

人工ミュオンが創る「見えない内部」を可視化する新しい透視技術

下村浩一郎^{*1}
Shimomura Koichiro

三部 勉^{*2}
Mibe Tsutomu

奥野 広樹^{*3}
Okuno Hiroki

1. はじめに

かつては「誰がそんなものを注文したのか (Who ordered it?)」とアイジドル・ラビに言わしめたミュオンは、今や基礎物理のフロンティアからエネルギー問題、更には文化財研究に至るまで、多角的な価値を創出する「21世紀の基盤粒子」へと変貌を遂げています¹⁾。この記事ではミュオンをもっと社会に身近なものにするために筆者らが取り組んでいる、小型ミュオン加速器のコンセプト及びその社会実装への可能性について紹介したいと思います。このプロジェクトは内閣府主導のもと創設された「経済安全保障重要技術育成プログラム (通称 “K Program”)」で、科学技術振興機構 (JST) が公募した「宇宙線ミュオンを用いた革新的測位・構造物イメージング等応用技術」の中で「高強度ミュオンを生成する小型加速器につながるコア技術の開発」(研究代表・下村浩一郎) として進められているものです。

2. ミュオンで内部を見る

私たちの社会を支えるインフラ構造物、港湾を行き交うコンテナ、あるいは厚い遮蔽の内側にある物体を、壊さずに調べることは、安全・安心を支える重要な技術課題です。橋梁、トンネル、プラント設備、物流コンテナ等は、いずれも社会活動を止めずに状態を把握することが求められます。対象物を分解したり破壊したりせずに内部情報を得る非破壊検査は、そのための基盤技術です。

X線は広く用いられる透視手段ですが、対象が厚い場合や高密度の遮蔽材に覆われている場合には、十分な情報を得にくいことがあります。そこで注目されてきたのが、物質透過能力に優れたミュオンです。宇宙線として地上に到達するミュオンを利用すれば、大型構造物の内部を安全に調べることができます。実際に、火山、ピラミッド、原子炉内部等のイメージングに応用され、ミュオン透視の有用性が示されてきました。

ミュオンを用いる利点は、単に「よく透過すること」ではありません。物質中での散乱の仕方や、電場・磁場による軌道の曲がり方を調べることで、内部の密度分布や重元素の存在、更には機能材料内部の電磁場に関する情報を引き出せる可能性があります。つまりミュオンは、構造を見るだけでなく、物質や機能を見分けるためのプローブとしても期待されています。

3. 宇宙線ミュオンから人工ミュオンへ

一方で、宇宙線ミュオンは自然に到来する粒子であるため、強度、到来方向、エネルギーを自由に選ぶことができません。測定したい場所に粒子が都合よく十分な数だけ届くわけではなく、粒子の飛来方向もばらつきます。その結果、測定には時間がかかり、分解能にも限界があります。大型構造物のように長時間観測が可能な対象では有効ですが、物流や検査の現場では、より短時間で確実に判断できる手法が必要になります。

特にコンテナ検査のように、限られた時間で内部

ミュオンイメージングによる ドライブスルーコンテナ検査（イメージ）

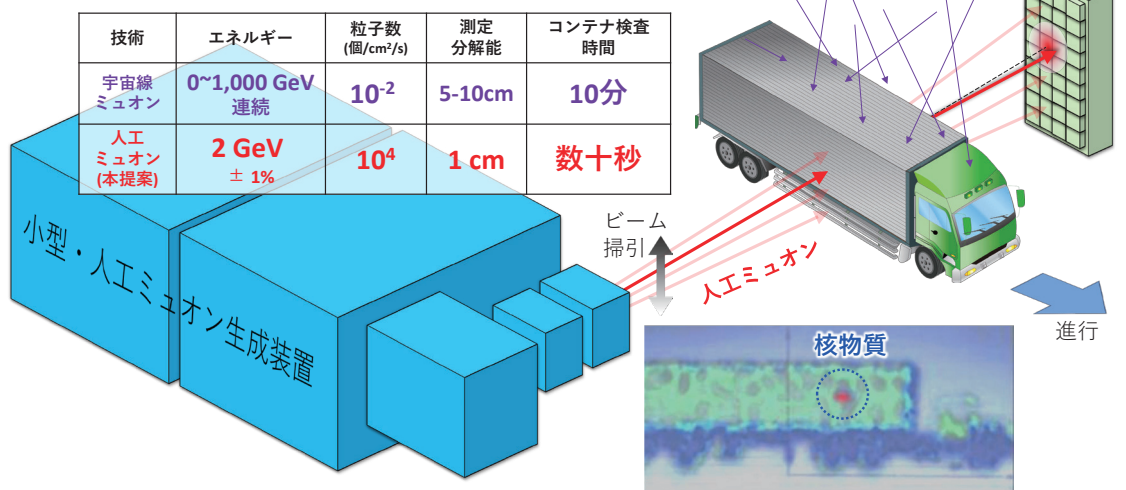


図1 ミュオンイメージングによるドライブスルーコンテナ検査のイメージ

の物質を識別する用途では、強度と指向性を兼ね備えたミュオンビームが求められます。今回のプロジェクトでは、コンテナを貫通できるエネルギー、毎秒1万個規模のミュオン強度、センチメートル級の空間分解能を満たす小型人工ミュオンシステムが将来像として示されています（図1）。これは、自然に到来する宇宙線ミュオンを待つ受動的な観測から、必要な場所で必要な性質のミュオンを発生させて使う能動的な計測へ進む試みです。

人工ミュオンの大きな魅力は、エネルギーや方向がそろい、到来時刻も制御しやすい点にあります。これにより、検出器側の設計やデータ処理も、宇宙線ミュオンを前提とした従来手法から大きく変わります。粒子がいつ、どの方向から来たかをよりよく把握できれば、対象物を通過した後の変化を高精度に読み取り、内部の情報をより短時間で画像化できる可能性があります。

4. 鍵となる「冷やして、そろえて、加速する」技術とイメージング

人工ミュオンを小型で高性能な透視装置に使うためには、単にミュオンを発生させるだけでは不十分です。加速器で生成したミュオンは、生成過程の性質上、ビームとしての広がりが大きくなりやすく、

そのままでは高分解能イメージングに適した「細く、そろった」ビームにはなりません。そこで本研究開発では、ミュオンをいったん熱エネルギー程度まで減速し、ビームの質を整えたうえで再加速する方法を採ります。

具体的には、従来型のミュオンビームを特殊加工したシリカエアロゲルに停止させます。停止したミュオンは電子を捕獲してミュオニウムとなり、標的内部を拡散した後に真空中へ放出されます。そこにレーザーを照射して光イオン化することで、室温程度まで冷えた「超低速ミュオン」を取り出します。このプロセスにより、従来型のミュオンビームに比べて、エネルギーを大きく下げ、ビームの広がりを抑えた低エミッタンスのミュオンビームを得ることができます^{2,3)}。

超低速ミュオンを得た後は、ミュオンの寿命が短いという制約の中で、短距離で素早く再加速しなければなりません。本研究では、J-PARCのミュオンビームを用いて、まず0.34 MeV、更に4.3 MeVまでの段階的な加速実証を進める計画です。4.3 MeVは光速の約30%に相当し、この領域まで加速できれば、その先の追加速には陽子加速器などで蓄積されてきた技術を応用しやすくなります。

この再加速技術を成立させるには、加速空洞、パルス電源、フィードバック制御の高度化が不可欠で

す。短距離での加速では加速電場の安定性がビーム品質に直結するため、外乱を抑え、電場を高精度に制御する必要があります。提案書では、次世代半導体を用いた小型パルス電源や、RFSoc 技術を活用したフィードバックシステムの開発が重要項目として位置づけられています。

高強度で方向のそろった人工ミュオンが得られれば、従来の宇宙線ミュオン透視とは異なるイメージングが可能になります。宇宙線ミュオンを用いる方法では、低い粒子密度を前提に、1つ1つの粒子の飛跡を検出して内部の散乱を推定することが基本になります。しかし、人工ミュオンでは強度と輝度が高く、従来と同じ粒子トラッキングの発想だけでは、その性能を十分に引き出せません。

そこで本研究がめざすのは、ビーム光学系を用いて、対象物内部で生じる散乱角分布そのものを像として取得する方法です。重元素などによる散乱の違いを可視化できれば、遮蔽された物質の検知や内部構造の把握に有効です。提案書では、加速器出口と検出器前に配置する光学素子を組み合わせ、ビームの散乱角分布を画像として一度にとらえるイメージング装置の開発が計画されています。

この考え方は、電子顕微鏡で培われた像転送や散乱情報の可視化の発想を、ミュオンに適用するものといえます。直接検出型 CMOS 画像センサやミュオン光学系を組み合わせることで、4.3 MeV まで加速したミュオンを用いたイメージング原理実証を行い、重元素を内包する物体の透視観察や散乱角分布の取得をめざします。

重要なのは、人工ミュオンが「高輝度であること」を前提に、検出と画像化の方法そのものを設計し直している点です。単に粒子数を増やすのではなく、ビームの性質をそろえ、対象物を通過した後の微小な変化を光学系で画像へ変換することで、短時間・高分解能の非破壊検査につなげようとしています。

5. 小型化・可搬化への挑戦

社会実装を見すえるうえで大きな課題となるのが、ミュオンを発生させる加速器そのものの小型化です。現在、ミュオンを発生できる施設は大型加速器に限られており、J-PARC や大阪大学 RCNP（核物理研究センター）のような大規模施設が研究の基

盤となっています。しかし、コンテナ検査やインフラ診断などの現場利用を考えると、装置は研究施設内に固定されるのではなく、必要な場所へ持ち込める規模であることが望まれます。

可搬型装置として成立させるには、加速器本体だけでなく、電源、遮蔽、冷却装置、制御系、ミュオン発生標的などを含む全体システムを見通す必要があります。いくら加速器本体が小さくても、補器が巨大であれば現場利用は難しくなります。そのため本研究では、ミュオン源と再加速技術の実証と並行して、小型ミュオン発生加速器の方式検討も進められます。

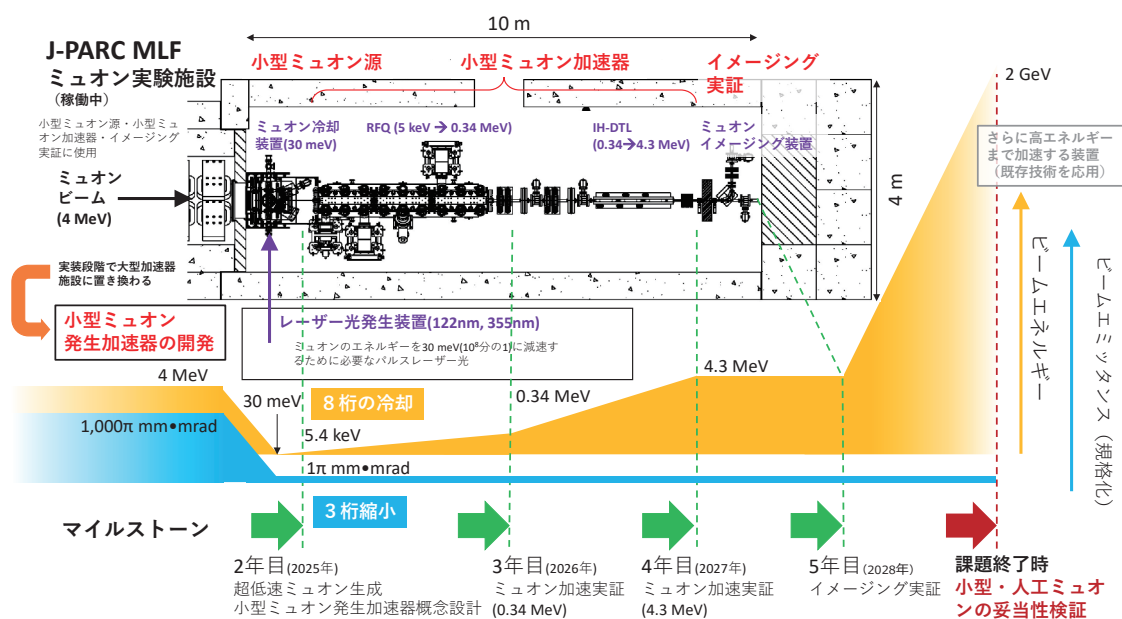
候補として挙げられているのは、超伝導（シンクロ）サイクロトロン、CARA（自動サイクロトロン共鳴加速器）、MERIT（多重エネルギー回復内部標的）といった方式です。それぞれ、加速の原理、装置サイズ、重量、必要な電源や冷凍機、ビームの取り出しやすさなどに特徴があります。計画では、これらの方式について概念設計を行い、メリットとデメリットを明確にしたうえで、可搬型ミュオン発生加速器としての実現性を検証します。

最終的には、小型ミュオン源、再加速器、イメージング光学系、ミュオン発生加速器を一体のシステムとして考え、全体として 10 m オーダーの規模に収まるか、どの程度の補器や遮蔽が必要かを見積もることになります。可搬化は単なる小型化ではなく、現場で安定に運用できる信頼性、安全性、保守性まで含めた総合的な技術課題です。

6. 段階的な実証とマイルストーン

本研究開発は、5 年間の計画の中で段階的に進められます。初期段階では、J-PARC の実験エリアを整備し、超低速ミュオンの生成に必要な標的、レーザー、輸送系を組み合わせ、ミュオン源としての動作を確認します。あわせて、小型ミュオン発生加速器の概念設計を進め、将来のシステム全体像を具体化していきます。

中間評価までの重要な目標は、ミュオン源と加速器の原理実証です。特に、超低速ミュオンを生成し、0.34 MeV まで加速する試験は、再加速技術の成立性を示すうえで重要な節目になります。その後、4.3 MeV までの加速を実現し、ビーム品質を測定し



て、想定どおり低エミッタンスのミュオンビームが得られるかを確認します。

最終年度には、4.3 MeV まで加速したミュオンを用いたイメージングの原理実証を行います。既知の物体に照射し、内部の重元素によって生じる散乱をとらえることで、透過イメージングの性能を評価します。更に、その結果をもとに、将来的に 2 GeV 級まで加速した場合のコンテナスキャン性能を予測し、宇宙線ミュオンを用いる手法との比較を行う計画です (図 2)。

7. 広がる応用

人工ミュオンによる高分解能イメージングは、コンテナ検査やインフラ診断にとどまりません。ミュオンは荷電粒子であるため、物体内部の電場・磁場によって軌道が変化します。この性質を利用すれば、密度や形状だけでなく、機能を担う電磁場の分布を可視化する手段にもなり得ます。

例えば、パワー半導体や RF 半導体、積層セラミックコンデンサの内部では、電場分布や電界集中が性能や信頼性に大きく関わります。ミュオンを用いて内部の電磁場を非破壊で調べられれば、破壊の起点や劣化の機序を理解し、高耐圧化や高速化につなげることが期待されます。電気自動車、ICT 機器、電

力変換装置など、波及範囲は広いと考えられます。

また、磁性材料や磁気回路内部の磁場分布を調べることができれば、モーターや発電機の高性能化にも役立ちます。文化財分野では、刀剣などの鋼材内部に残る熱処理履歴や磁気特性を、対象を傷つけずに調べられる可能性があります。更に、クライストロンやジャイロトロンなどのRF機器、イオンエンジンやホールスラスターなどの宇宙機用推進装置における電磁場可視化にも応用が広がり得ます。

このように、人工ミュオン技術は「透視する」技術にとどまらず、材料・デバイス・構造物の内部状態を多面的に読み解く計測基盤となる可能性があります。基礎科学、加速器技術、産業応用が交差する領域として、今後の発展が注目されます。

8. おわりに

本研究開発は、ミュオン科学、レーザー技術、高周波加速、ビーム光学、画像検出を横断する挑戦です。特殊加工シリカエアロゲルによる超低速ミュオン生成、真空紫外レーザーの安定化、小型パルス電源とフィードバック制御、ミュオン専用の加速空洞、そして高輝度ビームに適したイメージング光学系。それぞれが難度の高い要素技術であり、全体として1つのシステムへ統合することが求められます。

自然に降り注ぐ宇宙線ミュオンを利用する受動的な観察から、必要な場所で必要な性質のミュオンを生み出して利用する能動的なイメージングへ。小型で高強度の人工ミュオン生成技術は、見えない内部を安全に、短時間で、より高い分解能で可視化する新しい計測基盤となる可能性を秘めています。非破壊検査，安全保障，産業計測，材料評価，文化財調査など，様々な分野へ展開し得る次世代のミュオン利用技術として，今後の成果が期待されます。

参考文献

- 1) 寺田健太郎他, *Isotope News*, 特別号 No.8 (2024)
- 2) J. Beare, *et al.*, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **123** C01 (1-26) (2020)
- 3) S. Aritome, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **134**, 245001 (2025)

(^{*1} 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 ^{*2} 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 ^{*3} 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター)