

基金処理欄	
審査区分	34020
5桁数字の“科研費審査区分”を記入して下さい	

## 学 術 ・ 研 究 助 成 申 請 書

公益財団法人住友電工グループ社会貢献基金 御中


研究テーマ (40字以内で記入して下さい)

陰イオンガスを用いた極低放射能アルファ線イメージ分析装置の開発

研究テーマの要旨 (300字以内で記入して下さい)

方向に感度を持つ暗黒物質探索の感度改善のために、放射性不純物のスクリーニング検査が必要である。Time Projection Chamber(TPC)に基づいた表面 $\alpha$ 線イメージ分析器を開発し、汚染画像の取得に成功した。半導体メモリ分野への応用も期待されている。本研究は、さらに感度を $10^{-4}\alpha/cm^2/hr$ へ改善するために、陰イオンガス(SF<sub>6</sub>など)を用いる。小型2次元読み出しデバイスのサイズはそのままに、ドリフト長を拡張することで試料測定面積が拡大できる $\alpha$ 線イメージ分析装置を開発する。

申請者 (同一申請者が、複数の申請書を提出することは出来ません。尚、他の申請者の共同研究者として名前が記されることは問題ありません)

フリガナ 氏名	イトウ	ヒロシ		生年月日	西暦	
	伊藤	博士			1990年 9月 2日生 (28歳)	
現住所	〒939-2252 富山市上大久保531クワット201				学位	博士(理学)
所属 機関	名称	東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設	職位	特任研究員	最寄駅	猪谷
	所在地	Tel:0578-85-9712 Fax:0578-85-9640 〒506-1205 E-mail: itoh@km.icrr.u-tokyo.ac.jp 岐阜県飛騨市神岡町東茂住456				
不在時の連絡先	氏名	清水昭彦	Tel: 0578-85-9630			
	所属機関	東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設				

申請金額

今年度当該研究費総額 380 万円の内 申請金額 165 万円

申請者従事機関承諾書 個々の所属大学からの応募者に上限はありません

当機関に従事する上記申請者が公益財団法人住友電工グループ社会貢献基金の助成に申請することを承諾します。

2019. 年 5 月 31 日

所在

千葉県柏市柏の葉5-1-5

機関名

東京大学宇宙線研究所

職名・氏名

所長 梶田 隆

 (職印又は私印)

機関長 (大学の場合は学科長・学部長以上) の承諾を得て下さい。

申請者名 伊藤博士

申請者の略歴 (大学、研究機関に従事していない場合は研究歴を記入して下さい)

最終学歴	千葉大学大学院 理学研究科 博士後期課程 学位取得		
履歴事項 (最終学歴以降)	2017年10月 1日～2019年 3月31日	神戸大学大学院 理学研究科 学術研究員	
	2019年 4月 1日～現在	東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設 特任研究員	

研究形態 (□に✓印)

共同研究 (申請者の他 1 名)       個人研究

共同研究者

氏名	生年月(西暦)	所属機関	職位	最終学歴
身内賢太朗	1974年10月19日	神戸大学	准教授	東京大学 学位取得

申請者の主な業績 (発表論文、表彰、著作など)

発表論文は、申請研究テーマに関係のあるもので、申請者(代表)及び共同研究者が最近5年間に発表したものの中から5件を限度として最近のものから順に発表年次を過去に遡って記入して下さい

- [1] **Kentaro Miuchi**, Tomonori Ikeda, Hirohisa Ishiura, Kiseki D. Nakamura, Atsushi Takada, Yasuhiro Homma, Ko Abe, Koichi Ichimura, **Hiroshi Ito**, Kazuyoshi Kobayashi, Takuma Nakamura, Ryuichi Ueno, Takuya Shimada, Takashi Hashimoto, Ryota Yakabe, and Atsuhiko Ochi, "Development of a time projection chamber with a sheet-resistor field cage", Progress of Theoretical Experimental Physics, Accepted at 8 April 2019, in press, arxiv.1903.01663.
- [2] **Hiroshi Ito**, K. Horie, S. Shimizu, S. Bianchin, C. Djalali, D. Gill, M. D. Hasinoff, Y. Igarashi, J. Imazato, N. Kalantarians, H. Kawai, S. Kimura, A. Kobayashi, S. Kodama, M. Kohl, H. Lu, O. Mineev, M. Tabata, R. Tanuma, N. Yershov, "Performance check of the CsI(Tl) calorimeter for the J-PARC E36 experiment by observing  $e^+$  from muon decay", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Accepted at 27 May 2018, Nucl. Inst. Meth. A 901 (2018) 1-5.
- [3] Tomonori Ikeda, **Kentaro Miuchi**, Atsuhiko Ochi, Ryota Yakabe, Takashi Hashimoto, Ryosuke Taishaku, Daniel P. Snowden-Ifft, Jean-Luc Gauvreau, Toru Tanimori, Atsushi Takada and Kiseki Nakamura, "Study of Negative-Ion TPC Using  $\mu$ -PIC for Directional Dark Matter Search", EPJ Web of Conferences 174, 02006 (2018).
- [4] Takashi Hashimoto, **Kentaro Miuchi**, Kiseki Nakamura, Ryota Yakabe, Tomonori Ikeda, Ryosuke Taishaku, Miki Nakazawa, Hirohisa Ishiura, Atsuhiko Ochi, and Yasuo Takeuchi, "Development of a low-alpha-emitting  $\mu$ -PIC for NEWAGE direction-sensitive dark-matter search", AIP Conf. Proc. 1921, 070001 (2018).

申請者名      伊藤博士

研究の目的 (この研究に至った経緯、位置づけ、内外の他の研究との対比を含めて記入して下さい)

**【経緯】** 宇宙の構成物質のうち約27%は暗黒物質であると考えられる。暗黒物質は電氣的に中性で、質量を持ち、物質と非常に相互作用しないと考えられており、未だ発見されていない。近年、DAMAは $9.3\sigma$ の統計的優位性で銀河ハローの暗黒物質による季節変動を観測したと主張し続けているが[1]、XENON1T[2], LUX[3], COSINE[4]による追実験では発見に至っていない。一方、太陽系が銀河を回転することから太陽系が進む方向に沿って相対的に暗黒物質は飛来する[5]。そのため、方向感度を持つ暗黒物質探索は、強い証拠を検知し得る。NEWAGE実験はTime Projection Chamber (TPC)を用いて3次元原子核飛跡を検出することで、方向感度を持つ暗黒物質探索を実施してきた[6]。主要なバックグラウンドは $\mu$ -PIC(読み出し基盤)に含まれる $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Tl}$ の放射性不純物である。表面から放射された $\alpha$ 線が、フッ素原子核の反跳事象と間違えるため、素材に含まれる不純物は極限まで除去する必要がある。また、雑音となり得る領域の選択は暗黒物質を効率よく探索するために重要である。そのため、素材の汚染分布を極低放射能レベル( $10^{-4}\alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$ )で検査する必要がある。

**【位置付け】** 極低放射能 $\alpha$ 線イメージング装置は、不純物を極限に取り除いた素材を扱う①宇宙素粒子と②半導体材料の分野において大きな貢献が期待される。

- ① 宇宙素粒子分野については【経緯】に記した通り。
- ② 半導体メモリ分野では、素子に放射線が当たると0/1フリップしてデータが壊れ得るため、ピュアな素材が要求される。現在、はんだなどの部品に含まれる鉛の放射性同位体が課題になっている。三菱マテリアル社の低 $\alpha$ の素材は $10^{-3}\alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$ 程度までラインアップされている[7]。

**【他の研究の対比】** TPCを用いた $\alpha$ 線イメージ装置の概念図を図1に示す。サンプルから放射された $\alpha$ 線はドリフト板の穴を通過して、チェンバー内に入射する。 $\alpha$ 線によって $\text{CF}_4$ ガスが電離されて、電子が電場によって $\mu$ -PICへ誘導される。ヒット時間からz座標に変換することで3次元飛跡に再構成する。以下の表1に他の検出器との比較を示す。本装置は $\alpha$ 線発生位置を決定することができ、検出器由来などの雑音を抑制して低放射能測定できる点が他検出器と比べて特徴的である。

表1.  $\alpha$ 線装置の仕様比較

	現在の本装置[8]	ZnS(Ag)+Si-PM [9]	Ultra-Lo 1800 [10]
検出原理	ガスTPC	シンチレーション光	ガス電離箱
有効面積	10 cm × 10 cm	8 mm × 8 mm	2,600 cm <sup>2</sup>
位置分解能	7 mm( $\sigma$ )	0.2 mm(FWHM)	—
エネルギー分解能	7%( $\sigma$ )@5.3MeV	74%(FWHM)@5MeV	4.7%( $\sigma$ )@5.3MeV
感度限界	$10^{-3}\alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$	0.06 counts/min	$10^{-4}\alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$ [11]
検出効率	21%	0.3%	99.75%

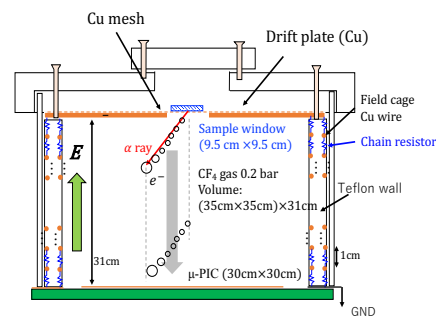


図1. 従来 $\alpha$ 線装置の断面図

- 【参考文献】** [1] J. Phys. Conf. Ser. 1056 (2018) 012005. [2] Eur. Phys. J. 77 (2017) 7781. [3] PRL 118 (2017) 021303. [4] Nature 564, 83-86 (2018). [5] Phys. Lett B 578 (2004) 241. [6] PTEP 043F01 (2015). [7] <http://www.mmc.co.jp/adv/ele/ja/products/assembly/index.html>. [8] arxiv.1903.01090. [9] NIMA 894 (2018) [10] NIMA 750 (2014) 96. [11] NIMA 884 (2018) 157.

この研究の特色 (独創性に関する説明等)

従来のTPCは基本的に電子を誘導して3次元飛跡を再構成するが、ドリフト方向zの絶対座標がわからない点が課題であった。本装置の主なバックグラウンドはガス中のラドンガス(Rn)である。また、試料内部から発生する $\alpha$ 線はエネルギーが低く、装置から発生した $\alpha$ 線と区別がつかなかった。サンプル $\alpha$ 線はz座標が定まっているため、 $\alpha$ 線発生座標の絶対値が決定できれば雑音の $\alpha$ 線を抑制できる。

DRIFTグループが $\text{CS}_2$ ガスを用いてz絶対座標の決定する技術を考案した[12]。電離した時に質量の異なる陰イオンガスが電場で誘導され、 $\mu$ -PICへの到達する時間差から $\alpha$ 線発生位置を決定する。次いで、池田らは $\text{SF}_6$ を用いて $\text{SF}_6^-$ と $\text{SF}_5^-$ の2ピーク観測に成功した[13]。図2にその結果を示す。

陰イオンガス( $\text{SF}_6$ )を用いて $\alpha$ 線の発生位置の絶対値を決定する技術を応用し、 $\mu$ -PICのサイズを変えずにドリフト長を変えて試料検査領域を拡張するシステムを開発する。10 cm × 10 cmの小型 $\mu$ -PICを用いて、検査領域5 cm × 20 cmの $\alpha$ 線イメージ分析装置を試作する。

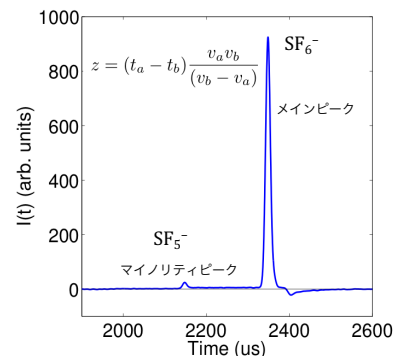


図2. 陰イオンガスによる典型的な信号波形

- 【参考文献】** [12] Phys. Dark Univ. 9-10 (2015) 1-7. [13] EPJ Web Conf. 174, 02006 (2018).

## 研究計画の概要

本研究は神戸大のSF<sub>6</sub>を用いた実績のある有効面積10 cm × 10 cmの小型TPC装置[13]を改良して、有効面積5 cm × 20 cmのα線イメージ分析装置を開発する。以下に計画の詳細を示す。

【装置設計】装置設計を図3に示す。従来のα線測定と異なり、フィールドケージの側面からサンプルα線を入射させる。陰イオンガスを用いたこの設計のメリットを以下に示す。

- (1) ドリフト座標の絶対値が決定できるため、2次元読み出しデバイス(μ-PIC)の面積はそのままに、ドリフト長を伸ばすことで検査可能な面積を拡張することができる。
- (2) 試料はTPCの下に設置することで、粉体や脆い材質でも検査可能になる。試料の汎用性が改善される。

本研究では10 cm × 10 cmのlow-α μ-PICを使用して検出器由来の雑音α線を削減する。活性炭を用いてラドン由来の雑音α線を抑制する。壁に衝突してエネルギーを誤らないように、飛跡の最大値は5 cm程度が要求される。シミュレーションの結果から、本装置では0.5気圧のSF<sub>6</sub>ガスを使用し、5 cm × 20 cmの有効面積を持つ。電場形成のフィールドケージはテフロン製の板に銅線を等間隔平行に巻き、その間に抵抗を取り付けて、線型の電場を形成する。サンプル設置に伴い電場が歪まないように高抵抗シートを取り付ける[14]。ステンレス製のベッセルは(10 cm × 10 cm) × 30 cmの容器をカバーするように設計する。さらに、サンプル交換を容易にするためにベッセルに取り出し機構を取り付ける。

### 【本研究で明らかにすること】

1. ドリフト長によって異なる分解能を考慮して、画像化に適した装置の最大設計を決定する。
2. フィールドケージの側面にサンプルを設置するが、線型電場の形成とα線の開口率の担保を天秤にかけて、感度をもっとも良い設計をシミュレートする。
3. フィールドケージ・TPCを試作：動作確認する。
4. マイノリティピークの観測
5. α線発生位置を取得して画像化する。

【電場設計】Gmesh+Elmerのシミュレータを用いて金属製試料の場合にチャージアップなど、電場を歪めるような不具合がないように、フィールドケージの電場を計算する。試料に露出する銅線にはナイロンもしくは不純物の少ない高分子樹脂を膜状に付着させて内部電場に導体の影響が見えないように施す。

ドリフトプレートに印加する数kVの電圧によって陰イオンの移動速度を調整する。高電圧では、イオン群が自身の電荷で離れて飛跡がぼやける現象(diffusion)を抑えて速くμ-PICに到達できる。一方、低い電圧ではSF<sub>5</sub><sup>-</sup>イオンによる遅延信号の時間差が大きくなるためz座標の位置分解能が良くなる。2つの効果を考慮して画像化した時に総合的に解像度が最も良くなるドリフト電圧を決定する。

【多チャンネル読み出し回路】μ-PICは256本のアノードとカソードストリップ(400μmピッチ)を持ち、TPCは基本ASDとエンコーダの読み出し回路によって飛跡再構成する。NEWAGEで試作した回路は128chを読み出し、領域2.5 cm × 2.5 cmの飛跡再構成に成功した。本研究では既存の回路を改良して領域10 cm × 5 cmの飛跡を再構成する。

【ガス増幅率】μ-PICとGEMを用いた読み出しシステムのガス増幅率をα線と<sup>55</sup>FのX線を用いて測定する。容器内圧力が高い時、印加電圧に対する増幅率は下がる傾向を持つ。0.5気圧で約1000の増幅率を確保し、放電を抑えるために、多層GEMシステムを採用する。GEM単体での信号読み出し、μ-PIC+GEMによる読み出し、μ-PIC+Double GEMへと動作試験のステップを経て目標増幅率を目指す。

【解析アルゴリズム】Flush ADCで読み取った信号波形のメインとマイノリティ・ピークのpileupを分離するアルゴリズムを開発してz座標絶対値を決定する。申請者のpileup波形解析[15]の経験を本研究に応用させる。試料からのα線は発生場所から5 cm以上ドリフトするので、ピーク間が狭い事象は雑音事象として取捨する。メインピークの波形傾向からα線の向きを決定しRn由来の雑音を解析からも抑制する。

【装置性能評価】サイズ5 cm × 2.5 cmの<sup>210</sup>Po-α線源を用いて、本装置の性能を評価する。この線源は従来のα線イメージ装置とUltra-Lo 1800で較正されている。評価項目は、エネルギー較正值と位置依存性、エネルギー分解能、位置分解能、検出効率、雑音頻度、測定限界感度である。試料のα線汚染画像を本装置で取得し、従来装置でクロスチェックして性能を比較する。

【参考文献】 [14] arxiv.1903.01663. [15] NIMA 901 (2018) 1.

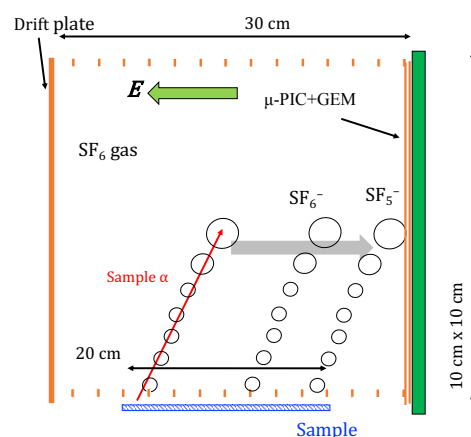


図3. 装置設計の断面図

今年度助成申請金額の費目別内訳

(金額単位：万円)

費目	金額	内訳・算出根拠等
機械器具備品費	50	・TPCステンレスベッセル・フランジ：真空・低圧に耐えられるように設計する。ステンレス製、全長35cm、20cm×20cmの容器。また、サンプルを側面から取り出せる機構をつけるため、オーダーメイドで製作を依頼する。
	35	・フィールドケージ：ドリフト長30cmまでのフィールドケージのため素材を発注する。電場形成のための12cm四方の無酸素銅のプレート、銅線20m、α線窓をつけたテフロン板を4枚、電場形成の歪みを減らすため高抵抗シートを発注する。
	10	・銅板電解研磨：銅板表面の粗さによって起こる放電を防止するため
	30	・GEM：読み出しガス増幅ボード
	10	・読み出し回路：既存回路に接続する変換基盤
消耗品費	8	・装置製作で使用する部品：ガス配管、コネクタ、クランプ、電子部品
旅費	12	・国内出張旅費：神戸大学でTPCシステム改良、分担者との打ち合わせをするため、飛騨市から神戸市のお出張を1年で2回行う。分担者が神岡坑内でTPCシステム改良、代表者との打ち合わせをするため、神戸市から飛騨市のお出張を1年で2回行う。
その他経費	10	・装置の輸送費：TPCシステムを神戸から神岡まで輸送し、坑内で測定することで宇宙線のバックグラウンドを抑制する。輸送後は代表者の所属先で作業を進める。
合計	165	←←← 1頁の申請金額に一致

注：記入に当たっては研究助成金費目一覧表を参照下さい。数年間の研究の場合にも助成期間（原則として2019年10月～2021年3月迄）に必要な金額について記入して下さい。

今年度の資金計画

(金額単位：万円)

内訳	金額	調達先
今年度当該研究費① (1頁の今年度当該研究費総額に一致)	380	
既に調達が確定している額②	0	
調達を予定している額③	165	住友電工グループ社会貢献基金からの助成 (1頁の申請金額に一致)
	115 100	住友財団 島津科学財団

注：①=②+③ となります。調達先は、校費、科学研究費補助金、他財団からの助成金等を記入して下さい。

なお、助成対象期間中に科学研究費補助金を申請中の場合には必ず記入して下さい。

同一又は類似テーマでの他の機関への助成金申請

(金額単位：万円)

助成金等の名称	代表研究者名	研究テーマ	金額	助成、内定、申請中、申請予定、等を記入
島津科学技術振興財団	伊藤博士	極低放射能アルファ線イメージング装置の感度改善	100	申請中