

透過型ミュオン顕微鏡の開発



永谷 幸則
Nagatani Yukinori



三宅 康博
Miyake Yasuhiro

1 はじめに

素粒子の一種であるミュオンは、正又は負の電荷をもち、質量が電子の約 200 倍、寿命が 2.2μ 秒でニュートリノを伴いつつ陽電子又は電子に崩壊する、電子によく似た粒子である。そのエネルギーが高いとき（数 10 MeV～数 TeV）には物質を極めて良く透過する性質をっており、宇宙線の主要な成分でもある宇宙線ミュオンは数百 m の地下へも到達できる。その透過能力のイメージングへの応用が永嶺らにより提案され、火山の透視¹⁾、福島第一原発事故後の原子炉の透視²⁾、近年ではエジプトのピラミッドでの新たな空間の発見³⁾等、様々な分野への利用が進められている。図 1 に示すように、ミュオンのエネルギーが数 10 MeV～数 TeV の領域は、低エネルギー側での物質のイオン化によるエネルギー損失と、高エネルギー側での物質中での制動放射による放射光発生による損失の狭間の領域となっており、物質を良く透過する⁴⁾。天然の宇宙線ミュオンは毎秒 0.01 個/cm² 程度の強度しかないため高い空間分解能は得られない。

一方、人工の粒子ビームを用いた透過観察法としては、X 線を用いる X 線透視法が医療診断から工業分野まで幅広く用いられている他、電子線を用いる透過電子顕微鏡（TEM: Transmission Electron Microscopy）が最も高い分解能を得る方法として生物学分野・材料物性分野を中心に広く用いられてい

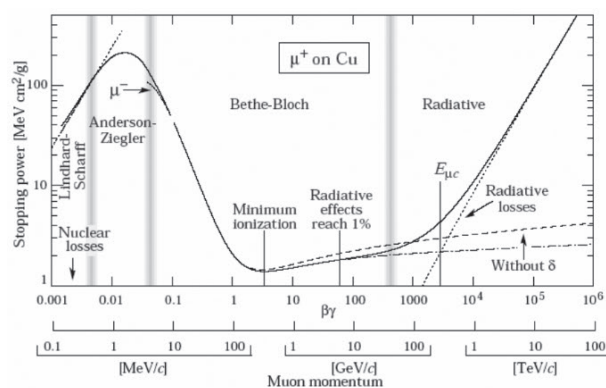


図 1 ミュオンの物質内でのエネルギー損失 (4)より引用

る。特に、凍結した生物試料を電子線で高分解能観察するクライオ電子顕微鏡法は、タンパク質から細胞内組織の構造を明らかにする等、目覚しい成果をあげ、2017 年には J. Dubochet, J. Frank と R. Henderson にノーベル化学賞が授与された。普及型の 200 keV 加速の電子ビームを用いる TEM では、試料は 200 nm 程度まで薄片化しておく必要がある。これより厚いと、電子ビームが透過しなくなる。生物電顕の開発の歴史では、この試料作成の方法が主要な課題の 1 つであった。細胞の構造を TEM で観ようとするとき、細胞の大きさは $10\mu\text{m}$ 超であり、凍結し氷包埋、あるいは固定し樹脂包埋したのち、200 nm 以下の薄さに切り出す必要がある。より厚い試料の観察が可能であれば、この手間は大きく省くことができる。これを 1 つの目的に開発されてき

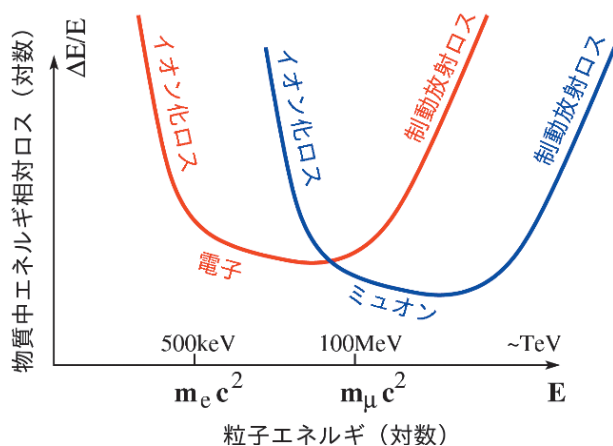


図2 ミュオンと電子の物質内でのエネルギーの相対損失の比較

たのが超高压 TEM であり、加速電圧を 1 MeV 以上に上げ、電子ビームの透過能力を増すことにより、1 μm 以上の厚さの切片試料の透過観察ができる。

以上を踏まえると、TEM で使用する電子に代えて、加速器で生成した強度の高い人工のミュオンを用い、適当なエネルギーまで加速して試料照射すれば、より厚い試料の透過観察が可能ではなかろうかというアイデアに到達するだろう。実際、電子とミュオンの物質中での相対的なエネルギー損失を比較してみると、エネルギーが 10 MeV を超えるあたりで、ミュオンの透過能が電子のそれを上回ることが分かる（図2 参照）。これが透過ミュオン顕微鏡の基本的な考え方である。本稿では、大強度陽子加速器施設（J-PARC）で開発中の透過ミュオン顕微鏡について、その原理と構成方法並びに現状を解説する。

2 透過ミュオン顕微鏡に必要な条件

ミュオンを用いて透過顕微鏡を構成するには、

- 1) 5 MeV 以上のエネルギー、
- 2) 高い平行度と収束性の良さを示す「低エミッタンス性」、
- 3) エネルギーのばらつきの少なさを示す「単色性」、更には
- 4) 実用的な時間での撮影を可能とする強度を備えたミュオンのビームが必要となり、
- 5) 高磁場・高磁場勾配のレンズ

が必要となる。1)は超高压 TEM の透過能を透過ミュオン顕微鏡がしのぐ条件、2)は分解能を高めるこ

とと、位相コントラストを得るために必要となり、3)は磁場レンズの焦点距離がエネルギーにより異なる色収差の影響を低減し分解能を高めるために必要となる。また、電子より 200 倍重くより高いエネルギーのミュオンビームを収束させ結像させるには、TEM で用いられる磁場レンズの強度を大幅に超える高磁場・高磁場勾配のレンズが必要となる。

3 ミュオン源

J-PARC では、エネルギー 3 GeV、平均出力 1 MW（設計値）、パルス周期 25 Hz、の陽子ビームを炭素ターゲットに照射し、その一部が核反応を起こし正及び負電荷のパイ中間子を生成し、寿命 26 n 秒の正負パイ中間子の崩壊により正負のミュオンを生成している。炭素ターゲットから飛び出た正負のパイ中間子を磁場で捕獲し、磁場中での飛行中に崩壊により正負のミュオンへと変換するものが「崩壊ミュオン」であり、100 keV 未満から 55 MeV と高いエネルギーまで広く分布する一方、正のパイ中間子が炭素ターゲット中で停止し静止状態のパイ中間子の崩壊から得られるのが「低速ミュオン（表面ミュオン）」であり、そのエネルギーは約 4 MeV と低く、エネルギー幅は 10 % 以下程度と揃った状態で得られる。

透過ミュオン顕微鏡に用いるビームの第 1 段階としては低速ミュオンが用いられるが、そのままではエミッタンスもエネルギー幅も大き過ぎる。エミッタンスやエネルギー幅を縮小し、より高品質なビームに変換するには「ビーム冷却」が必要である。

ビーム冷却は、図3に示すように、(1) 粒子ビームをできるだけ収束し、(2) 物質中で静止させ、(3)

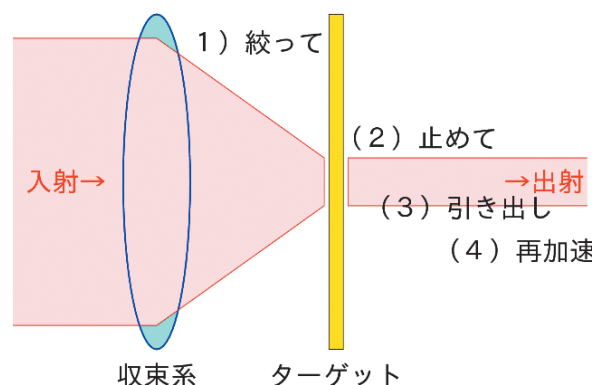


図3 ビーム冷却の原理

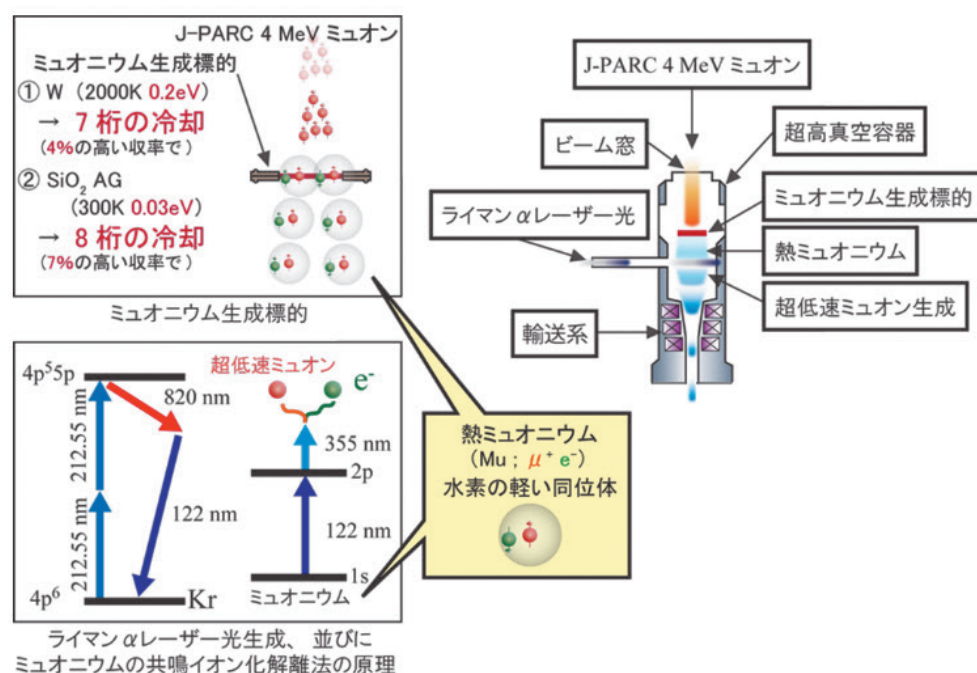


図4 超低速ミュオンの発生原理

再び粒子として取り出し、(4) 再加速することにより達せられる。ビームを収束するだけではエミッタンスは縮小されないが、一旦停止により横方向及び縦方向の運動量分布がターゲットの温度スケールまでリセットされ、ビームとして取り出せばエミッタンスが縮小される。このプロセスを繰り返し、よりエミッタンスを縮小することもできる。

正ミュオンを物質中に静止させ取り出そうとするとき、正ミュオンが電子と結合した中性の熱ミュオニウムとしてしか取り出せず、裸のミュオンとしては取り出せない。ミュオニウムは中性の水素原子の同位体とも呼べる存在であり、ミュオニウムにライマン α 波長122 nmの光パルスを照射し、ミュオニウムの基底状態1sから2p状態に励起させ、更に355 nmの光パルスの照射により電子を剥ぎ取ることができる。このミュオニウムの光共鳴解離法により、(3)のステップを実行できる。この原理で得られる正ミュオンビームは「超低速ミュオン」と呼ばれる。ターゲットとしては、2,000 Kに加熱したタンゲステン膜や、室温のシリカエアロジェルが用いられる。入射した4 MeVの表面ミュオンは、タンゲステンの使用ではエネルギー分散 $\Delta E = 0.2$ eVまで、シリカエアロジェルの使用では $\Delta E = 0.03$ eVまで冷却される。現在の実装は単段のビーム冷却装置で

あり、エミッタンスは $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ のオーダーまで冷却される。将来的には多段化により $\mu\text{m} \cdot \text{mrad}$ のオーダーまで冷却することを計画しており、分解能がnm台まで高まると共に、ゼルニケ位相差法等の導入により、ミュオン位相差像の取得、厚い試料内部での電磁場のイメージング等が可能となる。

4 ミュオン再加速

ミュオンの透過能力が電子をしのぐには5 MeV以上に加速する必要がある。ミュオンの寿命 $2.2 \mu\text{s}$ よりも速やかに加速しないと、加速途中に大半のミュオンが崩壊し利用できない。また、対物レンズの色収差の影響を抑えるため、エネルギー分散を $\Delta E/E = 10^{-5}$ 程度に抑えたまま加速する必要もある。

これらの要求を満たす加速手法として、多数のRF加速空洞を直線的に並べる線形加速器が可能であるが、高コストで大きな装置となる。リング加速器は、ビームを周回させ同一の加速空洞を複数回使用し、コストパフォーマンスを高めたものである。各種のリング加速器を検討した結果、サイクロトロンを採用するに至った。サイクロトロンは磁石の中に加速RF空洞が埋め込まれ、周回させながら同時に加速もする構成となっており、加速に寄与しない

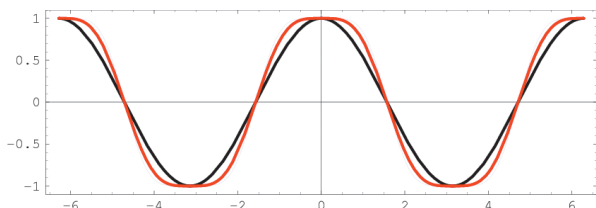


図5 フラットトップ加速

基本波（黒線）に3倍波を加えると頂点が平坦化され、入射パルスに対するエネルギー変動が小さくなる

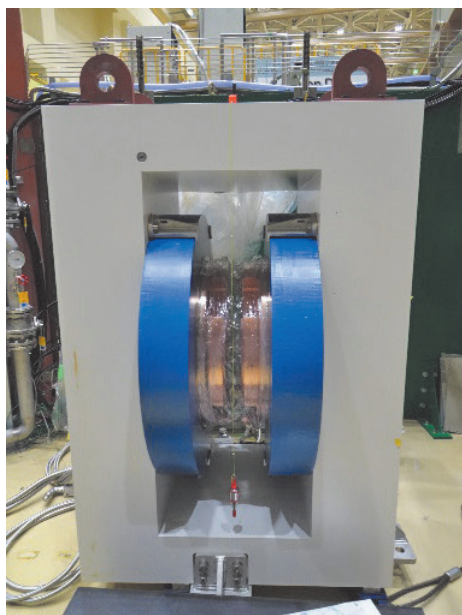


図6 ミュオンサイクロトロン電磁石

経路の最短化が図られ、結果として 1μ 秒未満で5 MeV まで加速できる。

また、エネルギー分散を下げるための「フラットトップRF加速」を採用した。正弦波の合成として、基本波 $\cos\omega t$ に適切な振幅で3倍波 $\cos 3\omega t$ を重畳させると、基本波の頂点部分が平坦化（フラットトップ化）される。これをRF加速に適用し、頂点付近への有限の時間幅のパルス入射に対してエネルギー分散の拡大を抑えることが可能となる（図5）。

ミュオンサイクロトロンは、住友重機械工業(株)の陽子サイクロトロンHM-10をベースとし、理研の大西氏、後藤氏、KEKの安達氏、山崎氏の協力を得て設計し、住友重機械工業が製作を担当している。本稿の執筆時点においてミュオンサイクロトロン主要部となる電磁石（図6）が完成している。本ミュオンサイクロトロンは4つのセクタ型の磁極を用いてビームを収束させつつ加速するAVF型であり、セクタ磁極の間にある4か所の間隙部のうち

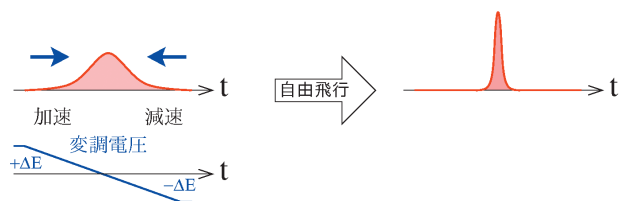


図7 パルス圧縮の原理

2か所に基本波RF加速空洞のDee電極を備え、1か所にフラットトップ加速のための3倍波用のDee電極を備えている。主な仕様は、磁場強度は平均0.4 T、サイクロトロン振動数は54 MHz、基本波RFは周波数108 MHz 入力12 kW、3倍波RFは周波数324 MHz 入力400 Wである。ミュオンサイクロトロンは写真（図6）にあるように縦に設置し、サイクロトロン中心に横から入射し、インフレクタと呼ばれるサイクロトロン磁場中で動作する螺旋形状の静電偏向器を用いてミュオンサイクロトロン内の軌道へと乗せる方式となっている。

5 パルス圧縮

本ミュオンサイクロトロンでエネルギー分散 $\Delta E/E=10^{-5}$ を達成するには、入射ミュオンパルスの時間幅として $\Delta t=200$ p秒以下が要求される。ミュオニウムのレーザー再分離法で得られる超低速ミュオンのパルス時間幅は数n秒ほどがあり、長すぎる問題がある。

この解決のため、超低速ミュオンの電位による引出しをパルス的にを行い、「位相空間回転」の手法により、時間パルス幅を圧縮する手法の採用する（図7）。これは、より早い粒子ほどより低いエネルギーで、より遅い粒子ほどより高いエネルギーで取り出し、自由飛行により早い粒子に遅い粒子を追い付かせ、パルス幅を圧縮するものである。

6 結像レンズ系

高いエネルギーに加速したミュオンは物質透過能が高いと同時に、磁場に対して曲がりにくい。数cm程度の焦点距離をもつレンズを構成するには、起磁力500 kATといった強力な磁場レンズが必要となる。これは超高压TEMの対物レンズより1桁以上大きな値であり、通常の銅コイルで作成するとそ

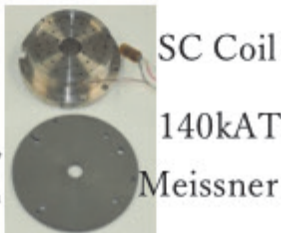
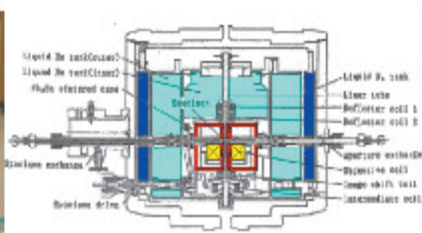


図8 超伝導対物レンズ

(左) 外観, (中) 断面構造⁶⁾ と (右) 超伝導コイルとマイスナーシールド板

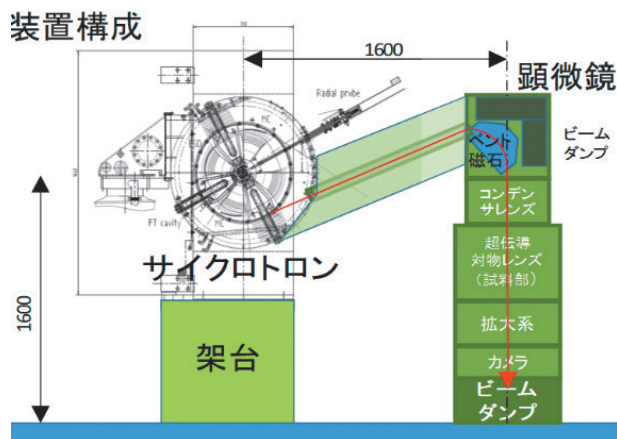


図9 ミュオンサイクロトロンと顕微鏡本体の構成

の発熱は約 50 kW にも達し、安定した冷却が難しくなる。また、ポールピースの磁気飽和によりビーム収束に使える収束磁場の強度は 2.5 T が限度となり、レンズの焦点距離を短くできない問題等も生じる。このため、透過ミュオン顕微鏡には、従来型の対物レンズに代え、超伝導対物レンズを採用する必要がある。

これまでに電子顕微鏡用途として数種類の超伝導対物レンズが開発されてきたが、1980 年代に Dietrich が開発したマイスナーシールド型^{5,6)}が、分解能と安定性において優れた成果を残している。これは、磁気ヨークやポールピースを使用せず、超伝導体が磁場を遮蔽するマイスナー効果を磁場のガイドとして利用する方法で、超伝導コイルをマイスナーシールドの内部に収め、マイスナーシールドのスリットから出る収束磁場を用いて、強い磁場と磁場勾配を得て、短い焦点距離を実現するものである。強いレンズ効果が得られると同時に、ヘリウム温度で永久電流動作することから、極めて安定性の高い装置となっており、採用した TEM の原子格子像のドリフトが毎秒 2 pm しなかったとの報告もされている⁶⁾。この技術は 1990 年代に日本電子(株)に技

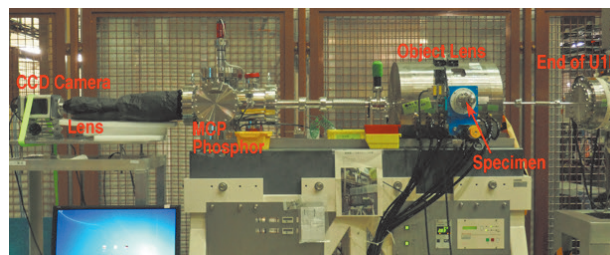


図10 透過ミュオン顕微鏡プロトタイプ

薄膜結晶試料の回折像の取得を試みている

術移転され、更に日本電子(株)と岩槻正志氏の御厚意により、KEK に技術移転された(図8)。この超伝導対物レンズの改造により、5 MeV 加速のミュオンビームを結像可能な装置を開発している。

これらの装置を組み合わせ、J-PARC の物質生命科学施設(MLF)の超低速ミュオンのビームラインである U ラインにおいて、透過ミュオン顕微鏡を開発している。

7 プロトタイプ実験装置

現在、U ラインでは、透過ミュオン顕微鏡のプロトタイプ実験装置(図10)を用い、30 keV の超低速ミュオンビームをそのまま常伝導の対物レンズに投入し、結晶薄膜の回折像の取得を試みている。このときミュオンの波長は 0.49 pm であり、例えばグラフェン格子の回折角は 2 mrad 程度となり、1 m のカメラ長で検出できる程度となる。エネルギーの低いミュオンは物質との相互作用が強く、電子よりも物質透過性が小さい。このため単層グラフェン等の最も薄い試料で実験を進めている。ミュオンの 2 次元像の取得はマルチ・チャンネル・プレート(MCP)と蛍光板の組合せを用い、蛍光板上の像を CCD カメラで観察する手法を取っており、実際に超低速ミュオンの像が取得できている。この実験は、ミュオンの波動性を回折パターンの取得により直接

証明しようとするものであり、標準模型の第1世代を超える粒子の波動性の最初の直接証明実験と位置付けられる。

8 今後の展望

本稿では開発中の5 MeV透過ミュオン顕微鏡の目的や現状を報告した。当初は超高圧TEMの透過能を大幅にしのぐ10 MeV加速の装置の開発を目指したが、科研費での実施という予算上の制約から5 MeV加速の装置を開発している。将来的には、MLFのHライン新建屋に、ミュオンg-2/EDM実験と併設する形で、100 MeV加速の透過ミュオン顕微鏡、更には走査負ミュオン顕微鏡と走査正ミュオン顕微鏡も併設したミュオン顕微鏡ステーション施設の建設も計画している。多段冷却の導入により、サブmm厚さの試料のnm分解能観察、ミュオン位相差法による試料内部の電磁場分布の可視化等を目指しており、例えば神経細胞に刺激を与えた直後に急速凍結し、位相差クライオ観察による電磁場マップの作製や、動作中の電池内部の高分解能観察等、様々な分野での利用が期待される。

謝辞

本研究は、KEKの山崎高幸氏、安達利一氏、足立泰平氏、Patrick Strasser氏、神田聡太郎氏、池戸

豊氏、湯浅貴裕氏、大石裕氏、的場史朗氏、Dey Sourav Kumar氏、Pant Amba Datt氏、吉田光宏氏、理化学研究所の後藤彰氏、大西純一氏との共同研究として進められています。ミュオンサイクロトロンを導入では理研・KEKの永宮正治氏よりご助力をいただきました。ミュオンサイクロトロンの3倍波加速空洞の導入では、住友重機械工業(株)の熊田幸生氏の発明による特許の使用許諾をいただきました。超伝導対物レンズの技術導入では、日本電子(株)の岩槻正志氏、福島球琳男氏の協力を得ました。また、日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(S)「高輝度ミュオンマイクロビームによる透過型ミュオン顕微鏡イメージング」の支援を受けています。ここに感謝の意を表明いたします。

参考文献

- 1) Nagamine, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A 356**, 585–595.
- 2) Fujii, *et al.*, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 043C02 (2020)
- 3) Morishima, *et al.*, *Nature*, **552**, 386–390 (2017)
- 4) Groom, D.E., *et al.*, *At. Data Nucl. Data Tables*, **78**, 183–356 (2001)
- 5) Dietrich, *et al.*, *Cryogenics*, **691** (1975)
- 6) 岩槻正志, 原田嘉晏, 電子顕微鏡, Vol.21 **3**, 174–180 (1987)

(高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所)