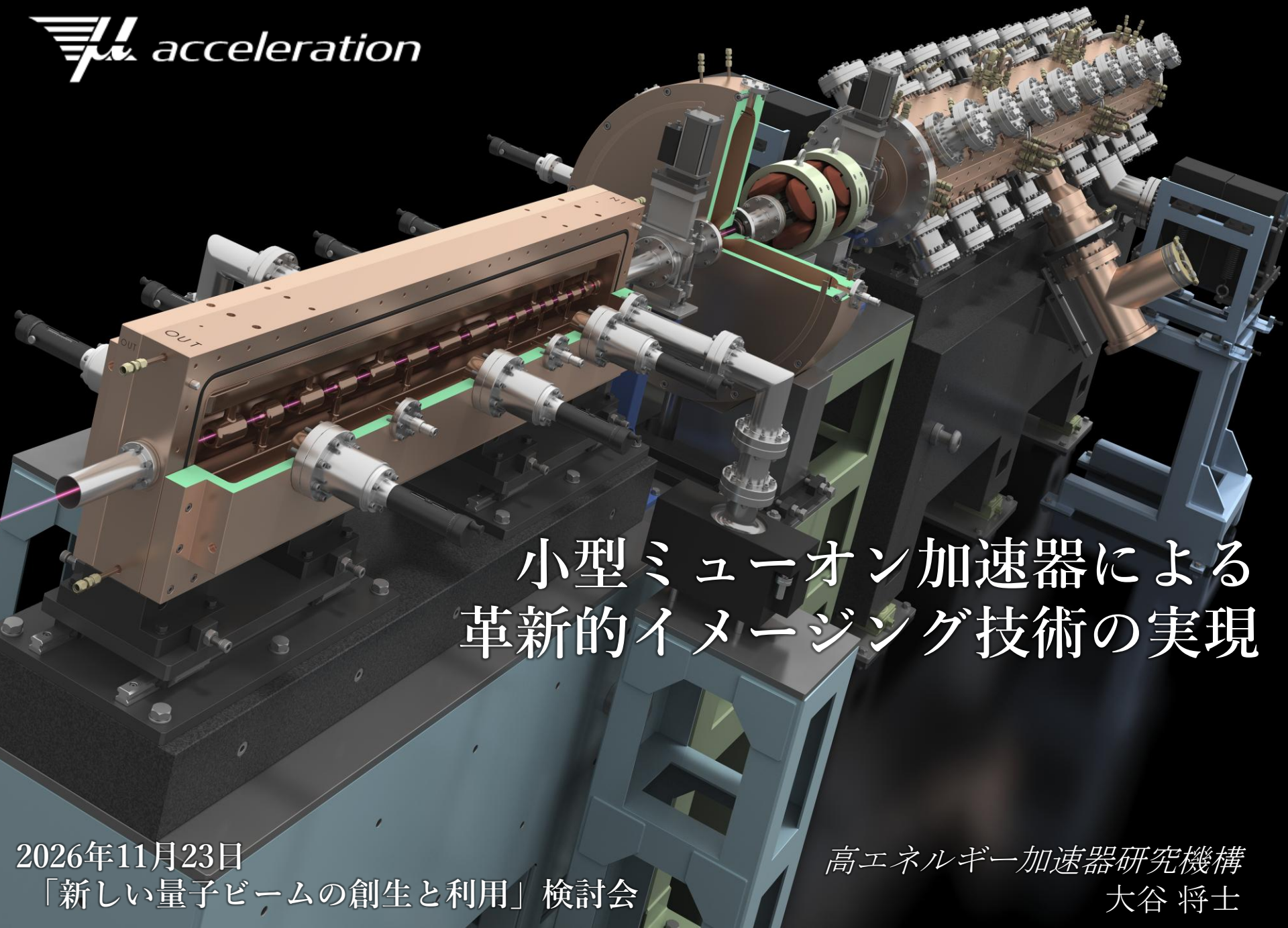
μ acceleration



小型ミューオン加速器による革新的イメージング技術の実現

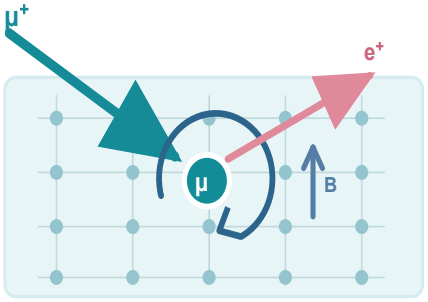
2026年11月23日
「新しい量子ビームの創生と利用」検討会

高エネルギー加速器研究機構
大谷 将士

ミューオンで『視る』

磁気状態を視る

μSR / μ^+

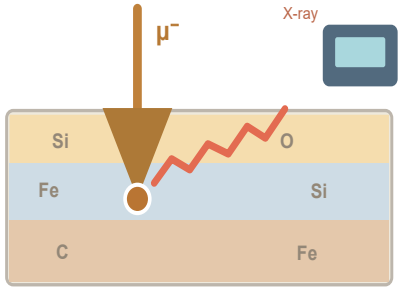


局所磁場やスピンの
動的な振る舞いを測定

磁性・超伝導

元素を視る

元素分析 / μ^-

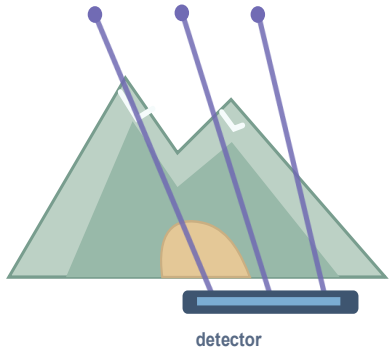


特性X線から、試料内部の
元素組成を分析

材料・文化財

内部構造を視る

ミュオグラフィ/宇宙線μ



透過・散乱する
ミューオンから、
密度分布などを可視化

火山・建造物

ミューオン冷却・加速が拓く新しい量子ビーム

- 冷却と加速により、エネルギーとビーム品質が制御可能に

エネルギーの選択肢が広がる

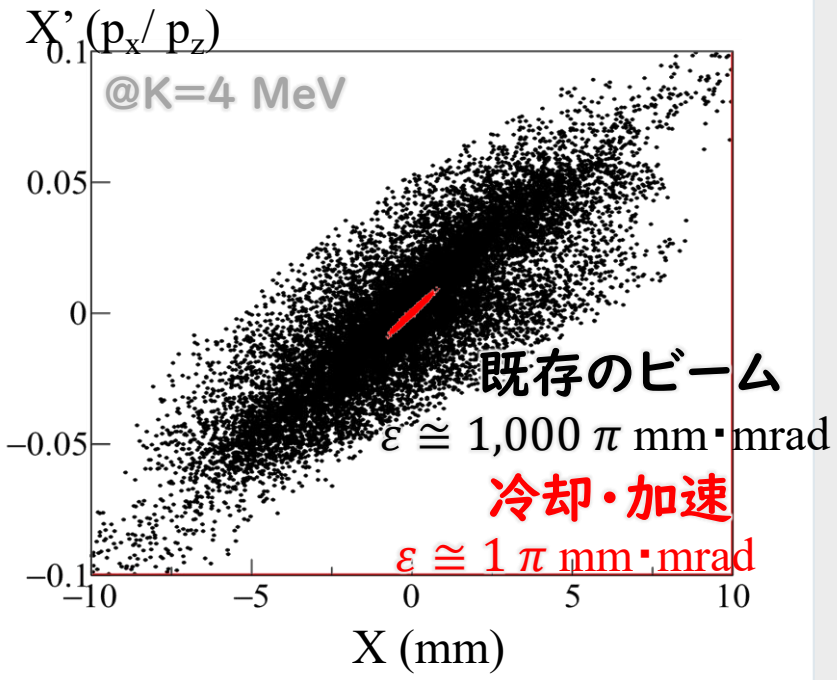
人工
ミューオン

宇宙線
ミューオン

ミューオン冷却・加速

MeV　　GeV　　TeV

高い指向性でより小さな領域へ



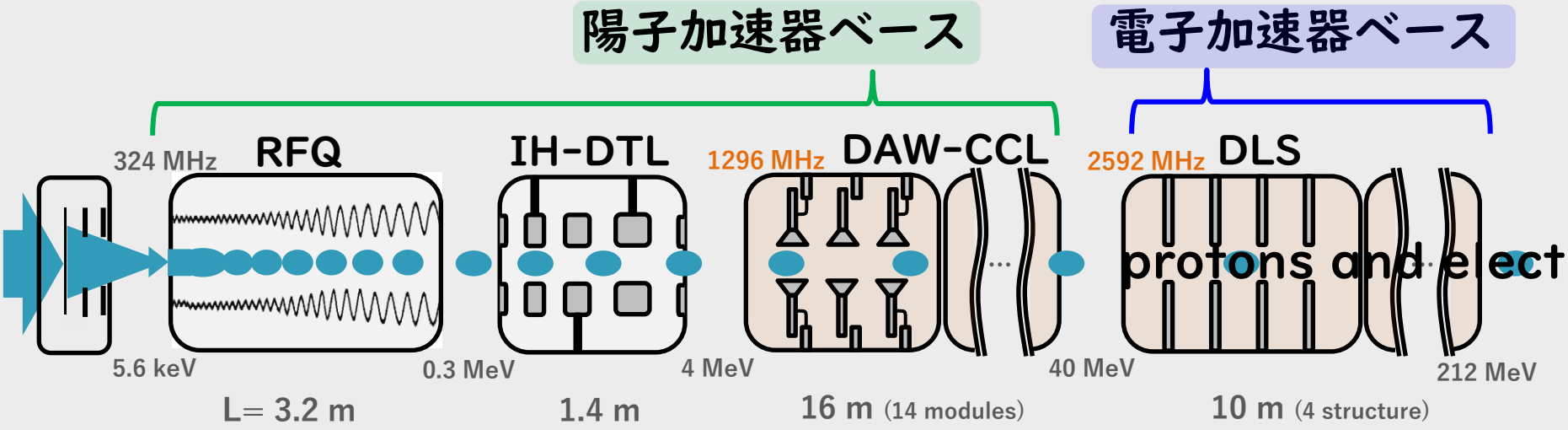




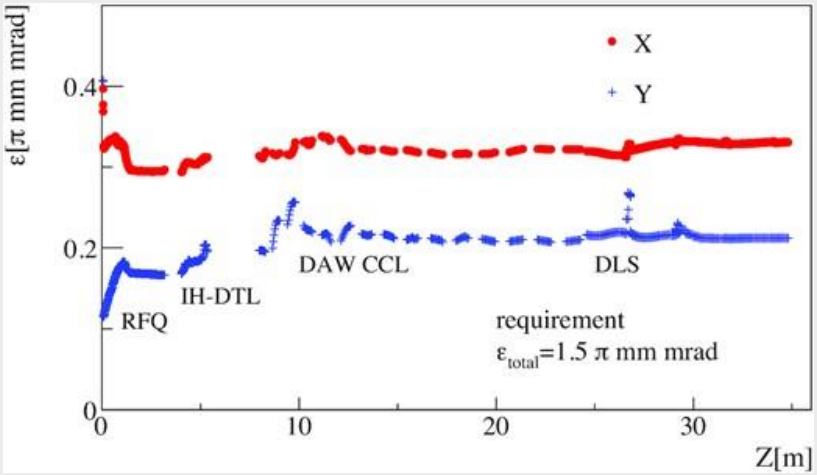
ミューオン加速の開発@J-PARC

加速器の概要

これまで陽子・電子で培われた技術を応用・発展



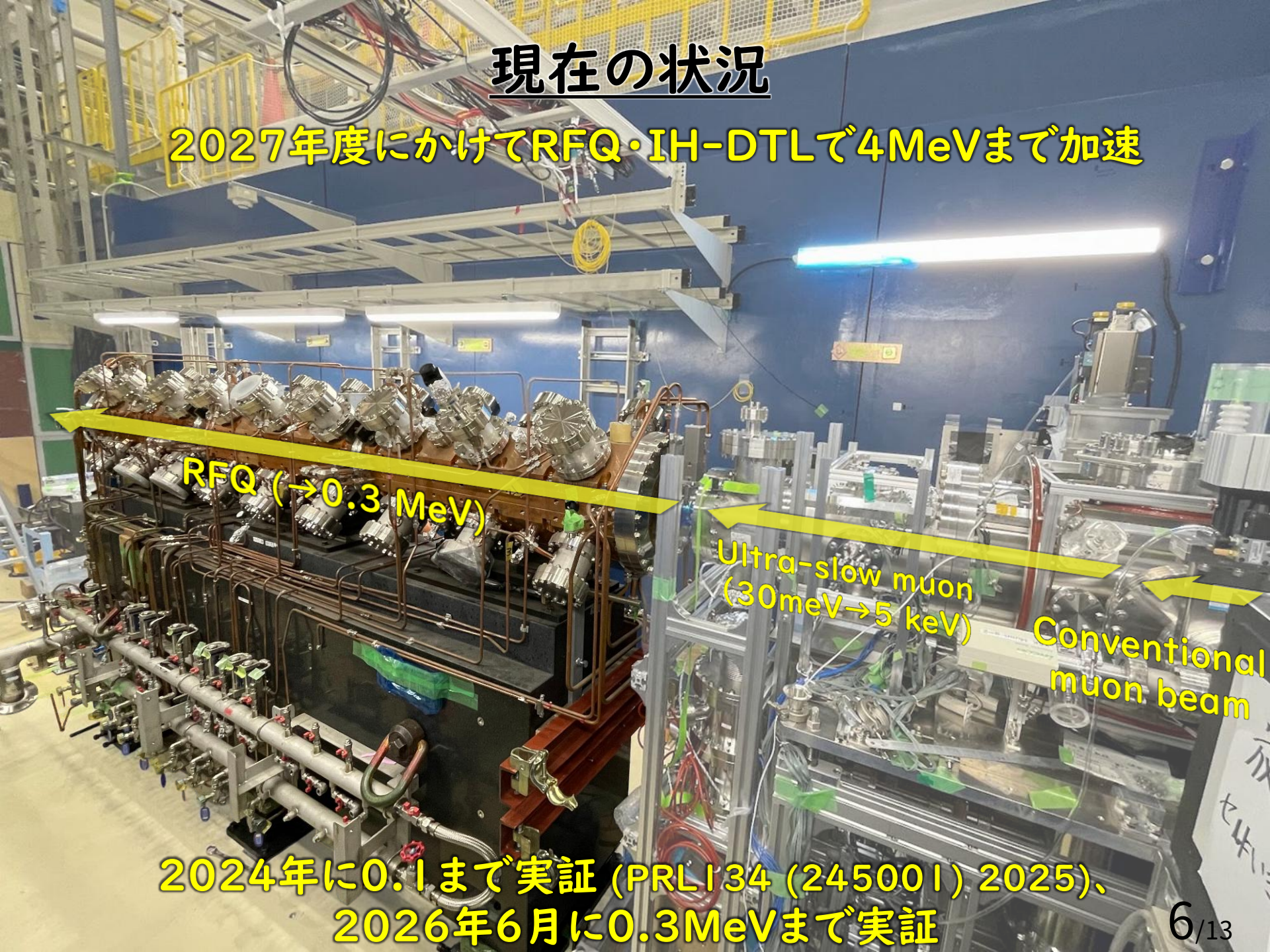
Energy [MeV]	212
Intensity [/s]	10^6
Repetition [Hz]	25
Pulse length [nsec]	~10
Normalized ε_t [π mm mrad]	~1.5
Δp [%]	~0.1



ミューオンを素早く(0.6<ミューオン寿命2マイクロ秒)、
高品質(エミッタンス増加~few ten%)で加速

現在の状況

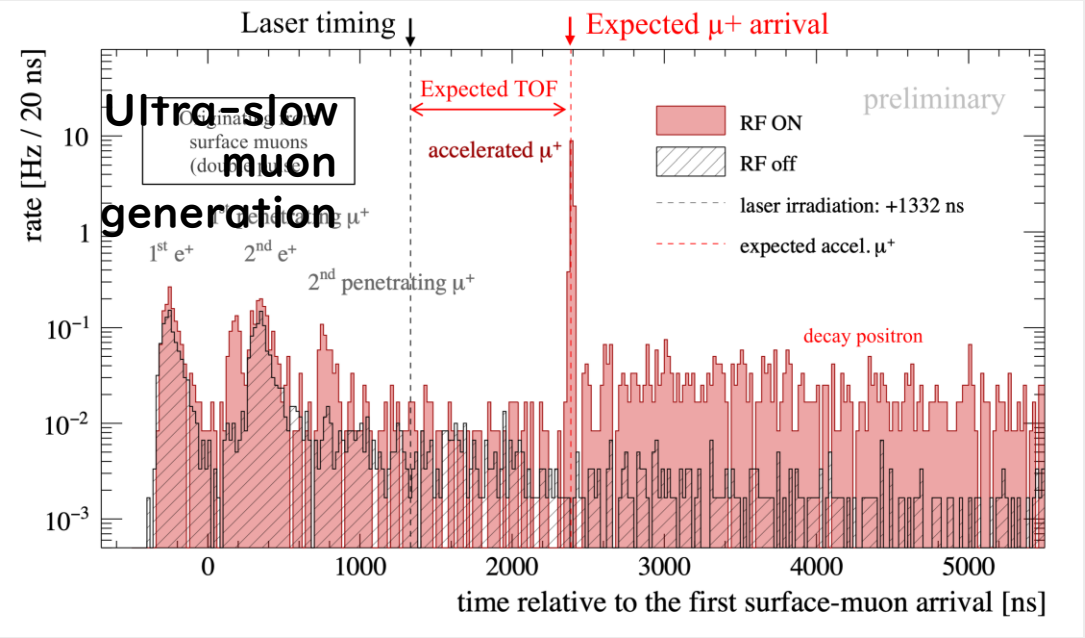
2027年度にかけてRFQ・IH-DTLで4MeVまで加速



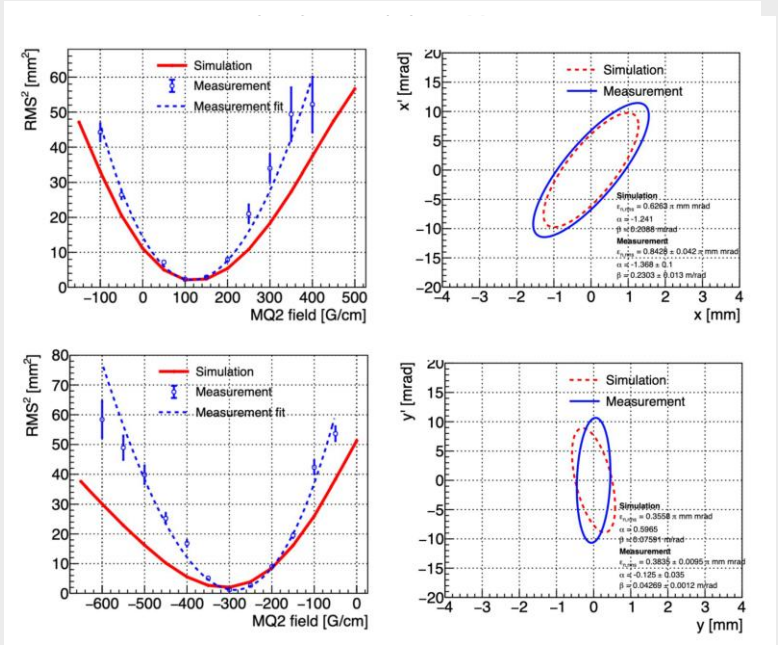
2024年に0.1まで実証 (PRL 134 (245001) 2025)、
2026年6月に0.3MeVまで実証

0.3 MeVまで加速を実証

飛行時間測定



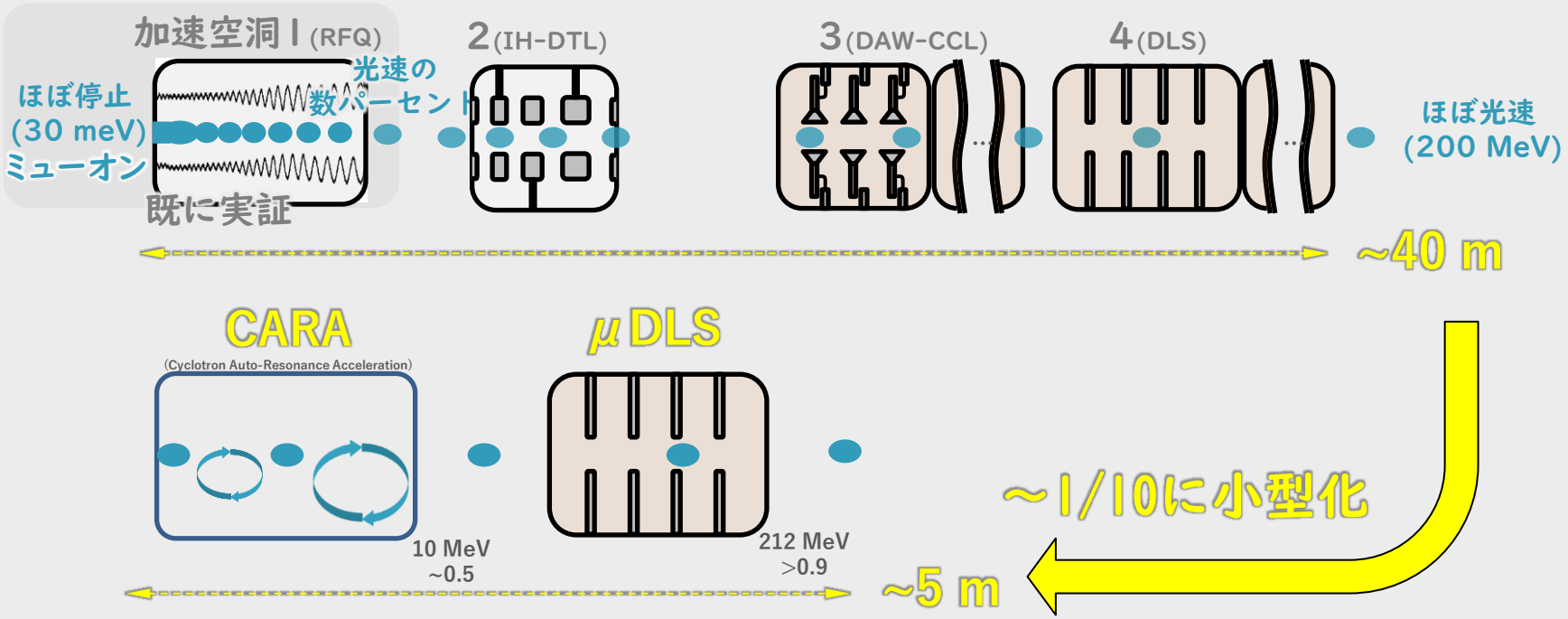
エミッタンス測定



想定通りの加速エネルギー、エミッタンスを実証

4MeVを2027年度、~200MeVまでの30年代前半に予定

加速器の小型化（創発研究）



サイクロトロン共鳴加速（CARA）

☑ 電子で既に実績 [PRL 76 (1996) 2718]

☹ 相対論効果により適応可能なエネルギー小

☐ 陽子で検討

☹ $B > 50$ T@ $f = 900$ MHz ($f = eB/2\pi m$)

☐ ミューオンで原理実証（本研究）

☺ 電子と陽子の中間質量

☑ 近年、ミューオンの高周波加速が実証→今こそ本原理を実証すべき！

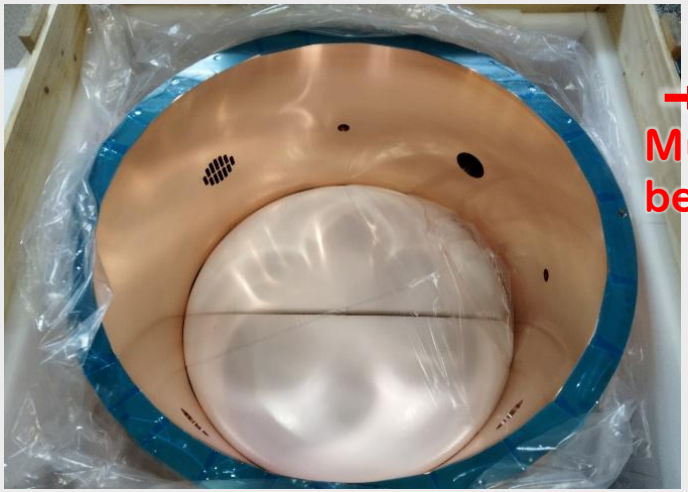
高勾配ミューオン専用加速管（μDLS）

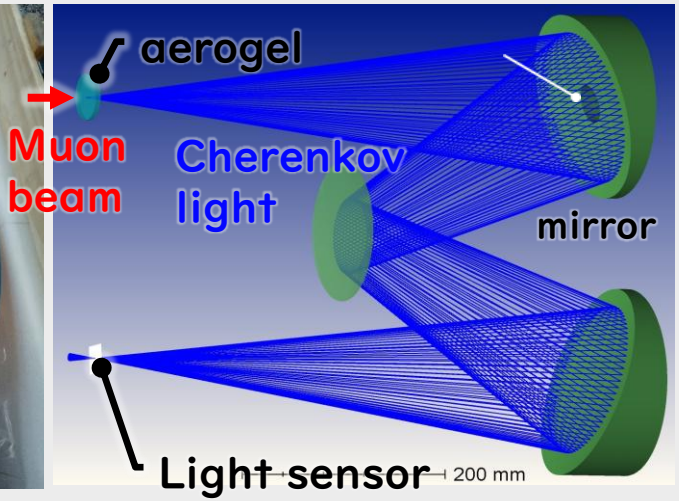
☐ 陽子線治療加速器用に世界中で検討 →世界に先駆けてミューオンで技術を確立

開発状況

- シミュレーションで小型化を実証。
- 試作機による空洞性能の実証
- これまでにないビームモニターの開発







30年代前半に基盤技術を確立、30年代後半に実現？

ミューオン加速技術の開発状況のまとめ

エネルギーの選択肢が広がる

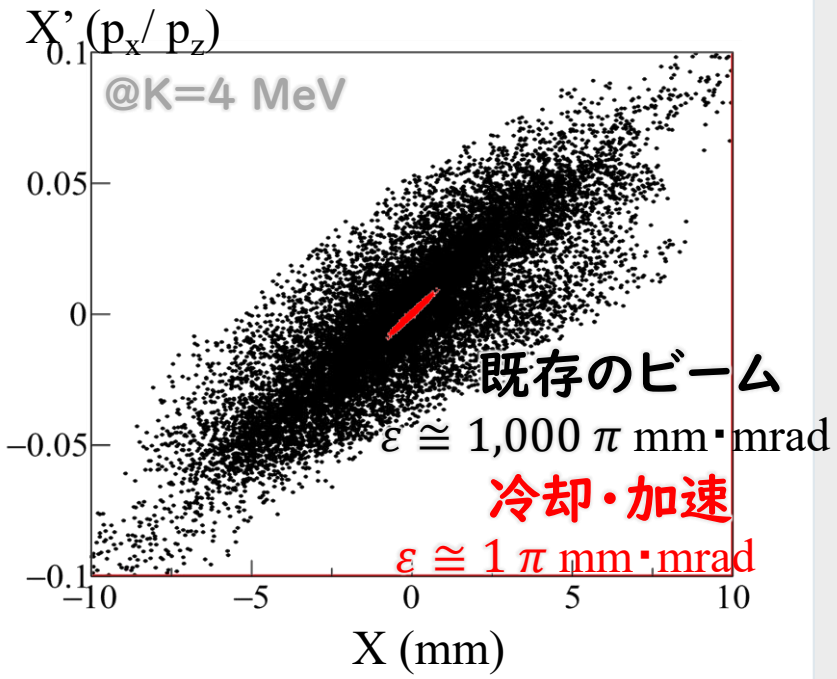
人工
ミューオン

宇宙線
ミューオン

ミューオン冷却・加速

MeV　　GeV　　TeV

高い指向性でより小さな領域へ



☑ 0.3 MeV
→ 4MeV

☐ ~200 MeV (30年代前半)
☐ 小型化 (30年代後半?)

例：何が『視える』ようになるか？

- ダイアモンドセルを貫くための高いエネルギー
- 小さな超伝導体を狙い撃つための低エミッタンス≒細いビーム

【基盤研究(S)】

複合極限条件下のミュオンスピン回転・共鳴法による水素化物超伝導の水素の挙動解明



研究代表者	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授 幸田 章宏(こうだ あきひろ)　研究者番号:10415044
研究課題情報	課題番号:26K21730　研究期間:2026年度～2030年度 キーワード:超伝導、ミュオンスピン回転、水素化物、超高圧、加速ミュオン

なぜこの研究を行おうと思ったのか(研究の背景・目的)

●研究の背景

最近、超高圧下100万気圧以上の金属水素化物で非常に高い温度（絶対温度150～250K）での超伝導転移が相次いで発見され、高い注目を集めている。夢の「室温超伝導」まで、あと一歩かもしれない。高い温度で超伝導転移するということは、それだけ高いエネルギーで電子対を形成しているということを意味する。こうした金属水素化物において水素の高いフォノンエネルギーが高温超伝導の起源であることは、ある意味、超伝導研究者が予想していた通りではあるが、実際の物質中において水素が結晶格子中のどこに位置し、どのような電子状態にあるか、実験によって観測した例はひとつもない。さらに、実現した超伝導状態の磁場侵入長やコヒーレンス長などの基本パラメータについても不明なままである。我々はミュオンを用いれば、これらの問いに答えを与えられると考えている。

●研究の全体像

ミュオンは素粒子の一種で、正の電荷を持つ正ミュオンは平均寿命約2.2マイクロ秒で崩壊して陽電子を放出する。ミュオンスピン回転法（μSR法）は陽電子の放出がミュオンスピンの方向に高い確率をもつという性質を利用して、物質内部の局所磁場・電子状態を調べる手法である。超伝導物質において磁場侵入長といった基本パラメータの観測に活躍してきた。

また正ミュオンは陽子の約1/9の質量で、物質中で電子と束縛状態（ミュオニウム）を作る。ミュオニウムは水素（陽子と電子の束縛状態）とほぼ同じ換算質量をもつため、ミュオニウムを水素のシミュレータとして利用することができる。つまり水素化物超伝導における超伝導発現に対して水素がどのような役割を担っているのか、これを調べるためにミュオンほどうってつけのプローブはない。

しかし、水素化物超伝導が発現する超高圧で実験をおこなうには、図1にあるようなダイヤモンドのアンビルを通過させ、その先の0.1ミリといったサイズの試料で実験をおこなわなければならない。こういった理由により、これまで超高圧のμSR実験はきわめて実現困難であった。この状況を突破するひとつの可能性が加速ミュオンである。2024年、J-PARCにおいて世界初のミュオン加速実験が成功した。加速ミュオンを用いれば1mmサイズのビーム径のミュオンビームが実現でき、しかもビームの時間幅を10ピコ秒と短パルス化できる。短パルス化はμSR測定の時間分解能の向上に直結し、強磁場中での超伝導状態の観測に最適なビームであるといえる。つまり、超高圧、強磁場、加速ミュオンといった先端技術を結集することで、水素化物超伝導の長い間の謎となっている、「水素はどこに、どのように存在するのか」明らかにしようとするのが本研究の目的である。

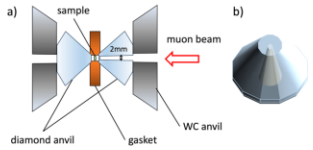


図1 a) μSR実験用超高圧セル（ダイヤモンドアンビルセル）の概念図。
b) 穿孔型ダイヤモンドアンビルのイメージ図。

●これまでの取組み

我々の研究グループでは2022年より、科研費基盤Aの研究プロジェクトとして低エネルギー4メガ電子ボルトのミュオンビームを用い、ダイヤモンドアンビルを透過して微小試料に止めたミュオンの測定に挑戦してきた。図2は0.3ミリ厚のダイヤモンドを透過したミュオンが模擬試料であるテフロンに止まったときの測定結果である。テフロン中のミュオンに特有な回転信号が観測されており、この結果から微小試料におけるS/N比を評価できる。

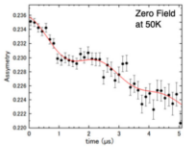


図2 0.3ミリ厚のダイヤモンドを透過したミュオンが模擬試料であるテフロンに静止したことを示すμSR信号。特徴的な回転信号が観測されている。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●水素化物超伝導の発現機構

水素化物超伝導において水素が担う役割は、我々が想像している通りなのか？この答えを知ることは、この先の室温超伝導の実現に向けた研究の道筋を知ることでもあると言える。

ただし、突破口の一端が見えたとはいえ、依然、技術的に挑戦しがいのある目標であることは変わりない。圧力に関しては、最初の達成ゴールを10万気圧と設定し、技術開発を継続しつつ40万気圧を目指す。これらの圧力域でよく調べられている金属水素化物として、イットリウム水素化物が挙げられる。イットリウム水素化物は九水素化イットリウムYH_9が200万気圧で絶対温度241Kの超伝導転移を示すことで高い注目を集めている。一方、より低水素状態の低い圧力でも多彩な現象が観測され、調べられている。我々の最終ゴールと掲げた40万気圧までの範囲で、二水素化イットリウムYH_2から三水素化イットリウムYH_3への構造転移、金属ー絶縁体転移、バンドギャップ消失による金属化、そして超伝導を示す。これらの様々な現象をミュオンにより詳細に調べることで、水素がどのような電子状態であるかという、鍵となる情報を得ることができると考えている。

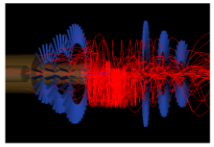


図3 3テスラの磁場中でミュオン崩壊陽電子が描く軌道（赤）のシミュレーション。強磁場μSR実験のために効率的な検出器配置を検討する必要がある。

●強磁場、加速ミュオン

超高圧とともに強磁場、加速ミュオンも本研究の重要な柱である。強磁場での効率的なμSR測定のためには、磁場中での陽電子の軌道を慎重に考慮した検出器を構成する必要がある。（図3）

また加速ミュオンはミュオン源として用いるミュオニウムを形成するときに偏極率が50%に減少してしまう。このことはμSR測定の効率に大きく影響を与えてしまう。円偏光レーザーと組み合わせてスピン偏極を回復させることも技術的挑戦のひとつである。

●加速ミュオンを用いたμSR研究：将来への期待

加速ミュオン装置は、g-2/EDM実験、透過型ミュオン顕微鏡など現在進行形の様々な研究プロジェクトの基盤となる装置である。本研究により、ここに新たにμSR法による物質研究が参画することになる。現時点で0.3ミリ厚のダイヤモンドを透過した実験まで成功している一方で、より高い圧力の発生には、より厚いダイヤモンドを透過する必要があり、そのためにはより高いエネルギーまで加速したミュオンを使うことになる。加速ミュオン技術が段階的に整備され、エネルギーを増加するにつれて、より高い圧力での実験へとステップアップしていく期待が高まっている。

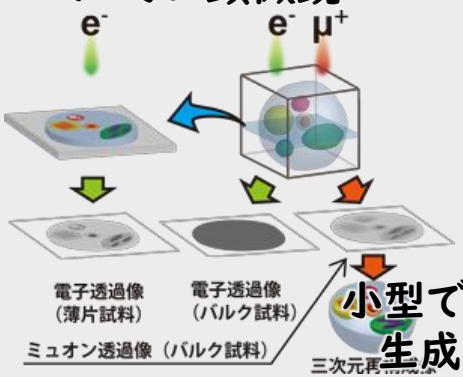
ウェブサイト等	https://www2.kek.jp/imss/msl/

～cont’d

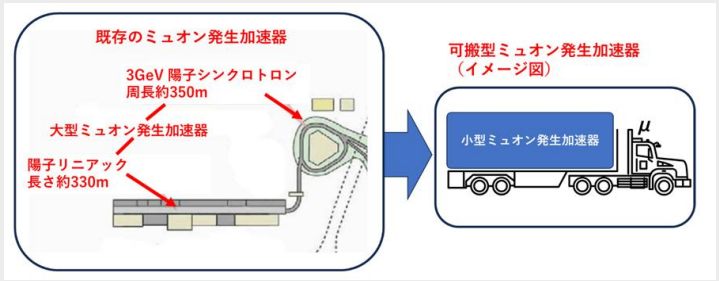
g-2/EDM (E34)



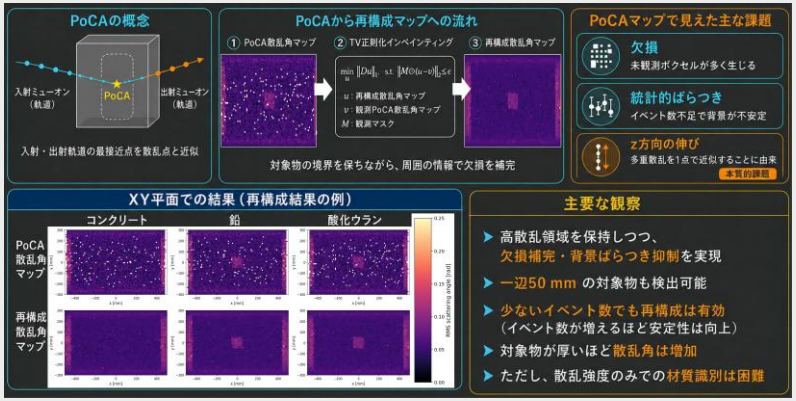
ミュオン顕微鏡



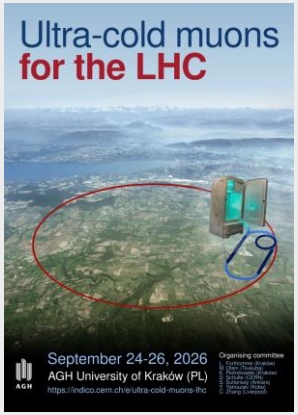
小型で人工的に高強度のミュオンを生成するコア技術 (Kプロ下村)



数理技術によるイメージング手法検討 (科研費学変A MSMI)



LHμC workshop



- 他には..?

まとめ

- ミューオンの冷却・加速によって、低エミッタンスで
  高エネルギーなミューオン(μ^+)ビームが実現可能に
- 0.3MeVまで実現。来年度に4MeVまで実現予定。
  30年代に～200MeV、小型化。
- 何が視えるようになるか？