ミュオン顕微鏡で探る世界

高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所
J-PARCセンター
永谷幸則

yukinori.nagatani@kek.jp

ミュオンによるイメージング

- **宇宙線ミュオンを用いた透過イメージング**
  ～巨大な物体のレントゲン撮影～

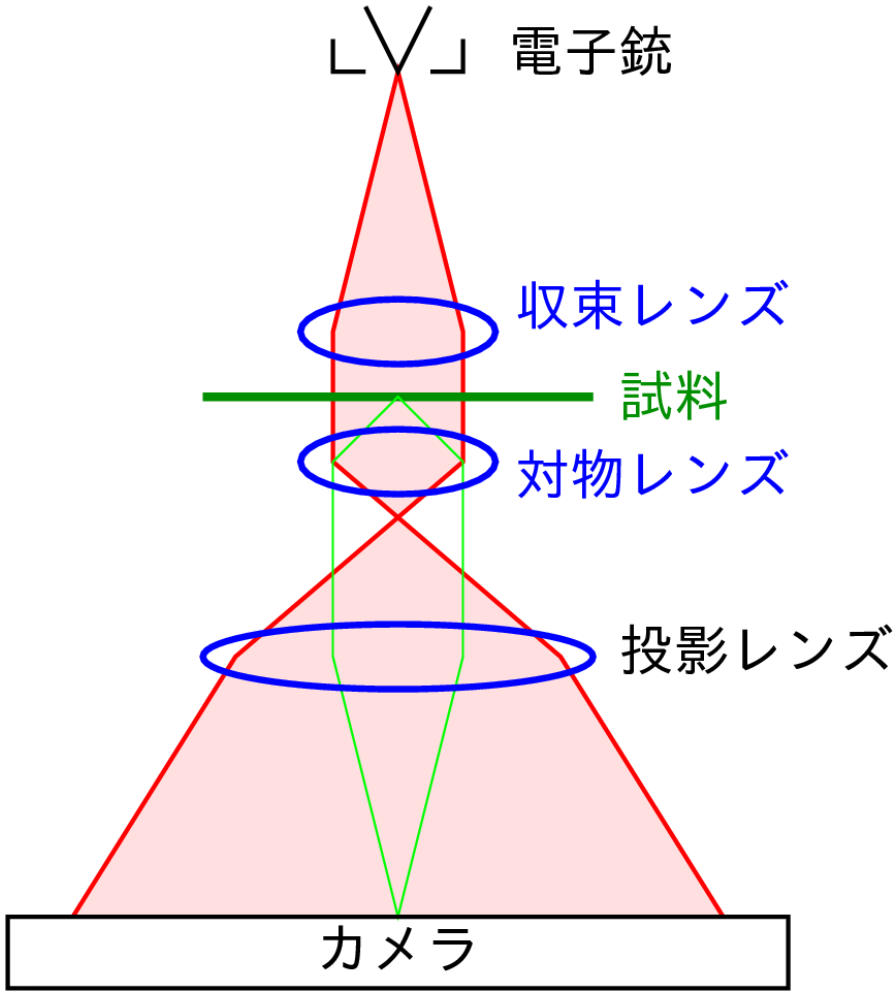
1955年　岩盤の密度測定 (E.P.Georg)
1968年　ピラミッドの透視の試み (L.W.Alvarez)
2000年代　**浅間山の透過イメージングに成功** (永嶺謙忠 et.al.)
2010年代　福島原子炉の透過イメージング (高崎史彦 et.al.)
　　クフ王ピラミッドの新空間発見(森島邦博,高崎史彦 et.al.)

近年、華々しい成果が続々と…

課題：輝度が低く高分解能化が出来ない

宇宙線ミュオンの飛来数：
毎秒約1個／(10cm四方)　≈　数百年に１個／(1μm四方)

透過型電子顕微鏡（TEM）によるイメージング



TEM: Transmission Electron Microscopy

電子線による透過イメージング

～最高分解能の透過観察手法～

1931年　発明 (E.Ruska)→1986年ノーベル物理学賞
生物学・物理学・工学などあらゆる分野で不可欠に

2017年　クライオ電顕にノーベル化学賞
（J.Dubochet, J.Frank と R.Henderson）

課題：電子線の透過能に限界

通常数100nm、厚くても数μm厚さの切片までしか観察できない

透過型電子顕微鏡（TEM）の観察可能厚さ

生物系試料を
対象として

試料厚さ	電子線エネルギー	価格（参考）
<100nm	100kV	2000万円～5000万円
<200nm	200kV	2億円～
<300nm	300kV	4億円～
	400kV以上は特注品	
～500nm	500kV	10億円～
	1MV以上は超高圧電顕（HVEM）に分類	
～1μm	1MV	20億円～

世界最高は阪大3MV透過電顕

透過型ミュオン顕微鏡（TμM）のアイデア

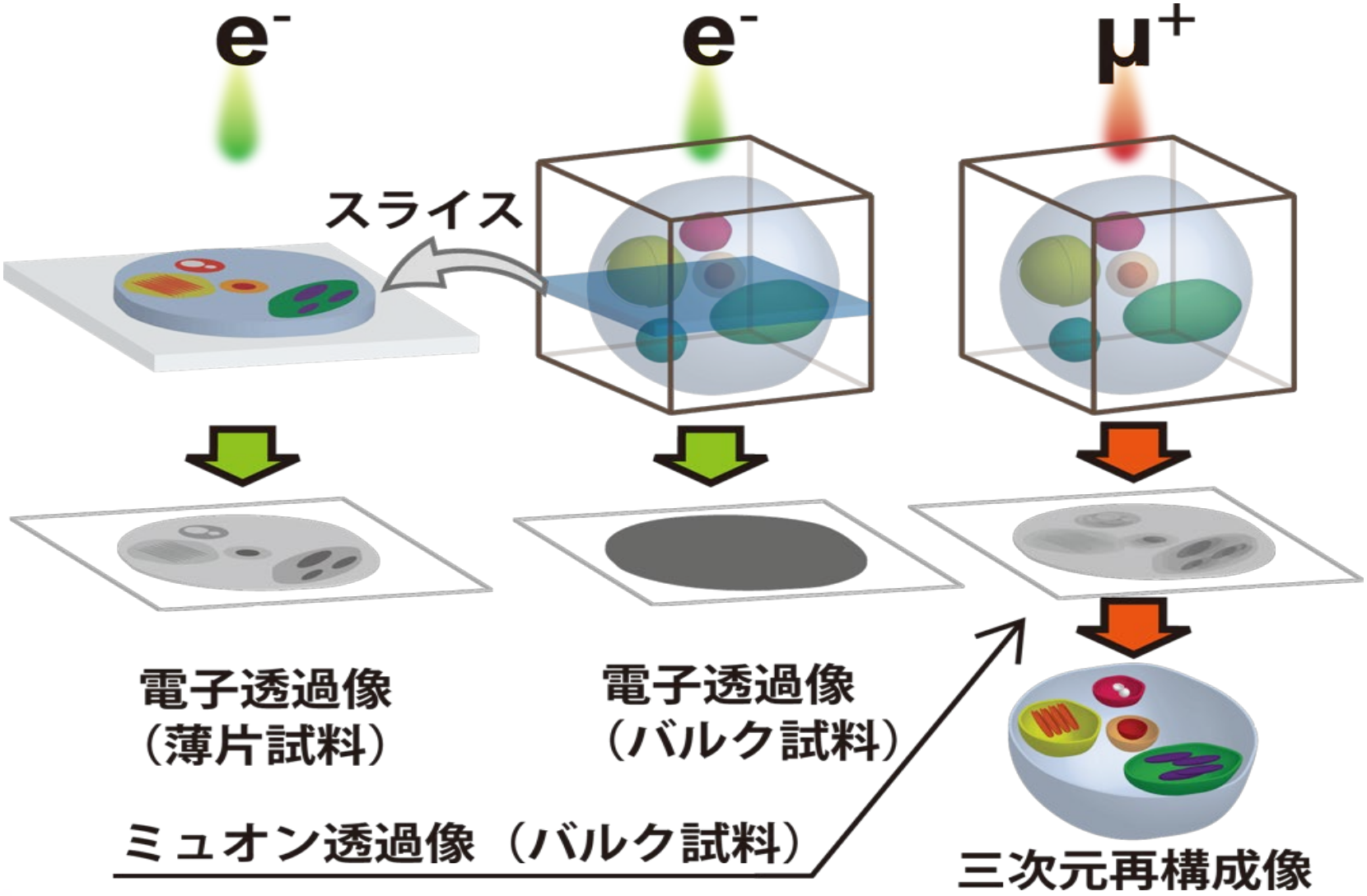
- 電子とミュオンは同じ分類の素粒子のレプトンであり、性質が良く似ている
- 人工ミュオンは輝度を極めて高く出来る
- 人工ミュオンを加速すれば、高い透過能力を獲得

↓

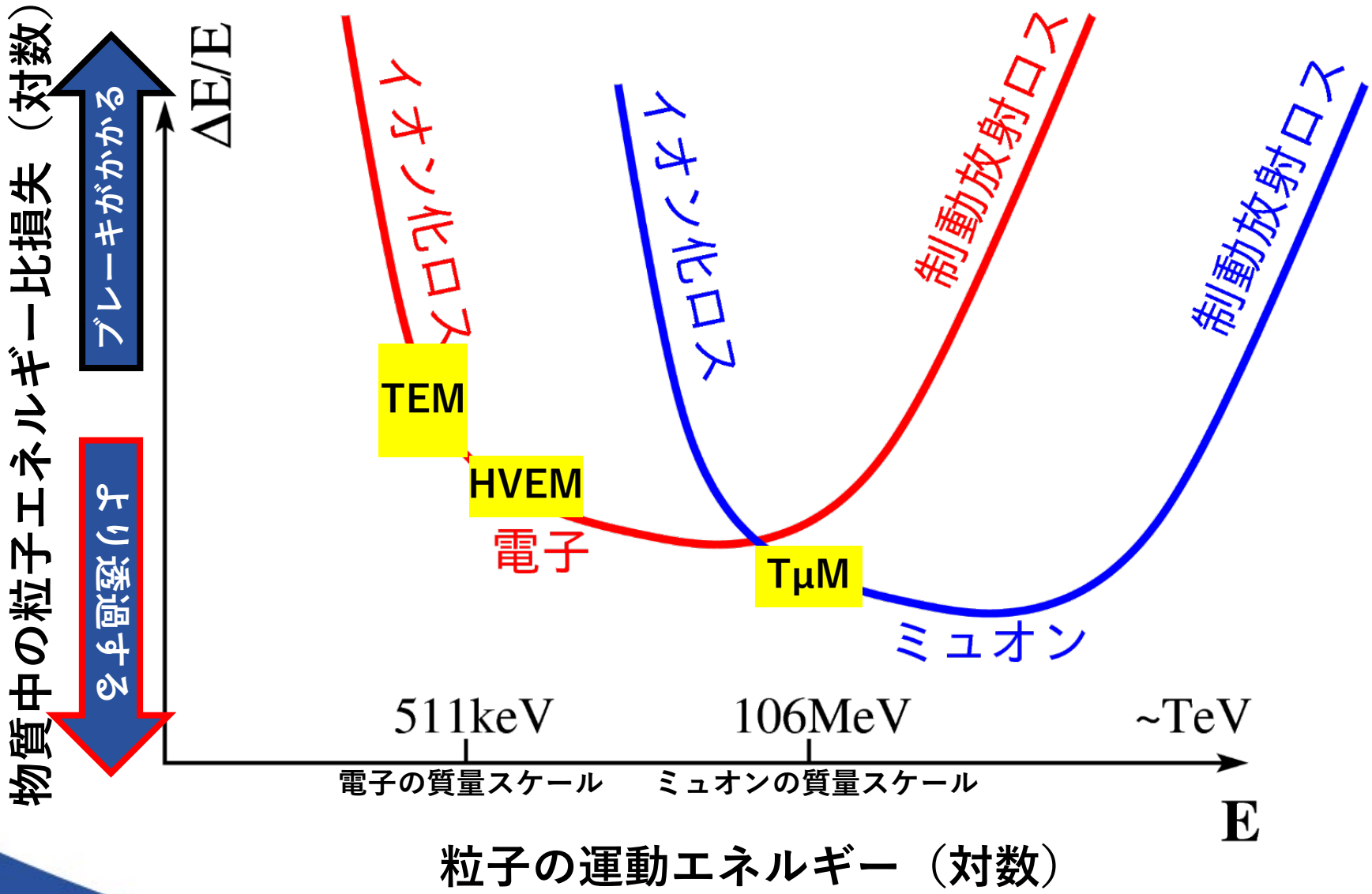
**透過電顕の電子の代わりに、
人工の加速ミュオンを用いれば、
ぶ厚い試料を高分解観察できる**

TμM：Transmission Muon Microscopy

透過型ミュオン顕微鏡（TμM）の概念



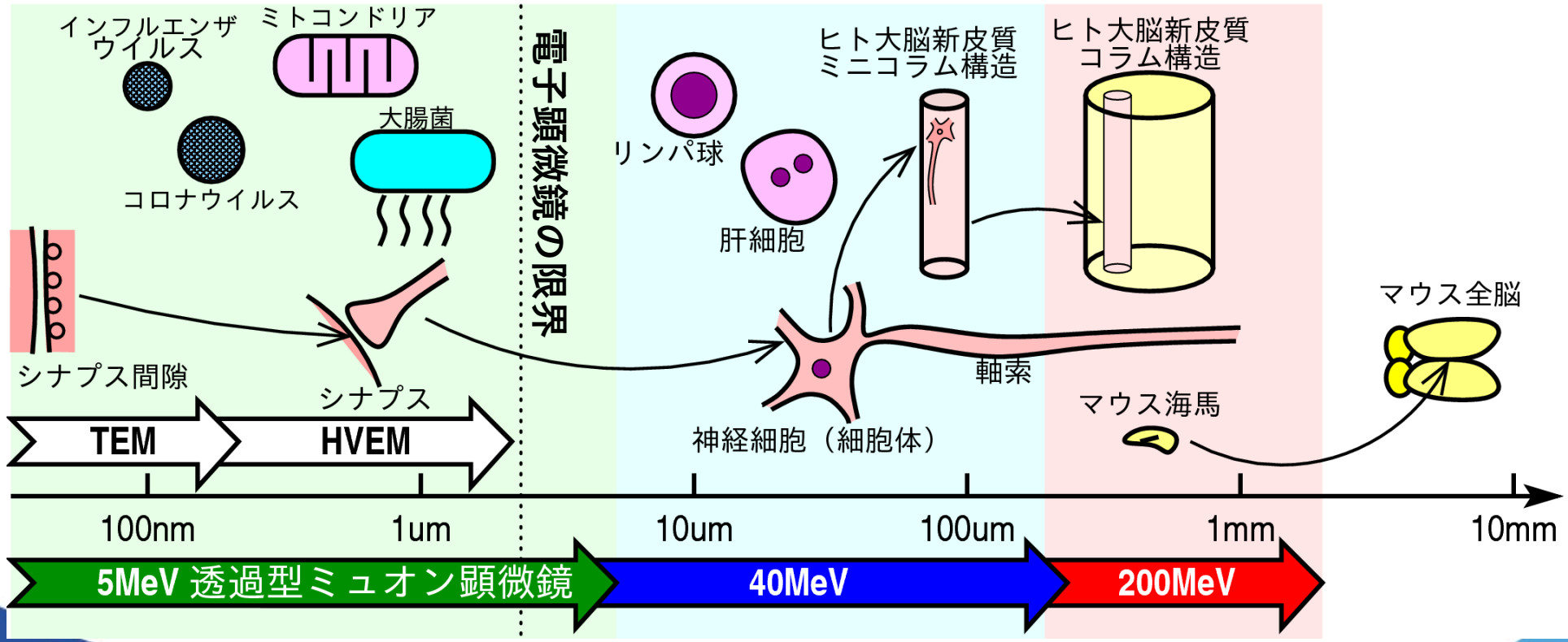
電子とミュオンの透過能力の比較



透過型ミュオン顕微鏡で見たいもの

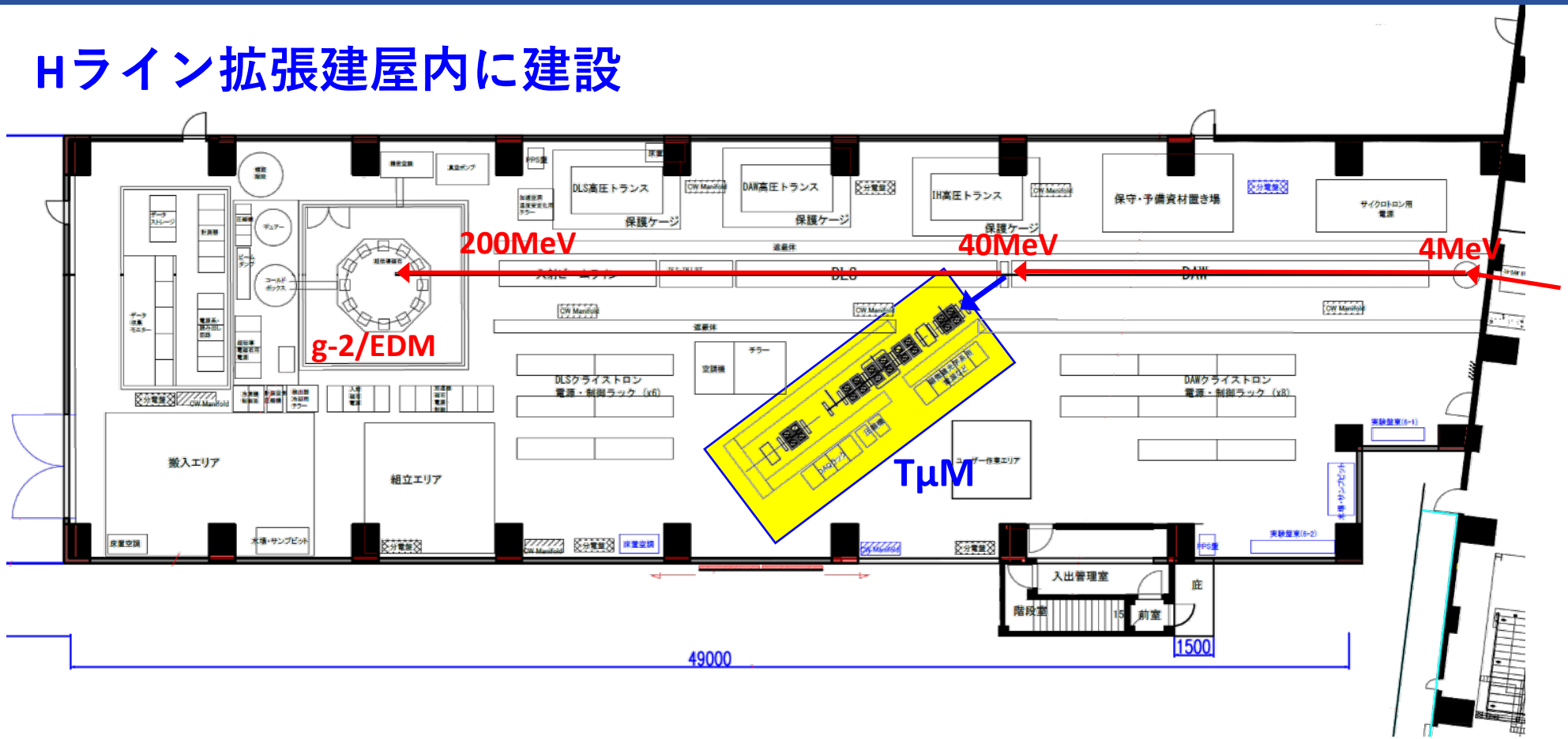
開発中 → 本計画 → 次期計画

μ再加速エネルギ	1MeV	3MeV	5MeV	10MeV	40MeV	200MeV
観察可能厚さ	220nm	1.6μm	4μm	14μm	150μm	1.5mm
観察対象	～ TEM	～HVEM	TEMを越える	細胞	ネットワーク	組織 小動物臓器



40MeV 透過型ミュオン顕微鏡の開発

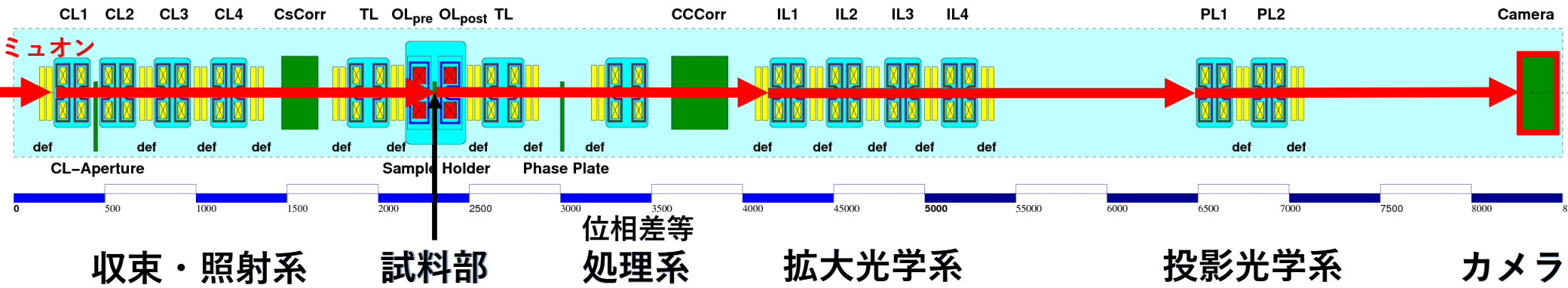
Hライン拡張建屋内に建設



高輝度超低速ミュオン源および加速器をg-2/EDM実験と共同開発し共有
最大の相乗効果とコストパフォーマンスを得る

40MeV 透過型ミュオン顕微鏡の本体構想

鏡筒の全長は９メートル程度



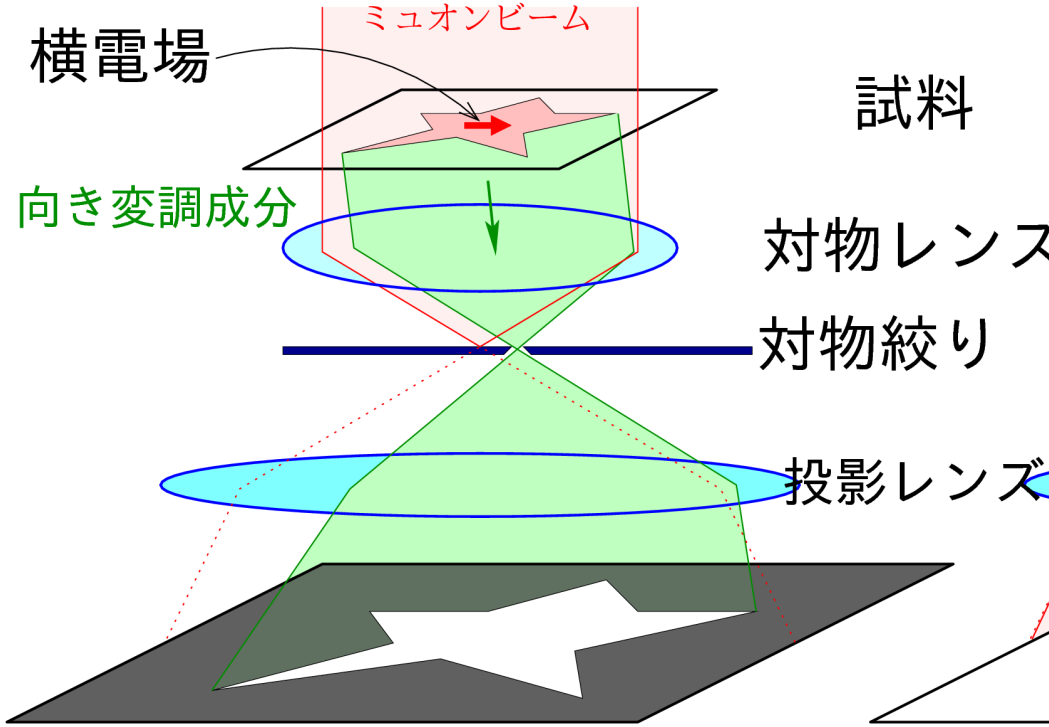
ハイエンドの電子顕微鏡で出来ることを、
そのままミュオン顕微鏡でも実現できる設計

高加速のミュオンは曲がりにくいため、
大勾配の強磁場が得られる超伝導レンズを使用

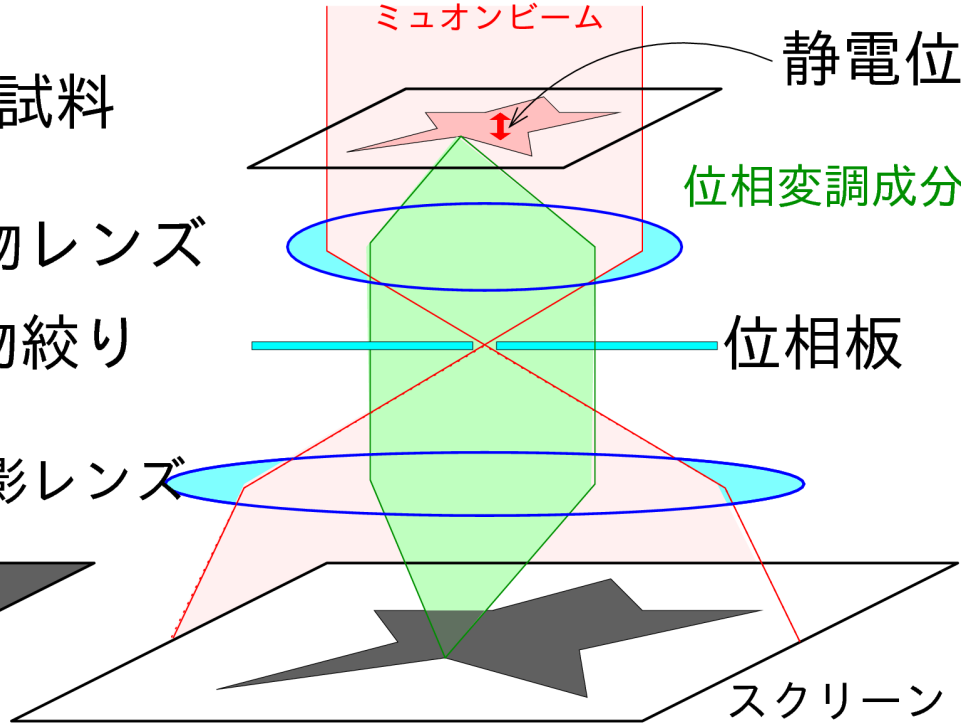
厚い試料内部の電磁場分布の可視化：

光学顕微鏡やx線顕微鏡では見えない電磁場が見える

ローレンツ顕微鏡法



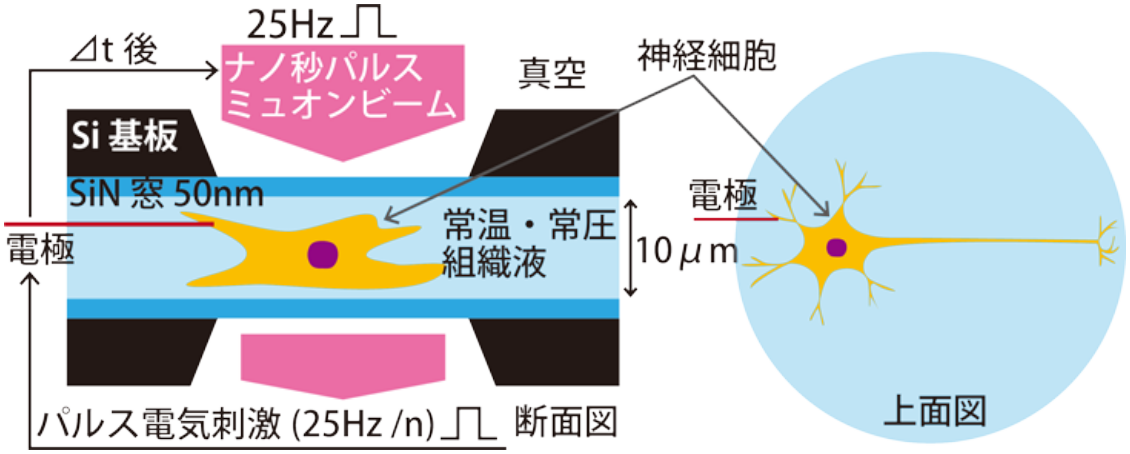
ゼルニケ位相差法



電子とミュオンは兄弟粒子
電子顕微鏡で出来る技術は何でも導入可能

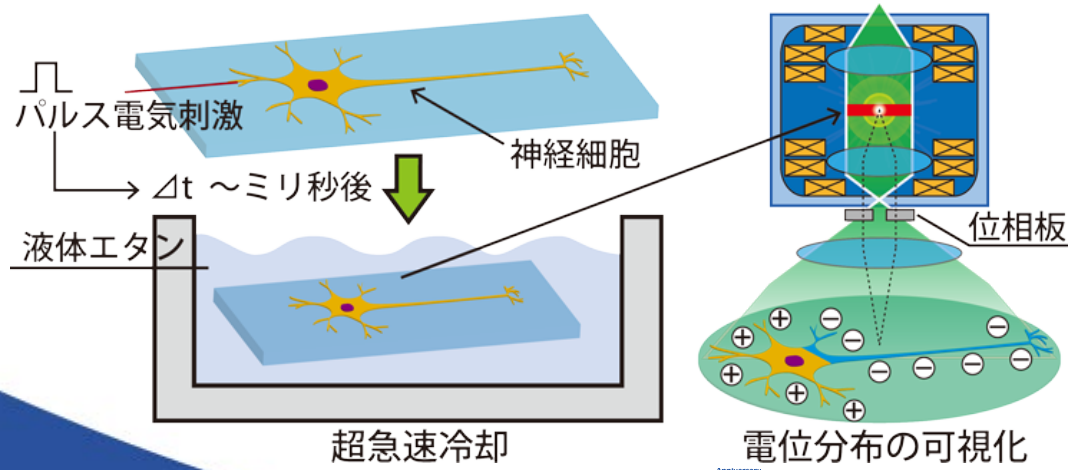
神経細胞や神経ネットワーク内の電磁場の可視化

神経細胞や神経組織を生きたまま環境セル内で神経電位を動画観察



- 室温、常圧、培養液中の神経組織を**環境セル**に入れ、真空窓こしに透過観察。
- 加速器からのパルスミュオンに同期した電気刺激を与え、ストロボ撮影で神経電位の伝播を２次元**動画**で可視化。
- 脳・神経の活動の現場そのものをナノ分解能で見る。

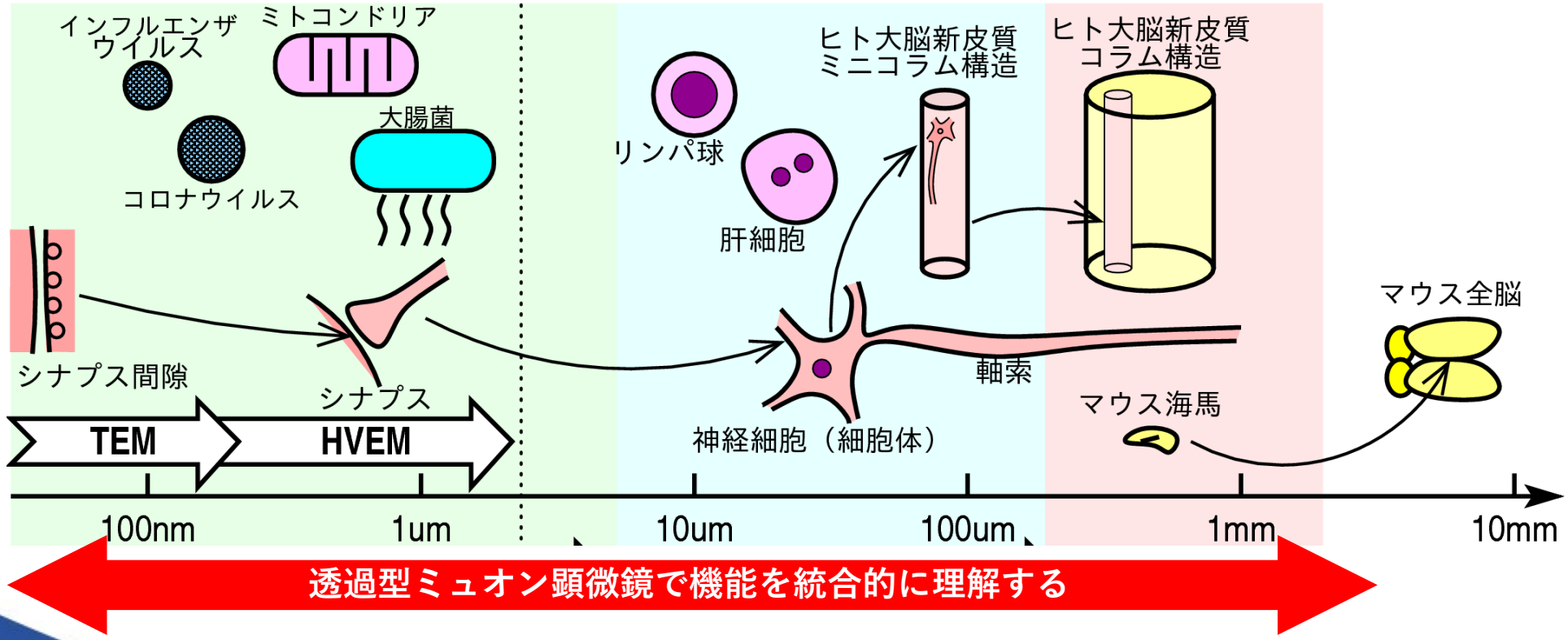
刺激を与えた神経組織を急速凍結、３次元スナップショットで詳細観察



- 神経組織に電気刺激を与えた直後に急速凍結。（クライオ電顕の技術）
- 位相差トモグラフィー撮影し、神経活動の伝播のスナップショットを、３次元かつ高分解能で見る

目指すもの

シナプス／神経細胞／ネットワーク／脳
複数に渡る階層をまたがった動作と機能の可視化
による階層間の統合的理解



物質材料や工学工業分野での利用

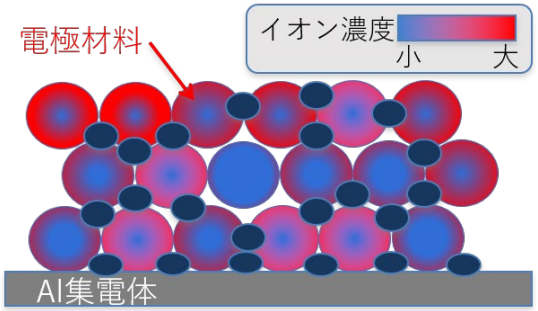
- **半導体内部での電磁場の可視化**
  IC, LSI, メモリ, CPU, RF半導体, パワー半導体,
  パッケージのまま中の動作が分かる

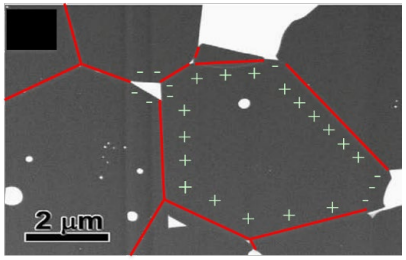
- **リチウムイオン電池の内部の電磁場**
  充電中や放電中の電位分布が可視化

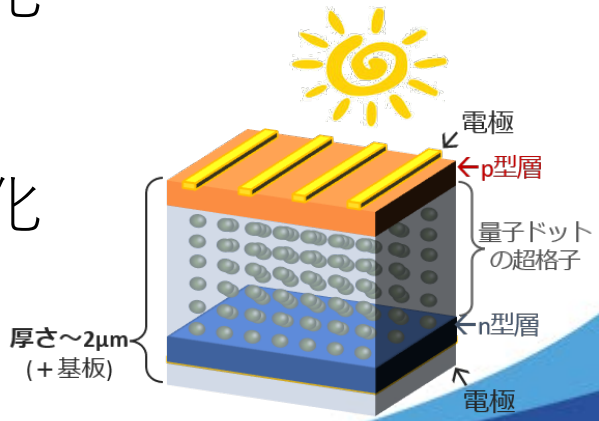
- **ピエゾ素子内部の電圧分布**
  医療用素子や超音波モーターの高性能化

- **永久磁石内部の構造と磁場の可視化**
  グレイン構造と磁区の可視化による高性能化

- **量子ドット内部の電場の可視化**
  太陽電池の高効率化、ディスプレイ高輝度化



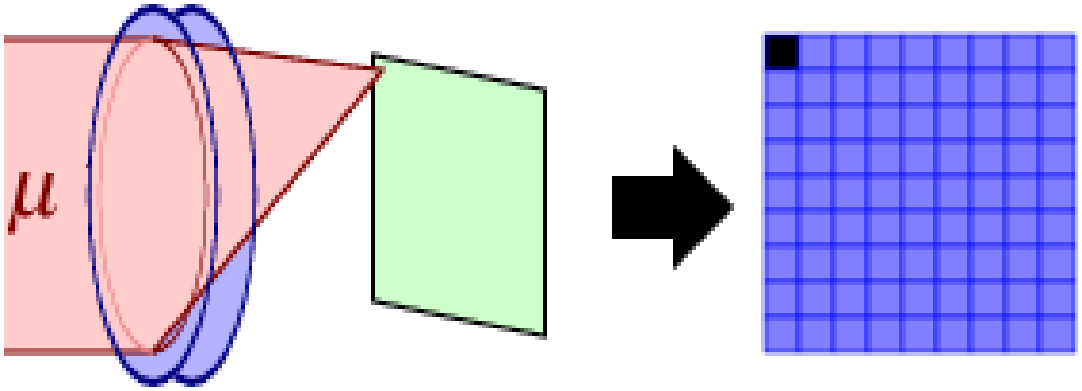




透過型に加え走査型ミュオン顕微鏡も併せて開発

SμM：Scanning Muon Microscopy

微小に絞った正ミュオンビームで試料上を走査



試料内部で正ミュオンが崩壊して出てくる
陽電子の放出方向の時間発展である
「μSR:ミュオン回転緩和スペクトラム」
を各点ごとに測定

試料上の各点でのμSR計測で

磁場（向き・強度）
磁場のゆらぎ
水素の状態
フェルミ面密度
：
ほか多数の物質情報

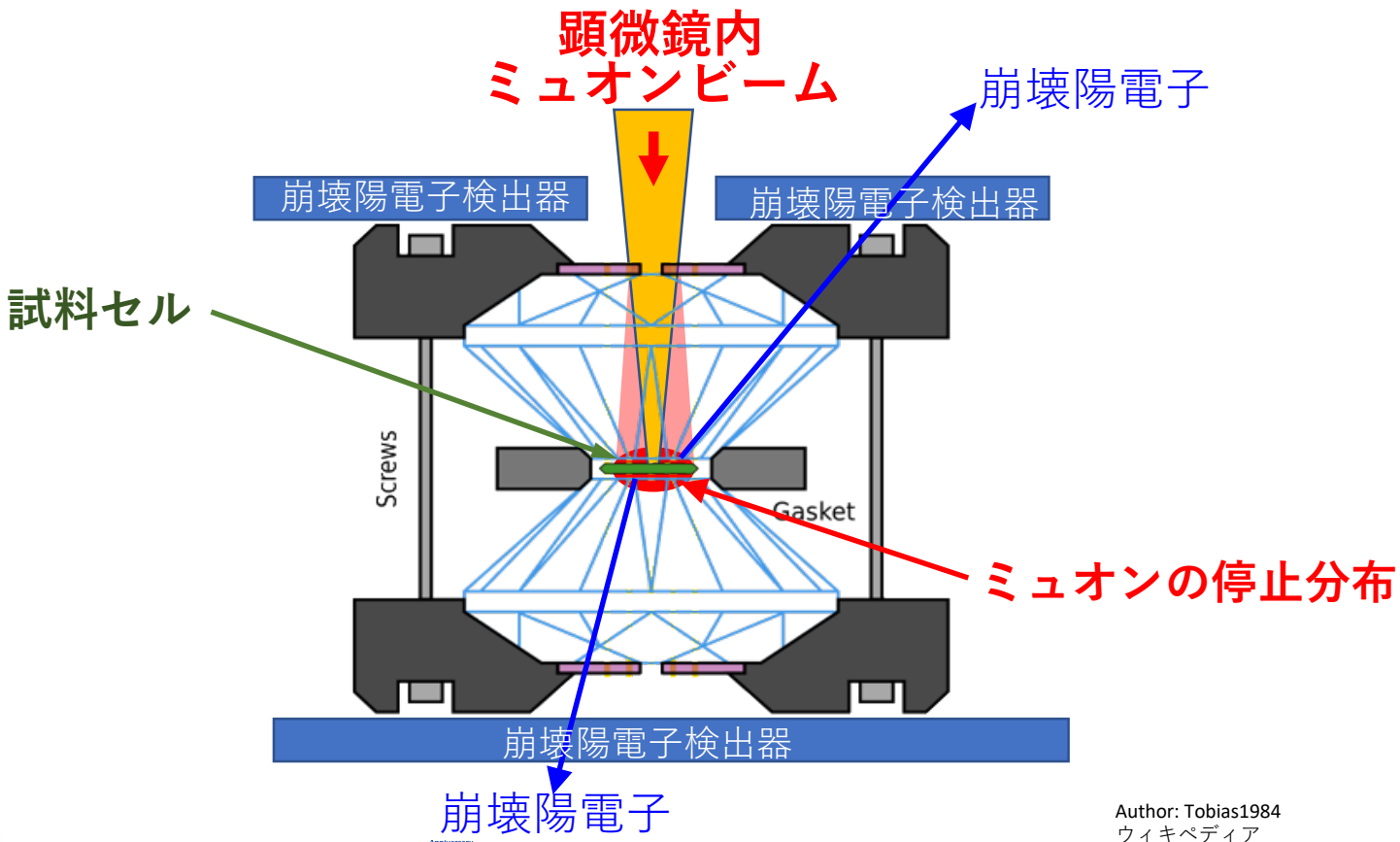
が、イメージとして取得

60年以上の歴史のあるμSR法が
顕微鏡法へと発展

物質・材料研究の新たな地平

超高圧下の室温超伝導物質（CH_8S 等）の計測

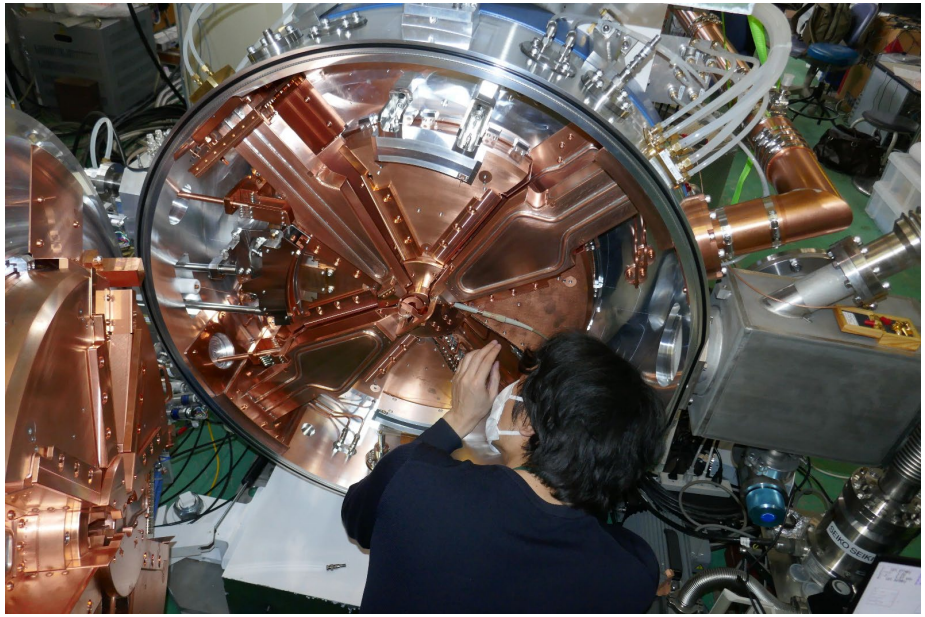
- **ダイヤモンドアンビルセル内の試料のμSR計測**
  収束できる加速ミュオンビームを用いれば、ダイヤモンドアンビルセル内の試料域にミュオンを停止させ、超高圧下の試料の超伝導特性の計測が可能に



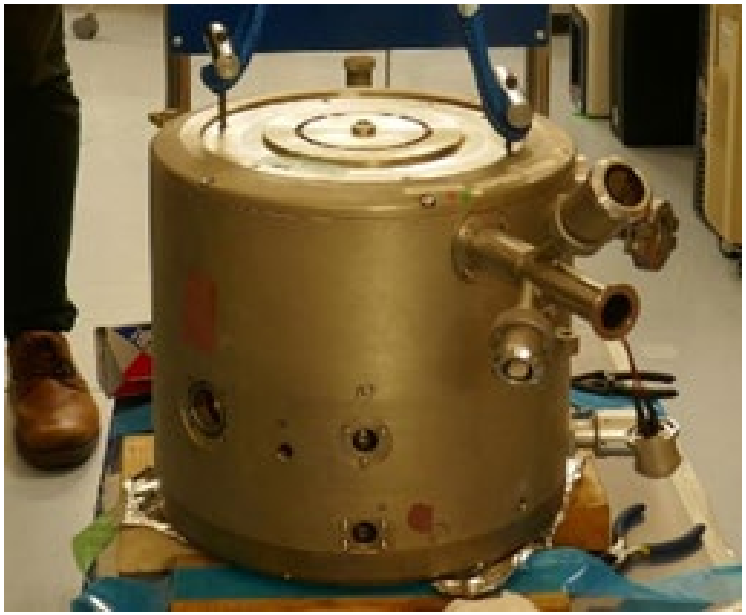
Author: Tobias1984
ウィキペディア
https://ja.wikipedia.org/wiki/ダイヤモンドアンビルセル
ライセンス：CC 表示-継承 3.0
を改変して掲載

準備状況

J-PARC MLF Uラインにおいて、
５MeV透過型ミュオン顕微鏡を原理実証機として開発中



小型・低コストなサイクロトロン開発で、超低速ミュオンを５MeVに再加速



I.Dietrichが生涯をかけて開発した電子顕微鏡用の超伝導対物レンズをミュオン顕微鏡に利用

なぜこの計画が立ち上がったのか？

2009年～2018年 永谷の前職（生理学研究所）での仕事：

電子顕微鏡＋線形加速器＝小型の高圧電顕

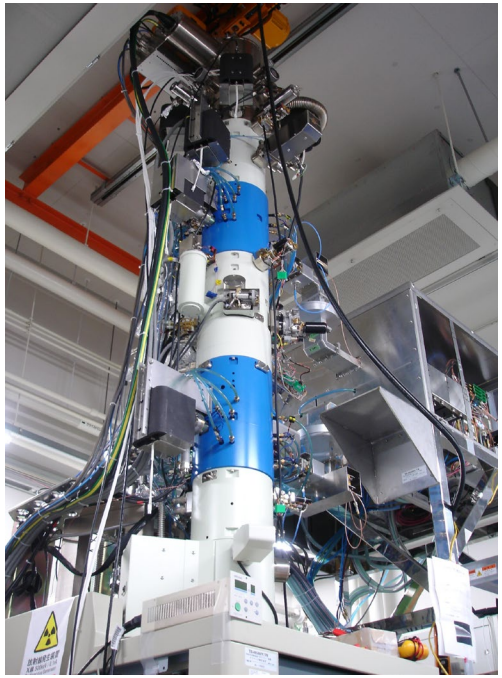
・専用の建屋を必要とする大型の高圧電子顕微鏡を
研究室に入るサイズにまで縮小

・マイクロ波で電子を加速してもサブnm分解能を実証

[Phys. Rev. Lett. 123, 150801 (2019)]

→ 大型加速器の高分解能の顕微鏡への応用の道が開いた

[顕微鏡 第50巻 第3号 (2015)]



2010年 加速器電顕開発を通じて**永谷と三宅康博KEK教授(現名誉教授)との出会い**：

電子顕微鏡の技術＋加速器＋ミュオン ＝ 透過型ミュオン顕微鏡

2013年 超低速ミュオン国際会議（松江）：基礎理論に目途、以後基礎R＆D
2018年 開発のために生理研からKEKに移籍、本格開発を開始

まとめ

- 人工ミュオンの高輝度と加速ミュオンの透過能力を生かした
  透過型ミュオン顕微鏡を開発

- ミュオンと電子は兄弟粒子：
  電子顕微鏡での観察可能厚さを３桁拡張するとともに、
  電子顕微鏡のあらゆる手法や技術を導入
  ミリメートルサイズの試料をナノ分解能で可視化

  特に、**厚い試料内の電場や磁場の分布が高分解能で３次元可視化**される

- シナプス／神経細胞／ネットワーク組織／脳といった階層間をまたぎ
  その動作と機能を可視化

- 物質材料研究から工業分野まで幅広い利用

- g-2/EDM実験とのミュオン源と加速器の共同開発と共同利用で、
  高い相乗効果とコストパフォーマンス