



JAEA-Testing

2020-010

DOI:10.11484/jaea-testing-2020-010

**東濃地科学センターにおける鉍物試料の
(U-Th)/He 年代測定 (He 測定編)
(受託研究)**

(U-Th)/He Dating Analysis at Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency:
Determination of He Contents
(Contract Research)

菅野 瑞穂 末岡 茂 福田 将真

Mizuho KANNO, Shigeru SUEOKA and Shoma FUKUDA

核燃料・バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター
地層科学研究部

Geoscientific Research Department
Tono Geoscience Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste management Technology Development

March 2021

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Testing

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

東濃地科学センターにおける鉱物試料の(U-Th)/He 年代測定 (He 測定編)
(受託研究)

日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部

菅野 瑞穂※、末岡 茂、福田 将真

(2020 年 12 月 23 日受理)

本書は、日本原子力研究開発機構東濃地科学センターで行う(U-Th)/He 年代測定法の分析のうち、He 測定に係る手順について取りまとめたものである。(U-Th)/He 年代測定法は U、Th 系列の放射性同位体の α 壊変を利用した放射性年代測定法で、熱年代測定に利用可能な測定法である。中でもジルコン、アパタイトを用いることで、低温領域の熱履歴を推定することが出来る。本書では試料調製の作業は役務作業員や学生実習生など、本作業を初めて行う者や経験に乏しい者が実施する場合があることから、作業手順や注意すべき点などを詳しく記載した。また、作業中に利用できる記録用紙のフォーマットを含めた。

**(U-Th)/He Dating Analysis at Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency:
Determination of He Contents
(Contract Research)**

Mizuho KANNO*, Shigeru SUEOKA and Shoma FUKUDA

Geoscientific Research Department, Tono Geoscience Center
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Izumi-cho, Toki-shi, Gifu-ken

(Received December 23, 2020)

This report provides procedures of He measurement for (U-Th)/He dating at Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency. (U-Th)/He method is a radiometric dating based on alpha decay of U and Th series isotopes, being utilized as a thermochronometer. (U-Th)/He thermochronometries on zircon and apatite are especially useful to estimate thermal history at low temperatures. The procedures are presented with the details, tips, and cautions because parts of the procedures can be carried out by beginners, including students and contractors. This report also includes some document formats helpful for conducting the procedures.

Keyword: (U-Th)/He Dating

※ Collaborating Engineer

目次

1. はじめに	1
2. 試料の前処理	3
2.1 岩石の粉砕	3
2.2 篩分と洗浄	5
2.3 重液分離	6
2.4 試料の選別と封入	8
3. He 質量分析	12
3.1 各部名称	12
3.2 装置の起動	19
3.3 装置の停止	23
3.4 試料の交換	23
3.4.1 試料の設置	24
3.4.2 真空引き	27
3.5 試料の測定	27
3.5.1 ステージ合わせ	27
3.5.2 レーザーの確認	28
3.5.3 測定項目の設定 標準ガスの場合	28
3.5.4 測定項目の設定 測定試料の場合	29
3.5.5 測定前の最終チェック項目	30
3.6 データの確認	30
3.6.1 データの取得	30
3.6.2 再測定	31
4. データ解析	33
4.1 補正	33
謝辞	35
参考文献	35
付録 記録用紙	37

Contents

1. Introduction	1
2. Sample preparation	3
2.1 Rock crushing.....	3
2.2 Sieving and cleaning.....	5
2.3 Mineral separation by heavy liquids.....	6
2.4 Hand-picking and packet enclosing	8
3. He mass spectrometer	12
3.1 Names of parts	12
3.2 Start operation	19
3.3 Stop operation	23
3.4 Sample installation.....	23
3.4.1 Sample exchange.....	24
3.4.2 Evacuation.....	27
3.5 He gas measurement	27
3.5.1 Reconfigure X-Y driver.....	27
3.5.2 Configure laser	28
3.5.3 Setup for standard gas.....	28
3.5.4 Setup for unknowns	29
3.5.5 Final confirmation before measurement.....	30
3.6 Data check.....	30
3.6.1 Data acquisition	30
3.6.2 Reanalysis.....	31
4. Analysis.....	33
4.1 Data correction.....	33
Acknowledgements.....	35
References	35
Appendix: Data sheet.....	37

1. はじめに

本報告書は、東濃地科学センターで実施している(U-Th)/He 年代測定法（以下 He 法）の分析のうち、He 測定に係る手順について取りまとめたものである。国内における年代測定の研究開発拠点である東濃地科学センターでは、地層処分に係る地質環境の長期安定性の評価における年代測定の技術開発を推進している。地質環境の長期安定性の評価では、火山・火成活動、深部流体の移動・流入、地震・断層活動、隆起・侵食といった自然現象について、数万年を超える長期的な影響の把握が求められる¹⁾。これらの現象が発生する頻度や速度などの推定には、年代測定技術に基づく評価が不可欠である。

He 法は主に U、Th 系列の放射性同位体の α 壊変を利用した放射性年代測定法である²⁾。 α 壊変系列で生じる α 粒子 (^4He の原子核) は、大気中にほぼ存在せず、壊変による生成速度も速いため、高精度の年代測定が可能である。アパタイトやジルコンのようなウランを含む鉱物中の ^4He は、主に ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th の壊変によって生じたものとみなせる。したがって、これらの同位体が定量できれば、以下の式を用いて、岩石や堆積物などの地質試料の年代値 t が測定できる：

$$^4\text{He} = 8^{238}\text{U}(e^{\lambda_{238}t} - 1) + 7(^{238}\text{U}/137.88)(e^{\lambda_{235}t} - 1) + 6^{232}\text{Th}(e^{\lambda_{232}t} - 1)$$

ただし、 $\lambda_{238} = 1.551 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ 、 $\lambda_{235} = 9.849 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ 、 $\lambda_{232} = 4.948 \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$ である。なお、アパタイトは Sm 濃度が相対的に高いため、この 3 つに加えて ^{147}Sm の寄与を考慮した(U-Th-Sm)/He 年代として算出するが、本稿では一括して(U-Th)/He 年代と表記する。

He 法の最大の特徴は、きわめて閉鎖温度³⁾が低い（すなわち温度変化に敏感な）熱年代学的手法として利用できることである。ある種の放射性年代測定法では、閉鎖温度と呼ばれるある温度を超えると、拡散により娘核種が試料から散逸する。したがって、試料が熱を受けて閉鎖温度を超えると、年代が見かけ上リセットされるという現象が起こる。これを利用して、熱年代学では、試料が過去に経験した温度-時間変化（熱履歴）や加熱イベントの時期などを推定する。閉鎖温度の値は熱年代測定法と鉱物の組み合わせに固有であるが、He 法の場合、娘核種の ^4He は軽い気体であるため、比較的低温でも容易に拡散・散逸が起こる。閉鎖温度は加熱時間にも依存するが、地質学で扱う数百万～数千万年の時間スケールでは、一般的な鉱物粒子の条件（結晶形状、化学組成、放射線損傷）を仮定すると、アパタイトで $55 \sim 80^\circ\text{C}$ ⁴⁾、ジルコンで $160 \sim 200^\circ\text{C}$ ⁵⁾ である。そのため、地殻浅部の比較的低温の領域で発生する地質イベント（山地の隆起・侵食、断層活動）の解明に用いられている⁶⁾⁷⁾。

(U-Th)/He 年代測定は、以下の手順で行われる：試料の前処理、鉱物粒子の選別、He 濃度測定、U・Th の濃度測定。本報告書では、このうち東濃地科学センターにおいてルーチン測定が実施されている He 濃度測定までの手順を示す。U・Th 濃度の測定は、海外では一般に U、Th のスパイクを用いた同位体希釈法⁸⁾が用いられるが、国内では法令上の理由でスパイクの使用が困難なこともあり、東濃地科学センターでは分析手順が未確立である⁹⁾¹⁰⁾。これらの測定に関しては、手順確立後に稿を改めて紹介する予定である。まず、試料の前処理では、岩石試料の粉碎、篩分、重液分離によるアパタイトとジルコンの抽出手順を示す。鉱物粒子の選別では、測定に適した鉱物粒子の選定基準や、 F_T 校正¹¹⁾¹²⁾と呼ばれる補正に必要なパラメータの測定方法、パケットへの封入手順などを紹介する。 F_T 校正とは、 α 壊変の際に結晶外に放出される α 粒子の割合の補正である。 α 壊変時のエネルギーにより、 α 粒子は結晶内を約 $20 \mu\text{m}$ 移動することが知られている¹¹⁾。したがって、結晶表面から約 $20 \mu\text{m}$ の領域では一定の割合で α 粒子が失われるため、

結晶の幾何学的形状を測定してこれを補正する。この測定は、パケットの封入前に、撮影した鉍物の写真から計算する。最後に、He の測定は、レーザー加熱によるガス抽出装置と四重極型質量分析計を搭載した専用の装置 (Australian Scientific Instruments 社製 Alphachron) を用いた方法を紹介する。 ^4He の定量は、 ^3He のスパイクを用いた同位体希釈法により実施する。未知試料の測定のほか、ブランク測定、標準ヘリウムガス測定を含めた一連のシーケンスや、データ処理方法、スパイクの減衰曲線の較正方法などについても示す。

2. 試料の前処理

本章では試料を He 質量分析装置にかけるまでに必要な前処理について述べる。He 質量分析では対象となる鉱物の単粒子にレーザーを照射して He を抽出するため、まず対象鉱物を単離する必要がある。対象鉱物としてもっとも広く使用されているのは、ジルコンとアパタイトである。いずれも重鉱物のため、比重の違いを利用した重液分離が有効となる。岩石試料であれば粉碎してから洗浄し、未固結試料であればそのまま洗浄して、篩で粒径を整えてから重液分離を行い、目的の重鉱物を濃集する。その後、双眼実体顕微鏡下で観察を行い、適した鉱物を選別し、粒子の写真撮影を行った後に、金属ポケットに 1 粒ずつ封入する。以下、これらの手順について詳細を述べる。

2.1 岩石の粉碎

本節では岩石試料の粉碎方法について述べる。試料が未固結の場合、本節は省略して 2.2 節から開始してよい。岩石試料の粉碎に用いる器具は、表 2.1.1 の通りである。これらを用いて、岩石を段階的に細かく砕いていく。最終的に粒径が 60 μm 以上 250 μm 以下程度の大きさを目指す。岩石に含まれるジルコンとアパタイトの量により、用意する岩石試料の量は変化するため、事前に一部を薄片にして顕微鏡で観察し、どの程度の岩石を粉碎すべきか見積もっておくと良い。

表 2.1.1 岩石の粉碎の使用器具

品名	数量	備考
岩石ハンマー	1 本	岩石の粉碎
スレッジハンマー	1 本	岩石の粉碎
プラスチックシート	1 枚	騒音の軽減
ゴムマット	1 枚	騒音の軽減
ポリ袋	2 枚以上	厚手のもの
ホーロー製バット	試料数分	岩石試料の運搬
メンディングテープ	適量	ポリ袋の開閉
乳鉢・乳棒	1 セット	鉄製（ステンレス製でも可）
スタンプミル	1 台	岩石の微粉碎
チャック付きポリ袋	試料数分	試料の保管
油性ペン	1 本	試料の情報の記載
新聞紙	1 日分	不要試料の保護
土嚢袋	1 枚	不要試料の運搬・保管
天秤	1 台	試料の計量
ダイヤモンドカッター	1 台	岩石の切断

- (1) 岩石はまず長径が 5 cm 程度になるようにハンマーで砕く。砕く際に飛び散ることがあるため、岩石はあらかじめ二重にしたポリ袋に入れメンディングテープで封をし、岩石の下にプラスチックシートあるいはゴムマットを敷いて騒音を軽減する（図 2.1.1）。砕いた岩石はホーロー製バットに載せて運搬する。岩石があまりに大きい場合は、重量のあるスレッジハンマーである程度の大きさまで砕くと良い。あるいは、ダイヤモンドカッターで切断すると良い。
岩石をハンマーで砕く際は、安全対策として軍手と安全眼鏡を着用し、襟付きの服あるいは首元をタオルで覆うなどする。飛び散った岩石は鋭利であり、目や首が負傷することを防ぐためである。
- (2) 鉄乳鉢で長径 1 cm 程度になるまで粗粉碎する。
- (3) スタンプミルで微粉碎する（図 2.1.2）。ジルコンとアパタイトはどちらもガラス様の割れやすい鉱物なので、スタンプミルを長時間使う場合は必要以上に細かくしないように時折試料の様子を確認する。粉碎した試料はチャック付きポリ袋に入れ、油性ペンで試料名を記載し、天秤で必要分を計量する。
- (4) 不要な試料は、粉碎前の岩石であれば新聞紙で包み土嚢袋に入れて保管する。粉碎後の試料であればチャック付きポリ袋に入れ、試料名を記載して保管する。

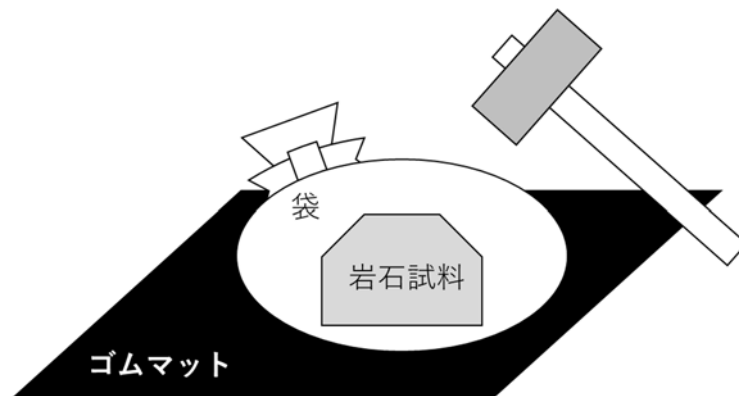


図 2.1.1 岩石の粉碎



図 2.1.2 スタンプミル

2.2 篩分と洗浄

He 質量分析ではジルコンとアパタイトに適したサイズと形状があるため、それ以外の大きさの粒子についてはあらかじめ篩を使って大まかに除外する。使用する器具は表 2.2.1、篩分作業の概要は図 2.2.1 の通りである。ジルコンは正方晶系、アパタイトは六方晶系のいずれも長細い形状の結晶であるため、適当なサイズ以上の鉱物が篩の網目をすり抜けるときがある。厳密な選別はピッキングの際に行うので、この時点での選別はある程度でよい。メッシュクロースを使う場合は篩に合わせた大きさに切り、たるみがなく強く張った状態で篩にセットする。メッシュクロースを篩にセットする前に養生テープで篩に固定するとセットしやすい。

表 2.2.1 篩分と洗浄の使用器具

品名	数量	備考
篩受け器	2 個	試料の篩分
目開き 2.00 mm 篩	1 個	試料の篩分
目開き 250 μm 篩	1 個	試料の篩分
目開き 60 μm 篩	1 個	試料の篩分
500 ml ビーカー	試料数	試料の洗浄
薬さじ	試料数	試料の洗浄
ホーロー製バット	2 枚	試料の乾燥
チャック付きポリ袋	試料数×3 枚	試料の保管
油性ペン	1 本	試料の記載
エアダスター	1 本	篩の洗浄
篩目詰まり除去ブラシ	1 本	篩の洗浄
天秤	1 台	試料の計量
乾燥器	2 台	篩の洗浄

- (1) 粉碎した試料は始めに 2 mm のステンレス篩を通して、通過した試料はバットに受ける。細かい網目の篩に大きく重量のある粒子が接触すると、そこから網目が広がるおそれがあるため、あらかじめ細礫以上の大きさの粒子を除外する。通過しなかった試料は保管する。篩は試料ごとにエアダスターや篩目詰まり除去ブラシを用いて十分に洗浄する。
- (2) 250 μm の篩を通し、通過した試料はバットに受ける。通過しなかった試料は保管する。
- (3) 60 μm の篩を通し、通過した試料はバットに受ける。通過しなかった試料が目的とするサイズの試料である。チャック袋などに入れて保管し、試料名とサイズを記入する。通過した試料は廃棄して良い。
- (4) 選別した試料を水洗する。500 ml ビーカーに 2 cm 程度の厚みになるように試料を入れて、水道水をビーカーの八分目以下になるように入れて、薬さじで攪拌する。攪拌後、懸濁した上澄みを捨て、再度水道水を入れて攪拌する。これを上澄みが懸濁しなくなるまで繰り返す。洗浄後、ホーロー製バットなどに試料を入れ、十分に乾燥させる。乾燥した試料は天秤で計量後にチャック袋などに入れ、油性ペンで試料名とサイズを記入して保管する。

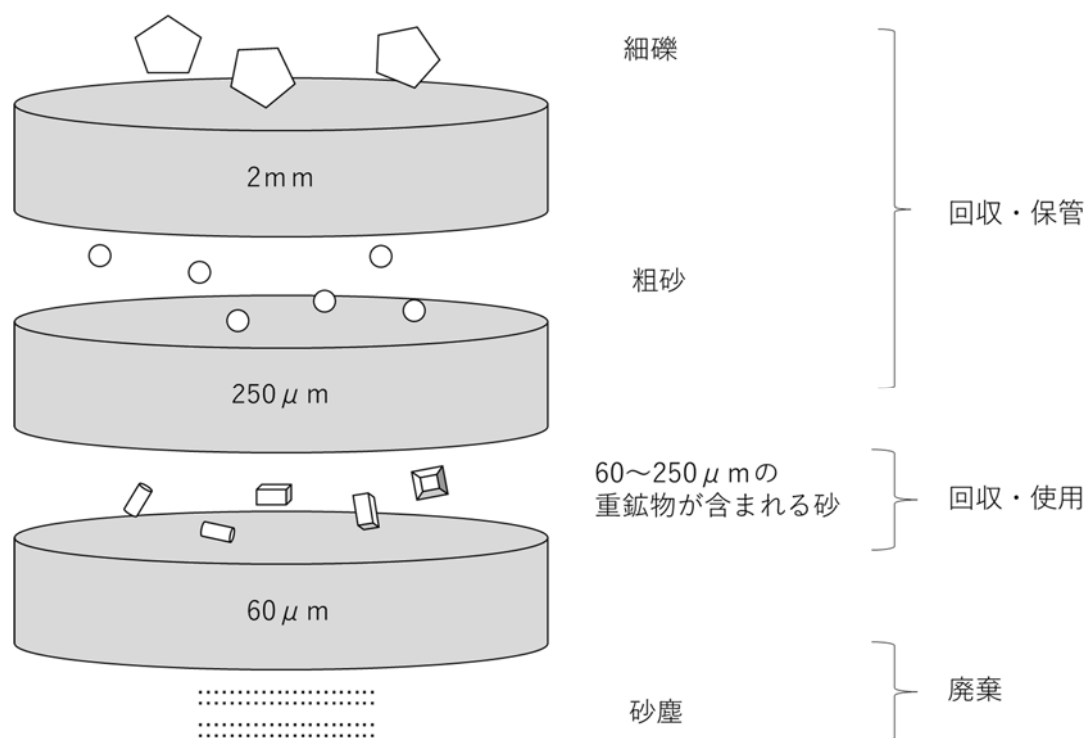


図 2.2.1 篩分の概念図

2.3 重液分離

ジルコン（比重： $4.6 \sim 4.7 \text{ g/cm}^3$ ）とアパタイト（比重： $3.16 \sim 3.22 \text{ g/cm}^3$ ）はいずれも重鉱物のため、比重 2.80 g/cm^3 以上の重液を用いて軽鉱物と分離する。使用器具は表 2.3.1 の通りで、東濃地科学センターでは重液にはポリタングステン酸ナトリウム（以下 SPT）を用いる¹³⁾。SPT は水溶性を持つ無機化合物で、無毒・無臭・不燃で、中性であり、ブロモホルムなどの他の重液と比較して安全に使用することが出来る。また、加水する量で比重の調整が容易であり、回収率も高いという利点がある。

表 2.3.1 重液分離の使用器具

品名	数量	備考
ガラスビーカー (100 ml)	2 個 (1 試料あたり)	重液回収・試料洗浄
ガラスビーカー (500 ml)	2 個 (1 試料あたり)	試料洗浄
ガラスビーカー (1000 ml)	2 個	重液回収・重液調製
薬さじ	1 個	試料の投入
ガラス棒	1 個	重液および試料の攪拌 試料の洗浄
メスシリンダー (50 ml)	1 個	重液の比重の調整
比重計	1 個	重液の比重の確認
SPT 粉末	必要量	重液調製
重液 (2.80 g/cm ³)	80ml (1 試料あたり)	重鉍物の分離
分液ロート	1 個 (1 試料あたり)	重鉍物の分離
ろ紙 (5B・110 mm)	2 枚 (1 試料あたり)	重鉍物の回収
ろ紙 (5C・110 mm)	1 枚 (1 試料あたり)	重液回収
ガラスロート	3 個 (1 試料あたり)	試料の投入、重液回収
ロート台	必要数	重液回収
ラップフィルム	必要量	作業台の保護
アスピレーター	1 台	重液回収
スターラー	1 台	重液の攪拌
超音波洗浄機	1 台	気泡の除去、試料の洗浄
超純水入りの洗瓶	1 本	ろ紙・試料の洗浄
薬包紙	試料数×2 枚	試料の保管
チャック付きポリ袋	試料数×2 枚	試料の保管
油性ペン	1 本	試料の記載

- (1) 重液を調製する。1000 ml のガラスビーカーに超純水と必要量の SPT 粉末を攪拌しながら少しずつ溶かして比重を調整する。SPT の量は比重と濃度のグラフ (Measure Works, 20201201¹⁴⁾) から濃度を読み取って計算する。比重は長石 (比重: 2.55~2.76 g/cm³) や石英 (比重: 2.59~2.63g/cm³) を排除できる 2.80 g/cm³ 以上とする。

例として、比重 2.80 g/cm³ の SPT 重液を作成するためには、81%濃度に調製する必要がある。例えば 500 ml の場合は、1134 g の SPT と 266 g の超純水を混ぜる。溶け切るまで時間が掛かるので、スターラーを使うと良い。この場合、気泡が発生して重液が軽くなる恐れ

があるため、十分に溶けた後に超音波洗浄機にかけて気泡を除去する。

- (2) 調製した重液は比重を確認する。SPT 重液を適量 50 ml メスシリンダーに入れ、比重計で比重を確認する。この時、比重計は完全に乾燥したものをを用いる。軽い場合は SPT 粉末を加えて再び溶け切るまで攪拌し、重い場合は超純水を洗瓶で微量ずつ加えて調整する。

SPT 重液はこぼれて乾燥すると白い粉末状になり、掃除に非常に労力を必要とするので、(1)、(2) の操作は作業台にあらかじめラップフィルムを貼るなどして、直接こぼれないような状態で行うと良い。

- (3) 重液分離を行う。ロート台に 100 ml 分液ロートを設置し、その下に 100 ml ガラスビーカーを置く。分液ロートのコックが閉まっていることを確認し、調製した重液を 80 ml ほど注ぐ。分液ロートのコックには使用前にシリコングリースを適量塗布し、動きやすくしておく。
- (4) 分液ロートの口にガラスロートを差し込み、試料を分液ロートに投入する。ガラスロートの先が重液に触れていると途中で試料が詰まるので注意する。100 ml 分液ロートに加える試料の量は薬さじ 2 杯程度が適量である。

試料を投入し終わったら、ガラスロートを抜き取り、ガラス棒を使って攪拌する。この際、試料が分液ロートの内壁に付着しないように注意する。軽鉍物と重鉍物が付着した状態では分離が進まないことがあるので十分に攪拌する。攪拌後、4 時間以上放置する。可能であれば一晩放置するとよい。

- (5) 分離後の重鉍物試料を回収する。ロート台にガラスロートとろ紙 (5B) をセットし、ガラスロートの下に 100 ml ビーカーを置く。100 ml ビーカーには試料名と重鉍物であることを記入する。

沈殿した試料が浮き上がらないように、分液ロートの口をしっかりと押えながらコックを開き、沈殿した重鉍物のみをろ過する。ろ液は再利用するため、別に 1000 ml ビーカーを用意し移し替える。ろ紙上に回収した重鉍物を超純水の入った洗瓶を使って 100 ml ビーカーに移す。

- (6) 分離後の軽鉍物試料を回収する。重鉍物を回収したろ紙とガラスロートを取り外し、新しいろ紙とガラスロートをセットする。ガラスロートの下に 100 ml ビーカーを置き、試料名と軽鉍物であることを記入する。

ろ紙からろ液が溢れないように注意し、ろ過する。ろ液は再利用するため、別に 1000 ml ビーカーを用意し移し替える。ろ紙上に回収した試料は超純水の入った洗瓶を使って 100 ml ビーカーに移す。

- (7) 回収した試料を洗浄する。水道水を 500 ml ビーカーに注ぎ、ガラス棒で攪拌し、また新しい水道水に入れ替える作業を 10 回ほど繰り返す。SPT 溶液が残っていると乾燥後に試料が固結するので、十分に洗浄する。試料が膠着している場合は超音波洗浄機にかける。水道水で十分に洗い流した後、超純水で一度洗浄し、乾燥器で試料を乾燥させる (110℃で 2 時間)。
- (8) 乾燥させた試料はそれぞれを薬包紙で包んでからチャック付きポリ袋に入れ、試料名と重鉍物か軽鉍物かを記入し、保管する。

2.4 試料の選別と封入

He 質量分析に適した鉍物試料は、以下の三つの条件を満たす必要がある²⁾。一つ目は粒子の幅が 60~150 μm であること、二つ目は瑕疵のない自形結晶であること、三つ目はジルコンでは包有物が極めて少なく、アパタイトでは包有物が全く含まれないことである。He 質量分析を行うに

あたり、粒子の体積と表面積の比に基づいて α 壊変時の ^4He の放出量を補正する必要があるが¹¹⁾¹²⁾、一つ目と二つ目の条件はこの誤差を減らすためのものである。適正サイズよりも小さな粒子は年代の信頼性が急激に下がり¹²⁾、逆に大きすぎると He の脱ガスに時間を要し、 $\text{U}\cdot\text{Th}$ 測定の際に完全に溶液化できないなどの困難が生じる。また、各粒子の He 濃度は粒子内で分布が均一と仮定して計算するため、三つ目の条件によりこの仮定を満たさない粒子を除外する。特にアパタイトは U や Th の濃度が低いため、これらの核種を高濃度で含む包有物がわずかでも存在すると、年代値が大幅に過大評価されることとなり、注意が必要である。

選別した試料はそのままでは分析が困難であるため、金属製のポケットに封入する。結晶の溶液化に用いる酸との反応性の問題から、東濃地科学センターでは、ジルコンはニオブ、アパタイトはプラチナのポケットに封入する。封入後にポケットの両端を完全に閉塞させると、ガスや試薬が通過できなくなり後々の分析に差し支えるため、鉱物が零れ落ちない程度の微小な隙間を開ける。以上の選別・封入作業に使用する器具は表 2.4.1 の通りである。

表 2.4.1 試料の選別と封入の使用器具

品名	数量	備考
精密ピンセット	1 本	試料の移動
強力ピンセット	1 本	ポケットの加工
スライドガラス	1 枚	試料の移動・整理
シャーレ	1 個	試料の拾い出し
双眼実体顕微鏡	1 台	試料の拾い出し
透過型偏光顕微鏡	1 台	試料の選別
緩衝材付きスライドガラス	1 枚	ポケットの加工
ニオブポケット	試料数	ジルコン用封入ポケット
プラチナポケット	試料数	アパタイト用封入ポケット
ディスクシャーレ	試料数	封入ポケットの保管
油性ペン（赤・細字）	1 本	ジルコン用筆記用具
油性ペン（黒・細字）	1 本	アパタイト用筆記用具

- (1) 重鉱物の中からジルコンとアパタイトを選別する。重鉱物は様々なものが混在しているが、ジルコンとアパタイトの自形結晶を選ぶ。鉱物は生成される環境により異なる形状となるが、図 2.4.1～2.4.2 のような両錐を保持した自形の結晶を選ぶ。

試料を粒子同士が重ならないようにシャーレに薄く広げる。精密ピンセットを使って、双眼実体顕微鏡下で適当なサイズの自形結晶をピックアップして、別に用意したスライドガラスに並べる。この時、 5×4 の格子状になるように並べる。あるいはスライドガラスに油性ペンなどで格子と番号を記入し、どの粒子が何番か分かるようにする。

- (2) ピッキングした鉱物粒子を乗せたスライドガラスを透過型偏光顕微鏡に移し、包有物と表面の瑕疵を確認する。この際、カメラを起動し、一粒子ずつ写真を撮る。撮影した画像をも

とに、長さと幅を測定する（図 2.4.1～2.4.2 の L1、L2、W1、W2、2R）。

すべての鉱物粒子の写真を撮り終わったら、再び双眼実体顕微鏡下に移し、精密ピンセットで鉱物を長軸回りに 90 度回転させる。アパタイトは 90 度ちょうどの回転は難しいので、二方向から確認して極端に扁平な結晶でないか確認する。鉱物粒子は転がりやすいので、慎重に行う。

再び透過型偏光顕微鏡下に移し、90 度回転させた鉱物の表面の瑕疵や包有物を確認し、写真を撮る。写真を撮り終わったら双眼実体顕微鏡下に戻す。

- (3) 透過型偏光顕微鏡での確認をもとに、ピックアップした鉱物粒子のうち、He 質量分析に適したものを選ぶ。傷があるものと形状が理想的な自形結晶でないものは全て除く。アパタイトは包有物があるものは全て除く。ジルコンは極力包有物がないものを選ぶ。

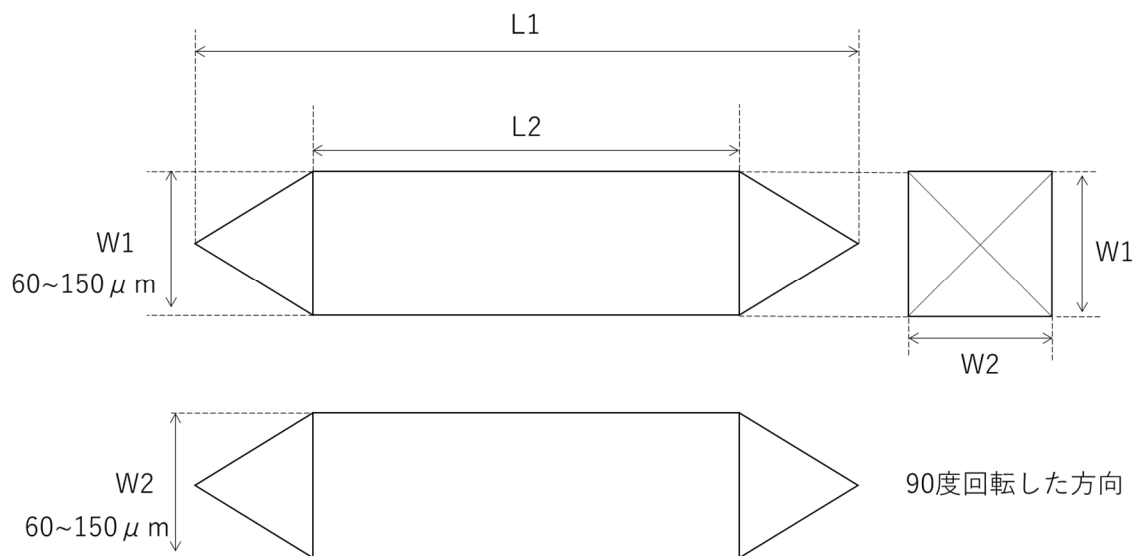


図 2.4.1 ジルコンの自形結晶模式図

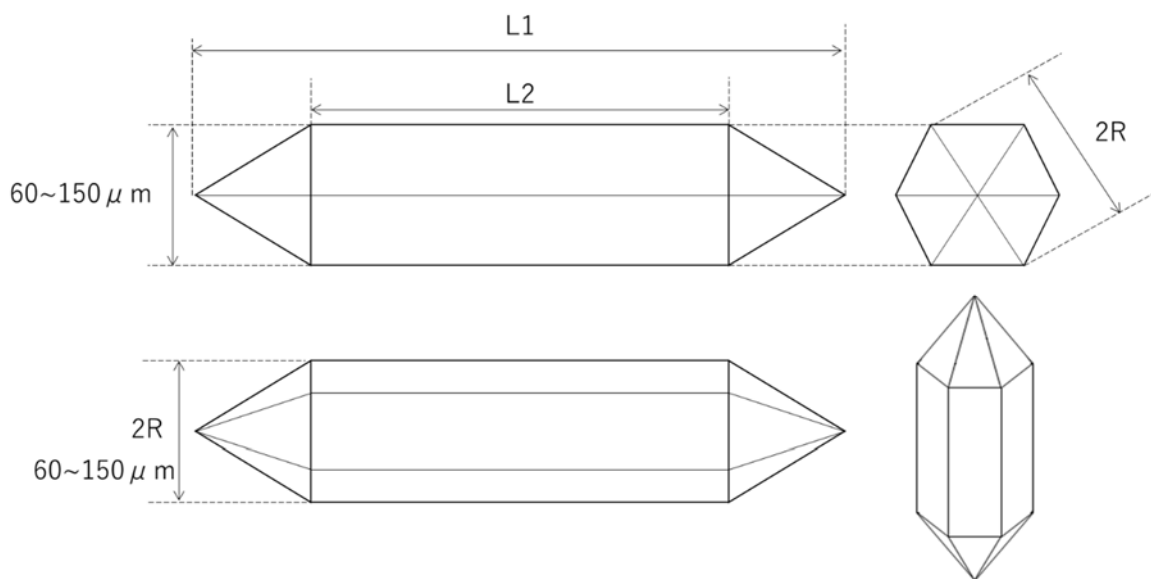


図 2.4.2 アパタイトの自形結晶模式図

- (4) 封入パッケージを準備する。ジルコンの場合はニオブを、アパタイトの場合はプラチナのパッケージを用意する。パッケージは直径 1 mm ほどの円筒状の金属チューブである。

緩衝材付きスライドガラスに必要数のパッケージを取り出し、精密ピンセットを用いて、開口部が上になるように下半分を埋め込む（図 2.4.3）。強力ピンセットを使い、パッケージの上端を閉じる。この時、完全には閉じず、鉱物粒子よりも狭くなるようにごくわずかに隙間を開ける。

この段階で半閉じパッケージを量産して別に保管しておく、他の試料を封入する際に利用することが可能である。

- (5) 上端が閉じたパッケージを精密ピンセットを使ってひっくり返し、開口部が上になるように緩衝材付きスライドガラスに固定する。(3) で選別した鉱物粒子を一粒ずつ精密ピンセットでつまみ、パッケージの中に入れる。このとき、静電気で精密ピンセットやパッケージの端部にくっつく場合があるので、しっかりと中に入ったことを実体顕微鏡下で粒子に焦点を合わせて確認する。

強力ピンセットを使い、パッケージの開口部を閉じる。この時、完全には閉じず、鉱物粒子よりも狭くなるようにごくわずかに隙間を開ける。

- (6) 封入したパッケージをディスポシャーレに移し、試料番号を記入し、密閉して保管する。封入したパッケージはディスポシャーレの蓋と容器の間にはまりやすいので、隙間が出来ないようにしっかりと密閉する。ジルコンを封入したものは赤い油性ペンで、アパタイトを封入したものは黒い油性ペンで記入すると一見してわかり易い。

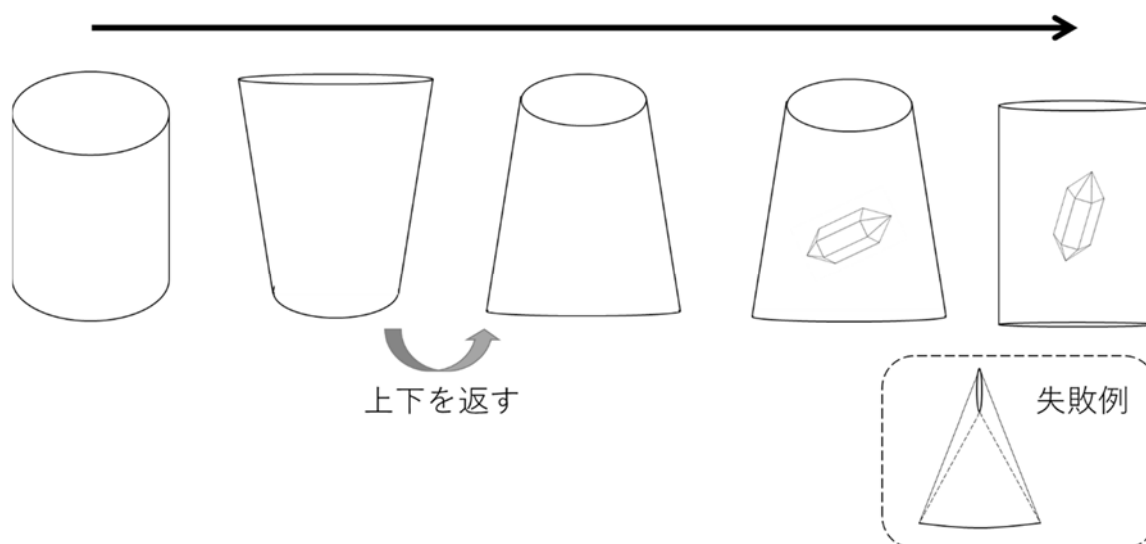


図 2.4.3 パッケージの封入過程の概略図

3. He 質量分析

本章では He 質量分析装置の使い方について述べる。He 質量分析装置は Australian Scientific Instruments 社製 Alphachron を用いる。Alphachron はレーザー加熱により試料から脱ガスした ^4He を、 ^3He スパイクを用いた同位体希釈法により、四重極型質量分析計 (QMS) で定量する装置である。圧縮空気を用いたバルブ操作により、PC 制御による全自動分析が可能という特徴を持つ。

3.1 各部名称

本節では本報告書で用いる Alphachron 装置の各部名称について述べる (図 3.1.1~3.1.6)。



図 3.1.1 Alphachron 装置本体

- ① イオンポンプ : Ion Pump の状態が表示される・制御できる。
- ② ロータリーポンプ : Rotary Pump の状態が表示される。
- ③ ターボポンプ : Turbo Pump の状態が表示される・制御できる。
- ④ バルブコントロール : バルブの状態が表示される。
- ⑤ ゲッターコントロール : Line getter の状態が表示される・制御できる。
- ⑥ 電源パネル : ポンプ等の主電源がある。
- ⑦ ガス精製ライン : マニュアルバルブが操作できる。
- ⑧ 試料室 : 試料ホルダーとレーザー照射ユニットからなる。
- ⑨ レーザースイッチ : レーザーの本体側のスイッチがある。



図 3.1.2 操作パネル (左側)

- ① バルブの現在の状態が表示される。ここではバルブの開け閉めは操作出来ない。2 つの MV (マニュアルバルブ) は手動で、IV (アイソレーションバルブ) はスイッチによる電磁操作で、V1～14 は PC 上からそれぞれ操作できる。

赤 : Close 緑 : Open

- ② イオンポンプ操作パネル。イオンポンプの操作および現在の状態が表示される。
- ③ ロータリーポンプの状態が表示される。ロータリーポンプは操作できない。
- ④ ターボポンプ操作パネル。ターボポンプの操作および現在の状態が表示される。



図 3.1.3 操作パネル（右側）

- ① ラインゲッターの操作パネル。
- ② ディフュージョンセルの状態が確認できる。使用するのは拡散実験の時のみで、通常の He 質量分析時は基本的に起動しない。
- ③ アイソレーションバルブ(IV)のスイッチ。オン（点灯）が Open、オフ（消灯）が Close である。
- ④ バルブコントロールのスイッチ。オン（点灯）状態にすると 3.1.2①が起動する。
- ⑤ その他手動スイッチ。本体起動時および終了時に操作する。
- ⑥ レーザーの本体側のスイッチ。キーを横に倒すと On になる。

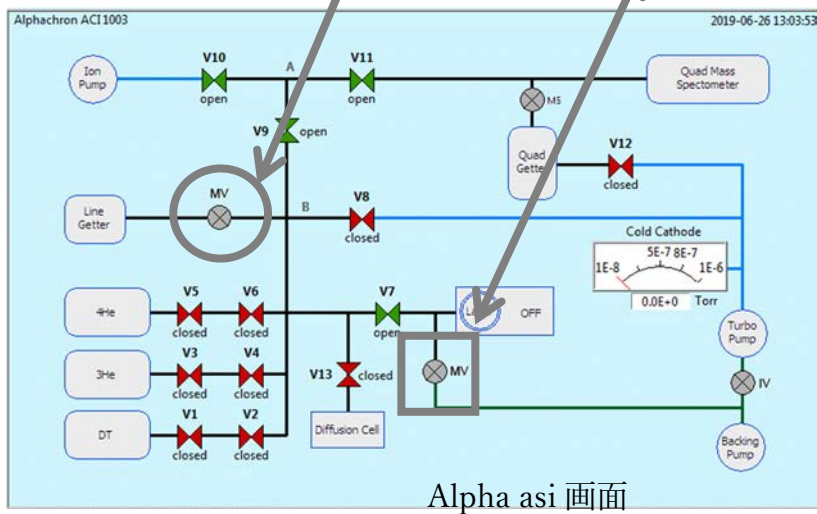
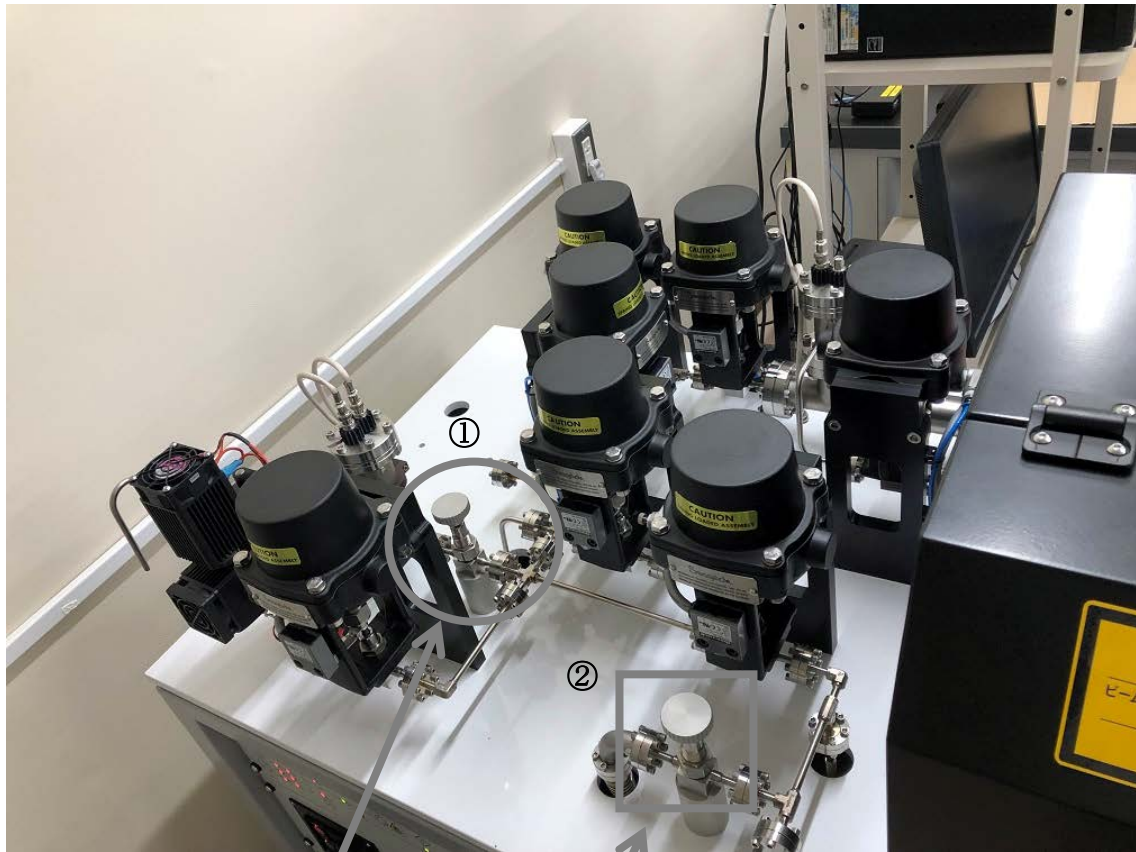


図 3.1.4 マニュアルバルブと Alpha asi 画面との対応

- ① ラインゲッターにつながっているマニュアルバルブ
- ② レーザーチャンバーにつながっているマニュアルバルブ

※Alpha asi 画面上で MV と表記されているのがマニュアルバルブである。

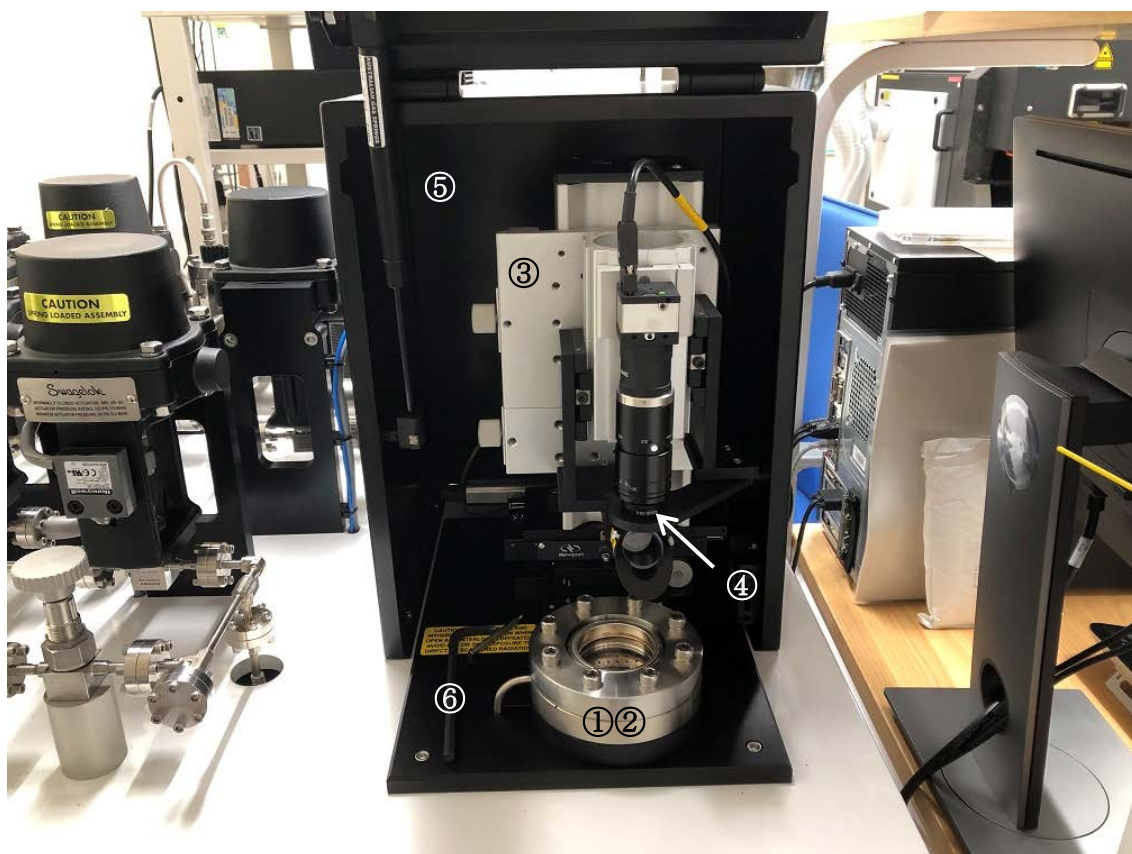


図 3.1.5 試料室内部

- ① 六角ネジで固定される外側。試料蓋と称する。試料皿を固定し、内部を真空中に保つ。サファイアガラス製の窓が付いており、レーザーは透過する。ガラスに傷がつくと透過率が下がるので、傷を付けないように注意して扱う。
- ② 試料蓋を外した内側。試料皿と称する。試料を入れる窪みが 5×5 で 25 穴ある。①②を合わせて試料ホルダーと称する。
- ③ レーザー台。
- ④ フィルター。レーザー台の XY 軸の調整の時はずらす。
- ⑤ 上記をまとめて試料室と称する。
- ⑥ 付属の工具類。六角棒レンチとネジ棒がある。ネジ棒は転がりやすいので注意する。

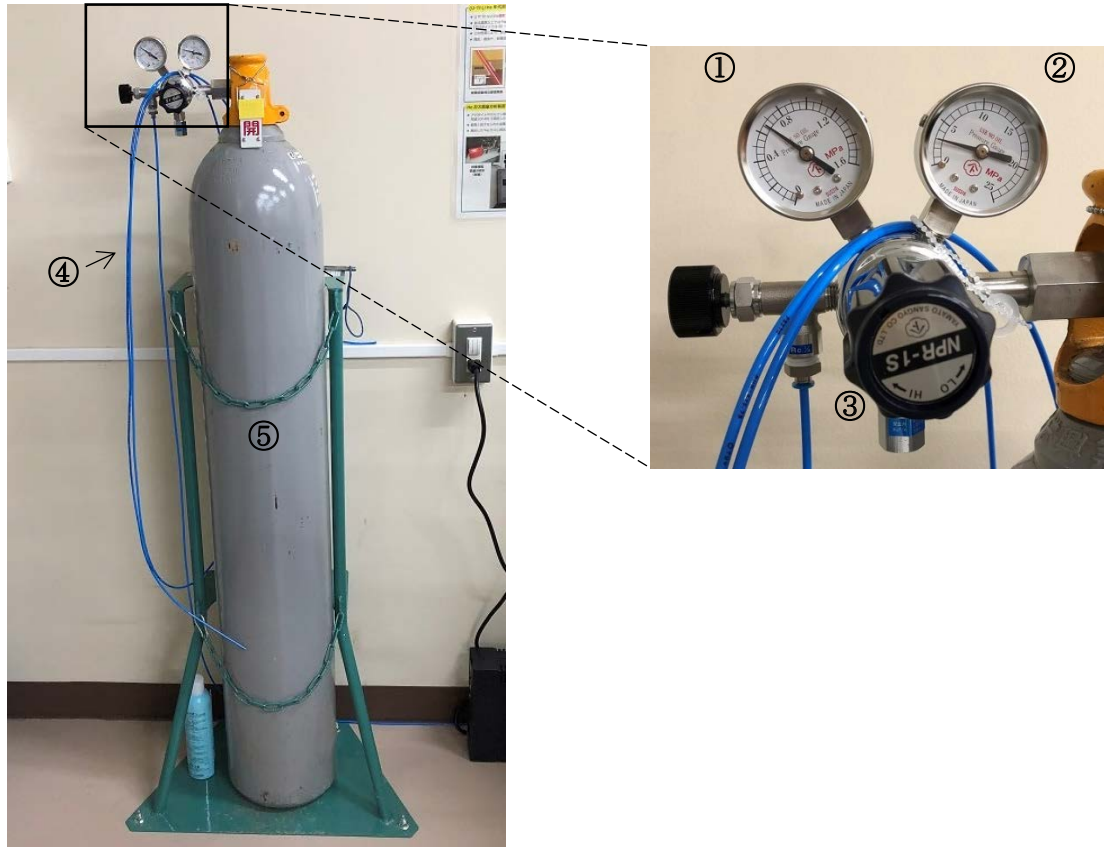


図 3.1.6 圧縮空気ポンペ

- ① 圧力ゲージ。出力している圧力が表示される。約 0.62 MPa (= 90 psi) を維持する。
- ② 残量ゲージ。残りの圧縮空気の量が表示される。
- ③ ひねると圧力が操作できる。圧力ゲージに反映されるまで少し時間がかかる。
- ④ 空気ポンペから本体に空気を送るチューブ。非常に柔らかく脆弱であるため、折れ曲がったり上に何か置いたりすると空気が送れなくなり、ターボポンペが停止する。
- ⑤ 圧縮空気ポンペ。圧縮空気が入っている。残量が少なくなったら新しいポンペに交換し、ポンペの管理担当に報告する。

3.2 装置の起動

本節では He 質量分析装置の起動方法について述べる。He 質量分析装置は起動の過程において各所を真空引きする。正しい順番で起動しないと、急激な気圧の変化により内部に悪影響を与える恐れがある。

- (1) 試料室の蓋を開け、内部の試料ホルダーの蓋を閉めるネジがしっかりと締まっているかを確認する。もし不十分であれば付属の六角棒レンチを使って締める。
空気圧縮ポンベを確認し、出力圧が 0.62 MPa になるように調整する。
- (2) PC の電源を入れる。この時点ではソフトウェアを立ち上げてはならない。
- (3) 装置本体のスイッチ（図 3.1.1⑥）のうち、下記のスイッチを入れて点灯させる。QMS はスイッチを入れたあと、緑色の LED が点滅するまで少し待つ（図 3.2.1）。
 - ① Gauge
 - ② Laser Controller
 - ③ Motion Controller
 - ④ Valve Control
 - ⑤ Getter Control
 - ⑥ QMS



図 3.2.1 QMS の緑色の LED

- (4) 装置本体の Fore Pump のスイッチを入れる。入れた直後に大きな排気音がするが、しばらくすればおさまる。
- (5) 装置本体の Turbo Pump と Ion Pump のスイッチを入れる。装置本体にあるそれぞれの操作パネルはまだ操作してはならない。
- (6) PC のデスクトップ画面から QUADERA のアイコンをダブルクリックして起動する。QUADERA 画面下部のアイコンから QMS connect を選んで QMS と接続できるかどうか確認する（図 3.2.2）。

※SEM およびフィラメントとも接続できるが、この時点で接続すると PC がフリーズする危険があるため、(6) の時点では絶対に接続してはならない。もしフリーズした場合、3.3 節の手順に従い装置を停止させ、再起動を試みること。

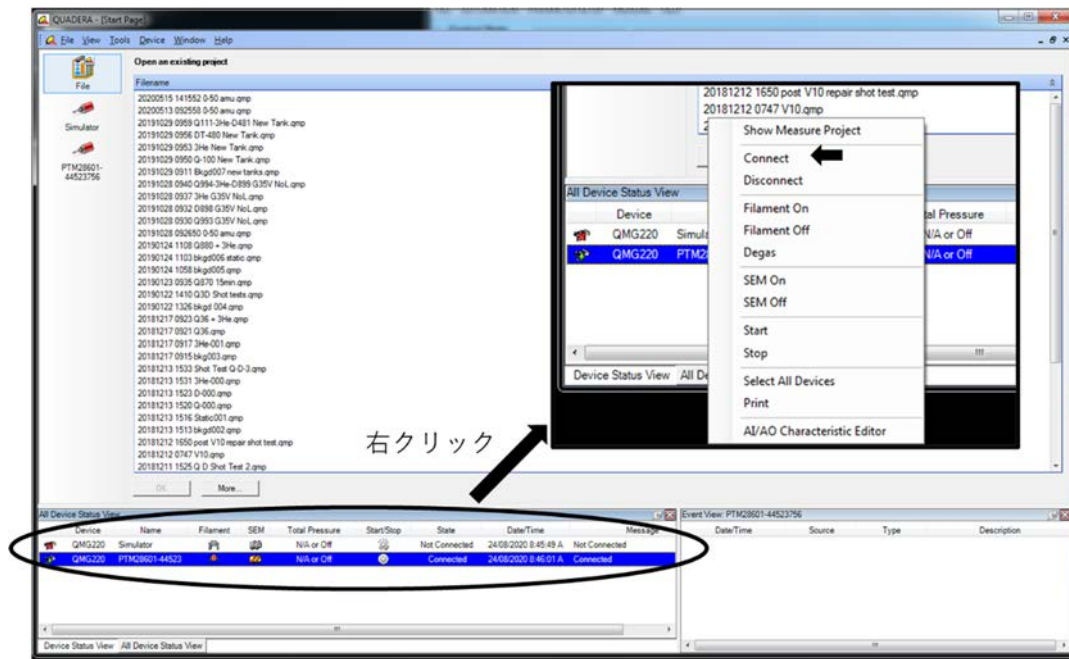


図 3.2.2 QMS 接続のための操作アイコン位置

(7) PC デスクトップから Alpha asi のアイコンをダブルクリックして起動する。開いた Alpha asi 画面から下記の機能について正常に動作しているか確認する。

① Cold cathode Gage

起動当初は $1\text{E}-6$ 以上である。

② XY driver

State 欄が緑色であれば正常である。

③ Camera

試料室の蓋を開け、フィルターを外すと Camera 画面に画像が映る。

④ Laser

試料室の蓋がしっかりと閉じていることを確認する。装置本体のキーが On の位置にあることを確認し、Alpha asi 画面の Fire Laser をクリックすると、装置本体の Laser Enabled の LED が赤く点灯する。

※QMS Scan を起動すると PC がフリーズする危険性があるため、(7) の時点では絶対に起動してはならない。

(8) 装置本体のすべてのマニュアルバルブを閉める。マニュアルバルブは時計回りが閉める方向、反時計回りが開ける方向である。

(9) アイソレーションバルブを開ける。装置本体にスイッチがあり、点灯していると開いており、消灯していると閉じている。

(10) ターボポンプを起動する。装置本体の DCU PFEIFFER VACUUM と記載されているパネルがターボポンプの操作パネルである。

矢印ボタンで液晶画面を操作し、309 : ActualSpd と表示されている状態にする。

On/Off ボタンを押すとターボポンプが起動し、液晶画面の数値が 0 Hz から徐々に上がり、1500 Hz まで上昇する。310 : の値は 3.5 A 程度まで上昇した後に徐々に下がり、0.6 A で安定する。

PC の Alpha asi 画面では Cold cathode が徐々に下がっていく。この値が $1\text{E-}7$ 以下になるまで一晩ほど放置する。下限値 ($1\text{E-}8$) 以下になると $0.0\text{E+}0$ と表記される。

- (11) これ以降の操作は低圧状態からの真空引きとなる。(10) の時点でエラーがある場合、装置本体に大きな損傷を与えるおそれがある。もし (10) 終了時点でエラーが発生していた場合、丹念にエラーを解消し、どうしても解消できなかった場合は、3.3 節に従い装置をいったん停止させ、再起動する。

Cold cathode が $1\text{E-}7$ 以下になっていることをしっかりと確認したら、(12) 以降の操作を行う。

- (12) ターボポンプを使って B ラインを排気する (図 3.2.3)。

Alpha asi 画面の V1~V13 はクリックすることで開閉操作が可能なバルブで、赤い色が閉まっている状態、緑色が開いている状態である。

PC の Alpha asi 画面から V8 をクリックして緑色にする。Cold cathode の値がいったん跳ね上がり、すぐにまた下がる。 $1\text{E-}7$ 以下まで下がったら次の工程へとすすむ。

- (13) ターボポンプを使って A ラインを排気する (図 3.2.3)。Alpha asi 画面から V9 をクリックして緑色にする。Cold cathode が $1\text{E-}7$ 以下まで下がることを確認する。

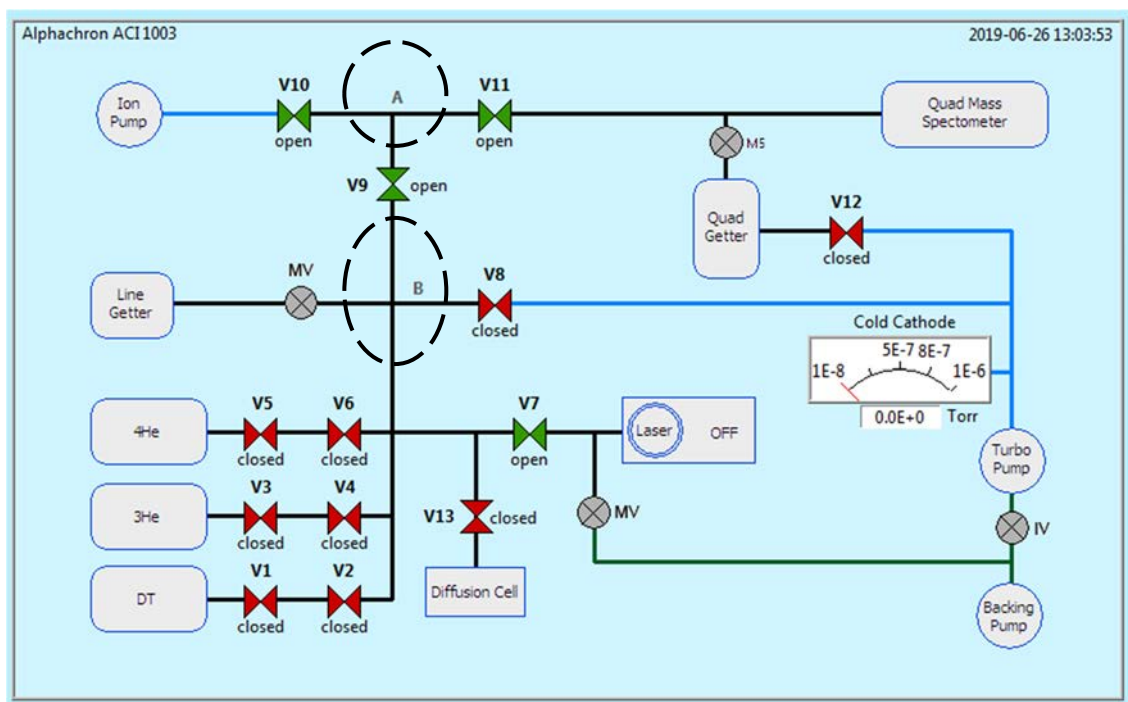


図 3.2.3 A ラインと B ライン

- (14) ターボポンプを使ってイオンポンプを排気する。Alpha asi 画面から V10 をクリックして緑色にする。Cold cathode が $1\text{E-}7$ 以下まで下がることを確認する。
- (15) ターボポンプを使って QMS を排気する。Alpha asi 画面から V11 と V12 をクリックして緑色にする。Cold cathode が $1\text{E-}7$ 以下まで下がったら、V11 と V12 をクリックして赤い閉じた状態にする。
- (16) イオンポンプを起動する。装置本体のイオンポンプの操作パネルから、電源ボタンを長押しして操作パネルを起動する。HV ボタンを押すとイオンポンプが起動する。矢印ボタンを

何度か押して、出力が-7000 V になっていることを確認する。

PC の Alpha asi 画面の Cold cathode が徐々に下がっていくので、E-8 以下になるまで数時間待つ。下限値以下 (0.0E+0) になるまで待つのが理想的だが、その場合は一晩かかる。

- (17) イオンポンプを使って A ラインと QMS を排気する。Alpha asi 画面から V9 を閉じて、V10 を開く。Cold cathode が十分に下がることを確認する。
- (18) イオンポンプを使ってガス精製ラインを排気する。Alpha asi 画面から V2、V4、V6 の操作を順に一つずつ行う。まず V2 を開き、Cold cathode が十分に下がったら V2 を閉じて、V4 の操作に移る。すべての操作が終わったら、V2、V4、V6 すべてが閉じていることを確認する。
- (19) 残りのすべてのラインを排気する。Alpha asi 画面から V7、V13 を順に操作する。まず V7 を開き、Cold cathode が十分に下がったら、V7 を閉じて、V13 の操作に移る。すべての操作が終わったら、V7、V13 どちらも閉じていることを確認する。
- (20) ターボポンプを使ってラインゲッターを排気する。ラインゲッターにつながるマニュアルバルブを反時計回りにカチッと音が鳴るまで回して、開ける。
- (21) フィラメントと SEM を起動する。PC デスクトップから QUADERA 画面を開き、QMS filament と SEM と接続する (図 3.2.4)。

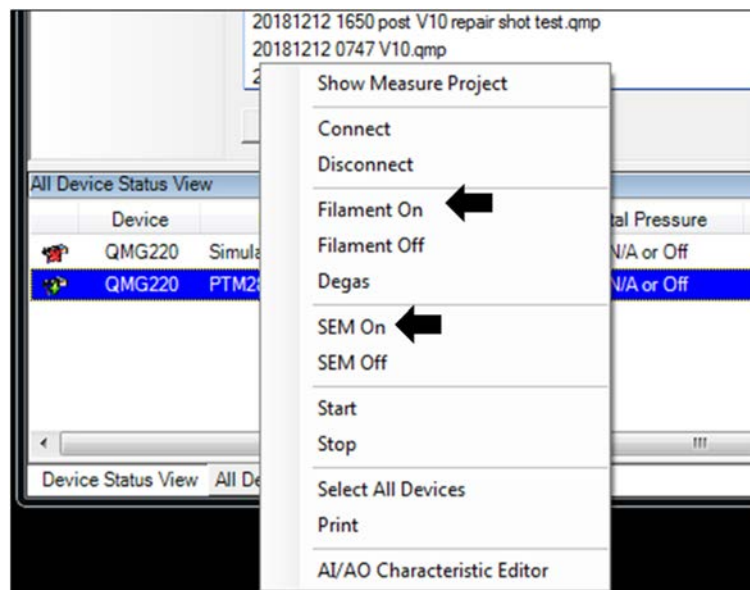


図 3.2.4 フィラメントと SEM の接続コマンド

- (22) QMS スキャンを開始する。Alpha asi 画面から QMS Scan をクリックしてスキャン画面を開く。Open から helium analysis を選択して Use Parameters をクリックすると開始される。helium analysis は下記に格納されている。

C:\¥Alphachron configuration¥parset¥helium analysis.par

- (23) ラインゲッターを起動する。装置本体のゲッターコントローラーで Output Voltage のつまみを回し、Voltmeter が 35 V になるように調整する。
- (24) システムを安定化させるため、一晩静置する。

3.3 装置の停止

本節では He 質量分析装置の停止方法について述べる。He 質量分析装置を起動する過程または稼働する過程においてなんらかのエラーが発生し、通常の復帰手順においてエラーが解消されなかった場合、装置の保護のため装置を停止させる必要がある場面が想定される。また、通常に使用する場合でも、管理者が長期間不在となる場合においては、落雷などによる不慮の事故防止のため、装置を停止させることを推奨する。

- (1) QMS と SEM を停止する。方法は二通りあるので、いずれかの方法で行う。
 - ① PC の Alpha asi 画面から QMS Scan を開き、Send Multiplier Off と Send Filament Off をどちらもクリックする。しばらくすると Amplitude の値が E-14 まで低下する。Stop Scan をクリックする。
 - ② PC の QUADERA 画面からデバイス接続画面を選択し、右クリックして filament disconnect と SEM disconnect を選択する。
- (2) PC の Alpha asi 画面から操作できるすべてのバルブを赤色にして閉じる。
- (3) 装置本体のすべてのマニュアルバルブを時計回りに回して締めて閉じる。
- (4) PC 上のすべてのプログラム、ソフトウェアを終了し、PC をシャットダウンする。
- (5) ラインゲッターを停止する。装置本体のラインゲッター操作パネルから、Getter Controller を操作してラインゲッターの出力電圧を 0 V にする。その後、ラインゲッターの電源を落とす。
- (6) 装置本体の Isolation Valve ボタンを操作し、消灯状態にして閉じる。
- (7) ターボポンプを停止する。ターボポンプ操作画面の電源ボタンを押し、309 : ActualSpd が徐々に下がるのを確認する。0 Hz まで下がることを確認する。
- (8) イオンポンプを停止する。イオンポンプ操作画面の HV ボタンを押し、液晶画面に Discharged と表示されることを確認する。その後、イオンポンプの Power on/off ボタンを押して停止させる。
- (9) 装置本体のすべてのスイッチを切って消灯状態にする。
- (10) 電源ケーブルを抜く。

3.4 試料の交換

本節では He 質量分析装置に試料入りの封入パッケージをセットし、測定可能な状態にする方法について述べる。He 質量分析装置は起動の過程において各所が真空状態になっており、正しい順番で試料のセットを行わないと急激な圧力の変化により装置に悪影響を与えるおそれがある。また、試料のセットした後も正しい順番で真空引きを行う必要がある。真空引きは完了まで半日～一晩程度の時間を必要とするため、十分に余裕をもって行うと良い。試料は測定する未知試料の他、中に何も入っていない空のパッケージからなるブランク試料 1 つと、測定の信頼性を保証する年代基準試料 1 つ以上を混在させる。一度に測定できる最大数は 25 個である。試料の交換に用いる器具は表 3.4.1 の通りである。

表 3.4.1 試料の交換の使用器具

品名	数量	備考
ゴム手袋	1 枚	皮脂汚れの排除 (アズワン製クアラテック)
紙ウェス	1 枚	作業台の確保 (日本製紙クレシア製キムタオル)
パラフィルム	1 枚	コンタミネーションの防止
はさみ	1 本	パラフィルムの整形
記録ノート	1 冊	試料の位置等の記録
精密ピンセット	1 本	試料の移動
六角棒レンチ	1 本	試料蓋の固定等
銅ガasket	1 枚	気密の確保

3.4.1 試料の設置

- (1) 作業を開始する前に、下記の項目について確認する。
 - ① 圧縮空気ポンプ、Cold cathode、ロータリーポンプ、イオンポンプの値を確認してノートに記入する。
 - ② PC の Alpha asi 画面から V7～V11 を赤くして閉じる。できれば Alpha asi 上で操作できるすべてのバルブを閉じる。
 - ③ レーザーチャンバーにつながるマニュアルバルブを閉める。
 - ④ レーザーが確実に照射されていない状態であることを確認する。
- (2) 試料封入パッケージの入ったディスポシャーレを 5×5 に並べ、試料皿の位置と対応させ、ノートに位置を記録する。パラフィルムをはさみで 5 cm 角程度の大きさに切り、中央に直径 2 mm 程度の穴をあける (図 3.4.2)。
- (3) 安全で清潔な作業台を用意し、紙ウェスを敷く。ゴム手袋を着用し、ピンセット等に汚れが付着していないか確認する。汚れているのならばアルコールで洗浄する。
- (4) PC の Alpha asi 画面から go to next position ボタンを操作し、開いたサブウィンドウから 3 を選択する。レーザー台が中央奥側 (3 番ホール直上) に移動する。
- (5) レーザー台左側奥にストッパーとなるネジがあるので回して緩め、レーザー台を奥へと押し込む。
- (6) 試料蓋を外す。付属の六角棒レンチを使ってネジを対角線上に少しずつ緩める。十分に緩めたら垂直に持ち上げて外し、(3) の作業台に移す。
- (7) 試料皿を外す。付属のネジ棒を差し込んで回して固定し、垂直に持ち上げて外す。万が一の落下に備え、触れないように下に手を回す。試料蓋と同様に作業台に移す。試料皿の移動後、試料室の蓋を閉じて余計な埃などが入らないようにする。
- (8) 試料の設置を行う。(2) で用意した穴あきパラフィルムを試料皿の穴の上に置き、作業する穴以外がフィルムで塞がれている状態にして、コンタミネーションを防ぐ。稀にパラフィルムに静電気で試料封入パッケージがくっつく時があるので、静電気除去装置を併用すると良い。

ディスポシャーレを作業台に移動させ、(2) で記入した位置と対応した穴に試料封入パケットを精密ピンセットを使って入れる。封入パケットは中央が膨らんだ四角形をしており、出来るだけ膨らんだ中央が真上をむくような姿勢を取らせる (図 3.4.1)。強力ピンセットで移動させると、パケットの口が開いて中の鉱物が落ちる危険性があるので、必ず精密ピンセットで行う。測定済み試料は元々入っていたディスポシャーレに戻す。

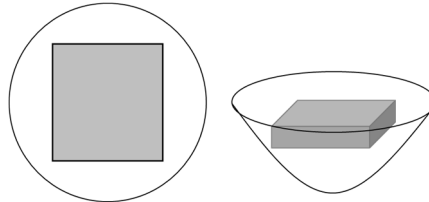


図 3.4.1 試料封入パケットの姿勢

- (9) 銅ガスケットを交換する。銅ガスケットは一度使うと跡が付いて、再利用すると気密性が下がる可能性があるため、試料を入れ替えるたびに交換する。交換時は試料ホルダーに傷をつけないように、精密ピンセットなどを使い、垂直に落とすように入れ替える。動径方向に傷がつくと気密性が下がる原因となるので、ずらしながら位置を調整することはしないようにする。
- (10) 試料皿、試料蓋の順に慎重に戻し、六角棒レンチで締める。銅ガスケットを押しつぶして気密性を確保するので、締め具合に不均一が出ないように対角線上に慎重に締め付ける。
- (11) 奥へ押し込んでいたレーザー台を戻し、左側奥のネジを締めてストッパーを掛ける。



図 3.4.2 作業台および試料室

3.4.2 真空引き

- (1) 各所の真空引きを行う。PC の Alpha asi 画面で操作できるすべてのバルブが赤くなり閉じていることを確認する。装置本体の Isolation valve ボタンを消灯状態にして閉じる。
- (2) レーザーチャンバーにつながるマニュアルバルブを開ける。反時計回りにカチッと音が鳴るまで回す。ロータリーポンプの値が 1.0 以下になるまで数分待つ。1.0 以下になったらレーザーチャンバーにつながるマニュアルバルブを時計回りに回して締め、閉じる。
- (3) 装置本体の Isolation valve ボタンを点灯状態にして、開ける。
- (4) ラインゲッターにつながるマニュアルバルブを時計回りに締め、閉める。
- (5) PC の Alpha asi 画面から V7 と V8 を緑色にして開ける。Cold cathode が徐々に下がることを確認する。
- (6) 圧力が安定するまで一晩静置する。
- (7) Cold cathode が E-8 以下になっていることを確認する。試料室に向かって He ガスを吹きかけてリークを確認する。もしリークしていた場合は Cold cathode の値に変化が現れる。
- (8) ラインゲッターにつながるマニュアルバルブを反時計回りにカチッと鳴るまで回し、開ける。
- (9) PC の Alpha asi 画面から V7、V9、V10、V11 を緑色にして開き、それ以外を赤くして閉める。

3.5 試料の測定

本節では He 質量分析装置で測定を行う際の設定手順や諸々のチェック項目について述べる。

3.5.1 ステージ合わせ

本項ではレーザー台の位置合わせについて述べる。試料の交換の際にレーザー台の位置はずれてしまうため、試料交換後は必ずこの調整を行う。

- (1) 試料室の蓋を開き、フィルターをずらす。
- (2) PC の Alpha asi 画面から Display vision window をクリックし、カメラ画像の映るサブウィンドウを開く。
- (3) PC の Alpha asi 画面から setup sample disk をクリックし、ステージの位置合わせを操作するサブウィンドウを開く。
- (4) カメラ画像ウィンドウを確認しながらセットアップウィンドウの矢印ボタンを操作し、13 番ホールが画面の中心に来るように調整する。Zero stage ボタンをクリックし、13 番ホールを原点として設定する。
- (5) 13 番ホールと同様に 11 番ホールを中心に来るように調整する。Set Hole 11 marker position ボタンをクリックし、位置を設定する。
- (6) 13 番ホールと同様に 15 番ホールを中心に来るように調整する。Set hole 15 marker position ボタンをクリックし、位置を設定する。
- (7) build grid coordinates close ボタンをクリックし、13、11、15 番ホールを基準とした格子を作成する。
- (8) 格子が正しく作れているか確認する。Alpha asi 画面から go to next position ボタンをクリックし、1 番ホール、25 番ホールの位置を確認する。ずれていたら (4) からやり直す。
- (9) フィルターの位置を元に戻し、試料室の蓋を閉める。

3.5.2 レーザーの確認

本項では試料に照射するレーザーの確認方法について述べる。

- (1) 試料室の蓋が閉じていることを確認する。
- (2) PC の Alpha asi 画面から fire laser ボタンを押す。本体側の laser enabled の LED が連動して赤く光れば問題ない。

3.5.3 測定項目の設定 標準ガスの場合

本項では標準ガスを測定する場合の測定項目の設定方法について述べる。標準ガスは装置本体起動後初めてとなる測定の前、長期間測定を行わなかった時、連続して様々な試料を測定する場合などに測定し、キャリブレーションのような役割を担う。試料交換後には毎回行うようにすると良い。

- (1) PC の Alpha asi 画面から open QMS par editor をクリックし、QMS の設定を行う画面を開く。Open から helium analysis.par を選択し、use parameters をクリックする。

※ (1) の操作を行わないと測定したデータが保存されない。レーザー照射後の試料からは He も抜けているため、2 章からやり直しになる。必ず設定すること。

- (2) PC の Alpha asi 画面から show sequence controller をクリックし、シーケンス設定を行うサブウィンドウを開く。表 3.5.1 を参考に設定を行う。

LB-n は全体を通しての連続番号となるため、以前に測定した際の LB-n を確認し、その次の数字から入力する。以前に測定した LB-n は PC のデスクトップ上に保存される JAEA.data から確認できる。

Hole number は全て 0 と記入する。

- (3) 測定項目の設定は終了だが、Start sequence をクリックすると測定が始まってしまうので、3.5.5 項の最終チェック項目を確認するまで、測定を開始してはいけない。

表 3.5.1 標準ガスのシーケンス設定

Analysis Type	Sample Name	Hole Number
LB	LB-100	0
LB	LB-101	0
Q	空欄	0
Q	空欄	0
DT	空欄	0
Q	空欄	0
DT	空欄	0
Q	空欄	0
DT	空欄	0
Q	空欄	0
Q	空欄	0
LB	LB-102	0
LB	LB-103	0

3.5.4 測定項目の設定 測定試料の場合

本項では試料を測定する場合の測定項目の設定について述べる。設定に当たり、3.3.1 項 (2) でノートに記入した各試料の位置情報が必要となるので用意する。

- (1) PC の Alpha asi 画面から open QMS par editor をクリックし、QMS の設定を行うサブウィンドウを開く。Open から helium analysis.par を選択し、use parameters をクリックする。

※ (1) の操作を行わないと測定したデータが保存されない。レーザー照射後の試料からは He も抜けているため、2 章からやり直しになる。必ず設定すること。

- (2) PC の Alpha asi 画面から show sequence controller をクリックし、シーケンス設定を行うサブウィンドウを開く。表 3.5.2 を参考に設定を行う。

中身のないパッケージからなる空試料はブランク試料として、ジルコンであれば ZrHB、アパタイトであれば ApHB と記入する。

年代基準試料および未知試料は試料名、測定時間、電流、穴番号を記入する。Hole number にはその試料が入っている穴番号を記入する。Analysis type は[Re]と記入されているものを測定する鉱物と合わせて選ぶ。なお、[Re]と記入されていないものとの違いは、測定の実行回数である。[Re]と記入されていないものは測定を 1 回のみ実行するが、[Re]と記入されているものは、試料の脱ガスが完全に行われたか確認するための 2 回目の測定 (re-extract) を続けて実行する。

LB・n は全体を通しての連続番号となるため、以前に測定した際の LB・n を確認し、その次の数字から入力する。以前に測定した LB・n は PC のデスクトップ上に保存される JAEA.data から確認できる。

アパタイトとジルコンを同時に測定する場合は、ガスが比較的少ないアパタイトを先に測定する。アパタイトからジルコンに移り変わる前に LB と Q を 2 つずつ挟む。

- (3) 測定項目の設定は終了だが、Start sequence をクリックすると測定が始まってしまうので、3.5.5 項の最終チェック項目を確認するまで、測定を開始してはいけない。

表 3.5.2 測定試料のシーケンス設定例

Analysis Type	Sample Name	Hole Number
LB	LB-100	0
LB	LB-101	0
Q	空欄	0
Q	空欄	0
Zircon (ブランク試料)	ZrHB 5min 1.7A H1	1
Zircon (ブランク試料)	ZrHB 5min 1.7A H1	1
Zircon [Re] (年代基準試料)	FC3-001 5min 1.7A H3	3
Zircon [Re] (未知試料)	TK-2-102 5min 1.7A H14	14
Zircon [Re] (未知試料)	ND-1-015 5min 1.7A H15	15
LB	LB-102	0
LB	LB-103	0

3.5.5 測定前の最終チェック項目

本項では 3.5.4 項まで終了した状態で、測定を開始する前に確認すべき事項について述べる。測定シーケンス開始後は停める手段が限られており、また試料にレーザーが照射された後であれば He ガスはすでに試料から抜けて再測定が不可能な状態となるため、測定失敗を極力なくするために、測定開始前に本項の項目については確実に確認することが望ましい。

- (1) 試料室の蓋を開けて、レーザー台のフィルターが装着されているかどうかを確認する。ステージ位置の調整後、戻し忘れることがあるためである。問題なければ試料室の蓋を確実に閉じる。開いていると安全装置が働き、レーザーが照射されない。
- (2) 圧縮空気タンクの出力圧と残量を確認する。試料を 25 個測定する場合はおおよそ 1 MPa 消費する。残量が 1 MPa 以下である場合は、圧縮空気タンクを交換し、担当者に報告する。
- (3) 圧縮空気タンクから装置本体につながるチューブが折れ曲がったり潰れていたりしないか確認する。柔らかい素材であるため上に何か載っている程度でも中空が潰れてしまう。空気が送れなくなるとターボポンプが停止し、測定が中断される原因となる。
- (4) 3.5.3 項 (1) および 3.5.4 項 (1) で設定した QMS について、確実に設定されているか確認する。
- (5) Alpha asi 画面のシーケンス設定画面で、Sample name と Hole number の穴番号が正しく設定されているか確認する。稀にずれていたり、設定し忘れていたりする場合がある。
- (6) 圧縮空気ポンプ、Cold cathode、イオンポンプ、ロータリーポンプの値を確認し、測定を開始する日時と共にノートに記入する。
- (7) 以上の項目について特に問題なければ、show sequence controller から Start sequence をクリックし、測定を開始する。

3.6 データの確認

本節では He 質量分析装置で試料測定を行ったのち、そのデータの取得方法および、再測定する際の注意点について述べる。

3.6.1 データの取得

本項では測定終了後、QMS からデータを取得する方法について述べる。

- (1) PC の Alpha asi 画面および装置本体を確認し、エラーが発生していないかを確認する。
- (2) PC のデスクトップから Achron Data Processing のアイコンをダブルクリックして、Achron 画面を起動する。
- (3) Output file name に Des Demo と記入する。
- (4) He# にデスクトップ上の JAEA.data を参考にして、最新の番号に 1 を足したものを記入する。QMS データ保存先での参照番号であり、データ全体での連番となっている。
- (5) 表 3.6.1 を参考に MASS4 などの項目について設定する。表 3.6.1 中の○が Achron 画面上の黄緑色、表 3.6.1 中の×が Achron 画面上の暗緑色である。黄緑色になっている項目についてデータとして出力される。
- (6) Save & Load Next を必要回数クリックし、データを出力する。必要以上クリックすると、これ以上データはないといった旨のウィンドウが表示される。終わったら Slip & Load previous をクリックして Achron 画面を閉じる。
- (7) PC の C:\¥Alphachron Data¥Processed¥Des Demo に保存されている Des Demo.txt を開くと、最下行に最新データが記述されているので、該当部分をコピーして JAEA.data の

最下行から一行開けてペーストする。

- (8) データ媒体を使って PC から (7) のデータを移動する。

表 3.6.1 Achron Data Processing の設定項目

Output File Name			Des Demo		
He#			最新の He#+1		

MASS 4	m4 Tz	○	MASS 2	m2 Tz	○
	SD	×		SD	×
	% SD	×		% SD	×
	Slope	×		Slope	×
	Ave	×		Ave	×
	SD	×		SD	×
	% SD	×		% SD	×
MASS 3	m3 Tz	○	Mass40	m40 Tz	○
	SD	×		SD	×
	% SD	×		% SD	×
	Slope	×		Slope	×
	Ave	×		Ave	×
	SD	×		SD	×
	% SD	×		% SD	×
4/3 Ratio (×1000)	Ratio Tz	○	Mass 5 Baseline	Ave	○
	SD	○		SD	×
	% SD	○		% SD	×
	Slope	×	PAB Averages	m2	×
	Ave	×		m3	○
	SD	×		m4	○
	% SD	×		m5	×
				m40	×

3.6.2 再測定

本項ではデータの確認後、まだ試料に He ガスが残留していると考えられる場合に、もう一度測定する方法について述べる。

3.5.4 項とほぼ同じ工程ではあるが、シークエンス設定時に表 3.6.2 を参考に、re1 の数字を書き加え、1 巡目と区別できるようにする。3 巡目であれば re2 とする。また、He ガスが抜けきったと考えられる試料についてはシークエンスから抜くようにする。

これ以外の操作については 3.5 節と同様である。

表 3.6.2 2 巡目のシーケンス設定例

Analysis Type	Sample Name	Hole Number
LB	LB-104	0
LB	LB-105	0
Q	空欄	0
Q	空欄	0
Zircon	ZrHB 5min 1.7A H1	1
Zircon	ZrHB 5min 1.7A H1	1
Zircon [Re] (年代基準試料)	FC3-001-re1 5min 1.7A H3	3
Zircon [Re] (測定試料)	TK-2-102-re1 5min 1.7A H14	14
LB	LB-106	0
LB	LB-107	0

4. データ解析

4.1 補正

本節ではデータの処理方法について述べる。3.6 節で取得したデータは、He ガスのシグナル比 ($^4\text{He}/^3\text{He}$) であるため、これを後々の(U-Th)/He 年代の計算に用いるためには、 ^4He のモル数に直す必要がある。最終的に単位がフェムトモル (fmol) になるように算出する。

まず、2 種類の ^4He 標準ガス測定で得られた Q と D の値からキャリブレーションデータを作成する。これについては Alphachron の整備を行う際に技師側で準備するので、こちらで用意する必要はない。東濃地科学センターで使用される Alphachron のデータ整理用ファイルである JAEA.data においては、Q-800、Q-DF と称されているデータがキャリブレーションデータに相当する。表 4.1.1 には 3.6.1 項で取得するデータの例を示し、年代基準試料の He 2413 を補正式を当てはめる例とする。

表 4.1.1 データ補正例

He#	Name	Q	sample	HB	CB
He 2407	LB-1054				0.17
He 2408	LB-1055				0.18
He 2409	Q996_	687.61			
He 2410	Q997_	687.01			
He 2411	ZrHB 5min 1.7A H1 (ブランク試料)			0.20	
He 2412	ZrHB 5min 1.7A H1			0.35	
He 2413	FC3-001 5min 1.7A H1 (年代基準試料)		65.79		
He 2414	FC3-001 5min 1.7A H1 RE		3.90		
He 2415	TK-2-102 5min 1.7A H14 (未知試料)		58.49		
He 2416	TK-2-102 5min 1.7A H14 RE		2.36		
He 2417	ND-1-015 5min 1.7A H15 (未知試料)		318.25		
He 2418	ND-1-015 5min 1.7A H15 RE		17.18		
He 2419	ZrHB 5min 1.7A H1 (ブランク試料)			0.92	
He 2420	ZrHB 5min 1.7A H1			0.96	
He 2421	LB-1056				0.59
He 2422	LB-1057				0.41

CALIBRATION OF ORIGINAL TANK SET			
Q-800	11.117	D-800	11.204
Q-DF	0.999903130	D-DF	0.999903547

式① Q の補正

$$= Sample \div Q \times (Q_{800}) \times (Q_{DF})^{(Qn-800)}$$

ただし、Sample は未知試料および年代測定試料の $^4\text{He}/^3\text{He}$ のシグナル比、Q は Qn 番目の標準ガス測定時の $^4\text{He}/^3\text{He}$ のシグナル比、Q-800（式①中では Q_800 と表記）は 800 番目の標準ガス測定時の Q タンクにおける標準状態での ^4He の体積（ncc ^4He : ncc は 10^{-9} 立方 cm）である。Q-DF（式①中では Q_DF と表記）は Q タンクの容積 / （Q タンクの容積 + V5～V6 間のピペットの容積）で、一回のピペット操作に伴う Q タンク中の ^4He 減少率に相当する。すなわち（Q-DF）^(Qn-800) は、800 番目の Q 測定から Qn 番目の Q 測定までを通じた Q タンク ^4He 減少率を表す。

表 4.1.1 を式①に当てはめると、He2413 の標準状態における ^4He 体積（ncc ^4He ）は以下のよう求められる。

$$= 65.79 \div 687.01 \times (11.117) \times (0.999903130)^{(997-800)}$$

式② ^4He 体積（ncc ^4He ）からモルへの変換

$$= \textcircled{1} \times 10^{-9} \div 22414$$

式③ フェムトモルへの変換

$$= \textcircled{2} \times 10^{15}$$

式④ まとめ

式①～③を統合して、補正式は以下のようにならわすことが出来る。

$$= Sample \div Q \times (Q_{800}) \times (Q_{DF})^{(Qn-800)} \times 10^6 \div 22414$$

謝辞

本手法の導入にあたり有益な助言をいただいた、ACHRON HELIUM SYSTEMS の Des Patterson 博士、株式会社ペスコの小川由美氏、有賀千恵氏に深く感謝いたします。

本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「平成 30～31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 地層処分研究開発調整会議, 地層処分研究開発に関する全体計画（平成 30 年度～平成 34 年度）, 2018, https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/data/pdf/20180329001_01.pdf（参照：2020 年 12 月 1 日）。
- 2) Farley, K.A., (U-Th)/He dating: Techniques, calibrations, and applications, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, vol.47, 2002, pp.819-844.
- 3) Dodson, M.T., Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol.40, 1973, pp.259-274.
- 4) Farley, K.A., Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite, *Journal of Geophysical Research*, vol.105, 2000, pp.2903-2914.
- 5) Reiners, P.W., Spell, T.L., Nicolescu, S., Zanetti, K.A., Zircon (U-Th)/He thermochronometry: He diffusion and comparisons with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.68, 2004, pp.1857-1887.
- 6) Ault, A.K., Gautheron, C., King, G.E., Innovations in (U-Th)/He, fission track, and trapped charge thermochronometry with applications to earthquakes, weathering, surface-mantle connections, and the growth and decay of mountains, *Tectonics*, vol.38, 2019, <https://doi.org/10.1029/2018TC005312>（参照：2020 年 12 月 1 日）。
- 7) 末岡 茂, 田上高広, 低温領域の熱年代学の原理と地殻浅部のテクトニクスへの応用, *地学雑誌*, vol.128, 2019, pp.707-730.
- 8) Evans, N.J., Byrne, J.P., Keegan, J.T. and Dotter, L.E., Determination of uranium and thorium in zircon, apatite and fluorite: Application to laser (U-Th)/He thermochronology, *Journal of Analytical Chemistry*, vol.60, 2005, pp.1159-1165.
- 9) 山田国見, 國分陽子, ジルコン(U-Th)/He 法におけるジルコン分解と脱塩処理, *フィッション・トラックニュースレター*, vol.25, 2012, pp.54-55.
- 10) 末岡 茂, 島田耕史, 菅野瑞穂, 横山立憲, 原子力機構における FT および(U-Th)/He 分析施設の現状と展望, *フィッション・トラックニュースレター*, vol.33, 2020, pp.15-18.
- 11) Farley, K.A., Wolf, R.A., Silver, L.T., The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th)/He ages, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.60, 1996, pp.4223-4229.
- 12) Hourigan, J.K., Reiners, P.W., Brandon, M.T., U-Th zonation-dependent alpha-ejection in (U-Th)/He chronometry, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.69, 2005, pp.3349-3365.
- 13) 檀原 徹, 岩野英樹, 糟谷正雄, 山下 透, 角井朝昭, 無毒な重液 SPT（ポリタングステン酸ナトリウム）とその利用, *地質ニュース*, vol.455, 1992, pp.31-36.

- 14) MEASURE WORKS, ポリタングステン酸ナトリウム, 2020,
<https://www.measureworks.co.jp/SPT.htm> (参照 : 2020 年 12 月 1 日).

付録 記録用紙

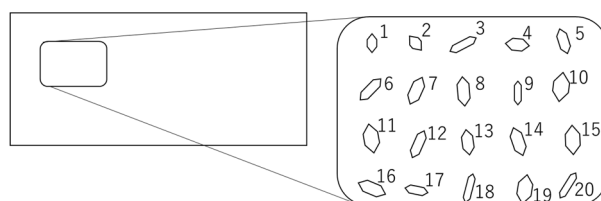
2.4 節で試料の選別を行う際に下記の記録用紙を用いる。ここでは入力例のみを示し、実際に用いる記録用紙は Excel で作成したものを示す。

記録用紙 「ピックアップ表」

ピックアップ表は 2.4 節の試料の選別の際に用いる。試料選別では鉍物を 5×4 の計 20 個拾い出し、1～20 の番号を割り振って、下表に記入する。双眼実体顕微鏡下では最大倍率でも結晶の瑕疵や包有物を見分けることは難しいので、状態については透過型偏光顕微鏡下での観察結果を記入する。封入はパケットに封入し、ディスポシャーレに密封した状態での試料番号を記入する。記入欄は必要に応じて表の下に追加する。

試料名	TK-1 R2.11.26																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
状態	○	○	×	△	△	◎	○	×	○	×	◎	◎	×	○	×	×	△	○	×	◎
封入	×	4				1	5		×		2	3		6				7		×
試料名																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
状態																				
封入																				
試料名																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
状態																				
封入																				
試料名																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
状態																				
封入																				

凡例		
状態	◎	大きさ、形状、包有物すべてが申し分ないもの
	○	形状・包有物は問題ないが、大きさが下限・上限に近いもの
	△	形状は問題ないが、包有物、大きさが許容限界に近いもの
	×	形状、包有物、大きさのいずれかに問題があるもの
封入	数字	ディスポシャーレに密封した状態の試料番号と対応させる
	×	紛失



図付録.1 鉍物の並べ方 (例)

記録用紙 「写真シート」

写真シートは 2.4 節で試料を選別する際に測定したサイズと、顕微鏡下で撮影した二方向の写真に記載するためのシートである。下のフォーマット例はジルコン用であり、アパタイト用は W1～W2 が 2R に変わる。L1～W2 および 2R については図 2.4.1～2.4.2 を参考にする。記入欄は必要に応じて表の下に追加する。

TK-1	
	
試料名	TK-1-001
L1	247.0 μm
L2	174.8 μm
W1	110.2 μm
W2	87.7 μm
備考	R2.11.26撮影 TK-1_20201126_006と対応
試料名	
L1	μm
L2	μm
W1	μm
W2	μm
備考	

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe Δ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

(a) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 Δ 」は対応関係を示すものである。

表 10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

