

ガスTPCと光検出に基づく高感度 アルファ線イメージ分析

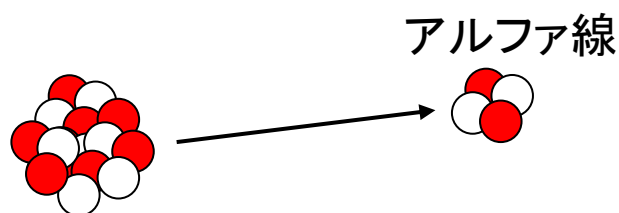
東京理科大学

創域理工学部 先端物理学科

助教 伊藤博士

2024年11月7日

はじめに、アルファ線とは？



放射性同位体(RI)

例) ウラン、トリウム、ラドン
アメリシウム

(^{238}U , ^{232}Th , ^{222}Rn , ^{241}Am)

- ヘリウム原子核(質量数4, 電荷+2e)
- 空気中で数cm飛ぶ。紙1枚で止まる。
- 自然界には、空気中にラドン(α 線放出)が $100\text{Bq}/\text{m}^3$ 程度含まれている*。
- 被曝に関する等価線量係数が20: 他のベータ線、ガンマ線が1に比べて非常に高い。

*Bq(ベクレル): 1秒間に1個アルファ線が放出する頻度に相当する単位。

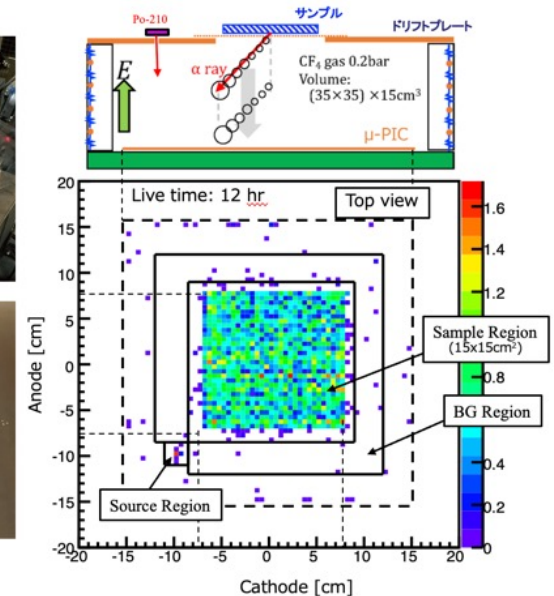
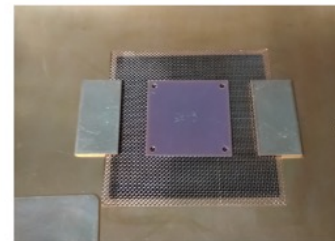
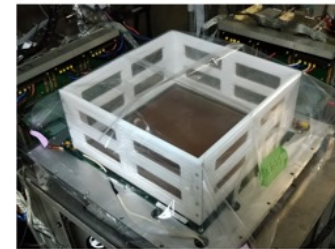
- 原子炉の燃料廃棄物から大量のアルファ線が発生する。
- BNCT法など、アルファ線を用いた治療法も期待されている。
- アルファ線(一般に放射線)は、半導体メモリなどに損傷を与えデータ破損させうるため、**関連部品はRI(放射性同位体)不純物を極限に減らす必要**がある。

宇宙素粒子実験の技術を社会へ還元

- 宇宙素粒子実験のための検出器は、
「**極限まで少ない不純物**」 + 「**大型化**」が要求される。これまで綺麗な素材確保・生成・分析技術は確立されてきた。
- 材料表面の微小な放射能汚染でも、地下実験では大問題！（**表面アルファ線分析も重要である。**）

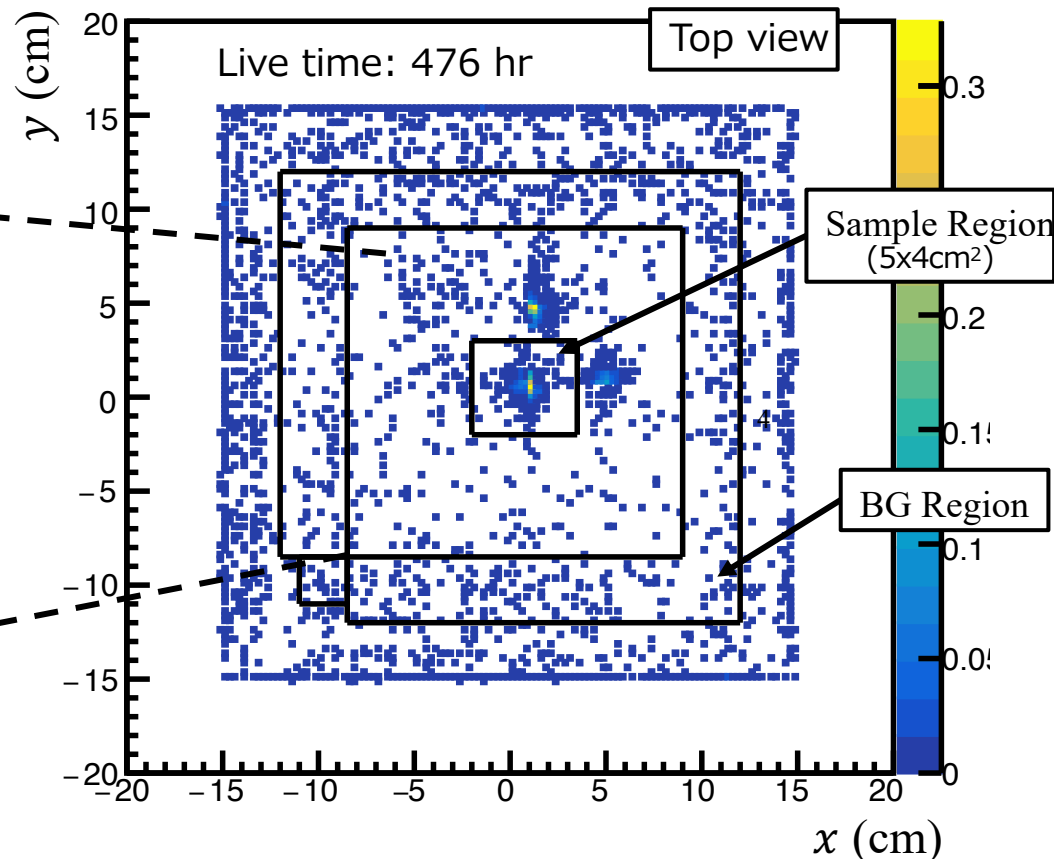
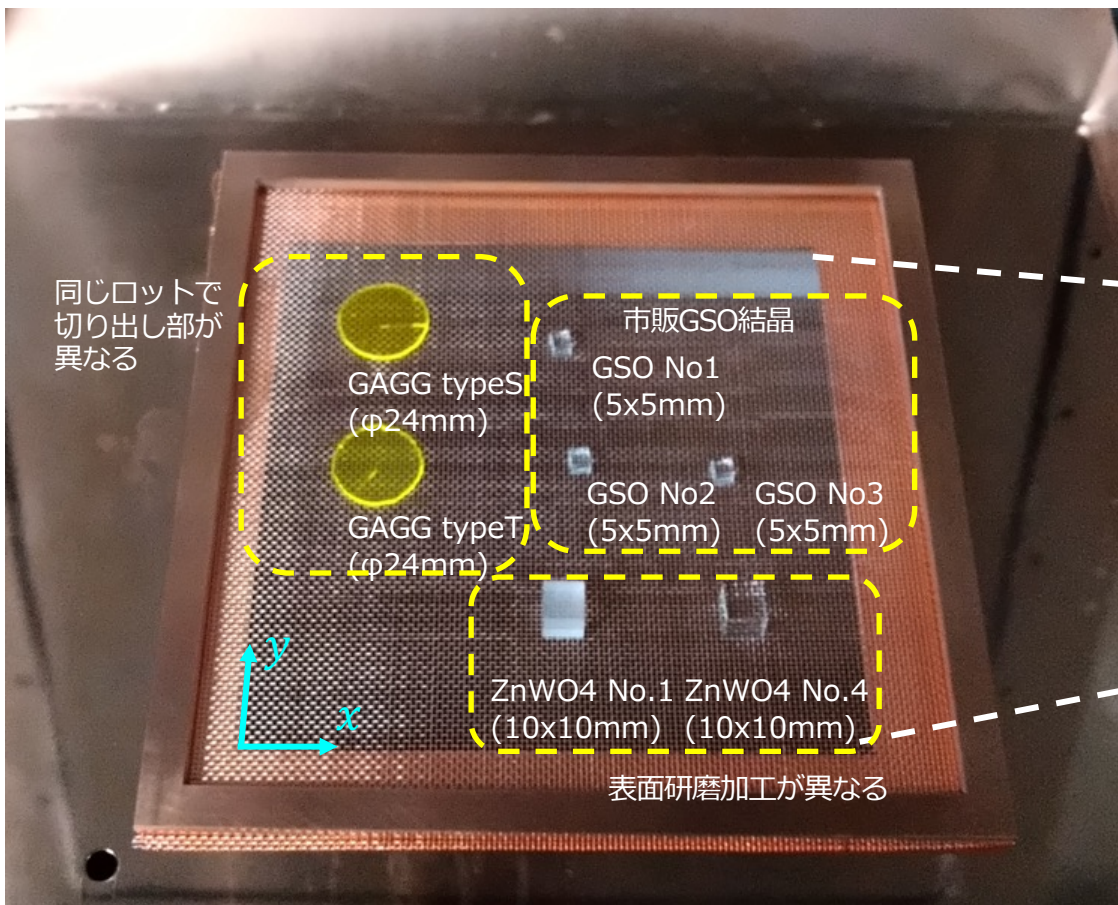
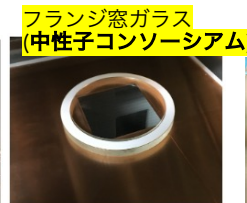
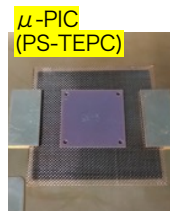
学術領域内で開発した表面 α 線分析装置

- ガスTPC(**タイムプロジェクションチェンバー**)技術による3次元飛跡再構成手法。
- 空気中の自然放射能物質が表面に付着するような汚染ですら検出できる高い感度。
- 汚染イメージが取得できる。
- エネルギー分布から、 α 線が材料表面から or 内部から放射しているか判断できる。



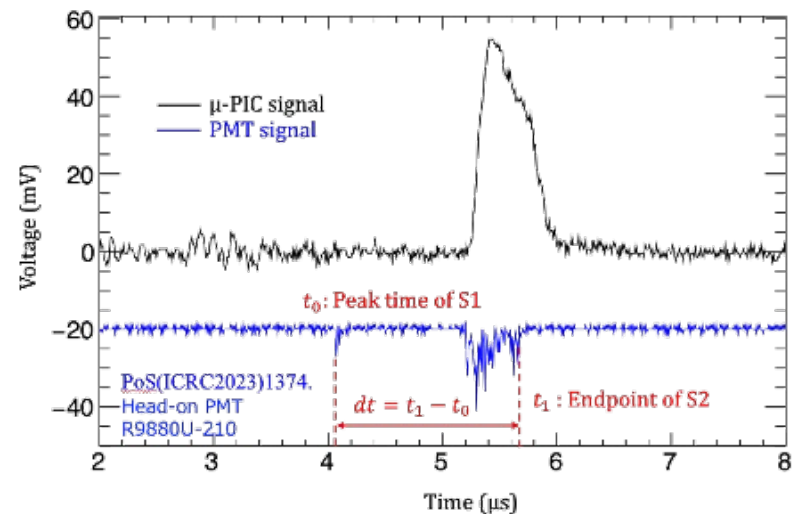
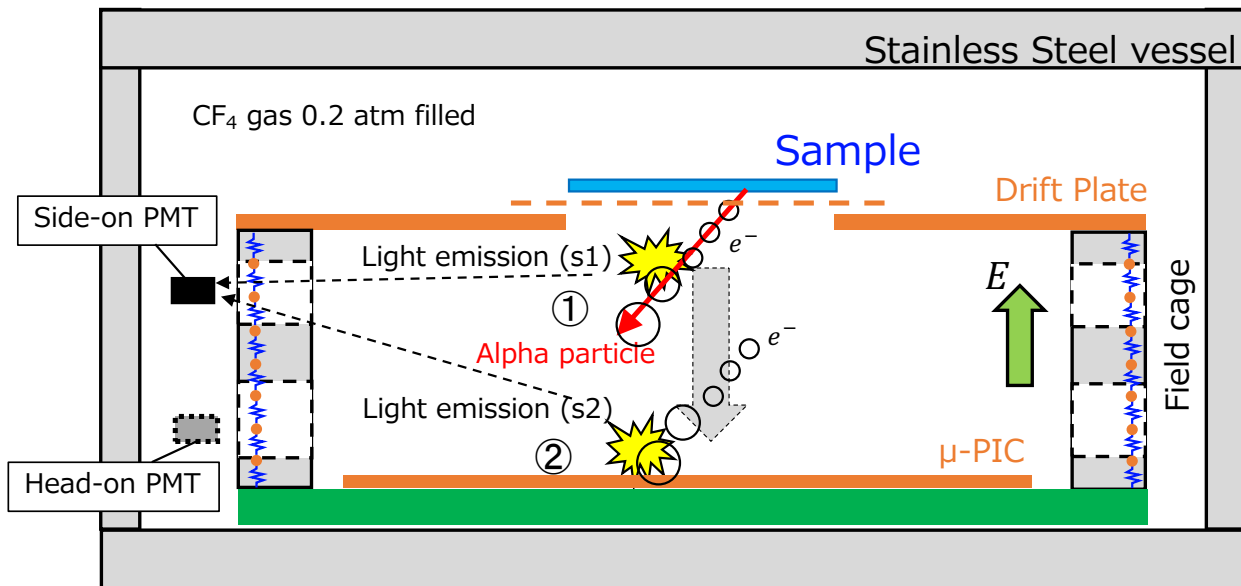
宇宙素粒子実験の技術を社会へ還元

分析感度 $\sim 1 \times 10^{-3}$ (90%CL) $\alpha/\text{hr}/\text{cm}^2$ @ $E > 2.5 \text{ MeV}$ で、
学術領域の研究グループから依頼され分析を実施してきた実績がある。



GSO No2: $43.27 \pm 0.97_{\text{stat}} \pm 0.73_{\text{sys}} \alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$

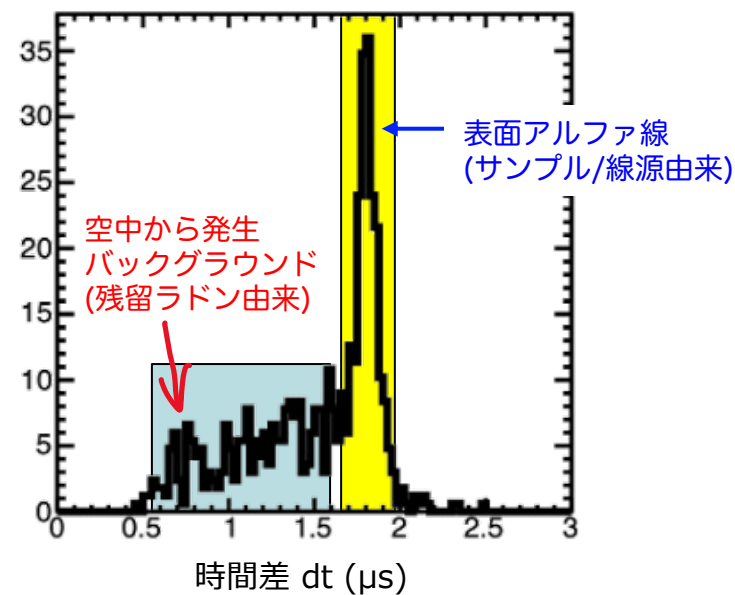
新技術：ガスTPCと光検出に基づいた検出手法



① アルファ線がガス中で電離し、かつ発光する(s1)。
この光を光センサー(PMT)で検出。

② 電離電子が電場によって誘導され、 μ -PICに到達した時に発光する(s2)。この光を光センサー(PMT)で検出。

この2つの発光時間差 dt は μ -PICからの鉛直距離に対応するため、サンプル由来のアルファ線であることを特定できる。
つまり、バックグラウンドを除去し、高感度化できる。



従来技術とその問題点(1)

市販の低バックグラウンド・ α 線分析装置(XIA, Ultra-Lo1800)は、

- 有効面積 最大1800 cm²と広く、感度 10^{-4} a/cm²/h、画像は取得しない。
- 信号波形からエネルギー測定できるイオンチェンバー。

課題点

- 表面 α 線量を決定するために、サンプルあり・なしで2回測定が必要。
- 画像取得しないため、サンプル全体が汚染しているか局所的なのかわからない。
- また、発生位置高さ方向は決定できないため、サンプルから放射された α 線か、空中で発生した α 線か判断できない。

従来技術とその問題点(2)

シンチレータを用いたアルファ線イメージ手法

- JAEA+東北大の開発した検出器
- シンチレータと顕微鏡+CCDカメラを用いた装置
- 数ミクロン程度の高解像度で標本表面の汚染分布が得られる。

課題点

- ガンマ線、ベータ線にも反応するため、環境放射能に曝される。
- 低アルファ線の分析には向かない。
- 正確なアルファ線量の見積りが困難になる。

新技術の特徴・従来技術との比較

エネルギー測定

Alpha Suite, ORTEC
半導体アルファ線
検出器

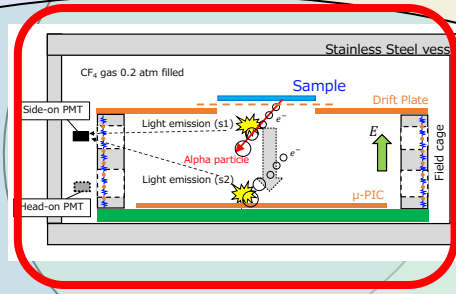
Ultra-Lo1800, XIA
アルゴンガスフロー
型イオンチェンバー

WPC-1050, Protean
ガスフロー型比例計
数管検出器
(α/β 識別可能)

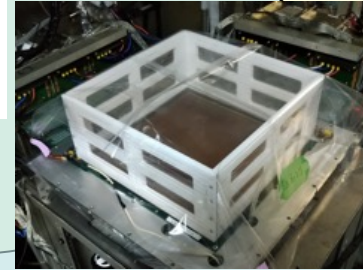
Alpha Science
Model 1950
ガスフロー型比例計数管検出器

イメージ測定

シンチレータと
顕微鏡+CCDカメラによる装置



新技術



Alpha Imaging Chamber (神岡)

計数頻度(感度)

想定される主な用途

□ 半導体製造におけるパッケージ材料の品質評価・分析

- 半導体ソフトウェアが誘発されるため、製造最下流のパッケージに使用する材料(はんだボール、セラミックなど)の品質管理はとても重要である。
- 半導体の省電力化、微細化にともない、現状よりも高純度(超低 α)な金属、材料が需要拡大する。同時に α 線分析も高感度化が要求される。
- 表面 α 線は、材料内部の微量なウラン・トリウムの存在で、時間と共に増え放射平衡に達する傾向がある。材料を手抜くと、数年後には頻繁にソフトウェアが起き続けることも？

□ がん治療RI創薬を加速させるアルファ線イメージ

- アルファ線によるがん治療薬開発は、現在、ガンマ線検出による間接的な手法で、投薬注射後の拡散性など研究され、理解が進んでいる。
- 次のステージでは、実際動物試験などで投薬後の臓器のアルファ線放出分布を測定する。これで、薬が癌組織に集中しているか、正常組織にも分布するか試験でき、薬効評価できる。
- 装置が高感度であることは少量RIで試験できるため、実験者の被曝低減や、試薬節約につながる。

実用化に向けた課題

- 現在、実験機を用いて、新技術であるガス発光とTPC技術を用いた高感度アルファ線分析手法の原理検証に成功した。
- 実用化に向けて、小型検出機開発も進めている。
- 実用化に向けた課題
 - ユーザービリティの向上
 - 単純な装置仕様を実現し、大量生産や部品交換修理しやすい設計
 - 検出器の安定動作できる供給電圧値の決定
 - ガス流量、ガス圧力、ガス種類の最適化
 - 有効面積拡張（大型化）した際の検出効率の担保

企業への期待

- 宇宙素粒子実験の先端技術を社会に還元したい。
 - 半導体、材料、化学など、他分野でも幅広く役立てたい。
 - 高感度アルファ線分析のご依頼も、学術領域を超えて受け入れています。
- たまご - にわとり問題
 - 高純度金属の分析評価のためには、高感度装置が必要
 - 高感度装置に使用される材料は、高純度金属(材料)が必要。
 - 高純度材料メーカーとのタッグを組むと、世界最高感度の分析装置開発と世界最高純度の金属(材料)製造技術を共に実現できる！？
- 分析装置販売および分析委託の事業への協賛。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術(ガスTPCと光検出技術に基づくアルファ線イメージ分析)は、低頻度事象における汚染箇所の特定が可能である。
- そのため、**複数サンプル比較のための同時測定**、汚染箇所特定による歩留まり評価 (全体に分布しているか、局所的な分布か) が可能になる。
- 国内外において、半導体材料分析のためのアルファ線分析装置の性能は2011年から大幅な改善がなされてこなかった。
- 古い装置を修理できない等の理由から、大手分析会社のアルファ線分析事業撤退(**引き継ぎ先なし**)が、高価な分析装置を持っていない利用者にとって大きな痛手となる。
- 本技術に基づくシンプルな仕様で構成した装置を開発し、装置提供・分析の新規事業 (ベンチャー企業?) 設立で、今後の材料分析を、従来感度もしくは高感度な分析を提供することで貢献できる。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 分析装置
- 出願番号 : 特願2023-44723
PCT/JP2024/010839
- 出願人 : 東京理科大学
- 発明者 : 伊藤博士

お問い合わせ先

東京理科大学
産学連携機構

TEL 03-5228-7440

e-mail shinsei_kenkyu@admin.tus.ac.jp