

2024年度量子医科学研究所  
重粒子線がん治療装置等  
共同利用研究報告書  
(発表会用暫定版)

II. 物理・工学

2024 Annual Report of the  
Research Project with Heavy Ions  
at QST-HIMAC

2025年5月  
May, 2025

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



2025年5月16日

### 重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書（発表会用暫定版）について

- これは重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書の草稿で、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。
- 第一分冊が治療・診断と生物、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あるので、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27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。



# 「2024年度HIMAC共同利用研究成果発表会日程表（案）」

日時：2025年5月26日（月）～5月27日（火）

開催方式 Web開催

日付	5月26日(月曜日)	5月27日(火曜日)
時間	治療・診断	物理・工学
10:00		挨拶、9:50 - 10:00 A 治療 10:00 - 10:30
11:00		休憩 B 放射線と化学反応 10:40 - 11:10
12:00		休憩 C 加速器ビーム利用の新展開 11:20 - 12:10
13:00		昼休み D 様々な検出器の開発 13:10 - 13:50
14:00	課題番号 L126-L139 13:00 - 14:10	休憩 E 宇宙観測のための測定器 14:00 - 15:00
15:00		F 原子核の研究と検出器の開発 15:10 - 16:00
16:00		
17:00		

日付	5月26日(月曜日)
時間	生物
10:00	挨拶、9:50 - 10:00 課題番号 001-147 10:00 - 10:40
11:00	休憩
12:00	課題番号 148-156 11:00 - 11:50
	昼休み
	11:50 - 12:50
13:00	課題番号 204-347 12:50 - 13:40
	コーヒーブレイク
14:00	課題番号 413-444 14:10 - 14:50
	休憩
15:00	課題番号 446-472 15:00 - 15:40
	休憩
16:00	課題番号 501-507 16:00 - 16:40

## 「2024年度HIMAC共同利用研究成果発表会プログラム（案）、治療・診断班」

日時： 2025年5月26日（月）13時00分～14時10分  
 場所： Web開催

## 口頭発表

報告書  
ページ

## 5月26日(月)

13:00 - 13:10

## セッション準備

13:10 - 13:20 24L126 篠藤誠

LET最適化法を用いた腓膵癌炭素イオン線治療法の新規治療開発

3

Development of a Novel Carbon-ion Radiotherapy

13:20 - 13:30 23L134 今井礼子

骨軟部腫瘍に対するマルチイオン照射法によるLET制御重粒子線治療法の開発

7

Development of LET-optimized multi-ion radiotherapy for bone and soft tissue sarcoma

13:30 - 13:40 24L135 磯崎哲朗

心臓MRIを用いた食道癌に対する重粒子線治療後の心機能障害計測と新規照射技術開発

9

Measuring cardiac dysfunction after carbon-ion radiotherapy for esophageal cancer using cardiac MRI and developing new irradiation techniques

13:40 - 13:50 24L137 黒崎宏貴

膵癌に対する重粒子線治療における予後予測因子の解明

11

Prognostic factors in carbon ion radiotherapy for pancreatic cancer

13:50 - 14:00 24L138 岡東篤

前立腺肥大症手術歴のある前立腺癌に対する重粒子線治療の効果と安全性の検討

14

14:00 - 14:10 24L139 村田和俊

LET Adaptive Therapy開発のためのインターフラクショナルエラーの検討

17

※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

24L136 山口有輝  
子

大腸癌術後のオリゴ転移に対するQST病院における重粒子線治療の成績

21

2025/5/16

## 「2024年度HIMAC共同利用研究成果発表会プログラム（案）、生物班」

日時： 2025年5月26日（月）9時50分～16時50分  
 場所： Web会議

5月26日（月） May 26（Mon）

9:50 - 10:00 開会の挨拶

	口頭発表	報告書 ページ
課題番号 001-147		
10:00 - 10:10	セッション準備（座長：）	
10:10 - 10:20	22J001 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	25
10:20 - 10:30	22J114 高橋豊 光子線抵抗性細胞株移植マウスモデルを用いた免疫チェックポイント阻害剤と重粒子併用時のアブスコパル効果とその作用機序の検討 Investigation of the Abscopal Effect and Its Mechanism in a Photon-Beam-Resistant Tumor-Bearing Mouse Model Treated with Combined Heavy Ion Irradiation and Immune Checkpoint Inhibition	29
10:30 - 10:40	24J147 下川卓志 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	33
10:40 - 10:50	24J148 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	37
10:50 - 11:00	休憩	
課題番号 148-156		
11:00 - 11:10	セッション準備（座長：）	
11:10 - 11:20	23J152 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	40
11:20 - 11:30	23J153 佐藤香枝 次元培養による重粒子線評価システムの検討 Investigation of heavy particle radiation evaluation system using three-dimensional culture	43
11:30 - 11:40	23J154 中島菜花子 ロテアソーム阻害剤の炭素線増感効果 Analysis of the Carbon ion irradiation sensitizing Effect of Proteasome Inhibitors	46
11:40 - 11:50	24J156 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	48
11:50 - 12:50	昼休み	
課題番号 204-347		
12:50 - 13:00	セッション準備（座長：）	
13:00 - 13:10	24J206 石川仁 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	51

13:10	– 13:20	24J315	平山亮一	高LET粒子線による腫瘍再酸素化の機序解明 Elucidation of the Mechanism of Tumor Reoxygenation by high-LET particle beams	54
13:20	– 13:30	23J327	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	57
13:30	– 13:40	24J347	間宮大晴	重イオントラック構造依存的な細胞致死効果の解明 Cell killing effect of heavy ion track structure	60
13:40	– 13:50	23J204	網野真理	重粒子線を用いた根治的不整脈治療の開発	63
13:50	– 14:10			コーヒーブレイク	
				課題番号 413-444	
14:10	– 14:20			セッション準備 (座長:)	
14:20	– 14:30	24J413	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 Study of DNA damage induced by heavy ion beam for searching radioprotector candidates	68
14:30	– 14:40	22J433	中野敏彰	重粒子線誘発DNA損傷構造の特徴と飛跡末端構造に関 する研究 Study on the structure of DNA damage induced by heavy ion beam and the structure of track ends	71
14:40	– 14:50	22J444	島田幹男	重粒子線による幹細胞のゲノム安定性への影響 Effect of heavy ion beam exposure to the genome stability in stem cells	75
14:50	– 15:00			休憩	
				課題番号 446-472	
15:00	– 15:10			セッション準備 (座長:)	
15:10	– 15:20	23J446	Takata Kei-ichi	高LET放射線照射によって刻まれるDNA変異 Mutational signatures induced by high LET radiation	78
15:20	– 15:30	24J447	鈴木雅雄	重粒子線照射がん細胞と非照射細胞間のバイスタン ダー効果を介した生物効果誘導解明 Biological effects through bystander effects between heavy-ion irradiated tumor and unirradiated normal cells	82
15:30	– 15:40	24J468	平山亮一	慢性低酸素細胞に関する粒子線基礎生物研究 Basic biological research on chronically hypoxic cells using particle beams	85
15:40	– 15:50	24J472	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	88
15:50	– 16:00			休憩	
				課題番号 501-507	
16:00	– 16:10			セッション準備 (座長:)	
16:10	– 16:20	24J501	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	91
16:20	– 16:30	23J503	松山知樹	重粒子線による植物品種識別と突然変異育種に関する 研究 Development of cultivar identification method and plant breeding using heavily ion-beams	95

16:30	– 16:40	24J505	高橋美智子	重イオンビーム照射による栄養ストレス耐性植物の作出	98
16:40	– 16:50	24J507	下川卓志	実用化を目指した有用微生物の単離・育種	101

※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

22J137	KIM Jong Ki	Investigation of heavy ion stimulated Colomb nanoradiator on amyloid protein-magnetite aggregation in neurodegenerative disease	107
22J150	関原和正	悪性腫瘍（放射線、抗がん剤に抵抗性を示す難治がん含む）に対する重粒子線の有用性および分子機構の解明 Investigation of the efficacy and molecular mechanisms of heavy ion beams for malignant tumors including refractory cancers resistant to radiation and anticancer drugs	110
23J155	Ebner Daniel Keith	Advanced multiomic analysis of DNA Damage, Metabolic, and Immunotherapeutic Inhibitors with Heavy-Ion Radiotherapy	113
24J207	Angela Corvino	Heavy ion minibeam radiation therapy: safety and efficacy studies	116
22J307	Eun Ho Kim	The identification of miRNA-17 and miR-214 as Carbon-ion radiosensitizer on osteosarcoma	119
23J348	Di Cuixia	Molecular mechanism of heavy ions overcoming radiation resistance of p53 mutant cancer cells	123
23J349	Jing Si	The Functional Role and Underlying Mechanism of Heavy Ions in Overcoming the Radioresistance of Quiescent Cancer Cells	127
23J350	Sun Chao	Mechanism study on much efficient induction of tumor cell death by heavy ion irradiation: the role of NADPH oxidase-mediated mitochondrial vicious cycle	130
24J428	PORCEL Erika	Radioamplification effect of nanoparticles study on 3D cell models	133
24J146	Safavi Naeini Mitra	Evaluation of a Prototype System for Prompt Gamma Detection and Neutron Capture Discrimination in NCEPT	

2025/5/16

## 「2024年度HIMAC共同利用研究成果発表会プログラム(案)、物理・工学班」

日時： 2025年5月27日(火) 9時50分～16時10分

場所： Web開催

5月27日(火) May 27 (Thu)

9:50 - 10:00		開会の挨拶	報告書 ページ
10:00 - 10:30	セッションA	口頭発表 治療 (座長：) セッション準備	
22H005	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	139
23H285	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	142
10:30 - 10:40		休憩	
10:40 - 11:10	セッションB	放射線と化学反応 (座長：) セッション準備	
22H467	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 Visualization of Heavy Ion Particle Trails in Water Using Ultrasonic Echoes	147
22H426	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検 出とその反応解析 Detection of lipid free radicals induced by carbon-ion beam irradiation to oil/lipid	150
11:10 - 11:20		休息	
11:20 - 12:10	セッションC	加速器ビーム利用の新展開 (座長：) セッション準備	
24H262	為ヶ井強	粒子線照射による新規超伝導体における臨界電流増強 と超伝導対称性の同定 Enhancement of Critical Current and Identification of Symmetry of Superconductivity in New Superconductors by means of Particle Irradiations	153
22H409	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	156
24H492	小林和淑	放射線による劣化現象TIDを考慮した宇宙機向け耐ソフト エラー回路の開発 Development of Soft Error Tolerant Circuits for Spacecraft Considering Total Ionizing Dose	157
23H487	北村徳隆	シリコンカーバイド検出器の重イオンビームに対する 応答	159
12:10 - 13:10		昼休み	

13:10 – 13:50	セッションD	様々な検出器の開発 (座長：) セッション準備	
23H138	山内知也	高感度飛跡検出器に相応しい新しい検出閾値概念とエッチングモデルの確立 Toward a new concept for detection threshold and etching-models suited to track detectors with high registration sensitivity	161
24H212	中竜大	超微粒子原子核乾板によるナノスケール高電荷分離放射線飛跡検出器の展開 Study for the super-fine grained nuclear emulsion as nano-scale tracking detector with high-charge discrimination	164
23H473	廣瀬重信	エネルギー分解能を持つ白雲母固体飛跡検出器の開発 Development of Mica Solid State Track Detector with Energy Resolution	167
13:50 – 14:00		休息	
14:00 – 15:00	セッションE	宇宙観測の為の測定器 (座長：) セッション準備	
24H095	新藤浩之	化合物半導体への重イオンの影響に関する研究 Study of single event effects on compound semiconductor devices	170
23H189	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	173
24H437	James Vohradsky	In-Field and Out-of-Field Dose Profile from Therapeutic Hadron Therapy Beams	177
22H414	Hajdas Wojciech	Tests of Particle Telescopes for JUICE and other future missions of ESA	183
22H465	高橋忠幸	ガンマ線衛星搭載検出器の重イオン応答の研究 Study of heavy ion response of gamma-ray satellite onboard detectors	186
15:00 – 15:10		休憩	
15:10 – 16:00	セッションF	原子核の研究と検出器の開発 (座長：) セッション準備	
24H445	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	189
24H443	山口貴之	不安定原子核の荷電変化反応の研究 Study on Charge Changing Interactions of Heavy Ions	195
24H455	外川学	高放射線耐性を持つ新素材半導体検出器の研究	198
22H466	今井伸明	対称重イオン核融合反応の断面積評価と新同位体探索 Study of the near-symmetric fusion cross section and search for new isotopes	201

- ・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

23H248	George Stuart P	Nuclear Fragment Spectrometer	207
23H377	Ploc Ondrej	Novel Space Dosimetry System for the Czech Satellite in the Cislunar Environment	210
23H387	福田祐仁	レーザー加速イオン特性評価のための高精度エネルギー スペクトロメータの開発 Development of the energy spectrometer for characterization of laser-accelerated ions	213
24H446	楠本多聞	放射線化学実験で解き明かす生物効果の線量率依存性 メカニズムの解明 Clarification of the mechanism of the dose rate effect of biological effectiveness	221
22H461	Benton Eric R	Atmospheric Ionizing Radiation Detector Development	224
23H474	Berger Thomas	Human Space Exploration - The Radiation risks and novel new detector developments	227
23H476	Dong Hai Zhang	Cross sections for charge pickup reaction of heavy ions On elemental targets at HIMAC energies	231
23H479	大島武	民生部品の宇宙利用拡大に向けた高信頼車載デバイスの 放射線損傷メカニズム解明 Radiation damage mechanism for highly reliable onboard devices for the expansion of consumer components into space applications	234
24H488	García Alía Rubén	SRAM and Diode Irradiation with Xe and Kr Heavy Ions at HIMAC	237
22H462	Safavi- Naeini Mitra	Evaluation of a prototype system for prompt gamma detection and neutron capture discrimination in NCEPT	

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 (22H005)

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 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 *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: development of SiC/Diamond detector with measurement of linear energy deposition distribution in MIRT, micro-surgery experiment for extremely small irradiation field in scanning beams, investigation of response characteristics of the radio-photoluminescence dosimeter for heavy-ion beams, development of a method for measuring the effects of heavy ion beam irradiations using three-dimensional cultured cancer cells, radiation quality measurement using SOI detector for QA of MIRT and beam source data measurements using mesh ripple filter 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) マルチイオンビームに対する薄膜型ダイヤモンド検出器による線エネルギー付与分布測定
- 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) 重粒子線治療ビームの LET 分布測定法の開発
- 5) マルチイオン治療のためのガントリーを用いたヘリウムビームコミッショニング

#### 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) 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
- 2) スキャンニングビームによる照射場検討のためのマイクロサージェリー実験
- 3) 重粒子線に対する蛍光ガラス線量計 (RPLD) の応答特性評価
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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

本稿では、2)、3) について報告する。

### 【スキャンニングビームによる照射場検討のためのマイクロサージェリー実験】

微小疾患を対象とするマイクロサージェリーに向け、新治療棟におけるラット実験を想定したコリメータを用いた照射場の構築およびビームデータの取得を行った。小照射野の炭素線場を形成するため 2 mm φ のコリメータを使用した。ラット照射を想定して、ピーク深が 7-14 mm となるよう 109、103、96(MeV/u) のエネルギーを選択した。それぞれのエネルギーについて照射野中心の深部線量分布と側方線量分布を測定し、またコリメータの設置条件を調整することでラット実験に使用可能な照射場を構築した。図 1 に電離箱線量計によるオープンフィールドでの深部線量分布(白抜きシンボル)と 2 mm φ コリメータを用いた小照射野でのガフクロミックフィルム EBT4 による深部線量分布(黒塗りシンボル)を示す。生物照射室において得られている深部線量分布のピークと入口線量の比 1.83 とおおよそ同等の線量比が得られた。

又、マイクロサージェリーの臨床使用実現のため、コリメータを使用せずビーム輸送ラインの電磁石パラメータの調整による小照射野形成の可能性について検証した。ピーク深 (9 cm) 付近でのビームスポット径は 1σ ~1.5 mm であり、臨床使用において小

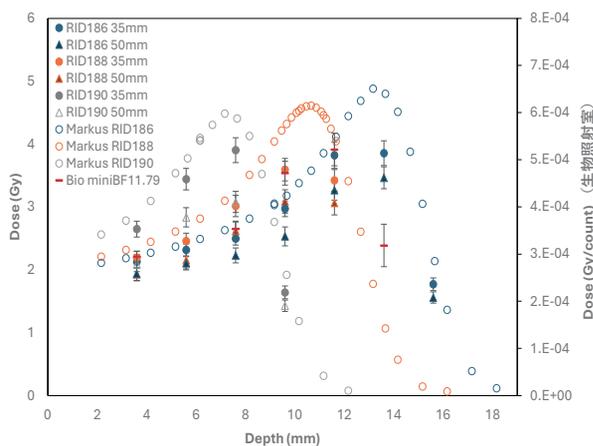


図 1 : 109、103、96(MeV/u) の炭素線に対する深部線量分布(RID:186,188,190)。白抜きシンボルは電離箱線量計による大きな照射野を黒塗りシンボルは 2 mm φ コリメータによるガフクロミックフィルムでの線量分布を示す。

照射野の形成が可能なサイズであることを確認した。

### 【重粒子線に対する蛍光ガラス線量計 (RPLD) の応答特性評価】

放射線治療の質向上のための出力線量評価について、本邦において光子線では蛍光ガラス線量計 (RPLD) を用いて事業化されているが、重粒子線に対する RPLD の応答は十分に評価されていない。そのため重粒子線に対する RPLD の応答特性、特に LET による線量応答特性を評価する。炭素線 290 MeV/n の平面照射で 10 mm 深の吸収線量が 1Gy の照射パターンを用い、RPLD を封入した水等価ファントムの厚みを変化させることで LET を変化させた。電離箱線量計を基準として、同条件で照射した蛍光ガラス線量計の出力を評価した。図 2 に電離箱線量計測定値に対する RPLD の LET 補正係数を示す。LET の増加に伴い、ガラス線量計測定値が減少し、ブラッグピーク近傍ではその影響が大きいことが確認された。又、線量応答特性として良好な線量リニアリティを示し、フェーディングについてはコバルト γ 線照射時と有意な差はなかった。これに基づき出力線量評価を行う測定点として、入射位置とすることを決定した。重粒子線の出力線量の評価ツールとしての有用性をまとめ、実用化に向けて総合評価を行う予定である。

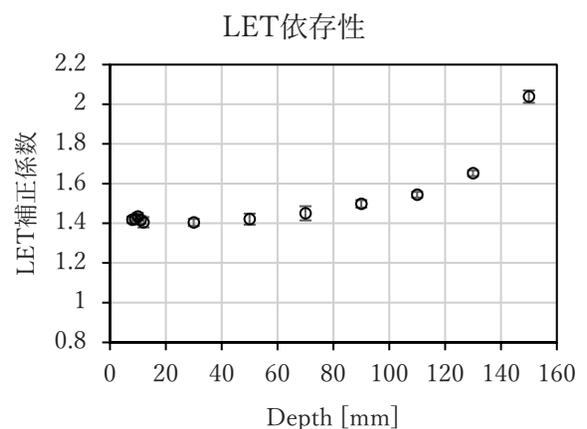


図 2 : 290MeV/n の炭素線における測定深によるガラス線量計 (RPLD) の LET 補正係数。

QST

【学術論文】

- Tanaka S, Inaniwa T. Method for fabricating a mesh ripple filter for charged-particle therapy. *Phys Med Biol.* 2024 Jul 10;69(14). doi: 10.1088/1361-6560/ad5d49. PMID: 38941999.
- Hideyuki Mizuno, Taku Nakaji, Sung Hyun Lee, Dousatsu Sakata, Katsumi Aoki, Kota Mizushima, Linh T Tran, Anatoly Rosenfeld and Taku Inaniwa, Verification of linear energy transfer optimized carbon-ion radiotherapy, *Phys. Med. Biol.* **69** 23NT01 (2024)
- Kohno R, Koto M, Ikawa H, Lee S H, Sato K, Hashimoto M, Inaniwa T and Shirai T, High-linear energy transfer irradiation in clinical carbon-ion beam with the linear energy transfer painting technique for patients with head and neck cancer, *Adv. Radiat. Oncol.* **9** 101317 (2024)

【学会発表】

- Kasamatsu K, Boscolo D, Masuda T, Mizushima K, Tanaka S, Sato S, Weber U, Durante M, Inaniwa T: Preparation of experiment environment for heavy ion FLASH and its application to the creation of 3D modulated FLASH dose distribution. 127th Scientific Meeting of the Japan Society of Medical Physics, Yokohama, 2024.4.
- Makoto Sakama, Dosimetric evaluation for heavy ion radiotherapy in head and neck region with clinical trial of dual energy CT, 10th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, Nagoya, 2024.9
- Sota Takauji, Development of external dosimetry audit for heavy ion radiotherapy using radio photoluminescent glass dosimeters, 10th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, Nagoya, 2024.9
- Ryo Watanabe, Linear energy transfer (LET) and field size dependence of a radiophotoluminescent glass dosimeter for carbon beams, 10th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, Nagoya, 2024.9
- Taku Nakaji, Measurement of linear energy transfer in scanned carbon-ion radiotherapy for patients with pancreatic cancer, 10th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, Nagoya, 2024.9

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  
(23H285)

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

### 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 monitoring in particle therapy. Here, irradiation produced  $\beta^+$ -emitting nuclides are metabolized (biologically washed out) mainly by blood flows depending on the tumor vascular status. We hypothesized that the biological washout rate of the produced  $\beta^+$ -emitting nuclides themselves would be a biomarker for the tumor vascular status. The aim of this study was to detect the biological washout rate distribution within the tumor and verify its correlation with the intratumoral vascular status. A  $^{12}\text{C}$  ion beam was irradiated to a tumor rat model, then high sensitivity PET imaging was performed applying our custom made total-body small animal PET system. Then, a hypoxia PET ( $^{18}\text{F}$ -FAZA administration) was carried out for the same rat model. Difference of the biological washout rate depending on vascular status inside of the tumor, which agreed with the  $^{18}\text{F}$ -FAZA PET result, was observed. This study supported the concept of the biological washout-based tumor vascular diagnosis evaluation.

### 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」のアイデアを 2008 年に提案し[1]、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 QST 病院 (E 室) への導入が完了し (figure 1)、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、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) の補正等、より臨床応用に即した研究を重点的に進めている。



Fig 1. OpenPET installation in QST hospital Room-E.

### 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 4 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、照射フラクシオン毎の画像の変化の解析手法の開発に至った。

washout 効果研究においては、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結果が得られた。増殖中の腫瘍の特徴である血管新生 (血管透過性が亢進)

や、低酸素・壊死などの血流不足など、腫瘍の血管状態が washout 速度係数に反映されていることが示された[2]。これは臨床において腫瘍診断に用いられる Dynamic Contrast Enhanced-MRI 解析の結果と相関を示す結果であり、washout 速度係数が腫瘍の診断指標になるという結果が得られた。

### 3. 今年度の研究内容

実際の腫瘍内の細胞活性領域は均質ではなく、血管新生領域、低酸素領域、壊死状態領域など、組織的に不均質な構造もつ。今年度は、腫瘍内組織構造に対応する washout 速度分布を捉える事を目的とし、重粒子線治療ビームによる腫瘍ラットモデル照射実験と高感度 PET 測定を実施した。

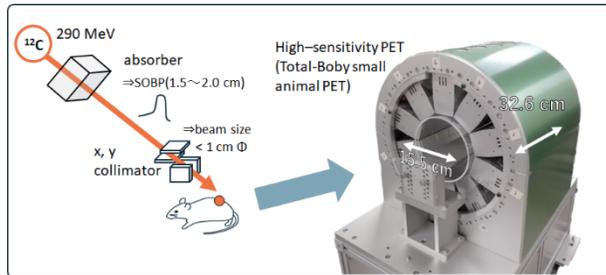


Fig 2. Experimental scheme and setups for beam-monitoring PET scan with TBS-PET in HIMAC Bio experimental room.

ヌードラット (six weeks old, F344/NJcl-rnu/rnu CLEA Japan, Inc.) の左脚 (皮下組織) に C6 グリオーマ細胞を移植し、HIMAC 生物実験照射室にて  $^{12}\text{C}$  ビーム照射を行った (figure 2)。ビーム条件は、最大エネルギー 290 MeV、SOBP 幅 6 cm、ビームサイズ直径 10 cm である。吸収体とコリメータを用い、SOBP 幅とビーム径は腫瘍サイズに合わせて調整した。照射後、小動物 PET (total body small-animal PET : TBS-PET) [3]にて高感度 PET 撮像を行った。照射線量は 8Gy、照射後から PET 撮像開始までの時間は約 2.7 分、PET 撮像時間は 30 分である。PET 再構成画像上において、放射能強度の異なる領域に関心領域 (ROI) を設け、それぞれの時間減衰曲線 (time activity curve : TAC) を得た。

更に、同じラットモデルに対し、低酸素トレーサ [ $^{18}\text{F}$ ]-fluoroazomycin arabinoside ( $^{18}\text{F}$ -FAZA) を投与し、超高分解能小動物用 PET 装置 “Mirai-PET” (Mirai Imaging Inc., Fukushima, Japan) [4]により低酸素 PET 撮像を行った (figure 3)。

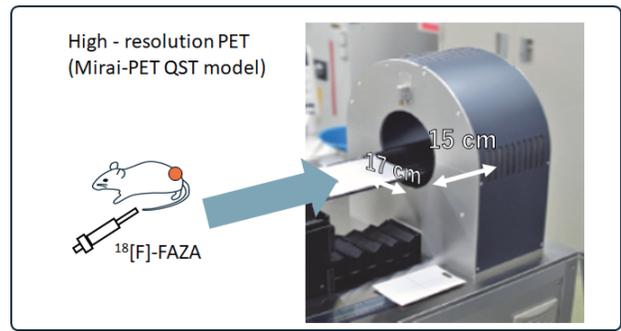


Fig 3. Experimental setup Hypoxia PET imaging with Mirai-PET in Positron building animal experimental room.

### 4. 今年度の研究成果と解析結果

Figure 4 (a), (b) に照射野イメージング PET 画像と低酸素 PET 画像を示す (腫瘍部位の拡大図)。両者には相関性が見られた。また、figure 3 (c)に TAC を示す。実線は 1 組織コンパートメントモデルによる fitting 結果である。腫瘍内部において異なる washout 速度分布が捉えられた。腫瘍中心部は壊死領域であるために washout 速度が遅くなったと解釈できる。低酸素領域と増殖領域との分離に向けた解析も進行中である。今回の HIMAC 実験にて、washout 測定で重粒子線治療に対する腫瘍の反応を評価できる可能性が示唆された。

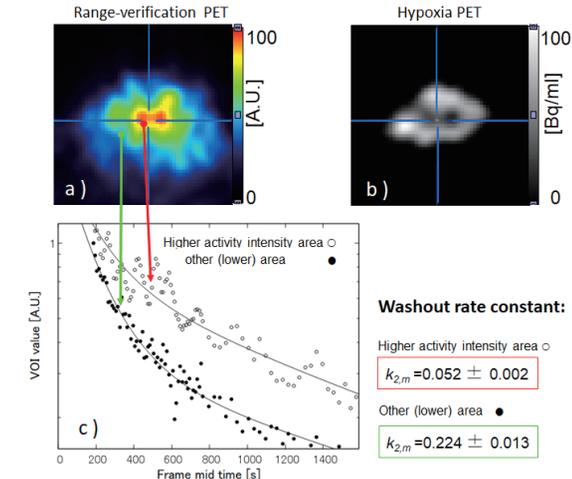


Fig 4 Axial tumor image obtained by the range-verification PET experiment (a) and the hypoxia PET experiment (b). TACs depend on the different intensity areas (c).

#### 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 125006105011, 2022.
- [3] H. G. Kang, et al., SNMMI., 62, (Supp. 1) 1148, 2021.
- [4] Ishikawa T et al 2024 Mirai-PET: High-resolution, portable, axially long small animal PET with TOF-DOI detection 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

## 2024 業績リスト(23H285)

(原著論文等)

### 1. Prospects for applying radioactive ion beams in particle therapy

Yamaya Taiga, Hangyu Kang, Akram Mohammadi, Toramatsu Chie, Inaniwa Taku  
The European Physical Journal Plus 140.3 (2025): 203. 10.1140/epjp/s13360-025-06039-z

### 2. A whole gamma imaging prototype for higher quantitative imaging of <sup>89</sup>Zr-labeled antibodies in a tumor mouse model

Sodai Takyu, Hideaki Tashima, Miwako Takahashi, Eiji Yoshida, Hidekatsu Wakizaka, Fujino Obata, Go Akamatsu, Kotaro Nagatsu, Aya Sugyo, Hitomi Sudo, Atsushi B Tsuji, Mariko Ishibashi, Yoichi Imai, Katia Parodi and Taiga Yamaya  
Physics in Medicine & Biology 70.2 (2025): 025012.

### 3. Dose estimation using in-beam positron emission tomography: Demonstration for <sup>11</sup>C and <sup>15</sup>O ion beams

Akram Mohammadi, Tashima Hideaki, Iwao Yuma, Takyu Sodai, Akamatsu Go, Hangyu Kang, Nishikido Fumihiko, Katia Parodi, Yamaya Taiga  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 1066(169643), 1 - 13, 2024-09,  
DOI:10.1016/j.nima.2024.169643

### 4. A quantitative assessment of Geant4 for predicting the yield and distribution of positron-emitting fragments in ion beam therapy

Andrew Chacon, Harley Rutherford, Akram Mohammadi, Nitta Munetaka, Nishikido Fumihiko, Iwao Yuma, Hideaki Tashima, Yoshida Eiji, Akamatsu Go, Takyu Sodai, Hangyu Kang, Daniel R Franklin, Katia Parodi, Yamaya Taiga, Anatoly Rozenfeld, Susanna Guatelli, Mitra Safavi naeini  
Physics in Medicine & Biology, 69(12), 125015-1 - 125015-12, 2024-06, DOI:10.1088/1361-6560/ad4f48

(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 <sup>12</sup>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 <sup>12</sup>C-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. OpenPET 試作機による重粒子線がん治療照射野イメージング：臨床試験の開始

田島 英朗, 寅松 千枝, Mohammadi Akram, 岩男 悠真, 赤松 剛, Kang Han Gy u, 錦戸 文彦, 田尻 稔, 水野 秀之, 小藤 昌志, 山谷 泰賀

第 64 回日本核医学会学術総会, 日本核医学会, 2024-11-08

##### 2. Feasibility of tumor diagnosis by means of range-verification PET in carbon-ion therapy: A rat demonstration

寅松 千枝, 田島 英朗, 脇坂 秀克, 須藤 仁美, 関 千江, 生駒 洋子, 菅野 巖, 山谷 泰賀

2024 年第 85 回応用物理学学会秋季学術講演会, 日本応用物理学学会, 2024-09-18

##### 3. 開放型 PET による粒子線治療の治療効果モニタリング法の開発

寅松 千枝

開放型 PET による粒子線治療の治療効果モニタリング法の開発

PET サマーセミナー2024, 日本核医学会 PET 核医学分科会, 2024-08-30

##### 4. OpenPET 初の重粒子線がん治療臨床応用

田島 英朗, 寅松 千枝, Mohammadi Akram, 岩男 悠真, 赤松 剛, Kang Han Gy u, 錦戸 文彦, 田尻 稔, 水野 秀之, 小藤 昌志, 山谷 泰賀

第 43 回日本医用画像工学会大会, 一般社団法人 日本医用画像工学会, 2024-08-07

##### 5. A preliminary report of the first clinical study of OpenPET: in-beam range verification for 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

The 3rd International Conference on Radiological Physics and Technology, Japan Society of Medical Physics, Japan Society of Radiological Technology, 2024-04-12

#### [ポスター発表]

##### 1. 粒子線照射により発生する陽電子放出核種を用いた腫瘍診断：ラット実証実験

寅松 千枝, 田島 英朗, 脇坂 秀克, 須藤 仁美, 関 千江, 生駒 洋子, 菅野 巖, 山谷 泰賀

粒子線照射により発生する陽電子放出核種を用いた腫瘍診断：ラット実証実験

日本放射線腫瘍学会第 37 回学術大会, 日本放射線腫瘍学会, 2024-11-21

##### 2. Utility of Total-Body PET for Range Verification and Tumor Diagnosis in Carbon Ion Therapy: A Rat Study

Toramatsu Chie, Wakizaka Hidekatsu, Tashima Hideaki, Akamatsu Go, Seki Chie, Sudo Hitomi, Yamaya Taiga

2024 IEEE Nuclear Science Symposium, IEEE NSS-MIC-RTSD, 2024-10-31

##### 3. GATE Simulation of an Ultra-Sensitive Total-Body Small-Animal PET Scanner

Hosotani Nobuyoshi, Hangyu Kang, Toramatsu Chie, Tashima Hideaki, Yamaya Taiga

2024 IEEE NSS MIC RTSD, IEEE NPSS, 2024-10-30

##### 4. Hypoxia Imaging by Range-verification PET in Carbon ion Therapy: Rat Demonstration

Toramatsu Chie, Wakizaka Hidekatsu, Tashima Hideaki, Akamatsu Go, Seki Chie, Sudo Hitomi, Yamaya Taiga

Hypoxia Imaging by Range-verification PET in Carbon ion Therapy: Rat Demonstration

American Association of Physicists in Medicine (AAPM) Annual Meeting, 2024-07-23

## 5. The World's First Full-Ring in-Beam PET System 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

American Association of Physicists in Medicine (AAPM) Annual Meeting, American Association of Physicists in Medicine, 2024-07-21

## 6. The first clinical test of OpenPET: the world's first open-type full-ring PET system for range verification

Yamaya Taiga, Tashima Hideaki, Toramatsu Chie, Akram Hamato, Iwao Yuma, Akamatsu Go, Hangyu Kang, Tajiri Minoru, Mizuno Hideyuki, Koto Masashi

The 62nd Annual PTCOG Conference & 4th PTCOG-AO Meeting, PTCOG, 2024-06-14

(その他)

### [招待講演]

#### 1. [第30回放射線賞受賞記念講演]「核医学応用物理」の実践：革新的PET装置のBench-to-Clinical研究

山谷 泰賀, 高橋 美和子, 田島 英朗, 吉田 英治, 寅松 千枝, 赤松 剛, 錦戸 文彦, Mohammad i Akram, Kang Han Gyu, 田久 創大, 岩男 悠真, 黒澤 俊介, 鎌田 圭, 吉川 彰, 羽石 秀昭, 菅 幹生, 川村 和也, 石橋 真理子, 今井 陽一

[第30回放射線賞受賞記念講演]「核医学応用物理」の実践：革新的PET装置のBench-to-Clinical研究  
第85回応用物理学会秋季学術講演会, 公益社団法人 応用物理学会, 2024-09-18

### [研究・技術・調査報告]

#### 1. 核医学の新しい領域を切り開く Whole Gamma Imaging

田島 英朗, 高橋 美和子, 田久 創大, 赤松 剛, Kang Han Gyu, 錦戸 文彦, 吉田 英治, 山谷 泰賀

核医学の新しい領域を切り開く Whole Gamma Imaging

臨床核医学 (Nuclear Medicine in Clinic) , 57(4), 53 - 56, 2024-07

# 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 Visualization of Heavy Ion Particle Trails in Water Using Ultrasonic Echoes (22H467)

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

M. Kobayashi<sup>a</sup>, O. Okudaira<sup>a</sup>, N. Shikazono<sup>b</sup>, S. Kodaira<sup>b</sup> and K. Terasawa<sup>c</sup>

## Abstract

The purpose of this study is to clarify the effects other than ionization interaction in heavy ion beam irradiation of water and to make practical the visualization of the heavy ion track by these effects. 500 MeV/n Fe ion irradiation experiments at HIMAC showed that "microbubbles" near the Bragg peak were recorded as ultrasonic echoes near the Bragg peak were recorded as ultrasonic waves. The mechanism of "microbubble" generation is unknown, but it is certain to be an effect other than ionization interaction. The visualization of these tracks is of great importance for particle therapy. Elucidation of this effect will lead to a better understanding of the mechanism of DNA cluster damage induction. In this paper, we discuss the results of previous experiments by calculating the probability of Fe ions stopping in the negative pressure part of the ultrasound echo pulse.

## 1. 研究の目的とバックグラウンド

本研究の目的は、水に重粒子線を照射したときの飛跡部分で起きている電離相互作用以外の作用について明らかにすることである。これまでに HIMAC の Fe イオン 500MeV/n の照射実験でブラッグピーク付近に「微小気泡」のようなものが超音波エコーの映像として記録できているが発生メカニズムはわかっていない。これを明らかにすることで DNA のクラスター損傷誘発機構の解明につながると同時に超音波エコーをつかった重粒子飛跡の可視化を、放射線計測あるいは医療における粒子線の軌跡モニターなどに応用できる。

本研究課題は、19J433 で行った DNA のクラスター損傷誘発機構の解明のための実験に端を発している。我々は、粒子線が照射された水中で「音響波」ではなく、「音響波」を発生している部分を検出しようと着想した。粒子線が水中でエネルギーを損失することで局所的な温度の上昇や密度の変化があるとすれば、音響伝播的に変化が見られるのではないかと考えた。例えば、水中に目には見えなくらい小さな気泡があれば超音波を反射・散乱するので超音波エコー画像には鮮明に映る。このように常温の水から何かしらの「変化」があるとすればそれを検出するために、アクティブに超音波を送信してその散乱・反射の様子を画像化する超音波エコーを利用することを考え超音波診断装置を使うことにした。

## 2. 昨年度までに得られている結果

これまでに得られたことを以下にまとめる。<sup>1)</sup>

- 「輝点」は Fe ビームのブラッグピークの付近に現れて、さらにビームの下流にも現れることが分かっている。
- ビーム強度の増加に対して、微小気泡と思われる「輝点」の数や輝度が増えている、ビームスポット径を変化させると、超音波エコー画像上の「輝点」の分布は、ビームスポットの範囲内にだけ分布している。
- ビーム強度を上げると、「輝点」も増える。
- ビームスポット径を小さくすると、個々の輝点の密度が高くなる。
- ビーム強度を上げた状態でスポット径を小さくすると、ビデオカメラで目視できるような大きな気泡が発生する。
- そのような大きな気泡は、水の溶存ガスの濃度が増えると発生しやすいようである。

これらのことにより、Fe イオン粒子を水に照射したときに超音波エコー映像に「輝点」として見えるメカニズムとして次のように考察した。<sup>1)</sup>1 個の Fe 粒子線によって「気泡核」ができる。分子動力学計算によって数十 nm と推測されている。<sup>2)</sup>粒子線強度が大きくなると気泡核が集まってより大きくなる。超音波（診断装置の周波数は 3.5MHz、共振周波数は約 400 $\mu$ m）によって信号として観察できる（粒子強度 $>10^7$ ppp、気泡サイズは  $\mu$ m $\sim$ 数十 $\mu$ m）。ただし、超音波によって圧壊される。さらに粒子強度を大きくすることで（粒子強度 $>10^8$ ppp）、気泡のサイズが超音波で圧壊されるようなサイズよりもさらに大きくなるのではないかと思っていたようになった。

## 3. 今年度の研究内容

今年度は生物照射室にて、ビーム条件は昨年までと同様に 500MeV/n の Fe イオン粒子を水に照射して実験を行った。ターゲットである水の溶存ガス濃度を調整して、超音波を照射することでビデオカメラに映る大きな気泡が発生する条件を探したが、生物照射室ではビーム径を 20mm までしか絞れないためか、大きな気泡は発生しなかった。一方で、ビーム径 20mm だと「輝点」がまばらで数えやすい。そこで「輝点」の数と Fe イオン粒子のフラックスとの関係について考察した。

## 4. 今年度の研究成果と解析結果

ここでは、超音波エコー装置が発生する超音波パルスの負圧部分に Fe 粒子が停止する個数を推計してそれが実際に映像に映っている輝点の数と比較する。実験に使用した超音波エコー装置の

プローブは、長手方向の幅が7cm、厚みが1cmある。検討の対象としている映像はブラッグピークの位置でビームスポットの断面を観測するようにプローブを配置したときの映像である(図1)。

表1には、超音波パルスの負圧部分のある瞬間の、ビーム上流から見た超音波パルスの負圧部分の断面積を計算するためのパラメータを示す。

表1. 超音波装置のパラメータ

パラメータ	値	単位
超音波プローブの幅	0.07	m
チャンネル数	128	ch
信号の水平方向の幅 (負圧部分の水平方向の長さ)	0.546875	mm
水中音速	1500	m/s
プローブ周波数	3.50E+06	1/s
水中での波長	4.29E-04	m
負圧の大きいところの 深さ方向の長さ	0.143	mm

これらのパラメータから、ある瞬間の、ビーム上流から見た超音波パルスの負圧部分の断面積は $7.81 \times 10^{-8} \text{m}^2$ と求められる。この値をSとする。

面積Sの負圧部分は水中の音速で伝播する。その動いている負圧部分にFe粒子が当たる頻度を求めて超音波エコーの1コマで見える輝点の数を見積もる。ビームスポット径内に固定した、①と同じ形状・面積の枠(0.547mm×0.143mm)を考える。ここで、ビームの条件を表2に示す。

表2. 比較のためのビーム条件の例

パラメータ	値	単位
スポット面積	0.000314159	m <sup>2</sup>
フルーエンス	1.00E+08	ppp
ビーム持続時間	0.7	s
ビームフラックス	4.55E+11	m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>

まずは、その枠内にFe粒子が当たる単位時間当たりの個数を調べる。Sの面積にあたるFe粒子の頻度に等しいので、表2の例では $3.55 \times 10^4 [1/s]$ となる。次に、その枠内を負圧部分が上から下へとスライドするイメージで、枠内に負圧部分が少しでも存在する時間を求める。つまり、枠に負圧部分がかかり初めて、完全に一致するようになり、枠から負圧部分が通り過ぎていくまでの時間である。その時間 $\Delta t$ は0.19 $\mu\text{s}$ となる。

ただし、その時間の間、枠内に負圧部分が100%存在しているわけではない。枠内に負圧部分が現

れ始めて、100%になって消えるまでの負圧部分の時間平均的な面積を考えると、 $\Delta t$ の間の負圧になっている部分の面積は枠の面積の1/2になる。

これらの値から計算すると、Sにフラックスを乗じて、さらに $\Delta t$ および1/2を乗じると、0.547mm×0.143mmの「枠」に入って負圧部分に止まるFe粒子の個数は $3.38 \times 10^3$ 個となる。これを直径20mmのスポット径の面積に相当する個数にすると、1フレームで13.6個となる。図1に示す実際の実験結果では3~10個の「輝点」が現れている。

これまで複数のFe粒子の軌跡が重なった時に超音波エコー映像に「輝点」として映し出されるものは見えると考えていたが、上のような解析で一つだけのFe粒子が負圧領域と重なることで「輝点」が観測できることが予想される。



図1. HIMACで照射したFeビームの超音波エコー画像(1フレームを切り出した)の例。表2の条件と同じ。輝点は9個見えている。

## 5. まとめ

超音波装置によるパルスの負圧部分にFe粒子のブラッグピークが重なる頻度を計算する解析モデルで計算を行った。すると、1個のFe粒子が負圧部分と重なる頻度と実験結果のエコー画像の輝点の数が概ね一致した。今後さらに解析のモデルや条件を詳細化するとともに、比較するための照射ビーム条件を細かく変えて実験を行う予定である。

## 参考文献

- 1) M. Kobayashi et al., Japanese Journal of Applied Physics 64(3) 03SP26-03SP26 (2025).
- 2) K. Moribayashi, H. Matsubara, Y. Yonetani, and N. Shikazono, AIP Conf. Proc. 2756, 030001 (2023).

- 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

(原著論文等)

- ・ Masanori Kobayashi, Osamu Okudaira, Naoya Shikazono, Kazuhiro Terasawa, Satoshi Kodaira, Nagaya Okada, Visualization of heavy ion particle Bragg peaks in water by ultrasound imaging, Japanese Journal of Applied Physics 64(3) 03SP26-03SP26 2025年3月1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」第85回応用物理学会秋季学術講演会、2024年9月16日(月)～20日(金)、朱鷺メッセほか2会場(新潟市) & オンライン、講演番号 20a-D62-2.
- ・ 小林正規、奥平修、鹿園直哉、寺沢和洋、小平聡、岡田長也、「重イオン放射線および超音波による溶存ガスの気泡化の研究」ソノケミストリー討論会、2024年度第33回ソノケミストリー討論会プログラム、2024年10月18日(金)～19日(土)、善光寺本坊大勸進紫雲閣および信州大学長野(工学)キャンパス(長野市)講演番号 P20.
- ・ 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45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)、明治大学駿河台キャンパス・アカデミーコモン(東京都)講演番号 3P4-10.

(その他)

なし

(学位論文)

なし

炭素線照射した脂質中に生成するフリーラジカルの検出とその反応解析  
Detection of lipid free radicals induced by carbon-ion beam irradiation to oil/lipid  
(22H426)

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

Abstract

Lipid free radicals ( $\bullet$ L) induced by irradiating X-ray or carbon-ion beam in corn oil were quantitatively measured using an electron paramagnetic resonance (EPR) spin-trapping method, and the local concentration of the  $\bullet$ L was estimated. In this study, LET dependence of local concentration of  $\bullet$ L was estimated.

A series of corn oil solutions containing several different concentrations (0.79–338 mM) of PBN, which is a lipophilic spin-trapping agent, was prepared. The corn oil samples were irradiated with 128 Gy X-ray or several different LETs (13, 20, 40, 60, 80, >100 keV/ $\mu$ m) of carbon-ion beam. The  $\bullet$ L adducts of PBN (PBN-L) generated in the corn oil samples were quantitatively measured by X-band EPR. The yields of PBN-L were plotted versus the linear-density (the reciprocal of intermolecular distance) of PBN in the corn oil samples. The local concentration of the  $\bullet$ L generated in corn oil was estimated from the plot profile.

The local concentration of lipid free radical generated in corn oil by ionizing radiation was estimated as more than 338 mM. No LET dependence on the local concentration of  $\bullet$ L was observed, although the LET dependence on the yields of PBN-L was observed.

## 1. 研究の目的とバックグラウンド

これまでの HIMAC 共同利用研究課題 B483、H347、H427、J429、H451 および H426 で得られた結果から、放射線による水中でのヒドロキシラジカル ( $\bullet$ OH) の生成は局在しており、mmol/L レベルの比較的疎な生成と、mol/L レベルの極めて密な生成が在ることが明らかになった。また炭素線では LET が増大すると、疎な $\bullet$ OH 生成が減り、密な $\bullet$ OH 生成が増加することが分かった。極めて密な $\bullet$ OH 生成の場合には、 $\bullet$ OH 同士の反応により酸素非依存的に過酸化水素 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) が生成し、その局所濃度は密な $\bullet$ OH の局所

生成濃度に準じた高い濃度であることが分かってきた。また炭素線では LET が増大すると酸素非依存的な  $\text{H}_2\text{O}_2$  生成が増加することも分かった。

放射線が水中に生じる活性種の様子が明らかになってきたが、一方、脂質中でのフリーラジカル生成の様子はほとんどわかっていない。細胞の内部は複雑に入り組んだ脂質膜構造が存在し、狭い空間に水相と油相がそれぞれ存在する。脂質分子も水分子と同様に、放射線により電離あるいは励起され、脂質分子上に直接フリーラジカルが生じることが予想できる。そこで H426 では、放射線により生じる脂質フリーラジカル ( $\bullet$ L) の検出と反応解析を試みた。

## 2. 昨年度までに得られている結果

2021 年度に、EPR スピンプローブ法による $\bullet$ L 生成の検出法開発を行った。PROXYL 系の安定ニトロキシラジカルである 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、脂質中 (コーン油中) に生じた $\bullet$ L 量の評価を試みた。その結果、 $\bullet$ L 生成量は X 線よりも LET の低い炭素線で多く、また炭素線では LET の増加とともに $\bullet$ 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実験毎の測定値のバラつきが大きく、 $\bullet$ L 生成量の定量は困難であった。

そこで 2022 年度は、EPR スピントラップ法による $\bullet$ L 生成の検出を試みた。 $\alpha$ -phenyl-*N*-*t*-butylnitron (PBN) をスピントラップ剤として X 線および炭素線がコーン油中に生成する $\bullet$ L の生成量を測定し比較した。スピントラッピング法による測定でも、 $\bullet$ L 生成量は X 線よりも LET の低い炭素線で多く、また炭素線の LET の増加とともに少なくなる傾向が見られスピントラップ法の

結果と一致した。またスピントラッピング法の場合は、照射した試料を低温暗所で保存することによりスピンアダクトがある程度安定に存在することが分かり、放射線照射で脂質中に生じる・L量の定量が可能であった。また放射線がコーン油中に生成する・L量に対する溶存酸素の影響はほぼ見られず、酸素とは無関係に・Lが生じることが分かった。

2023年度は、X線および炭素線がコーン油中に生成する・Lの局所生成濃度について評価を試み、X線および13、80 keV/μmの炭素線についてデータを得た。その結果、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

2023年度の実験の再現性を得るとともに、更にいくつかの異なるLETにおけるデータを追加して、・Lの局所生成濃度のLET依存性について調べた。PBNをスピントラッピング剤として用い、段階的に濃度の異なる(7.69, 13.3, 25.9, 61.5, 106, 208, 338 mM) PBNのコーン油溶液を用意し、それぞれにX線またはLETの異なる(13, 20, 40, 60, 80, >100 keV/μm)炭素線を128 Gy照射した。照射したPBNコーン油溶液をX-band EPRで測定し、試料溶液中に生じた・LのPBNアダクト(PBN-L)量を定量した。試料溶液中に生じたPBN-L量をPBNの一次元密度(PBNの分子間距離の逆数あるいは濃度の3乗根に相当する値)に対してプロットし、プロットの形状に基づいて・Lの局所濃度を予想した。各LETでのプロットの形状を比較して、・Lの生成局所濃度に対して炭素線のLETによる違いがあるか否かを考察した。

### 4. 今年度の研究成果と解析結果

13, 20, 40, 60, 80, >100 keV/μmの炭素線について、各3回以上の測定実験が実施できた。X線の場合も炭素線の場合もコーン油中におけるPBN-Lの生成量はPBNの一次元密度(濃度)が大きくなるに従い最大一次元密度588 μm<sup>-1</sup>(338 mM)まで滑らかに増加し、途中に変曲点等は見られなかった

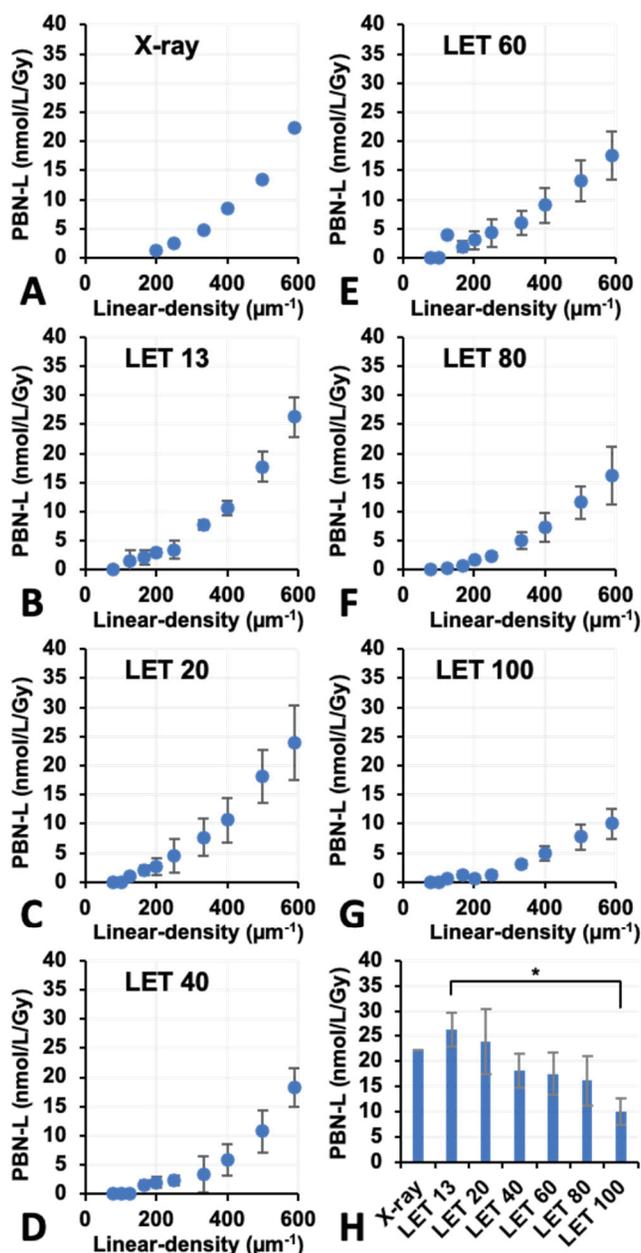


図1. ・Lの局所生成濃度の評価と生成量に対するLETの影響。(A) X線による・Lの生成。(B-G) 炭素線による・Lの生成。(H) 338 mM PBNコーン油溶液中でのPBN-Lの生成量。

(図1. A-G)。また338 mM PBNコーン油溶液中でのPBN-Lの生成量は、X線よりも13 keV/μmの炭素線で多く、炭素線ではLETの増加と共に減少した(図1. H)。<sup>・</sup>Lの生成局所濃度に対するLETの影響は見られなかったが、<sup>・</sup>L生成量は線質およびLETに依存して変化した。放射線による<sup>・</sup>Lの局所生成濃度は338 mM以上で、生体膜中でも同様の密な<sup>・</sup>L生成が生じると予想される。

- a. 放医研規制科学障害分子機構
- b. 量子生命研量子生命スピン量子レドックス

2024年度 HIMAC 共同利用 成果一覧  
(22H426)

(原著論文等)

1. **Ueno M.**, Setoguchi S., Matsunaga K., Matsumoto K., Takata J., Anzai K.: Effects of whole-body carbon-ion beam irradiation on bone marrow death in mice and an examination of candidates for protectors or mitigators against carbon-ion beam-induced bone marrow death. *Radiat Res*, *in press*.

(学会及び研究会口頭発表等)

1. 松本謙一郎, 上野恵美, 荘司好美, 伊藤紘, 中西郁夫: 放射線が水中に生じる高濃度過酸化水素クラスターの検出とその反応性の評価, 第27回ESRフォーラム研究会, 奈良, 2024.07.

粒子線照射による新規超伝導体における臨界電流増強と超伝導対称性の同定  
Enhancement of Critical Current and Identification of Symmetry of Superconductivity  
in New Superconductors by means of Particle Irradiations  
(24H262)

為ヶ井強<sup>a</sup>、久我英理<sup>a</sup>、李文杰<sup>a</sup>、任統<sup>a</sup>、陈杨菘<sup>a</sup>、于澄<sup>a</sup>、坂上良介<sup>a</sup>

T. Tamegai<sup>a</sup>, H. Kuga<sup>a</sup>, W. J. Li<sup>a</sup>, T. Ren<sup>a</sup>, Y. Chen<sup>a</sup>, C. Yu<sup>a</sup>, R. Sakagami<sup>a</sup>

## Abstract

Conflicting results on the effect of particle irradiation on the superconducting transition temperature ( $T_c$ ) of kagome superconductor  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  have been reported by 2.5 eV electron and 3 MeV proton irradiations. In order to shed light on this issue, we have reexamined the effect of 3 MeV proton irradiation on  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  by irradiating it at room temperature in contrast to the irradiation at  $\sim 100$  K in the previous experiments.  $T_c$  in  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  was suppressed by proton irradiation at room temperature, while it was suppressed by irradiation at  $\sim 100$  K. Possible origin of such behavior is discussed.

## 1. Introduction

The kagome lattice, composed of corner-sharing triangles and hexagons, provides a versatile platform for investigating fascinating quantum phenomena. New kagome compounds  $\text{AV}_3\text{Sb}_5$  ( $A = \text{K}, \text{Rb}, \text{and Cs}$ ), which possess nontrivial band topology such as flat bands, Dirac points, and saddle points, were discovered to exhibit novel properties including chiral charge-density wave (CDW), anomalous Hall effect, and unconventional superconductivity (SC) [1]. Such coexistence and competition between superconductivity (SC) and CDW has been observed in various kinds of superconductors such as  $\text{NbSe}_2$  [2] and  $\text{Lu}_5\text{Ir}_4\text{Si}_{10}$  [3]. It has been well established that introduction of disorder suppresses CDW order, while it enhances SC. It is because non-magnetic disorder in CDW system works similar to magnetic scattering in SCs that destabilize the formation of spin-singlet Cooper pairs. Actually, it has been reported that V-site disorder by Nb substitution can enhance  $T_c$  from  $\sim 2.5$  K up to  $\sim 4.5$  K with CDW is suppressed from  $\sim 92$  K to 58 K [4]. However, conflicting results on the effect of disorder induced by particle irradiations have been reported for  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  (CVS). While  $T_c$  is reported to be enhanced by 3 MeV proton [5] and 2.6 GeV U [6] irradiations,

it is reported to be suppressed by 2.5 MeV proton irradiation [7].

In this study, we reexamined the effect of 3 MeV proton irradiation on the superconductivity including  $T_c$  in CVS using two kinds of crystals with different initial disorder levels.

## 2. Experiments

CVS single crystals were grown by self-flux method as described in ref. [4]. Two kinds of crystals grown in quartz tube (old-type) and in Ta tube (new-type) have been used. All crystals were cleaved into thin flakes with thicknesses less than  $15 \mu\text{m}$  before the irradiation. This value is smaller than the projected range of 3 MeV proton in CVS of  $\sim 57 \mu\text{m}$ . Proton irradiation experiments were conducted at NIRS-HIMAC in Chiba, Japan. The crystals were irradiated at room temperature in vacuum better than  $1 \times 10^{-5}$  Torr, while the crystals in the previous proton irradiation were irradiated at 100 K [5]. The irradiation dose of the proton was evaluated by controlling the irradiation time with the assumption that the average beam intensity does not fluctuate in time. The standard four-probe method was applied for the measurement of resistivity. Measurements of magnetization were carried out with a SQUID magnetometer (MPMS-XL5, Quantum Design).

## 3. Results and discussion

Figure 1 shows the normalized resistivity ( $\rho(T)/\rho(300\text{K})$ ) versus temperature for the new- and old-types of CVS. The residual resistivity ratios (RRR) for the new-type CVS is 103, which is similar to the value reported in ref. [4], while it is 20.3 for the old-type CVS consistent with our previous study [5]. In addition, a clear CDW transition is observed at  $\sim 94$  K in the new-type CVS, while it is about 87 K and the transition is smeared in the old-type CVS. The characteristics of CDW in the old-type CVS is reproducing our previous results in ref. [5], indicating that the old-type CVS has a higher

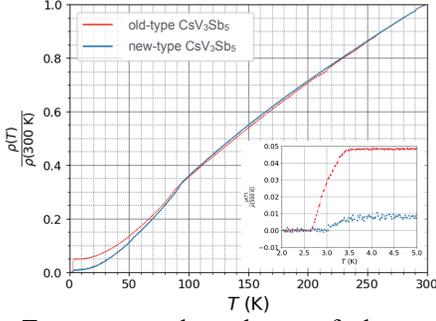


FIG. 1: Temperature dependence of the normalized resistivity ( $\rho(T)/\rho(300\text{K})$ ) for the new- and old-types of  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$ .

level of disorder in the pristine state.

Figure 2(a) shows the evolution of temperature dependence of the normalized magnetization with the 3 MeV proton dose in the new-type of CVS. As the proton dose increases, the onset temperature of diamagnetism becomes lower and the transition becomes sharper.  $T_c$  defined by the criterion of  $-M(T)/M(2\text{K}) = 0.05$  is plotted in Fig. 2 (b). It is clear that  $T_c$  is monotonically suppressed by increasing the proton dose up to  $4 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ . Essentially the same behavior has been observed also in the old-type of CVS with the initial  $T_c$  slightly lower than the new-type of CVS as shown in the same figure. We can interpret that the old-type of CVS has already been disordered in the pristine state. The CDW transition temperature in the new-type of CVS is suppressed by  $\sim 3\text{K}$  (data not shown) by irradiating 3 MeV proton up to  $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$

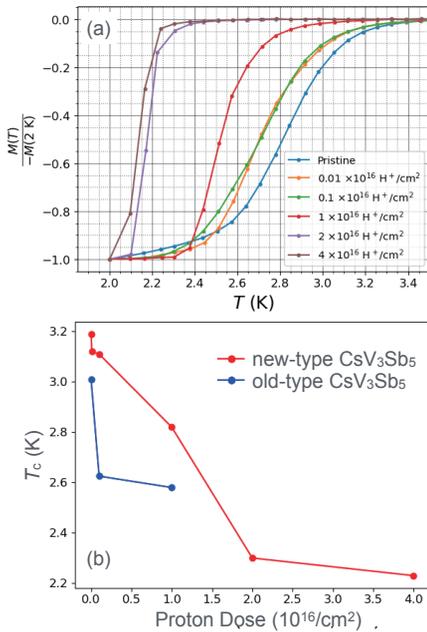


FIG. 2: (a) Temperature dependence of normalized magnetization in the new-type  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$ . (b)  $T_c$  as a function of 3 MeV proton dose for the new- and old types of  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$ .

consistent with our previous report [5].

The behavior that  $T_c$  in CVS with competing CDW is suppressed by introducing disorder is exceptional. However, it should be noted that  $T_c$  in superconductors with artificial defects introduced by particle irradiation can be affected by the change in the lattice parameter [8]. In  $\text{NbSe}_2$  with columnar defects introduced by 2.6 GeV irradiation, clear expansion of the lattice has been observed along all directions. Careful analyses considering the pressure dependence of  $T_c$  and compressibility along two directions clarified that  $T_c$  change induced by the lattice expansion cannot be ignored. Figure 3 shows the change in the  $c$ -axis lattice parameter for CVS as a function of proton dose. It is clear that the change in the lattice parameter is very small, and significant contribution to  $T_c$  change is not expected. An important difference between the two proton irradiation experiments is the temperature where the irradiation was performed, 100 K in the previous experiments, while at room temperature in the present experiments. So, we can speculate that different defect structures introduced by irradiations at different temperatures have caused different disorder dependences of  $T_c$  in CVS.

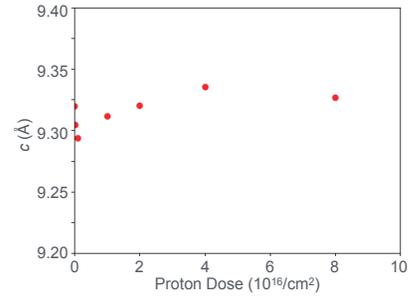


FIG. 3:  $c$ -axis lattice parameter as a function of 3 MeV proton dose for the new-type  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$ .

## References

- [1] B. R. Ortiz *et al.*, Phys. Rev. Mater. **3**, 094407 (2019).
- [2] M. Naito and S. Tanaka, J. Phys. Soc. Jpn. **51**, 219 (1982).
- [3] R. N. Shelton *et al.*, Phys. Rev. B **34**, 4590 (1986).
- [4] Y. K. Li *et al.*, Phys. Rev. B **105**, L180507 (2022).
- [5] C. L. Wang *et al.*, Phys. Rev. B **109**, 024514 (2024).
- [6] C. L. Wang *et al.*, Phys. Rev. B **110**, 054520 (2024).
- [7] M. Roppongi *et al.*, Nat. Commun. **14**, 667 (2023).
- [8] W. J. Li *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 074709 (2022).

<sup>a</sup> 東京大学工学系研究科物理工学専攻

## 成果一覧

(原著論文等)

- Tong Ren, Suneng Pyon, and Tsuyoshi Tamegai, “Meissner Hole in Pristine and Proton-Irradiated ( $\text{Ba}_{1-x}\text{Rb}_x$ ) $\text{Fe}_2\text{As}_2$ ”, *Phys. Rev. B* **109**, 224504 (2024).
- Tong Ren, Yue Sun, Francesco Laviano, Ryosuke Sakagami, Zhi Xiang Shi, and Tsuyoshi Tamegai, “Vortex Penetration along Twin Boundaries in Pristine and Proton-irradiated FeSe”, *Phys. Rev. Mater.* **8**, 084806 (2024).

(Proceedings 等)

なし

(学会及び研究会口頭発表等)

- Yangsong Chen, Chunlei Wang, Ryosuke Sakagami, Satoru Okayasu, and Tsuyoshi Tamegai, “Evolution of peak effects in irradiated ( $\text{Ca,Lu}$ ) $\text{KFe}_4\text{As}_4$ ”, 日本物理学会第 79 回年次大会、北海道大学、2024.9.16.
- 為ヶ井強, 李文杰, 板橋諄典, 坂上良介, “秩序  $\text{Fe}_2\text{P}$  型構造を持つ( $\text{Sc}_{1-x}\text{Lu}_x$ ) $\text{FeTe}_2$  の作製と超伝導特性”, 日本物理学会第 79 回年次大会、北海道大学、2024.9.18.

(その他)

なし

(学位論文)

- 任 統, ” Study of Vortex Dynamics in Iron-based Superconductors by Magneto-optical Imaging ”, 博士論文、東京大学工学系研究科 (2025).
- 久我英理, ” カゴメ超伝導体  $\text{CsV}_3\text{Sb}_5$  における高エネルギー粒子線照射効果”, 卒業論文、東京大学工学部 (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 (22H409)

牧野 高紘<sup>a</sup>、原田 信介<sup>b</sup>、大島 武<sup>a</sup>、米内 俊祐<sup>a</sup>  
T. Makino<sup>a</sup>, S. Harada<sup>b</sup>, T. Ohshima<sup>a</sup>, and S. Yonai<sup>a</sup>

## Abstract

Risetime resolution of a measurement system for single event transient pulses on SiC power MOSFETs was improved to 15GHz. The system demonstrated sufficient time resolution, as the measured pulse duration was 10-20 ns.

## 1. 研究背景と目的

炭化ケイ素 (SiC) をはじめとした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次世代の宇宙や原子力・加速器施設用の耐環境・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、SiC 半導体デバイスの放射線照射効果の解明と耐放射線強化技術に関する研究・開発を推進している。特に単一イオンの入射が半導体デバイスを破壊に導く現象 (シングルイベント現象) について研究を進めており、なかでも MOS (Metal Oxide Semiconductor: 金属-酸化膜-半導体) 構造を有するデバイスにおける単一イオン誘起破壊現象に注目している。

我々は、近年開発著しい SiC パワーMOS トランジスタにおける単一イオン誘起破壊現象に注目し、その物理過程解明研究を進めてきた。その結果、単一イオン誘起破壊現象には MOSFET の構造に大きく依存し、従来のプレーナー型ゲートと比較して、トレンチ型ゲート構造を持つ MOSFET の方が、高い使用電圧においてもイオン誘起破壊耐性を示唆する結果を得た。本年度は、電荷の生成から輸送までの素過程を直接測定するための、測定技術開発・条件出しを行ってきた。昨年度はアナログ周波数 10GHz の測定系での測定を試み、過渡応答は 10ns 程度の時間で収束することを見出した。今年度は、測定系の周波数帯域を 15GHz に向上させた上で、同様の測定を行った。

## 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トレンチ型ゲート IE-UMOSFET (Implantation Epitaxial UMOSFET) 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 23GHz 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、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、従来の測定結果と同様であった。測定系のアナログ周波数を向上させたにもかかわらず、昨年度と同等の時間幅を持つ波形を観測した。加えて、15GHz (立ち上がり時間約 66 ps) は、測定現象の 1/10 以下の時間であり、本研究で構築した測定系の性能は、本実験に十分な性能であると言える。

取得した波形は、波高の差はあれほとんどが相似計であり、電荷の増幅はイオンが電荷を生成してからごく早い時間、つまり立ち上がり成分中に起こっていると考えられる。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。

<sup>a</sup> 量子科学技術研究開発機構

<sup>b</sup> 産業技術総合研究所

# 放射線による劣化現象 TID を考慮した宇宙機向け耐ソフトエラー回路の開発 Development of Soft Error Tolerant Circuits for Spacecraft Considering Total Ionizing Dose (24H492)

小林和淑<sup>a</sup>、古田潤<sup>b</sup>、中島隆一<sup>a</sup>、小澤太希<sup>a</sup>、杉崎春斗<sup>a</sup>、吉田圭汰<sup>a</sup>、中本耀<sup>a</sup>  
K. Kobayashi<sup>a</sup>, J. Furuta<sup>b</sup>, R. Nakajima<sup>a</sup>, T. Ozawa<sup>a</sup>, H. Sugisaki<sup>a</sup>, K. Yoshida<sup>a</sup> and H.  
Nakamoto<sup>a</sup>

## Abstract

We carried out an evaluation of the impact of Total Ionizing Dose (TID) degradation on soft error tolerance to develop radiation-hardened circuits for space applications. Radiation-hardened circuits fabricated using a 65 nm FD-SOI process were subjected to gamma-ray and heavy ion (Xe) irradiation. Gamma-ray irradiation at QST Takasaki was used to generate samples with different TID levels, and degradation was assessed using frequency shifts of ring oscillators. At HIMAC, irradiation under maximum Linear Energy Transfer (LET) conditions was conducted based on PHITS simulations. However, an unexpected acrylic cap caused a shift in the LET peak position, preventing planned sample evaluation. This finding will improve our future experiment setup and contribute to the design of circuits that consider combined TID and soft error effects.

## 1. Research Objective and Background

In the space environment, not only soft errors by radiation but also Total Ionizing Dose (TID) effects are significant issues. Soft errors are temporal faults such as bit flips in memory cells, while TID causes degradation of semiconductor characteristics, leading to permanent faults and reduced device lifetime. To ensure high reliability in integrated circuits for spacecraft, it is essential to clarify the impact of TID on soft errors and to implement countermeasures. This study aims to develop radiation-hardened circuits for space application by taking TID effects into account.

## 2. Research Activities in This Year

We used radiation-hardened circuits designed with the well-established 65 nm FD-SOI (Fully-Depleted Silicon on Insulator) process and conducted both gamma-ray and heavy ion irradiation experiments. Gamma-ray irradiation was performed at QST Takasaki to prepare samples with different TID degradations. Heavy ion irradiation was carried out at HIMAC, with the objective of evaluating the difference of soft error rates among these samples. This evaluation is intended to clarify the combined effects of TID and soft errors and contribute to establishing design guidelines for radiation-hardened circuits.

## 3. Experimental Overview at HIMAC

The overview of the heavy ion irradiation experiment conducted at HIMAC this year is as follows:

- Ion species : Xe

- Energy : 290 MeV/u
- Target : Semiconductor chip assumed for spacecraft use
- Beam time : 7 hours and 30 minutes

## 4. Results and Analysis

In the gamma-ray irradiation test, we used ring oscillators (ROs) to quantitatively assess the degree of TID degradation. Since the oscillation frequency of the RO changes with semiconductor degradation, it becomes a sensitive indicator of TID effects. Table 1 shows the degradation rates (frequency shifts) of the ROs.

**Table 1 : Measurement results of TID degradation under gamma-ray irradiation**

Dose [krad(Si)]	RO degradation rate [%]
0	100.0
237	98.2
259	98.0
554	96.7
712	95.4
791	95.1
1121	93.3

From these results, we successfully prepared seven samples with different levels of TID degradation.

At HIMAC, to evaluate the impact of TID degradation on soft error tolerance, we needed to conduct measurements under conditions where the Linear Energy Transfer (LET) was at its maximum. Therefore, we adjusted the thickness of the binary filter and the position of the test device to achieve the maximum LET for Xe. The filter thickness was determined based on simulation results from PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)<sup>[1]</sup>. However, there is a discrepancy between the simulated and measured LET peak positions, delaying the setup of optimal conditions during the experiment. As a result, we were unable to perform soft error evaluations with multiple samples as originally planned. After the experiment, we identified the cause of this discrepancy as an approximately 1 mm thick acrylic cap installed to protect the Al-Mylar film at the entrance of the ion chamber. This cap was not considered in the simulation. Since 1 mm of acrylic corresponds to about 1.2 mm of water-equivalent thickness, it was consistent with the observed deviation (approximately 1.26 mm water equivalent).

## 5. Supplementary Information

We also conducted a similar heavy ion irradiation experiment at Gunma University Heavy Ion Medical Center (GHMC). Although the test device differed from that in this study, it was also a semiconductor chip. At GHMC, we used 290 MeV/u carbon ions (C) and adjusted the binary filter thickness and test device position base on PHITS<sup>[1]</sup>. As a result, the optimal LET condition was determined within approximately 1 hour and 30 minutes from the start of irradiation. Since the LET range for C is narrower than for Xe, we believe that if the acrylic cap had been considered in the HIMAC Xe experiment, the optimal conditions could have been determined in a similarly short time. A similar LET adjustment experiment is planned for the next fiscal year (FY2025) under a different project, we expect that the experience gained this year will enable more efficient setup.

## 6. 参考文献

[1] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe *et al.*, "Recent improvements of the particle and heavy ion transport code system – phits version 3.33," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 61, no. 1, pp. 127–135, 2024.

- 
- a. 京都工芸繊維大学 工芸科学研究科
  - b. 岡山県立大学 情報工学部

# シリコンカーバイド検出器の重イオンビームに対する応答 Response of a silicon carbide detector to heavy-ion irradiation (23H487)

北村徳隆<sup>a</sup>、岸下徹一<sup>b</sup>、道正新一郎<sup>c</sup>、今井伸明<sup>a</sup>、  
花井周太郎<sup>a</sup>、小嶋玲子<sup>a</sup>、土屋諒<sup>d</sup>

N. Kitamura<sup>a</sup>, T. Kishishita<sup>b</sup>, S. Michimasa<sup>c</sup>, N. Imai<sup>a</sup>,  
S. Hanai<sup>a</sup>, R. Kojima<sup>a</sup>, R. Tsuchiya<sup>d</sup>

Charged-particle sensors based on silicon carbide are candidates for next-generation radiation-hard detectors in nuclear physics experiments. The primary objective of the present study is to evaluate the feasibility of employing silicon carbide sensors at radioactive beam facilities, specifically for the detection of ion beam particles. Following an initial irradiation experiment using an <sup>40</sup>Ar beam at 6 MeV/nucleon conducted in 2023, a new measurement was carried out this year using a <sup>132</sup>Xe beam at energies exceeding 100 MeV/nucleon. Signals originating from the passage of ions through the detector were successfully observed. The performance of the detector, including its timing properties, was characterized. The results of the present experiment highlight the potential of silicon carbide sensors as time-of-flight detectors for radioactive ion beams.

## 1 研究の目的と背景

原子核に発現する量子多体効果を微視的な視点から統一的に理解するためには、放射性崩壊に対して不安定な短寿命核の性質を系統的に調べ上げることが必須である。このような研究を可能にする実験施設として、理化学研究所 RIBF をはじめとした不安定核ビーム供給施設が稼働中である。特に RIBF はインフライト型の不安定核ビーム施設であり、多種の不安定核を相対論的エネルギーをもった高速ビームとして同時に生成可能であ

るという強みがある。しかしながら、生成された不安定核を物理測定に供するためには個々のビーム粒子の核種同定が不可欠であり、実験技術面における要求が高い。通常、核種同定には不安定核ビーム粒子の質量電荷比の情報が必要であり、そのためには粒子の飛行時間を 100 ps 程度の高い時間分解能で決定することが要求される。

より高度な不安定核実験を実現すべく、不安定核ビームの強度は増大の一途をたどっており、その中で放射線耐性に優れた飛行時間検出器の需要が高まっている。我々は多結晶ダイヤモンドを用いた荷電粒子検出器 [1] を RIBF での大強度不安定核ビームを用いた実験にて運用してきたが、検出器の作製コストをはじめとした困難が依然として存在する。そこで我々は、ダイヤモンドと同じく、ワイドギャップ半導体に分類され、高い放射線耐性をもつシリコンカーバイドに着目した。シリコンカーバイド半導体は過酷な環境下にて使用可能な荷電粒子検出器としての応用 [2, 3] が期待されており、国外の動向を見ても検出器開発の勢いが増している。我々の究極のゴールは、RIBF における物理実験にシリコンカーバイド半導体を用いた飛行時間検出器を投入することであり、この目標に向けた基礎的研究を 2023 年より開始した。その第一歩として、安定核ビームを検出器素子に照射し基礎特性を評価することにした。その結果をもとに、不安定核実験施設での応用のためのさらなる開発に着手するという研究計画を立てた。

<sup>a</sup> 東京大学

<sup>b</sup> 高エネルギー加速器研究機構

<sup>c</sup> 理化学研究所

<sup>d</sup> 立教大学

## 2 前年度までに得られている結果のまとめ

初年度の 23H487 実験では、安定核ビームをシリコンカーバイド検出器に照射し、その応答を観測することを第一のテスト項目として掲げた。試験に使用した検出器素子 [2] は、陽子やミュオンの検出を主眼において開発されたものであり、重イオンに対する応答は本研究実施以前は未知の状況であった。RIBF における不安定核ビームのエネルギーは 200 MeV/nucleon 程度であり、飛行時間検出器へのエネルギー付与は典型的に 100 MeV のオーダーである。同等のエネルギー付与を再現するために、中エネ照射室で利用可能な 6 MeV/nucleon の  $^{40}\text{Ar}$  ビームを選定した。重イオンビームをシリコンカーバイド検出器に照射し、その応答波形をオシロスコープ等を用いて直接記録した。その結果、今回試験した検出器素子は、電流パルスの立ち上がりが 1 ns 以下と非常に高速な応答を示すことが分かり、さらに電荷収集効率とエネルギー分解能にも優れていることが確認できた。以上の結果をまとめた論文を用意し、投稿の準備を整えた。

## 3 今年度の研究内容

今年度のビームタイムは 2025 年 2 月に実施した。昨年度に確立した測定系とデータ解析スキームを活用しつつ、不安定核物理実験におけるシリコンカーバイド検出器の使用条件を可能な限り模擬すべく、今年度は生物照射室で利用可能なシンクロトロン加速による高エネルギー重イオンビームを用いた照射試験に移行した。測定には加速エネルギー 290 MeV/nucleon の  $^{132}\text{Xe}$  ビームを使用した。シリコンカーバイド検出器と高精度の検出時刻リファレンスを提供するプラスチックシンチレータ検出器のスタックにビームを照射し、時間分解能評価を可能とした。生物照射室では被照射体に至るまでビームは大気中を飛行するため、検出器入射直前でのエネルギーは 150 MeV/nucleon

程度と見積もられた。供試検出器として、昨年度に使用したシリコンカーバイド検出器素子に加え、二倍の有感面積をもつ素子も試験した。また本実験では、ビームプロファイルの確認を目的として、セットアップ上流に位置感応型のガス検出器を配置した。これら検出器は大阪大学グループによる他の物理系実験課題 24H445 においても必要なものであったことから、実験セットアップと準備作業を二つの実験の間で共通化し、生産性を最大化するための工夫を加えた。

## 4 研究成果と解析結果

今年度の実験により、100 MeV/nucleon を超える高エネルギー重イオンビームに対しても検出器が期待通り、かつ安定に動作することが確かめられた。検出器からの過渡応答波形を観測し、有感面積の異なる二つのシリコンカーバイド検出器の双方とも電流パルスの立ち上がりが 1 ns 以下の高速応答を示すことを確認した。加えて、電荷収集効率の検出器バイアス電圧依存性も測定することができ、検出器内部での空乏層発達の様子などデバイスの詳細な理解に資するデータを取得した。時間分解能評価のためのデータ解析も最終段階にあり、その結果は、不安定核物理実験における飛行時間検出器としての要求である 100 ps (FWHM) を十分に満たすものであった。昨年度の研究内容も含め、本課題はシリコンカーバイド検出器の不安定核実験施設での応用に向けた欠かすことのできないステップであった。今年度に得られた成果は、別途投稿論文として公表することを予定している。

- [1] S. Michimasa *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B **317**, 710 (2013).
- [2] T. Kishishita *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **68**, 2787 (2021).
- [3] T. Kishishita *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **70**, 1210 (2023).

高感度飛跡検出器に相応しい新しい検出閾値概念とエッチングモデルの確立  
Toward a new concept for detection threshold and etching-models suited to track detectors  
with high registration sensitivity  
(23H138)

山内 知也<sup>a</sup>、小日向 大輔<sup>a</sup>、貞光 俊斗<sup>a</sup>、山田 怜央<sup>a</sup>、勢一 隼人<sup>a</sup>、木本 敦<sup>a</sup>

金崎 真聡<sup>a</sup>、楠本 多聞<sup>b</sup>、北村 尚<sup>b</sup>、小平 聡<sup>b</sup>、バリオン レミ<sup>c</sup>

T. Yamauchi<sup>a</sup>, H. Kohinata<sup>a</sup>, S. Sadamitsu<sup>a</sup>, R. Yamada<sup>a</sup>, H. Seiichi<sup>a</sup>, A. Kimoto<sup>a</sup>,  
M. Kanasaki<sup>a</sup>, T. Kusumoto<sup>b</sup>, H. Kitamura<sup>a</sup>, S. Kodaira<sup>b</sup>, and R. Barillon<sup>c</sup>

### 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

既にその発見から半世紀が経過しようとしているが、ポリアリルジグリコールカーボネート (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。半世紀にわたって最高感度を維持する PADC を凌駕する新しい検出器を開発するためには、PADC 中イオントラックに沿った損傷構造の一体何が優れたエッチング特性を生み出しているのかを理解する必要がある。イオン種やエネルギーという意味での広い範囲の検出感度と損傷構造についてのデータを蓄積してきたが、近年、エッチピットがぎりぎり生まれるための条件を知るために、検出閾値周辺の分析を行っている。そしてその検出閾値を評価する中で、従来の検出閾値概念では理解でき

ない現象に出会った。垂直入射の場合を考えると、飛跡に沿ったトラックエッチング速度  $V_t$  が、バルクエッチング速度  $V_b$  より大きくなるとエッチピットが生れる。古典的な考え方を極限にまで推し進め、エッチピットが生まれるイオン軌跡上の点を閾値と定義した。入射したイオンが減速するとともに高分子内に残す損傷のレベルが徐々に上がり、閾値に相当する点以降には  $V_t > V_b$  という関係が現れると考えたからである。ところが PADC についてはこの変化が必ずしも連続的ではなく、 $V_t > V_b$  という条件がイオンの飛跡に沿って断続的に現れていると考えられる結果を得た。新しい閾値概念を確立する必要がある。一方で、潜在飛跡構造に関係するヒドロキシル基生成密度やエーテル基損傷密度は、イオンの減速、すなわち阻止能の増加とともに連続的に変化している。しかし、潜在飛跡の構造は  $2\ \mu\text{m}$  や  $15\ \mu\text{m}$  といった厚さを持った PADC 薄膜の深さ方向の平均値として求められているので、その厚さ以下の不連続な変化は評価不能である。検出閾値近傍におけるエッチングテストに  $\mu\text{m}$  以下の分解能が求められるようになった。

本研究においては、PADC の検出閾値周辺における詳細なエッチング特性と潜在飛跡構造評価に基づいて、エッチピットの生成機構の根本的な見直しを試みている。エッチングテストには長時間のエッチング (数十  $\mu\text{m}$  深さ) 後の電子顕微鏡観察 SEM を導入している。エッチピット成長モデルについても「ホイヘンスの原理」に忠実に従った波動方程式の数値計算に基づくモデルを構築している。

## 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始める。しかし、PADC では数十  $\mu\text{m}$  のエッチング後にも光学顕微鏡下で直径が  $1\ \mu\text{m}$  程度しかなく、明確な像を結ばない構造が見つかった(”Dwarf etch-pit”と名付けた)。垂直入射では  $V_t > V_b$  の場合、すなわち、 $V = V_t/V_b > 1$  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る。

## 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 シートに Xe イオン (6 MeV/u) を照射した。同試料はガンマ線照射が PADC のバルクエッチング速度に及ぼす効果を評価するために利用している。
- 2) 中エネルギー照射室において、大気中で PADC 薄膜 (15  $\mu\text{m}$  厚) にプロトン (6 MeV) 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評価して、両者の相関を見ることができた。
- 3) 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検討している。

## 4. 今年度の研究成果と解析結果

重イオンとは対照的にガンマ線はバルク全体に様にエネルギーを付与する。ヒドロキシル基生成には大気から供給される酸素が大きく作用するため、PADC 表面と深部では照射効果が大きく異なる。図 1 は Xe イオンを照射した後にガンマ線照射した PADC のエッチング後の様子を示している。バルクエッチング速度の顕著な増加は表面近傍に限られるので、エッチピットの断面にはワインボトルのような構造が現れる。ヒドロキシル基の生成も表面近傍で著しいことを確認している。

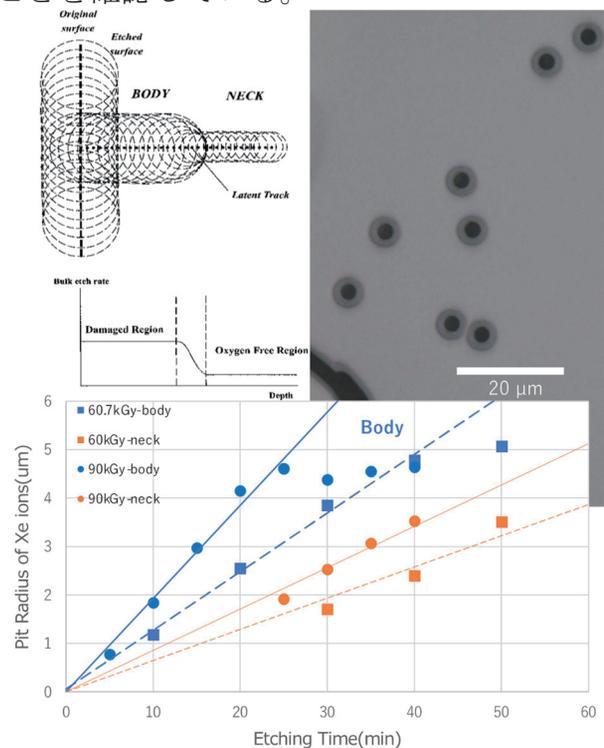


図 1 ボトル型エッチピットの模式図と Body と Neck が二重に見える上面図写真とそれらの成長挙動。

- a. 神戸大
- b. QST
- c. ストラスブール大

## 研究成果一覧

(原著論文等)

- Masato Kanasaki, Kouta Mune, Taiyo Itoh, Ken Yasuda, Bunta Ishihara, Tamon Kusumoto, Satoshi Kodaira, Rémi Barillon, Tomoya Yamauchi, Sensitization effect of carbon dioxide treatment on CR-39 track detectors for protons and heavy ions, *Nuclear Instruments and Methods B*, 554, 165409. (2024).

(Proceedings 等)

(学会及び研究会口頭発表等)

- 木本 敦、金崎 真聡、山内 知也：PADC 飛跡検出器に及ぼす 172 nm 紫外線照射効果、第 72 回応用物理学会春季学術講演会、東京理科大学野田キャンパス、2025 年 3 月 16 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 37 回固体飛跡検出器研究会、神戸大学、2025 年 3 月 26 日。
- 木本 敦、金崎 真聡、山内 知也：PADC 検出器の紫外線及びプロトン等の照射効果、第 37 回固体飛跡検出器研究会、神戸大学、2025 年 3 月 26 日。
- 能澤 毅成、木本 敦、金崎 真聡、山内 知也：PADC 飛跡検出器の応答特性における紫外線照射効果、第 37 回固体飛跡検出器研究会、神戸大学、2025 年 3 月 26 日。
- 山田 怜央、木本 敦、勢一 隼人、小日向 大輔、貞光 俊斗、金崎 真聡、山内 知也、楠本 多聞、小平 聡、藤乗 幸子：Xe イオン照射 PADC 検出器のバルクエッチング特性に及ぼすガンマ線照射効果、第 37 回固体飛跡検出器研究会、神戸大学、2025 年 3 月 26 日。
- 山田 怜央、木本 敦、勢一 隼人、小日向 大輔、貞光 俊斗、金崎 真聡、山内 知也、宮脇 信正：30MeV 及び 65MeV 陽子線照射による PADC 中ヒドロキシル基生成挙動、第 37 回固体飛跡検出器研究会、神戸大学、2025 年 3 月 26 日。
- 勢一 隼人、金崎 真聡、山内 知也：波動方程式を用いた固体飛跡検出器中エッチピット成長挙動を表すシミュレーションの開発、第 37 回固体飛跡検出器研究会、神戸大学、2025 年 3 月 26 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：極低温照射後のアニーリング過程における PADC 中ヒドロキシル基の生成、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、2024 年 9 月 16 日。
- 木本 敦、勢一 隼人、山田 怜央、小日向 大輔、貞光 俊斗、楠本 多聞、金崎 真聡、小平 聡、石川 一平、山内 知也：PADC 検出器の紫外線及びプロトン等の照射効果、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、2024 年 9 月 16 日。
- 勢一 隼人、金崎 真聡、山内 知也：波動方程式を用いた固体飛跡検出器中エッチピット成長挙動についての新しいシミュレーション、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、2024 年 9 月 16 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：極低温照射後のアニーリング過程における PADC 中ヒドロキシル基の生成、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、2024 年 9 月 16 日。
- 小日向 大輔、貞光 俊斗、木本 敦、勢一 隼人、山田 怜央、楠本 多聞、金崎 真聡、小平 聡、藤乗 幸子、菅田 義英、山内 知也：ガンマ線照射による PADC の構造変化、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、2024 年 9 月 16 日。

(その他)

(学位論文)

- 貞光 俊斗：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、修士論文、神戸大学大学院海事科学研究科 (2024)。
- 小日向 大輔：ガンマ線照射による PADC 検出器の特性変化、修士論文、神戸大学大学院海事科学研究科 (2024)。

超微粒子原子核乾板によるナノスケール高電荷分離放射線飛跡検出器の展開  
Study for the super-fine grained nuclear emulsion as nano-scale tracking detector with  
high-charge discrimination  
(24H212)

中 竜大<sup>a</sup>, 浅田貴志<sup>a</sup>, 石原大樹<sup>a</sup>, 染谷一輝<sup>a</sup>, 陳夏姫<sup>b</sup>, 井戸悠生<sup>b</sup>, 小平 聡<sup>c</sup>

Tatsuhiko Naka<sup>a</sup>, Takashi Asada<sup>a</sup>, Daiki Ishihara<sup>a</sup>, Kazuki Someya<sup>a</sup>, Chin Natsuki<sup>b</sup>, Yuki Ido<sup>b</sup>, Satoshi,  
Kodaira<sup>c</sup>

Toho University<sup>a</sup>, Nagoya University<sup>b</sup> and QST<sup>c</sup>

## 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. In this project, we are working to upgrade the technologies associated with the NIT device, including improvements to the detector itself and to the optical microscope-based readout systems. For calibration and performance evaluation, heavy ion beams from HIMAC are employed. During this fiscal year, we focused on developing new chemical treatment methods and sensitization processes to enhance sensitivity and improve optical imaging performance by achieving higher contrast. In particular, we investigated physical development techniques and sensitization using triethanolamine. Utilizing the heavy ion beam from HIMAC, we confirmed a significant improvement in both the optical contrast of particle tracks and the overall sensitivity of the detector to heavy ions.

## 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、反粒子の量子干渉イメージングなど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おり、本研究では、HIMACの重イオンビームを用いたそれらの特性理解を深めることを目的としている。

## 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。これは、数10nmのAgBr(I)結晶内部における電子-正孔の再結合効果等による電離電子の失活が影響していると期待されるが、一方で、この影響は阻止能よりも粒子速度に強く依存していることが示唆されており、放射線物性における新たな知見が得られ初めており、継続した研究を実施している。また、NIT中での放射線飛跡を構成する銀粒子は、ナノスケールの構造を持つことから、光学顕微鏡下において局在表面プラズモン共鳴(LSPR)の効果が観測される。このLSPRの効果を用いた電荷識別能の向上や超解像イメージング法の研究を進めてきており、新たなイメージング法とNITのさらなるダイナミックレンジの向上に向けた研究を行ってきた。

## 3. 今年度の研究内容

現在、国際共同プロジェクトとしてさまざまなテーマでの研究が進められているが、2024年度からイタリアのグループと共同で陽子線がん治療における粒子線核破砕反応による2次被ば

く効果のモデル検証に向けた精密飛跡解析プロジェクト研究を進めている。この中で、現在の NIT デバイスの化学処理法において、上記の LSPR の効果を効率よく発現するには十分な最適化がなされておらず、特に、エネルギー阻止能の低い陽子線等においては光学顕微鏡下での輝度の低下が問題となっていた。今年度、新たに現像法を研究することで、光学輝度の向

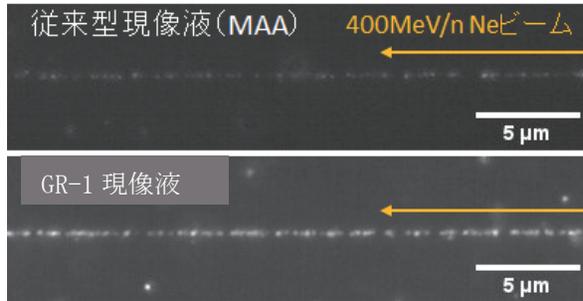


図 1: Ne (400 MeV/n) の NIT での飛跡。上図：従来現像液、左図：本研究での GR-1 現像液

上を図り、より効率的な LSPR 効果の発現をさせるための研究を進めた。さらに、NIT の感度を増加させる、いわゆる”増感”手法についても、新たにトリエタノールアミン(TEA)を使った感度効果を検証し、上記の陽子線反応研究への展開を図った。また、これらの研究と合わせて、宇宙素粒子物理学的研究のためのノイズ削減法の研究、超解像イメージング法の研究などについても HIMAC イオンビームを用いた検出デバイス較正として利用することで、その基礎特性の評価などを進めた。

#### 4. 今年度の研究成果と解析結果

NIT に記録された飛跡の顕微鏡下でのより高い光学輝度を実現する現像法として、今回、溶解物理現像液（通称、GR-1）を研究した。GR-1 は、通常の研究レベルでの溶解物理現像法にはない、商業レベルの安定性を目指したもので、Fuji Film の技術者らによって処方改良されたものをベースとした。まず、Ne 400MeV/n の飛跡を用いた光学輝度増強効果を検証した。その結果を図 1 に示した。上図が従来の現像法による結果であり、下が本研究で用いた現像法による結果である。これにより明確に光学輝度の増強が確認することができ、また、デバイス内の一様性についても概ね問題ないレベルであることが確認でき、NIT を用いたさまざまな実験プロジェクトにおける標準現像液として機能し得る結果が得られた。また、より精密に GR-1 の感度特性を C 290MeV/n を用いて評価したものを図 2 に示した。従来の現像法に対して、結晶

感度が 2 倍程度向上していることが明らかになり、飛跡検出器としての性能（エネルギー分解能、検出閾値、検出効率等）が飛躍的に向上することが期待される。

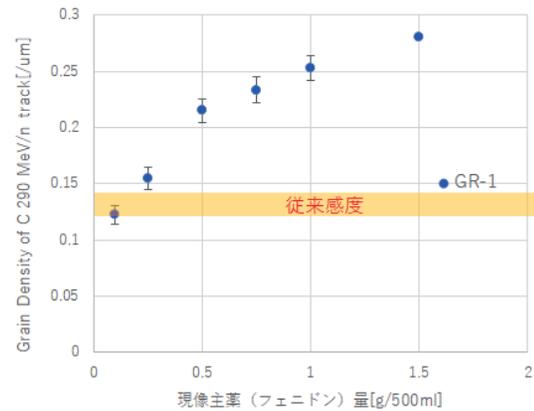


図 2: C 290MeV/n における GR-1 現像に対する銀粒子密度の現像主薬依存性

また、新たな増感法の研究も進め、TEA 増感による性能評価も進めた。これについては、C 290MeV/n の飛跡を用いて行い、TEA の添加量にも依存するが、結果として約 1.5 倍の感度増強を確認した。図 3 は、TEA 濃度 2.5% における飛跡像の従来型増感との光学顕微鏡比較像を示した。これらの処理法は、いずれもこれまでの標準的 NIT デバイスの特性を向上させるとともに、LSPR 効果を増強させるものであることから、今後、NIT を用いた実験における標準化を進めていく。

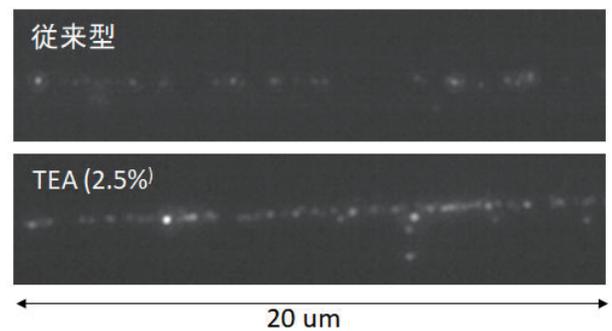


図 3: C 290MeV/n の飛跡における従来型(上図)および TEA を用いた増感 (下図) の光学顕微鏡画像

- a. 東邦大学
- b. 名古屋大学
- c. QST・放医研

# 研究成果一覧

## 1) 原著論文

Kana SAEKI, Ken'ichi KUGE, Tatsuhiro NAKA, Takuya SHIRAIISHI, Satoshi KODAIRA, "Assessment of the Sensitivity to Charged Particles of Nuclear Emulsions Featuring Fine Microcrystals", Bulletin of the Society of Photography and Imaging of Japan, Vol.34, No.2:16 (2024)

## 2) Proceedings

なし

## 3) 口頭発表

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における低ノイズ化に関する研究」学術変革領域「地下稀事象」第1回若手研研究会、2025年3月6日、富山大

石原大樹、中竜大、陳夏姫、染谷一輝「減力処理法を用いた超微粒子原子核乾板の低ノイズ化に関する研究」画像関連学会連合会秋季大会、2024年11月22日、京都工芸繊維大

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 Reversal 現像液での検出応答の特性評価」画像関連学会連合会秋季大会、2024年11月22日、京都工芸繊維大学

石原大樹、中竜大、浅田貴志、白石卓也、星野靖、陳夏姫「暗黒物質直接探索に向けた超微粒子原子核乾板の低バックグラウンド化のための新たな作成手法の開発」、日本物理学会第79回年次大会、2024年9月16-19日、北海道大学

井戸悠生、中竜大、二村翔大、高松海斗、織瞳磨、加藤丈典、伊神洋平、廣瀬重信、村瀬孔大、白石卓也、星野靖、伊藤好孝、風間慎吾、「鉍物飛跡検出器を用いた未知宇宙線事象探索のための飛跡形状ならびに飛跡形成閾値に関する研究」、日本物理学会第79回年次大会、2024年9月16-19日、北海道大学

陳夏姫、中竜大、「自然放射線の影響を低減した 極低内部放射能原子核乾板の開発」、コニカミノルタ科学 技術振興財団研究奨励金受賞講演、2024年度日本写真学会年次大会、2024年5月17日

染谷一輝、中竜大、浅田貴志、石原大樹、陳夏姫「超微粒子原子核乾板における放射線飛跡の光学輝度上昇に向けた現像液の検討と評価」、2024年度日本写真学会年次大会、2024年5月17日

## 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）

陳夏姫、「人工高分子を用いた極低放射能原子核乾板の開発」、修士論文、名古屋大学大学院理学研究科（2025年3月）

エネルギー分解能を持つ白雲母固体飛跡検出器の開発  
Development of Mica Solid State Track Detector with Energy Resolution  
(23H473)

廣瀬重信<sup>a</sup>、中竜大<sup>b</sup>、井戸悠生<sup>c</sup>、鈴木勝彦<sup>a</sup>  
S. Hirose<sup>a</sup>, T. Naka<sup>b</sup>, Y. Ido<sup>c</sup>, and K. Suzuki<sup>a</sup>

Abstract

Mica, a mineral, is recognized as a natural solid-state track detector. This research employs heavy ion beams for sample preparation, crucial for extracting recoil energy from tracks recorded in mica detectors. By penetrating the sample with heavy ions, penetration marks serve as reference points for accurately determining the observation field. This process is vital for precisely reading out the recoil energy, represented by etching pit depths, from the tracks in mica. Consequently, mica crystals can function as particle detectors with energy resolution.

1. 研究の目的とバックグラウンド

鉱物の白雲母 ( $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{H}_2$ ) は、天然の固体飛跡検出器として知られる。たとえば、鉱物学では、不純物として含まれるウラン 238 の自然核分裂により生ずるエネルギー MeV/u 程度の分裂片が作る約  $20\mu\text{m}$  のフィッシュントラックを観察し、その数密度から年代推定を行う手法が確立されている。また、ウラン 238 の  $\alpha$  崩壊や高速中性子による原子核反跳により、エネルギー (keV/u 程度) に応じて長さ  $O(10)\sim O(100)\text{nm}$  のトラックが形成されることも知られている。これらのトラックは地球年齢以上に保持されるため、白雲母を「非常に稀にしか起こらないニュートリノやダークマターによる原子核反跳 (エネルギー keV/u 程度)」の検出器として用いる試みがなされている (e.g. Snowden-Ifft et al. 1995, PRL 74, 4133)。

ただし、これらの「潜在トラック」はそのままでは顕微鏡で観察できないため、(1) 白雲母結晶を劈開し、(2) 劈開面をフッ酸でエッチングする前処理を行う。これにより、劈開面近傍のトラックは大きさ数  $\mu\text{m}$  程度の「ピット」として露出し、その深さ (数 nm 程度) がトラックを生じた原子核の反跳エネルギーを反映する。すなわち、ピット深さを原子間力顕微鏡 (AFM)

等で精度良く読み取ることにより、白雲母はエネルギー分解能を有する素粒子検出器として機能する。この反跳エネルギーは、記録されたトラックが背景事象かシグナルかを判別するための重要情報となる。

ところが、このピット深さ読み取りには次のような実際上の問題点が存在する。それは、トラックが劈開面を通過していた場合にそのトラックに対応するピットが劈開面両側に現れることである。この場合、反跳エネルギーを反映しているのは対となるピットの深さの「和」であるため、そのピット対を同定できるように、劈開面両側の対応する領域 (劈開前に互いに接していた領域) を観察しなければならない。このとき、例えば AFM の場合、観察視野は数十  $\mu\text{m}$  角程度であるため、劈開面両側の対応する観察視野の決定精度は誤差数  $\mu\text{m}$  以下が求められる。そのような精度の高い視野決定を実現するには、サンプルの劈開面両側に存在する「十分小さな共通の目印」を基準にした座標設定が必要となる。

先行研究 (Snowden-Ifft et al. 1995) では、目印として自然核分裂に伴うフィッシュントラックが用いられた。フィッシュントラックは光学顕微鏡で明瞭に認識できるが、この方法は、サンプル内部で確率的に生ずるフィッシュントラックが劈開面近傍に存在するという偶然性に依存する。そのため、都合の良いサンプル選択が必要であるほか、ウラン濃度の低いサンプルには適用できないという問題点もある。

そこで本研究では、サンプルを選ばず常に視野決定が行えるよう、白雲母サンプルに座標設定のための目印を重粒子線によってつけることを目的とする。本研究は、サンプルに重粒子線によって小さな目印をつけるという単純な実験であるが、上述の通り、白雲母を「エネルギー分解能を持つ素粒子検出器」として機能させるためにクリ

ティカルな工程である。

## 2. 昨年度まで得られている結果

白雲母のサンプルに、座標設定の目印となる貫通痕をつけるためには、

- (A) 照射したイオンがサンプルの厚みの少なくとも半分は貫通する（劈開面に貫通痕が現れる）
- (B) 貫通痕がエッチング後に光学顕微鏡で観察可能になる（阻止能が十分大きい）

という二つの要件を満たす必要がある。

これらの要件を、生物照射室の Xe 290MeV/u を用いて達成するための BF 値のサーベイを行った。その結果、BF 値が 6.40mm (2%) から 9.23mm (84%) の間であれば要件が満たされることがわかった（カッコ内はトラックの生成効率）。ただし、BF 値が 9.23mm の場合は目視でも確認できるダメージが見られたため、BF 値としては 8.68mm (68%) が最適値といえる。

## 3. 今年度の研究内容

昨年度はビーム条件を検討する目的でサンプル全面に照射したが、今年度は実際に目印づけを行うためサンプルの一部領域に限定して照射を実施することにした。

これに伴い、サンプル保護用ステンレス板治具を開発し、板厚は Xe 290MeV/u のステンレス中での飛程（約 4mm）より厚い 5mm とした。また、サンプル 1 枚につき、ビーム通過用のための、直径 2mm の穴を 4 つ設けた。

### 【前期実験条件】

- ・ BF 値：8.68mm
- ・ 照射角度：45 度、67.5 度、90 度
- ・ 照射量：3e2、1e3、3e3、1e4 cm<sup>-2</sup>
- ・ 穴の位置：サンプル中心から 7.5mm

### 【後期実験条件】

- ・ BF 値：8.68mm
- ・ 照射角度：67.5 度、90 度
- ・ 照射量：3e3、1e4 cm<sup>-2</sup>
- ・ 穴の位置：サンプル中心から 5mm

## 4. 今年度の研究成果と解析結果

### 【実験結果】

前期実験において、照射角度が 45 度または照射量が 1e3 cm<sup>-2</sup>以下の場合、ステンレス保護治具に設けた直径 2mm の貫通穴をイオンが十分に通過できず、サンプル上に照射痕が現れなかった。一方、それ以外の条件では照射痕が確認されたが、貫通穴がサンプル端部（切り出し時に生じた微細な不均一性の影響を受けやすい位置）に近かったため、光学顕微鏡での観察時に照射痕識別が困難になるケースがあった。

これを受け、後期実験では貫通穴の位置をサンプル中部に近づけた新たな保護治具を使用するとともに、照射条件を照射角度 67.5 度以上、照射量 3e3 cm<sup>-2</sup>以上に設定することで、照射痕が確実かつ明瞭にサンプル上に現れる条件を採用した。

### 【解析結果】

イオン照射を行った白雲母サンプルを劈開して両面を得た上で、49%フッ酸によりエッチング処理（25℃、1 時間）を施し、各劈開面を光学顕微鏡で観察した。

その結果、劈開両面において光学顕微鏡で明瞭に認識可能な貫通痕が現れた。さらに、今年度照射野を限定したことで両面の照射痕パターンを照合することで、その結果、単一のイオンによる貫通痕が各面で同定できることが確認された。

### 【研究まとめと今後の展望】

単一イオンによる貫通痕が劈開両面で同定できたことにより、重粒子線を用いて白雲母サンプルの劈開面両側に目印を付けるという本研究課題の目的が達成された。今後は、今回得られたサンプルで実際に重粒子線目印を用いて視野決定を行うとともに、劈開面を通過する自然由来トラックのピット同定および深さ測定を実施する。

また、サンプル保護用ステンレス治具を通過した重粒子線がサンプルに与えたダメージの程度については、Geant4 シミュレーションにより評価する予定である。

- 
- a. 国立研究開発法人海洋研究開発機構
  - b. 東邦大学理学部
  - c. 名古屋大学大学院環境学研究科

## 研究成果一覧

(原著論文等) なし

(Proceedings 等) なし

(学会及び研究会口頭発表等)

- Shigenobu Hirose, Natsue Abe, Qing Chang, Takeshi Hanyu, Noriko Hasebe, Yasushi Hoshino, Takashi Kamiyama, Yoji Kawamura, Kohta Murase, Tatsuhiro Naka, Kenji Oguni, Katsuhiko Suzuki, Seiko Yamasaki, DMICA: exploring Dark Matter in natural muscovite MICA, Kashiwa-no-ha Dark Matter and Cosmology Symposium, 2024 年 10 月 31 日
- Shigenobu Hirose, Natsue Abe, Qing Chang, Takeshi Hanyu, Noriko Hasebe, Yasushi Hoshino, Takashi Kamiyama, Yoji Kawamura, Kohta Murase, Tatsuhiro Naka, Kenji Oguni, Katsuhiko Suzuki, Seiko Yamasaki, DMICA: exploring Dark Matter in natural muscovite MICA, 15th International Workshop on the Identification of Dark Matter, 2024 年 7 月 11 日
- 中竜大, 井戸悠生, 二村翔大, 高松海斗, 織瞳磨, 加藤丈典, 廣瀬重信, 村瀬孔大, 白石卓也, 星野靖, 伊藤好孝, 風間慎吾, 伊神洋平: 鉍物飛跡検出器を用いた地球年代スケールの重い暗黒物質の探索と宇宙線研究、日本物理学会第 79 回年次大会、札幌、2024.9.
- 二村翔大, 中竜大, 井戸悠生, 高松海斗, 織瞳磨, 加藤丈典, 伊神洋平, 廣瀬重信, 村瀬孔大, 白石卓也, 星野靖, 伊藤好孝, 風間慎吾: 鉍物飛跡検出器を用いた Q-ball 探索における光学読み取りシステムの開発、日本物理学会第 79 回年次大会、札幌、2024.9.
- 井戸悠生, 中竜大, 二村翔大, 高松海斗, 織瞳磨, 加藤丈典, 伊神洋平, 廣瀬重信, 村瀬孔大, 白石卓也, 星野靖, 伊藤好孝, 風間慎吾: 鉍物飛跡検出器を用いた未知宇宙線事象探索のための飛跡形状ならびに飛跡形成閾値に関する研究、日本物理学会第 79 回年次大会、札幌、2024.9.

(その他) なし

(学位論文)

- 井戸悠生、修士 (理学)、Direct search for ultra-heavy dark matter using muscovite、名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻 (2024)

化合物半導体への重イオンの影響に関する研究  
Study of single event effects on compound semiconductor devices  
(24H095)

岩田 愛実<sup>a</sup>、高橋 美沙<sup>a</sup>、鈴木 隆博<sup>a</sup>、新藤 浩之<sup>a</sup>、岩田 佳之<sup>b</sup>、村上 健<sup>b</sup>  
M. Iwata<sup>a</sup>, M. takahashi<sup>a</sup>, T. Suzuki<sup>a</sup>, H. Shindou<sup>a</sup>, Y. Iwata<sup>b</sup>, and T. Murakami<sup>b</sup>

Abstract

We carried out irradiation experiments for lateral GaN FETs with Xe ions in horizontal condition to investigate the parameters that contribute to the improvement of the breakdown voltage. The results show a correlation between the breakdown voltage and  $I_{DMAX}$  at the previous fluence condition; however, this correlation disappeared when the fluence was increased. Based on these results, we conclude that the fluence needs to be increased in order to properly evaluate the resistance of the device. On the other hand, the  $I_{DMAX}$  might have a correlation with the number of defects in the device. The capability of this device for actual use in the space environment must be evaluated taking into account the probability of occurrence of a destructive event.

1. 研究の目的とバックグラウンド

宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA）では、自動車や鉄道車両に匹敵する大電力化が進んでいる、人工衛星や大型宇宙機（月 Gateway 等）、電動航空機、探査ローバ等の電力制御に対応した耐放射線性パワーデバイス半導体技術の実現を目的として研究を実施している。過去には宇宙用電源向けの部品として DC/DC コンバータ等に用いられるシリコン製パワー MOSFET 等の国内開発を継続的に実施してきたが、前述の大電力化に対応できる技術として、産業用途で実用化が進む SiC（炭化ケイ素）や GaN（窒化ガリウム）等の化合物半導体技術が宇宙でも必要とされている。化合物半導体はシリコンに比べ電気的性能を大きく改善しながら小型化も実現可能という利点がある一方、SiC、GaN とともに、パワーデバイスの重要な電気的性能指標の一つである最大定格電圧よりもかなり低い電圧条件で放射線による破壊現象が観測されており、安全マージンを大きく確保した限られた電圧範囲でしか使用できないという課題がある。JAXA では、化合物半導体パワーデバイスの性能を最大限まで引き出すことができるよう、放射線破壊耐性を最大定格電圧近くまで引き上げる技術の獲得を目標としている。

JAXA で研究対象としている化合物半導体パワーデバイスは主に SiC および GaN であるが、長飛程を持つ高エネルギーな重イオンの照射が可能な HIMAC での照射機会は限られることから、近年ではこのような条件での評価がより必要とされる GaN デバイスを HIMAC での主な評価対象としてきた。SiC デバイスは電流経路が素子の縦方向となる縦型構造が一般的であり、放射線耐性評価におけるイオン入射方向の最悪条件は、デバイス表面に対し垂直となる方向（垂直照射）であることが多い。典型的

な感応領域はデバイス表面から数十  $\mu\text{m}$  程度であり、比較的低エネルギーの重イオンでも評価が可能である。一方、GaN デバイスは電流経路が素子表面部分に位置する横型構造が採用されることが多く、放射線耐性評価におけるイオン入射方向の最悪条件は、典型的にはデバイス表面に対し水平となる方向（水平照射）である。通常、デバイスの周辺には耐圧を確保するための外周構造が採用されるため、水平照射において感応領域まで重イオンを到達させるには、長飛程を持つ高エネルギーな重イオンが必要となることから、HIMAC での評価が欠かせない。

2. 昨年度までに得られている結果

横型 GaN FET に対する Xe イオン照射による評価を実施し、当該デバイスにおけるイオン入射方向の最悪条件は水平照射、かつデバイスの電極配線に対して直交する方向（すなわち、デバイスの電流経路と平行な方向）であることを確認した。この評価で破壊したサンプルの断面観察を実施し、破壊箇所が電流経路層（以下、2DEG 層）であることを特定した。また、ゲート電圧が 0 V のときにオフ状態となるノーマリオフのデバイスと、ゲート電圧が 0 V のときにオン状態となるノーマリオンのデバイスとを評価し、ノーマリオフデバイスの破壊耐圧がより高くなる結果を得た。

上記結果、およびノーマリオフデバイスの方がノーマリオンデバイスより 2DEG 層のキャリア濃度が低いことから、2DEG 層のキャリア濃度を低減させることで破壊耐性が向上すると推定し、試作した実サンプルの評価結果からこの推定が正しいことを確認した。ただし、耐性向上は 8.3% に留まり、宇宙用部品としての実用化に向けては更なる改善が必要と考える。

3. 今年度の研究内容

昨年度までの評価結果から、ノーマリオフの横型 GaN FET に関して更なる耐性向上を検討することとした。具体的には、同一プロセスで製作されたものの、ドレイン電流の最大定格電流（以下、 $I_{DMAX}$ ）に関してばらつきを持つサンプルに対して同一条件での Xe イオン照射を実施し、結果の差分から  $I_{DMAX}$  が耐性向上に繋がるパラメータとなるかを評価することとした。照射に使用した核種を表 1 に示す。

表 1 使用核種

核種	エネルギー [MeV]	LET@チップ表面 [MeV/(mg/cm <sup>2</sup> ) (GaN)]	飛程 [ $\mu\text{m}$ (GaN)]
Xe	15396	12.6	1260

イオンの入射方向はこれまでの評価で確認した最悪条件である水平照射で、かつデバイスの電極配線に対して直交する方向とした。デバイスはゲート電圧 0 V のオフ状態とし、とあるドレイン電圧を印加した状態で照射を実施し、破壊が見られなければ印加するドレイン電圧を上昇させて照射を継続した。各電圧条件でのイオンのフラックスは約  $1.0 \times 10^4$  ions/cm<sup>2</sup>/s、フルエンスは  $1.0 \times 10^6$  ions/cm<sup>2</sup> とした。

#### 4. 今年度の研究成果と解析結果

3 項に記載した評価条件により評価した 4 サンプル (DUT 1~4) について、各電圧条件での照射終了時点におけるドレインリーク電流推移を図 1 に示す。I<sub>DMAX</sub> の大きさは DUT 1 < DUT 2 < DUT 3 < DUT 4 であり、リーク電流が急増している電圧を破壊耐圧とすると、I<sub>DMAX</sub> のばらつきと概ね相関した破壊耐圧が確認できた。特に、破壊耐圧が高いサンプルでは、デバイス設計耐圧の 1200V に対し 80 % 以上の破壊耐圧が得られた。

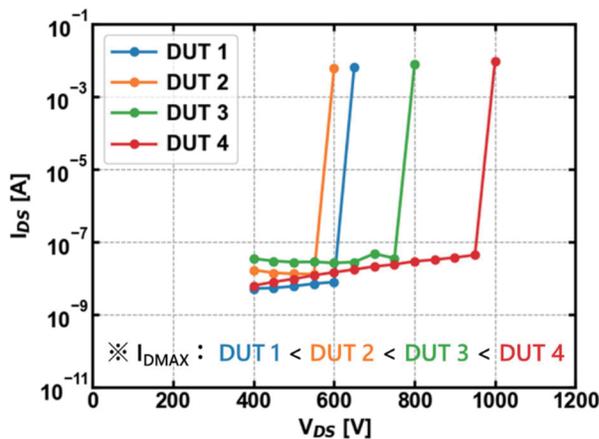


図 1 Xe 照射によるドレインリーク電流推移

一方、この評価では 4 サンプル中 DUT 1 と DUT 3 の 2 サンプルで、照射規定フルエンスである  $1.0 \times 10^6$  ions/cm<sup>2</sup> まで照射しきる直前に破壊が発生したことから、各電圧条件での照射フルエンスが不足している可能性が想定された。照射フルエンスを  $2.0 \times 10^6$  ions/cm<sup>2</sup> および  $3.0 \times 10^6$  ions/cm<sup>2</sup> に増加させた照射を、I<sub>DMAX</sub> のばらつきを持つ各 4 サンプルまたは 5 サンプルに対して実施したところ、I<sub>DMAX</sub> のばらつきによる破壊耐圧の差が見られなくなった。図 2 に、破壊時の電圧とその電圧条件における破壊時照射量の関係を示す。今回の結果では、フルエンスを  $3.0 \times 10^6$  ions/cm<sup>2</sup> とした場合であっても、 $2.0 \times 10^6$  ions/cm<sup>2</sup> までに破壊することを確認した。また、当該デバイスに対する全電圧条件を通じた累積照射量と破壊耐圧の関係を図 3 に示す。破壊耐圧が同程度のサンプルにおいて、累積照射量は最小値と最大値で約 5.6 倍もの差があることから、当該デバイスにおける破壊現象は累積的な照射効果にはよらず、単一イオンによる効果 (シングルイベント) によるものと考えられる。

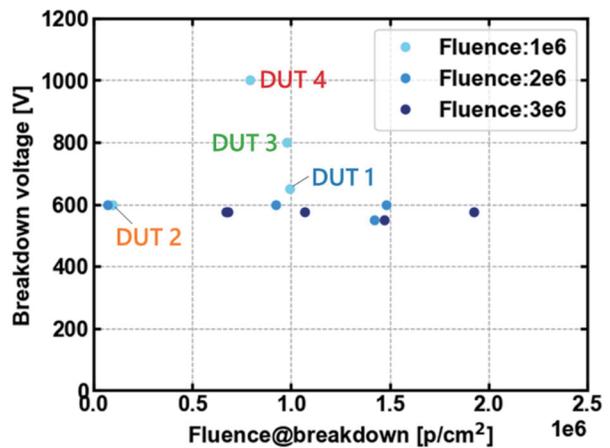


図 2 各電圧条件における照射量と破壊耐圧

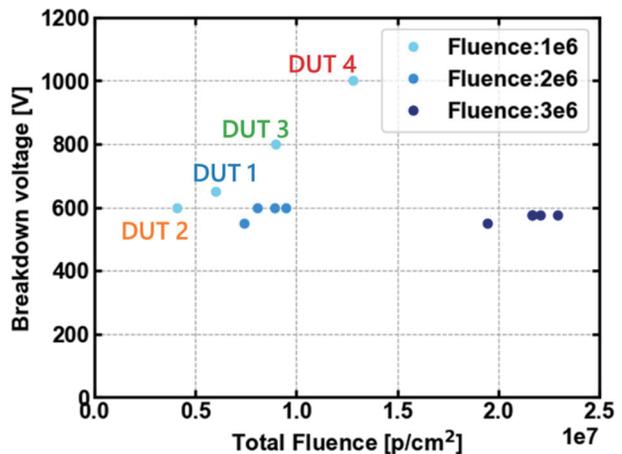


図 3 当該デバイスへの累積照射量と破壊耐圧

以上より、当該デバイスに対して水平照射を実施する場合の必要フルエンスは  $2.0 \times 10^6$  ions/cm<sup>2</sup> であると結論付けた。また、今回照射した全サンプルで表面に破壊痕が観察された。うち、5 サンプルではデバイス端部に破壊痕が見られたことから、電界集中する端部の方がより放射線に対する感度が高いと推測される。

今回の結果は破壊耐性を向上できるパラメータの抽出には直接的にはつながらなかったが、一方で照射フルエンス  $1.0 \times 10^6$  ions/cm<sup>2</sup> までの評価結果では I<sub>DMAX</sub> のばらつきによる破壊耐圧の差が見られたことから、今回着目した I<sub>DMAX</sub> はデバイス中の欠陥量との相関性を持つ可能性があると思定する。実際の宇宙環境での利用を想定した破壊耐圧評価においては、事象の発生確率を考慮した実力値評価も必要になると考える。

最後に、実験実施にあたりご支援くださる三菱テクニカ様、また、HIMAC を用いた実験をさせてくださる QST 量子医科学研究所様に厚く御礼申し上げます。

- a. 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門  
Research and Development Directorate, JAXA
- b. 量子科学技術研究開発機構 量子医科学研究所  
IQMS, QST

## 2024年度の研究成果一覧 (24H095)

### (1) 原著論文

なし

### (2) 国際研究集会などの Proceedings

- M. Takahashi, E. Kagoshima, T. Makino, M. Iwata, N. Ohtani, N. Nemoto, S. Narita, T. Tawara, J. Senzaki, K. Kobayashi, T. Suematsu, S. Harada, A. Takeyama, T. Ohshima, J. Saito, H. Fujiwara, and H. Shindou: Investigation of Potential Impact of Nitridation Process on Single Event Gate Rupture Tolerance in SiC MOS Capacitors, Solid State Phenomena, vol. 358, 1-6 (2024).

### (3) 学会及び研究会の口頭発表

- M. Takahashi, E. Kagoshima, S. Narita, T. Tawara, M. Iwata, N. Nemoto, T. Makino, K. Kobayashi, T. Suematsu, S. Harada, A. Takeyama, T. Ohshima, J. Saito, H. Fujiwara, and H. Shindou: Demonstration of Structural Effects on SEB Tolerance in Trench Gate SiC-MOSFETs under Heavy-Ion Irradiation, The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM), North Carolina, 2024.10.
- E. Kagoshima, M. Takahashi, S. Narita, T. Tawara, K. Kobayashi, T. Suematsu, M. Okamoto, M. Iwata, H. Shindou, T. Makino, A. Takeyama, T. Ohshima, J. Saito, T. Nishiwaki, A. Onogi, H. Fujiwara and S. Harada: Improvement of Single Event Leakage Current Tolerance in 4H-SiC Trench MOSFET, The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM), North Carolina, 2024.10.
- M. Iwata, S. Kuboyama, A. Michez, A. Makihara, M. Takahashi, N. Nemoto, M. Midorikawa, J. Boch, F. Saigné, F. Wrobel, T. Makino, T. Ohshima, and H. Shindou: Physics-Based Ion Track Structure Model for Single-Event Effect Simulations on Power Devices, RADECS 2024, Canary Islands, 2024.9.
- 籠島瑛二、高橋美沙、成田舜基、俵武志、小林慶亮、末松知夏、岡本光央、岩田愛実、新藤浩之、牧野高紘、武山昭憲、大島武、斎藤順、西脇剛、小野木淳士、藤原広和、原田信介：SiC トレンチ MOSFET におけるシングルイベントリーク(SELC)の改善、第11回先進パワー半導体分科会、群馬、2024.11.

### (4) その他

なし

### (5) 学位論文

なし

## 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

(23H189)

寺沢和洋<sup>a,c</sup>、岸本祐二<sup>b</sup>、佐々木慎一<sup>b</sup>、高橋一智<sup>b</sup>、窪田雅弓<sup>b</sup>、  
身内賢太郎<sup>d</sup>、永松愛子<sup>c</sup>、中西大樹<sup>c</sup>、藤田康信<sup>c</sup>、会田圭祐<sup>e</sup>、福山誠二郎<sup>e</sup>、小平聡<sup>f</sup>  
K. Terasawa<sup>a,c</sup>, K. Aida<sup>c</sup>, Y. Fujita<sup>c</sup>, S. Fukuyama<sup>c</sup>, Y. Kishimoto<sup>b</sup>,  
S. Kodaira<sup>f</sup>, M. Kubota<sup>b</sup>, K. Miuchi<sup>d</sup>, A. Nagamatsu<sup>c</sup>, D. Nakanishi<sup>c</sup>, S. Sasaki<sup>b</sup>, K. Takahashi<sup>b</sup>

### Abstract

Deposit energy distribution and gas gain dependence on the electric field were obtained by the irradiation of carbon beam supplied from HIMAC with Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) for space dosimetry. The dosimeter has a  $\mu$ -PIC electrode for position detection. A new version of the electrode has been tested, improved by studying materials and electric field leakage. The new model detector obtained the same energy resolution as the previous flight model.

### 1. 研究の目的とバックグラウンド

実時間計測可能なアクティブ検出器・生体組織等価・位置有感比例計数管 PS-TEPC (Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber)<sup>1)</sup>を開発し、最終的には宇宙放射線被曝線量を実測することを目的としている。これまでに、1 回目の実測の機会を 2016 年から 1.4 年に渡り、国際宇宙ステーション (ISS) 内の Japan Experimental Module (JEM) 与圧部において得ている。

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) で評価する。従って、LET の実測がその本質である。測定対象となる LET の範囲は広く (0.2 ~ 1000 keV/ $\mu$ m)、定常的な被曝の測定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を使用することが適しているといえる。

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寄与も付加される。

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 である (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)<sup>2)</sup> や国産の Real-time Radiation Monitoring Device-III (RRMD-III、Si 位置検出器の組み合わせ)<sup>3)</sup> 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・物質で検出器を構成し、中性子への感度が相対的に高い一方で、位置情報がないため、粒子の入射方向の一様等方向性を仮定した場合の、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、単位は同じでもその物理的な意味は全く異なる。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%)<sup>4)</sup> に加えて検出器自身の分解能も相対的に悪い。

その結果、被曝線量限度から導かれる宇宙滞在期間は、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)<sup>5)</sup> をそもそも達成できていない。

一方、RRMD-III 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は期待できない。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<sup>1)</sup>。

検出器は、気体を利用した位置検出器 (3 次元飛跡検出器、Time Projection Chamber、TPC) で構成され、LET をリアルタイムで実測することで線量データを取得することができる。電荷収集用の電極として、Micro-Pixel Chamber ( $\mu$ -PIC)<sup>6)</sup> 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、 $\mu$ -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。最終的には長期安定運用可能な線量計として、宇宙船内でのインフラ化を目指している。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 mm<sup>2</sup> の大きさの既存の  $\mu$ -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<sup>7)</sup>。続いて、搭載性を考慮した小型  $\mu$ -PIC (25×25 mm<sup>2</sup>) 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  $\mu$ m 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%、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>: 10%) を使用していたが、メタンベースの生体組織等価ガス (CH<sub>4</sub>: 64.4%、CO<sub>2</sub>: 32.4%、N<sub>2</sub>: 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%

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)

以内の精度を達成できる見込みとなった<sup>8,9)</sup>。

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<sup>10)</sup>、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、 $\mu$ -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、マシンタ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。

$\mu$ -PIC については改良型（後述）の設計・試作を行い、基礎実験（ $\alpha$ 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。鉄ビームの照射により、検出器への印加電圧として低電圧側のガスゲインデータを取得した。

### 3. 今年度の研究内容

昨年度に引き続き、試作品の  $\mu$ -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、炭素ビーム照射を行った。ガスゲインの向上で印加電圧を下げることであれば、放電を抑制し、より安定的な動作・運用につながり、詳細なデータ解析（位置情報や  $dE/dx$  など）

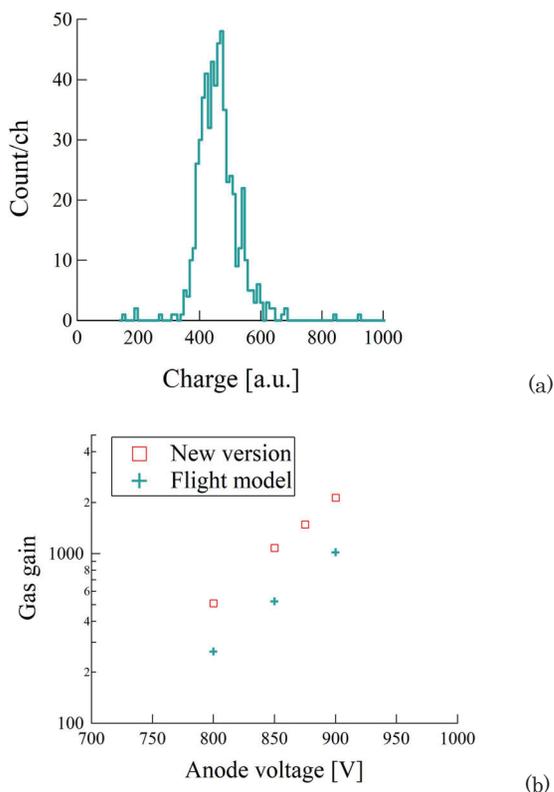


Fig.1 (a) Deposit energy distribution for 400 MeV/n carbon beam irradiation and (b) gas gain dependence on the anode voltage with the flight model and the new version  $\mu$ -PIC.

も可能になると期待している。

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  $\mu$ -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(a)に生物照射室にて取得の炭素 400 MeV/n に対する付与エネルギー分布を示す。FM とほぼ同等の性能（分解能  $\sigma \sim 11\%$ ）を得ることができた。

更に、Fig.1(b)に $\mu$ -PIC のガスゲインの電場依存性（電圧依存性）について示す。昨年度よりも高電圧側についてのデータ取得となり、この領域でも、FM で使用した従来型と比べ、2 倍程度高いゲインを得た。Anode 電圧で、同程度のゲインを得るために、数十 V 程度低い電圧値での達成が可能となり、一層の安定動作につながる結果となった。

以上の結果は、分解能が電離電子の数の統計で決まることを考えると、ゲイン向上・分解能同等は理に適っている。

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も行う必要があり、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・開発についても継続して照射を行っていく。

照射機会の回数を想定すると、粒子照射に伴う開発のスピードは、2 年間でこれまでの 1 年分に相当すると考えている。

### 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、並びに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) K. Terasawa et al., *KEK Proc.*, 2005-12 (2005) 63.
- 2) G.D. Badhwar et al., *Radiat. Res.*, 139 (1994) 344.
- 3) T. Doke et al., *Radiat. Meas.*, 33 (2001) 373.
- 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.

## 研究成果一覧 (23H189)

### (原著論文等)

- Kubota M., Kishimoto Y., Saito K., Takahashi K., Sasaki S., Terasawa K., Miuchi K., Nagamatsu A.: Study on miniaturization and weight reduction of a position sensitive tissue equivalent proportional chamber (PS-TEPC) using an ASIC, Proc. of the 38th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, KEK (2024). in press.

### (Proceedings 等)

- 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). in press.
- Terasawa K., Y. Kishimoto., Kubota M., Miuchi K., Nagamatsu A., Sasaki S., Takahashi K., Kodaira S.: Present status for development of active space dosimeters in Japan (2023), Space Utilization Research 38, pp.1-3 (2024). (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)

- 窪田雅弓、岸本祐二、齋藤究、高橋一智、佐々木慎一、寺沢和洋、身内賢太郎、永松愛子、小平聡:位置有感生体組織等価比例計数箱 PS-TEPCにおける Time over Threshold 法の利用検討、第 72 回応用物理学会春季学術講演会、東京理科大学野田キャンパス&オンライン、2025.3.17.
- 窪田雅弓、岸本祐二、齋藤究、高橋一智、佐々木慎一、寺沢和洋、身内賢太郎、永松愛子:宇宙線量計 PS-TEPC の開発～月周回有人拠点 Gateway での利用に向けて～、学術領域「地下稀事象」若手研究会、富山大学金森会館ホール、2025.3.7.
- 窪田雅弓、岸本祐二、齋藤究、高橋一智、佐々木慎一、寺沢和洋、身内賢太郎、永松愛子:宇宙線量計 PS-TEPC の月周回有人拠点 Gateway での利用に向けた開発」、第 39 回宇宙環境利用シンポジウム、オンライン、2025.1.22. (上記 Proceeding に伴う発表です).
- Kubota M., Kishimoto Y., Saito K., Takahashi K., Sasaki S., Terasawa K., Miuchi K., Nagamatsu A.:The Performance of the Compact Model of the Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) using an ASIC, IEEE NSS MIC RTSD, TAMPA, FLORIDA, USA, 2024.10.30.
- 岸本祐二:放射線検出器の宇宙開発への応用、神戸大学大学院理学研究科物理学専攻談話会、神戸大学六甲台地区、2024.6.14.

### (その他)

- KEK プレスリリース: 月面利用の拡大に向けた先行的な技術の研究開発開始! ～超小型・高機能な宇宙放射線環境の計測技術とリアルタイム被ばく線量評価システムの構築～、<https://www.kek.jp/ja/press/202411181400moon>, 2024.11.18.
- 総研大プレスリリース:

月面利用の拡大に向けた先行的な技術の研究開発開始！～超小型・高機能な宇宙放射線環境の計測技術とリアルタイム被ばく線量評価システムの構築～、  
<https://www.soken.ac.jp/news/2024/20241118.html>, 2024.11.18

- 寺沢和洋:宇宙放射線の実測との対比から導かれる、ダマされないためのメディア・リテラシー、マネー・リテラシー、早稲田大学稲門会、金融経済研究会、令和6年第7回セミナー、株式会社フロンティアコンサルティング、東京・大手町、2024.9.24.
- 寺沢和洋:宇宙放射線測定から紐解く、ダマされないためのメディア・リテラシー、第42回豊島稲門塾・早稲田大学、豊島区産業振興プラザ、2024.9.6.
- 寺沢和洋:「宇宙放射線とメディア・リテラシー」、新春の集い講演会、早稲田大学春秋会、早稲田大学大隈会館、2024.1.20.

# In field and Out of Field Dose Profile from Therapeutic Hadron Therapy Beams at HIMAC facility (24H437)

J. Vohradsky<sup>1</sup>, M. M. Roberts<sup>1</sup>, V. Pan<sup>1</sup>, D. Bennett<sup>1</sup>, M. Povoli<sup>2</sup>, A. Kok<sup>2</sup>, H. Mizuno<sup>3</sup>, T. Nakaji<sup>3</sup>, S. Matsuba<sup>3</sup>, A. Ishikawa<sup>3</sup>, S. Tanaka<sup>3</sup>, M. Muramatsu<sup>3</sup>, T. Inaniwa<sup>3</sup>, L. T. Tran<sup>1</sup> and A. B. Rosenfeld<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre for Medical Radiation Physics, University of Wollongong, Wollongong, Australia

<sup>2</sup>SINTEF, Oslo, Norway

<sup>3</sup>Research 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 <sup>40</sup>Ar ion therapeutic beam. The new MicroPlus2 probe is compared to its predecessor in these experiments. 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  $y_D$  values. This demonstrates that the SOI microdosimeter is suitable for high LET ion QA applications.

## 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 ( $y_D$ ) 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 miniTEPC 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 with low energy threshold in readout electronics, events with very low energy were observed in MCA spectra. These low energy events may deteriorate the microdosimetry spectrum 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 Ar ions when the microdosimeter was placed behind different thicknesses of PMMA layers.

## 2. Materials and Methods

### A. Structure of 3D “Mushroom” Microdosimeter

The 3D trench-ed planar Mushroom SOI design used in this study features 10  $\mu\text{m}$  thin active layer cylindrical sensitive volumes [4] [5]. There are 40 $\times$ 40 SVs connected in parallel, and the diameter of each SV is 18  $\mu\text{m}$ , with a total active area of 2 $\times$ 2 mm<sup>2</sup> [5].

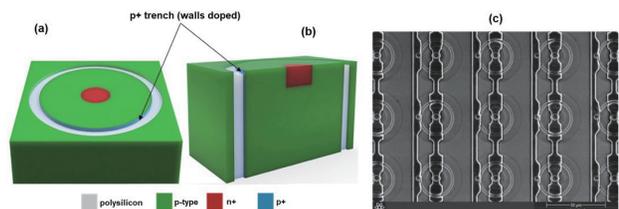


Fig. 1: Trenched-3D Mushroom with planar core SV: (a) Schematic of single SV, (b) Cross-section of schematic, (c) SEM image of SV array [4].

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+ doped wall 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 the field oxide layer between SVs aiming to avoid low energy events [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-grade 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: MicroPlus2 Probe with SOI microdosimeter inserted. Built-in shaping amplifier indicated in orange region.

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.

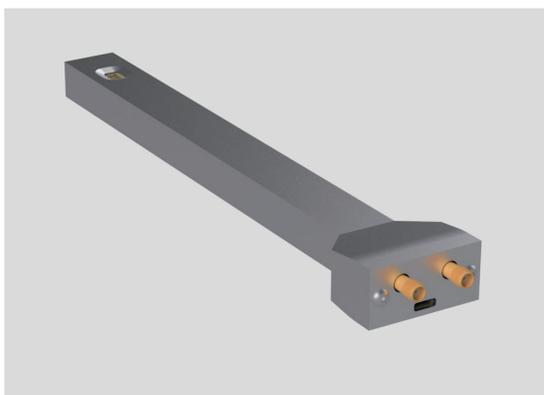


Fig. 3: CAD render of MicroPlus2 Probe inserted in rectangular sheath.

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

In this experiment, mono-energetic  $^{40}\text{Ar}$  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 benchmark the response of MicroPlus1 to MicroPlus2 in the same high LET radiation field conditions.

The microdosimeters were connected to respective MicroPlus probes, which output to Amptek 8000D MCAs. The MicroPlus probes was 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).

## 3. Results and Discussion

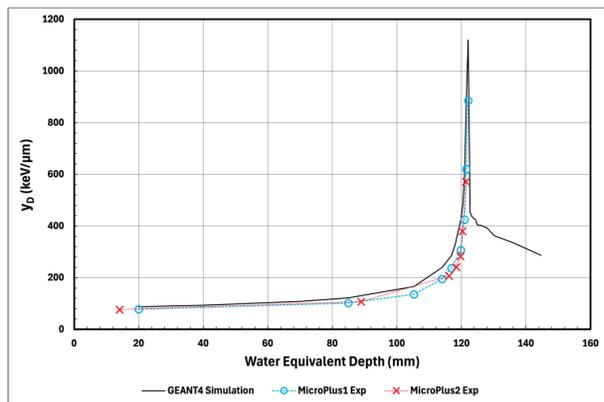


Fig. 4:  $y_D$  distribution as a function of WET for 500 MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  ion converted from silicon to tissue, comparing experimental measurements to Geant4 simulation.

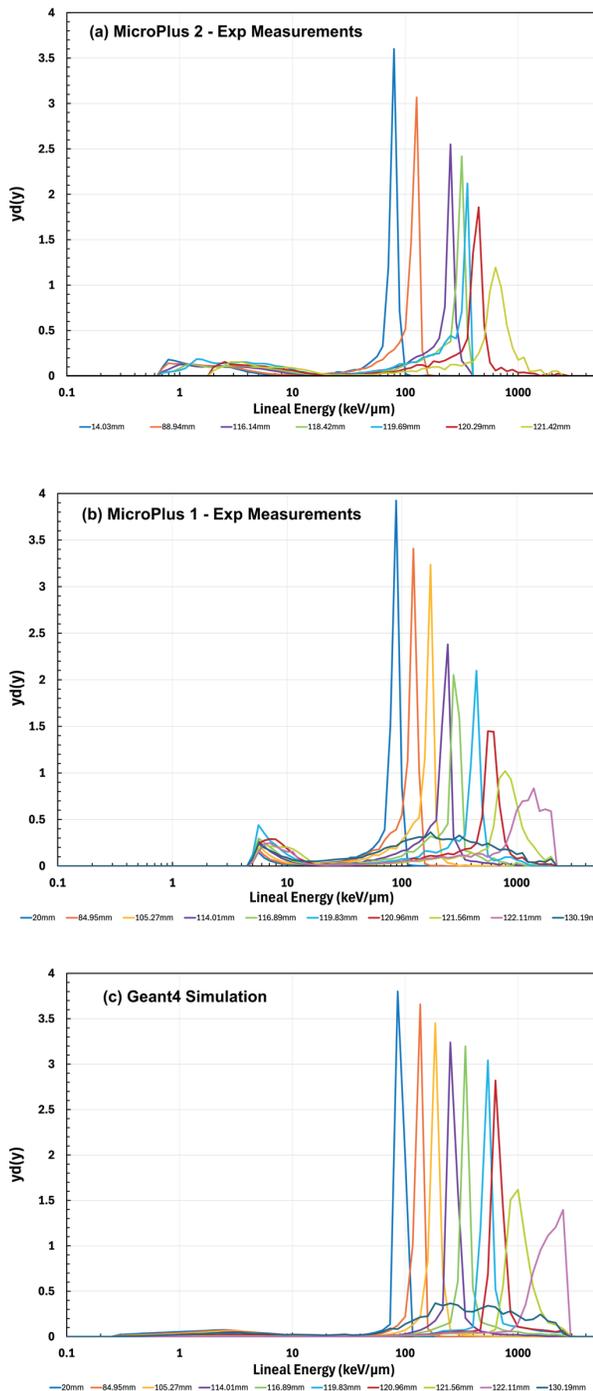


Fig. 5: The response of the Mushroom microdosimeter to 500 MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  ion converted from silicon to tissue. (a) MicroPlus2 experimental measurements, (b) MicroPlus1 experimental measurements, (c) Geant4 simulation of MicroPlus microdosimeter.

Fig. 4 shows the  $y_D$  distribution as a function of WET as measured by the SOI mushroom microdosimeter in a free air geometry, downstream of a PMMA phantom at various depths. The response of both probes had similar  $y_D$  values.

Fig. 5 shows the microdosimetric spectra that was used to calculate the  $y_D$  values shown in Fig. 4. It can be observed that at the BP region and distal part of the BP, lineal energies of up to 2000 keV/ $\mu\text{m}$  were recorded experimentally. The main improvement of the MicroPlus2 probe is larger dynamic range while ability to record much lower energy events (due to lower noise threshold). This is demonstrated in the response of MicroPlus2 in Fig. 5a, with lower lineal energy threshold of 0.7 keV/ $\mu\text{m}$  recorded. This allows the measurement of lower energy events which are normally below the noise floor of the MicroPlus1 system.

These low energy events (below 10 keV/ $\mu\text{m}$ ) are observed in the Geant4 simulations, but with a lesser overall contribution to microdosimetric spectra than that of the experimental measurements.

#### 4. Conclusions

The results demonstrate the performance of this version of the SOI mushroom microdosimeters in conjunction with a new MicroPlus2 probe when measuring high LET ions (up to 2000 keV/ $\mu\text{m}$ ), with some attributing low energy events observed in the extremely low energy region. This result is acceptable for microdosimetry of proton and ion therapeutic beams up to Ar or Fe ions. This has been demonstrated in this work by measuring with the high energy resolution and larger dynamic range the microdosimetric spectra for 500 MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  ions at HIMAC.

The new MicroPlus2 probe has been demonstrated as having comparable response to its predecessor, though with the added advantage of measuring much lower energy events, due to improved built-in pulse shaping electronics.

In the full paper, a comparison of measured and simulated with Geant 4 microdosimetric spectra and  $y_D$  values for 500 MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  ions will be presented. The further reduction of parasitic low energy events when measuring high LET ions will be addressed in the next batch of fabrication via heavily doped p<sup>+</sup> stop layer on the surface of the microdosimeter.

#### 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. Methods Phys. Res. B.*, vol. 268, no. 11-12, pp. 1818-1823, 2010.

## List of Publications and presentations

### I. Publications

1. J. W. Archer E. Giulio Villani, **Vladimir A. Pan**, Zeljko Pastuovic, Daniel Hynds, Abdelrahman M. BaniHani, **James Vohradsky**, Daniel J. Bennett, Martin Gazi, Stefania Peracchi , Susanna Guatelli, Marco Petasecca, Michael Lerch , Daniela Bortoletto , **Linh T. Tran** and **Anatoly B. Rosenfeld.**, "A Two-Dimensional Characterization of Low-Gain Avalanche Diodes for Low-LET Microdosimetry," in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 71, no. 3, pp. 342-351, March 2024, doi: 10.1109/TNS.2024.3359249.
2. S. Peracchi, Ryan Drury, Zeljko Pastuovic, Jesse Williams, **Linh T. Tran**, Susanna Guatelli, **Vladimir Pan**, Jay W. Archer, **Anatoly B. Rosenfeld**, Andrea Coronetti., "LET Calibration of Ion Microbeams and Their SEE Cross Section Characterization," in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 71, no. 8, pp. 1565-1570, Aug. 2024, doi: 10.1109/TNS.2024.3372135.
3. **V.A. Pan**, **L.T. Tran**, T. Madden, B. Clasié, H. Kooy, **A.B. Rosenfeld**, N. Depauw, LETd Optimization Verification With an SOI Microdosimeter, International Journal of Radiation Oncology\*Biology\*Physics, Volume 119, Issue 3, 2024, Pages 946-956, ISSN 0360-3016, <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2023.12.036>.
4. Jeppe Brage Christensen, Iván Domingo Muñoz, Pawel Bilski, Valeria Conte, Pawel Olko, Lily Bossin, Anne Vestergaard, Stefano Agosteo, **Anatoly Rosenfeld**, **Linh Tran**, Željka Knežević, Marija Majer, Iva Ambrožová, Alessio Parisi, Tim Gehrke, Mária Martišíková, Niels Bassler, Status of LET assessment with active and passive detectors in ion beams, Radiation Measurements, Volume 177, 2024, 107252, ISSN 1350-4487, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2024.107252>.
5. C. Potiriadis, K. Karafasoulis, C. Papadimitropoulos, E. Papadomanolaki, A. Papangelis, I. Kazas, J. Vourvoulakis, G. Theodoratos, A. Kok, **L.T. Tran**, M. Povoli, J. Vohradsky, G. Dimitropoulos, **A. Rosenfeld**, C.P. Lambropoulos, LURAD: Design study of a comprehensive radiation monitor package for the gateway and the lunar surface, Advances in Space Research, Volume 74, Issue 3, 2024, Pages 1352-1365, ISSN 0273-1177, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.04.054>.
6. Klaudiusz Jakubowski, James Vohradsky, Andrew Chacon, Daniel R. Franklin, **Linh T. Tran**, Susanna Guatelli, Mitra Safavi-Naeini, **Anatoly Rosenfeld**, Computational design and evaluation of a quad-MOSFET device for quality control of therapeutic accelerator-based neutron beams, Radiation Measurements, Volume 177, 2024, 107253, ISSN 1350-4487, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2024.107253>
7. **Hideyuki Mizuno**, **Taku Nakaji**, Sung Hyun Lee, Dousatsu Sakata, Katsumi Aoki, Kota Mizushima, **Linh T Tran**, **Anatoly Rosenfeld** and **Taku Inaniwa**, Verification of linear energy transfer optimized carbon-ion radiotherapy, Phys. Med. Biol. 69 23NT01, 2024
8. Suresh Rana , Noufal Manthala Padannayil , **Linh Tran** , **Anatoly B Rosenfeld** , Hina Saeed , Michael Kasper “Quantifying the Dosimetric Impact of Proton Range Uncertainties on RBE-Weighted Dose Distributions in Intensity-Modulated Proton

Therapy for Bilateral Head and Neck Cancer”, *Curr.Oncol.*, 2024 Jun 27;31(7):3690-3697. doi:10.3390/curroncol31070272

9. **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 RBE 10 Modeling in Particle Therapy with a Solid State SOI Microdosimeter”, *Phys.Med.Biol.*, 2024 , DOI 10.1088/1361-6560/ad9f1c
10. **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.
11. **D. J. Bennett**, **V. A. Pan**, **L. T. Tran**, D. Bolst, K. Aoki, T. Nakaji, H. Mizuno, H. Takei, T. Inaniwa, A. Pervertaylo, I. Anokhin, M. Lerch, M. Petasecca and **A. B. Rosenfeld**, "P-I-N diodes for Displacement Damage Monitoring in a Heavy ion Space Radiation Environment," *IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference*, conference paper, [unpublished], 2025
12. 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.*, 2025 (accepted, 07.02.25)
13. Suresh Rana, **Anatoly Rosenfeld** “Effects of Spot Size Errors in Dynamic ARC Pencil Beam Scanning Proton Therapy Planning”, *Phys.Med.Biol.*, Nov 27;**69**(23), 2024 doi: 10.1088/1361-6560/ad8feb

## II. Presentations

1. **Anatoly Rozenfeld** “Assessment of LET in hadron radiotherapy”, National Particle Therapy Symposium, 2024
2. Daniel J. Bennett, Linh T. Tran, Vladimir A. Pan, D. Bolst, S. Guatelli, M. Petasecca, M. Lerch, Katsumi Aoki, Taku Nakaji, Hideyuki Mizuno, Hideyuki Takei, Taku Inaniwa, A. Perevertaylo, I. Anokhin and **Anatoly B. Rosenfeld**, “Sensor for Displacement Damage Monitoring in GCR Space Environment”, NSSMIC, Vancouver, Canada, 2023.
3. **L. T. Tran**, on behalf of Microdosimetry team “Recent development of solid state dosimetry and microdosimetry and its applications in particle mini beam therapy”, invited talk, Particle Minibeam therapy workshop, Munich, March 2024
4. **L. T. Tran**, on behalf of Microdosimetry team, “*Recent development of solid state microdosimetry and its applications in particle therapy and space*”, visit to Czech Technical University in Prague, Czech Republic, April 2024
5. **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 conference, February 2025.

6. **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”, NSSMIC conference, Vancouver, Canada, November, 2023.
7. **J. Vohradsky**, L. T. Tran, V. Pan, S. Peracchi, D. Bolst, B. James, L. Chartier, D. Bennett, D. Prokopovich, Z. Pastuovic, A. Pogosso, S. Guatelli, M. Petasecca, M. Lerch, M. Povoli, A. Kok, M. Jackson, N. Matsufuji, Taku Inaniwa, Dirk Wagenaar, Stefan Both, and A. B. Rosenfeld, “Radiation Measurements in Advanced Radiotherapy Techniques at the Centre for Medical Radiation Physics”, invited, Tsukuba conference, 2023
8. **V. A. Pan**, V. Jacobsen, J. Vohradsky, N. Bassler, A. Vestergaard, L. T. Tran and A. B. Rosenfeld, “Implementation of the MicroPlus SOI Microdosimetry System for Patient Specific Plan Evaluation in Terms of LETd Mapping”, PTCOG, June, 2024
9. **Matthew Roberts**, James Vohradsky, Linh Tran, Vladimir Pan and Anatoly Rozenfeld “Development of a Silicon Based Dose Equivalent Neutron Dosimeter for Radiation Protection Purposes (GEANT4 Modelling)” MedPhys conference, Sydney, December 2024.
10. **Daniel Bennett** et al. “P-I-N diodes for Displacement Damage Monitoring in a Heavy ion Space Radiation Environment”, Australian Space Conference 2023.
11. **Daniel Bennett** et al. "Calibrating p-i-n Diodes for Displacement Damage Monitoring in a Space Radiation Environment", HIAS Canberra Conference 2024.

### III. Dissertations

1. **V. Pan**, “*Radiobiological Effectiveness of Charged Particle Therapeutic Beams: Experimental Derivation, Application for Treatment Optimization and Radiation Protection of Astronauts*”, PhD Thesis, University of Wollongong, Australia, submitted March 2024.
2. **D. Bennett**, “*Detector for Displacement Damage Dose Monitoring in a Space Radiation Environment*”, Masters Thesis, University of Wollongong, Australia, submitted November 2023.

# Tests of Particle Telescopes for JUICE and other future missions of ESA 22H414

W. Hajdas<sup>a</sup>, R. Marcinkowski<sup>b</sup>, L. Mirjanovic<sup>d</sup> and H. Kitamura<sup>c</sup>

## Abstract

After a successful launch of the ESA JUICE satellite on 14 April 2023 the Radiation Hard Electron Monitor RADEM was switched on and underwent its commissioning phase. The detector has been operating successfully since then. During the Earth gravitational assist, the instrument passed through the radiation belts, allowing for verification of its detections of energetic electrons. Currently, the instrument is being optimized, and its data awaits processing at the 1st level, followed

by its dissemination. PSI has provided a database container for the RADEM data, including its quick look facility based on Graphene software. One can also include a simple first analysis based on a Python script library. The application is ready for use and awaits ESA permission to publish it. Preliminary data of RADEM are shown in Figure 1 below. One can see very strong Solar Particle Events largely exceeding the prediction of the strength for Solar Cycle 25.

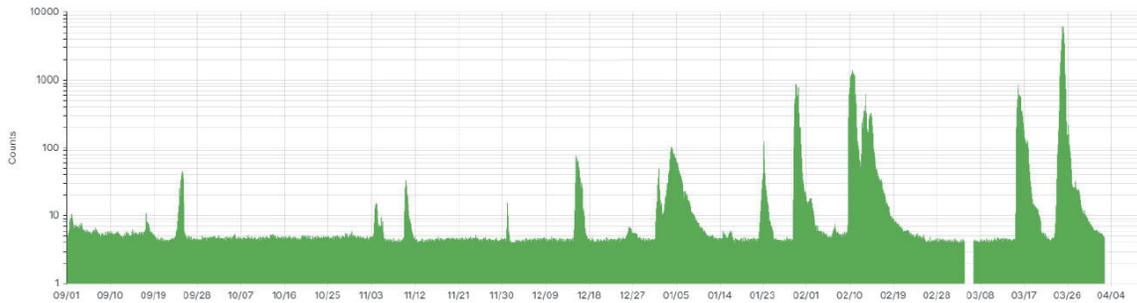


Figure 1: RADEM preliminary data set until the end of March 2024. Events from the PD1 channel are presented. One can see the constant Cosmic Ray background and several strong Solar Energetic Particle events.

After successfully testing the HIT telescope, our efforts moved to design and construction of the new instrument called AMORE: Aerospace Measurement of Radiation Environment instrument. This development aims to provide an affordable, small, and low-power consumption particle spectrometer for use on either ground or in aerospace, i.e., airplanes and satellites. The monitor should measure both charged and neutral particles and distinguish them, initially using the coincidence/anticoincidence principle. It should also separate different species of charged particles based on the de-E nuclear physics detection technique. In the first stage the position sensitivity and quenching tests are being performed. The current development stage goal is to demonstrate the AMORE principle during airplane and balloon flights. The instrument will consist of a sandwich of dE-E-dE scintillators. The dimensions are 52x52x2 mm<sup>3</sup> for dE detectors and 50x50x50 mm<sup>3</sup> for the E detector. The current experimental phase used only fast scintillators. During the breadboard model tests, one used the standard DRS4-based waveDREAM data acquisition system and a single PCB with just one DE plastic sheet. The first goal was to demonstrate its ability to detect gamma-rays, protons, and heavy ions using a small area SiPM from HAMAMATSU. These tests were conducted at PSI PIF (protons) and EMON (electrons) beamlines as well as in HIMAC heavy ion biology beamline. The results were positive and showed that with multiple

SiPMs of only a small area, one can successfully perform dE measurements of incoming radiation. Figure 1 presents the diagram of the full AMORE and its dE readout part of the DM.

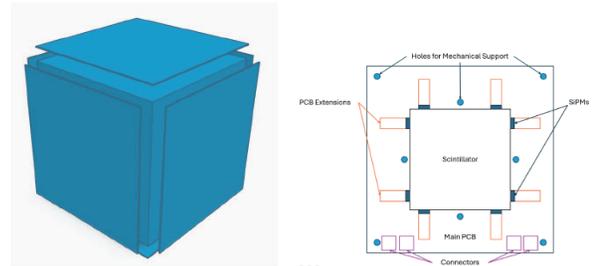


Figure 1: AMORE telescope with one central E-scintillator and 6 thin dE-thins scintillators (left), Thin plastic on the PCB with the readout via eight SiPM paired at each corner given four input channels (right).

## 1. RESULTS

Figure 1 (right) shows the simplified dE DM. It is being used to test the distributed readout of the plastic scintillator and verify the position sensitivity of AMORE. The position sensitivity would allow measuring the angular distributions of the incoming radiation in space or onboard balloons and airplanes. All measurements were conducted from March 2024 until March 2025. One used various sources of radiation and concentrated in the

first stage on angular distributions and scans over positions of the oncoming radiation. The position sensitivity was tested at PSI using different particle beams. The full plastic area (52x52 mm<sup>2</sup>) was scanned using equally distributed positions with a 5x5 measurement matrix (25 points in total). Setup for measurements using 200 MeV protons from the PIF facility is showed in Figure 2 (left) while angular tests arrangement in HIMAC is seen on Figure 2 (right).

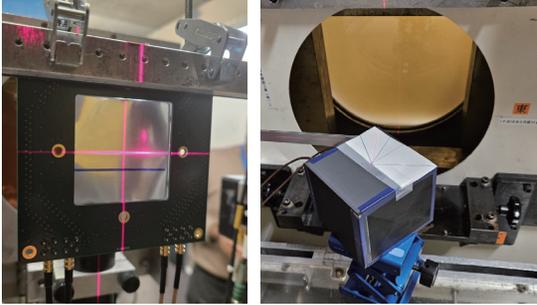


Figure 2: dE scintillator part in PIF (left) similar arrangement with a full box in HIMAC (right).

During various initial tests, one collected the waveforms from detected pulses. One used four different types of scintillators wrapping: white paper, Wikuiti foil, Aluminum foil, and no wrapping. Both electron and proton tests were done for four types of wrapping as defined above. The first analysis used the mean value of the built histogram for comparison of signal pulse height and calculations of the signal position sensitivity.

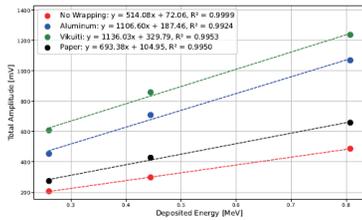


Figure 3: Amplitude vs proton deposited energy.

The first test determined the dependence of the measured amplitudes on the proton energy loss – Figure 2. Figure 3 presents the signal amplitude dependence on the hit position of the incoming particle. Results here are given for the no-wrapping case in form of amplitude maps.

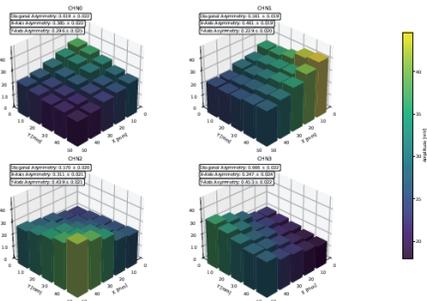


Figure 3: Amplitude detection maps from electron scans.

One can see that each corner of the scintillator has the highest observed amplitudes for pulses hitting in its nearest vicinity and the lowest ones at the largest distance. Such characteristics allow for a unique and accurate detection of particle hit positions. Similar

results were observed for all four types of wrapping. One can see in Figure 4 that the best results, i.e., the highest sensitivity, are obtained for the no-wrapping and paper wrapping cases. The Aluminum and Wikuity wrappings give the values that are by more than 30% lower. Slightly higher values are for proton tests in which signal amplitudes were also much higher. One can also notice that the Wikuity and the Aluminum have much higher values of signal amplitudes due to much better light collection – see the curves in Figure 3.

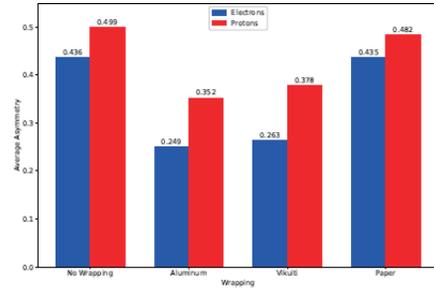


Figure 4: Comparison of the measured particle hit position sensitivities for electrons and protons /

The comparison of sensitivities for protons and electrons shows results that are similar within about  $\pm 5\%$  for no-wrapping and paper wrapping, where the light collection is very uniform. Differences for Wikuity and Aluminum are bigger i.e. about  $\pm 15\%$ - $20\%$ , due to light-collection and optomechanical non-uniformities. Further studies of these effects using Monte Carlo simulations are ongoing.

## 2. Summary

The first demo model of the AMORE 4pi particle telescope was developed and tested with different types of radiation fields. It aims to demonstrate the potential of a small and affordable particle monitor to determine the type, energy, and direction of incoming particles. The first tests were conducted at HIMAC and at PSI in 2024 and 2025 with results confirming AMORE abilities. The 12C tests at HIMAC provided incoming angle data, while the proton and electron tests at PSI allowed for determining the particle position sensitivity. The results were obtained for four types of wrapping. The best sensitivity is obtained for paper and no-wrapping cases. Aluminum and Wikuity wrapping have lower sensitivity values of more than 30%. They, however, allow for much better light collection, offering signals that are at least twice as large as in other cases. Further studies of the instrument are ongoing. The following future tests will determine the sensitivity for particle type detection using the dE-E technique and the pulse shape discrimination method. Additional tests are planned for the separation potential between protons and neutrons and electrons and gamma rays. Further experiments will also determine quenching factors in the E scintillation material with NaI(Tl) and LYSO as main candidates. We also plan to study AMORE for a potential use in radiation dosimetry.

<sup>a</sup>PSI, <sup>b</sup>SE2S, <sup>c</sup>QST, <sup>d</sup>ETHZ

## List of Publications

### (1) Publications

W. Hajdas et al. "The JUICE radiation environmental monitor, RADEM", accepted by the Space Science Review, 2025, <https://doi.org/10.1007/s11214-025-01163-9>

### (2) Proceedings

### (3) Oral and poster presentation

L. Mirjanovic, W.Hajdas and S.Ermakov, "Construction and Calibration of the position and energy sensitive detector for Cosmic Ray measurements", 6<sup>th</sup> Swiss SCOSTEP Workshop, Locarno 2024

### (4) Others

### (5) Dissertation , Diploma

L. Mirjanovic, "Construction and Calibration of the position and energy sensitive detector for Cosmic Ray measurements", ETHS diploma thesis, supervision by Prof. K. Kirch, March 2025

ガンマ線衛星搭載検出器の重イオン応答の研究  
Study of heavy ion response of gamma-ray satellite onboard detectors  
(22H465)

高橋忠幸<sup>ab</sup>、中澤知洋<sup>c</sup>、H. Gulick<sup>d</sup>、幸村孝由<sup>e</sup>、伊藤尚輝<sup>e</sup>、清水康行<sup>e</sup>、萩野浩一<sup>c</sup>、  
北村尚<sup>f</sup>、A. Lowell<sup>d</sup>、南喬博<sup>ba</sup>、長澤俊作<sup>ba</sup>、大熊佳吾<sup>c</sup>、J. C. M. Oliveros<sup>d e</sup>、  
J. Tomsick<sup>d</sup>、米田浩基<sup>a</sup>、A. Zoglauer<sup>d</sup>  
T. Takahashi<sup>ab</sup>、H. Nakazawa<sup>c</sup>、C. Chen<sup>d</sup>、H. Gulick<sup>d</sup>、T. Kohmura<sup>e</sup>、N. Itoh<sup>e</sup>、Y. Shimizu<sup>e</sup>、K. Hagino<sup>f</sup>、  
H. Kitamura<sup>g</sup>、A. Lowell<sup>d</sup>、T. Minami<sup>ba</sup>、S. Nagasawa<sup>ba</sup>、K. Okuma<sup>c</sup>、J. C. M. Oliveros<sup>d</sup>、  
J. Tomsick<sup>d</sup>、H. Yoneda<sup>a</sup>、A. Zoglauer<sup>d</sup>

Abstract

The Background and Transient Observer (BTO) onboard the upcoming Compton Spectrometer and Imager (COSI) Small Explorer mission is designed to provide light curves of the spatially and temporally varying soft gamma-ray background, as well as spectral information on transient phenomena such as gamma-ray bursts, magnetars, solar flares, and terrestrial gamma-ray flashes. BTO employs two scintillator detectors with SiPM readouts to detect gamma rays in the ~30 keV to 2 MeV range. To validate the design of the readout circuits and to investigate after-pulse signals induced by high-energy ions, we conducted a series of experiments at HIMAC between 2022 and 2024. The ions used were carbon at 350 MeV/u and iron at 500 MeV/u.

1. 研究の目的とバックグラウンド

MeV ガンマ線は、天文学において未だ十分に探査されていない最後の波長域といえる。2027年に打ち上げ予定のNASA SMEX ミッション「COSI」は、半導体コンプトン望遠鏡による高いエネルギー分解能と大きな有効面積を特長とし、MeV ガンマ線観測の新時代を切り開くとともに、マルチメッセンジャー天文学の重要な一翼を担うことが期待されている[1,2]。

COSI 衛星で高感度観測を実現するためには、軌道上におけるバックグラウンド放射の正確なモデリングと、その差し引き処理が不可欠である。そこで我々は、バックグラウンドを常時モニターするための独立した検出器「Background and Transient Observer (BTO)」を2台搭載することを決定し、その開発を進めている(図1参照)。BTOには、30 keV~2 MeVのエネルギーバンドに対応し、662 keVにおいて15~20% (FWHM)のエネルギー分解能を達成することが求められている。

本研究では、COSI/BTO 検出器に対する重イオンの入射による応答を詳細に評価し、これらの高エネルギー粒子が引き起こす大信号の影響を調査することを目的とする。BTOにおいては、バックグラウンド光子の正確な計測を可能とするため、信号処理回路の最適化が必要である。特に、アナログ系が飽和するような大信号に対しても安定した動作が保証される回路設計に加え、飽和状態を不感時間として正確に記録する回路が求められる。

本研究を通じて、衛星搭載を想定した機能検証モデル(地上試験装置)の開発を行う。

2. 昨年度までに得られている結果

2022年度には、C(350 MeV/u)および He(230 MeV/u)の重イオン照射実験を実施した。搭載予定の Scionix 社製シンチレータ検出器をセンサーとして用い、既存の ORTEC モジュールを利用して、CsI(Tl)および NaI(Tl)シンチレータの重イオン通過時の応答を調査した。

CsI(Tl)は NaI(Tl)に比べて単位エネルギーあたりの発光量が多く、潮解性がないといった利点がある一方、軌道上での使用においてはアフターパルスが問題となる可能性が指摘されている。本実験では、センサーの出力信号を数100ミリ秒にわたり高精度に記録し、NaI(Tl)と比較してCsI(Tl)においてより顕著なアフターグロー(残光)成分が観測された。この結果を受け、最終的にBTOの検出器にはNaI(Tl)を採用する方針とした[3]。

2023年度には、C(350 MeV/u)および Fe(500 MeV/u)の照射実験を実施し、BTO用アナログ信号処理回路の試作機を用いて、重イオン通過時に発生する大信号がSiPM出力およびその後段の信号処理系に与える影響を評価した。その結果、重イオン通過に伴い、入射エネルギーに相関するテール成分がセンサー出力に現れることが明らかとなった。これらの長い信号回復時間は回路設計に大きな影響を与えるため、Scionix社に対して、SiPM出力を直接取り出す追加信号の提供を急遽依頼した。

さらに、30 keV以上のエネルギーを持つアフターパルスがCsI(Tl)において特に顕著であることも確認された。ただし、NaI(Tl)においても同様の現象が発生する可能性があることから、新たに導入するSiPMの直接出力信号を活用して、重イオン通過後にアフターパルスによって発生する「偽トリガー信号」の期間を検出する仕組みを、今後の信号処理回路に組み込む方針とした。

3. 今年度の研究内容

2024年度は、7月19日にC(350 MeV/u)、11月21日にFe(500 MeV/u)を用いた重イオン照射実験を実施した。これまでに得られた知見を踏まえ、実際に衛星へ搭載を想定した装置の地上試験モデルを開発し、アナログ回路およびデジタル回路を試作し

た。  
アナログ回路には、新たに追加した SiPM からの直接信号を受け取り、所定のしきい値を超える信号に対して「Super Upper Discriminator (SUD)」信号を生成する機構を設けるなどの工夫を施した。デジタル回路には高速マイクロコントローラを搭載し、FPGA を用いずに C 言語でのプログラム制御によってリアルタイムのデータ取得と転送を実現している。

Analog Board Prototype (BTO-A3) Digital Board Prototype (SPMU-003)



図 1 開発したアナログボードとデジタルボード

#### 4. 今年度の研究成果と解析結果

図2に、SiPMからのFeイオンに対する直接信号を示す。センサー内部のトランスインピーダンスアンプ (TIA) の出力 (青) は、およそ3 MeV相当の信号で飽和しているのに対し、TIAの前段から引き出された直接信号 (黄) は、60 MeV相当の信号でも飽和せずに出力されていることが分かる。また、信号の幅については、 $^{137}\text{Cs}$ による662 keVの信号では約 $10\ \mu\text{s}$ でグラウンドレベルに復帰するのに対し、Feイオンによる信号では復帰に約30  $\mu\text{s}$ かかることも確認された。

この信号は $1\text{M}\Omega$ で終端して測定したが、終端抵抗を $50\ \Omega$ に変更すると、飽和した信号がグラウンドレベルに戻るまでの波形が変化し、回復により長い時間を要することが明らかとなった。これらの特性は、シンチレータの光出力が小さい宇宙線を用いた実験室レベルの試験では評価が困難であり、HIMACにおける実験は極めて貴重な機会であった。

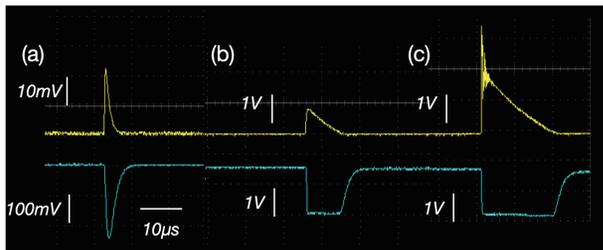
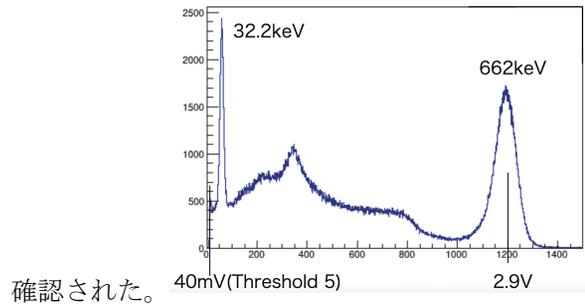


図 2 センサーからの出力、新設した SiPM の直接信号 (上) 従来からのアンプ出力 (下)。終端抵抗は  $1\text{M}\Omega$ 。(a)  $^{137}\text{Cs}$  からの 662keV (b) 宇宙線 (c) Fe イオン

図3に、地上試験モデル回路で取得した $^{137}\text{Cs}$ からのスペクトルを示す。スペクトルから、閾値が20 keV以下に設定できていることが確認できる。また、ダイナミックレンジとしては最大2MeVまでの観測が可能であり、大信号の影響を抑えるために整形回路の時定数やトリガー回路の最適化を行った結果、要求される性能を満たしていることが



確認された。  
図 3  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトル

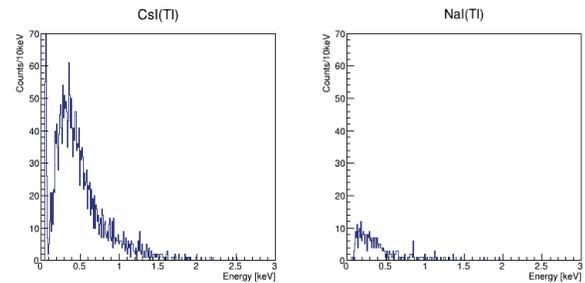


図 4 CsI(Tl) (左) と NaI(Tl) (右) の Fe イオン通過後 70~100 マイクロ秒間に取得されたスペクトルの違い (測定時間 61 秒)

Feイオン照射時に、Scionix社製のCsI(Tl)およびNaI(Tl)シンチレータを用いた2種類のセンサーを用い、イオン通過後70~100マイクロ秒の間に取得されたスペクトルを図4に示す。明らかに、CsI(Tl)のスペクトルには低エネルギー事象の過剰が見られ、これは第1回の実験で確認されたアフターパルスによるものと考えられる。この結果は、NaI(Tl)の方が宇宙空間での観測実験にはより適していることを示している。また、各トリガーが重イオンの通過を示すSuper Upper信号からの程度時間的に離れているかを把握する仕組みを導入することで、重イオン通過に起因するアフターパルスによる「偽トリガー」による事象を除去できることも示された。

#### 参考文献

- [1] Tomsick et al., The COSI Compton Spectrometer and Imager, Concept Study Report in response to: NNH19ZDA011O-ASMEX (2021)
- [2] Tomsick et al., The Compton Spectrometer and Imager, 38<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference (ICRC2021), July 12-23, 2024, Nagoya, Japan (arXiv:2308.12362)
- [3] Gulick et al., A Study of Afterglow Signatures in NaI and CsI Scintillator Modules for the Background and Transient Observer Instrument on COSI, NIM B. 561,2025,165631

- a. 東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構
- b. 東京大学理学系研究科
- c. 名古屋大学 KMI/理学研究科
- d. University of California, Berkeley
- e. 東京理科大学
- f. 量子科学技術研究開発機構

## 「2024 年度の研究成果一覧」

(学会及び研究会口頭発表等)

- Hannah C. Gulick, Eliza Neights, Samer Al Nussirat, Claire Tianyi Chen, Kaylie Ching, Cassandra Dove, Alyson Joens, Carolyn Kierans, Hubert Liu, Israel Martinez, Tomas Mician, Shunsaku Nagasawa, Shreya Nandyala, Isabel Schmidtke, Derek Shah, Andreas Zoglauer, Kazuhiro Nakazawa, Tadayuki Takahashi, Juan-Carlos Martinez Oliveros, John A. Tomsick, "Across the soft gamma-ray regime: utilizing simultaneous detections in the Compton Spectrometer and Imager (COSI) and the Background and Transient Observer (BTO) to understand astrophysical transients," Proc. SPIE 13093, Space Telescopes and Instrumentation 2024: Ultraviolet to Gamma Ray, 130932J (21 August 2024 ); <https://doi.org/10.1117/12.3020606>
- Hannah Gulick, Hiroki Yoneda, Tadayuki Takahashi, Claire Chen, Kazuhiro Nakazawa, Shunsaku Nagasawa, Mii Ando, Keigo Okuma, Alyson Joens, Samer Al Nussirat, Yasuyuki Shimizu, Kaito Fujisawa, Takayoshi Kohmura, Kouichi Hagino, Hisashi Kitamura, Andreas Zoglauer, Juan Carlos Martinez Oliveros, John A. Tomsick, "A study of afterglow signatures in NaI and CsI scintillator modules for the background and transient observer instrument on COSI," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, Volume 561, 2025, 165631; <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2025.165631>
- 長澤俊作他、「MeV ガンマ線観測衛星 COSI 搭載 BTO 検出器の信号処理システムの開発」、日本天文学会 2024 年秋季年会、2024 年 9 月、兵庫 (口頭発表)

# 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 (24H445)

F. Endo<sup>a</sup>, H. Shibakita<sup>b</sup>, S. Ota<sup>a</sup>, N. Kobayashi<sup>a</sup>, R. Kojima<sup>c</sup>, N. Kitamura<sup>c</sup>, S. Hanai<sup>c</sup>,  
N. Imai<sup>c</sup>, E. Takada<sup>d</sup>

Abstract

We are developing the active target CAT-M to determine the macroscopic properties of nuclear matter, such as nuclei and neutron stars. This research requires systematic measurements of various nuclear reactions on both the stable and unstable nuclei. In the present study, to further improve measurement accuracy, we carried out performance evaluations of newly developed readout pads for the Beam TPC (Time Projection Chamber), designed for beam tracking, and evaluated the rate of the ion backflow, which causes distortion of the electric field caused by space charge effects due to intense heavy-ion beams. Data analysis is currently ongoing, and this report outlines the current status of these evaluations.

The equation of state (EOS) of nuclear matter governs its fundamental properties and plays a critical role in understanding the structure of neutron stars and finite nuclei [1]. Of particular importance is the experimental constraint on the isospin dependent incompressibility  $K_{\tau}$  [2]. Determining  $K_{\tau}$  requires systematic measurements of the isoscalar giant monopole resonance (ISGMR) across a wide range of nuclei, including unstable ones. To address

this need, we are developing the active target CAT-M, consisting of time projection chambers (TPCs) and silicon detectors. In previous studies, we have achieved beam intensities of up to 1 MHz heavy ions per second. By installing a dipole magnet inside the recoil TPC, we successfully suppressed background events caused by a large amount of the delta electrons. A tiny TPC (Beam RPC) is recently introduced, which is located as close as the recoil TPC, to measure the beam position and direction precisely. This study aims to address the following two issues to improve tracking accuracy: (1) Mitigation of electric field distortion through suppression of ion backflow, and (2) Enhanced position resolution through smaller size readout pads.

The CAT-M consists of the Beam TPC for beam tracking, the Recoil TPC and silicon detectors for recoil particle detection, and dipole magnets for the suppression of delta electrons. Both the Beam and Recoil TPCs collect ionization electrons generated by charged particle passage using a uniform electric field formed by a field cage. These electrons are multiplied by THGEMs [3] and subsequently detected by readout electrodes, allowing the reconstruction of particle trajectories based on drift time and position. However, ion b

ackflow—positive ions generated during multiplication drifting back into the field cage—degrades tracking accuracy due to the distortion of the electric field by the ions. In the Recoil TPC, such distortion can cause trajectory shifts of approximately 1 degree in the CM system, corresponding to energy shifts of  $\sim 1$  MeV in the excitation spectrum. Furthermore, in the current Beam TPC configuration, local degradation of spatial resolution by a factor of five has been observed due to limitations in readout electrode geometry and layout.

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 a newly developed readout electrode for the Beam TPC.

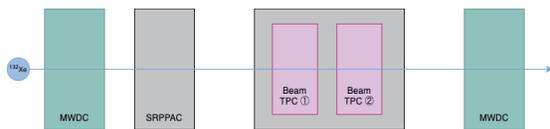


Figure1: Beam Experimental setup. Beam TPC ① was used for ion backflow evaluation, and Beam TPC ②, MWDC, and SR-PPAC for position resolution evaluation.

The experimental setup is shown in Fig. 1. Two Beam TPCs are located between two MWDCs [4] and one SR-PPAC [5], which gives the reference of the beam trajectory.

Each Beam TPC consists of a field cage, multiplication stage, and readout electrode. In this experiment, as shown in Fig. 2, we used a 3-stage stack comprising two Normal THGEMs (left panel) and one Flower THGEM (middle panel), alternately layered at 2 mm intervals.

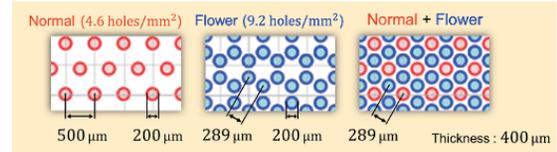


Figure2 : Hole configurations of the Normal (left) and Flower THGEM (middle).

We evaluated the ion backflow ratio by analyzing the electric field between stacked THGEMs and measuring the current values at the upper electrode of the field cage and at the readout electrode by using the current monitors. The analog outputs of the current monitors were digitized using a waveform digitizer (CAEN V1740). The former provides the ion backflow signal, while the latter captures the electrons. Typical waveforms are shown in Figure 3.

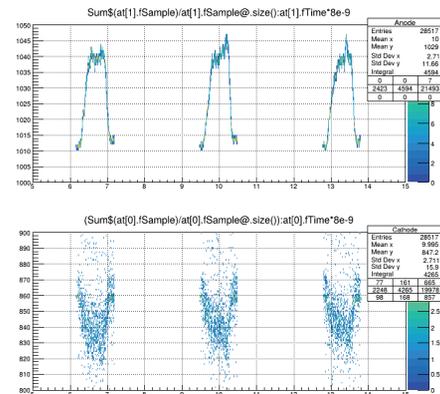


Figure3 : Anode signal (top) and cathode signal (bottom).

Acquired waveforms from the anode (electron signal, top) and cathode (ion signal, bottom). The horizontal axis is time in seconds. A periodic structure of 3.3 seconds is observed. The ratio of electron to ion signal is currently under analysis to evaluate ion backflow.

Beam TPC ② is equipped with a readout electrode consisting of 60 equilateral triangular pads (3 mm side length), as shown in Fig. 4. Using both low-intensity ( $\sim 10$  kHz) and high-intensity ( $\sim$

100 kHz) beams, we examined position-dependent response and intensity dependence.

<sup>b</sup>Department of Physics, Osaka University

<sup>c</sup>Center for Nuclear Study, University of Tokyo

<sup>d</sup>National Institute of Radiological Science

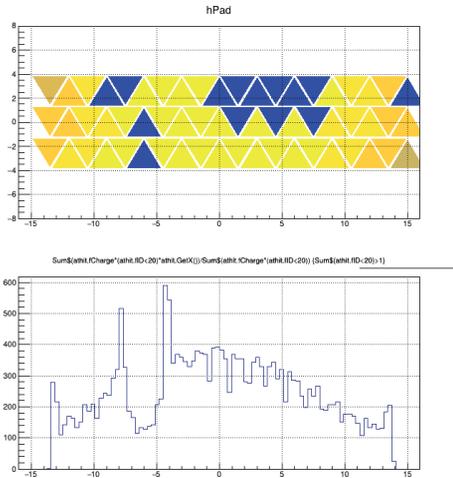


Figure 4 : (Top) Hit pattern, (Bottom) position distribution.

The top figure shows the number of hits on each pad, visualizing their response to passing particles. Blue pads indicate electrodes for which data was not acquired due to circuitry constraints. The bottom figure presents the position distribution reconstructed from the charge-weighted centroid using only the first row of pads. The beam spread was approximately 30 mm from the center of the Beam TPC. A dip of about -6 mm corresponds to the position of a non-functioning pad as seen in the top figure. The further analysis is ongoing.

## 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. M. Cortesi et al., Rev. sci. instrum 88, 013303 (2017)
4. H. Miya et al., NIM-B 317, 701-704 (2013).
5. S. Hanai et al., NIM-B 541, 194-196 (2023).

<sup>a</sup>Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

## 研究成果一覧 (24H445)

### (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>)
- 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, “ISGMR measurement of 86Kr 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 86Kr 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86Kr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 86Kr 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, “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  $^{86}\text{Kr}$  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, “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

不安定原子核の荷電変化反応の研究  
Study on Charge Changing Interactions of Heavy Ions  
(24H443)

山口貴之<sup>a</sup>, 安田伊吹<sup>a</sup>, 岩本怜<sup>a</sup>, 滝浦一樹<sup>a</sup>, 菊池悠太<sup>a</sup>, 西澤悟<sup>a</sup>, 渡辺晃平<sup>a</sup>,  
鈴木健<sup>a</sup>, 北川敦志<sup>b</sup>, 佐藤眞二<sup>b</sup>, 小沢顕<sup>c</sup>, 森口哲朗<sup>c</sup>, Zhang Hanbin<sup>c</sup>, 三井真音<sup>c</sup>,  
三河美沙希<sup>c</sup>, 小林楓人<sup>c</sup>

T. Yamaguchi<sup>a</sup>, I. Yasuda<sup>a</sup>, R. Iwamoto<sup>a</sup>, K. Takiura<sup>a</sup>, Y. Kikuchi<sup>a</sup>, S. Nishizawa<sup>a</sup>, K. Watanabe<sup>a</sup>,  
T. Suzuki<sup>a</sup>, A. Kitagawa<sup>b</sup>, S. Sato<sup>b</sup>, A. Ozawa<sup>c</sup>, T. Moriguchi<sup>c</sup>, H. Zhang<sup>c</sup>, M. Mitsui<sup>c</sup>,  
M. Mikawa<sup>c</sup>, H. Kobayashi<sup>c</sup>

### Abstract

We have studied charge changing interactions of nuclei from intermediate to high energies. The charge changing cross sections of heavy ions are sensitive to the point-proton radii of projectiles, thus being a new tool to investigate nuclear structure far from stability. For establishing a new method, we precisely measured the charge changing cross sections of  $^{46}\text{Ti}$  on a carbon target at intermediate energies at HIMAC. This would be a part of basic reaction data base to clarify the charge-changing reaction mechanism and for general applications in various fields.

#### 1. 研究の目的とバックグラウンド

RI ビーム実験技術の発達に伴って、よりエキゾチックな原子核の殻構造進化が大きく注目されている。例えば中性子ハローのように、価中性子が芯核から離れて空間的に広範囲に分布している場合、陽子分布と中性子分布を分離することに興味を持たれる。我々は反応断面積から核物質半径すなわち陽子半径と中性子半径の“和”を決定することができる。したがって独立な方法で陽子半径を決定すれば半径の分離が可能になる。しかし、不安定核の陽子半径を測定する方法は限定されている。

本研究は、生成率の著しく低い不安定核の陽子半径を決定するために荷電変化断面積に着目している。本研究の前身 H246 では、高エネルギービームの荷電変化断面積が陽子分布と相関するであろうという発想のもとに系統的な測定を行い、一定の成果を得た[1,2]。

この方法は軽い核では成り立っていたが、中重核では陽子半径の決定には至っていなかった[3]。最近、この問題に対して、反応過程においてプレフラグメントが生成された直後、励起した状態から陽子が蒸発する効果を考慮すると実験値をほぼ再現できることが分かった[4]。よって本研究では、中重核の荷電変化断面積を系統測定し、陽子半径を決定するための方法論の確立を目指している。

#### 2. これまでに得られている成果

H443 は R3 年度から再スタートし R4 年度で Kr 同位体の荷電変化断面積エネルギー依存性を測定した。また蒸発陽子の角度分布を測定した。投稿論文に向けて最終確認中である。

#### 3. 今年度の研究内容

R6 年度は、12 月に生物照射室(本来なら SB2 コースが好ましい)で 1 晩、 $^{46}\text{Ti}$  450 MeV/u ビームを用いて荷電変化断面積を測定することが出来た。

今回初めて生物照射室で実験するにあたり、ビームが空気の領域を通過する距離が長いため、エネルギーを正確に測定するためのプラスチックシンチレーション検出器を新規に製作した。反応標的の上流に約 3 m 離して 2 台の検出器を設置し、飛行時間を測定した。その他のセットアップは R5 年度のものと同じである。

Ti ビームを利用した目的は、HIMAC で得られるできるだけ高いエネルギーのビームを用いて、広範囲で荷電変化断面積のエネルギー依存性を測定するためであった。R5 年度に 550-700 MeV/u のデータを取得済みなので本測定によって目的を達成した。

#### 4. 今年度の研究成果と解析結果

図 1 に R6 年度のビームタイムで得られた  $^{46}\text{Ti}$  の荷電変化断面積エネルギー依存性の結果を示す。標的には炭素板を用いた。厚さを 6, 12, 18, 23, 28, 40 mm と変化させた。エネルギーにして 200-400 MeV/u の断面積データに相当する。断面積は統計精度 1% 以下の高精度で得られた。まだすべての解析が完了していないため、結果の一部である。また、R5 年度に得られた高エネルギーデータも一緒に示した。

その結果、中間～高エネルギー領域ではほとんどエネルギー依存性がないことが分かる。図中の 3 本の実線は、下から蒸発効果なしの場合、真ん中の赤線が蒸発効果ありで励起エネルギー 27 MeV の場合、一番上の青線は同じく励起エネルギー 45 MeV のグラウバー計算値[4]である。今回の測定によりビームエネルギーに依存して励起エネルギーが変化していること、あるいはまた、荷電変化断面積のエネルギー依存性がそもそもグラウバー理論とは異なることが明らかになった。荷電変化断面積は最近国内外で測定されているが、エネルギー依存性については見逃されてきた。今回の結果は、過去に H246 にて  $^{28}\text{Si}$  を測定した結果と同傾向で

あり、核反応メカニズムの観点から興味深い[1]。

## 5. 今後の展開

物理汎用室が使用できないため、高エネルギーデータの取得は困難な状況にある。しかしながら、生物照射室にて低～中間エネルギーでの測定が可能であるため、今後測定核種を精査しながら進め、エネルギー依存性を明らかにしたい。

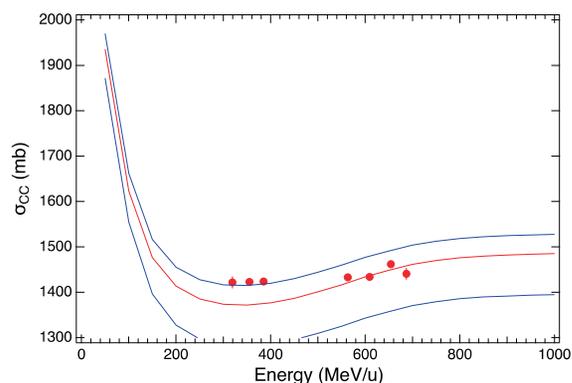


図 1:  $^{46}\text{Ti}$  の荷電変化断面積エネルギー依存性。

## 参考文献

- [1] T. Yamaguchi et al., Phys. Rev. C 82, 014609 (2010)
- [2] T. Yamaguchi et al., Phys. Rev. Lett. 107, 032502 (2011)
- [3] S. Yamaki et al., Nucl. Instr. Meth. B 317, 774 (2013)
- [4] M. Tanaka et al., Phys. Rev. C 106, 014617 (2022)

- 
- a. 埼玉大学 理工学研究科  
Saitama Univ.
  - b. 量子医科学研究所  
QST
  - c. 筑波大学 数理物質系  
Univ. of Tsukuba

## 24H443 R6 年度 研究成果一覧

(原著論文)

- なし

(学会及び研究会発表)

- T. Yamaguchi, RI beam experiments with fragment separator and storage ring, International workshop on nuclear physics related to HIAF, Huizhou, China, 16-19 Apr. 2024 (招待講演)

(学位論文)

- 安田伊吹： $^{46}\text{Ti}$ の荷電変化断面積の測定、埼玉大学理学部物理学科、令和6年度
- 岩本怜： $^{46}\text{Ti}$ の荷電変化断面積の測定、埼玉大学理学部物理学科、令和6年度

# 高放射線耐性を持つ新素材半導体検出器の研究

## Research of a novel semiconductor detector with high radiation tolerance (24H455)

外川学<sup>a</sup>, 廣瀬茂輝<sup>b</sup>, 飯田哲<sup>b</sup>, 井村将隆<sup>c</sup>, 板橋浩介<sup>a</sup>, 磯部忠昭<sup>d</sup>, 宮原正也<sup>a</sup>  
西永慈郎<sup>e</sup>, 奥村宏典<sup>b</sup>, 浦崎圭吾<sup>b</sup>

M. Togawa<sup>a</sup>, S. Hirose<sup>b</sup>, S. Iida<sup>b</sup>, M. Imura<sup>c</sup>, K. Itabashi<sup>a</sup>, T. Isobe<sup>d</sup>, M. Miyahara<sup>a</sup>  
J. Nishinaga<sup>e</sup>, H. Okumura<sup>b</sup> and K. Urasaki<sup>b</sup>

### Abstract

For the particle detector in high radiation environment, we have developed new semiconductor detectors by the Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) and Gallium Nitride (GaN). In 2024, a thick type CIGS detector and the GaN pixel detector were tested with 290 MeV/n Xe beam at the HIMAC. For the CIGS detector, the 5 and 25  $\mu\text{m}$ -thick sample were irradiated by Xe ions and outputs are increased for thicker sample as expected. The first prototype of GaN pixel detector successfully detects the Xe particle as well as the strip type GaN detector tested in 2022.

### 1 Motivation

Silicon is commonly used as a sensor material in wide variety of imaging application. In recent high energy and intensity beam experiments, high radiation tolerance is required and new semiconductor detector consists of radiation hard material have been investigated. A wide-gap semiconductor, such as Gallium Nitride (GaN), is one of good candidates with high binding energy among nucleons and low leakage current. The Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) semiconductor is also expected to have high radiation tolerance with the recovery feature with the compensation of defects by ions.

The small samples of CIGS (2  $\mu\text{m}$  thick\*) and GaN (2, 10  $\mu\text{m}$  thick) detectors were tested with 400 MeV/n Xe beam at the HIMAC and both successfully detected Xe ion as a single event. For the CIGS detector, the outputs reduced by irradiation of the Xe beam, while

it was recovered with the heat annealing at 130 °C [1]. To see more details of recovery behavior of the CIGS detector, the 2  $\mu\text{m}$  thick were irradiated Xe ions with high rate and long time, up to 0.8 MGy. The repetition about recovery is confirmed. The heat annealing has temperature dependence and it seems there is sharp changes between 90 and 130 °C. For the GaN detector, the GaN strip detector successfully detected the Xe ion [2]. They are summarized in publications [3], [4], [5].

In 2024, thicker CIGS sample, 5 and 25  $\mu\text{m}$ , were irradiated and tested in terms of output charges. About the GaN, first pixel type detector was irradiated.

### 2 Setup

#### 2.1 CIGS and GaN detector

The CIGS and GaN strip detectors are shown in Figure 1. The geometries of CIGS in each pad are circle shape with  $\phi=500 \mu\text{m}$  and  $\phi=100 \mu\text{m}$  for 5  $\mu\text{m}$  and 25  $\mu\text{m}$  active layer thickness samples, respectively. About the GaN pixel detector, pixel size is  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  and the active layer is 10  $\mu\text{m}$ .

#### 2.2 Setup at HIMAC

The experimental setup is shown in Figure 2. In previous twice irradiation tests, we used 400 MeV MeV/n Xe beam at the physics and general-purpose irradiation room, but it has been shutdown from 2023 unfortunately. Alternatively, the 290 MeV/n was used at the biological irradiation room. Actually 290 MeV/n is the value of the acceleration, while the beam energy at our sample location may be reduced to 170 MeV/n due to the air and materials on the beam trajectory which was reported at other experiment in this room [6]. Basically the same readout equipments were used as in

<sup>a</sup>. 高エネルギー加速器研究機構

<sup>b</sup>. 筑波大学

<sup>c</sup>. 物質・材料研究機構

<sup>d</sup>. 理化学研究所

<sup>e</sup>. 産業技術総合研究所

\*Only thickness of active layer

the previous experiments. The beam size was adjusted about  $\phi$  5 mm by a fluorescent plate at the beginning. During irradiation, the beam power was typically set to  $3 \times 10^6$  particles per pulse.

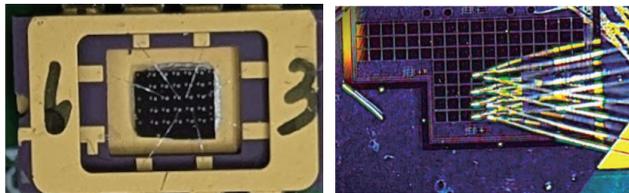


Fig. 1: Sample pictures of Left) the CIGS detector Right) the GaN pixel detector



Fig. 2: Setup of the beam test in 2024. Left) The CIGS detector Right) Whole view at the biological irradiation room.

### 3 Results

For the CIGS detector, outputs of the 5 and 25  $\mu\text{m}$  thick sample are shown in Figure 3. High voltage are supplied as -5.6 V and -16.6 V for 5 and 25  $\mu\text{m}$  thick sample, respectively. The outputs are roughly 4 times, they are close to proportional response, but 25  $\mu\text{m}$  is bit smaller than the expected. For the 5  $\mu\text{m}$  sample, it was fully depleted, while the 25  $\mu\text{m}$  sample was partially depleted, it may cause charge collection differences between them.

For the GaN pixel detector, it successfully detected the Xe ion as shown in Figure 4. We can see a single pixel hit event-by-event and signal peak which is well separated from the noise. The device is successfully supplied bias voltage up to 200 V and still it is not fully depleted as shown in Q-V curve. With the comparison with the  $\alpha$ -source outputs, the charge correction is 16 times higher, it is almost expected with the GEANT4 simulation. More detailed study is on going.

### 4 Conclusion

For the particle detector in high radiation environment, we have developed new semiconductor detectors by the CIGS and GaN. For the CIGS detector, 5 and 25  $\mu\text{m}$  thick samples were irradiated. The outputs are

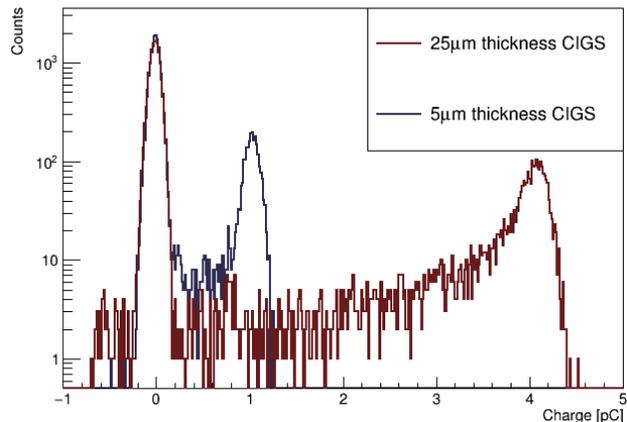


Fig. 3: CIGS detector outputs with Xe ion irradiation.

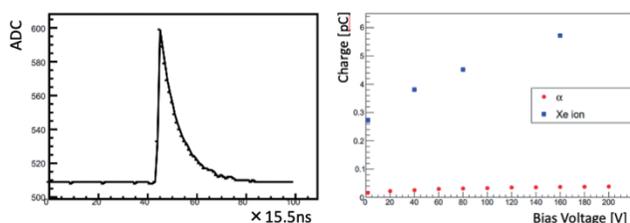


Fig. 4: Left) Single Xe ion event detected by the GaN detector. Right) Q-V curve with  $\alpha$ -particle and Xe ion.

roughly 4 times, close to the proportional response, but 25  $\mu\text{m}$  was bit smaller than the expected. It may be due to partial depletion of the 25  $\mu\text{m}$  thick sample.

About the GaN detector, first pixel type detector was irradiated. It successfully detected the Xe ion and output is almost consistent with the expectation of  $\alpha$ -source experiment and GEANT4 simulation.

### References

- [1] M. Togawa et al., HIMAC Prog. Rep. 21H455 (2021).
- [2] M. Togawa et al., HIMAC Prog. Rep. 21H455 (2022).
- [3] “Study of radiation tolerance of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> detector”, K. Itabashi *et al.*, NIM A, 1067 (2024) 169637.
- [4] “The CIGS semiconductor detector for particle physics”, M. Togawa *et al.*, JINST 19 C05042.
- [5] “Degradation of vertical GaN diodes during proton and xenon-ion irradiation”, Hironori Okumura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 62 064001.
- [6] Z. Chen et al., HIMAC Prog. Rep. 477.

## 研究成果 (24H455)

(学会及び研究会口頭発表など)

「窒化ガリウム半導体を用いたピクセル検出器の特性評価」,  
日本物理学会 2025 春季大会 飯田哲 他 2025. 3

「LGAD 構造を用いた GaN ピクセル粒子位置検出器の作製」,  
第 72 回 応用物理学会 春季学術講演会 奥村宏典 他 2025. 3

「粒子検出器開発に向けた CIGS 半導体の熱回復特性評価」,  
日本物理学会 第 79 回年次大会 板橋浩介 他 2024. 9

“Development of high radiation tolerance detector with CIGS”,  
Strasbourg, France, PIXEL 2024 18-22 November 2024.

(論文)

“Study of radiation tolerance of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> detector”,  
K. Itabashi, S. Fujii, M. Imura, T. Isobe, M. Miyahara, J. Nishinaga, H. Okumura  
and M. Togawa,  
NIM A, 1067 (2024) 169637.

“The CIGS semiconductor detector for particle physics”,  
M. Togawa, S. Fujii, M. Imura, K. Itabashi, T. Isobe, M. Miyahara, J. Nishinaga and  
H. Okumura,  
*JINST* **19** C05042.

“Degradation of vertical GaN diodes during proton and xenon-ion irradiation”,  
Hironori Okumura, Yohei Ogawara, Manabu Togawa, Masaya Miyahara, Tadaaki  
Isobe, Kosuke Itabashi, Jiro Nishinaga and Masataka Imura  
*Jpn. J. Appl. Phys.* **62** 064001.

# Study of the near-symmetric fusion cross section and search for new isotopes 対称重イオン核融合反応の断面積評価と新同位体探索 (22H466)

J.T. Li<sup>a</sup>, H. Qin<sup>a</sup>, N. Imai<sup>a</sup>, R. Yokoyama<sup>a</sup>, Y. Anuar<sup>a</sup>, N. Kitamura<sup>a</sup>, R. Kojima<sup>a</sup>, Y. Yamamoto<sup>a</sup>

李嘉泰、秦昊、今井伸明、横山輪、ヤスミンアヌアー、北村徳隆、小嶋玲子、山本康嵩

D. Nishimura<sup>b</sup>, C. Fukushima<sup>b</sup>, S. Endo<sup>b</sup>, F. Sato<sup>b</sup>, K. Maeda<sup>b</sup>, C. Inoue<sup>b</sup>, R. Kageyama<sup>b</sup>, K. Matsuyama<sup>b</sup>, N. Itou<sup>b</sup>  
西村太樹、福嶋知隼、遠藤駿、佐藤風吹、前田啓太、井上千波、影山理音、松山健斗、浦崎圭吾、伊藤波音、  
E. Takada<sup>c</sup> 高田栄一

## Abstract

Synthesizing heavy elements using fusion reaction often suffers from the fusion hindrance by quasi-fission. To evaluate fusion hindrance effects in heavy-ion reactions to form the compound nucleus of around  $Z\sim 90$  and to search for new isotopes, a heavy ion collision experiment was conducted at the medium-energy beam line in HIMAC early 2025 using  $^{136}\text{Xe}$  beam of 6 MeV/nucleon upon a target of  $^{89}\text{Y}$  of  $2.5\mu\text{m}$  thickness. Thanks to the inverse kinematics, the evaporation residue moved downstream and stopped in the implantation graphene sheet. The alpha decays from the residues were detected by position-sensitive mosaic detectors in beam-off periods. An additional offline activation in the implantation material was measured with the HPGe detectors.

## 1. Background and Motivation

An "island of stability" is predicted near  $Z=114$  and  $N=184$ , where nuclei can exhibit extremely long half-lives due to shell effects. Synthesizing these nuclei via heavy-ion fusion requires a detailed understanding of the fusion dynamics. Particularly under conditions where the product of atomic numbers, referred to as  $Z_1Z_2$ , of projectile and target exceeds 1600, the production cross section exponentially decreases as a function of  $Z_1Z_2$ , which is called fusion hindrance.

In past studies, superheavy elements (SHEs) have mainly been synthesized via highly asymmetric systems such as  $^{48}\text{Ca}$  + actinide targets to avoid the fusion hindrance. In contrast, near-symmetric systems like the present case of  $^{136}\text{Xe} + ^{89}\text{Y}$  have not been studied yet well because they are expected to suffer from the fusion hindrance. According to a phenomenological formula of the fusion hindrance [1], the production cross section of evaporation residues (ERs) in the present system of  $^{136}\text{Xe}+^{89}\text{Y}$  is expected to be suppressed by as large as  $10^4$ . The systematic study of near

symmetric reactions may lead to a new experimental method to synthesize SHEs. The compound nucleus  $^{225}\text{Np}$  formed in this reaction system decays via alpha emission after the neutron evaporation, which can be effectively detected using in-beam spectroscopy in inverse kinematics.

## 2. Previous Studies and Objectives

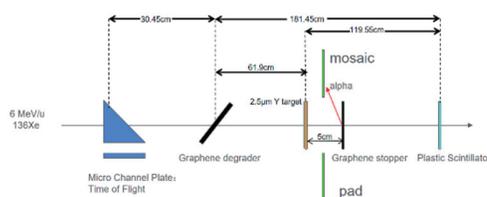
In the 23H466 experiment, the fusion reaction of the  $^{136}\text{Xe}$  beam with the  $^{\text{nat}}\text{Zn}$  target was studied, confirming the feasibility of measuring alpha decays from ERs in inverse kinematics using an optimized detection system. Because of the inverse kinematics, the ER still had kinetic energy enough to exit from the target and stopped in the implantation material. The experiment was conducted with the pulsing beam with six spills on and six spills off, which enabled us to measure alpha particles from the ER freely from other events originating from the reaction such as quasi-fission. The energy of the alpha depends on the emission angle from the implantation material because the angle determines the trajectory of the alpha inside the material. To implement the

position sensitivity in the alpha detector, we have developed a mosaic-type detector, which consists of sixty-four photo-diodes of S13955-1 in  $8 \times 8$  matrix. Each diode has an active area  $7.52 \times 7.52 \text{ mm}^2$  with small dead space. The position dependent alpha energies measured were in good agreement with the expected energy spectrum of Po isotopes. The excitation function of the production cross sections of ER was as large as those synthesized by other reaction systems, indicating no significant fusion hindrance in  $^{136}\text{Xe} + \text{natZn}$  system [2].

### 3. Experimental Setup and Methods

The experiment was conducted at the HIMAC MEXP beamline. The beam energy of  $^{136}\text{Xe}$  was degraded down from 6 to 4.4 MeV/nucleon by a rotatable graphene sheet of  $10 \mu\text{m}$  thickness. The energy was confirmed by measuring the TOF between a MCP just upstream of the degrader and a plastic scintillator 181 cm downstream of the target. The beam was directed on a target of  $^{89}\text{Y}$  evaporated on a graphene sheet of  $18 \mu\text{m}$  thickness. The thickness of  $^{89}\text{Y}$  was determined to be  $2.5 \pm 1.1 \mu\text{m}$  by measuring the energy loss of alpha from  $^{241}\text{Am}$ . A schematic drawing of the experimental setup is shown in Fig. 1. To avoid the damage from fission, the implantation material was separated from the target by 5 cm. A mosaic detector was located between the target and the implantation material. They were placed not to face the target. Two large-area PIN Si photodiodes of  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  (Hamamatsu S14536) were also placed downstream. The beam was injected on the target in a pulsed mode with two spills on and two spills off.

During the break in the daytime, the activation of the implantation material were measured with



**Figure 1** A schematic drawing of the experimental setup.

HPGe detectors.

### 4. Discussion and Summary

Cross sections to synthesize  $^{220}\text{Np}$  from  $^{40}\text{Ar} + ^{185}\text{Re}$  reaction which formed the same compound nucleus  $^{225}\text{Np}$  as the present system was measured to be  $40_{-15}^{+20} \text{ pb}$  at 200 MeV in the center of mass energy [3]. The simple consideration with the fusion hindrance and the compound forming cross section of  $^{225}\text{Np}$ , a few events were expected to be observed in the 3 days MT with  $^{136}\text{Xe} + ^{89}\text{Y}$ . However, surprisingly, we measured several alpha particles for 1 hour, indicating the production cross sections of heavy elements of around  $1 \mu\text{b}$ . This means no fusion hindrance in this system. Further analysis on going.

[1] V.I. Zagrebaev and W. Greiner, Nucl. Phys. A 944 (2015) 257-307.

[2] J.T. Li, et al., Nucl. Inst. Meth. A 1070 (2025) 170019.

[3] Z. Zhiyuan et al., Nuclear Physics Review 37, 455-461 (2020), M.D. Sun et al., Phys. Lett. B771, 303-308 (2017).

a. Center for Nuclear Study, the University of Tokyo

東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター

b. Department of Natural Science, Tokyo City University

東京都市大学 自然科学科

c. QST-HIMAC, 量子科学研究開発機構

## 22H466 研究成果一覧

### 1) 原著論文

- [1] J. T. Li et al Nuclear Physics A 1059, 123079 (2025).
- [2] J.T. Li, et al., Nucl. Inst. Meth. A 1070, 170019 (2025).
- [3] J.T. Li et al., EPJ Web of Conferences, 306, 01037 (2024).

### 2) 学会、および研究会の口頭発表、ポスター発表

#### Poster 発表

- 1) **J. T. Li** et al., “Towards the shell structure at Island of Stability: Probing heavy-ion fusion reactions in near symmetric systems”, Singl-particle and collective motions from nuclear many-body correlation (PCM2025), Aizu, Japan, March 4-7th, 2025.
- 2) **J. T. Li** et al., “Probing heavy-ion fusion reaction in  $^{136}\text{Xe} + ^{64}\text{Zn}$  in inverse kinematics”, 14th International Symposium Nucleus-Nucleus Collision 2024, Whistler, BC Canada, August 18-23th, 2024.
- 3) **J. T. Li** et al., “Study of heavy-ion fusion reactions in  $^{136}\text{Xe} + \text{natZn}$  in inverse kinematics”, SNP-CNS Summer School 2024, Wako, Japan, August 3-8th, 2024.

#### 口頭発表

- 4) 福島知隼, “HIMAC での放射化法によるキセノンビームの核融合反応の研究” 第 13 回停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会



# 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



# Annual Report for “Nuclear Fragment Spectrometer” (23H248)

S.P. GEORGE<sup>A,B</sup> and T. CAMPBELL-RICKETTS<sup>A,C</sup>

<sup>A</sup> SPACE RADIATION ANALYSIS GROUP, NASA JOHNSON SPACE CENTER, HOUSTON, TEXAS, USA, <sup>B</sup> NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), HOUSTON, TEXAS, USA, <sup>C</sup> LEIDOS, HOUSTON, TEXAS,

USA

## Abstract

This report summarizes the progress for the first year of work on the ‘Nuclear Fragment Spectrometer’. The goal of this project is the design and construction of a lightweight instrument for measurement of light ion cross sections. Work this year validated key experimental concepts for the spectrometer culminating in the assembly of a prototype system at the end of the years work.

## 1. Background

The objective of this work is the construction of a compact spectrometer capable of measuring double differential cross sections of light ion fragmentation by use of Timepix3 hybrid pixel detectors with a magnetic analyzer. Measurement of these cross sections (especially production of H, D, T, He3 and He4) is needed to fill key physics gaps in space radiation transport codes. The basic principal of operation is use of a pair of Timepix3 for particle tracking, magnetic deflection for Z/A discrimination and a steeply tilted Timepix3 analyzer for identification of particle kinetic energy given an input charge (figure 1). Compared to existing ground based spectrometers this device is very small and light and can be considered the first stage proof of concept for future space based spectroscopic instrumentation. This work builds on our previous work at HIMAC over many years which has focused on the application of Timepix to space radiation measurement which has resulted in many flight instruments including detectors on the International Space Station, the Orion Spacecraft (Artemis I), the “Biosentinel” and “Peregrine Mission 1” scientific probes and the Polaris Dawn and Fram2 private astronaut missions.

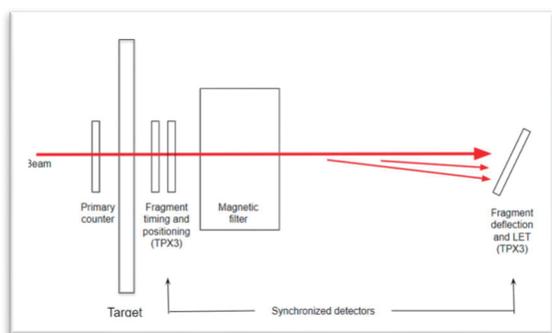


Figure 1 – Nuclear fragment spectrometer conceptual design

## 2. Prior Work

This was the first year of this project, however prior measurements at HIMAC (as part of a different project) had shown that hybrid pixel detectors could measure charge changing cross sections down to  $Z=1$ .

## 3. Results

Experimental work at HIMAC and other facilities was largely based around development and testing of the spectrometer hardware. Key goals for the year were; design of the initial spectrometer components including stages and magnet (figure 2), validation of the magnet design; optimization of the tracker including detector separation distance; development of procedures for precise alignment of the detector elements using particle beams, testing of time synchronization, measurement of the tracking uncertainty and triggering of the 4 detector stack and test reconstruction of the particle tracks through all 4 layers of silicon.

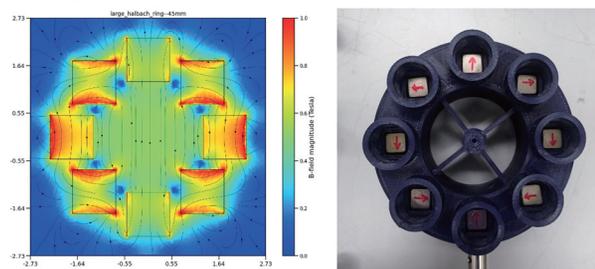


Figure 2 – Finite element simulation (left) and experimental magnet design for ‘halfbach array’ style deflection magnet

This testing was achieved over the year through a dedicated testing campaign including lab testing and 3 beams – one with protons at the Chicago Proton Center, carbon ions at HIMAC and then a variety of species at the NASA Space Radiation Laboratory. At the end of this period all test objectives were completed.

The basic magnet design and deflection was validated in a vacuum chamber at JSC, during test runs at HIMAC triggering and simultaneous acquisition of the data was confirmed with resolution of 5 ns (figure 3), as well as optimization of the tracker, validation of the developed detector alignment procedure and measurement of the tracking uncertainty (figure 4). Magnetic deflection was also measured to demonstrate energy discrimination (figure 5).

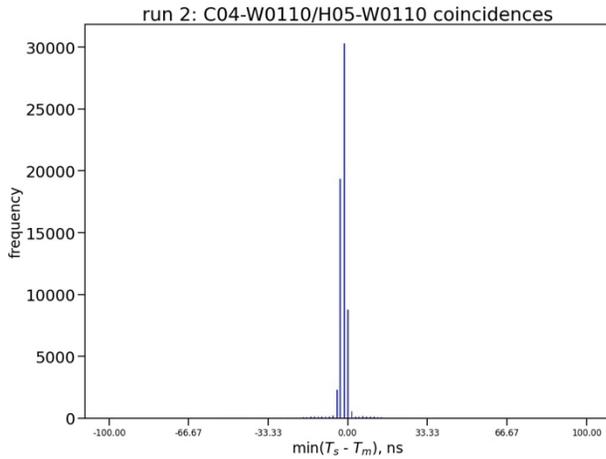


Figure 2 – Time coincidences between detector pair measured with two of the four Timepix3 detectors. The tracks are coincident with a resolution of  $\sim 5$  ns.

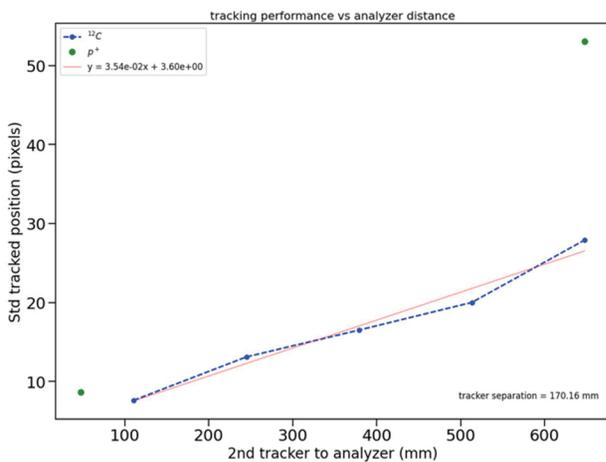


Figure 3 – Measured tracking uncertainty, in units of 55  $\mu\text{m}$  pixels, for protons and carbon

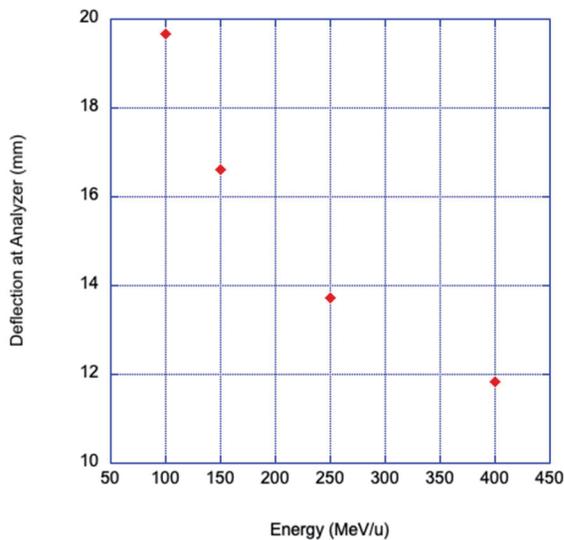


Figure 4 – Mean deflection at analyzer for fixed magnet design as a function of Helium kinetic energy.

Essentially, this campaign was used to validate and refine all of the key parts of the experimental design. Following this a later campaign at the NASA Space Radiation Laboratory in October put all of the pieces together

including magnet, 4 layer tracker and target and attempted a real cross section measurement as shown in figure 5. Analysis of this data is ongoing but has already driven several experimental optimizations to the setup including a need to improve the calibration of the analyzer Timepix3 detector, to experimentally calibrate the magnet and possibly to use a second magnet to increase the magnetic deflection.

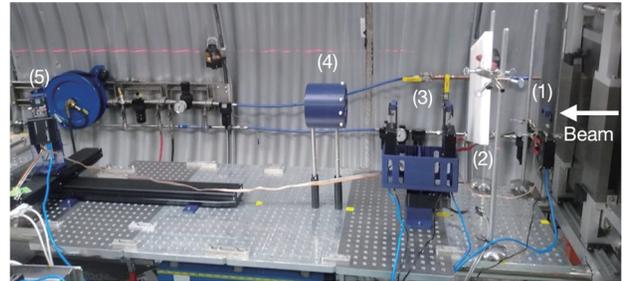


Figure 5 – Complete cross section measurement setup including (1) counter, (2) polyethylene target, (3) tracker, (4) deflection magnet and (5) analyzer stage.

Work this year will focus on the following experimental aspects

- (1) Attempts to measure a simple experimental cross section in the forward direction and compare to reference data – for example 400 MeV Carbon on Aluminum
  - (2) Fine tuning of the experimental setup including use of a second magnet to increase the magnetic deflection, improving the calibration of the Timepix3 detectors to high LET particles using existing methods in the literature and direct calibration of the magnetic deflection instead of relying on finite element modelling as has previously been used.
- And if experimental time permits:
- (3) Measurement of a simple experimental cross section at several angles not in the forward direction.

Ultimately this project would expand to use multiple setups in parallel for simultaneous measurement of fragments created at several different angles by multiple targets.

## List of Publications

The results of this work have not yet been disseminated outside of our group. However prior work on Timepix instrumentation supported by HIMAC has been widely disseminated in the past year.

### (1) Publications

- (1) Rahmanian, S., Slaba, T. C., George, S., Braby, L. A., Bhattacharya, S., Straume, T., & Santa Maria, S. R. (2025). Galactic cosmic ray environment predictions for the NASA BioSentinel Mission, part 2: Post-mission validation. *Life Sciences in Space Research*, *44*, 134-142.
- (2) Slaba, T. C., Rahmanian, S., George, S., Laramore, D., Norbury, J. W., Werneth, C. M., & Zeitlin, C. (2025). Validated space radiation exposure predictions from earth to mars during Artemis-I. *npj Microgravity*, *11*(1), 6.
- (3) George, S. P., Gaza, R., Matthiä, D., Laramore, D., Lehti, J., Campbell-Ricketts, T., ... & Berger, T. (2024). Space radiation measurements during the Artemis I lunar mission. *Nature*, *634*(8032), 48-52.
- (4) Stoffle, N. N., Campbell-Ricketts, T., Castro, A., Gaza, R., Zeitlin, C., George, S., ... & Schram, A. (2023). Hera: A timepix-based radiation detection system for exploration-class space missions. *Life sciences in space research*, *39*, 59-66.
- (5) Kroupa, M., Campbell-Ricketts, T., George, S. P., Bahadori, A. A., & Pinsky, L. S. (2023). Particle showers detected on ISS in Timepix pixel detectors. *Life Sciences in Space Research*, *39*, 52-58.

### (2) Oral presentation

- (1) S.P. George et al [Radiation Measurements on ISS and Biosentinel from the May 2024 and June 2024 Space Weather](#), 27<sup>th</sup> WRMISS, Boulder Sept 2024
- (2) S. P. George et al [Latest Radiation Results from the Biosentinel and Astrobotic Peregrine Missions](#), 27<sup>th</sup> WRMISS, Boulder Sept 2024
- (3) T. Campbell-Ricketts et al [Ten Years of Radiation Environment Monitors on ISS](#), 26<sup>th</sup> WRMISS, Rome Sept 2023
- (4) S. P. George et al [First Radiation Measurement Results from the Biosentinel Cubesat](#), 26<sup>th</sup> WRMISS, Rome Sept 2023
- (5) S. P. George et al Radiation Measurements with the Timepix based HERA Instrument on Artemis I and Biosentinel, IWORID 2023, Oslo, Norway

# Annual Report for 23H377 in FY 2024

## Novel Space Dosimetry System for the Czech Satellite in the Cislunar Environment

O. Ploc<sup>a</sup>, M. Kákona<sup>a</sup>, I. Ambrožová<sup>a</sup>, M. Sommer<sup>a</sup>, J. Šlegl<sup>a,b</sup>, M. Lužová<sup>a,b</sup>,  
O. Velychko<sup>a</sup>, H. Kitamura<sup>c</sup>, S. Kodaira<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Nuclear Physics Institute of the CAS, Czechia, <sup>b</sup> Czech Technical University in Prague, Czechia,  
<sup>c</sup> National Institutes for Quantum Sciences, Japan

### Abstract

In FY2024, we conducted two successful experimental campaigns at HIMAC using 400 MeV/u carbon (July 2024) and neon (March 2025) beams. These experiments were 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 (PArTicle 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 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. Using CTED it is possible to measure and compare LET in silicon and tissue equivalent material (plastic scintillator). As it is a new concept, it is crucial to perform measurements with a variety of high LET particles in known conditions. We tested the properties of the Si-diode separately in

a model configuration in the LABDOS detectors (<https://github.com/UniversalScientificTechnologies/LABDOS01>). The detectors were tested in a He beam, 150 MeV/u. The aim of the experiment was to determine the depth of the depleted region of the diode.

### 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 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 previously 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.

For Si-ions, the calculated LET was 0.75 MeV·cm<sup>2</sup>/mg in polyethylene and 0.57 MeV·cm<sup>2</sup>/mg in silicon. The corresponding measured “LET equivalent” values were 17.3 in the scintillator and 4.3 in the silicon detector.

For Ar-ions, the calculated LET values were 0.94 MeV·cm<sup>2</sup>/mg in polyethylene and 0.73 MeV·cm<sup>2</sup>/mg in silicon, while the measured “LET equivalent” values were 19.1 in the scintillator and 4.7 in silicon.

For N-ions, the calculated LET was 0.17 MeV·cm<sup>2</sup>/mg in polyethylene and 0.13 MeV·cm<sup>2</sup>/mg in silicon. The measured “LET equivalent” values were 10.3 in the scintillator and 2.3 in silicon.

These results demonstrate 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.

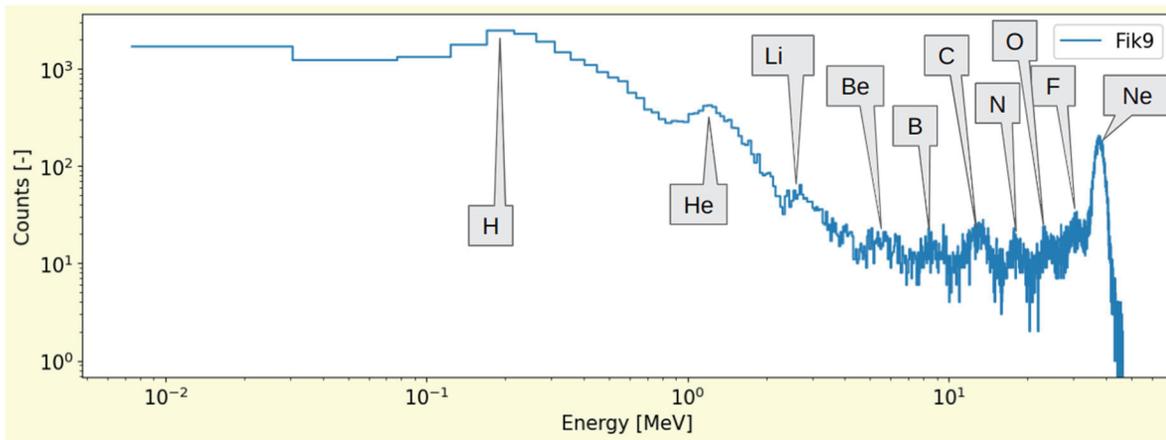


Figure 1. Fragmentation of the Ne-ions visible in the energy deposition spectra obtained with Si-PIN diode.

#### 4. Results in FY2024

July 2024: C 400 MeV/u in HIMAC BIO  
 March 2025: Ne 400 MeV/u in HIMAC BIO

In 2024, we focused on enhancing the performance of our silicon detector system, with particular emphasis on extending its usable energy range. This feature is especially important for space-based applications, as cosmic radiation consists of a broad spectrum of ions of various masses and energies. A wide dynamic range allows the detector to accurately register and characterize both low-energy and high-energy particles, which is essential for comprehensive radiation environment monitoring in space.

To achieve this, we successfully modified the readout electronics of the Si-detector, enabling it to record deposited energies up to approximately 100 MeV, see Figure 1. This marks a significant improvement over the previous configuration.



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

To validate the system’s performance, we conducted a series of tests using heavy ion beams, see Figure 2. These measurements confirmed that the detector reliably covers the energy range from 40 keV to 30 MeV. The extended range and

confirmed sensitivity across this spectrum significantly improve the detector’s suitability for deployment on satellite platforms operating in varying space radiation conditions.

#### 4. Conclusions

The HIMAC facility was instrumental in advancing the PARDAL hybrid detector. Our results from FY2024 beamtime indicate the Si-detector’s strong potential for accurate, low-power dosimetry in complex space radiation environments. Continued refinement, including the use of thinner scintillators and advanced calibration methods, will support integration into upcoming satellite platforms. The PARDAL detection system, specifically designed for space missions where heavy ions are a dominant component of the radiation field, has demonstrated promising performance. Through experimental validation using heavy ion beams, we confirmed the capability of the CTED subsystem to perform LET measurements directly in tissue-equivalent materials. These results are essential for ensuring dosimetric accuracy in realistic space environments. Investigating the interaction of well-defined ion species with solid-state detectors remains a key part of the development process. The HIMAC experiments provided critical insight into the response characteristics of both the silicon and scintillator components of the PARDAL system. This understanding is vital for interpreting detector data under the complex, mixed-field conditions.

#### Acknowledgment

The work was supported by HIMAC project H377.

List of publications for AnnualReport FY2024, project 23H377

(1) Publications

Vernetto, S., Vigorito, C. F., Kakona, M., Dvorak, R., Kodaira, S., Cirilli, S., ... & Zanini, A. (2024). Performance of the LABDOS01 spectrometer in dosimetric measurements. *arXiv preprint arXiv:2412.01515*.

レーザー加速イオン特性評価のための高精度エネルギー spektrometa の開発  
Development of the energy spectrometer for characterization of laser-accelerated ions  
(23H387)

安部 勇輝<sup>a</sup>, 南 卓海<sup>a</sup>, 岩佐 健生<sup>a</sup>, 田實 太陽<sup>a</sup>, 二階堂 颯佳<sup>a</sup>, 安井 稔遥<sup>a</sup>,  
尾崎 玲於奈<sup>b</sup>, 豊永 啓太<sup>b</sup>, 前川 馨<sup>b</sup>, 金崎 真聡<sup>b</sup>, 田中 周太<sup>c</sup>, 小平 聡<sup>d</sup>,  
時安 敦史<sup>e</sup>, 郡 英輝<sup>f</sup>, 蔵満 康浩<sup>a</sup>, 福田 祐仁<sup>g</sup>  
Y. Abe<sup>a</sup>, T. Minami<sup>a</sup>, K. Iwasa<sup>a</sup>, T. Tajitsu<sup>a</sup>, F. Nikaido<sup>a</sup>, T. Yasui<sup>a</sup>, R. Ozaki<sup>b</sup>,  
K. Toyonaga<sup>b</sup>, K. Maekawa<sup>b</sup>, M. Kanasaki<sup>b</sup>, S. Tanaka<sup>c</sup>, S. Kodaira<sup>d</sup>,  
A. Tokiyasu<sup>e</sup>, H. Kohri<sup>f</sup>, Y. Kuramitsu<sup>a</sup>, Y. Fukuda<sup>g</sup>

## Abstract

This work is aimed at developing multiple diagnostic methods that allow to characterize GeV-scale ion beams driven by lasers. We have published experimental results on solid-state nuclear track detectors (CR-39, nuclear emulsions *etc.*) [4-11] and scintillator-based detectors [12, 13] obtained during the previous beam time at HIMAC. This year, we continued experiments on a multi-pixel liquid scintillator panel coupled with multi-arrayed silicon photomultipliers (SiPMs). The multi-pixel detector is a possible solution to enable particle counting analysis in laser-driven experiments with limited shot rates. The detector was also tested for its capability of detecting secondary particles ( $\pi^+$  *etc.*) generated by the incidence of protons with energies above 200 MeV/u. The experiment was quite successful, and therefore, we hope to continue data acquisition at HIMAC in future beam time.

## 1. 研究の目的とバックグラウンド

レーザーイオン加速は小型の高速イオン源の要素技術として多様な応用展開が期待される。我々はサブミクロンの水素クラスターや、グラフェンベースのナノ薄膜をターゲットに用いた独自の加速手法により、レーザー駆動による sub-GeV 級の高純度・準単色の陽子線や炭素線の生成を目指している[1-3]。実験では、発生するイオンの空間・エネルギー分布の評価が最重要課題である。しかし、レーザー駆動のイオンビームはピークフルエンスが極めて高い上に、陽子や重イオン、X線、電子が同時発生するため、イオン計測に適用可能な検出器に限られる。

本研究では、レーザー加速イオンの空間・エネルギー分布等の特性評価を目的とし、①イオンのみに感度を有することを特徴とする CR-39、②コンパクトさを特徴とする原子核乾板、及び、③リアルタイム性を特徴とするシンチレータ、を用いた sub-GeV 級のイオン計測体系の開発を行う。開発においては、100 MeV/u 以上の陽子及び重イオンに対して核種弁別機能と±10%程度のエネ

ルギー分解能を持つことが重要である。これらの要求を満たす複数の計測手法を確立し、同時に運用できるようにすることで、信頼性の高い測定系の構築を目指す。

## 2. 昨年度までに得られている結果

我々は計測器開発の第一段階として、2017年度より、電子やX線に不感な固体飛跡検出器(CR-39等)を用いた計測器開発に取り組んできた。CR-39と減速材(フッ化炭素樹脂:PTFE)を交互に重ねたスタック型スペクトロメータの開発により、100 - 200 MeV/uの陽子線に対する十分なS/N比とエネルギー分解能を達成した[4, 5]。また、感度の異なる複数の固体飛跡検出器(ポリカーボネート(PC)及びポリエチレンテレフタレート(PET))を組み合わせることで、原子番号や質量電荷比の近いイオン種( $C^{6+}$ と $O^{8+}$ など)の識別精度が飛躍的に向上した[6]。さらに、機械学習を用いた粒子識別アルゴリズムの導入により、固体飛跡検出器(CR-39, FNTD)のデータ解析が高速化され、エッチピットの誤認率などの低減に成功した[7-9]。

第二段階(2019年度~)では、コンパクトさを追求した計測器として、原子核乾板と散乱体を交互に重ねた Emulsion Cloud Chamber (ECC)を開発した。これは粒子の飛程からエネルギーを求める先述のスタック型とは異なり、ECC内での多重クーロン散乱量からイオンのエネルギーを評価する。この評価手法では、高エネルギーイオンを検出器内部で静止させる必要がないことから、CR-39のスタックに比べて肉厚を薄くすることができ、検出器全体の小型化に成功した[10, 11]。

現在は開発の第三段階として、リアルタイム性を追求した計測手法の開発に取り組んでいる。これは加速器施設で一般的に用いられる単一粒子計数法を基本原理としており、シンチレーション検出器を用いて個々の粒子の飛行時間(TOF)とエネルギー付与を分析する。これにより粒子の核

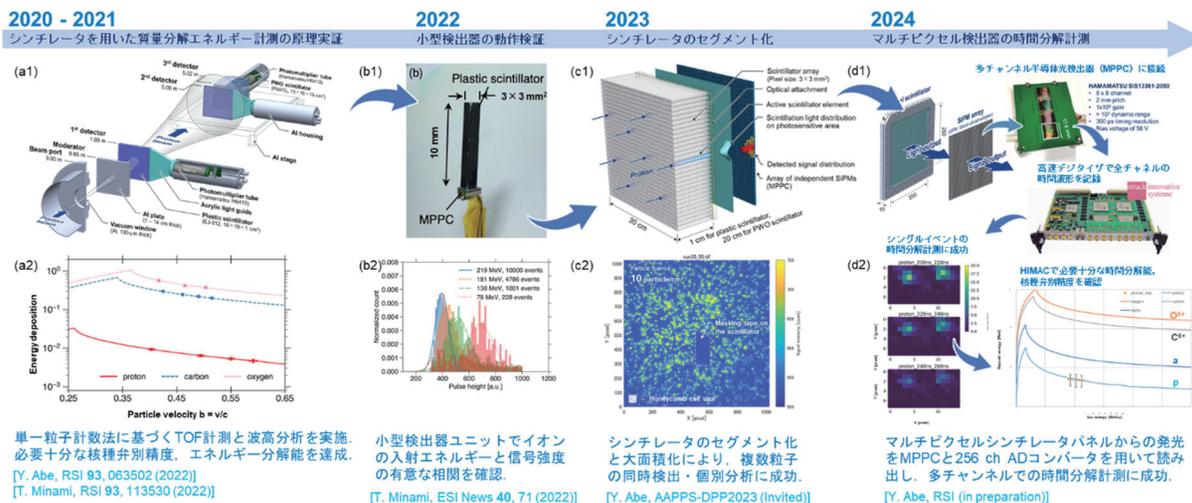


図1 シンチレータを用いたイオン計測法の開発経過の概要。

(a)最も基本的な計測器構成での核種別エネルギー計測の原理実証, (b)マルチピクセル化を想定した小型検出器の動作検証を経て, (c)マルチピクセル液体シンチレータパネルにゲートICCDカメラを組み合わせた多粒子同時検出, (d)マルチピクセル半導体光検出器(MPPC)を組み合わせた多粒子の時間分解計測に成功。

種同定とエネルギー計測を行うことができる。2021年度までに基本的な検出器ユニットで要求性能を達成可能であることを確認し(図1(a)) [12, 13], 2022年度からは, レーザー実験での実用性を考慮したマルチピクセル型の検出器構成の検証に取り組んできた(図1(b), (c)). 検出器をマルチピクセル化することで, 1パルスで多数の粒子を同時に検出・分析できるようになり, 少ないレーザーショット数でも十分な統計精度が得られる。2023年度には, 800 $\mu$ mピッチのアルミ製ハニカム板に有機液体シンチレータを充填した大面積マルチピクセルシンチレータパネルを開発した(図1(c1)). このマルチピクセルシンチレータパネルは高速応答でピクセル間の輝度ムラが非常に小さく, マルチピクセル検出器としての優れた発光特性を示した。このシンチレータパネルの発光を高速ゲート機能付ICCDカメラやマルチピクセル半導体光検出器(MPPC)で読み出し, 1パルスで多数のイオンイベントの同時検出・同時分析に成功した(図1(c)-(d)).

以上の成果は, HIMACでの動作検証の積み重ねによって得られたものであり, 既に論文10編が出版されている。また, 国内外の会議でも招待講演を受けており[14-19], ここ数年で当該分野における本研究への注目度は飛躍的に向上している。

### 3. 今年度の研究内容

#### シンチレータを用いたイオン計測器開発

今年度のビームタイム(2024年3月実施)では, 上記のマルチピクセル検出器の動作検証に加えて, 関西光量子科学研究所のJ-KARENレーザー

施設で現在稼働中のTOF計測器の較正を行った。

前者のマルチピクセル検出器については, エネルギー分解能とピクセル間のクロストークの評価のほか, パイオンやミューオンなどの2次粒子生成に対する検出感度の評価を試みた。200 MeV/u以上のエネルギー領域では, 高エネルギー陽子の衝突によってパイオン( $\pi^+$ )が放出されるため, これを検出することでGeV級イオンの発生を裏付けることができる。特に, レーザー実験ではイオンの速度が光速に近づくほどX線や高速電子との時間弁別が難しくなるため, こうした2次粒子生成を積極的に利用する診断手法は有効である。

後者のTOF計測器は, 図2のように薄型シンチレータを多層構造にしたもので, イオンの最大エネルギー計測に特化した簡易的な計測器であるが, トムソンパラボラや固体飛跡検出器に比べて広い立体角を容易にカバーできるようになったことで, イオンの検出効率が飛躍的に向上した。これにより, 従来のレーザーイオン加速実験では検出できなかった高エネルギー成分の存在がJ-KARENで行われた実験で明らかとなった。こうした成果を論文化するべく, HIMAC実験では計測器の基本的な出力特性(単一粒子に対する時間波形とそのエネルギー依存性など)の評価を行った。

### 4. 今年度の研究成果と解析結果

今年度のビームタイムで, 今後の論文化に必要な基礎データの取得が完了した。実験はHIMAC生物照射室で実施し, 230 MeV/uの陽子ビームを減速材(PMMA)で適宜減速しながらデータ取得を行った。図2(a)の多層シンチレーション検出器

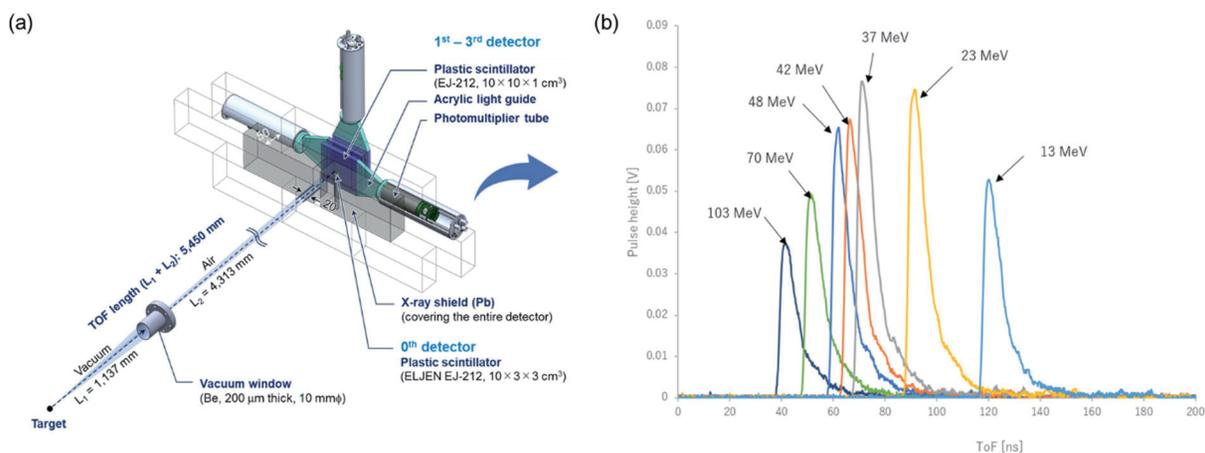


図2 J-KAREN レーザー施設で運用中の多層シンチレーション検出器の較正実験

(a) 多層シンチレーション検出器の構成と (b) 今年度のビームタイムで取得した単一陽子に対する時間波形のエネルギー依存性. 取得した時間波形を用いてレーザー実験の測定データをデコンボリューションすることで, 高エネルギー成分の粒子数などを議論できるようになった.

については, 単一陽子に対する出力時間波形のエネルギー依存性を取得した. これにより, 過去に J-KAREN で行われたイオン加速実験の計測結果から, 高エネルギーイオンの生成数などを議論できるようになった. マルチピクセル検出器については, エネルギー付与の違いを利用して1次粒子(ビーム粒子)と2次粒子(シンチレータ内で生成された反跳陽子等)を識別可能であることを確認し, 現在はパイオンの検出率についてデータ解析中である. 今年度のビームタイムでは, パイオン放出反応 ( $p+p \rightarrow p+n+\pi^+$ ) の閾値付近のデータ取得を行い, NIM, CAMAC, VME 規格のモジュールを用いたデータ取得系の確認が完了した. 今後は 300 MeV/u 以上のビームを用いて, 引き続きパイオンに対する計測器の動作検証を行いたい.

## 参考文献

- [1] R. Matsui *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122** (2019) 014804.
- [2] Y. Kuramitsu *et al.*, Sci. Rep. **12** (2022) 2346.
- [3] T. Minami *et al.*, High Eng. Dens. Phys. **55** (2025) 101195.
- [4] M. Kanasaki *et al.*, Progress in Ultrafast Intense Laser Science XV (2020) 133 - 147.
- [5] M. Kanasaki *et al.*, High Energy Density Phys. **37** (2020) 100852.
- [6] T. Hihara *et al.*, Sci. Rep. **11**, (2021) 16283.
- [7] T. Taguchi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **95** (2024) 033301.
- [8] F. Nikaido *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **95** (2024) 103302.
- [9] Y. Kuramitsu *et al.*, Phys. Plasmas **31** (2024) 053108.

- [10] T. Asai *et al.*, High Eng. Dens. Phys. **32** (2019) 44.
- [11] T. Asai *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **62** (2023) 016506.
- [12] Y. Abe *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **93** (2022) 063502.
- [13] T. Minami *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **93** (2022) 113530.
- [14] Y. Abe *et al.*, AAPPS-DPP2023, L-3-I4 (2023) (Invited).
- [15] Y. Fukuda *et al.*, International Symposium on Ultrafast Intense Laser Science (ISUILS2023), (2023) (Invited).
- [16] Y. Fukuda *et al.*, Laser Soc. Jpn. 2024, S06-17p-VII-01 (2024) (Invited).
- [17] S. Isayama *et al.*, Laser Soc. Jpn. 2024, S06-17p-VII-03 (2024) (Invited).
- [18] T. Minami *et al.*, Laser Soc. Jpn. 2024, S06-17p-VII-07 (2024) (Invited).
- [19] Y. Kuramitsu *et al.*, Laser Soc. Jpn. 2024, S06-17p-VII-08 (2024) (Invited).

<sup>a</sup> 大阪大院・工, <sup>b</sup> 神戸大院・海事, <sup>c</sup> 青学大・理工, <sup>d</sup> QST 放医研計測・線量評価部, <sup>e</sup> 東北大・電子光理学研, <sup>f</sup> 大阪大・核物研, <sup>g</sup> QST 関西研・光量子ビーム科学研究部,

## 研究成果一覧

(23H387)

研究代表者：福田 祐仁（量研関西研）

### (1) 原著論文

1. T. Taguchi, T. Minami, T. Hihara, F. Nikaido, T. Asai, K. Sakai, Y. Abe, A. Yogo, Y. Arikawa, H. Kohri, A. O. Tokiyasu, C. M. Chu, W. Y. Woon, S. Kodaira, M. Kanasaki, Y. Fukuda, and Y. Kuramitsu, “Automation of etch pit analyses on solid-state nuclear track detectors with machine learning for laser-driven ion acceleration”, *Rev. Sci. Instrum.* **95**, 033301 (2024).
2. Y. Kuramitsu, T. Taguchi, F. Nikaido, T. Minami, T. Hihara, S. Suzuki, K. Oda, K. Kuramoto, T. Yasui, Y. Abe, K. Imano, H. Takabe, C. M. Chu, K. T. Wu, W. Y. Woon, S. H. Chen, C. S. Jao, Y. C. Chen, Y. L. Liu, A. Morace, A. Yogo, Y. Arikawa, H. Kohri, A. Tokiyasu, S. Kodaira, T. Kusumoto, M. Kanasaki, T. Asai, Y. Fukuda, K. Kondo, H. Kiriyama, T. Hayakawa, S. J. Tanaka, S. Isayama, N. Watamura, H. Suzuki, H. S. Kumar, N. Ohnishi, T. Pikuz, E. Filippov, K. Sakai, R. Yasuhara, M. Nakata, R. Ishikawa, T. Hoshi, A. Mizuta, N. Bolouki, N. Saura, S. Benkadda, M. Koenig, and S. Hamaguchi, “Optimization of laser-driven quantum beam generation and the applications with artificial intelligence”, *Phys. Plasmas* **31**, 053108 (2024).
3. F. Nikaido, Y. Abe, T. Minami, K. Kuramoto, T. Yasui, K. Sakai, M. Kanasaki, Y. Fukuda, H. Kiriyama, C. S. Jao, C. M. Chu, K. T. Wu, W. Y. Woon, Y. L. Liu, T. Pikuz, S. Hamaguchi, N. Saura, S. Benkadda, T. Kusumoto, S. Kodaira, and Y. Kuramitsu, “3D track extraction from a fluorescent nuclear track detector via machine learning and an application to diagnostics of laser-driven ions”, *Rev. Sci. Instrum.* **95**, 103302 (2024).
4. T. Minami, C.M. Chu, O. McCusker, K. Sakai, Y.T. Liao, N. Tamaki, K. Kondo, H. Kiriyama, 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).

### (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. Y. Fukuda, M. Kanasaki, T. Asai, C. Inoue, S. Mochizuki, R. Ozaki, K. Toyonaga, K. Maekawa, T. Minami, K. Sakai, K. Himeno, T. Taguchi, K. Oda, S. Suzuki, F. Nikaido, K. Kuramoto, T. Yasui, S. Isayama, S. Tanaka, A. Tokiyasu, H. Kohri, S. N. Ryazantsev, T. Pikuz, S. Kodaira, T. Yamauchi, Y. Abe, Y. Kuramitsu, A. Kon, K. Kondo, Y. Mashiba, Y. Miyasaka, K. Ogura, A. Sagisaka, and H. Kiriyama, “Effect of a plasma mirror on the interactions of intense laser pulses with micron-scale cluster targets”, International Conference on high energy density sciences 2024 (HEDS2024), HEDS10-04, Yokohama, April 22-26<sup>th</sup> (2024).
2. Y. Kuramitsu, R. Kitamura, N. Tamaki, T. Minami, K. Sakai, T. Taguchi, F. Nikaido, S. Suzuki, Y. Abe, H. Habara, Y. Arikawa, A. Yogo, A. Morace, Y. Sakawa, Y. Fukuda, T. Hayakawa, L. Dohl, N. Woolsey,

- M. Kanasaki, A. Tokiyasu, H. Kohri, S. Kodaira, S. Isayama, S. Chen, C. Chu, K. Wu, Y. Liao, and W. Woon, “Monoenergetic sub-relativistic ion acceleration with a nanolayer target mounted on large-area suspended graphene”, International Conference on high energy density sciences 2024 (HEDS2024), HEDS10-05, Yokohama, April 22-26<sup>th</sup> (2024).
3. M. Kanasaki, T. Asai, C. Inoue, S. Mochizuki, T. Minami, K. Sakai, K. Himeno, T. Taguchi, K. Oda, S. Suzuki, Y. Abe, H. Kohri, A. Tokiyasu, S. Tanaka, T. Pikuz, S. Kodaira, A. Kon, K. Huang, N. Nakanii, K. Kondo, M. Kando, Y. Mashiba, Y. Miyasaka, K. Ogura, A. Sagisaka, H. Kiriyaama, T. Yamauchi, Y. Kuramitsu, and Y. Fukuda, “Repetitive Generation of Laser-driven Quasi-monoenergetic Multi-MeV Protons from Hydrogen Clusters”, International Conference on high energy density sciences 2024 (HEDS2024), HEDS13-04, Yokohama, April 22-26<sup>th</sup> (2024).
  4. T. Minami, T. Taguchi, T. Hihara, F. Nikaido, C.M. Chu, K. Sakai, N. Tamaki, S. Soichiro, Y. Abe, H. Habara, Y.T. Liao, L. Döhl, N. Woolsey, Y. Arikawa, A. Yogo, A. Morace, Y. Sakawa, Y.L. Liu, C.S. Jao, T. Pikuz, H. Kohri, A.O. Tokiyasu, S. Kodaira, S. Isayama, H.S. Kumar, N. Ohnishi, N. Saura, S. Benkadda, S. Hamaguchi, N. Watamura, H. Suzuki, M. Kanasaki, Y. Fukuda, W.Y. Woon, and Y. Kuramitsu, “High energy ion diagnostics using CR-39 with the aid of machine learning”, 25th Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics (HTPD 2024), 1.4.29, North Carolina, USA, April 21-25<sup>th</sup> (2024).
  5. F. Nikaido, T. Taguchi, Y. Abe, T. Minami, K. Oda, S. Suzuki, K. Kuramoto, T. Yasui, K. Sakai, Y. Fukuda, S. Kodaira, T. Kusumoto, S. Hamaguchi, S. Nathaniel, S. Benkadda, Y. Kuramitsu, “3D-track extraction from fluorescent nuclear track detector by machine learning and application for diagnostics of laser-driven ion”, 25th Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics (HTPD 2024), 2.2.7, North Carolina, USA, April 21-25<sup>th</sup> (2024)
  6. T. Yasui, Y. Abe, T. Minami, K. Oda, Z. Lan, H. Kohri, A. O. Tokiyasu, M. Kanasaki, S. Tanaka, S. Isayama, K. Sakai, T. Asai, T. Taguchi, K. Himeno, S. Suzuki, F. Nikaido, K. Kuramoto, Y. Sakai, T. Tanaka, A. Yogo, S. Kodaira, T. Hayakawa, Y. Fukuda, and Y. Kuramitsu, “High-energy ion diagnostics using a multi-layered scintillation detector for laser-driven ion acceleration experiments”, 25th Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics (HTPD 2024), 1.4.29, North Carolina, USA, April 21-25<sup>th</sup> (2024).
  7. Y. Kuramitsu, “Nuclear spallation by irradiating an atomic thin graphene target with an intense laser”, New Opportunities and Challenges in Nuclear Physics with High Power Lasers, Trento, Italy, 1-5<sup>th</sup> July (2024) (Invited)
  8. 安部勇輝, 松浦亮大, 岩佐健生, Alessio Morace, 南卓海, Jinyuan Dun, 福田祐仁, 有川安信, 森芳孝, 三浦永祐, 砂原淳, 羽原英明, 余語覚文, Zhe Zhang, 藤岡慎介, 蔵満康浩, 「一方向照射型慣性核融合方式を用いた高輝度短パルス点中性子源の開発」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 16pB111-8, 北海道大学, 2024 年 9 月 16-19 日
  9. 蔵満康浩, 南卓海, 草野颯斗, 玉城直也, 北村力丸, 二階堂颯佳, 安部勇輝, T.Pikuz, 時安敦史, 郡英輝, 境健太郎, F. C.M.Chu, K.T.Wu, Y.T.Liao, W.Y.Woon, 有川安信, 余語覚文, A.Morace, 坂和洋一, 藤岡慎介, 小平聡, 羽原英明, 金崎真聡, 福田祐仁, M. Ruszkowski, 「高強度レーザーを用いた宇宙線核破碎模擬実験」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 16pB111-9, 北海道大学, 2024 年 9 月 16-19 日

10. 南卓海, 二階堂颯佳, 安部勇輝, 黒地柊太郎, 時安敦史, 郡英輝, 田口智也, 境健太郎, 玉城直也, C.M.Chu, Y.T.Liao, W.Y.Woon, L. N. K. Döhl, N.Woolsey, 有川安信, 余語覚文, A.Morace, 坂和洋一, 小平聡, 羽原英明, 金崎真聡, 福田祐仁, 田中周太, 蔵満康浩, 「CR-39 および機械学習を用いたレーザー駆動 100 MeV 超陽子線の計測」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 16pB111-10, 北海道大学, 2024 年 9 月 16-19 日
11. 北村力丸, 南卓海, 田口智也, 二階堂颯佳, 境健太郎, 玉城直也, 安部勇輝, C.M.Chu, Y.T.Liao, W.Y.Woon, L. N. K. Döhl, G, N.Woolsey, 有川安信, 余語覚文, A.Morace, 坂和洋一, 羽原英明, 金崎真聡, 時安敦史, 郡英輝, 小平聡, 早川岳人, 福田祐仁, 蔵満康浩, 「金積層グラフェンナノレイヤーターゲットを用いたレーザー駆動準単色陽子線生成実験」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 16pB111-11, 北海道大学, 2024 年 9 月 16-19 日
12. 玉城直也, 南卓海, 鈴木蒼一郎, 田口智也, 二階堂颯佳, 北村力丸, 境健太郎, 安部勇輝, C. M. Chu, Y. T. Liao, W. Y. Woon, L. N. K. Döhl, G, N. Woolsey, 有川安信, 余語覚文, A. Morace, 坂和洋一, 羽原英明, 金崎真聡, 時安敦史, 郡英輝, 小平聡, 早川岳人, 福田祐仁, 蔵満康浩, 「金積層グラフェンターゲットを用いたレーザー駆動単色陽子加速の最適化」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 16pB111-12, 北海道大学, 2024 年 9 月 16-19 日
13. 二階堂颯佳, N. Bolouki, 黒地柊太郎, 水田晃, 安部勇輝, 南卓海, 安井稔遥, 倉本恭誓, 北村力丸, 田實太陽, 玉城直也, 大西直文, 福田祐仁, 金崎真聡, W. Y. Woon, Y. L. Liu, C. M. Chu, C. S. Jao, T. Y. Huang, Y. C. Chen, T. Pikuz, E. Filippov, Z. Liu, J. Yao, Z. Ma, Y. Zhang, J. Zhong, 小平聡, 楠本多聞, 境健太郎, 坂和洋一, 蔵満康浩, 「レーザー駆動イオンビームと機械学習を用いた乱流電磁場の再構築」, 日本物理学会第 79 回年次大会, 16pB111-15, 北海道大学, 2024 年 9 月 16-19 日
14. 安部勇輝, 岩佐健生, 加藤光, 南卓海, 二階堂颯佳, Morace Alessio, 福田祐仁, 有川安信, 森芳孝, 三浦永祐, 砂原淳, 羽原英明, 余語覚文, Zhang Zhe, 藤岡慎介, 蔵満康浩, 「超高強度レーザーを用いた一方向照射型慣性核融合による高エネルギー密度プラズマの生成と応用展望」, レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会, C05-22a-V-02, 広島国際会議場, 2025 年 1 月 21 - 23 日
15. 蔵満康浩, 「グラフェンと高強度レーザーを用いた新たな研究の展開」, レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会, C09-23a-V-03, 広島国際会議場, 2025 年 1 月 21 - 23 日
16. 二階堂颯佳, 南卓海, 安部勇輝, 草野颯斗, 江寄大和, 福田祐仁, 東柊斗, 勢一隼人, 金崎真聡, 蔵満康浩, 「CR-39 へのイオン入射角解析における超解像技術の導入とプロトンラジオグラフを用いた乱流電磁場再構築への応用」, レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会, C09-23a-V-04, 広島国際会議場, 2025 年 1 月 21 - 23 日
17. 玉城直也, 南卓海, 二階堂颯佳, 北村力丸, 倉本恭誓, 安井稔遥, 岩佐健生, 黒地柊太郎, 田實太陽, 草野颯斗, 山中敬太, 飯田海地, 江寄大和, 加藤光, 内藤佳輝, 中村豊, 境健太郎, 安部勇輝, 桐山博光, 今亮, 近藤康太郎, Chu Che-Men, Woon Wei-Yen, Morace Alessio, 坂和洋一, 羽原英明, Pikuz Tatiana, 諫山翔伍, 金崎真聡, 時安敦史, 郡英輝, 小平聡, 早川岳人, 福田祐仁, 蔵満康浩, 「金積層グラフェンターゲットを用いたレーザー駆動準単色イオン加速」, レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会, C10-23a-V-02, 広島国際会議場, 2025 年 1 月 21 - 23 日

18. 草野颯斗, 江寄大和, 内藤佳輝, 二階堂颯佳, 北村力丸, 岩佐健生, 玉城直也, 南卓海, 倉本恭誓, 安井稔遥, 黒地柊太郎, 田實太陽, 山中敬太, 加藤光, 中村豊, 飯田海地, 安部勇輝, Alessio Morace, 藤岡慎介, 福田祐仁, 早川岳人, 金崎真聡, 時安敦史, C. M. Chu, W. Y. Woon, 郡英輝, 蔵満康浩, 「高強度レーザーを用いたイオン加速における核反応の実験的研究」, レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会, C10-23a-V-03, 広島国際会議場, 2025 年 1 月 21 - 23 日
19. 金崎真聡, 尾崎玲於奈, 豊永啓太, 前川馨, 境健太郎, 南卓海, 今亮, 近藤康太郎, 宮坂泰弘, 眞柴雄司, 匂坂明人, 小倉浩一, 小平聡, 田中周太, 諫山翔伍, Pikuz Tatiana, 時安敦史, 郡英輝, 安部勇輝, 蔵満康浩, 山内知也, 桐山博光, 福田祐仁, 「水素クラスターターゲットを用いた MeV 級陽子線の繰り返し発生」, レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会, C10-23a-V-04, 広島国際会議場, 2025 年 1 月 21 - 23 日
20. 合原輔佑太, 山内知也, 金崎真聡, 福田祐仁, 「高強度レーザーと水素クラスターとの相互作用による陽子線加速メカニズムの解析」, レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会, C10-23a-V-05, 広島国際会議場, 2025 年 1 月 21 - 23 日
21. 尾崎玲於奈, 苺谷有哉, 近藤康太郎, Pikuz Taiana, Ghenuche Petru, Asavei Theodor, Magureanu Alexandru, Nastasa Viorel, Tudor Lucian, Doria Dominico, 金崎真聡, 山内知也, 福田祐仁, 「固体飛跡検出器を用いた 100 MeV/u を超えるレーザー加速重イオンの同定」, レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会, C10-23a-V-07, 広島国際会議場, 2025 年 1 月 21 - 23 日
22. 苺谷有哉, 尾崎玲於奈, 豊永啓太, 前川馨, 合原輔佑太, 山内知也, 福田祐仁, 金崎真聡, 「固体飛跡検出器を用いたレーザー加速アルゴンイオンのピンホールイメージング」, レーザー学会学術講演会第 45 回年次大会, P01-22p-P-14, 広島国際会議場, 2025 年 1 月 21 - 23 日
23. 合原輔佑太, 苺谷有哉, 尾崎玲於奈, 豊永啓太, 前川馨, 山内知也, 金崎真聡, 福田祐仁, 「Ar 液柱ターゲットによるレーザー駆動イオン加速の現状と課題」, 第 37 回固体飛跡検出器研究会, 27-02, 神戸大学深江キャンパス, 2025 年 3 月 26 - 27 日
24. 苺谷有哉, 尾崎玲於奈, 豊永啓太, 前川馨, 合原輔佑太, 山内知也, 金崎真聡, 福田祐仁, 「固体飛跡検出器 CR-39 を用いたレーザー加速アルゴンイオンのピンホールイメージング」, 第 37 回固体飛跡検出器研究会, 27-03, 神戸大学深江キャンパス, 2025 年 3 月 26 - 27 日
25. 川上恭平, 尾崎玲於奈, 苺谷有哉, 豊永啓太, 前川馨, 合原輔佑太, 田中龍生, 山内知也, 金崎真聡, 福田祐仁, 「固体飛跡検出器 CR-39 を用いたレーザー加速アルゴンイオンの計測」, 第 37 回固体飛跡検出器研究会, 27-04, 神戸大学深江キャンパス, 2025 年 3 月 26 - 27 日
26. 田中龍生, 豊永啓太, 合原輔佑太, 尾崎玲於奈, 前川馨, 苺谷有哉, 川上恭平, 山内知也, 金崎真聡, 福田祐仁, 「高強度レーザーとクラスターターゲットの相互作用領域に対する光学イメージング」, 第 37 回固体飛跡検出器研究会, 27-05, 神戸大学深江キャンパス, 2025 年 3 月 26 - 27 日

(4) その他

なし

(5) 学位論文

1. 安井稔遥, 修士論文「レーザーイオン加速実験における GeV 級イオンビームの核種分解エネルギー計測法の開発」, 大阪大学大学院工学研究科, 2025 年 3 月
2. 尾崎玲於奈, 修士論文「固体飛跡検出器を用いたレーザー加速イオンの計測」, 神戸大学大学院海事科学研究科, 2025 年 3 月
3. 豊永啓太, 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で発生する第二高調波のイメージング」神戸大学大学院海事科学研究科, 2025 年 3 月
4. 前川馨, 修士論文「高強度レーザーと水素クラスターターゲットの相互作用におけるレーザーパルスが陽子線加速に及ぼす影響」神戸大学大学院海事科学研究科, 2025 年 3 月

放射線化学実験で解き明かす生物効果の線量率依存性メカニズムの解明  
Clarification of the mechanism of the dose rate effect of biological  
effectiveness (24H446)

楠本多聞<sup>a</sup>、小西輝昭<sup>a</sup>、間宮大晴<sup>a</sup>、吉田思乃香<sup>b</sup>、北村尚<sup>a</sup>、小平聡<sup>a</sup>  
T. Kusumoto<sup>a</sup>, T. Konishi<sup>a</sup>, T. Mamiya<sup>a</sup>, S. Yoshida<sup>b</sup>, H. Kitamura<sup>a</sup>, S. Kodaira<sup>a</sup>

Abstract

We have evaluated changes in yields of hydrogen peroxide and OH radicals in the presence and in the absence of gold nanoparticles (GNPs) to discuss a combination treatment using GNPs with FLASH performed at ultra-high dose rate (UHDR). To do so, we firstly quantify the increase of OH radicals and the decomposition of hydrogen peroxide in the presence of GNPs under protons and heavy ions. Hydrogen peroxide is completely decomposed by GNPs below about 40 Gy, then increases monotonically with dose. In comparison, OH radicals rise in the presence of GNPs. The present findings imply a potential of the applicability of GNPs to radiotherapy using particle beams. Also, this result indicates an advantage of a combination radiotherapy using GNPs and FLASH.

1. 研究の目的とバックグラウンド

これまでの治療線量率の、1000倍以上高い線量率で実施するFLASH放射線がん治療は、治療効果を損なうことなく、正常組織や筋肉への影響を抑制できることで知られている。超高線量率での照射による保護効果(FLASH効果)は、動物実験で多くの報告例がある。一方で、線量率効果を確認できなかったという報告もされてきており、FLASH効果が発現する条件を正確に掴む必要がある。そのため、我々のグループでは、水の放射線分解生成物の収率の線量率依存性に着目し、放射線化学的な視点からFLASH効果の作用機序の解明に取り組んできた。それによると、トラック近傍における局所的かつ短時間の酸素濃度の低下と、隣接する飛跡間での化学種同士の再結合による、間接作用の寄与の低下が、FLASH効果のメカニズムの1つであることを示した。加えて、短時間(即ち短いパルス幅)で高い強度のビームを照射することで、瞬間的な線量率が増加し、線量率効果の恩恵を享受しやすいことを示した。これは、FLASH効

果がパルスビームを利用した電子線の照射によって確認された例が多い事と整合する。

並行して、放射線増感剤として知られている金ナノ粒子(GNPs)の作用機序解明にも取り組んでいる。X線の照射下において、過酸化水素が分解され、OHラジカルが追加生成する。これが、間接作用の寄与を増加させることにつながり、増感効果を生むことを明らかにした。

高線量率においては、隣接する飛跡間で生じた化学種同士の反応が促進される。この効果は密なトラック構造が形成されるブラッグピーク近傍では薄い。しかしながら、線量率効果が少なくとも、ブラッグピーク近傍においては高い過酸化水素の収率が期待できる。つまり、腫瘍(つまりブラッグピーク近傍)に金ナノ粒子を集積させ、高線量率での照射を行うことで、プラトー領域では、高線量率による保護効果による恩恵、ブラッグピーク近傍では豊富な過酸化水素をGNPsが分解することによる増感効果の恩恵を得ることができると考えられる。本年度はこの仮説の検証のための照射実験を生物照射室及び中エネルギービーム照射室において実施した。

2. 昨年度までに得られている結果

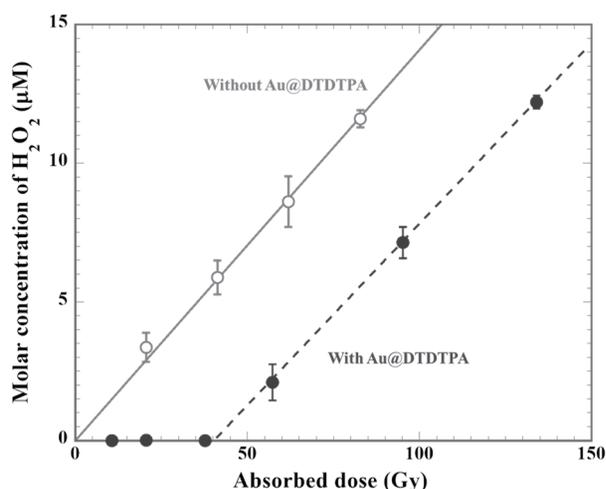
中エネルギービーム照射室において、パルス幅を固定し、アテネーターの値を変化させることで、線量率を変えた照射実験を実施してきた。水の放射線分解生成物(OHラジカル、過酸化水素、水和電子)の収率は、線量率の増加と共に減少することが確認できた。これは、飛跡間で生じたラジカル同士の相互作用によって(例えば $\text{OH} + e_{\text{aq}}^- \rightarrow \text{OH}^-$ )、OHラジカル(過酸化水素の前駆体でもある)や水和電子の収率が低下したからであると考えられる。種々の水の放射線分解生成物の収率を系統的に評価する事によって、ブラッグピーク近傍における線量率効果のメカニズムを明らかにしつつある。

3. 今年度の研究内容

今年度は、再現性のために生物照射室や

中エネルギービーム照射室での照射実験を継続した。これまでに得られている結果と同様の傾向を確認することができた。現在、論文として成果をまとめるための準備を進めている。一方で、GNPsを分散させた水溶液を使用した実験も開始した。生物照射室でHe及びCイオンの照射、中エネルギービーム照射にてプロトン、He、Cイオンの照射を実施した。OHラジカルの収率変化をAmplex Red水溶液、過酸化水素の収率変化をゴームレー法で評価した。

#### 4. 今年度の研究成果と解析結果



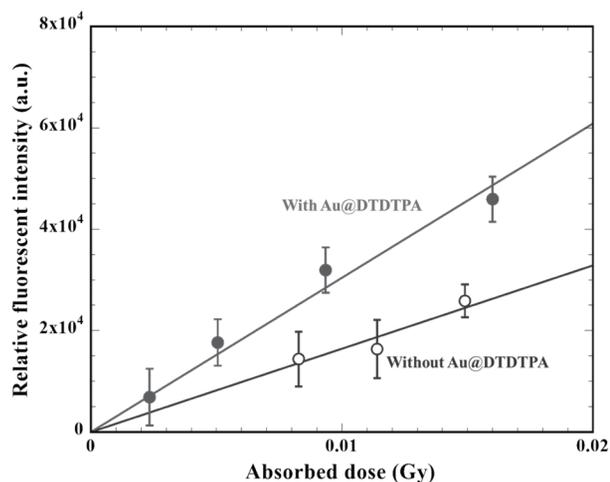
【図1】 He イオン (5.0 MeV/u) 照射時における過酸化水素の生成量と吸収線量の関係。

5.0 MeV/u の He イオン照射時の過酸化水素の生成量と吸収線量の関係を示す。GNPsを分散させない場合 (○)、過酸化水素の生成量は吸収線量に比例する。一方、ペンテト酸で修飾した GNPs (Au@DTDTPA ; ●) を分散させた場合、40 Gy 以下の領域では、過酸化水素が検出されなかった。これは生成した過酸化水素が、GNPsによって分解されたことを意味する。その後、吸収線量の増加に伴って、過酸化水素の生成量も増加し、その傾向は、GNPsなしの場合と同等であった。一方で、OHラジカルの収率は、GNPsを分散させた場合、1.8倍に増加した

【図2】 (○ : GNPsなし、● : DTDTPAで修飾させた金ナノ粒子を分散させた)。他のイオン種においても同様の傾向が確認されている (表1)。

【表1】各イオン種での GNPs 存在下における OHラジカル収率の変化。

Ion	Energy (MeV/u)	Relative increase of 'OH
Proton	4.8	1.0 ± 0.2
He	145	1.2 ± 0.3
	5.0	1.8 ± 0.4
C	275	1.5 ± 0.2
	3.2	1.2 ± 0.3



【図2】 He イオン (5.0 MeV/u) 照射時における OHラジカル生成量と吸収線量の関係。

GNPsによる増感効果は、X線のエネルギーが金に吸収されることによる局所線量の増加が一因であると考えられてきた。本研究においては、OHラジカル収率の増加が粒子線の照射においても確認できたことから、GNPs増感剤が粒子線治療においても間接作用を増強する可能性を示すことができた。中エネルギービーム照射での実験では、線量の増加にともなう過酸化水素の収率増加は確認できなかった。しかしながら、極短時間で空間的に多量のラジカル発生し、高線量率においても依然として高い過酸化水素の収率が確認できるブラッグピーク近傍における増感効果が期待できることから、FLASHにおいてもGNPsが適用可能であることを示唆する結果である。

- 量子科学技術研究開発機構 (QST)
- 早稲田大学理工学研究科

## 研究成果一覧

### (1) 原著論文

Y. Matsuya, Y. Yoshii, T. Kusumoto, T. Ogawa, S. Ohnishi, Y. Hirata, T. Sato, T. Kai, Development of a chemical code applicable to ions based on the PHITS code for efficient and visual radiolysis simulations. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 27, 6887-6898 (2025).

T. Kusumoto, Y. Okazaki, R. Hirayama, J. Kataoka, S. Roux, M. Fromm, R. Bazzi, S. Kodaira, Decomposition of hydrogen peroxide by gold nanoparticles leading to increase of OH radical yields: A radiosensitization potential for hadron therapy. *Radiat. Phys. Chem.* 232, 112687 (2025).

T. Kusumoto, A. Danvin, T. Mamiya, A. Arnone, S. Chefson, C. Galindo, P. Peaupardin, Q. Raffy, N. Kamiguchi, D. Amano, K. Sasai, T. Konishi, S. Kodaira, Dose Rate Effects on Hydrated electrons, Hydrogen peroxide, and a OH radical molecular probe under Clinical Energy Protons. *Radiat. Res.* 201, 287-293 (2024).

Y. Okazaki, T. Kusumoto, S. Roux, R. Hirayama, M. Fromm, R. Bazzi, S. Kodaira, J. Kataoka, Increase of OH radical yields due to the decomposition of hydrogen peroxide by gold nanoparticles under X-ray irradiation. *RSC Adv.* 14, 9509-9513 (2024).

### (2) 国際研究集会などの Proceedings

該当なし

### (3) 学会及び研究会の口頭発表、ポスター発表も含む、

吉田思乃香、楠本多聞、平山亮一、片岡淳、金ナノ粒子による DNA 塩基損傷収率の増加（第4回量子医科学会）

T. Kusumoto, What is the mechanism of FLASH effects?: Discussion from radiation chemistry view (15<sup>th</sup> Tihany symposium on radiation chemistry) August 23 – 28, 2024.

T. Kusumoto, A recent water radiolysis experiments towards the elucidation of the mechanism of FLASH radiotherapy (4<sup>th</sup> International Conference on Ionizing Processes 2024) August 11 – 15, 2024.

T. Kusumoto, Unveiling mechanisms of FLASH radiotherapy by radiation-chemistry and radiation-biology experiments (19<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications) July 14 – 19, 2024.

### (4) その他（解説、単行本など）

該当なし

### (5) 学位論文（博士論文、修士論文、卒業研究）

吉田思乃香、放射線治療における金ナノ粒子添加による塩基損傷増加の検証（早稲田大学 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻）

## Atmospheric Ionizing Radiation Detector Development (22H461)

Eric Benton<sup>1</sup>, Conner Heffernan<sup>1</sup>, Garrett Thornton<sup>1</sup> and Satoshi Kodaira<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Oklahoma State University, Dept. of Physics, Stillwater, Oklahoma,  
USA <sup>2</sup>National Institute of Radiological Problems, 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 400 and 230 MeV/n C, and 150 MeV/n He in the HIMAC BIO Room in order to characterize the response of these instruments to heavy ions. The AirTED tissue equivalent proportional counter and AirSiD Si PIN photodiode detector were exposed to both the bare beam and behind varying thicknesses of water (Binary Filter) and then lineal energy/y and energy deposition spectra were measured. Primary focus was on the characterization of the AirSiD detector during these experiments.

### Introduction

The OSU Radiation Physics Laboratory is developing radiation detectors for use in dosimetry aboard aircraft, unmanned aerial vehicles (UAVs or drones), and high altitude balloons, as well as aboard spacecraft like the ISS, and for characterizing the ionizing radiation environment in the upper atmosphere and space. Recent efforts focused on a detector head design for the tissue equivalent proportional counter (TEPC), reduction in the size and complexity of the support electronics, and adapting the TEPC for battery-powered operation so that it can be used aboard high altitude balloons. This includes incorporation of a new 4 input channel spectrometer replacing the two 2 input spectrometers used in the previous version. In addition, further development needs to be carried out on integrating the signals from the two radiation sensors—the TEPC and a Si PIN diode—into a single LET spectrum and associated absorbed dose and dose equivalent measurements, and for this the monoenergetic beams available at HIMAC are particularly important. The experiments would be carried out in the HIMAC Bio Room.

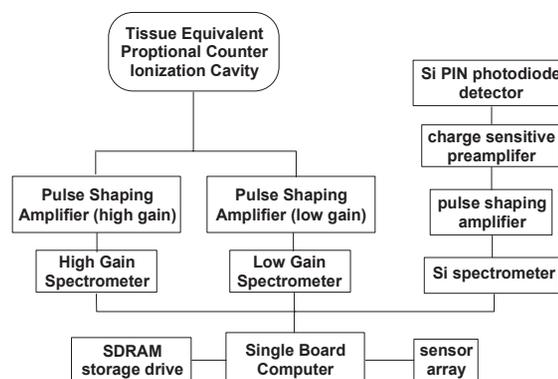


Figure 1. (t) Block diagram of the AirTED instrument. (b) Photo of the AirTED detector for use aboard high altitude aircraft.

## 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.

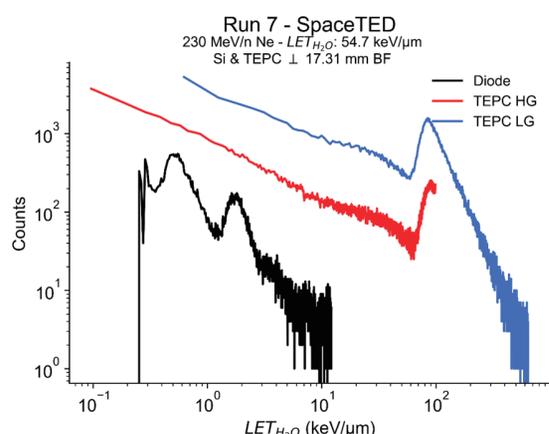


Figure 2. LET spectra measured in the Si diode and in the high and low gain channels of the TEPC in exposures to the 230 MeV/n Ne beam and with 17.31 mm of water equivalent binary filed in the beam. The primary peak with LET of 54.7 keV/μm is visible in the low gain TEPC channel and partially visible 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.

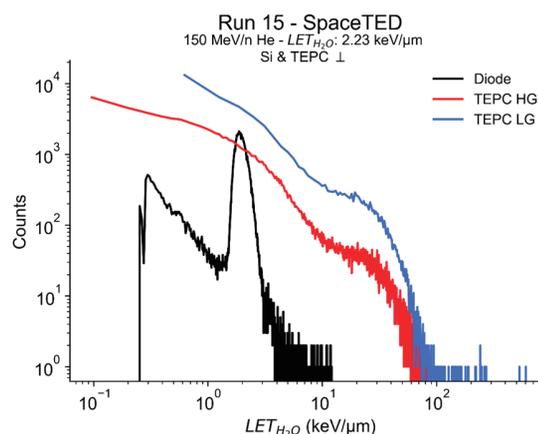


Figure 2. LET spectra measured in the Si diode and in the high and low gain channels of the TEPC in exposures to the 150 MeV/n He beam. The primary peak is visible in the Si diode, but cannot be resolved in either the high or low gain TEPC channels.

In order to combine results from the TEPC and Si PIN diode detectors, we use results obtained at HIMAC to establish the overlap regions in the lineal energy and LET(Si) spectra measured by TEPC and Si diode detectors, respectively. This is illustrate using data obtained from 230 MeV/n Ne and 150 MeV/n He beams. We identify peaks in the spectra having known LET, these arising either from the primary peak or fragmentation peaks produced behind known quantities of water-equivalent binary filter. Following conversion of the lineal energy and LET spectra in Silicon into a common format, i.e. LET spectra in water, these peaks can then be aligned with another in terms of LET. Figure 1 shows a sample of such spectra measured in the 230 MeV/n Ne beam, while Figure 2 shows representative spectra measured in the 150 MeV/n He beam.

### 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.

## List of Publications

(1)

Kodaira, S., Uchihori, Y., Iwata, Y., Makino, T., Ohshima, T., Benton, E., Zeitlin, C., and Miller, J., (2024) "Space Radiation Research with Heavy Ions at HIMAC," *Life Sciences in Space Research*, **43**, 4-12, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2024.08.002>

DeWitt, J.M. and Benton, E. R., (2024) "Secondary proton buildup in space radiation shielding," *Life Sciences in Space Research*, **41**, 119-126, <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2024.02.005>

Bain, H. M., Onsager, T. G., Mertens, C. J., Copeland, K., Benton, E. R., Clem, J., Mangeard, P.-S. Green, J. C., Guild, T. B., Tobiska, W. K., Shelton-Mur, K., Zheng, Y., Halford, A. J., Carlson, S., Pulkkinen, A. (2023) "Improved space weather observations and modeling for aviation radiation," *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, **10**, <https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1149014>

(3)

Benton, E. R., Lee, T., Heffernan, C., Yang, M., Thornton, G., and Gersey, G., "Space Tissue Equivalent Dosimeter (SpaceTED) and Atmospheric ionizing radiation Tissue Equivalent Dosimeter, (AirTED), 27<sup>th</sup> Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, Boulder, CO, 3-5 September 2024.

Benton, E. R., Copeland, K., Gersey, B., Lee, T., Yang, M., Heffernan, C. and Thornton, G., *Progress on the Atmospheric Ionizing Radiation Tissue Equivalent Dosimeter (AirTED)*, 2024 Space Weather Workshop, Boulder, CO, 15-19 April 2024.

Benton, E. R., "Measuring and Modeling Solar and Galactic Cosmic Radiation in the Atmosphere for Space Weather Applications," 8 May 2024, Research Institute for Nuclear Engineering, University of Fukui, Tsuruga, Japan

Benton, E. R., "Measuring and Modeling Solar and Galactic Cosmic Radiation in the Atmosphere for Space Weather Applications," 29 February 2024, NOAA Space Weather Prediction Center, Boulder, CO

# Human Space Exploration – The Radiation risks and novel new detector developments (23H474) – Annual Report FY2024

T. Berger<sup>a</sup>, K. Marsalek<sup>a</sup>, B. Przybyla<sup>a</sup>, M. Kasemann<sup>a</sup>, M. Rohde<sup>a</sup>, Daniel Matthiä<sup>a</sup>, H. Kitamura<sup>b</sup>, S. Kodaira<sup>b</sup>

## Abstract

In the FY2024, the large, uniform, monoenergetic irradiation field of the HIMAC's BIO facility was leveraged to assist in the development of detector technologies planned for human space flight and subsequently for cancer radiation therapy.

The **HIMAC Research Project H474** contributed to a feasibility study and in the development of two novel active DLR radiation detector systems. The temperature sensitivity of the signal yield from the partially depleted detector M-42 POSITION was established and the operational assessment of the newly developed M-42 BIG's functionality under penetrating radiation was carried out. M-42 EXT device's measurement range has been expanded due to the availability of the HIMAC beam irradiation.

## 1. Introduction

In the frame of this HIMAC Research Project two beamtimes has been performed in the BIO room of HIMAC in FY2024. Both runs were with Iron (Fe) ions as provided in Table 1.

Table 1: HIMAC beam time (ions and energies)

Run	Date	Ion	Energy (MeV/n)	Room
1	June 2024	Fe	500	BIO
2	February 2025	Fe	500	BIO

## 2. M-42 POSITION - Progress in FY2024

During both beam times the DLR's newly developed M-42 POSITION system has undergone several investigations. This detector is designed to measure the position and angle of incoming particles, with a focus on achieving very low energy consumption. In FY2024 the device was twice irradiated at HIMAC and we assessed the spatial resolution of both the detector and our newly developed readout electronics. Figure 1 shows the pinhole collimator that was used for the detector irradiation and the measured detector response - the point spread function - that shows the spatial resolution of the system. This development is the first step of our design process for a new type of linear energy transfer (LET) spectrometer.

During the Feb. 2025 campaign we successfully determined the temperature sensitivity of the signal yield from the partially depleted detector. Figure 2 shows the measurement setup including the cooling unit. Figure 3 depicts the measured increase in the detector's depletion zone thickness at low temperatures. We could show, that the +3.5% increase over the whole temperature range lies

within our error margin. This achievement was made possible only thanks to the use of penetrating heavy ions at HIMAC.

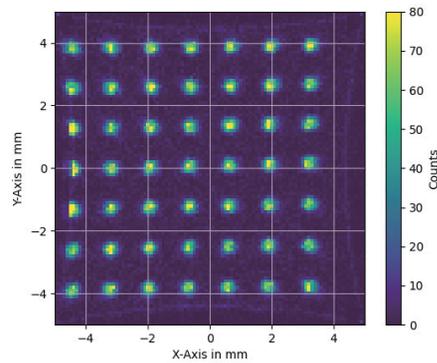
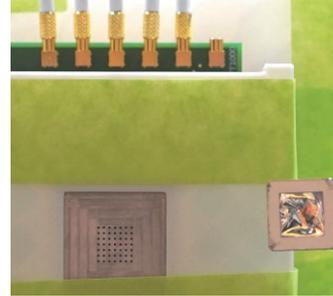


Figure 1: M-42 POSITION: Top - pinhole collimator. Bottom - measured point-spread function.

As an outcome of those irradiations at HIMAC, a patent application for this device has been filed recently.

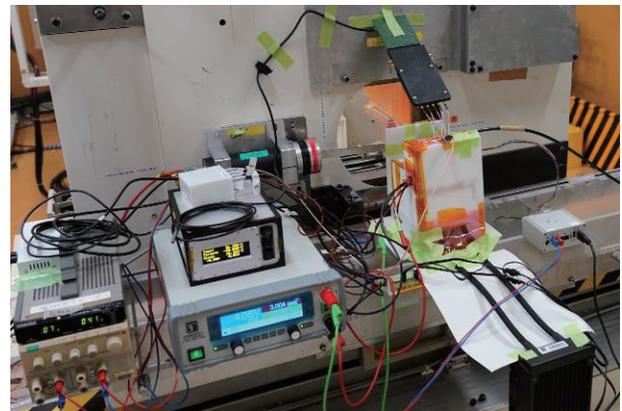
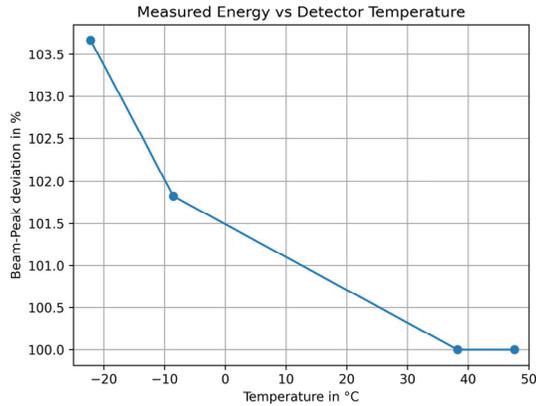


Figure 2: M-42 POSITION in the BIO-room during investigation of the temperature sensitivity of the depleted volume at HIMAC.

The used position sensitive detector (Hamamatsu) exhibits still unexplainable discrepancy in signal yield compared to position insensitive detectors. Further irradiations will be necessary for us to understand the underlying differences in charge collection process inside the detector.



**Figure 3: M-42 POSITION: Change in depletion zone thickness vs. temperature.**

### 3. M-42 BIG and M-42 EXT

M-42 BIG is a newly developed system by the DLR which features a sensor with a large surface area. The innovative aspect of the design is the utilization of an advanced and fine-tuned analog processing signal chain, along with cutting-edge digital electronics. Together they result in a single signal chain that covers a wide dynamic range, eliminating the need to combine two (e.g. DLR-RAMIS device) or three separate dynamic ranges. This system in current configuration covers energy range over 300 MeV (original M-42 design reached 20 MeV only) which enables the measurement of primary iron ions in space and further refines the dose measurement while exactly incorporating particles that used to be previously in the overflow bin.

It is incomparably complicated to reliably simulate deposited charges in the detector with high fidelity. Thus, it is necessary to test the detector in a known homogeneous radiation field. The large size of the uniform beam at HIMAC is for us the only known possibility to irradiate a detector with dimensions of 28 x 28 mm<sup>2</sup>. High LET penetrating particles like HIMAC's Fe500 are very convenient for that purpose as they are approaching the upper limit of the device's capabilities.

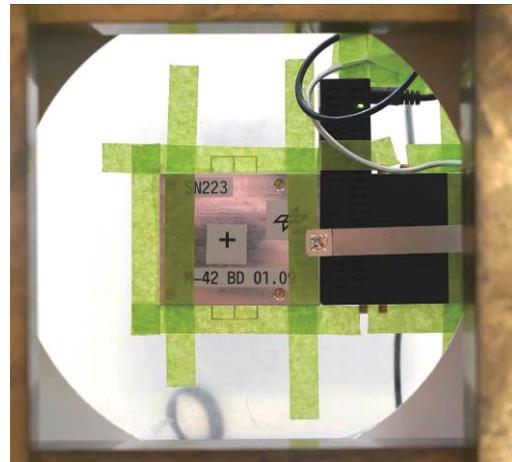
Figure 4 presents the detector head of M-42 BIG at the irradiation position.

The M-42 EXT dosimeter is an extremely low-power device. As it covers high deposited energies present in galactic cosmic radiation, it will be used for area monitoring and personal dosimetry of charged particles for space applications. Thanks to the several HIMAC Beam irradiations, the developmental work on the electronics signal chain yielded into 120 MeV dynamics.

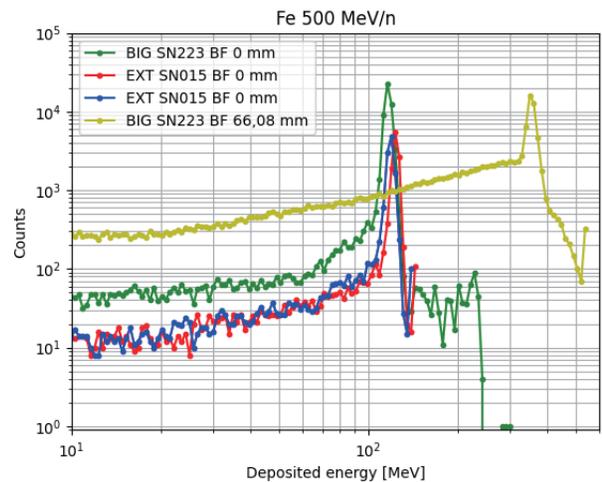
It is planned to use the M-42 EXT devices on the upcoming space missions to the Moon within the NASA Artemis program, but the system can also be applied for radiation measurements in research in relation to cancer therapy and space radiation shielding development.

During the beamtime in February 2024 it was possible to compare two M-42 EXT units with the first prototype of

the M-42 BIG. Figure 5 provides the comparison of the  $E_{Dep}$  spectra for the 500 MeV/n Fe ions peaking at about 115 MeV in Silicon. Although the EXT units have already a very wide measurement range up to 120 MeV in Si, the newest DLR development is capable of measuring up to 500 MeV in Si – this is illustrated in Figure 5 by the BIG measurement with binary filter of 66.08 mm thickness.



**Figure 4: Setup of the M-42 BIG at the irradiation table in the BIO-room at HIMAC.**



**Figure 5: Comparison M-42 EXT (SN015 and SN016) and M-42 BIG (SN223) showing the further extended measurement range in the newest developed BIG device.**

### 4. Conclusion and Outlook

Two irradiations in FY2024 both with Fe 500 MeV/n ions in the BIO facility were used to progress in the development of our three different active detector systems: M-42 POSITION, M-42 BIG and M-42 EXT.

The DLR team is especially grateful to the colleagues at HIMAC and at QST for their ongoing help and support during the irradiation campaigns. The data collected during our HIMAC irradiation campaigns present a very valuable input for our newly developed instrumentation.

<sup>a</sup>DLR, Germany; <sup>b</sup>QST-NIRS, Japan.

**Human Space Exploration – The Radiation risks and novel new detector developments (23H474) – Annual Report FY2024**  
**T. Berger<sup>a</sup>, K. Marsalek<sup>a</sup>, B. Przybyla<sup>a</sup>, M. Kasemann<sup>a</sup>, M. Rohde<sup>a</sup>, Daniel Matthiä<sup>a</sup>, H. Kitamura<sup>b</sup>, S. Kodaira<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>DLR, Germany; <sup>b</sup>QST-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:

Stuart P. George, Ramona Gaza, Daniel Matthiä, Diego Laramore, Jussi Lehti, Thomas Campbell-Ricketts, Martin Kroupa, Nicholas Stoffle, Karel Marsalek, Bartos Przybyla, Mena Abdelmelek, Joachim Aeckerlein, Amir A. Bahadori, Janet Barzilla, Matthias Dieckmann, Michael Ecord, Ricky Egeland, Timo Eronen, Dan Fry, Bailey H. Jones, Christine E. Hellweg, Jordan Hourri, Robert Hirsh, Mika Hirvonen, Scott Hovland, Hesham Hussein, A. Steve Johnson, Moritz Kasemann, Kerry Lee, Martin Leitgab, Catherine McLeod, Oren Milstein, Lawrence Pinsky, Phillip Quinn, Esa Riihonen, Markus Rohde, Sergiy Rozhdestvensky, Jouni Saari, Aaron Schram, Ulrich Straube, Daniel Turecek, Pasi Virtanen, Gideon Waterman, Scott Wheeler, Kathryn Whitman, Michael Wirtz, Madelyn Vandewalle, Cary Zeitlin, Edward Semones & Thomas Berger (2024) Space radiation measurements during the Artemis I lunar mission. *Nature* 634, 48–52 (2024) <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07927-7>

Schennetten K, Matthiä D, Meier MM, Berger T and Wirtz M (2024) The impact of the Gannon Storm of May 2024 on the radiation fields at aviation altitudes and in low earth orbits. *Front. Astron. Space Sci.* 11:1498910 <https://doi.org/10.3389/fspas.2024.1498910>

The following presentations were given in relation to instruments tested at HIMAC within the relevant HIMAC research projects at COSPAR Assembly in Busan, South Korea in July 2024.

- Thomas Berger “RADIATION MEASUREMENTS IN SPACE WITH SPECIAL FOCUS ON THE MARE EXPERIMENT DURING THE NASA ARTEMIS I MISSION”
- Thomas Berger et al. “THE DOSIS AND DOSIS 3D PROJECT TO MEASURE THE RADIATION ENVIRONMENT IN THE COLUMBUS LABORATORY OF THE ISS – DATA FROM 2009 – 2024”

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 Boulder, USA in September 2024.

- Karel Marsalek et al. “Over 2000 days in space – the RAMIS radiation detector on the DLR Eu:CROPIS mission”

- Thomas Berger et al. “DOSIS and DOSIS 3D – active and passive radiation measurements in Columbus from 2009 - 2024”
- Moritz Kasemann et al. “ASTROBOTIC Peregrine 1 Mission DLR M-42 Data and Update on M-42 Instrument Family”
- Martin Losekamm et al. “The RadMap Telescope Updates, Early Results, and Next Steps”

# Cross sections for charge pickup reaction of heavy ions On elemental targets at HIMAC energies (23H476)

DONG-HAI ZHANG<sup>a</sup> and Satoshi Kodaira<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Institute of Modern Physics, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China

<sup>b</sup>National Institute of Radiological Sciences, National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology, 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555, Japan

## Abstract

The proposed experiments (23H476) using the Himac beams study the charge pickup cross sections of heavy ions on elemental targets. We try to find out the dependence of charge pickup cross sections on the target mass for the same projectile at the nearly same energies, and the dependence on the projectile mass for the same target at the nearly same beam energies. From these studies we try to understand the reaction mechanism of charge pickup at Himac beam energies, and to find out some relations with the results at high energies.

## Background and objectives of the experiment

Nuclear charge pickup reactions are the charge exchange reactions in heavy ions induced interaction at relativistic and intermediate high energies. The study of their properties is an interesting subject in many basic researches and applications such as astrophysics, cosmic radiation and space flight, as well as in production of radioactive beams. Theoretically charge pickup reaction is interpreted as a very peripheral and surface interaction. The cross sections of peripheral interactions should depend on the impact parameter ( $A_p^{1/3} + A_t^{1/3}$ ), while the cross sections of surface interaction should depend on the cross sectional or surface area. These theoretical predictions are not consistent with the experimental results of charge pickup cross sections measured using different experimental setups at LBL, AGS, SPS and GSI SIS energies at beam energy greater than 1 A GeV. At LBL energy the cross section for charge pickup by  $\sim$  GeV/n projectiles was generally given to within a factor of two by the expression  $1.7 \times 10^{-4} \gamma_{pt} A_p^2$  (in mb), where  $\gamma_{pt}$  ( $= A_p^{1/3} + A_t^{1/3} - 1.0$ ) implied peripheral collisions. This projectile mass dependence has not been totally understood for a nuclear process. For the dependence of nuclear charge pickup cross section on target mass at LBL energy, a power law relation of  $a A_t^b$  (in mb) was found, with an exponent range from 0.2 to 0.45 depending on the type of projectile.

The proposed experiments (23H476) is to study the dependence of charge pickup cross sections on the target mass for the same projectile at the nearly same energies, and the dependence on the projectile mass for the same target at the nearly same beam energies.

## Activities and results in FY 2024

23H476 research project will run three years from April 2023 to March 2026. In FY2024, the beam times for 23H476 had been allocated on June 12<sup>th</sup> (Fe 500 MeV/n) and October 8<sup>th</sup> (Xe 290 MeV/n). We have finished these two exposures at Himac and begun to scan

the stacks at Institute of Modern Physics, Shanxi Normal University, China.

We have finished the measurement of total and partial charge-changing cross sections for <sup>28</sup>Si fragmentation on CH<sub>2</sub>, C, Al and Cu targets at 131 A MeV. The primary experimental results are presented in Table 1 and 2. The etched track area distribution of projectile and their fragments of Si on C target are given in Fig.1. The relation of etched track area and the charge of fragments are presented in Fig.2. It is shown that the area of etched track linearly depends on the charge of fragment.

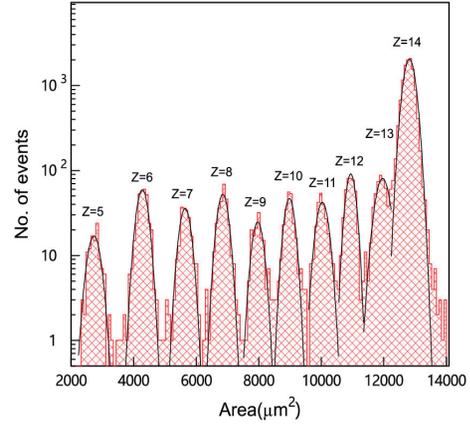


Fig.1 Etched track area distribution of projectile and their fragments of Si on C target

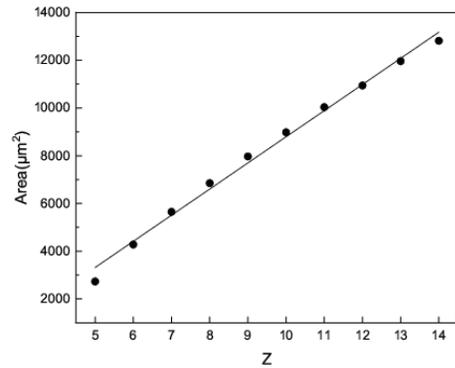


Fig.2 Relation of etched track area and the charge of fragments for Si fragmentation on C target.

We have finished the part scanning work for <sup>20</sup>Ne fragmentation on CH<sub>2</sub>, C, Al, Cu, Sn, Ag and Pb targets at 400 A MeV, the following works including manual check of track scanning, track reconstruction, the charge distinguish of fragments and the calculation of the total, partial and charge pickup cross sections will be finished in next year.

Table 1. Total charge-changing cross sections (in mb) for  $^{28}\text{Si}$  on  $\text{CH}_2$ , C, Al and Cu targets at 131 A MeV.

	Experiment	Tripathi[1]	Sihver[2]	Bradt[3]	Nilsen[4]
$\text{CH}_2$	604±12	607		654	525
C	1025±28	1212.2	1244.4	1157	1006
Al	1394±31	1641.4	1677.9	1552	1318
Cu	2336±53	2349.0	2389.8	2204	2117

Table 2. The partial charge-changing cross sections (in mb) for  $^{28}\text{Si}$  on  $\text{CH}_2$ , C, Al and Cu targets at 131 A MeV.

$\Delta Z$	$\text{CH}_2$	C	Al	Cu
1	58.3±3.9	90.7±8.3	109.7±14.1	152.6±17.6
2	76.8±4.5	51.1±6.2	50.4±9.5	262.4±23.1
3	51.8±3.7	94.5±8.5	86.3±12.5	181.1±19.2
4	34.4±3.0	86.9±8.1	44.9±9.0	95.6±14.0
5	21.4±2.4	60.2±6.8	18.0±5.7	85.5±13.2
6	19.0±2.2	52.6±6.3	48.6±9.4	93.6±13.8
7	10.4±1.6	57.2±6.6	46.8±9.2	154.6±17.7
8	19.5±2.3	69.4±7.3	70.2±11.2	223.8±21.3
9		88.4±8.2	54.0±9.9	132.2±16.4

#### Future plans of the study

Nuclear charge pickup process is a scarce nuclear interaction with mb cross sections. It needs more and more experimental data to understand the behind reaction mechanisms. We hope to have a system investigation using HIMAC beam to study nuclear charge pickup process in following years.

#### References

- [1] R.K. Tripathi, F.A. Cucinotta, J.W. Wilson, Nucl. Instrum. Meth. B117 (1996) 347.
- [2] L. Sihver, C.H. Tao, R. Silberberg, et al., Phys. Rev. C47 (1993) 1225.
- [3] H.L. Bradt, B. Peters, Phys. Rev. 77 (1950) 54.
- [4] B.S. Nilsen, C.J. Waddington, J.R. Cummings, et al., Phys. Rev. C52 (1995) 3277.

## List of Publications

### Publications

Ying-Hua Dang, Jun-Sheng Li, Dong-Hai Zhang, Ya-Ting Xi, Satoshi Kodaira, Nakahiro Yasuda,,: Investigation of projectile fragment emission in the fragmentation of  $^{28}\text{Si}$  on C target at 736 A MeV. Intern. J. Mod. Phys. E33, 2450030 (2024).

Ying-Hua Dang, Jing-Xiao Kang, Yang Wang, Yao Li, Ru Zhang, Jun-Sheng Li, Dong-Hai Zhang, Satoshi Kodaira, Nakahiro Yasuda,,: The total and the partial charge-changing cross sections of  $^{28}\text{Si}$  fragmentation on C,  $\text{CH}_2$  and H targets at 500-800 A MeV. Int. J. Mod. Phys. E33, 2450044 (2024).

# 民生部品の宇宙利用拡大に向けた高信頼車載デバイスの放射線損傷メカニズム解明

Radiation damage mechanism for highly reliable onboard devices for the expansion of consumer components into space applications

(23H479)

大島 武<sup>A</sup>, 牧野 高紘<sup>A</sup>, 小平 聡<sup>A</sup>, 北村 尚<sup>A</sup>, 金田 哲弥<sup>B</sup>, 加藤 一成<sup>B</sup>, 畠 邦彰<sup>B</sup>, 四ヶ所 陽介<sup>B</sup>,  
朝倉 浩一<sup>B</sup>, 木塚 達哉<sup>C</sup>, 木村 友久<sup>C</sup>

T. Ohshima<sup>A</sup>, T. Makino<sup>A</sup>, S. Kodaira<sup>A</sup>, H. Kitamura<sup>A</sup>, T. Kanata<sup>B</sup>, I. Kato<sup>B</sup>, K. Hata<sup>B</sup>, Y. Shikasho<sup>B</sup>,  
K. Asakura<sup>B</sup>, T. Kizuka<sup>C</sup>, T. Kimura<sup>C</sup>

## Abstract

Many large-scale industrial automotive components demonstrate excellent resistance to temperature, vibration, and impact, as well as high reliability, making them promising candidates for use in space systems. Compared to space-grade components, they are often more cost-effective and therefore offer considerable potential to improve the price competitiveness of space systems. However, expanding the use of consumer-grade components in space applications requires careful evaluation of the risks associated with malfunctions and damage caused by space radiation.

In this project, we aim to utilize car-mounted power devices—specifically RC-IGBTs and SiC-MOSFETs—which are well-characterized in terms of their cross-sectional structures among consumer technologies. We will measure characteristic variations caused by single-ion-induced breakdown phenomena and heavy-ion irradiation, with the objective of elucidating the mechanisms underlying radiation-induced damage and malfunction.

## 1. はじめに

近年の宇宙利用の需要拡大に伴って、民生部品の積極的な活用が喫緊の課題となっている。産業規模の大きい自動車部品の多くは耐温度環境特性、耐振動特性、耐衝撃特性、信頼性に優れ、宇宙システムに活用できる可能性があるものが多い。宇宙用部品と比較しても非常に安価であり、その活用によって宇宙システムの価格競争力を大きく改善できる可

能性が高い。一方で、民生部品の宇宙利用拡大には宇宙放射線による誤作動や損傷のリスクを十分に検討しておく必要がある。本研究においては、トヨタ自動車ならびにデンソーで内製開発した民生技術の中でも断面構造の把握できている車載用パワーデバイス（RC-IGBTならびにSiC-MOSFET）を用いて単一イオン誘起破壊現象と重イオン照射による特性変動量を実測し、放射線による損傷・誤作動のメカニズムを明らかにすることを通じて、部品故障のメカニズムとその対処法の検討を行うとともに、試験方法や耐性評価の基準について検討することを目的としている。令和6年度においては、前年度のRC-IGBTの評価に引き続きSiC-MOSFETの単一イオン誘起破壊を観測するため、QSTが有する重粒子線がん治療装置HIMACを活用し、半導体材料を貫通する飛程を持つ高エネルギーのXeビームを用いた照射試験を実施し、部品故障メカニズム把握と対策に関する検討を実施した。

## 2. 2024 年度進捗状況

令和6年10月22日にXe 290 MeV/uのマシントイムにおいて、SiC-MOSFETへの照射試験を行った。SiC-MOSFET立体構造中の深さに依存したエネルギー付与に対する照射効果の依存性を明らかにするため、バイナリフィルターの厚さを調整することにより、デバイス内飛程を表1のように2パターン作成した。

RUN#1では各条件共に200Vから50V刻みで印加電

圧を上昇させていき、短絡・破壊が発生した印加電圧を特定した。RUN#2では破壊直前の電圧を細かく10V刻みで上昇させ、破壊時の電圧を特定した。電圧条件と破壊時の状況を整理したものを図1に示す。

条件1と2で電荷敏感型プリアンプを用いて照射時に発生した電荷量を収集し、その電界強度依存性をモニタリングした。イオン照射中のSiC-MOSFETは、前置増幅器を介しドレインに100~600Vの電圧が印加され、それぞれの電圧状態での電荷量の分布を比較した。前置増幅器で観測した電荷量は、電荷量に比例した波高を持つパルスに整形され、波高分析器(PHA)にて電荷量と頻度の関係で出力される。図2に、取得した電荷量の頻度分布を示す。横軸は、電荷量(pC)、縦軸は観測頻度を示している。イオンはデバイス表面位置、時間的にもランダムに入射するが、照射中すべてのイオンによる電荷情報を個別に観測し、観測した電荷量ごとに頻度を数え上げた。何れの条件においても、印加電圧の増加に伴い、大きな電荷量を観測する頻度が増えていく。これは、印加電圧の増加に伴うデバイス内空乏領域の拡大により、その空房層内の電界でイオンが生成する電荷をより多く収集可能になったことや、イオンに誘起された電荷がデバイス内の電界に従って移動する際に、引き起こされるインパクトイオン化による電荷が増幅されたことによると考えられる。一般的に、入射LETの大きさに比例して、収集電荷量も多くなる。本結果では、入射LETが小さい条件1において、より大きい電荷量が観測されている。この原因解明にはデバイス構造を考慮した電荷収集シミュレーションによるさらなる解析が必要である。耐圧試験の結果を考慮すると、本研究における条件下では、観測電荷量の大きさとシングルイベント破壊リスクには正の相関があると言える。

以上より、シングルイベントバーンアウト (SEB) 耐性はデバイス内での電荷収集ダイナミクスに依存することが分かった。すなわち、縦方向で電界を受けるデバイスにおいて、デバイス内でのイオン停止深さによって電界強度が変わるため、アバランシェの発生やすさが異なりSEB耐圧依存を持つことが分かった。

### 3. まとめ

令和5・6年度を通じて実施したHIMAC照射試験の結果を受けて、観測電荷量の大きさとシングルイベント破壊リスクには正の相関があり、デバイス内深さに応じたSEB耐圧依存性が明確になった。SEBのような致命的な故障につながる試験として、試験方法（放射線種の種類とエネルギー・LET、照射フラックス・フルエンス）に関する一定の基準を確認した。デバイス側の照射試験基準の策定については、引き続き詳細の検討を進める予定である。

表1. Xe 290 MeV/uビーム照射条件

	バイナリフィルタ厚 [mm-water]	素子面入射エネルギー [MeV/u]	素子面LET [MeV cm <sup>2</sup> /g]	素子内飛程 [μm]
条件1	9.738	27.74	37 (in Si)	319 (in Si) 220 (in SiC)
条件2	10.174	7.28	64 (in Si)	71 (in Si) 50 (in SiC)

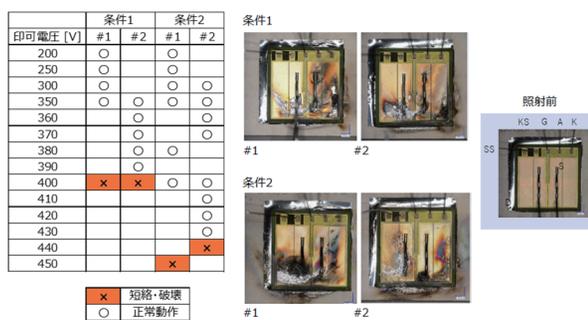


図1. 電圧条件と破壊時の状況

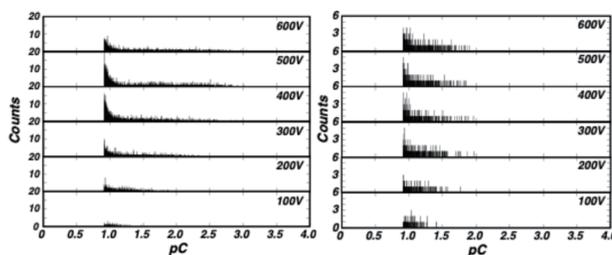


図2. 発生電荷量頻度分布: (左図) 条件1、(右図) 条件2

- A) QST
- B) トヨタ自動車 (株)
- C) 三菱重工業 (株)

23H479 関連成果一覧

【論文】

1. S. Kodaira, E. Benton, Y. Iwata, T. Makino, J. Miller, T. Ohshima, Y. Uchihori, C. Zeitlin, "Space Radiation Research with Heavy Ions at HIMAC", *Life Sci. Space Res.*, 43 (2024) 4-12.

# SRAM and Diode Irradiation with Xe and Kr Heavy Ions at HIMAC (24H488)

M. Cecchetto<sup>a</sup>, K. Bilko<sup>a</sup>, R Garcia Alia<sup>a</sup>, S. Kodaira<sup>b</sup>

## Abstract

Irradiation of Static Random Access Memories (SRAM) and silicon diodes were carried out during two test campaigns at HIMAC, in 2024 with 178 MeV/n Xe and in 2025 with 320 MeV/n Kr ions. The aim of this research is to study the impact of high energy heavy ions on Single Event Effect (SEE) cross sections and the energy deposition in silicon diodes by varying the LET through PMMA degraders.

## 1. Background and objectives

SEEs are a major concern when electronics operate in radiation environments. Specifically, Single Event Upsets (SEUs) and Single Event Latch-up (SEs) in memories are studied with heavy ions because these particles closely replicate the high-linear energy transfer (LET) conditions encountered in space and other radiation environments. The devices tested at HIMAC were measured in several facilities and are also used as a mean of comparison and calibration, with the aim of developing the capability to provide high-energy heavy-ion beams for electronics testing at CERN (e.g., for space applications) [1]. In addition, the knowledge of the heavy ion sensitivity is used in combination with Monte Carlo simulation models to estimate SEE failures in accelerator environment induced by neutrons and protons. SEUs (bit flips in memories, soft errors) and SELs (potentially destructive short circuits) are caused by the deposition of charge when energetic particles strike sensitive regions in electronic devices. The use of high energy heavy ions available at HIMAC with respect to standard energies (tens of MeV/n) has several advantages, linked to the high penetration properties of the beam in materials. For instance, typical heavy ion irradiation is performed in vacuum and by removing the package of electronic chips to allow the beam to reach the sensitive volume with a defined LET, which is not needed with high energy beams. The objectives of these tests are to measure SEE cross sections at several LETs obtained through PMMA degraders to study their behavior. Additionally, tests with a fully fragmented beam are of interest to quantify the variation on the cross sections. These results are compared with those from other irradiation facilities where the same SRAMs were used [2]. In addition, silicon diodes are used to measure the ion flux for monitoring purposes and calibration.

## 2. Test campaigns at HIMAC

Two test campaigns were conducted at HIMAC: with 179 MeV/n Xe ions at the location of the device under test (DUT) in 2024 and with 320 MeV/n Kr ions in 2025. The Xe and Kr beam sizes were 6 and 8 cm in diameter, respectively, with a homogeneity within 10%. The flux was monitored by means of a scintillator and also by one

DUT (silicon diode). Fig. 1 shows the setup installed at HIMAC, while Table 2 present the tested SEU-sensitive memories which were the same tested in both years. Each device was tested with several LETs, calculated in silicon through SRIM considering the respective PMMA thickness (density of 1.19 g/cm<sup>3</sup>) and shown in Table 1. Two SRAMs and a silicon diode were tested at the same time, by aligning them so that the beam was fully covering the surface of the sensitive areas.



Fig. 1 SRAM and diode setup irradiated at HIMAC in 2024 (left) and 2025 (right).

TABLE 2  
SEU TESTED COMMERCIAL OFF THE SHELF SRAMS

DUT	Size	Reference	Tech.
ISSI	32 Mbit	IS61WV204816BLL-10TLI	40 nm
Cypress	16 Mbit	CY62167GE30-45ZXI	65 nm
Renesas	8 Mbit	RMLV0816BGSA-4S2	110 nm

TABLE 1  
LETs OBTAINED WITH PMMA DEGRADERS USED DURING THE TESTS

Xe (2024)		Kr (2025)	
PMMA [mm]	LET in Si [MeVcm <sup>2</sup> /mg]	PMMA [mm]	LET in Si [MeVcm <sup>2</sup> /mg]
0	11.9	0	3.57
3.50	14.0	20	5
4.0	14.6	25	6.14
5.0	16.2	28	7.65
5.50	17.2	30	9.91
6.50	20.2	30.5	10.98
7.00	22.7	31	12.62
7.50	25.4	31.5	15.44
8.00	31.5	32	23.17
8.50	47.4		
9.00	Fragmented		
9.50	Fragmented		
10.48	Fragmented		

## 3. SRAM results – SEU measurements

The SEU cross sections measured at HIMAC for the three SRAMs are shown in Fig. 2, Fig. 3, and Fig. 4 for the ISSI, Cypress and Renesas memory, respectively. The SRAMs were tested with the full package and delidded (the package was removed exposing the sensitive area of the chip). As expected, for the three SRAMs, generally the cross sections measured with the package is similar to that measured delidded confirming the high penetration of the

beam. The HIMAC results with 178 MeV/n Xe and 320 MeV/n Kr ions are also compared to the cross sections measured in other facilities: RADEF (FI), KVI (NL) and GANIL (FR), which are fitted with a Weibull function in figures.

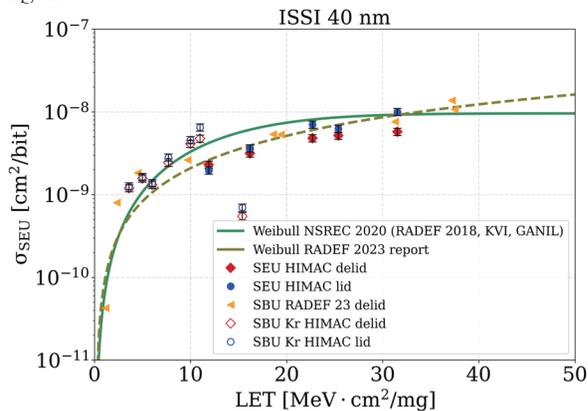


Fig. 2 - ISSI SRAM SEU cross sections comparison.

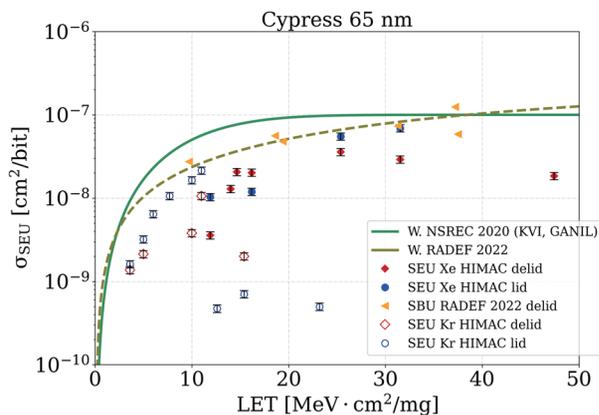


Fig. 3 - Cypress SRAM SEU cross sections comparison.

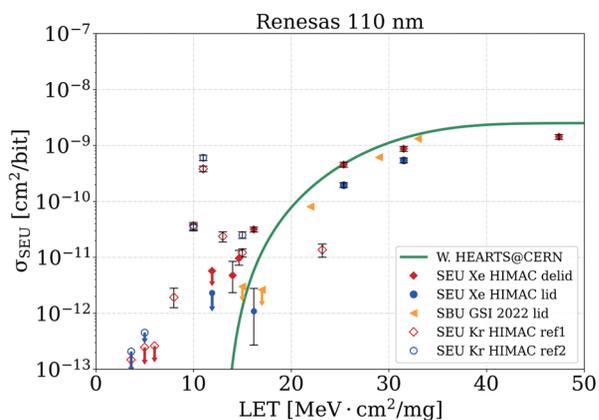


Fig. 4 - Renesas SRAM SEU cross sections comparison.

The ISSI cross sections (Fig. 2) with both Xe and Kr ions are aligned with the past measurements. However, the agreement considering the Cypress memory with both ions (Fig. 3) is not satisfactory as the cross sections at HIMAC resulted up to some orders of magnitude lower than expected. This behavior may be due to electromagnetic interferences produced by elements of the machine with the readout motherboard and needs to be further investigated. The Renesas memory presents compatible results using Xe ions at HIMAC, while

exhibiting high sensitivity to Kr ions at LET values lower than the expected threshold.

Interestingly, the SEU cross sections of the memories measured with a fully fragmented beam by using a thick PMMA showed to be very similar to those at the largest LET, roughly corresponding to the Bragg's peak.

### 3. Silicon diode measurements

During the experiments in 2024, we also characterized a commercially available silicon detector - Canberra FD 50-14-300RM [3]. This detector is crucial for the CHIMERA [4] and HEARTS projects [1], as it is the primary beam instrumentation used for intensity calibration. The measured energy deposition spectra collected at HIMAC, depending on the PMMA degrader thickness, are presented in Fig. 5. These measurements will be benchmarked against FLUKA Monte Carlo simulations, as well as against measurements collected at other heavy-ion facilities (BNL, GSI, CERN).

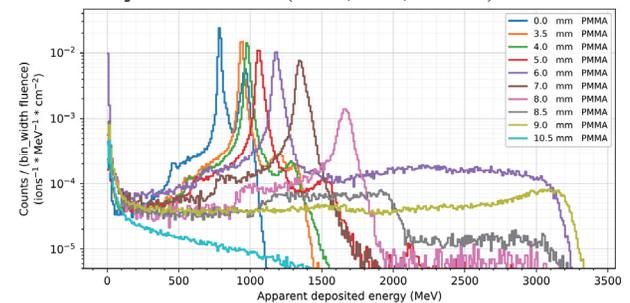


Fig. 5 - Diode energy deposition counts - Xe ions (2024).

### 4. Conclusions

The tests performed at HIMAC with Xe and Kr ion in 2024 and 2025 permitted to measure SEU cross sections and energy deposition in silicon diodes to enhance the knowledge on the impact of high energy heavy ions in electronic devices. As some results differ from those obtained at other heavy ion facilities, further investigation is required. Moreover, meaningful results were obtained regarding the fully fragmented beam, showing SEU cross sections as high as those obtained at LETs corresponding to the Bragg's peak.

- [1] R. García Alía et al., "The HEARTS EU Project and its Initial Results on Fragmented High-Energy Heavy Ion Single Event Effects Testing", in *IEEE TNS*
- [2] A. Coronetti et al., "SEU characterization of commercial and custom-designed SRAMs based on 90 nm technology and below," 2020 IEEE
- [3] K. Bilko et al., "Mixed-Field Radiation Monitoring and Beam Characterization Through Silicon Diode Detectors," in *IEEE TNS*
- [4] K. Bilko et al., "CHARM High-Energy Ions for Microelectronics Reliability Assurance (CHIMERA)," in *IEEE TNS*

<sup>a</sup>CERN <sup>b</sup>HIMAC

## List of Publications

(2) Data workshop paper (still not submitted)

(3) Oral presentation (accepted at NSREC 2025)

R. García Alía et al., "Implications of Ion Fragmentation for High-Energy Heavy Ion Single Event Effects Testing", NSREC 2025 conference, Nashville, Tennessee, United States, July 14-18, 2025



## 2024年度 HIMAC 共同利用研究課題

整理番号	申請者	課題名	報告書ページ
24L126	篠藤誠	LET 最適化法を用いた膀胱癌炭素イオン線治療法の新規治療開発	3
23L134	今井礼子	骨軟部腫瘍に対するマルチイオン照射法による LET 制御重粒子線治療法の開発	7
24L135	磯崎哲朗	心臓 MRI を用いた食道癌に対する重粒子線治療後の心機能障害計測と新規照射技術開発	9
24L136	山口有輝子	大腸癌術後のオリゴ転移に対する QST 病院における重粒子線治療の成績	21
24L137	黒崎宏貴	膀胱癌に対する重粒子線治療における予後予測因子の解明	11
24L138	岡東篤	“前立腺肥大症手術歴のある前立腺癌	14
24L139	村田和俊	に対する重粒子線治療の効果と安全性の検討”	17

(7 課題)

## 2024 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
22J001	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	25
22J114	高橋豊	光子線抵抗性細胞株移植マウスモデルを用いた免疫チェックポイント阻害剤と重粒子併用時のアブスコパル効果とその作用機序の検討	29
22J137	KIM Jong Ki	Investigation of Carbon Ion Stimulation (CIS) treatment on iron deposit in Alzheimer tau cell and synuclein Lewy Bodies in Parkinson Disease model	107
24J146	Safavi-Naeini, Mitra	Evaluation of a Prototype System for Prompt Gamma Detection and Neutron Capture Discrimination in NCEPT	
24J147	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	33
24J148	舟山知夫	伴侶動物がん細胞の放射線感受性解析	37
22J150	関原和正	悪性腫瘍（放射線、抗がん剤に抵抗性を示す難治がん含む）に対する重粒子線の有用性および分子機構の解明	110
23J152	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	40
23J153	井川和代	三次元培養による重粒子線評価システムの検討	43
23J154	中島菜花子	プロテアソーム阻害剤の炭素線増感効果	46
23J155	Ebner Daniel Keith	Advanced multiomic analysis of DNA Damage and Immunotherapeutic Inhibitors with Heavy-Ion Radiotherapy	113
24J156	武島嗣英	光子線と重粒子線の抗腫瘍免疫応答の比較	48
23J204	吉岡公一郎	重粒子線を用いた根治的不整脈治療の開発	63
24J206	石川仁	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	51
24J207	Prezado Yolanda	Heavy ion minibeam radiation therapy: safety and efficacy studies	116
22J307	Eun Ho Kim	The identification of miRNA-17 and miR-214 as Carbon-ion radiosensitizer on osteosarcoma	119
24J315	平山亮一	高 LET 粒子線による腫瘍再酸素化の機序解明	54
23J327	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	57
24J345	Li Qiang	Study on the mechanism of ferroptosis induced by high-LET carbon ions in human hepatocellular carcinoma cells	マシント イム無の 為未発表
24J347	小西輝昭	ブラッグピーク近傍の重粒子イオンを用いたイオン特的な細胞致死効果の研究 Ion specific biological effect on cell inactivation of heavy ion near the Bragg peak	60
23J348	Di Cuixia	Molecular mechanism of heavy ions overcoming radiation resistance of p53 mutant cancer cells	123
23J349	Jing Si	The Functional Role and Underlying Mechanism of Heavy Ions in Overcoming the Radioresistance of Quiescent Cancer Cells	127
23J350	Sun Chao	Mechanism study on much efficient induction of tumor cell death by heavy ion irradiation: the role of NADPH oxidase-mediated mitochondrial vicious cycle	130
24J413	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	68
24J428	PORCEL Erika	Radioamplification effect of nanoparticles study on 3D cell models	133
22J433	中野敏彰	重粒子線誘発により生じる高複雑性 DNA 損傷の修復機構の解明と癌治療へ向けた応用研究	71
22J444	島田幹男	重粒子線による幹細胞のゲノム安定性への影響	75
23J446	Takata Kei-ichi	Mutational signatures induced by high LET radiation	78

## 2024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
24J447	鈴木雅雄	重粒子線照射がん細胞と非照射細胞間のバイスタンダー効果を紹介した生物効果誘導解明	82
24J468	平山亮一	重粒子線照射後における低酸素生物に関する基礎研究	85
24J472	松尾陽一郎	重粒子線によるDNA損傷と突然変異誘発機構の分子レベルでの解析	88
24J501	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	91
23J503	松山知樹	重粒子線による植物品種識別と突然変異育種に関する研究	95
24J505	高橋美智子	重イオンビーム照射による栄養ストレス耐性植物の作出	98
24J507	下川卓志	実用化を目指した有用微生物の単離・育種	101

(42 課題)

## 2024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
22H005	坂間誠	重粒子線治療照射法に関する総合的研究	139
24H095	新藤浩之	化合物半導体への重イオンの影響に関する研究	170
23H138	山内知也	“高感度飛跡検出器に相応しい新しい検出閾値概念とエッチングモデルの確立	161
23H189	寺沢和洋	Toward a new concept for detection threshold and etching-models suited to track detectors with high registration sensitivity”	173
24H212	中竜大	位置有感比例計数管の重イオンに対する応答	164
23H248	George Stuart P	超微粒子原子核乾板によるナノスケール高電荷分離放射線飛跡検出器の展開	207
24H262	為ヶ井強	Measurement of Isotopic Light Ion Cross Sections with a Nuclear Fragment Spectrometer	153
23H285	山谷泰賀	粒子線照射による新規超伝導体における臨界電流増強と超伝導対称性の同定	142
22H358	RAFFY Quentin	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	マシンタイム無の 為未発表
23H377	Ploc Ondrej	Dose-rate effects with accelerated ions: Experimental investigation and Simulation of water and biomolecules radiolysis	210
24H380	百田佐多 生	Novel Space Dosimetry System for the Czech Satellite in the Cislunar Environment	マシンタイム無の 為未発表
23H387	福田祐仁	中間エネルギーにおける破碎反応メカニズムの研究	213
22H409	牧野高紘	レーザー加速イオン特性評価のための高精度エネルギースペクトロメータの開発	156
22H414	Hajdas Wojciech	SiC MOSFET のシングルイベント過渡応答の直接測定	183
22H426	上野恵美	Tests of Heavy Ion Telescopes for JUICE and other future missions of ESA	150
24H437	Rosenfeld Anatoly B	炭素線照射した脂質中に生成するフリーラジカルの検出とその反応解析	177
24H443	山口貴之	In-Field and Out-of-Field Dose Profile from Therapeutic Hadron Therapy Beams	195
24H445	大田晋輔	不安定原子核の荷電変化反応の研究	189
24H446	楠本多聞	ガスアクティブ標的による核物質の物性研究	221
24H455	外川学	放射線化学実験で解き明かす生物効果の線量率依存性メカニズムの解明	198
22H461	Benton Eric R	高放射線耐性を持つ新素材半導体検出器の研究	224
22H462	Safavi Naeini Mitra	Atmospheric Ionizing Radiation Detector Development	
22H465	高橋忠幸	Evaluation of a prototype system for prompt gamma detection and neutron capture discrimination in NCEPT	186
22H466	今井伸明	ガンマ線衛星搭載検出器の重イオン応答の研究	201
22H467	小林正規	対称重イオン核融合反応の断面積評価と新同位体探索	147
23H473	廣瀬重信	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	167
23H474	Berger Thomas	エネルギー分解能を持つ白雲母固体飛跡検出器の開発	227
23H475	Davis Scott C	Human Space Exploration - The Radiation risks and novel new detector developments	免除
23H476	Dong Hai Zhang	Radiation Effects Testing Electronic Components for Space	231
23H479	大島武	Cross sections for charge pickup reaction of heavy ions on	234

## 2024 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
		elemental targets at Himac energies	
23H487	北村徳隆	”民生部品の宇宙利用拡大に向けた高信頼車載デバイスの	159
24H488	García Alía Rubén	放射線損傷メカニズム解明”	237
24H489	Kim Sunghwan M	シリコンカーバイド検出器の重イオンビームに対する応答	免除
24H490	仲田光一	High-energy heavy ions and their interaction with matter for enhanced radiation effects testing of space and accelerator electronics	免除
24H491	Sihver Lembit	Calibrations of Advanced Particle dosimeter and Spectrometer for Heavy Ions in Space Radiation	免除
24H492	小林和淑	”半導体部品の宇宙機器への適用に向けた	157

(36 課題)

