, which corresponds to the backflow ions, were measured by using a 6485 Picoammeter (KEITHLEY), and the monitor output voltage was recorded by the V1740. The acquired waveforms are shown in the Fig. 3. The ion back flow rate of the 0.4% is achieved in this measurement. The further analysis is ongoing.

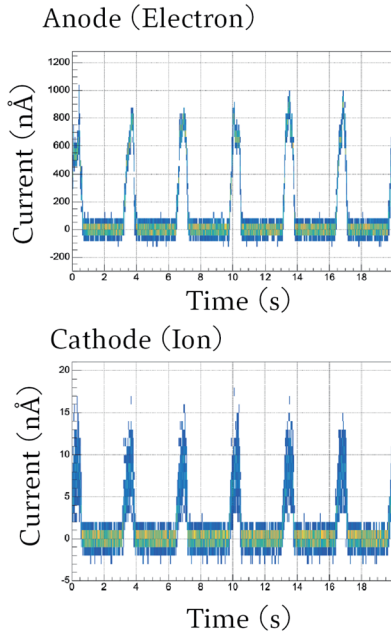


Figure 3 : anode signal (top) and cathode signal (bottom)

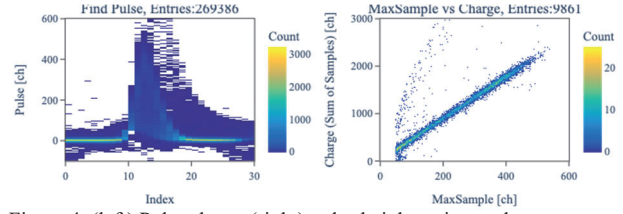


Figure 4: (left) Pulse shape, (right) pulse height vs integral.

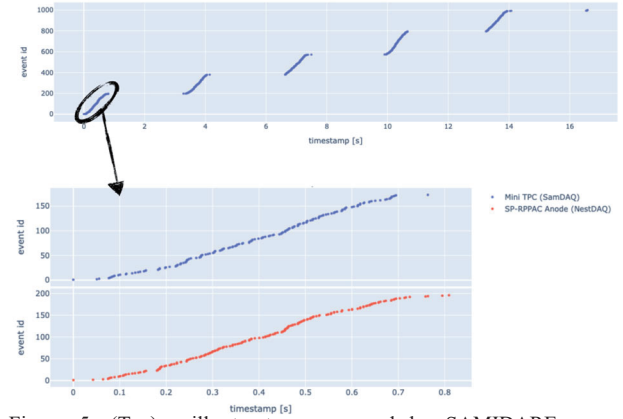


Figure 5: (Top) spill structure measured by SAMIDARE, (Bottom) one spill structure measured by each DAQs.

References

1. F. J. Fattoyev et al., Phys. Rev. C 86, 025804 (2012)
2. U. Garg et al., Prog. Part. Nucl. Phys 101, 55-95 (2018).
3. H. Miya et al., NIM-B 317, 701-704 (2013).
4. S. Hanai et al., NIM-B 541, 194-196 (2023).
5. M. Cortesi et al., Rev. sci. instrum 88, 013303 (2017)

^aResearch Center for Nuclear Physics, Osaka University

^bRIKEN Nishina Center

^cDepartment of Physics, Osaka University

^dCenter for Nuclear Study, University of Tokyo

^eDepartment of Physics, Rikkyo University

^fNational Institute of Radiological Sciences

The SAMIDARE test was performed using two Beam TPCs together with other beam-line detectors. Beam-line detectors were acquired using a streaming DAQ. This DAQ synchronized clock using the reference timing distributor MIKUMARI. In this study, DAQ integration was achieved by adopting the MIKUMARI as the operation clock of SAMIDARE. The acquired waveforms were analyzed to extract pulse timing and event reconstruction. The reconstructed pulse demonstrates pulse without distortion, and the linearities between pulse height and pulse integral indicates that no pile-up effects (Fig. 4).

Figure 5 shows the timing structure of the beam particles. The top panel presents data acquired with SAMIDARE. Measured time structure was consist with 3.3 s operation cycle of the synchrotron. In addition, the bottom panel shows the timing structure within a spill, derived from data with the streaming DAQ and SAMIDARE. A correlation was confirmed between recorded by SAMIDARE and those detected by streaming DAQ.

研究成果一覧 (25HH015)

(原著論文)

- C. Iwamoto, S. Ota et al., “Performance of prototype dual gain multilayer thick gas electron multiplier with high-intensity heavy-ion beam injections in low-pressure hydrogen gas”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2023 083H01 (<https://doi.org/10.1093/ptep/ptad095>)
- S. Hanai, S. Ota et al. “Development of fast-response PPAC with strip-readout for heavy-ion beams”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2023, 123H02 (<https://doi.org/10.1093/ptep/ptad140>)
- F. Endo, et al., “Measurement of the isoscalar giant monopole resonance in ^{86}Kr via deuteron inelastic scattering using an active target CAT-M”, PTEP, ptapg010 (2026)
- S. Fracassetti, *et al.*, “Data analysis procedures to improve energy resolution in silicon detectors using GET electronics”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, January 2025

(Proceedings)

該当なし

(学会発表)

- S. Ota: “Pair correlation and condensation via two-nucleon transfer reactions”, The 3rd RIKEN RCNP- CAS IMP Joint symposium, Saitama, Japan
- 大田 晋輔: 「陽子・中性子スピン三重項対相関の実験的研究」、RCNP研究会「核子系と電子系における対相関と対凝縮相」、2024年9月、大阪、日本
- S. Ota: “Recent activities on the study of nucleonic matter properties EoS and Pair Condensation”, 2024 Annual Meeting of NRF/NSCF/JSPS A3 Foresight Program “Nuclear Physics in the 21st century”, July, 2024, Seoul, Korea
- 大田 晋輔: 「核子多体系の凝縮相の解明に向けた実験的研究の発展」、シンポジウム「極限非平衡現象から探る宇宙における物質と構造の創生」、日本物理学会、オンライン、2024年3月
- S. Ota: “Development of CAT-M for experiments with high-intensity heavy-ion beams”, New Results and Prospects of Time Projection Chambers for Low-energy Nuclear Physics 6th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Hawaii, US, Nov. 2023.
- 大田 晋輔: “大強度重イオンビーム照射実験のためのガスアクティブ標的CAT-Mの現状”, MPGD & アクティブ物質TPC研究会、2023年12月、仙台、日本

- 大田 晋輔: “核子物質の物理”、HIMACにおける原子核物理学研究の展望、2023年11月、大阪、日本
- 大田 晋輔: “Overview of the workshop topics and Experimental studies for nucleon pair condensation”, RCNP研究会「Microscopic approach from pair correlation to pair condensation」、2023年9月、大阪、日本
- F. Endo, “Current status of systematic ISGMR measurements using an active target CAT-M”, Italy-Japan Symposium on Joint Activities in Fundamental Physics, Kore University of Enna, 3月 (2026)
- F. Endo, “Mini TPCを用いた連続読み出し波形ディジタイザSAMIDAREの実機試験”, 第22回MPGD研究会および第9回アクティブ媒質TPC座談会の合同研究会, 岩手大学, 9月 (2025)
- F. Endo, “ISGMR measurements in stable Kr and Xe isotopes using an active target CAT-M: Toward systematic studies including unstable nuclei for a precise determination of $K\tau$ ”, The 8th International Conference on Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions, Florida State University, 11月 (2025)
- F. Endo, “Development of a tiny THGEM-based TPC for high-intensity heavy ion beam experiment”, 20th International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics, Chateau Fairmont Whistler, 10月 (2025)
- F. Endo, “Commissioning test of the SAMIDARE board using the Mini TPC towards the upgrade for CNS Active Target”, Workshop on New Generations of Detector and Data Acquisition Systems for Nuclear Physics, Michigan State University, 9月 (2025)
- 遠藤史隆, “CAT-Mアップグレードに向けたMini TPCを用いたSAMIDAREボードの実装試験”, 日本物理学会 第80回年次大会(2025) 広島大学, 9月 (2025)
- F. Endo, “ISGMR Measurement of Kr isotopes using Active Target CAT-M”, the 29th International Nuclear Physics Conference 2025, Daejon Convention Center, 5月 (2025)
- F. Endo, “原子核の密度振動モードの系統的測定による核物質の非圧縮率研究”, ～中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ2025, 理化学研究所, 5月 (2025)
- F. Endo, “ISGMR measurement of ^{86}Kr with an active target CAT-M”, Single-particle and collective motions from nuclear many-body correlation, March, 2025, Fukushima, Japan
- F. Endo, “ISGMR Measurement of ^{86}Kr with the active target CAT-M and future plan for measuring the ISGMR of neutron deficient tin isotopes”, Advancing Physics at Next RIBF, January, 2025, Saitama, Japan
- 遠藤史隆, “アクティブ標的CATによるISGMR 測定実験の現状とアップグレード計画”, マイクロパターンガス検出器 (MPGD) &アクティブ媒質TPC合同研究会, 2024年12月, 大阪, 日本

- 遠藤史隆, “大強度重イオンビーム照射可能なアクティブ標的の開発と応用“, 山田研究会 第6回量子線イメージング研究会 2024年9月, 東京, 日本
- 遠藤史隆, “アクティブ標的CAT-Mを用いた重陽子非弾性散乱による ^{86}Kr の非圧縮率測定”, 一般社団法人 日本物理学会 2024年秋季大会, 2024年9月, 北海道, 日本
- F. Endo, “ISGMR measurement of ^{86}Kr via deuteron inelastic scattering using CNS active target”, SNP CNS Summer School 2024, August 2024, Tokyo, Japan
- F. Endo, “Monopole transition measurements using gas active target CAT-M”, Korea-Japan symposium on new generation RI beam facilities and nuclear processes in stellar explosions with neutron star, March, 2024, Online
- F. Endo, “Systematic ISGMR measurements by using the active target toward determination of the nuclear matter incompressibility”, Giant monopole resonance and related topics, May 2023, Saitama, Japan
- H. Shibakita, “Toward the reduction of ion backflow in a TPC using Flower GEM”, 20th International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics, Chateau Fairmont Whistler, 10月 (2025)
- H. Shibakita, “Performance Evaluation of MiniTPC in CAT-M”, The 2023 Fall Meeting of the Division of Nuclear Physics of the American Physical Society and the Physical Society of Japan, Hawaii, 2023
- 柴北洋明, “MiniTPCにおける多段THGEMによるイオンバックフロー軽減”, 一般社団法人 日本物理学会 2024年春季大会, 2024年3月, オンライン
- H. Shibakita, “Toward the reduction of ion backflow in a TPC using Flower THGEM”, SNP CNS Summer School 2024, August, 2024, Tokyo, Japan
- 柴北洋明, “大強度ビーム入射時のTPCにおけるイオンバックフローの低減に向けたTHGEMの開発”, 一般社団法人 日本物理学会 2024年秋季大会, 2024年9月, 北海道, 日本

(そのほか)

該当なし

(学位論文)

- F. Endo, “Isoscalar giant monopole resonance of ^{86}Kr via deuteron inelastic scattering using gas active target CAT-M”, PhD thesis, Tohoku University, 2024
- S. Fracassetti, “Study of the ISGMR in Kr Isotopes with CAT-M Active Target”, PhD thesis, KU Leuven, 2025
- 柴北洋明, “異種のGEMにおけるイオンバックフローの抑制に向けた研究”, 修士論文, 大阪大学, 2025
- 柴北洋明, “小型ビーム検出器MiniTPCの性能向上に向けた研究”, 卒業研究発表, 大阪大学, 2024

動的核偏極法による不安定核の磁気双極子モーメント測定 Measurement of Magnetic Dipole Moments of Unstable Nuclei by Means of Dynamic Nuclear Polarization (25HH029)

三原基嗣^a, 手塚康晃^b, 笹森玲那^b, 高山元^a, 田口諒^a, 石谷壮史^a, 安田圭吾^a, 福田光順^a, 福留美樹^b, 阿部高士^b, 松田昂大^b, 大坪隆^b, 泉川卓司^c, 稲角直也^a, 岩本康希^a, 岩崎友紀^a, 溝井浩^d, 北川敦志^e, 佐藤真二^e

M. Mihara^a, Y. Tezuka^b, R. Sasamori^b, G. Takayama^a, R. Taguchi^a, S. Ishitani^a, K. Yasuda^a, M. Fukuda^a, M. Fukutome^b, T. Abe^b, K. Matsuda^b, T. Ohtsubo^b, T. Izumikawa^c, N. Inazumi^a, K. Iwamoto^a, T. Isawaki^a, Y. Mizoi^d, A. Kitagawa^e, and S. Sato^e

Abstract

To overcome the current stagnation in measuring the magnetic dipole moments of unstable nuclei, we have begun to develop a measurement technique using the dynamic nuclear polarization (DNP) method. As a first step, we have applied the DNP method to ^{31}Si ($I^\pi = 3/2^+$, $T_{1/2} = 157.3$ m) produced in P-doped Si and attempted to measure its magnetic moment.

1. 研究目的

原子核の磁気双極子モーメントは核構造を理解する上で非常に重要な物理量である。しかし、安定線から遠く離れた不安定核のスピンを偏極させることが非常に困難であるため、磁気双極子モーメント未測定原子核がまだまだ多数残っているのが現状である。この状況を打開するために、本研究では動的核偏極 (DNP) 法により不安定核を偏極させて磁気双極子モーメントを測定する手法の開発を行う。今回はその第一段階として、重陽子照射により P ドープ Si 結晶中に不安定核 ^{31}Si ($I^\pi = 3/2^+$, $T_{1/2} = 157.3$ m) を生成し、DNP 法により ^{31}Si をスピンの偏極させてその磁気モーメントを測定を目指す。

2. 今年度の研究内容

HIMAC の中エネルギービーム照射室に供給された 12 MeV の重陽子 (d) ビームを用いて実験を行った。図 1 に示すように標的チャンバーを設置し、照射後使用する電子スピン共鳴 (ESR) 装置の試料管に収まるよう、約 3 mm × 15 mm に切った厚さ 0.7 mm の P ドープ Si ($n_p = 6 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$) 単結晶を複数並べ、Cu 製のホルダーに装着して約 4 時間ビーム照射を行った。 ^{30}Si (d, p) ^{31}Si 反応により ^{31}Si を生成後、最も線量の高い標的片を選び、照射損傷を回復させるために 800 °C で約 10 分間焼鈍した後、ただちに図 2 に示した ESR 装置に装着した。照射試料については、図 3 に示すように、焼鈍前後の ESR スペクトルから、ドナー準位の電子と ^{31}P 核スピン間の超微細相互作用により分裂した 2 本の共鳴線が焼鈍により先鋭化し、d 照射により形成された格子欠陥が回復する様子が確かめられている。試料管をキャビティー内に挿入して 20 K に冷却し、~0.3 T

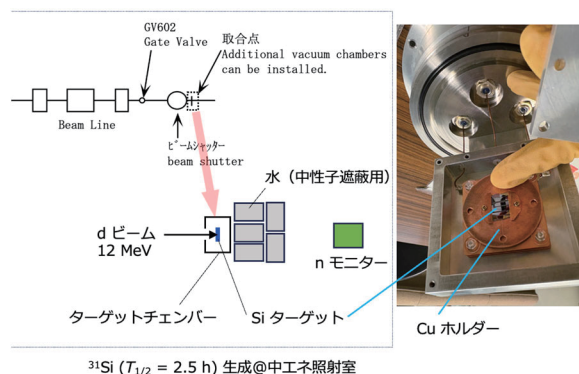


図 1. 中エネルギービーム照射室における ^{31}Si 生成用標的の様子

の静磁場を低磁場側の共鳴線の信号が最大となる (図 3 中に矢印で示している) 値に固定してマイクロ波を照射すると、低温・静磁場下で得られた電子スピン偏極が DNP により核スピン偏極へと移行する [1]。

^{31}Si の核スピン偏極は、放出される β 線の非対称度をモニターすることにより観測することができる。しかし、ESR 装置のキャビティーチャンバーが厚く試料管を挿入した状態では β 線を検出

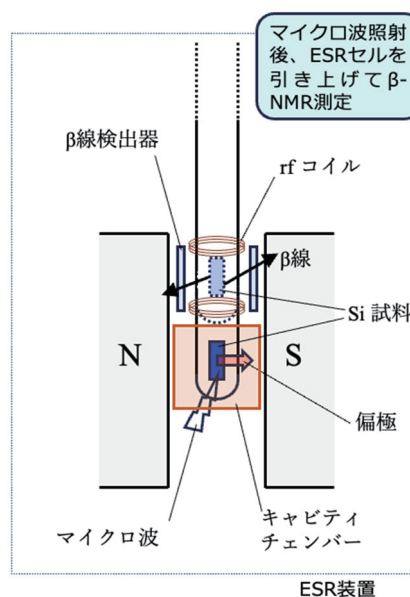


図 2. ^{31}Si の DNP および β -NMR 測定装置の概略図。

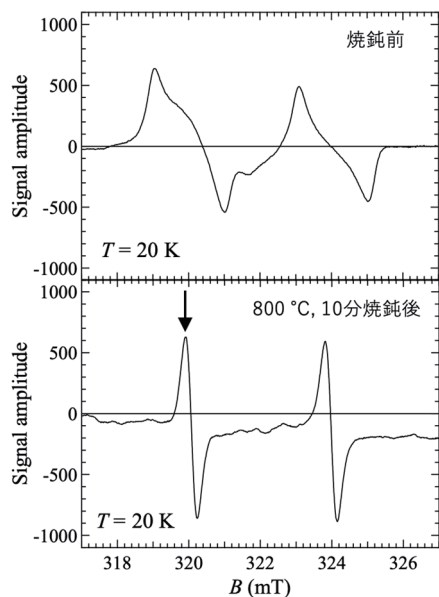


図 3. P ドープ Si 単結晶の重陽子ビーム照射後の ESR スペクトル.

することが出来ないため、 β 線計測時は図 2 に示すように試料管を引き上げて測定を行った。このとき高周波 (rf) 磁場も印加し、核磁気共鳴 (NMR) による磁気双極子モーメント探索も行った。

3. 今年度の研究成果と解析結果

図 4 に示すように、 β 線時間スペクトルは ^{31}Si の半減期を再現しており、d 照射した Si 単結晶中で ^{31}Si が生成されていることが確認できた。磁気双極子モーメントを探索するために、キャビティー内で約 100 mW のマイクロ波を約 10 分照射した後試料を引き上げ、6 分間 β 線を計測しながら 1 分毎にパルス rf 磁場を印加して adiabatic fast passage (AFP) による偏極反転を試みた。マイクロ波照射-測定のコイルを繰り返して得られた、 β 線非対称度の変化と rf 磁場の周波数の関係 (β -NMR スペクトル) を図 5 に示す。1.05 MHz 付近に共鳴が存在する可能性が見られるが、まだ統計的に有意であるとは言えない。かつ、図 6 に示す

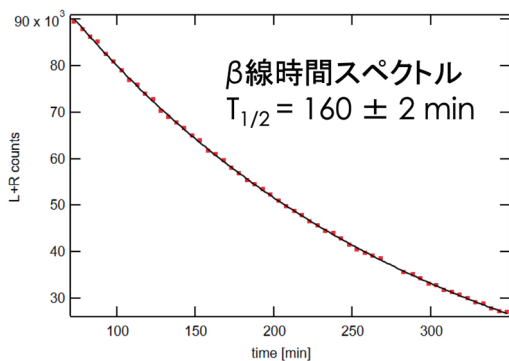


図 4. 重陽子ビーム照射後の P ドープ Si 標的から放出された β 線の時間スペクトル.

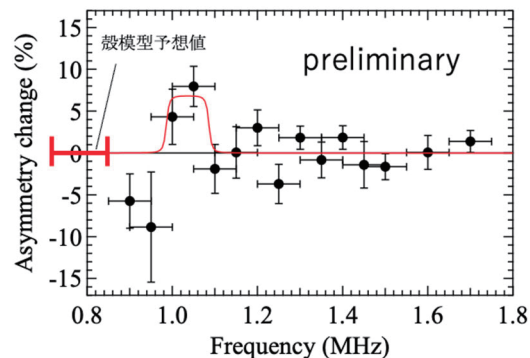


図 5. DNP 法により測定した ^{31}Si の β -NMR スペクトル.

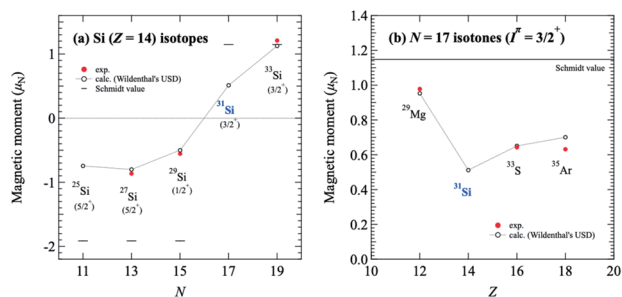


図 6. 殻模型による ^{31}Si およびその近傍核の磁気双極子モーメントの計算値と実験値の比較.

K-SHELL による殻模型計算 [2] 結果から予想される 0.8 MHz 付近をまだ探索出来ていないため、今後この周波数領域を重点的に探索する必要があると考えている。

参考文献

- [1] H. Hayashi et al., Phys. Rev. B **80**, 045201 (2009).
- [2] N. Shimizu, et al., Comput. Phys. Comm. **244**, 372 (2019).

- a. 大阪大学大学院理学研究科 (UOsaka)
- b. 新潟大学大自然科学研究科 (Niigata Univ.)
- c. 新潟大学研究統括機構 (IRA, Niigata Univ.)
- d. 大阪電気通信大学 (OECU)
- e. 量子科学技術研究開発機構 (QST)

2025 年度の研究成果一覧

(Proceedings 等)

- Mihara M., Kimura Y., Sugisaki T., Fukuda M., Takayama G., Fukutome M., Taguchi R., Ishitani S., Amitani M., Nakamura Y., Fukushima C., Nishimura D., Izumikawa T., Ohtsubo T., Momota S., Tanaka M., Ozawa A., Kitagawa A., Sato S.: Chemical shift analysis and precise magnetic moment of ^{17}N studied by liquid-state beta-NMR spectroscopy, *KURNS-EKR-22*, "Proceedings of the Specialist's Meeting on Nuclear Spectroscopy and Condensed Matter Physics Using Short-Lived Nuclei XI", 27-29 (2025).

(学会及び研究会口頭発表等)

- 福留美樹、大坪隆、手塚康晃、笹森 玲那、阿部高士、松田昂大、島村敏矢、安達主紘、泉川卓司、三原基嗣、高山元、田口諒、石谷壮史、安田圭吾、福田光順、稲角直也、岩本康希、岩崎友紀、北川敦志、佐藤眞二：動的核偏極法による不安定核 ^{31}Si の磁気双極子モーメント測定に向けた手法の構築、令和7年度専門研究会「短寿命RIを用いた核分光と核物性研究 XII」、2026.2.
- 福留美樹、大坪隆、手塚康晃、笹森 玲那、阿部高士、松田昂大、島村敏矢、安達主紘、泉川卓司、三原基嗣、高山元、田口諒、石谷壮史、安田圭吾、福田光順、稲角直也、岩本康希、岩崎友紀、北川敦志、佐藤眞二：動的核偏極法による不安定核の磁気双極子モーメント測定に向けた手法の構築、第14回 停止・低速RIビームを用いた核分光研究会 (14th SSRI)、2026.2.
- 三原基嗣、手塚康晃、笹森玲那、高山元、田口諒、石谷壮史、安田圭吾、福田光順、福留美樹、阿部高士、松田昂大、大坪隆、泉川卓司、稲角直也、岩本康希、岩崎友紀、溝井浩、北川敦志、佐藤眞二：動的核偏極法による不安定核 ^{31}Si の磁気双極子モーメント測定、日本物理学会2026年春季大会、オンライン、2026.3.
- 岩崎友紀、岩本康希：不安定核 ^{31}Si の生成断面積の測定、大阪大学理学部プロジェクト「2025秋冬学期オーナーセミナー自主研究発表会」、大阪大学、2026.3.

(学位論文)

- 手塚康晃：動的核偏極法を用いた ^{31}Si の磁気モーメント測定に関する研究、2025年度修士論文、新潟大学大学院自然科学研究科 (2026).

発表会開催日に発表ができない課題

発表会開催後日に録画発表

Measurement of isotopic light ion cross sections with a nuclear fragment spectrometer

Project number 25HH007

T. Campbell-Ricketts^{1,2}, S. George^{3,2}, J. Norbury^{3,4}, C. Zeitlin^{1,2}, D. Laramore^{1,2}, and L. Stegeman^{1,2}

1) Leidos Inc., 2) Space Radiation Analysis Group, Johnson Space Center, 3) NASA, 4) Langley Research Center

Abstract

The nuclear fragment spectrometer is being developed to count isotopically-identified light fragments in heavy-ion beam interactions with various target materials, in the few-hundred MeV/u velocity range. The spectrometer consists of a sequence of pixel detectors for particle tracking and LET measurement, together with an assembly of permanent magnets in a circular Halbach array. In 2025, experiments were conducted with the system at HIMAC, to investigate its tracking and particle identification capabilities. In July 2025, we operated the system in a 400 MeV/u carbon beam, with and without a thin graphite target. In November, 2025, we performed tracking experiments in a 150 MeV/u helium beam, with and without a 32 mm PMMA target.

(1) Introduction

In the field of radiation-related astronaut safety, perhaps the greatest source of physics-based uncertainty arises from the marked lack of consistently measured light-ion production cross sections [1]. The lack of this information, for example, has made it impossible to verify if and where exists the long-hypothesized optimum in shielding thickness for a space vehicle exposed to galactic cosmic rays. These light-ion fragments have a relatively dominant effect on biological hazard, yet are impossible to accurately quantify in transport codes, due to the historical difficulty in measuring the relevant cross sections.

Pixel detectors are a powerful tool in high-energy physics. For more than a decade, NASA has been using Timepix devices for detailed measurement of the space radiation environment, and it was realized that these detectors could be brought into service to address this knowledge gap in dosimetrically important nuclear cross sections. Providing this information would not only serve the space-radiation community, but would also have impact on terrestrial activities, such as treatment planning for ion therapy, and possibly in shielding design and other aspects of nuclear engineering.

(2) Methodology

The nuclear fragment spectrometer uses a sequence of three Timepix3 detectors to track particles downstream of a beam target. The Timepix3s allow synchronized time tagging, precise to within a few nanoseconds, high spatial resolution, thanks to their 256x256 array of 55 μm square pixels, and deposited energy resolution, due to a time-over-threshold mechanism. Two of the detectors perform a precise measurement of the trajectory of an individual particle before it enters a circular Halbach magnetic array.

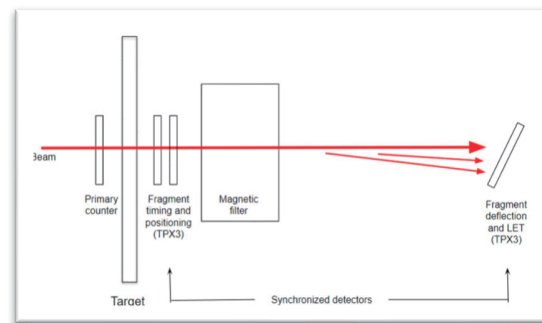


Figure 1: Schematic layout of the nuclear fragment spectrometer

The Halbach assembly consists of eight 100 mm long neodymium magnets in a circular arrangement. In the central region of this ring, where the tracked particles flow, a uniform vertical magnetic field of 0.5 Tesla provides a deterministic lateral kick to all charged

particles. With this field strength over this distance, deflection of several mm is reasonable for most species, at energies below 500 MeV/u.

The third Timepix3, placed about 1 m downstream of the Halbach magnet, registers the deflection of the previously tracked particles, as well as their LET. The magnetic deflection is dependent on the charge to mass ratio of the particle, together with its velocity. The LET measurement is also determined by velocity and charge. Thanks to the discrete nature of Z and A, with these two measurements it is in principle possible to solve for Z, A, and kinetic energy.

A fourth Timepix3 can be placed upstream of the target material, to record the number of incident primary particles, thereby allowing normalization of the fragment counts and determination of the desired double-differential cross sections.

Finite-element calculations of the Halbach assembly have been performed, indicating a highly uniform magnetic field of just over 0.5 Tesla. We use Euler's method to solve for the downstream deflection of a given particle at a given energy due to this Halbach magnet (see Figure 2).

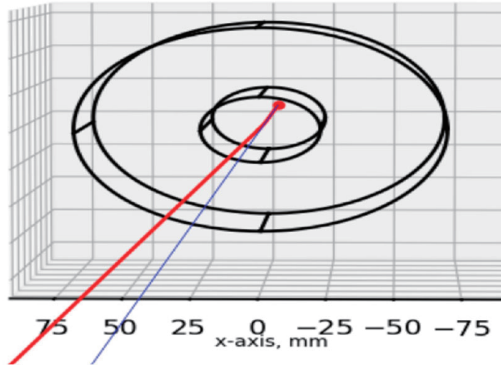


Figure 2: Calculated deflection of a 200 MeV/u α -particle moving towards the viewer. The deflected (red) and undeflected (blue) trajectories intersect a reference plane at predictable positions, allowing the lateral deflection to be determined.

The downstream detector is rotated (typically to 60°) to give multiple samples of the measured particle's LET, denoted F_j for the retarding force in the j -th pixel of the track. Denoting the measured deflection as D , then the maximum likelihood point in

species/velocity space can be derived from Bayes' theorem, and is given as

$$L_{max}(S_i, V) = \text{argmax}(P(F_1 F_2 \dots F_m | S_i V I) \times P(D | S_i V I))$$

where V is the particle's velocity and S_i is the i -th species in a list of particles with unique (Z, A) combinations.

The first term on the right of the above equation can be determined from the Landau-Vavilov distribution, or an equivalent model of the energy-deposition statistics:

$$P(F_1 F_2 \dots F_m | S_i V I) \approx \prod_{j=2}^{m-1} P_{LV}(F_j | S_i V I)$$

where m is the number of pixels along the length of the track. We ignore the first two pixels as we are uncertain of the exact path lengths through these, but with 18 or so pixels in total in a 0.5 mm thick detector at 60° , the product of $m-2$ terms gives a far better estimate than a single cluster-wide LET measurement [2].

The second term in the maximum-likelihood formula gives the probability for a measured deflection based on species and velocity. This deflection consists of a deterministic component, as illustrated in Figure 2, and a random tracking error. These errors are dominated by scattering in the tracking detectors and in the air between the tracker and the downstream detector. In previous years, we have measured these error distributions at HIMAC and other facilities for a variety of species and energies, allowing us to interpolate a general model for the Gaussian tracking errors, based on S_i , V , and the total flight distance.

Using these measured tracking errors, and assuming that the dispersion in deposited energy registration is dominated by the Landau-Vavilov statistics, we performed a Monte-Carlo evaluation of the maximum-likelihood identification scheme. The results for particles of 200 MeV/nucleon are shown in Figure 3.

We studied species of H (A=1, 2, 3) and He (A=3, 4) (10,000 of each particle type) and considered all reasonably likely hypotheses up to lithium-7. With the setup examined, we never saw a particle assigned the wrong atomic number, while errors in assigned atomic

mass were infrequent. When errors do occur in determination of A , they are no greater than ± 1 , and appear preferentially in the upward direction. This is because lighter isotopes undergo more diffusion during transit towards the measurement plane (i.e. greater tracking uncertainty), and so are less well localized at the detector, and more easily mis-identified than a nucleus that is heavier by one neutron. Figure 4 illustrates why this is the case. It may prove possible to correct our measurements based on understanding this bias mechanism.

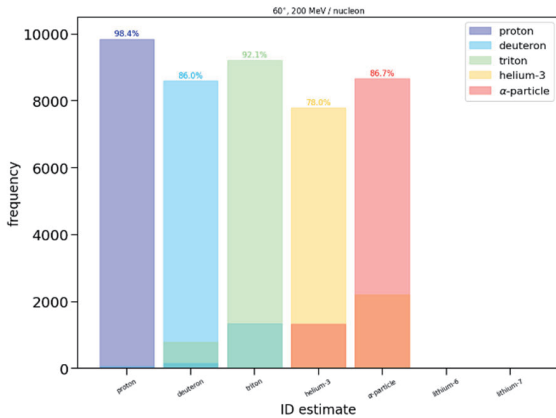


Figure 3: Monte-Carlo assessment of the maximum-likelihood particle ID scheme. Each color represents a true particle identity, while the x-axis indicates the assigned identity based on simulated, noisy measurements.

(3) Recent Progress

In 2025, we undertook two beam measurement campaigns at HIMAC (C, 400 MeV/u and He, 150 MeV/u) and one set of measurements at Thomson Proton Center, in Tennessee, USA. Each measurement added valuably to our collection of tracking error distributions, showing areas where our parameterized model of diffusion in terms of species, energy, and flight distance could be refined.

As an additional measurement with the carbon beam, we attempted to generate and register secondary particles with a 5 mm graphite target, but were unsuccessful in generating statistically significant numbers of lighter particles.

With the helium beam, we again verified the performance of the Halbach magnet, achieving a mean deflection within 1.6 mm of the predicted 16.7 mm

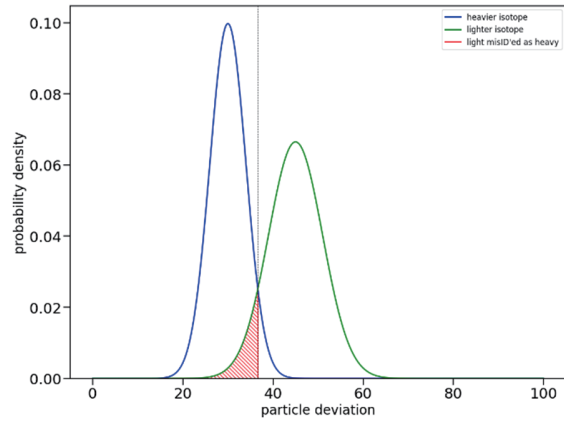


Figure 4: Illustrating why atomic-mass errors are preferentially towards the heavier isotope. Probability distributions show the likely arrival points for a heavier (blue) and a lighter (green) particle, deflected by the Halbach magnet. Maximum likelihood favors assignment to the particle whose probability is greater at the measurement location. The shaded region represents lighter particles mis-diagnosed. This region clearly includes more mass than is associated with errors in the opposite direction.

lateral movement at the downstream measurement plane. The standard deviation tracking uncertainty in this measurement was less than 4.6 mm. This compares well with the 4.2 mm standard-deviation tracking uncertainty we measured in the same beam, without the magnet, confirming that the magnetic field is indeed highly uniform over the region seen by the tracked particles.

We again attempted to record secondary particles with the helium beam. This time, we inserted 32 mm of PMMA upstream of the spectrometer, but again we saw no significant population of fragments.

We have also performed various Monte Carlo simulations of the experimental setup in Geant4. In Figure 5 we show results from a study aimed to optimize the species identification precision by changing aspects of the Halbach magnet. Figure 5 plots 2D LET-deflection histograms for a system with two of our standard Halbach magnets in series. The results indicate much reduced species overlap, compared to using a single magnet. We have subsequently built a second magnet assembly, and will conduct beam experiments with the two magnets back to back in 2026.

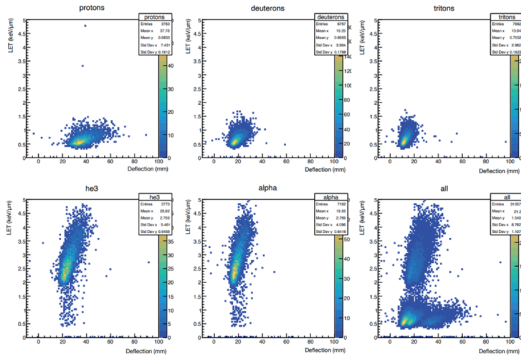


Figure 5: Simulation of species separability for flat particle spectra between 150 and 400 MeV/u, using a double-magnet system. Each panel shows a 2D histogram with deflection on the x-axis and LET on the y-axis. The lower-right panel shows all simulated species together, showing that each isotope inhabits its own distinct region of phase space.

We have developed simulations to estimate fragment production yields, using the state-of-the-art cross-section data available at present (see Figure 6). This code maintains the history of the fragment from generation to detection with sufficient detail to allow us to separately count (1) fragments created by the primary in the target - the orange bars, (2) fragments created by non-primary particles in the target - the green bars, and (3) fragments generated elsewhere in the setup - blue minus (orange plus green). Term (1) is the true signal indicative of the desired cross section, while terms (2) and (3) must be considered error terms, which should be corrected for. We imagine an iterative process in which differences between prediction and measurement are fed back into the cross-section values used by Geant4 to obtain refined error corrections until a point of satisfactory convergence is reached. Further development work is required to determine if this is really achievable.

For 2026, we have secured a helium beam at HIMAC, using which we will again attempt to generate multiple secondary species. Through analysis of the particle hit-rate statistics observed during our previous HIMAC experiments, we have observed that the instantaneous particle flux remains much lower over the spill structure than at other synchrotron facilities we have used. Consequently, we expect to be able to utilize much higher particle fluxes than we have previously used, while not interfering with the system's ability to track individual particles. This, coupled with an optimized experiment, based on the simulations described in the previous paragraph, should make it possible to see adequate fragments for our experiments.

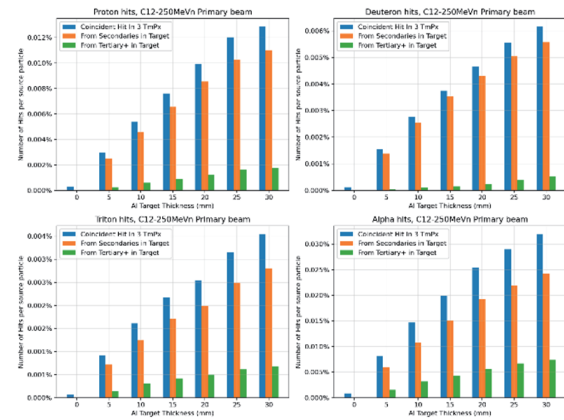


Figure 6: Fragment production yields for 250 MeV/u carbon on varying thicknesses of aluminium, calculated with Geant4. The orange bars show fragments created directly by the primary, while the green bars count fragments created in higher-order processes.

Later in 2026, we hope to take measurements with oxygen on a carbon target, to try to replicate some recent cross-section results by other workers.

List of Publications

Journal publications with peer review:

- (1) *'Are Further Cross Section Measurements Necessary for Space Radiation Protection or Ion Therapy Applications? Helium Projectiles'*, J. Norbury et al., *Front. Phys.*, 29 November 2020
- (2) *'Kinetic energy reconstruction with a single layer particle telescope,'* M. Kroupa, A. Bahadori, T. Campbell-Ricketts, S. George, and C. Zeitlin, *Applied Physics Letters* 112, 134103 (2018)
- (3) *'Particle showers detected on ISS in Timepix pixel detectors,'* M. Kroupa, T. Campbell-Ricketts, S. George, A. Bahadori, and L. Pinsky *Life Sciences in Space Research*, 39, 52-58 (2023)

Dose-rate effects with accelerated ions: Experimental investigation and Simulation of water and biomolecules radiolysis (25HH010)

Q. Raffy^a, S. Chefson^b, N. Arbor^a, M. Vanstalle^a, R. Barillon^a, S. Kodaira^b, T. Kusumoto^b

a) Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC), 23 rue du Loess, BP 28, 67037 Strasbourg, France

b) National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage, Chiba 263-8555, Japan

Abstract: This report summarizes the results obtained during a beam-time campaign June 25, in medium energy and bio rooms. Yields of the main water radiolysis species and of biomolecules were measured along the track of 230 MeV/u He ions, and with a special focus on the fragment region, as well as under 6 MeV Protons at various high dose-rates.

Introduction

The aim of our proposal is to better understand and describe the radiolysis mechanisms of protein biomolecules under ion irradiation and with dose-rate. We focus on indirect effect, that is, reaction of biomolecules with water radiolysis reactive species. Therefore, we measure also yields of most reactive water radiolysis species in the same conditions: HO[•], e⁻_{aq} and H₂O₂. This allows deconvolution of LET and dose-rate effects on water radiolysis from that on the biomolecule radiolysis mechanisms. Data gathered will be used to improve simulation codes, such as Geant4-DNA. The biomolecules studied are amino acids, the elementary building blocks of proteins and small peptides containing these amino acids.

Results

Medium energy: Water radiolysis

In previous experiments, we have measured the yields of HO[•], e⁻_{aq} and H₂O₂ under various high dose-rates C an He ions, in the medium energy room. During 2025 session, we performed similar experiments with 6 MeV H⁺, of lower Linear Energy Transfer (LET). This would also allow comparison with experiments performed at lower dose-rates (0.1 – 200 Gy/s) with protons at IPHC Cyrce cyclotron. Hydrated electron yields and OH radical yields were measured with two different probes for each species, at a scavenging time of 74 ns. G(e⁻_{aq}) were measured under argon with

Glycyl-glycine and with a solution of NaNO₃ and NaHPO₃. As for HO[•], the yields were determined using terephthalate and solutions of KBr and formate. For hydrated electron, both probes gave similar results, with yields very close to that measured with He ions (Figure 1). As with He and C ions, G(e⁻_{aq}) decreases with dose-rate, most likely because of inter-track radical-radical recombinations. For OH radical, while both probes show a similar trend, there are discrepancies between the values of G(HO[•]) measured (Figure 1). Therefore, it is delicate to conclude on the actual values with these data. However, there seems to be a dose-rate effect on HO[•] yields, similar to that on e⁻_{aq} yields.

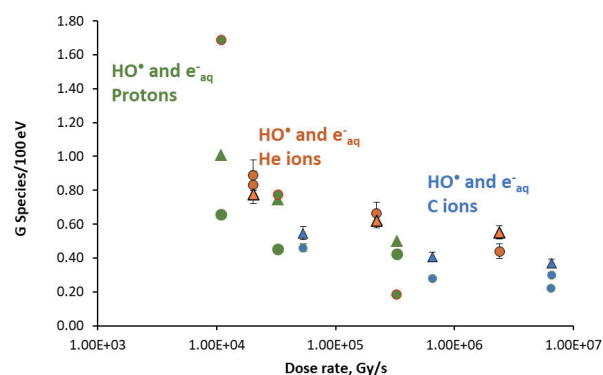


Figure 1. Yields of HO[•] (dots), and e⁻_{aq} (triangles) under irradiation by 6 MeV H⁺ (green), 41 MeV C ions (blue) and 21 MeV He ions (orange). HO[•] yields determined with terephthalate (green dots) and KBr/formate (green dots with red lining) are shown.

Medium energy: Biomolecules

Phenylalanine and aspartame yields were measured under the very same conditions, and the yields of radiolysis products were determined. The most accurate way to compare radiolysis between various conditions is to determine relative yield G(radiolysis product)/G(HO[•]), which is independent of variations of G(HO[•]). Here, the value of G(HO[•]) has not been unequivocally measured. However, when data obtained with KBr/formate probes are used, we obtain a

relative value for the main radiolysis products of phenylalanine, tyrosines, which is quite close to that measured on IPHC Cyrécé Cyclotron (Figure 2).

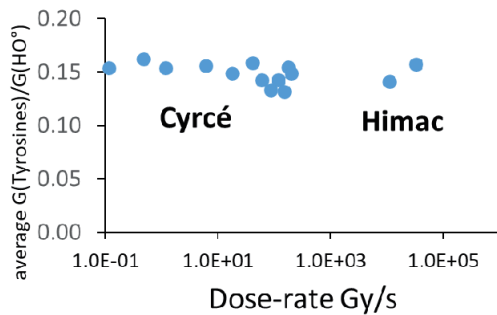


Figure 2. Relative yields of radiolysis products of phenylalanine tyrosines, measured with 24 MeV protons at lower dose-rates (Cyrécé) and with 6 MeV protons at highest dose-rates (Himac).

Data obtained during this session have shown that there is most likely a dose-rate effect on HO^{*} and e⁻_{aq} yields at ultra-high dose-rates, as was observed with Ce and He ions, with a limited impact on biomolecules.

BioRoom: High-energy He ions (230 MeV/u)

Experiments performed in the BioRoom aimed at reproducing and completing previous work done in 2023 in the physics room with 230 MeV/u He ions. Yields of HO^{*}, e⁻_{aq} and H₂O₂ were measured along the track of He ions, and after the Bragg peak. A series of targeted experiments was designed to quantify the yields of these species beyond the Bragg peak, in the region where radiolysis is induced exclusively by ion fragments. Data were also extended to longer scavenging times, with measurements at 74 and 740 ns.

Data obtained for HO^{*} at 74 ns along the track of He ions show evolutions and values similar to measurements from 2023. H₂O₂ measurements could be extended to the whole track, when they had been previously measured only in the plateau region. In the fragment region, terephthalate and KBr/formate probes, used for OH radical, also gave similar yields. These follow previous values, with yields that would be between 10 and 12 species/100 eV for G(HO^{*}) (Figure 3). Such extremely high yields, far above that under low LET X-rays (2.8 species/100 eV at 74 ns), could not represent real values of G(HO^{*}). Nevertheless, given that comparable values were obtained for

e⁻_{aq} and HO^{*}, and that these results were reproducible across two independent experimental sessions and irradiation facilities, it is reasonable to conclude that these observations reflect a genuine phenomenon. Therefore, the high value measured could be the consequence of a dose under-evaluated by the ionizing chamber in the fragment region. The project CLINM, that we are currently developing with IPHC DeSIs team, aims at determining the nature and quantities of fragments produced in the ion track, and will help better understand these results.

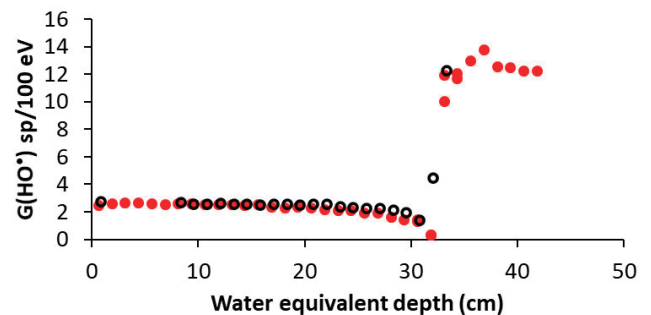


Figure 3. HO^{*} yields measured with KBr/Formate at 74 ns. Black circle: data from 2023. Red Dots: data from 2025. The Bragg peak occurs after 31.8 cm water equivalent.

As for biomolecules, phenylalanine and aspartame radiolysis products were measured in the same conditions. When comparable, data were very close to that from 2023, with the exception of the Bragg peak, which position is very sensitive with our setup (Figure 4).

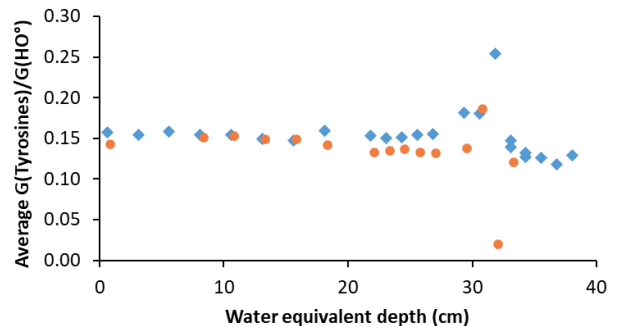


Figure 4. Average G(Tyrosines)/G(HO^{*}) measured in 2025 (blue diamonds) and 2023 (orange dots).

For tyrosine isomers, the relative yields G(Tyrosine)/G(HO^{*}) are quite the same in the plateau and in the fragment region, which was also the case with 400 MeV/u C ions. This would confirm that the reason for the very high HO yields determined is most likely the estimation of the dose in the fragment region.

(1) Oral presentations

Evolution of the radiolytic yields of main water radiolysis products along ion tracks S. Chefson¹, A. Danvin¹, A. Arnone¹, C. Galindo¹, P. Peaupardin¹, T. Kusumoto², S. Kodaira², N. Arbor¹, Q. Raffy¹, *Miller Conference on Radiation chemistry*, October **2025**, Dubrovnik, Croatia.

Radiolysis of water and protein biomolecules at high dose rates A. Arnone¹, A. Danvin¹, S. Chefson¹, C. Galindo¹, P. Peaupardin¹, M. Pelliccioli¹, T. Kusumoto², S. Kodaira², R. Barillon¹, N. Arbor¹, Q. Raffy¹, *Miller Conference on Radiation chemistry*, October **2025**, Dubrovnik, Croatia.

(2) PhD Defenses

PhD defense Aurélia Arnone, November 2025

Etude expérimentale de l'impact du TEL et du débit de dose sur la radiolyse d'un acide aminé, libre et inclus dans un peptide. Premiers éléments sur l'effet du dioxygène. Etude complémentaire sur la radiolyse de protéines

An experimental study of the impact of TEL and dose rate on the radiolysis of an amino acid, both in its free form and when incorporated into a peptide. Preliminary findings on the effect of oxygen. A complementary study on the radiolysis of proteins.

Jury : Pr. FROMM Michel, Dr. RENAULT Jean-Philippe, Pr. NGONO-RAVACHE Yvette, Dr. EL-BITAR Ziad, Dr. BURCKEL Hélène

PhD defense Séverine Chefson, June 202

Etude expérimentale de la radiolyse de l'eau par des ions et modélisation des données par simulation Monte Carlo Geant4-DNA

Experimental study of the radiolysis of water by ions and data modeling using Geant4-DNA Monte Carlo simulation

Jury : Dr. Sophie LE CAER, Dr. Lydia MAIGNE, Pr. Rémi BARILLON, Dr. Ziad EL BITAR, Dr. Johan VANDENBORRE

Atmospheric Ionizing Radiation Detector Development 25HH016

Eric Benton¹, Conner Heffernan¹, Garrett Thornton¹ and Satoshi Kodaira²
¹Oklahoma State University, Dept. of Physics, Stillwater, Oklahoma, USA
²National Institute of Radiological Sciences, Chiba, Japan

Abstract

Radiation detectors under development by OSU researchers for use in dosimetry at aviation altitudes and in space were exposed to beams of 230 MeV protons, and 400 MeV/n Carbon ions in the HIMAC BIO as part of an effort to develop a method of combining measurements from two different types of radiation detector: 1) a tissue equivalent proportional counter (TEPC) and 2) a Si PIN diode detector. These two detectors are both incorporated in the Atmospheric ionizing radiation Tissue Equivalent Dosimeter (AirTED). The two detectors were exposed to the bare beam and behind varying thicknesses of water (Binary Filter). lineal energy/y and energy deposition spectra were measured.

Introduction

The OSU Radiation Physics Laboratory is developing radiation detectors for use in dosimetry aboard commercial jetliners, unmanned aerial vehicles (UAVs), and high altitude balloons, as well as aboard spacecraft like the ISS. These detectors can also be used for characterizing the ionizing radiation environment in the upper atmosphere and space. In order to be able to use AirTED on high altitude balloons, the size and mass of the detector must be reduced. This has led to a redesign of the TEPC detector head and the use of a new 4 input channel spectrometer replacing the two 2 input spectrometers used in the previous version. AirTED A major innovative feature of the AirTED instrument is the combining of data from two dissimilar detectors into a single measured LET spectrum from which total absorbed dose and dose equivalent can be determined. This approach is being developed in response to the fact that no single detector currently exists that is sufficiently sensitive to ionizing radiation over the whole of the relevant LET range.

Tissue equivalent proportional counters are sensitive to high LET radiation including recoil secondaries produced by neutrons interacting with the C, H, and O nuclei of the tissue equivalent plastic walls of the proportional counter. However, the TEPC, being a low-pressure gas-filled detector is relatively insensitive to low-LET radiation such as x-/gamma-rays, electrons/positrons, and relativistic protons. Si diode detectors on the other hand are unable to accurately measure the energy deposition from high LET radiation and are relatively insensitive to secondary neutrons. However, they possess excellent sensitivity to low LET radiation.

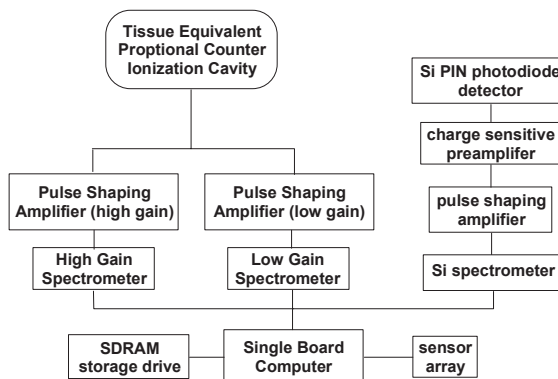


Figure 1. (t) Block diagram of the AirTED instrument. (b) Photo of the AirTED detector for use aboard high altitude aircraft.

2. Description of Instrument

The AirTED detector uses two complimentary detectors, the first needed to measure the high-LET (stopping power) charged particles and secondary neutrons, and the second needed to measure low-LET charged particles and x/γ radiation. Figure 1 (t) shows a block diagram of the AirTED instrument, while (b) is a photo of the current version of AirTED. We are developing a second detector, the Atmospheric ionizing radiation Silicon Detector (AirSiD) to meet the second need. AirSiD uses a Si PIN photodiode, a custom designed charge sensitive preamplifier circuit and a custom designed pulse shaping amplifier circuit. This version is primarily for use on stratospheric balloons where power must be provided by batteries and the total payload cannot exceed 3 kg.

3. Results

In order to measure the LET spectrum over the entire range of relevance and from that to determine total absorbed dose and dose equivalent, it is necessary to combine the LET spectra measured at the upper end of the spectrum by the TEPC with that measured at by the Si diode at the lower end of the spectrum. This requires first converting the lineal energy spectrum measured by TEPC to LET spectrum in water [1] and to convert the LET spectrum in Si measured by the Si diode to LET in water [2], so measurements from the two instruments are directly comparable. Then the spectra from the two instruments need to be matched in the region where there is good overlap in LET, roughly between 1 and 30 keV/ μm .

Figure 2. LET spectra measured in the Si diode and in the high and low gain channels of the TEPC in exposures to the 400 MeV/n C. The primary peak with LET of 10 keV/ μm is visible in the low gain TEPC channel and partially visible in the high gain TEPC channel. Two distinct fragmentation peaks are visible in the Si spectrum, likely due to protons and alpha particles, but cannot be resolved in the TEPC spectrum due to the lack of sensitivity of this detector at lower LET.

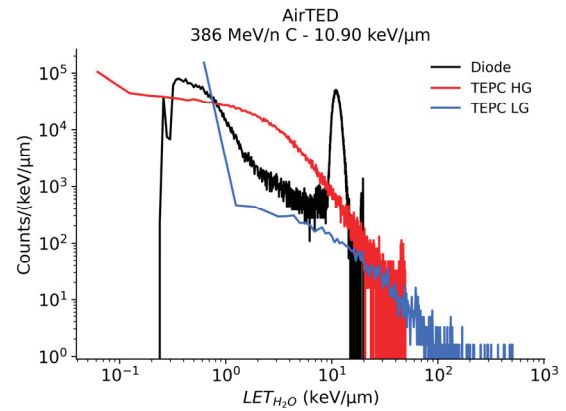


Figure 2. LET spectra measured in the Si diode and in the high and low gain channels of the TEPC in exposures to the 400 MeV/n C beam. The primary peak is visible in the Si diode, but cannot be resolved in either the high or low gain TEPC channels.

We are currently investigating why the main ionization peak is not visible in the LET spectra measured in the TEPC high and low gain channels. The explanation likely has to do with the non-uniform chord-length distribution in the spherical TEPC cavity. However, a broad peak would still be expected and this is not apparent in the data. Similarly results were seen in AirTED data from the 230 MeV proton exposures also carried out at HIMAC. In this case, the efficiency of the TEPC to such low LET (0.2 keV/ μm) particles may play a major role. Further experiments need to be carried out in order to better understand this situation and to determine what corrections might need to be applied to account for this effect.

4. References

- [1] Hayes, B. M., Causey, O. I., Gersey, B. B., and Benton, E. R., (2022) "Active Tissue Equivalent Dosimeter: A Tissue Equivalent Proportional Counter flown onboard the International Space Station," *Nucl. Inst. & Meth. A.*, **1028**, 166389.
- [2] Benton, E. R., Benton, E. V., and Frank, A. L., (2010) "Conversion between different forms of LET," *Rad. Meas.*, **45**, 957-959.

Benton Professional Presentations:

Benton, E. R., *Radiation Monitoring in the Commercial Aviation Environment*, Assessing Radiation Exposure, Health Outcomes, and Mitigation Strategies for Flight Crewmembers, National Academy of Sciences ad hoc committee meeting #4, 3 December 2025.

Benton, E. R., Heffernan, C., Thornton, G., and Gersey, G., *Progress on Tissue Equivalent Dosimeters being developed at Oklahoma State University*, 28th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, Cologne, Germany, 3 September 2025.

Benton, E. R., Copeland, K., Gersey, B., Hands, A., Heffernan, C. and Thornton, G., *Progress on Development of Dosimetry Instrumentation for Monitoring Ionizing Radiation in the Upper Atmosphere*, 2025 Space Weather Workshop, Boulder, CO, 17-21 March 2025.

Benton, E. R., “Measuring Galactic and Solar Cosmic Radiation in Space and the Upper Atmosphere,” 6 February 2025, Dept. of Physics, Oklahoma State University, Stillwater, OK

重イオン位置感応型検出器の開発(25HH018)

Development of a Heavy-Ion Position-Sensitive Detector

土屋諒^{a,b}、小嶋玲子^c、横山輪^c、山本康嵩^c、青井考^c、矢向謙太郎^c、今井伸明^c、

大田晋輔^d、小林信之^d、Lakmin Wickermashinghe^d、古川史也^d、柴北洋明^d、西岡翔^d

R. Tsuchiya^{a,b}, R. Kojima^c, R. Yokoyama^c, Y. Yamamoto^c, N. Aoi^c, K. Yako^c, N. Imai^c

S. Ota^d, N. Kobayashi^d, W. Lakmin^d, F. Furukawa^d, H. Shibakita^d, S. Nishioka^d

Abstract

We have been developing a stripped-readout parallel plate avalanche chamber (SR-PPAC), which can measure the trajectories of beam particles. In this study, a new type of amplifier-shaper-discriminator chip named ASAGI was employed to the cathode readout circuit of the SR-PPAC, and its position resolution was compared with the result obtained using a readout circuit of RPA-132 which was originally employed. In addition, the dependence of the position resolution on beam intensity was also evaluated. The results showed that the RPA-132 cathode readout achieved a better position resolution by several tens of micrometers compared to the ASAGI-based system. Even though there seems to be room to be improved for ASAGI-based results. On the other hand, regarding the dependence on beam intensity, it was found that increasing the beam intensity from 1 kppp to 10 kppp caused almost no change in the position resolution.

1. 研究の目的とバックグラウンド

東京大学 CNS では、1Mpps のビーム強度で飛来するビーム粒子の飛跡を、300 μ m 程度の高位置分解能で測定可能な、重イオン位置感応型ガス検出器 SR-PPAC の開発を進めている [1,2]。本課題では、SR-PPAC のカソード読み出し回路に SPADI-Alliance で開発された ASAGI-1.0 [3] を使い、既存の読み出し回路 (RPA-132) を使用した場合と ASAGI-1.0 を用いた場合とで SR-PPAC の位置分解能を比較評価した。また、ビーム強度による位置分解能への影響についても ASAGI-1.0 を用いて評価した。

2. 昨年度までに得られている結果

ASAGI-1.0 は、回路の時定数などのパラメータを変えることができ、それにより増幅される信号のゲインや信号幅を変えることができる。昨年度は、HIMAC の生物照射室において、290 MeV/nucleon の Xe ビームを SR-PPAC に

照射し、ASAGI-1.0 をカソード読み出し回路に使用した場合のカソード波形をオシロスコープで取得した。ビーム実験を踏まえ、 α 線源を用いて、ASAGI-1.0 の抵抗値、静電容量を変えながら取得した数百イベントを解析し、ASAGI-1.0 のパラメータによる波形の変化を調べ、パラメータ毎のカソードの閾値を決定した。さらに、RPA-132 では観測されなかった、SR-PPAC 内部での電子増幅過程において生成されるイオンの影響により、カソード波形が擾乱し、位置導出に問題が生じる可能性があることが確認された。

3. 今年度の研究内容

昨年度 HIMAC で行った実験と同じ ^{129}Xe 290 MeV/nucleon を SR-PPAC に照射した。SR-PPAC の上下流に MWDC を設置し、その内挿と SR-PPAC 単体で導出した位置を比較することで位置分解能を評価した。昨年度の実験を元に、S/N やゲイン、また擾乱抑制という 3

点を満たすパラメータを用意した。また、SR-PPAC と ASAGI-1.0 を 2 枚直付けする基板を設計することで、X,Y 両方の位置を導出できるようにした。

4. 今年度の実験結果

カソード読み出し回路に ASAGI を使い、位置分解能のビーム強度依存性を調査した。ビーム強度 1kppp では、 $221 \pm 3 \mu\text{m}$ (X)、 $187 \pm 3 \mu\text{m}$ (Y)であった。また、10kppp では $220 \pm 3 \mu\text{m}$ (X)、 $193 \pm 3 \mu\text{m}$ (Y)であった。この結果、ビーム強度を 1 kppp から 10 kppp に増大させても、位置分解能に影響がないことがわかった。

次に、ビーム強度 1kppp で、RPA-132 を使用した場合と ASAGI-1.0 を使用した場合で位置分解能を比較した。カソード読み出し回路に RPA-132 を使用した場合は $171 \pm 1 \mu\text{m}$ (X)、 $170 \pm 1 \mu\text{m}$ (Y)であった。一方で、ASAGI-1.0 を使用した場合は $221 \pm 3 \mu\text{m}$ (X)、 $187 \pm 3 \mu\text{m}$ (Y)であった。

しかし、図 1 で示すように、明らかに ASAGI-1.0 には電荷情報にチャンネル依存性があることが分かった。SR-PPAC では、隣り合う 3 つのストリップの電荷情報を元に、その加重平均をとることで位置分解能を上げる。したがって、電荷のチャンネル依存性を考慮することで ASAGI-1.0 を用いた SR-PPAC の位置分解能は向上する可能性がある。

ところで、イオンによる影響を抑えるパラメータについても位置分解能の比較を行ったが、数 μm ほどしか変化せず、Y 面では改善したが X 面ではむしろ悪化した。このことから、イオンによるフィードバックの影響が改善したとはいえない結果となった。

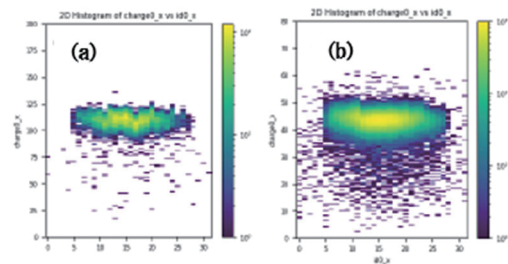


図 1 SR-PPAC での各チャンネルの最も大きい波高値の違い(a) ASAGI-1.0, (b)RPA-132。

5. 今後の展望

今後は、ASAGI-1.0 での位置依存性を解消して検出器固有の分解能を評価する。RPA-132 では、ベースラインリストラがあったために、イオンフィードバックの効果を消せていた。ASAGI-1.0 にもそのような機能が追加できるか検討していく。

参考文献

- [1] S.Hanai, et al.,Development of a fast-response Parallel-Plate Avalanche Counter with strip-readout for heavy-ion beams, PTEP 2023, 123H02
- [2]花井周太郎,電子雪崩信号の高速読み出しによる重イオン飛跡検出器の開発,2021 年,東京大学修士論文.
- [3]山本勇次,ドリフトチェンバー用読み出し回路 ASAGI ASD カードの性能評価,2023 年,大阪大学修士論文.

-
- a. 立教大
 - b. 理研仁科センターBigRIPS チーム
 - c. 東大 CNS
 - d. 大阪大学核物理研究センター

25HH018 研究成果一覧

1. 2026/03 土屋諒 立教大学 修士論文 「ASAGI ASD カードを用いた位置検出器 **Strip-Readout PPAC** の位置分解能評価」
2. 2025/8/19-20 2nd Symposium on TOPTIER Platform in Extreme Rare Isotope Science, R. Tsuchiya “Development of ASAGI for SR-PPAC” (oral)
3. 2025/8/22-28 TOPTIER-CNS Summer School 2026, “Development of ASAGI for SR-PPAC” (poster)

レーザーイオン加速による GeV 級イオンビーム生成の実証に向けた 高エネルギーイオン診断法の開発

High-energy ion diagnostics for demonstrating GeV-scale ion beam generation
by laser-driven ion acceleration

(25HH030)

安部 勇輝^a, 二階堂 颯佳^a, 草野 颯斗^a, 北村 力丸^a, 玉城 直也^a, 荒川 祥輝^a,
山本 隆奨^a, 林 直也^a, 小平 聡^b, 楠本 多聞^b, 諫山 翔伍^c, 田中 周太^d,
時安 敦史^e, 郡 英輝^f, 蔵満 康浩^a, 福田 祐仁^g

Y. Abe^a, F. Nikaido^a, H. Kusano^a, R. Kitamura^a, N. Tamaki^a, Y. Arakawa^a,

T. Yamamoto^a, N. Hayashi^a, S. Kodaira^b, T. Kusumoto^b, S. Isayama^c, S. Tanaka^d,

A. Tokiyasu^e, H. Kohri^f, Y. Kuramitsu^a, Y. Fukuda^g

Abstract

The project is aimed at demonstrating GeV-scale ion acceleration by laser toward future compact ion sources. Carbon-ion beams at HIMAC were successfully used for energy calibration and background characterization of several diagnostics, including scintillation detectors and solid-state nuclear track detectors. These diagnostics are employed in laser-driven ion acceleration experiments conducted at the J-KAREN laser facility at the QST Kansai Institute for Photon Science (KPSI). The obtained calibration data support results from our latest laser-driven experiments, indicating carbon beam generation with record energies exceeding 200 MeV/u. In addition, a new time-of-flight detector with improved diagnostic capability is almost ready for testing. Therefore, we request additional beam time at HIMAC in 2026.

1. 研究目的と背景

本研究は、レーザーによる GeV 級イオン加速の原理実証を目指し、その実現に不可欠な高エネルギーイオン計測器の開発を行うものである。レーザー駆動イオンビームは超短パルス・低エミッタンスを特徴とし、核融合や中性子源への応用が進む一方、医療応用にはエネルギーや核種選択性などの制御が課題であり、「100 MeV/u の壁」の突破が重要とされてきた。申請者らは水素クラスターやグラフェン薄膜を用いた独自ターゲットにより、高純度・準単色の陽子線 (最大 137 MeV/u) および炭素線 (60 MeV/u 超) を達成し、世界最高水準の成果を得ている [1-3]。さらに、プラズマ中の航跡場 (電場の縦波) を利用した追加加速により GeV/u 到達の可能性も理論計算で示されており [4]、現在は関西光量子科学研究所の高出力レーザー J-KAREN を用いた実験を推進中である。

一方、GeV イオン加速実証の最大の課題は計測である。レーザー加速では多核種混合・高強度・連続スペクトルのビームが生成され、高強度 X 線

や電磁パルス環境下での精密計測が困難である。従来手法 (トムソンパラボラやラジオクロミックフィルム) は高エネルギー域で性能が不十分であり、sub-GeV~GeV 領域で有効な診断法は未確立である。そこで本研究では、100 MeV/u 以上のイオンに対し核種弁別と±10%のエネルギー分解能を有する複数の計測手法を確立し、同時運用可能な高信頼測定系の構築を目指す。これまでに固体飛跡検出器、原子核乾板、シンチレータを用いた手法を開発し、HIMAC での検証を経てレーザー実験への導入を進めている [5-13]。

2. 今年度の実施内容

本年度は、レーザーイオン加速実験の論文化に向けた較正データの取得と新規計測技術の高度化を主目的とし、積層型固体飛跡検出器およびマルチピクセルシンチレータの基礎データ取得を実施した。

積層型固体飛跡検出器は、CR-39 と減速材を積層したものであり、入射粒子の飛程とエネルギー付与 (エッチピットサイズ) に基づいて核種同定およびエネルギー計測を行う。昨年度のレーザー実験では、本検出器により 200 MeV/u を超える炭素イオン生成を示唆する結果が得られており、論文化に向けて極めて重要な役割を担っている (図 1)。本年度の HIMAC 実験では、レーザー実験と同一構成・同一ロットの検出器を用いて較正実験を行った。各層のエッチピットサイズ分布を入社エネルギーごとに取得するとともに、高エネルギーイオンのフラグメンテーションに伴う二次粒子生成とバックグラウンド寄与を定量評価し、検出器応答の信頼性向上と論文化に必要な基礎データを整備した。

シンチレーション検出器は、レーザーショット毎のリアルタイム計測を可能とする点に特徴があり、単一粒子信号の飛行時間 (TOF) 計測と波高分析によりエネルギー計測と核種同定を行う。単

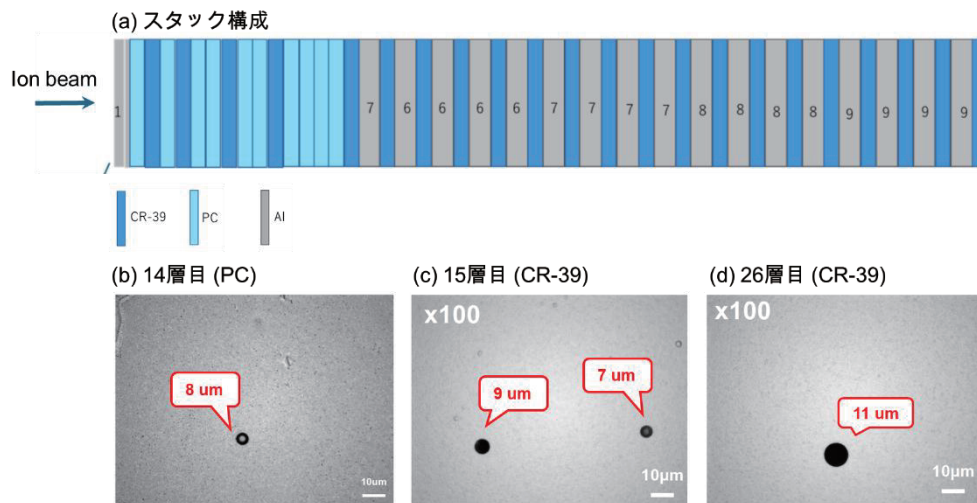


図1 レーザーイオン加速実験に導入したスタック型固体飛跡検出器の計測結果.

(a) スタック構成, (b - d) グラフェンベースのターゲットを用いた実験において14層目, 15層目, 26層目で観測されたエッチピットの顕微鏡写真の例. 写真に写る直径7-11 μm のピットは炭素イオンによるものと考えている. 炭素イオンは14-15層目では80 MeV/u, 26層目では300 MeV/uに相当する.

一ショットで多数の粒子を同時かつ個別に検出するためには, 検出面の面積化およびセグメント化が重要となる. 本年度は, すでに検証中の液体ベースのマルチピクセルシンチレータに加え, 新たにファイバーシンチレータアレイの性能評価を行った. 液体シンチレータは高速応答性, 均質性, 面積化の利点を有する一方, セグメント部材に起因する光収率の低さが課題であった. 一方, ファイバーシンチレータアレイは高価だが高い光収率と遮蔽配置の柔軟性といった利点を有するため, 時間・波高分解能などについて液体シンチレータとの比較を行った.

3. 今年度の実験結果

図2は, 135 MeV/uの炭素イオンビームを照射した積層型固体飛跡検出器の測定結果であり, 2時間のエッチング処理後に各層で観測されたエッチピットの粒径分布を示している. 粒径分布においてピーク位置に対応する成分が一次粒子であり, それよりもやや小さく, かつ検出数が約2

桁低い成分は二次粒子に起因するものである. これらの二次粒子は主にベリリウムやホウ素イオンによるものと考えられる. さらに, これら二次粒子の粒径分布が検出器の深さに応じて変化する様子が詳細に観測されており, 現在, この傾向をモンテカルロコード (PHITS等) によりどの程度再現可能であるかを検証している. また, 2時間のエッチング条件では, 陽子, α 粒子, リチウムなどの軽イオンに由来するエッチピットは小さく観測が困難であるため, 3時間, 4時間と段階的にエッチング時間を延長し, 軽イオン成分の検出可能性とその入射エネルギー依存性についても系統的な評価を進めている.

一方, シンチレーション検出器についても有効な測定データの取得に成功しており, 現在, 時間分解能および各種粒子弁別精度の評価を進めている. また, データ取得系の調整時間を短縮し, 生物照射室における限られた照射時間内で確実にデータ取得を完了するため, 本年度よりNIM・CAMACモジュールを組み合わせた従来のデータ

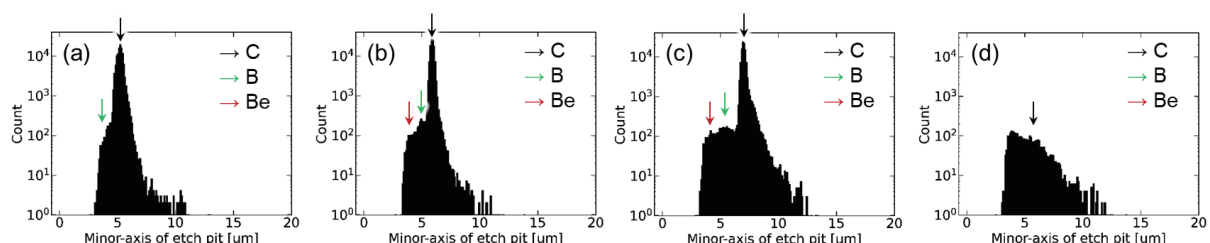


図2 135 MeV/u 炭素イオンに対する積層 CR-39 のエッチピットの粒径分布

(a) 1層目, (b) 5層目, (c) 10層目, (d) 15層目の結果. 高エネルギーイオンが入射した場合, CR-39 内部でのフラグメンテーションにより生成された2次粒子 (Be, B等) がバックグラウンドとなる. 2次粒子の粒径分布は入射粒子エネルギーや層によって変化するため, その傾向をモンテカルロコードでどの程度再現可能であるかを現在検証している.

収集系から、オシロスコープ1台で完結するデータ取得系への切り替えを行っている。これにより、測定系の簡素化と高い再現性の確保を実現するとともに、実験準備からデータ取得までの作業効率を大幅改善に成功した。2026年度は陽子ビームで引き続きデータ取得を行うとともに、TOFカメラの原理を応用した新しい多チャンネル読み出し回路の動作検証なども実施する予定である。

参考文献

- [1] R. Matsui, Phys. Rev. Lett. **122** (2019) 014804.
- [2] Y. Kuramitsu, Sci. Rep. **12** (2022) 2346.
- [3] T. Minami, HEDP **55** (2025) 101195.
- [4] S. Isayama, Phys. Plasmas **28**, (2021) 073101
- [5] M. Kanasaki, HEDP **37** (2020) 100852.
- [6] T. Hihara, Sci. Rep. **11**, (2021) 16283.
- [7] T. Taguchi, Rev. Sci. Instrum. **95** (2024) 033301.
- [8] F. Nikaïdo, Rev. Sci. Instrum. **95** (2024) 103302.
- [9] Y. Kuramitsu, Phys. Plasmas **31** (2024) 053108.
- [10] T. Asai, High Eng. Dens. Phys. **32** (2019) 44.
- [11] T. Asai, Jpn. J. Appl. Phys. **62** (2023) 016506.
- [12] Y. Abe, Rev. Sci. Instrum. **93** (2022) 063502.
- [13] T. Minami, Rev. Sci. Instrum. **93** (2022) 113530.

^a 大阪大院・工, ^bQST 放医研計測・線量評価部,
^c九州大院・総合理工, ^d青学大・理工, ^e東北大・
電子光物理学研, ^f大阪大・核物研, ^gQST 関西研・
光量子ビーム科学研究部,

研究成果一覧

(25HH030)

研究代表者： 安部 勇揮（大阪大学大学院工学研究科）

(1) 原著論文

1. S. Kurochi, A. Mizuta, K. Sakai, F. Nikaido, N. Tamaki, C.-S. Jao, Y.-C. Chen, N. Ohnishi, and Y. Kuramitsu, “Numerical investigation of a CNN-based approach to reconstruct turbulent electric fields in laser-driven plasmas”, *Phys. Plasmas* **33**, 032109 (2026).
2. T. Minami, F. Nikaido, Y. Abe, T. Yasui, A. O. Tokiyasu, H. Kohri, M. Cuciuc, R. Borcea, A. N. State, R. Corbu, S. R. Ban, A. Turturica, S. Aogaki, Y. Nakamiya, O. Tesileanu, D. Doria, K. Sakai, S. J. Tanaka, H. Suzuki, S. Kodaira, M. Kanasaki, Y. Fukuda, and Y. Kuramitsu, “Ion velocity vector measurement using stacked CR-39 with the aid of machine learning”, *Phys. Plasmas* **32**, 073108 (2025).
3. Y. Kuramitsu and T. Hada, “Charged particle transport in magnetic turbulence”, *Contr. Plasma Phys.* E70018 (2025).
4. T. Minami, C.M. Chu, O. McCusker, K. Sakai, Y.T. Liao, N. Tamaki, Ko. Kondo, H. Kiriya, S. Egashira, M. Ota, A. Morace, Y. Sakawa, M. Alkhimova, T. Pikuz, F. Nikaido, T. Yasui, S. Suzuki, Y. Abe, H. Habara, H.S. Kumar, S. Isayama, C.S. Jao, K.T. Wu, Y.L. Liu, A. McIlvenny, M. Borghesi, S. Jinno, M. Kanasaki, Y. Fukuda, W.Y. Woon, and Y. Kuramitsu, “Ion acceleration with an intense short-pulse laser and large-area suspended graphene in an extremely thin target regime”, *High Eng. Dens. Phys.* **55**, 101195 (2025).
5. N. Tamaki, T. Minami, S. Suzuki, and Y. Kuramitsu, “Optimization of Ion Acceleration by Irradiating Large-Area Suspended Graphene With a Picosecond Laser”, *Contr. Plasma Phys.* e70016 (2025)

(2) 国際研究集会などの Proceedings

(3) 学会及び研究会の口頭発表

1. K. Iwasa, Y. Abe, H. Kato, A. Morace, T. Minami, Y. Fukuda, Y. Arikawa, Y. Mori, E. Miura, A. Sunahara, H. Habara, A. Yogo, Z. Zhang, S. Fujioka, and Y. Kuramitsu, “Monodirectional-drive inertial confinement fusion using ultra-high intensity laser for bright pulsed point neutron source”, *OPICS& PHOTONICS International Congress 2025, HEDSp-12, Yokohama, Japan, April 21-25 (2025)*
2. Y. Kuramitsu, F. Nikaido, N. Tamaki, S. Kurochi, H. Kusano, R. Kitamura, K. Iida, K. Sakai, T. Minami, Y. Abe, C.S. Jao, Y.C. Chen, M. Kanasaki, Y. Fukuda, C.M. Chu, W.Y. Woon, A. Mizuta, N. Ohnishi, S. Kodaira, “Experimental investigation on the origins of magnetic field in the universe associated with hydrodynamic instabilities using high-power lasers”, *The 8th International Conference on Matter and Radiation at Extremes (ICMRE), InvitedVII-2, Xian, China, May12-15 (2025) (Invited)*
3. Y. Kuramitsu, F. Nikaido, S. Kurochi, Y. Esaki, N. Tamaki, R. Kitamura, H. Kusano, K. Iida, S. Hamaguchi, C.-S. Jao, Y.-C. Chen, C.-M. Chu, Y.-L. Liu, S. Isayama, N. Saura, S. Benkadda, T. Minami, H. Suzuki, K. Sakai, T. Hoshi, A. Nakano, Y. Abe, A. Yogo, Y. Arikawa, S. Fujioka, M. Kanasaki, Y. Fukuda, T. Hayakawa, W. Y. Woon, H. Kohri, A. Tokiyasu, A. Mizuta, N. Ohnishi, T. Pikuz, S. Kodaira, B. Albertazzi, G. Rigon, and M. Koenig, “Extreme plasma astrophysics using intense lasers with the aid

- of artificial intelligence”, 6th International Conference on Data-Driven Plasma Science (ICDDPS-6), Hotel Santa Fe, Hacienda and Spa, New Mexico, USA, August 4-8, (2025)
4. S. Kurochi, A. Mizuta, K. Sakai, F. Nikaido, N. Tamaki, C.-S. Jao, Y.-C. Chen, N. Ohnishi, and Y. Kuramitsu, “Numerical investigation on reconstruction of turbulent electromagnetic fields in laser-driven plasma using artificial intelligence”, 6th International Conference on Data-Driven Plasma Science (ICDDPS-6), Hotel Santa Fe, Hacienda and Spa, New Mexico, USA, August 4-8, (2025)
 5. Y. Esaki, K. Sakai, T. Hoshi, A. Nakano, A. Mizuta, C.-S. Jao, N. Ohnishi, S. Kurochi, F. Nikaido, and Y. Kuramitsu, “Data-driven analysis of electromagnetic field measurements by ion radiography in laser-produced plasmas”, 6th International Conference on Data-Driven Plasma Science (ICDDPS-6), Hotel Santa Fe, Hacienda and Spa, New Mexico, USA, August 4-8, (2025)
 6. F. Nikaido, N. Tamaki, H. Kusano, S. Kurochi, R. Kitamura, K. Iida, K. Sakai, B. Albertazzi, G. Rigon, M. Koenig, C.-S. Jao, Y.-L. Liu, C.-M. Chu, M. Kanasaki, Y. Fukuda, S. Hamaguchi, and Y. Kuramitsu, “Measurement of electric and magnetic field in laser-produced plasmas with solid-state nuclear track detectors using machine learning”, 6th International Conference on Data-Driven Plasma Science (ICDDPS-6), Hotel Santa Fe, Hacienda and Spa, New Mexico, USA, August 4-8, (2025)
 7. K. Iwasa, Y. Abe, H. Kato, A. Morace, T. Minami, Y. Fukuda, Y. Arikawa, Y. Mori, E. Miura, A. Sunahara, H. Habara, A. Yogo, Z. Zhang, S. Fujioka, Y. Kuramitsu, “Bright pulsed point neutron sources using ultra-intense lasers and spherical deuterated capsules”, 13th International Conference on Inertial Fusion Science and Applications (IFSA2025), P.Mo.39, Tours, France, September 14-19 (2025)
 8. F. Nikaido, N. Tamaki, H. Kusano, S. Kurochi, R. Kitamura, K. Iida, K. Sakai, B. Albertazzi, G. Rigon, M. Koenig, C.-S. Jao, Y.-L. Liu, C.-M. Chu, M. Kanasaki, Y. Fukuda, S. Hamaguchi, and Y. Kuramitsu, “Spatiotemporal evolution of instabilities and electromagnetic turbulence driven by asymmetric counter-streaming plasmas”, 13th International Conference on Inertial Fusion Science and Applications (IFSA2025), P.Tu.9, Tours, France, September 14-19 (2025)
 9. H. Kusano, F. Nikaido, R. Kitamura, N. Tamaki, T. Minami, Y. Esaki, Y. Naito, K. Iwasa, S. Kurochi, K. Yamanaka, H. Kato, Y. Nakamura, K. Iida, Y. Abe, A. Morace, S. Fujioka, Y. Fukuda, T. Hayakawa, M. Kanasaki, A. O. Tokiyasu, C.-M. Chu, W.-Y. Woon, H. Kohri, and Y. Kuramitsu, “Nuclear Reactions in Ion Acceleration by Irradiating a Nanometer-thick Graphene Target with LFEX Laser”, 13th International Conference on Inertial Fusion Science and Applications (IFSA2025), P.Mo.37, Tours, France, September 14-19 (2025)
 10. N. Tamaki, T. Minami, F. Nikaido, R. Kitamura, K. Iwasa, S. Kurochi, H. Kusano, K. Yamanaka, K. Iida, Y. Esaki, H. Kato, Y. Naito, Y. Nakamura, K. Sakai, Y. Abe, H. Kiriya, A. Kon, K. Kondo, C.-M. Chu, W.-Y. Woon, A. Morace, Y. Sakawa, H. Habara, T. Pikuz, S. Isayama, M. Kanasaki, A. O. Tokiyasu, H. Kohri, S. Kodaira, T. Hayakawa, Y. Fukuda, and Y. Kuramitsu, “Laser-driven Ion Acceleration Using Large-area Suspended Graphene for Ion Fast Ignition”, 13th International Conference on Inertial Fusion Science and Applications (IFSA2025), P.Tu.32, Tours, France, September 14-19 (2025)
 11. Y. Kuramitsu, Y.-L. Liu, M. Iwamoto, S. Isayama, T. Moritaka, T.-Y. Huang, N. Khasanah, S.-H. Chen, H.-H. Chu, J. Wang, C.-H. Pai, C.-M. Chu, P.-Y. Chang, W.-Y. Woon, C.-S. Jao, N. Tamaki, Y. Abe, H. Kusano, R. Kitamura, F. Nikaido, K. Iwasa, S. Kurochi, K. Yamanaka, Y. Naito, K. Iida, R. Yamamoto, Y. Arakawa, M. Nagao, T. Takami, Y. Esaki, Y. Nakamura, S. J. Tanaka, K. Sakai, T. Minami, H. Suzuki,

- Y. Sakawa, K. Yamanoi, Y. Fukuda, K. Kondo, H. Kiriyama, S. Matsukiyo, M. Koenig, T. Pikz, H. Kori, M. Kanasaki, and M. Hoshino, “Model experiments of cosmic ray acceleration using intense lasers”, 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP2025), Fukuoka, Japan, Spetember 21-26 (2025)
12. Y. Kuramitsu, Y. Naito, R. Yamamoto, N. Tamaki, H. Kusano, R. Kitamura, K. Iwasa, F. Nikaido, S. Kurochi, Y. Arakawa, T. Takami, M. Nagao, N. Hayashi, Y. Esaki, Y. Nakamura, K. Iida, K. Yamanaka, Y. Abe, T. Pikuz, H. Habara, H. Kohri, A. O. Tokiyasu, T. Minami, H. Suzuki, K. Sakai, M. Ota, C.-M. Chu, P.-Y. Chang, S. Kodaira, S. Gohara, Y. Ichigotani, K. Kawakami, R. Tanaka, M. Kanasaki, S. Isayama, Y. Nakahara, A. Ikeda, K. Noda, Y. Yamanaka, Y. Urabe, K. Kawai, W.-Y. Woon, T. Kudo, A. Kon, Y. Miyasaka, K. Kondo, H. Kiriyama, and Y. Fukuda, “Nonlinear evolution of the Weibel instability in the presence of an external magnetic field”, 1000-Tesla Science Workshop, Chiba, Japan, December 5-9 (2025)
 13. Y. Naito, N. Tamaki, F. Nikaido, H. Kusano, R. Kitamura, Y. Esaki, Y. Nakamura, R. Yamamoto, Y. Abe, C. Che-men, A. Ikeda, K. Noda, Y. Yamanaka, T. Morita, H. Kohri, M. Kanasaki, S. Gohara, Y. Ichigotani, T. Pikuz, H. Kiriyama, Ko. Kondo, Y. Fukuda and Y. kuramitsu, “Comparison between experimental and simulation of laser ion acceleration with an external magnetic field”, 1000-Tesla Science Workshop, Chiba, Japan, December 5-9 (2025)
 14. Yuji Fukuda, “Relativistic laser plasma interaction and its application”, International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science 2025 (ISUILS2025), Sicily, Italy, September 9-15, (2025) (Invited)
 15. 蔵満康浩, 玉城直也, 草野颯斗, 北村力丸, 岩佐健生, 二階堂颯佳, 黒地柗太郎, 内藤佳輝, 荒川祥輝, 高見健志, 長尾真希, 林直也, 山本隆奨, 江寄大和, 中村豊, 飯田海地, 山中敬太, 安部勇輝, Tatiana Pikuz, 羽原英明, 郡英輝, 時安敦史, 南卓海, 鈴木秀幸, 境健太郎, 太田雅人, C. M. Chu, Po-Yu Chang, 小平聡, 合原輔佑太, 苺谷有哉, 川上恭平, 田中龍生, 金崎真聡, 諫山翔伍, 中原寛太, 池田暁彦, 野田孝祐, 山中悠太郎, 卜部裕真, 河合慶一郎, Wei-Yen Woon, 工藤光顕, 今亮, 宮坂泰弘, 近藤康太郎, 桐山博光, 福田祐仁, 「J-KAREN upgrade を用いた最高エネルギーのカーボンイオン加速」, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学, 東広島キャンパス, 2025 年 9 月 16 日～19 日
 16. 黒地柗太郎, 水田晃, 境健太郎, 二階堂颯佳, 玉城直也, Jao, Y. C. Chen, 大西直文, 蔵満康浩, 「深層学習を用いたレーザー生成プラズマ中の乱流電磁場再構築」, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学, 東広島キャンパス, 2025 年 9 月 16 日～19 日
 17. 諫山翔伍, 安部勇輝, 南卓海, 境健太郎, 太田雅人, 玉城直也, 草野颯斗, 北村力丸, 岩佐健生, 二階堂颯佳, 黒地柗太郎, 内藤佳輝, 荒川祥輝, 高見健志, 長尾真希, 林直也, 山本隆奨, 江寄大和, 中村豊, 飯田海地, 山中敬太, Tatiana Pikuz, 兼安祐実, 陳仕宏, 金崎真聡, 田中周太, 小平聡, 時安敦史, 郡英輝, 山ノ井航平, 今亮, 宮坂泰弘, 近藤康太郎, 桐山博光, 福田祐仁, 蔵満康浩, 「J-KAREN upgrade を用いたイオンの航跡場加速」, 日本物理学会 第 80 回年次大会, 広島大学, 東広島キャンパス, 2025 年 9 月 16 日～19 日
 18. 蔵満康浩, 草野颯斗, 玉城直也, 北村力丸, 岩佐健生, 二階堂颯佳, 黒地柗太郎, 内藤佳輝, 荒川祥輝, 高見健志, 長尾真希, 林直也, 山本隆奨, 江寄大和, 中村豊, 飯田海地, 山中敬太, 安部勇輝, 羽原英明, 郡英輝, 時安敦史, 南卓海, 鈴木秀幸, 境健太郎, 太田雅人, C. M. Chu, Po-Yu Chang, 小平聡, 合原輔佑太, 苺谷有哉, 川上恭平, 田中龍生, 金崎真聡,

- 諫山翔伍, 中原寛太, 池田暁彦, 野田孝祐, 山中悠太郎, 卜部裕真, 河合慶一郎, Wei-Yen Woon, Morace Alessio, 余語覚文, 藤岡慎介, Tatiana Pikuz, 早川岳人, 今 亮, 宮坂泰弘, 近藤康太郎, 桐山博光, 福田祐仁, 「高強度レーザー駆動イオン加速における協同的核破砕」, 第 42 回 プラズマ・核融合学会年会京都工芸繊維大学, 松ヶ崎キャンパス, 02Ca04, 2025 年 12 月 1-4 日
19. 南 卓海, 二階堂颯佳, 安部勇輝, 安井稔遥, 時安敦史, 郡 英輝, Mihai Cuciuc, Ruxandra Borcea, Alexandru N. State, Radu Corbu, Sara R. Ban, Andrei Turturica, 青垣総一郎, 中宮義英, Ovidiu Tesileanu, Domenico Doria, 境健太郎, 田中周太, 鈴木秀幸, 小平 聡, 金崎真聡, 福田祐仁, 蔵満康浩, 「固体飛跡検出器の機械学習を用いた解析によるイオン速度ベクトルの同定」, 第 42 回 プラズマ・核融合学会年会京都工芸繊維大学, 松ヶ崎キャンパス, 02Ca05, 2025 年 12 月 1-4 日
20. 諫山 翔伍, 中原 寛太, 安部 勇輝, 玉城 直也, 草野 颯斗, 北村 力丸, 岩佐 健生, 二階堂 颯佳, 黒地 柊太郎, 内藤 佳輝, 荒川 祥輝, 高見 健志, 長尾 真希, 林 直也, 山本 隆奨, 江寄 大和, 中村 豊, 飯田 海地, 山中 敬太, Tatiana Pikuz, 南 卓海, 境 健太郎, 太田 雅人, 陳 仕 宏, 合原 輔佑太, 苺谷 有哉, 川上 恭平, 田中 龍生, 金崎 真聡, 田中 周太, 小平 聡, 時安 敦史, 郡 英輝, 兼安 祐実, 山ノ井 航平, 今 亮, 宮坂 泰弘, 近藤 康太郎, 桐山 博光, 福田 祐仁, 蔵満 康浩, 「フォームターゲットを用いたイオンの航跡場加速」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会 第 46 回年次大会, 大阪南港 ATC, C03-13p-IV-03, 2026 年 1 月 13-15 日
21. 安部 勇輝, 岩佐 健生, 加藤 光, K. F. F. Law, 二階堂 颯佳, 草野 颯斗, 玉城 直也, 北村 力丸, 黒地 柊太郎, 山中 敬太, 飯田 海地, 江寄 大和, 内藤 佳輝, 中村 豊, 羽原 英明, 蔵満 康浩, 城崎 知至, 藤岡 慎介, 「超高強度レーザーと球殻ターゲットを用いたキロテスラ磁場生成」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会 第 46 回年次大会, 大阪南港 ATC, C03-13p-IV-06, 2026 年 1 月 13-15 日
22. 南 卓海, Chu Che-Men, 安部 勇輝, 二階堂 颯佳, 玉城 直也, 時安 敦史, 郡 英樹, 境 健太郎, 浅井 孝文, Jao Chun-Sung, Liu Yao-Li, 諫山 翔伍, Pikuz Tatiana, 田中 周太, 鈴木 秀幸, Woon Wei-Yen, 小平 聡, 金崎 真聡, 今 亮, 近藤 康太郎, 桐山 博光, 福田 祐仁, 蔵満 康浩, 「グラフェンターゲットを用いた高エネルギーイオン加速とその計測」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会 第 46 回年次大会, 大阪南港 ATC, C05-14a-IV-01, 2026 年 1 月 13-15 日
23. 玉城 直也, 二階堂 颯佳, 草野 颯斗, 北村 力丸, 黒地 柊太郎, 岩佐 健生, 山中 敬太, 江寄 大和, 中村 豊, 内藤 佳輝, 加藤 光, 飯田 海地, 南 卓海, 境 健太郎, 安部 勇輝, 羽原 英明, Chu Che-Men, Woon Wei-Yen, Morace Alessio, 坂和 洋一, 金崎 真聡, 時安 敦史, 郡 英輝, 小平 聡, 福田 祐仁, 蔵満 康浩, 「金積層グラフェンターゲットとピコ秒レーザーを用いた高エネルギーイオン加速」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会 第 46 回年次大会, 大阪南港 ATC, C06-14a-IV-02, 2026 年 1 月 13-15 日
24. 草野 颯斗, 田口 智也, 二階堂 颯佳, 玉城 直也, 北村 力丸, 南 卓海, 安部 勇輝, 福田 祐仁, 金崎 真聡, 小平 聡, 蔵満 康浩, 「CR-39 スタック検出器を利用した高エネルギーの重イオン計測における核破砕生成 粒子の影響」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会 第 46 回年次大会, 大阪南港 ATC, C06-14a-IV-03, 2026 年 1 月 13-15 日

25. 苺谷 有哉, 合原 輔佑太, 川上 恭平, 田中 龍生, Pikuz Tatiana, 境 健太郎, 太田 雅人, 南 卓海, 時安 敦史, 郡 英輝, 中原 寛太, 諫山 翔伍, 田中 周太, 山中 悠太郎, 卜部 裕真, 河合 慶一郎, 野田 孝祐, 池田 暁彦, 林 直也, 高見 健志, 荒川 祥輝, 長尾 真希, 山本 隆奨, 立木 健嗣, 中村 豊, 内藤 佳輝, 加藤 光, 江寄 大和, 飯田 海地, 山中 敬太, 岩佐 健生, 北村 力丸, 黒地 柊太郎, 草野 颯人, 玉城 直也, 二階堂 颯佳, 安部 勇輝, 蔵満 康浩, 近藤 康太郎, 今 亮, 宮坂 泰弘, 桐山 博光, 山内 知也, 金崎 真聡, 福田 祐仁, 「固体飛跡検出器 CR-39 を用いたレーザー駆動準単色 100 MeV 超陽子線の同定」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会 第 46 回年次大会, 大阪南港 ATC, C06-14a-IV-05, 2026 年 1 月 13-15 日
26. 蔵満 康浩, 玉城 直也, 草野 颯斗, 北村 力丸, 岩佐 健生, 二階堂 颯佳, 黒地 柊太郎, 内藤 佳輝, 荒川 祥輝, 高見 健志, 長尾 真希, 林 直也, 山本 隆奨, 江寄 大和, 中村 豊, 飯田 海地, 山中 敬太, 安部 勇輝, Tatiana Pikuz, 羽原 英明, 郡 英輝, 時安 敦史, 南 卓海, 鈴木 秀幸, 境 健太郎, 太田 雅人, C.M.Chu, Po-Yu Chang, 小平 聡, 合原 輔佑太, 苺谷 有哉, 川上 恭平, 田中 龍生, 金崎 真聡, 諫山 翔伍, 中原 寛太, 池田 暁彦, 野田 孝祐, 山中 悠太郎, 卜部 裕真, 河合 慶一郎, Wei-Yen Woon, 工藤 光顕, 今 亮, 宮坂 泰弘, 近藤 康太郎, 桐山 博光, 福田 祐仁, Julien Fuchs, 「マルチ PW レーザーとナノレイヤー複合グラフェンターゲットを用いた相対論的イオン加速への挑戦」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会 第 46 回年次大会, 大阪南港 ATC, 2026 年 1 月 13-15 日
27. 合原 輔佑太, 苺谷 有哉, 川上 恭平, 田中 龍生, Pikuz Tatiana, 境 健太郎, 太田 雅人, 南 卓海, 時安 敦史, 郡 英輝, 中原 寛太, 諫山 翔伍, 田中 周太, 山中 悠太郎, 卜部 裕真, 河合 慶一郎, 野田 孝祐, 池田 暁彦, 林 直也, 高見 健志, 荒川 祥輝, 長尾 真希, 山本 隆奨, 立木 健司, 中村 豊, 内藤 佳輝, 加藤 光, 江寄 大和, 飯田 海地, 山中 敬太, 岩佐 健生, 北村 力丸, 黒地 柊太郎, 草野 颯人, 玉城 直也, 二階堂 颯佳, 安部 勇輝, 蔵満 康浩, 近藤 康太郎, 今 亮, 宮坂 泰弘, 桐山 博光, 山内 知也, 金崎 真聡, 福田 祐仁, 「高強度レーザー照射水素クラスターターゲットからの準単色 100 MeV 超陽子線加速の加速メカニズム」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会 第 46 回年次大会, 大阪南港 ATC, C06-14a-IV-06, 2026 年 1 月 13-15 日
28. 二階堂 颯佳, 玉城 直也, 草野 颯斗, 黒地 柊太郎, 北村 力丸, 飯田 海地, 安部 勇輝, 境 健太郎, Buruno Albertazzi, Gabriel Rigon, Michel Koenig, Chun-Sung Jao, Yao-Li Liu, Che-Men Chu, 金崎 真聡, 福田 祐仁, 浜口 智志, 蔵満 康浩, 「固体飛跡検出器を用いたラジオグラフと機械学習によるレーザー生成プラズマの電磁場の診断」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会 第 46 回年次大会, 大阪南港 ATC, C09-15p-IV-03, 2026 年 1 月 13-15 日

(4) その他

なし

(5) 学位論文

1. 岩佐 健生, 修士論文「超高強度レーザーを用いた求心プラズマ集束法の開発」, 大阪大学大学院工学研究科, 2026 年 3 月
2. 北村 力丸, 修士論文「金積層グラフェンターゲットを用いたレーザー駆動高エネルギー炭素線の生成実験」, 大阪大学大学院工学研究科, 2026 年 3 月

3. 草野 颯斗, 修士論文「機械学習を用いたレーザー駆動イオン加速に伴う核反応の調査」, 大阪大学大学院工学研究科, 2026年3月
4. 黒地 柊太郎, 修士論文「畳み込みニューラルネットワークを用いたレーザー駆動乱流プラズマ中の電磁場再構築における数値的研究」, 大阪大学大学院工学研究科, 2026年3月
5. 玉城 直也, 修士論文「Numerical study of laser-driven ion acceleration using Au-mounted large-area suspended graphene targets」, 大阪大学大学院工学研究科, 2026年3月
6. 林 直也, 卒業論文「高強度レーザーとグラフェンターゲットを用いた核破碎の研究」, 大阪大学工学部, 2026年3月
7. 山本 隆奨, 卒業論文「外部磁場を印加した高強度レーザーイオン加速に関する研究」, 大阪大学工学部, 2026年3月
8. 荒川 祥輝, 卒業論文「高出力レーザーとナノ薄膜ターゲットを用いた重イオン加速に関する研究」, 大阪大学工学部, 2026年3月
9. 莓谷有哉, 修士論文「固体飛跡検出器 CR-39 を用いたレーザー加速プロトン及びアルゴンイオンの特性評価」神戸大学大学院海事科学研究科, 2026年3月
10. 合原輔佑太, 修士論文「高強度レーザーとクライオターゲットの相互作用によるイオン加速の研究」神戸大学大学院海事科学研究科, 2026年3月
11. 安藤 凌, 「ミー散乱法を用いた水素クラスターターゲットのサイズ計測」神戸大学海事科学部, 2026年3月
12. 中川直哉, 「水素クラスターのクーロン爆発で加速されたプロトンのエネルギー特性」神戸大学海事科学部, 2026年3月
13. 臼井健斗, 「クラスターターゲットから加速される Ar 多価イオンの異方性」神戸大学海事科学部, 2026年3月

2025年度 HIMAC 共同利用研究課題一覧

整理番号	申請者	課題名	報告書ページ
25HJ001	稲庭拓	新規重粒子線治療の実現に向けた臨床前動物実験	3
25HJ101	Safavi-Naeini, Mitra	Investigation of Cell Death as a Result of Dose Enhancement via Neutron Capture	不許可
25HJ102	下川卓志	高 LET 粒子線による放射線抵抗性脳腫瘍の治療を目指した基礎研究	7
25HJ103	舟山知夫	三次元培養した伴侶動物がん細胞の放射線感受性解析	11
25HJ104	関原和正	治療抵抗性がんに対する重粒子線治療の新展開：薬物療法との併用効果と腸内細菌叢の役割の解明	61
25HJ105	佐井星	難治性癌に対する重粒子線照射と薬剤併用による基礎研究	17
25HJ106	Ebner Daniel Keith	Advanced multiomic analysis of DNA Damage and Immunotherapeutic Inhibitors with Heavy-Ion Radiotherapy	64
25HJ107	Tinganelli Walter	The CANTO Project (Circulating cANcer cells and meTastases fOrmation)	67
25HJ108	高草木洋一	超偏極 13C-MRI を用いた重粒子線照射による腫瘍内代謝変化の評価	21
25HJ110	高橋豊	重粒子線が誘導する免疫応答の解明と免疫治療との併用効果の検討	23
25HJ111	武島嗣英	光子線と重粒子線の抗腫瘍免疫応答の比較	26
25HJ112	小嶋光明	重粒子線すだれ状照射による抗腫瘍効果と正常組織障害軽減効果に関する基礎研究 Basic biological research on the antitumor effect and the reduction of normal tissue damage by special fractionated heavy particle beam irradiation	70
25HJ201	吉岡公一郎	重粒子線を用いた根治的不整脈治療の開発	34
25HJ202	若月優	重粒子線による高精度量子メス治療（マイクロサージェリー）技術開発と適応拡大に関する研究	37
25HJ203	Prezado Yolanda	Heavy ion minibeam radiation therapy: safety and efficacy studies	73
25HJ302	森田明典	細胞死制御剤による粒子線防護効果のマウス個体レベルでの検討	40
25HJ303	小西輝昭	ブラッグピーク近傍の重粒子イオンによる致死的 DNA 損傷誘発メカニズムの解明	43
25HJ401	余語克紀	重粒子線誘発の DNA 損傷を指標としたアミノ酸およびアミノ酸誘導体の放射線防護剤の探索	31
25HJ402	PORCEL Erika	Radioamplification effect of nanoparticles study on 3D cell models	76
25HJ403	中野敏彰	重粒子線照射により生じる DNA 損傷と細胞死の相関の解明：細胞死経路の制御によるがん治療の最適化	46
25HJ404	島田幹男	組織オルガノイドにおける重粒子線の生物効果比の評価	14
25HJ405	Takata Kei-ichi	Mutational signatures induced by high LET radiation	49
25HJ407	平山亮一	低酸素細胞に関する粒子線基礎生物研究	28
25HJ408	松尾陽一郎	粒子線による DNA 損傷と突然変異誘発機構の分子レベルでの解析	79
25HJ501	下川卓志	イオンビームによる微生物・植物への変異導入を利用した基礎研究 プラットフォームの構築	52
25HJ502	高橋美智子	植物への重粒子線照射が栄養ストレス耐性に与える影響	未実施
25HJ503	藤田知道	コケ植物胞子体の宇宙放射線耐性限界の調査および DNA 修復・放射線耐性の分子機構の研究	56

2025 年度 HIMAC 共同利用研究課題一覧

整理番号	申請者	課題名	報告書ページ
25HH001	坂間誠	重粒子線治療照射法に関する総合的研究	85
25HH002	新藤浩之	Soceity5.0 に向けた革新的耐宇宙線デバイス技術の開発	104
25HH003	山内知也	高感度飛跡検出器開発を目指したイオントラック構造と応答特性に関する基礎データ集の確立 Fundamental data collection on ion track structure and response characteristics for the development of high-sensitivity track detectors.	118
25HH004	小林憲正	重粒子線照射による模擬宇宙環境下での有機物の生成とその変成	106
25HH005	寺沢和洋	位置有感比例計数管の重イオンに対する応答	121
25HH006	中竜大	超微粒子原子核乾板によるナノスケールの放射線飛跡検出器の高度化と展開	124
25HH007	George Stuart P	Measurement of Isotopic Light Ion Cross Sections with a Nuclear Fragment Spectrometer	157
25HH008	山谷泰賀	重粒子線照射野イメージングのための OpenPET 装置開発に関する研究	88
25HH009	森口哲朗	反応断面積測定に向けた固体重水素標的の開発 RI ビーム飛行時間検出器の開発 -理研稀少 RI リングのための検出器-	142
25HH010	RAFFY Quentin	Dose-rate effects with accelerated ions: Experimental investigation and Simulation of water and biomolecules radiolysis	162
25HH011	Ploc Ondrej	Novel Space Dosimetry System for the Czech Satellite in the Cislunar Environment	133
25HH012	牧野高紘	SiC MOSFET のシングルイベント過渡応答の直接測定	109
25HH013	上野恵美	炭素線照射した脂質中に生成するフリーラジカルの定量とその反応進行過程の解析	99
25HH014	石川正純	BaTiO ₃ 強誘電体を用いた線量測定における LET 依存性の検証	127
25HH015	大田晋輔	ガスアクティブ標的による核物質の物性研究	147
25HH016	Benton Eric R	Atmospheric Ionizing Radiation Detectors: Continuing Development Atmospheric Ionizing Radiation Detector Development	165
25HH017	Safavi-Naeini Mitra	A Second-Generation High Performance Prompt Gamma Detection and Neutron Capture Discrimination System for NCEPT Evaluation of a prototype system for prompt gamma detection and neutron capture discrimination in NCEPT	不許可
25HH018	今井伸明	重イオン位置感応型検出器の開発	168
25HH019	小林正規	超音波エコーを利用した水中における重粒子線飛跡可視化の研究	101
25HH020	Berger Thomas	Human Space Exploration - The Radiation risks and novel new detector developments	137
25HH021	Davis Scott C	Radiation Effects Testing Electronic Components for Space	免除
25HH022	Kim Sunghwan	Calibrations of Advanced Particle dosimeter and Spectrometer for Heavy Ions in Space Radiation	96
25HH023	Sihver Lembit	Enabling in-orbit AI on Space Stations and Satellites by shielding of COTS based electronics	免除
25HH024	小林和淑	放射線環境下で発生する電圧変動を活用したデバイスモデルパラメータ最適化手法の構築	110

2025 年度 HIMAC 共同利用研究課題一覧

整理番号	申請者	課題名	報告書ページ
25HH025	Coronetti Andrea	Heavy ion single-event effect testing of components needed for ethernet-based time-sensitive networks in space applications	免除
25HH027	Park Inchun	気象衛星ひまわり後継機搭載用宇宙放射線計測装置の開発と評価	140
25HH028	榊泰直	重粒子線による輝尽性蛍光体検出器および蛍光体検出器の LET 依存性に関する研究	130
25HH029	三原基嗣	動的核偏極法による不安定核の磁気双極子モーメント測定	152
25HH030	安部勇輝	レーザーイオン加速による GeV 級イオンビーム生成の実証に向けた高エネルギーイオン診断法の開発	171
25HH031	Rosenfeld Anatoly B	In-Field and Out-of-Field Dose Profile from Therapeutic Hadron Therapy Beams	112
25HH032	外川学	ノンシリコン半導体を使った粒子検出器の基礎研究	未実施
25HH033	山口充孝	二次電子制動放射線計測による粒子線イメージング手法の開発	93
25HH034	中嶋大	宇宙 X 線観測に向けた超小型衛星搭載センサの放射線耐性	未実施
25HH035	Nguyen Trung Tat	耐宇宙環境試験による民生品の信頼性評価	免除
25HH036	岡本広樹	半導体部品(電源用部品)の宇宙機器への適用に向けた重イオンシングルイベント効果の評価	免除

(35 課題)

