

小型で人工的に高強度のミュオンを生成する コア技術の開発

SATテクノロジー・ショーケース2025

■ はじめに

本提案で開発するコア技術は、エネルギーを熱エネルギーまで減速させる小型ミュオン源（超低速ミュオン）、それを4 MeVまで加速する小型ミュオン加速技術、陽子ビームからミュオンを発生させる小型ミュオン発生加速器、4 MeVエネルギーでのイメージング技術の開発を行うことである。これらの複数の要素技術開発を取りまとめ、イメージングシステム全体の妥当性を検討する、融合と検証を行う。これによって、アウトプット目標「インフラ構造物やコンテナ等のイメージング技術の革新的発展に向けた、人工的にミュオンを生成する可搬システムの開発及び応用に係る検出器等の要素技術及びデータ処理技術の高度化」を実現する。

■ 活動内容

1. 小型ミュオン源の開発

従来型の人工ミュオンは、炭素等の原子核標的に陽子ビームを照射し、そこで生成されるパイ中間子の崩壊から生じるエネルギー4 MeVのミュオンビームである。本研究では小型ミュオン源として超低速ミュオンを用いる(図1)。超低速ミュオンは、従来型のミュオンビームより、エネルギーを8桁減少(4 MeV→30 meV)し、ビームエミッタンス(位相空間体積)を1,000分の1(1,000 π mm \cdot mrad \rightarrow 1 π mm \cdot mrad)にする新しいタイプのミュオン源である。まず、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(ミュオニウム生成標的に)停止させる。熱エネルギーまで減速されたミュオンは電子を捕獲してミュオニウム(ミュオンと電子の束縛状態)となり、標的の内を拡散したのち真空中に放出する。そこにレーザーを照射して光イオン化することにより室温まで冷却したミュオンを生成する。

小型ミュオン源は、ミュオニウム生成標的、ミュオニウムを効率よくイオン化するための共鳴コヒーレント光、後段の加速器までの引き出し・輸送系からなり、要求されるのは高強度の超低速ミュオンの加速器への安定した供給である。このうち生成標的は表面加工されたシリカエアロゲル標的を開発済みであり、従来のシリカエアロゲル標的に比べて10倍の効率で室温のミュオニウムを生成可能である。コヒーレント光源は、これまでにJ-PARCの超低速ミュオンビームライン(U-line)では10マイクロジュール級の大強度真空紫外レーザーシステムが構築され、約300個/秒の超低速ミュオン発生及びその応用研究が実施されている。しかしながら、このような短波長光源固有の技術的課題に、真空

紫外光による短・中期での光学素子の変性や劣化がある。このレーザーシステムを可搬装置とするために、小型集積化による機械熱管理の高度化に加えて長期安定運用の実証が克服すべき技術課題である。最後に、輸送系は静電レンズと静電散乱器を用い、引き出した超低速ミュオンを加速器に正しくマッチングするための軌道補正手法の確立が必要になる。

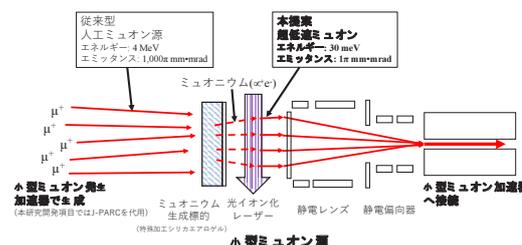


図1 小型ミュオン源と超低速ミュオン生成の概要

2. 小型ミュオン加速技術の確立

小型ミュオン加速器は、冷却によってほぼ静止したミュオンを宇宙線と同様に光速まで加速する。ミュオンは2マイクロ秒で崩壊してしまうため短距離で素早く加速する必要があるが、高エネルギーまで加速すれば相対論的効果により寿命が延びる。光速の約30%(4.3MeV)まで加速すれば、陽子加速器等で実績のある加速器で容易に追加速が可能であり、10mオーダーの加速装置が実現する。このとき、ビーム品質・指向性を表す指標であるエミッタンス(位相空間上の面積、小さいほど指向性が高い)が従来のミュオンビームの約千分の一(1 π mm \cdot mrad)より十分小さいビームが必要である。よって、本技術の実現には、冷却直後に小型加速器で光速の約30%まで高い品質で加速できるかどうかを試金石になる。

ほぼ静止したミュオンを光速の30%まで加速する際に速度の急激な変化を伴うため、2種類の高周波加速空洞を組み合わせることで実現する。初段の加速空洞は陽子加速に用いるものが転用可能である。2段目の加速空洞はミュオン専用の設計が必要である。この空洞はすでに製作を終えており、本提案で行う原理実証に使用できる。しかし、短距離加速によって相対的に加速勾配が大きいミュオン加速において、高品質加速を実現するには、種々の外乱による加速電場の変化を補正するフィードバックシステムの

代表発表者 **下村 浩一郎(しもむら こういちろう)**
 所属 **高エネルギー加速器研究機構**
 問合せ先 **〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方 203-1**
TEL:029-284-4706 FAX:029-284-4899
koichiro.shimomura@kek.jp

■キーワード: (1) 可搬型ミュオン加速器
 (2) ミュオンイメージング
 (3) インフラ診断
 ■共同研究者: 三部 勉 (KEK 素核研)
 奥野広樹 (理研)
 高柳智弘 (JAEA)
 飯嶋 徹 (名古屋大学)

開発が技術課題である。さらに、加速空洞に加え、最も大きな補器(加速器に付随する電源や遮蔽体)となるパルス電源の小型化が可搬装置実現に必須の技術課題となる。

小型ミュオン加速器を開発し、ほぼ静止した状態からエネルギー0.34 MeV(光速の8%)、エネルギー4.3 MeV(光速の30%)まで加速を段階的に実証する。これに必要となるフィードバックシステムの高度化とパルス電源装置の小型化を実現する。加速されたビームの分布測定を行いエミッタンスが予想通り $1 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ より十分小さいことを確認する。

3. イメージング技術

コンテナ等の構造物をスキャンするとき、宇宙線ミュオンに比べ人工ミュオンの強度と輝度は極めて高く、宇宙線ミュオンに用いられる検出器や手法ではその性能を十分に生かすことが出来ない。高い空間分解能、高い散乱(偏向)角分解能と短い計測時間を両立させる新しいミュオンイメージング手法が必要となる。人工ミュオンを用いた過去のイメージングの実績としては、数cmサイズの物体に対する直接投影法やビームアレイ投影法により、物体の構造の空間分解能で1mm程度、散乱角を検出する電磁場イメージングで数mm程度の空間分解能と数10mrad程度の角度分解能が得られているが、高輝度化した人工ミュオンによる高分解能の透視は過去に例がない。像転送などの光学系を組み合わせた大きな構造物に適用可能な高分解能のビーム散乱角分布のイメージング装置の開発が本質的な技術課題である。

物体内部でのビーム散乱の分布を像として透視イメージングするミュオンビームの光学系を構築し、重元素を内包する物体の透視観察を行い、ビーム散乱角の分布を像として取得する技術の検討を行う。分解能はビーム照射領域サイズに依存するため、ビーム照射領域サイズの1/1000程度を空間分解能の目標とする。また、ビーム散乱角分解能は1mrad未満を目標とする。

4. 小型ミュオン発生加速器

現在、国内でミュオン発生加速器を有している加速器施設は、J-PARCと大阪RCNPである。J-PARCは3 GeVで1 MW程度の陽子によってミュオンを発生させる。シンクロトロンという形式の加速器であり、周長約350 mのリング状のものである。大阪大学RCNPは400 MeV陽子によってミュオンを発生させる。リングサイクロトロンという形式の加速器で

あり、直径14 m重さは2200トン近いものである。これらより、ミュオン発生加速器の可搬型化を目指すには、小型化及び軽量化が課題である。

以下の3タイプの加速器が小型ミュオン発生器として使用可能か検討し、最終的には補器(加速器に付随する電源や遮蔽体)の大きさも割り出し、可搬型ミュオン発生加速器を提案する。

1. サイクロトロンは、磁場に垂直な面で旋回運動する荷電粒子を、旋回に同期した高周波電界で加速する装置である。同じ性能を達成するためには、サイクロトロンは、リニアックやシンクロトロンより小型化が可能である。また超伝導磁石を用いることにより、重量は、常伝導磁石を用いる場合の約1/15に抑えることが可能である。

2. CARA:2000年代にYale大学Hirshfieldで発明された自動サイクロトロン共鳴加速(CARA: Cyclotron Auto-Resonance Acceleration)方式。荷電粒子を旋回運動させるソレノイドコイル内に円筒形の導波管を配置し、導波管内に回転するTE111モードの進行波を発生させ加速が実現される。

3. MERIT:2000年代に京大の森グループによって発明されたFFAG(Fixed Frequency Alternating gradient)加速器の一種である。MERITは、多重エネルギー回復内部標的法: Multiplex Energy Recovery Internal Targetの略であり、FFAGリング内部でビーム軌道にくさび型の標的を設置し、ビームを周回(貯蔵)、加速させるのと同時に、ビームを標的に照射することで二次粒子を生成する。

5. 融合と検証

克服すべき課題: 研究開発項目1~4で行うコア技術は、それぞれ個別の研究開発であるため、これらの研究開発結果を取りまとめ、適切に融合させることが必要である。コア技術の融合によって初めてアウトプット目標である、人工的高強度のミュオンビームを用いたイメージングシステムの妥当性の検証が可能となる。個々のコア技術の研究開発の進捗を考慮して、複数のコア技術を効率良く融合させることにより当初の想定以上の効果が得られる可能性や、予期せぬ問題点により特定のコア技術で当初の性能が得られない場合に、システム全体とし目標の性能を保持するための方策等を総合的に検討する。