

モリブデン酸塩水溶液の構造材料に対する 腐食性確認試験装置の設計・製作

Design and Fabrication of Test Apparatuses for Investigation on
Corrosivity of Aqueous Molybdate Solution for Structural Materials

石川 幸治 稲葉 良知 土谷 邦彦

Koji ISHIKAWA, Yoshitomo INABA and Kunihiko TSUCHIYA

大洗研究開発センター

照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

February 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Testing

本レポートは独立行政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 (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根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
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

モリブデン酸塩水溶液の構造材料に対する腐食性確認試験装置の設計・製作

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター

照射試験炉センター

石川 幸治^{*}、稲葉 良知、土谷 邦彦

(2009年12月3日受理)

⁹⁹Moの新しい製造方法として提案している溶液照射法では、照射ターゲットであるモリブデン酸塩水溶液がキャプセル中を流動する。しかしながら、流動するモリブデン酸塩水溶液とキャプセルや配管の構造材料との両立性は、明らかではなかった。そこで、両者の両立性を調べるために、腐食性確認試験装置を設計・製作した。また、製作した試験装置を用いて予備試験を行った結果、目的の試験が行えることを確認した。

Design and Fabrication of Test Apparatuses for Investigation on Corrosivity of Aqueous Molybdate Solution for Structural Materials

Koji ISHIKAWA[※], Yoshitomo INABA and Kunihiko TSUCHIYA

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 3, 2009)

In the solution irradiation method, which is proposed as new ⁹⁹Mo production method, the molybdate solution of an irradiation target flows in a capsule. However, the compatibility between the flowing aqueous molybdate solution and the structural materials of capsules and pipes was not clear. Therefore, test apparatuses for the investigation of the compatibility were designed and fabricated. Preliminary tests with the test apparatuses were also carried out, and it was confirmed that planned tests could be carried out.

Keywords: Solution Irradiation Method, ⁹⁹Mo, Aqueous Molybdate Solution, Structural Material, Corrosivity, Compatibility

※ Visiting Researcher (the Present Affiliation: KAKEN Co., Ltd.)

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験装置の構成及び設計	2
2.1 試験装置の構成	2
2.1.1 静置型試験装置	2
2.1.2 流動型試験装置	2
2.1.3 試験ブース	2
2.2 試験装置の設計・仕様	3
2.2.1 静置型試験装置	3
2.2.2 流動型試験装置	3
2.2.3 試験ブース	4
3. 試験装置の性能試験及び操作方法	13
3.1 静置型試験装置	13
3.1.1 性能試験	13
3.1.2 操作方法	13
3.2 流動型試験装置	14
3.2.1 性能試験	14
3.2.2 操作方法	14
4. まとめ	15
謝 辞	16
参考文献	16

Contents

1. Introduction	1
2. Structure and Design of Test Apparatuses	2
2.1 Structure of Test Apparatuses	2
2.1.1 Static Solution-Type Test Apparatus	2
2.1.2 Circulating Solution-Type Test Apparatus	2
2.1.3 Test Booth	2
2.2 Design and Specifications of Test Apparatuses	3
2.2.1 Static Solution-Type Test Apparatus	3
2.2.2 Circulating Solution-Type Test Apparatus	3
2.2.3 Test Booth	4
3. Performance Tests and Operation Methods of Test Apparatuses	13
3.1 Static Solution-Type Test Apparatus	13
3.1.1 Performance Test	13
3.1.2 Operation Method	13
3.2 Circulating Solution-Type Test Apparatus	14
3.2.1 Performance Test	14
3.2.2 Operation Method	14
4. Concluding Summary	15
Acknowledgements	16
References	16

1. 緒 言

溶液照射法は、放射性医薬品として核医学の分野で最も多く用いられている ^{99m}Tc の親核種である ^{99}Mo を製造する新たな手法として提案しているものである^{(1) (2)}。従来の固体ペレットを使用した製造方法の改良型である溶液照射法では、原子炉の炉心に設置したキャプセル内でモリブデン酸塩水溶液を循環または静置させながら中性子照射し、 ^{99}Mo を製造する。このため、照射ターゲットとなるモリブデン酸塩水溶液が、流動または静置した状態でキャプセルや配管の構造材料と接触することになる。

これまで、未照射下及びガンマ線照射下において、静置したモリブデン酸塩水溶液と構造材料との両立性について調べた^{(3) (4)}。しかしながら、流動するモリブデン酸塩水溶液と構造材料との両立性については、明らかでなかった。そこで、流動するモリブデン酸塩水溶液と構造材料との両立性について調べるための腐食性確認試験装置を設計・製作した。また、比較のため、静置したモリブデン酸塩水溶液と構造材料との両立性について調べるための腐食性確認試験装置も設計・製作した。

本報告書は、モリブデン酸塩水溶液の構造材料に対する腐食性確認試験装置の設計・製作及び操作方法に関するものである。

2. 試験装置の構成及び設計

2.1 試験装置の構成

これまでの研究⁽³⁾⁽⁴⁾から照射ターゲットとなるモリブデン酸塩水溶液として選定したモリブデン酸カリウム水溶液とキャプセル構造材料との長期に渡る両立性試験を行い、構造材料の経時的変化を観察可能な試験装置を設計・製作した。両立性試験の目的は、モリブデン酸カリウム水溶液のキャプセル等の構造材料に対する腐食性について確認・評価し、水溶液の照射ターゲットとしての適性を調べることである。

試験装置は、水溶液を静置した状態で試験片（構造材料）を浸漬し、試験片に対する水溶液の腐食性を評価する静置型試験装置、水溶液を循環（流動）させた状態で試験片を浸漬し、試験片に対する水溶液の腐食性を評価する流動型試験装置の2種類の試験装置を製作した。また、試験を安全に実施するため、これらの試験装置が入る試験ブースを設置した。

2.1.1 静置型試験装置

静置型試験装置は、水溶液を静置した状態で、水溶液と構造材料との両立性及び水溶液の化学的安定性を評価するためのものである。本試験装置は、試験片浸漬用ガラス製浸漬槽、試験片固定用試験片ホルダー、水溶液温度測定用熱電対及び温度データ収集・監視用データロガーから構成される。水溶液に浸漬する構造材料（試験片）として、照射キャプセルや配管の構造材料として用いられるアルミニウム合金（A6063）及びステンレス鋼（SUS304、SUS316L）の金属種を使用した。加熱条件では水溶液温度を最大 100℃まで加温・保持可能であり、試験装置が3セット入る大きさの定温乾燥機を用いた。試験装置構成の概念図を Fig. 2.1 に示す。

2.1.2 流動型試験装置

流動型試験装置は、水溶液を循環させ、試験片と水溶液を流動下で接液させた状態で、水溶液と構造材料との両立性及び水溶液の化学的安定性を評価するためのものである。本装置は、試験片浸漬用ガラス製浸漬槽、水溶液温度保持用ガラス製貯留槽、水溶液流動用循環ポンプ、流量測定用フロートメーター、水溶液用チューブ、水溶液温度測定用熱電対、温度データ収集・監視用データロガー（静置型試験装置と共通）等から構成される。水溶液に浸漬する材料として、ステンレス鋼（SUS304）を使用した。加熱条件では、循環水溶液を最大 100℃まで加温・保持可能となるように、試験装置が入る大きさの定温乾燥機を用いた。試験装置構成の概念図を Fig. 2.2 に示す。

2.1.3 試験ブース

上記試験装置を搬入・設置可能な試験ブースを設計・製作した。装置異常時の保護及び安全に作業

できることを考慮した構造となるよう設計した。ブースは、排気システムを持ち、試験等で発生したガスを実験室の外側まで排気できる。試験ブースの概念図を Fig. 2.3 に示す。

2.2 試験装置の設計・仕様

2.2.1 静置型試験装置

静置型試験装置は、温度をパラメータとし、モリブデン酸カリウム水溶液を静置した状態で、水溶液と構造材料との両立性や化学的安定性について定量的に評価可能となる装置とした。本装置は、常温（雰囲気温度）で試験を行う装置及び高温（100℃）で試験を行う装置に分けられる。高温試験は、加熱チャンバー内で行われる。

水溶液に浸漬する試験片サイズを $10 \times 30 \text{ mm} \times 1 \sim 2^1 \text{ mm}$ （市販規格）とし、この試験片を各試験で2枚ずつ浸漬するため、試験片の総表面積は 12 cm^2 （厚さ無視）となる。このことから、JIS（JIS G 0572、G 0573）規格に基づき、試験片の浸漬水溶液量を 400 cm^3 と決定した。

水溶液及び浸漬試験片を入れるガラス浸漬槽は、浸漬水溶液量及び試験片の手動による取り出し操作を考慮し、セパラブルフラスコ（容量： 500 cm^3 ）及び専用蓋で構成し、両者を専用金具及びOリングで固定した。専用蓋上部には、テフロン製熱電対アダプター及びテフロン製バルブを設置した。試験片ホルダーはテフロン加工品、熱電対はテフロン被膜品とした。試験装置接液部の材料にガラス及びテフロンを選定したのは、水溶液の金属材料試験片に対する腐食性評価のため、非金属である必要性からである。水溶液を加熱する試験条件では、加熱時の容器内圧力上昇による熱電対アダプター及びバルブの緩み・外れが無いよう、馬蹄型クランプでこれらと専用蓋を固定した。

高温試験で使用する加熱チャンバーとして、高温試験時におけるチャンバー内での圧力異常等によるガラス浸漬槽の破損を考慮し、内面は耐食性のステンレス製、安全確認用のガラス窓付き、漏電ブレーカー、過電流ブレーカー、過熱防止サーモスタット及びバーンアウト機構（センサー遮断時）の機能を有する機器を選定した。さらに、水溶液漏洩時に、直接液が乾燥機内にこぼれることを防止するため、チャンバー内にステンレス製バットを設置した。

製作した試験装置の詳細図を Fig. 2.4 に、テフロン製試験片ホルダーの詳細図を Fig. 2.5 に示す。

2.2.2 流動型試験装置

流動型試験装置は、温度及び試験片の接液部流速をパラメータとし、モリブデン酸カリウム水溶液をポンプで循環流動させた状態で、水溶液と構造材料との両立性や化学的安定性について定量的に評価可能となる装置とした。本装置は、常温（雰囲気温度）で試験を行う装置及び高温（80℃）で試験を行う装置に分けられる。高温試験は、加熱チャンバー内で行われる。

試験片を入れるガラス浸漬槽は、試験片の手動による取り出し操作を考慮し、上部にネジ式フランジを持つガラス製外筒及び試験片固定用のテフロン製試験片ホルダーで構成し、上下部でテフロンチューブと接続した。水溶液に浸漬する試験片サイズは静置型試験と同様とし、テフロンホルダーにより浸漬槽中心に試験片を固定した。また、浸漬槽前段にガラス貯留槽を設置し、ガラス製貯留前段に

設置するポンプからの脈動を防止し、水溶液温度の均一化を図った。貯留槽には、テフロン製チューブアダプタを3つ取り付け、テフロンチューブ（水溶液出入口）の接続及びテフロン被膜熱電対の設置に使用した。ガラス製貯留槽前段に設置するポンプとして、接液部が非金属であり、90℃までの耐熱性を持つギア式ポンプを採用した。ポンプ前段には、試験中の循環流量を把握するため、ガラス製フローメーターを設置した。ポンプとフローメーター間にはシリンジを2本取り付け、水溶液採取や系内の除圧に使用した。これらの機器間は、テフロン製チューブで接続した。試験装置接液部の材料にガラス及びテフロンを選定した理由は、静置型試験と同様である。高温試験では、チャンバー入口から貯留槽に入るまでのテフロンチューブをループ状にし、一定温度に加熱された状態で貯留層に流入するようにした。

高温試験で使用する加熱チャンバーとして、静置型試験装置と同タイプで、補償導線（熱電対）及び循環水溶液用配管を取り出せるものを選定した。静置型試験と同様に、チャンバー内にステンレス製バットを設置した。

試験装置の循環流量は、溶液照射法による実規模装置の循環流量を約 $2 \text{ dm}^3/\text{min}$ であると仮定し、試験片ホルダー部で実規模装置と同じ流速を実現可能とするため、試験ホルダーの流路径を最小 13 mm とし、装置内循環流量を約 $100 \text{ cm}^3/\text{min}$ と決定した。流速に関しては、ガラス浸漬槽の径または流量（ポンプ出力）により変更することが可能である。

製作した試験装置部品のガラス製浸漬槽の詳細を Fig. 2.6、シリンジ部組図を Fig. 2.7 に示す。

2.2.3 試験ブース

試験ブースは、静置型及び流動型試験装置を設置可能であること、試験装置を保護しかつ安全に作業できることを考慮した設計とした。前面には、装置搬入、試験作業が行い易いように大型扉を設け、外側から試験装置が目視確認可能なように、透明な部材の割合を多くした。側面や上面に関しても、明るさを得るために、透明部材を使用した構造とした。また、ブース上部に排気ダクト及び排気ファンを設置した。排気ファンの能力は、ブース室内を1時間に5回程度で排気できるものとし、試験等で発生したガスを実験室の外側まで排気できる機能を持たせた。製作した試験ブースの詳細を Fig. 2.8 に示す。また、試験ブース内に設置された試験装置の写真を Fig. 2.9 に示す。

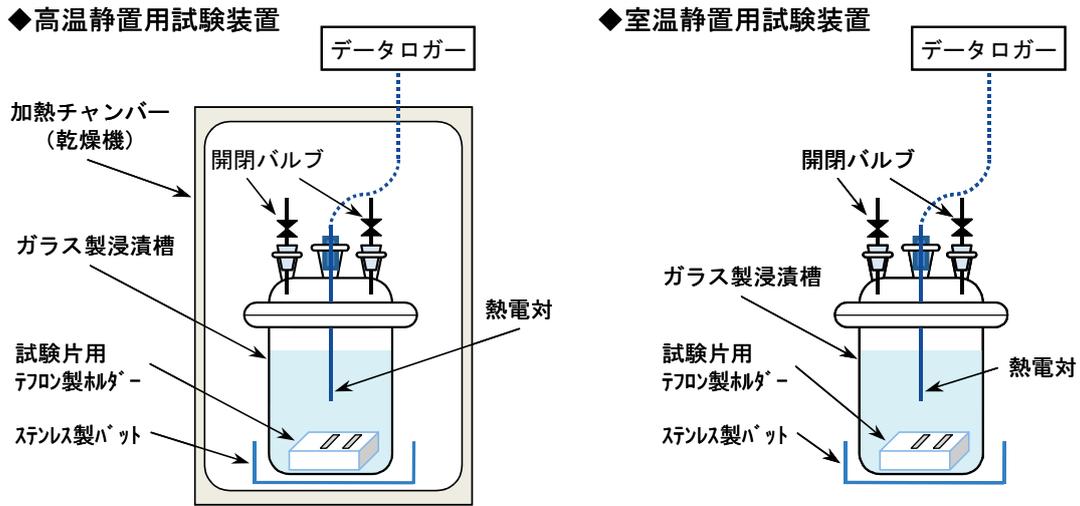


Fig. 2.1 静置型試験装置の概念図

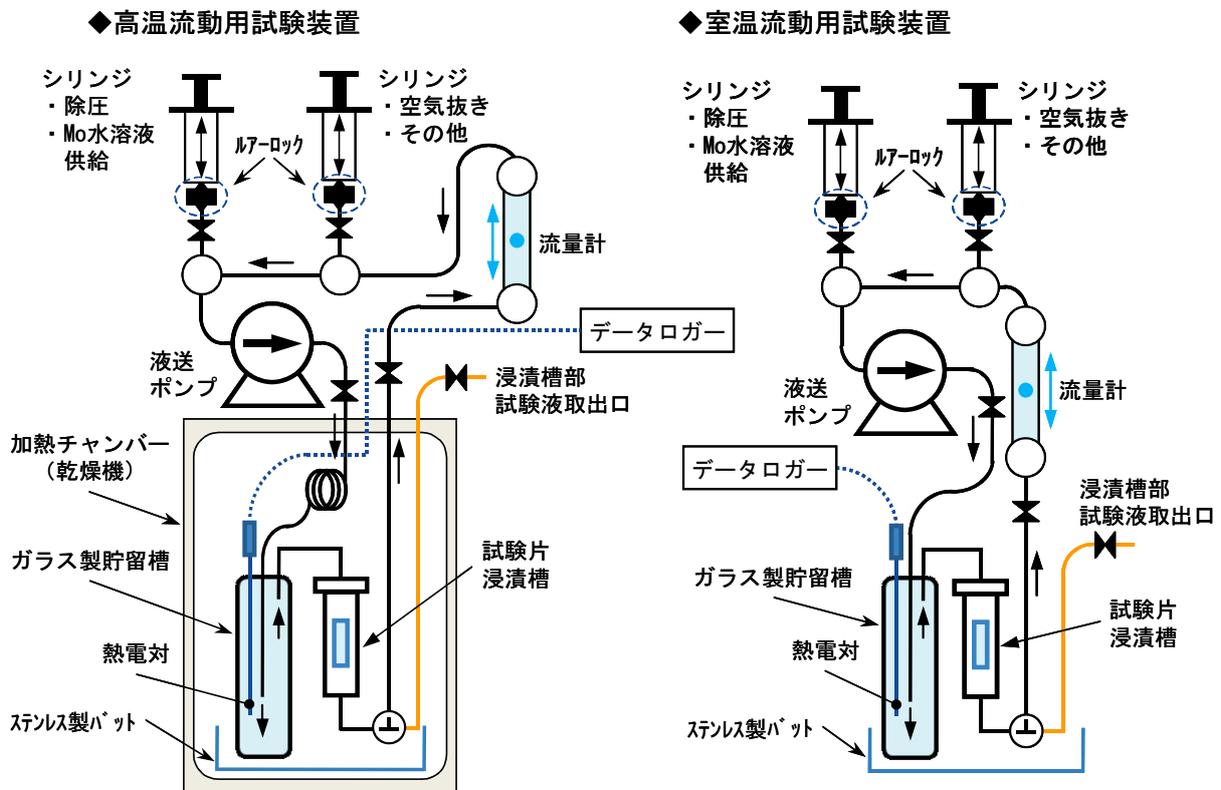


Fig. 2.2 流動型試験装置の概念図

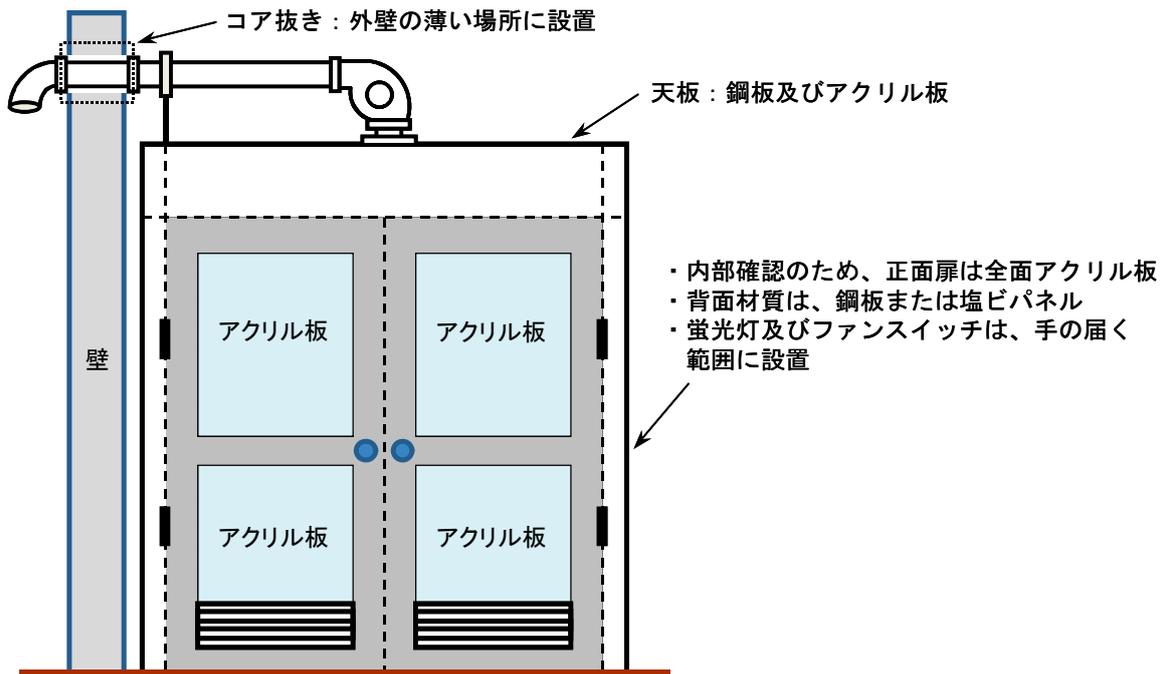


Fig. 2.3 試験ブースの概念図

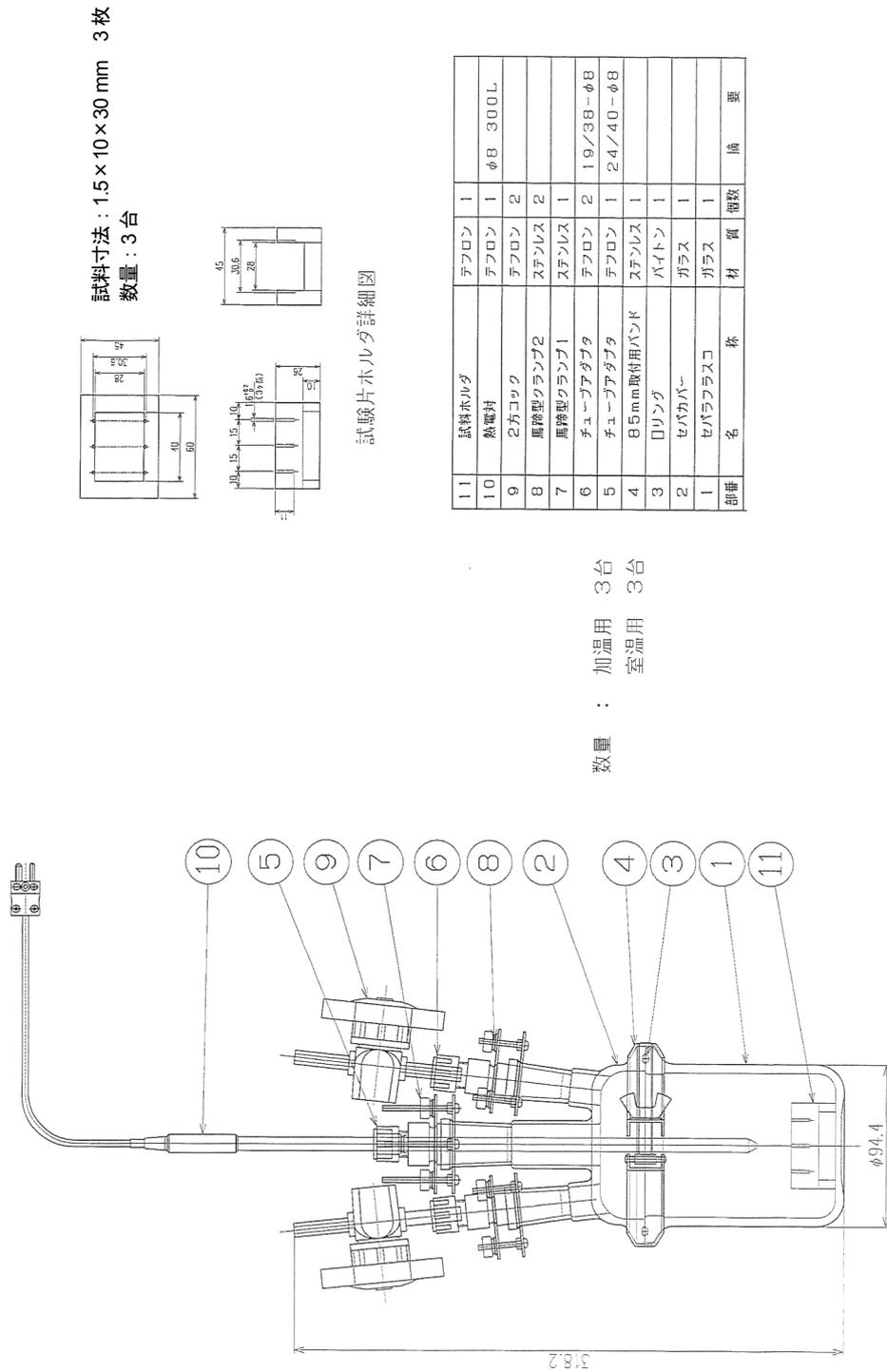
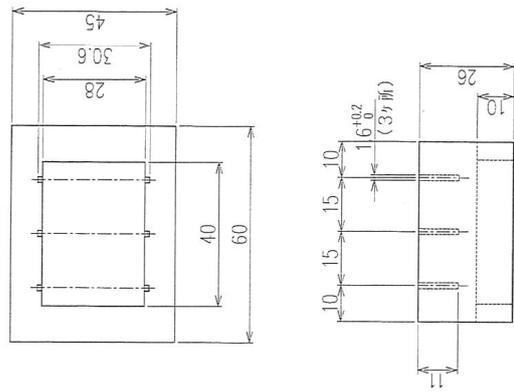


Fig. 2.4 静置型試験装置の詳細図



試料寸法：1.5×10×30 mm 3枚
数量：3台

1	静置用試験片ホルダ	テフロン	1	備	要
部番	名	材	個数	備	要

Fig. 2.5 静置型試験装置のテフロン製試験片ホルダー詳細図

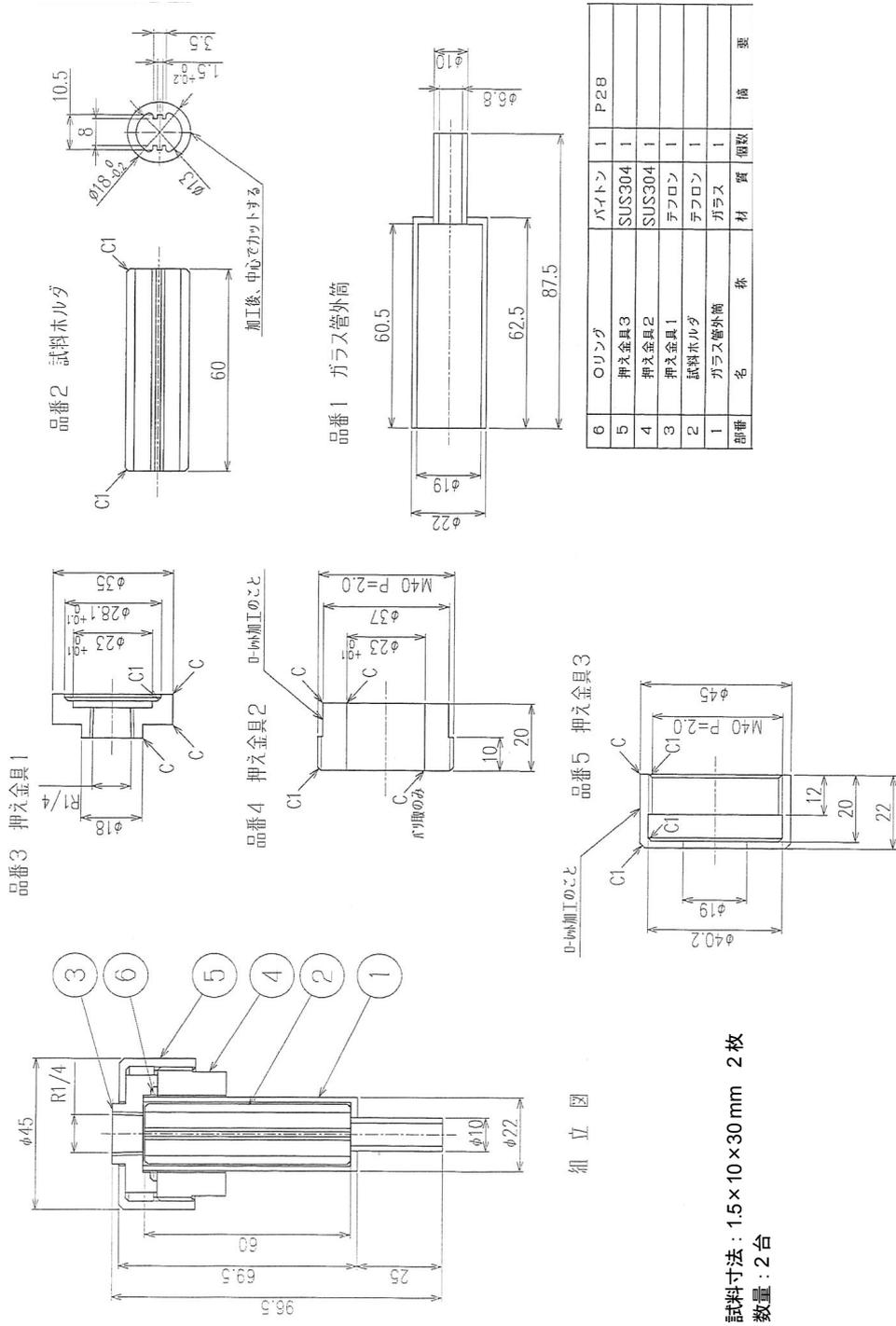
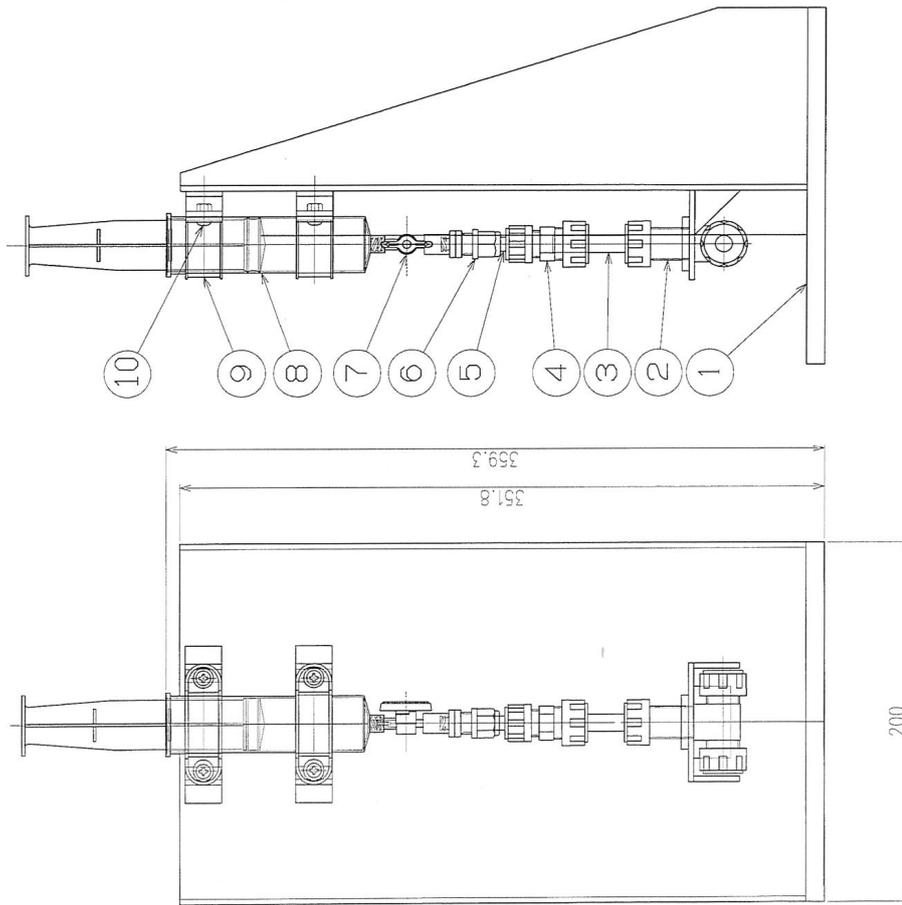


Fig. 2.6 流動型試験装置の浸漬槽詳細図



数量 : 2台

部番	名	称	材	質	個数	備	要
10	十字付小針		ｽﾌﾟﾘ		4		
9	クランプ		-		2		
8	シリンジ		-		1		
7	リアメス		チタロン		1		
6	リアストップコック		チタロン		1		
5	チューブ		チタロン		1		
4	チューブアダプタ		チタロン		1		
3	チューブ		チタロン		1		
2	三方チューブアダプタ		チタロン		1		
1	架台		塩ビ		1		

Fig. 2.7 流動型試験装置のシリンジ部詳細図



Fig. 2.9 試験ブース内の試験装置

3. 試験装置の性能試験及び操作方法

3.1 静置型試験装置

3.1.1 性能試験

静置型試験に関しては、下記項目の性能試験を実施し、全ての項目が正常であることを確認し、静置型試験が実施可能となった。

- ・外観試験：機能を害する打ち傷、凸凹、擦り傷、有害な汚れ、油脂、錆の付着等が無いことを確認した。
- ・寸法試験：図面指示されている公差を満足することを確認した。ただし、公差が図面指示されていない場合は、JIS B 0405-1991 極粗級の公差を満足することを確認した。
- ・漏洩試験：ガラス製浸漬容器（セパラブルフラスコ）に水を入れ、漏洩が無いことを確認した。
- ・動作試験：熱電対、加熱条件用に使用する加熱チャンバー（起動、恒温性）が、試験目的上問題なく作動することを確認した。また、ガラス製浸漬容器に水を注入して水温の恒温性試験を行い、水温 90℃（沸騰手前）で恒温性や再現性を確認した。

3.1.2 操作方法

- ①ガラス製浸漬容器に試験片ホルダーと試験片を設置し、試験溶液を定量入れ、ガラス製3口カバーをOリングで挟み密閉し、専用バンドで固定する。
- ②ガラス製3口カバーの中心に熱電対を差し込み設置し、残りにテフロン製開閉バルブを取り付ける。
- ③室温条件の場合、そのまま静置させる。加熱条件の場合、加熱チャンバー内に試験装置を設置し、試験温度まで昇温させる。
- ④サンプリング時には専用バンドを外し、非金属性ピンセット等で試験片を取り出す。試験片観察後、操作①～③の順に戻す。
- ⑤浸漬期間中の定期的なサンプリングにより、浸漬液の pH 測定及び Mo 濃度測定、試験片の重量測定及び顕微鏡による表面観察等を行う。

※注意事項：試験容器は密閉型なので、加熱（100℃）によって容器内の体積膨張等による容器接続部の緩みを生じる可能性がある。このため、昇温時には上部設置バルブを開けて除圧し、水溶液温度の安定を確認してバルブを閉める。また、試験容器取り出しの際には、放冷による体積収縮により容器開閉が困難となるため、バルブを開けて放冷する。

3.2 流動型試験装置

3.2.1 性能試験

流動型試験は、下記項目の性能試験を実施し、全ての項目が正常であることを確認し、流動型試験が実施可能となった。

- ・外観試験：機能を害する打ち傷、凸凹、擦り傷、有害な汚れ、油脂、錆の付着等が無いことを確認した。
- ・寸法試験：図面指示されている公差を満足することを確認した。ただし、公差が図面指示されていない場合は、JIS B 0405-1991 極粗級の公差を満足することを確認した。
- ・漏洩試験：試験装置の組み立て後、水を入れ、漏洩が無いことを確認した。
- ・動作試験：各機器（熱電対、加熱チャンバー、ギアポンプ、フローメーター）が、試験目的上問題なく作動することを確認した。また、試験装置の組み立て後、水を使用して装置内を循環させ、流動状況や各部（接合部や継ぎ手等）から漏洩が無いことを確認した。加熱条件では水温 80℃まで昇温させ、恒温性や流動安定性を確認した。

3.2.2 操作方法

- ①ガラス製浸漬部に試験片ホルダーと試験片を設置し、配管と接続部の緩みを確認する。上部シリンジ部より試験溶液を入れる。途中、ポンプを起動し、試験溶液を入れながら脱気させる。溶液注入後、しばらく循環させて漏洩の無いことを確認する。
- ②設定の流量までフローメーターを確認しながら、ポンプボリュームを調節する。
- ③室温条件の場合、そのまま流動させる。加熱条件の場合、加熱チャンバーを試験温度まで昇温させる。
- ④サンプリング時にはポンプを止め、専用の試験液取出口より浸漬槽部内の試験液を抜き取り、浸漬槽上部から非金属性ピンセット等で試験片を取り出す。
- ⑤試験片観察後、試験片をガラス製浸漬部に設置し、接続部の緩みを確認する。専用の試験液取出口より浸漬槽部内へ試験液を充填し、ポンプを起動させながら試験溶液循環状態を確認する。
- ⑥流動浸漬期間中の定期的なサンプリングにより、浸漬液の pH 測定及び Mo 濃度測定、試験片の重量測定及び顕微鏡による表面観察等を行う。

※注意事項：試験装置内は基本的に密閉しているので、加熱（80℃）によって試験溶液の体積膨張等による容器接続部の緩みを生じる可能性がある。このため、昇温時には上部シリンジ部ピストンで除圧させる。

4. まとめ

溶液照射法で用いる照射ターゲットの候補であるモリブデン酸カリウム水溶液と、キャプセル構造材料となるステンレス鋼やアルミニウム合金の両立性について確認・評価が可能な試験装置を設計・製作した。静置型試験装置は、水溶液を静置した状態で、モリブデン酸カリウム水溶液と構造材料との両立性について、JIS 規格に基づき定量的に評価可能な試験装置とした。流動型試験装置は、溶液照射法による⁹⁹Mo 製造システムの構成を模擬し、モリブデン酸カリウム水溶液をポンプで流動させて装置内を循環可能な構造とし、循環している水溶液と構造材料との両立性について評価可能な試験装置とした。また、製作したこれらの試験装置を用いた性能試験を実施し、モリブデン酸カリウム水溶液中のキャプセル構造材料に対する腐食性確認試験を行える見通しを得た。

製作した腐食性確認試験装置を大洗研究開発センターの照射試験開発棟に設置し、本試験装置によりモリブデン酸カリウム水溶液と構造材料との長期間（1年間程度）の両立性試験を開始している。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、照射試験炉センターの河村弘センター長、石原正博副センター長、石塚悦男研究主幹（前照射試験開発課長）及び原子炉施設管理部齋藤順市技術主幹から有意義なご指導、ご助言を頂きました。照射試験開発棟への試験装置設置にあたっては、照射試験開発課齋藤隆技術主幹及び石田卓也氏にご協力を頂きました。ここに明記し、謝意を表します。

著者の石川幸治は、外来研究員として平成 19～21 年度に照射試験炉センター照射試験開発課に在籍し、主に ^{99m}Tc の親核種である ^{99}Mo 製造に関する研究開発に従事しました。この研究開発を通し、JMTR を用いた照射技術及び照射キャプセルの開発に関して知見を得ることができました。在籍中、ご指導、ご鞭撻をいただきました照射試験炉センターの皆様には謝意を表します。

参考文献

- (1) 稲葉良知, 石川幸治, 蓼沼克嘉, 石塚悦男, 「溶液照射法による ^{99}Mo 製造に関する技術開発」モリブデン酸塩水溶液の特性評価, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 8, No. 2, pp. 142-153 (2009).
- (2) Y. Inaba, K. Ishikawa, T. Ishida, K. Tatenuma, E. Ishitsuka : “Development on ^{99}Mo Production Technology by Molybdenum Solution Irradiation Method” , Proc. 2008 KAERI/JAEA Joint Seminar on Advanced Irradiation and PIE Technologies, Daejeon, Korea, Nov. 5-7, JAEA-Conf 2008-010, pp. 259-267 (2008).
- (3) 稲葉良知, 石川幸治, 石田卓也, 蓼沼克嘉, 石塚悦男 : 「溶液照射法による ^{99}Mo 製造に関する研究 (1) -未照射下におけるモリブデン酸塩水溶液の特性評価-」, JAEA-Technology 2009-012, (2009).
- (4) 稲葉良知, 石川幸治, 石田卓也, 蓼沼克嘉, 石塚悦男 : 「溶液照射法による ^{99}Mo 製造に関する研究 (2) -ガンマ線照射下におけるモリブデン酸塩水溶液の特性評価-」, JAEA-Technology 2009-013, (2009).

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
物質の量	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基本単位	
	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, 電流量	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
光照度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
放射線量	ルクス	lx		lm/m ²
放射線種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		m ² cd 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	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、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (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 ³ kg s ⁻²
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	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 ² 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	接頭語	記号	乗数	接頭語	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=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=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	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=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=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm 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。
ベベル	B	
デジベル	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 =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
ファ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」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=1cGy=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 = 200 mg = 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	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ) 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

