

国立研究開発法人

量子科学技術研究開発機構

高崎量子応用研究所

第71号

# 高崎研だより

役立つ科学

治療用粒子線の可視化に関する研究

日本/世界見聞録

ポーランドの古都を訪れて

My Favorite

我が家のムードメーカー

研究装置紹介

原子吸光光度計



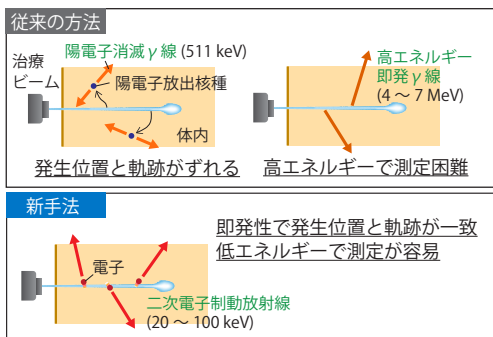
### Q1. 治療用粒子線とはどのようなものですか？

治療用粒子線とは、がんの放射線治療で利用される放射線の 1 つです。身体にメスを入れることなく治療が可能のため、2019年の日本の放射線治療患者数はその5年前の約2.5倍に増加しています。

放射線治療ではこれまで主に X 線が利用されてきましたが、近年は陽子線や重粒子線を用いた粒子線治療が行われています。X 線の場合、身体に与えるエネルギーは皮膚表面が最大で、身体内に進むほど線量が減少します。一方、粒子線は身体内のある一定の深さで急激にエネルギーが増加するため、正常細胞への影響を極力抑えてがん細胞に放射線のエネルギーを集中させることが可能です。

### Q2. 既に実用化されている粒子線治療ですが、なぜ可視化が必要なのでしょう？

粒子線治療は、治療計画から実際の治療までの期間に腫瘍や周囲の臓器の形状が変化し、照射位置がずれるリスクがあります。現在の技術では、治療直後に正確な照射位置を把握する手段はないため、患者体内に照射された粒子線を可視化することで、治療の安全性などの向上が期待できます。



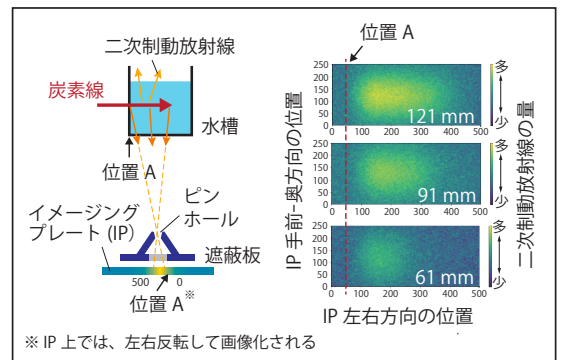
二次電子制動放射線の特徴

体内に照射された粒子線の可視化を目的に、粒子線軌跡上に発生する消滅 $\gamma$ 線、もしくは即発 $\gamma$ 線を測定する方法が研究されています。しかし、消滅 $\gamma$ 線は体内の代謝機能の影響で発生位置がずれてしまうため、また即発 $\gamma$ 線は発生位置のずれはないものの高エネルギーであるため、測定が困難です。そこで、我々は、同じ体内を通過する粒子線の軌跡上から発生し、代謝の影響がなく、さらに低エネルギーであるため測定が容易な二次電子制動放射線を測定して、粒子線を可視化する手法を提案しています。

### Q3. どのようにして、粒子線の可視化を行うのでしょうか？

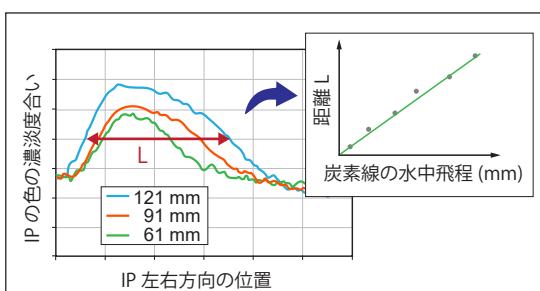
高いデータ信頼性と実績から、医療分野で広範囲に利用されているイメージングプレート (IP) を使って二次電子制動放射線を測定し、可視化 (画像化) を行います。数 100  $\mu\text{m}$  程度の高解像度と高感度を持つ IP は、精度の高い飛程 (放射線が物質中を進む距離) の推定が期待できるほか、低コストで取扱が容易であるため、粒子線可視化装置として有望です。

実験装置を右図に示します。人体の変わりに水槽に張った水に重粒子線 (炭素イオン) を照射し、水中の軌跡上から発生する二次電子制動放射線をピンホールを通して IP で捉えることで、画像化しました。その結果、炭素イオンのエネルギーを変えることで、飛程を 121、91、61 mm と変化させた様子を撮像結果から観測することに成功しました。



実験装置と二次制動放射線の IP 撮像結果

### Q4. 得られた結果はどのように解析するのでしょうか？



飛程推定手法の導入

炭素線の飛程を変えて得られた複数の画像から、IP 左右方向の位置と色の濃淡の関係をプロファイルし、ある一定の濃淡を示す位置の距離  $L$  を求め、炭素線の水中飛程との関係をグラフ化しました。その結果、標準偏差 2.5 mm という高い精度で飛程を推定することができました。この精度は、IP 以外の装置による画像化実験で得られた 7 mm を大幅に上回る優れた値です。

2023年10月ポーランド南部の都市クラクフの Jagiellonian (ヤギェウォ) 大学で開催された「Symposium on New Trends in Nuclear and Medical Physics」の国際シンポジウムに参加しました。Nuclear (原子力) と Medical Physics (医学物理) はあまり馴染みのない組み合わせですが、このシンポジウムは、素粒子・核物理から臨床応用までを目指している陽電子断層撮像 (PET) 技術の開発等について議論するものです。筆者は、自身が行ってきたスピン偏極陽電子等の研究に主催者 P. Moskal 教授が開発した J (Jagiellonian)-PET 技術を融合できないかという視点から発表を行いました。



Collegium Maius の外観

Jagiellonian 大学は、1364年に建造されたポーランド最古の大学で、今回会議会場となった Theranostics Center (セラノティクスセンター) や現在博物館として利用されている Collegium Maius (大学校舎) など当時の建築物が現存する他、天文学者コペルニクスなど数多くの偉大な学者を輩出していることで知られています。ここを訪れると、当時からの「科学」を育む空気を肌で感じ、何とも言えない深い感慨を覚えます。



Wieliczka 岩塩坑の内部

クラクフから南東へ約 10 km のところには、世界遺産の Wieliczka (ヴィエリチカ) 岩塩坑があります。約 700 年前に開かれた岩塩の採掘場で、現在その全長は 300 km 以上に及びます。採掘場内のホールでは、結婚式やコンサートなどが開催されます。ポーランドに行かれる際には是非訪れてみてください。

先進ビーム利用施設部 河裾 厚男

## My Favorite

## 我が家のムードメーカー

皆さんは日々どのように癒されていますか？私は実家に愛犬を飼っており、妹から毎日のように送られて来る愛犬動画を観ることが私の癒しになっています。

元々ペットを飼ったことがなく、小学校のクラスでウサギを飼育していたぐらいでした。そして、その時経験した動物を育てる大変さなどから、ペットのいない少年時代を過ごしてきました。しかし、その後家族で慣れない土地に引っ越しをすると、家族の調子が悪くなった時期がありました。その際、妹の「犬が欲しい」との希望から一匹の犬と出会いました。マルチーズとトイプードルのミックス犬で、白いふわふわな毛並み、くりくりした目、ちろっと出た舌、全てがどストライクで、その場でその子を家族にすることに決めました。



歯までも可愛い！

名前は、ぱっと頭に浮かんで響きの可愛さから「かぶ介」と私が決めました。



構ってほしいときの表情

世界で一番可愛い名前をつけたと思っています。かぶ介が我が家に来てからは、家族にも元の笑顔が戻り、かぶ介中心の生活になっていきました。今では、家族のムードメーカーとして支えてくれる大事な弟です。

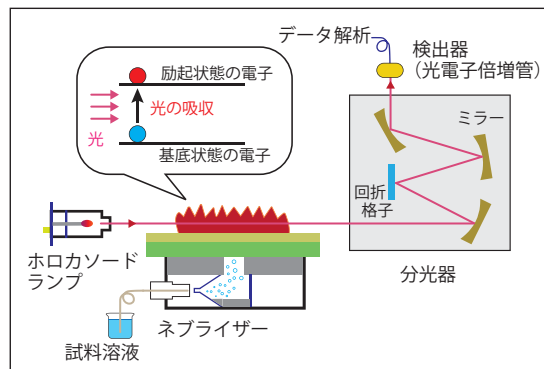
こたつからひょっこり顔を出す動画や、お手を習得した動画などを観ながら眠りにつくのが、高崎で一人暮らしをする私のお気に入りのルーティンです。最初は動物に興味なかった私ですが、実際に飼ってからは日々充実した生活を送っています。皆さんもペットという新しい家族を迎えてみるのはいかがでしょうか？

おすしすき (ペンネーム)

## 【原理と特徴】

原子吸光光度計は、主に溶液中に含まれる無機元素の濃度を測定する装置です。元素の種類によって原子が吸収する光の波長が異なる性質を利用し、その光の吸収量から元素の濃度を測定します。

原子吸光光度計の原理を右図に示します。最初に、ネブライザー（噴霧器）で霧状にした試料に熱エネルギーを加えて原子を蒸気の状態にする原子化を行います。原子化には、炎を用いるフレイム法と黒鉛炉などで電氣的に加熱するフレイムレス法があり、フレイム法では溶液を 2,000 ~ 3,000℃ に加熱します。一般的に、フレイム法は mg/L (ppm) オーダー、フレイムレス法は μg/L (ppb) オーダーの測定に使われます。



原子吸光光度計の装置構成（フレイム法）

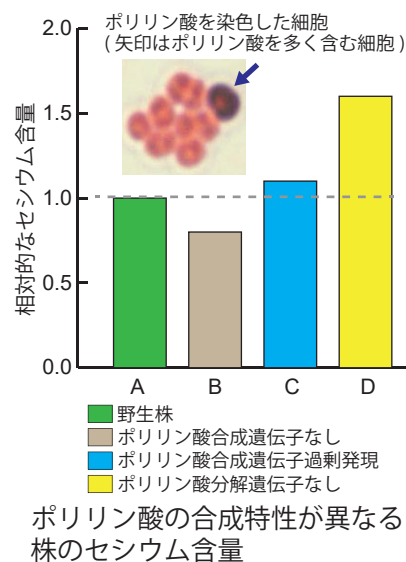
光源には、特定の波長の光を出すホロカソードランプを使用します。元素はそれぞれ固有の波長の光を吸収する特徴があり、フレイム中の基底状態の原子はランプからの光を吸収して励起状態になります。分光器では、フレイム通過後の光に含まれる、ランプ中の不要な光や励起状態の原子が基底状態に戻る際に発する光などをカットし、測定対象元素の吸収により減光した波長の光のみを取り出します。ランプは測定対象元素毎に交換が必要です。検出器には、光電子増倍管と呼ばれる高感度の光センサーを用います。

実際の測定では、測定対象の元素を含む標準試料を用いて検量線を作成し、これを基準として未知試料中の元素濃度を求めます。複数の元素を同時に測定することはできないため、定性分析には不向きですが、ほとんどの金属元素を高感度で定量できるため、環境試料の分析に広く利用されています。

## 【実際の使用例】

微生物を利用した放射性核種回収技術の開発を目指す研究で、細胞に含まれるセシウム濃度の測定に原子吸光光度計を使用しました。リン酸が直鎖状に結合した生体高分子であるポリリン酸は、負に帯電しており、正の電荷を持つ金属イオンを捕捉すると考えられています。

そこで、ポリリン酸を生成する微生物を用いて、ポリリン酸の生成とセシウム濃度の関係を調べました。ポリリン酸を合成する遺伝子を持たない変異株 (B) は野生株 (A) に比べて、セシウム濃度が少なく、逆に合成する遺伝子を過剰に発現させた株 (C) は、やや濃度が高いことがわかります。微生物はポリリン酸を分解する遺伝子も持っているため、この遺伝子を持たない変異株 (D) についても調べたところ、最も多くのセシウムを細胞内にため込むという予想外の結果が得られました。



## Qメッセージ

「春告げ花」とも呼ばれる菜の花の旬は 12 月～ 3 月です。花が咲くと苦味が増すので、蕾の状態販売しています。先日、群馬県では 2 月としては観測史上初となる夏日となり、店頭で咲いてしまった花を摘む一苦労がありました。商品だけでなく、収穫前の作物への影響も懸念されています。気候変動が農業に及ぼす影響は計り知れません。収穫量の低下を食い止めるため、高崎研では量子技術を活用した研究を進めています。

(量子バイオ基盤研究部長 石岡 典子)