JAEA-Technology 2008-050



スイープガス装置用トリチウムモニタの更新

Renewal of Tritium Monitor of Sweep Gas Apparatus

富田 健司 井上 修一 石田 卓也 小沼 勇一 土谷 邦彦

Kenji TOMITA, Shuichi INOUE, Takuya ISHIDA, Yuichi ONUMA and Kunihiko TSUCHIYA

大洗研究開発センター 照射試験炉センター 原子炉施設管理部

Department of JMTR Operation Neutron Irradiation and Testing Reactor Center Oarai Research and Development Center

July 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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, 2008

JAEA-Technology 2008-050

スイープガス装置用トリチウムモニタの更新

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 原子炉施設管理部

冨田 健司・井上 修一⁺・石田 卓也**・小沼 勇一・土谷 邦彦⁺

(2008年4月17日受理)

材料試験炉(JMTR)を用いてチタン酸リチウム(Li₂TiO₃)微小球充填体を装荷した照射試験 を行うための試験設備として、ブランケット照射試験設備を整備した。整備した本試験設備は、 微小球充填体から生成・放出されるトリチウムをオンラインで測定・回収するスイープガス装 置及びトリチウム増殖材領域の温度制御と中性子束の測定を行うキャプセル制御盤から構成さ れている。スイープガス装置には5台のトリチウムモニタが設置されているが、このうち測定 系トリチウムモニタ(TmIRA201)の検出部が使用不能となり、その交換が必要となった。

本報告書は、トリチウムモニタ検出部の製作及びその交換作業についてまとめたものである。

大洗研究開発センター:〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

※:出向職員(照射試験炉センター)

^{+ :}照射試験炉センター

Renewal of Tritium Monitor of Sweep Gas Apparatus

Kenji TOMITA, Shuichi INOUE⁺, Takuya ISHIDA^{**}, Yuichi ONUMA and Kunihiko TSUCHIYA⁺

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

(Received April 17, 2008)

Blanket Functional Facility (BFT) for fusion blanket development was established in the Japan Materials Testing Reactor (JMTR). The irradiation tests with Li_2TiO_3 pebble-bed were carried out with the BFT. The BFT consisted of a sweep gas system for tritium measurement and recover and a capsule controlled system for temperature control and neutron flux measurement of Li_2TiO_3 pebble-bed. Five tritium monitors (ion chambers) for tritium measurement were established in the sweep gas system. In these tritium monitors, one tritium monitor for the measurement of tritium release property (TmIRA201) was not able to be used, and then it was necessary to exchange for new tritium monitors.

This report describes the fabrication of new tritium monitors and exchange procedure.

Keywords : Blanket Functional Facility (BFT), Fusion Blanket, Li₂TiO₃ Pebble-bed, Sweep Gas Device, Tritium Monitors (Ion Chamber), Tritium, JMTR

^{+ :} Neutron Irradiation and Testing Reactor Center

^{🔆 :} Research Staff on Loan

目 次

1.	はじ	めに	<u>·</u> ··		•••		•••		•••	••	• •	• •	• •	• •	••	•••	•••	•••	•••	• •	• •	• •	• •	• •	• •	• •	•••	•••	•	• •	 •••	•••	1
2.	トリ	チウ	14	モニ	ニタ	′検	出	部(の値	吏戶	目フ	下自	Ц С	きて	Ĩ)約	医緯	と	対	策	•••						•••	•••	•		 	•••	1
3.	トリ	チウ	レム	モニ	ニタ	′検	出	部(の事	製作	乍・			••	• •	•••	•••	•••	•••		••						•••	•••	•	• •	 • •	• •	2
4.	トリ	チウ	14	モニ	ニタ	′検	出	部(わろ	交担	與作	乍美	検・		• •	•••	•••	•••	• • •		••			• •			•••	•••	•		 	•••	5
5.	まと	め・			•••		•••		•••	•••					• •	•••	•••	•••	• • •		••			• •			•••	•••	•		 	•••	7
謝辞	<u>4</u>				•••		•••		•••	• •				• •	• •	•••	•••	•••	• • •		••						•••	•••	•		 ••	• •	8
参考	文献	•••			•••		•••		•••	•••					• •	•••	•••	•••	• • •		••			• •			•••	•••	•		 	•••	8
付錡	ι Γ	トリ	チ	ウィ	ムモ	=	タ	βĿ	出붙	部の	りぞ	密封	討理	包侈	民省	帘容	器	! 	•••		• •							•••	•		 • •	• •	35

Contents

1.	Introduction	1
2.	Accident Cause and Provision of Tritium Monitor	1
3.	Fabrication of Tritium Monitor	2
4.	Exchange of New Tritium Monitor in Sweep Gas system	5
5.	Conclusion ·····	7
Ackr	nowledgement·····	8
Refe	erences	8
Appe	endix I Sealed Storage Container of Tritium Monitor	35

1. はじめに

日本原子力研究開発機構大洗研究開発センターの材料試験炉(JMTR)を用いてチタン酸リ チウム(Li₂TiO₃) 微小球充填体を装荷した照射試験(JMTR キャプセル名:96M-37J キャプセ ル及び 99M-54J キャプセル)が平成 10~18 年の間で行われ、中性子照射下における Li₂TiO₃ 微小球充填体からのトリチウムの生成・放出特性¹⁻³⁾を調べてきた。

この照射試験の試験設備として、平成8年10月にJMTR 炉室地下1階にブランケット照射 試験設備を整備した。本試験設備は、微小球充填体から生成・放出されるトリチウムをオン ラインで測定・回収するスイープガス装置及びトリチウム増殖材領域の温度制御と中性子束 の測定を行うキャプセル制御盤から構成されている。⁴⁾

スイープガス装置には、5 台のトリチウムモニタが設置されている。その内の 2 台のトリ チウムモニタ(測定系トリチウムモニタ(TmIRA201 及び TmIRA202))は、微小球充填体から のトリチウム放出量を測定するためのものである。他の 3 台のトリチウムモニタ {回収系ト リチウムモニタ(TmIRA301)、操作ボックス内トリチウムモニタ(TmIRA501)及び排気系トリ チウムモニタ(TmIRA502)}は、スイープガス中のトリチウムを操作ボックス内に設置した吸 着塔で回収した後のトリチウム濃度を測定・監視するためのものである。

平成15年の定期点検の機器交換作業時において、測定系トリチウムモニタ(TmIRA201)の 検出部(以降、TmIRA201検出部と記述)が使用不能となり、その交換が必要となった。本報 告書は、TmIRA201検出部の製作及び交換作業についてまとめたものである。

2. トリチウムモニタ検出部の使用不能までの経緯と対策

スイープガス装置の電解セル交換時に、新しい電解セルの取付け作業を実施していたところ、5 台のトリチウムモニタの指示値が同時に異常を示した。このため、電解セルの取付け 作業を中断し、スイープガス装置のスイープガスラインの遮断及び操作ボックスの封じ込め 操作を行った後、トリチウムモニタの点検を行った。

トリチウムモニタの点検を行った結果、高圧電源モジュールのヒューズ(1A)が切れていた。ヒューズの交換を行い、高圧電源モジュールの電源を投入した。5 台のトリチウムモニ タモジュール電源を全て投入した時、トリチウムモニタの指示値及び高圧電源の電圧指示値 (通常 340V が 50V に低下)が不安定であった。このため、トリチウムモニタモジュール電源 を一台づつ投入し指示値を確認した。その結果、測定系トリチウムモニタの 1 つである TmIRA201の高圧電源電圧が不安定であることが確認され、他4台のトリチウムモニタについ ては正常に作動した。また、モジュール単体での模擬入力確認、ケーブル単体での健全性確 認を行い、これらの部分は全て正常であることが分かった。 以上の結果、測定系トリチウムモニタである TmIRA201 が使用不能であることが明らかになった。この原因は、TmIRA201 検出部内部の高圧ラインの短絡又はエレクトロメータ (プリアンプ)の異常と考えられた。プリアンプについては、点検により正常であったことから、検出部内部の高圧ラインが短絡したことによる絶縁不良の原因により、使用不能になったことが分かった。検出部内部は高濃度のトリチウムガスに暴露されていたため、内面はトリチウムで汚染されており、持出し修理はできない。そのため、新規に TmIRA201 検出部を製作し、交換することにした。

3. トリチウムモニタ検出部の製作

(1) TmIRA201 検出部の仕様

スイープガス装置に設置しているトリチウムモニタは、通気型でありそれぞれの測定用途 に応じた設計となっている。トリチウムモニタの全体構成のブロック図を Fig. 3.1 に示す。 使用不能となった TmIRA201 検出部の外形図を Fig. 3.2 に示す。製作にあたっては、品質保証 計画書に基づき、以下の法令、基準及び規格に準拠して製作を行った。

- ・ 試験研究の用に供する原子炉等の技術基準に関する規則(総理府令第74号)
- ・ 試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準(15 科原安 第13 号)
- ・ 発電用原子炉設備に関する構造等の技術基準(告示 501 号)
- 日本工業規格 (JIS)
- ・ ASTM 規格及び ANSI 規格

TmIRA201 検出部の詳細仕様を Table. 3.1 に示す。また、TmIRA201 検出部の概略寸法及び溶 接箇所を Fig. 3.3 に示す。

(2) 設計耐圧計算

詳細仕様に基づいて、設計耐圧計算を行い、試験研究用原子炉施設に関する構造物等の技術基準(15科原安 第13号)を満足するか確認した。計算箇所は、TmIRA201検出部の胴部、 容器の平板部、上部フランジ部及び電極付フランジ部とした。各部における計算式を以下に 示す。

① 胴部の評価

技術基準(15 科原安 第13 号)の第35条で定められた内圧を受ける円筒形の胴における 必要肉厚計算式(3-1)に基づき、評価を行った。

$$\mathbf{t} = \frac{\mathrm{PDi}}{(2S \eta - 1.2)} \tag{3-1}$$

- t : 胴肉厚の計算上必要な厚さ(mm)
- **P** : 最高使用圧力 (M P a)
- **Di**: 胴の内径 (mm)
- S: 最高使用温度における発電用原子力設備に関する構造等の技術基準(告示 501 号)の別表第6に規定する材料の許容引張応力(N/mm²)
- **η** : 長手継手の効率

容器の平板

技術基準(15 科原安 第13 号)の第35条で定められた内圧を受ける平板における必要肉 厚計算式に基づき、評価を行った。容器の平板に設ける穴の大きさが平板の径の1/2以下の 場合、容器の平板厚さは、(3-2)式により計算した値以上を満足することが必要である。

$$\mathbf{t} = \mathbf{d} \sqrt{\frac{2\mathrm{KP}}{\mathrm{S}}}$$
(3-2)

- t : 平板の計算上必要な厚さ(mm)
- **P**: 最高使用圧力(MPa)
- d : 平板を取り付ける胴部の内径(mm)
- S: 最高使用温度における発電用原子力設備に関する構造等の技術基準(告示 501 号)の別表第6に規定する材料の許容引張応力(N/mm²)
- K : 平板取付け方法による係数

③ 上部フランジ

技術基準(15 科原安 第13 号)の第35条で定められた内圧を受ける平板における必要肉 厚計算式に基づき、評価を行った。容器の平板に設ける穴の大きさが平板の径の1/2以下の 場合、容器の平板厚さは、(3-2)式により計算した値以上を満足することが必要である。

$$\mathbf{t} = \mathbf{d} \quad \sqrt{\frac{2\mathrm{KP}}{\mathrm{S}}} \tag{3-3}$$

- **t** : 平板の計算上必要な厚さ(mm)
- **P** : 最高使用圧力(MPa)
- **d** : 平板を取り付けるボルト穴の中心直径(mm)
- S: 最高使用温度における発電用原子力設備に関する構造等の技術基準(告

示 501 号)の別表第6に規定する材料の許容引張応力(N/mm²) **K**: 平板取付け方法による係数

④ 電極付フランジ

技術基準(15 科原安 第13 号)の第35条で定められた内圧を受ける平板における必要肉 厚計算式に基づき、評価を行った。容器の平板に設ける穴の大きさが平板の径の1/2以下の 場合、容器の平板厚さは、(3-4)式により計算した値以上を満足することが必要である。

$$\mathbf{t} = \mathbf{d} \quad \sqrt{\frac{2\mathrm{KP}}{\mathrm{S}}} \tag{3-4}$$

t : 平板の計算上必要な厚さ(mm)

P : 最高使用圧力(MPa)

d : 平板を取り付けるボルト穴の中心直径(mm)

- S:最高使用温度における発電用原子力設備に関する構造等の技術基準(告示 501号)の別表第6に規定する材料の許容引張応力(N/mm²)
- K : 平板取付け方法による係数

各々の計算箇所における計算条件を Table. 3.2 に示す。これらの計算条件により計算した 結果を Table. 3.3 に示す。以上の結果により、TmIRA201 検出部の胴部、容器の平板部、上部 フランジ部及び電極付フランジ部の耐圧は十分満足することを確認した。

(3) 溶接施工方法

溶接作業は、以下の手順で行った。

まず、溶接は資格認定された溶接士により施工した。溶接方法はTIG溶接とし、溶加材は、 全て「ニッコー熔材工業㈱」とした。そして、試験研究の用に供する原子炉等の技術基準に 関する規則(総理府令第74号)に基づいて、部品の寸法、形状及び開先形状が基準を満足し ていることを承認図にて確認した。

次に、溶接施工前、開先部及びその近傍 50mm の範囲をアセトン洗浄した。溶接後、溶接部 及びその近傍をステンレス製ワイヤブラシで酸化物を除去した。最後に、溶接部の検査を行 った。

(4) TmIRA201 検出部の試験検査

製作した TmIRA201 検出部について、試験検査実施計画表(Table.3.4)を策定し、試験検 査要領と判定基準(Table.3.5)を決定した。試験検査で使用する測定器については、校正日、 有効期限を確認した。なお、性能検査における指示精度確認試験及び動作確認試験には、 TmIRA201 検出部に設置するプリアンプ及びトリチウム濃度計モジュールを用いて、試験検査 を行った。以下にその主な結果を記載する。

製作した TmIRA201 検出部の外観写真を Fig. 3.4 に示す。外観検査、寸法検査、材料検査の 結果、有害な傷、変形等のないこと、承認図に示された公差内の寸法であること、材料の化 学成分及び強度が JIS 規格に合致していることを確認した。

溶接部については、液体浸透探傷検査を行い、欠陥による指示模様がないことを確認した。 液体浸透探傷試験の写真を Fig. 3.5 に示す。また、He リーク試験ではリーク率が 1×10⁻⁷Pa・ m³/s 以下であること、耐圧試験では He ガスを 0.19MPa×30 分間加圧し、圧力降下がないこと を確認した。

性能試験として、指示精度確認試験及び密封線源(²²⁶Ra)照射による指示値の動作確認試験を行った。指示精度確認試験については、基準電流発生器接続によるモジュール指示値の確認を行い、濃度計モジュールメータの指示精度が±0.2 デカード以内であることを確認した。動作確認試験については、3.7×10⁶Bq以下の²²⁶Ra線源をTmIRA201検出部の定位置に取り付け、濃度計モジュールメータの指示値を確認し、メーカーの自主検査と立会検査での指示値の差が±10%以内であることを確認した。

校正試験では、実際の非密封トリチウムガスによる He 雰囲気中でのトリチウム濃度指示値 の値付けを行った。トリチウム放射能濃度と濃度計モジュールメータの指示値の依存性を Fig. 3.6 に示す。この結果、濃度換算係数の誤差は±10%以内であるとともに、トリチウム 放射能濃度と濃度計モジュールメータの指示値は良好な直線性を示すことが分かった。

4. トリチウムモニタ検出部の交換作業

交換作業に際しては、操作ボックス内における TmIRA201 検出部の設置位置、重量(28kg) などから、操作ボックスの前にグリーンハウスを設置(Fig4-1)し、操作ボックス前面のア クリル板を取外した後、交換作業を行わなければならなかった。このため、Fig4-2 に示すよ うな交換作業前準備、交換作業及び交換終了後の処置の3 段階に分けて作業手順を策定し、 交換作業要領書を作成した。TmIRA201 検出部の交換作業要領書を Table 4-1 に示す。

(1) 交換作業時における安全評価

TmIRA201 検出部の交換作業に伴い、操作ボックス内のトリチウム濃度及び放出されるトリ チウム量を検討した。

本交換作業は、トリチウムに汚染された配管と検出部を接続している VCR 継手を 2 箇所取 外す必要がある。この作業は、オーバーホール時期に実施している水分計交換作業時の配管 解放作業と同じと考えて、放出されるトリチウム量を評価した。

水分計交換作業実績から、操作ボックス排気流量は約 1.0m³/h、操作ボックス内の最大ト リチウム濃度は 0.07Bq/cm³であった。(操作ボックス内トリチウムモニタ TmIRA501 で測定) バックグラウンド値が約0.04Bq/cm³であることから、正味の放射能濃度は0.03Bq/cm³である。 従って、交換作業におけるトリチウム濃度は、放射線業務従事者の呼吸する空気中濃度限度 である0.7Bq/cm³を十分下回っている。また、作業時間を1.5時間とした場合、交換作業で放 出される全トリチウム量は4.5×10⁴Bqであり、JMTR 設置許可書に記載された年間放出量1× 10¹¹Bqに比べて十分少ないことが分かっている。

これらの実績より、TmIRA201 検出部の交換作業においても、トリチウム濃度及びトリチウム放出量には問題ないことを確認した。

本作業では、トリチウムによる内部被ばくの防止から、大洗研究所障害防止規程に基づい て放射線防護具を選定した。作業エリア1の作業者は、顔面は送風マスク、身体は特殊作業 衣(ワンピース)の上にビニールアノラック、足はオーバーシューズを着用した。

作業中のモニタリングは、作業エリア1の天井から移動型室内ガスモニタに接続したサン プリングホースを入れ、作業環境中のトリチウム濃度を連続測定することにした。作業エリ ア1内のトリチウム濃度が管理区域内における空気中の濃度限度である 0.7Bq/cm³を超えた 場合は作業を中止することとした。作業者が着用しているビニールアノラックのスミヤ採取 を行い、全作業が終了した時点で作業者の呼気測定による内部被ばくの確認を行うこととし た。グリーンハウス撤去後は、操作ボックスのアクリル板、作業エリア等のスミヤ採取を行 い、汚染の無いことを確認することとした。

(2) 交換作業前準備

交換する既設 TmIRA201 検出部近傍の汚染検査を行い、汚染のないことを確認した。次に、 操作ボックスのアクリル板取外し前の気密試験を行った。操作ボックスの大気比較法による 気密試験の概略図を Fig. 4.3 に示す。この結果、操作ボックスの漏洩量は 0.062vo1%/h で あり、判定基準の 0.1Vo1%/h 以内であることを確認した。この試験結果は、交換作業終了後 にアクリル板を取付けた後の気密試験の比較データとした。これらの試験検査の後、操作ボ ックスの前にグリーンハウスを設置した。

(3) 交換作業

交換する既設 TmIRA201 検出部は、使用不能になってから、前後の弁を閉じた状態であり、 スイープガス(He+H₂)が流れない期間が長く、TmIRA201 検出部の内部はトリチウム除去が 行われていない状態であった。そのため、交換前の 2 日間は弁を開け、スイープガスを 50cm³/min で流しトリチウム除去を行った。トリチウム除去後、策定した交換作業要領書に従 って、作業を実施した。以下に主な交換作業の結果を示す。

スイープガス配管に接続されている TmIRA201 検出部の排気側及び吸気側配管継手(VCR 継 手)の2箇所を取外し、取外した開放部は閉止キャップもしくは閉止プラグの取付けを行っ た。この作業の所要時間は約6分であり、この取外し作業の間でトリチウム濃度の上昇はな く、バックグランド(0.004~0.008Bq/cm³)であった。

配管を切り離して取外した TmIRA201 検出部は、ステンレス製の密封型保管容器に収納した。

保管容器に収納後、金属パッキンを挿入し、上蓋を取付けた。上蓋締付けの際は、締付けト ルクを管理した。上蓋取付け終了後、密封型保管容器内をHe ガスにより 0.15MPa に加圧し、 30 分間放置して圧力降下及び変形等の無いことを確認した。次に、He ガスを充填したまま加 圧積分法によるHe リーク試験を実施した。その結果、7.2×10⁻⁹Pa・m³/s であり、判定基準で ある1×10⁻⁷Pa・m³/s 以下であることを確認した。

製作した TmIRA201 検出部を固定台に固定し、配管継手(VCR 継手)2箇所の接続を行った。 閉止プラグを取付けた配管を開放した際、トリチウム濃度の上昇はなく、取外し時同様、バ ックグランド値(0.004~0.008Bq/cm³)であった。

配管を取付けた後、製作した TmIRA201 検出部にヒータ線及びコネクタを接続し、動作確認 を行った。濃度モジュールの電源を入れ、²²⁶Ra 線源による照射試験を行った結果、濃度計モ ジュールの指示値は 0.04 Bq/cm³であった。この結果は、TmIRA201 検出部の製作時に行った 試験検査の指示値と同じであり、正常に設置することができた。次に、スイープガス装置の 供給系より He ガスを供給し、取付けた TmIRA201 検出部について 0.15MPa×30 分間の条件で 耐圧試験を行った結果、圧力の降下がないことを確認した。また、耐圧試験後、加圧積分法 による He リーク試験を行った結果、配管継手(VCR 継手)の 2 箇所とも 1.5×10⁻⁹Pa・m³/s であり、判定基準である 5×10⁻⁷Pa・m³/s 以下であることを確認した。

(4) 交換作業終了後の処置

作業終了後、アクリル板を取付け、操作ボックスの気密試験を行った。この結果、漏洩量は 0.079vo1%/h であり、作業前に行った漏洩量と同程度であるとともに、判定基準の 0.1Vo1%/h 以内であることを確認した。試験結果を Table. 4.2 に示す。

最後に、作業終了時における汚染検査を行った。作業場所、工具、作業者マスク等に関しては、検出下限密度以下であることが確認され、汚染拡大、作業者の内部被ばくがないことを確認した。トリチウムモニタ検出部交換作業におけるスミヤ採取結果をTable.4.3 に示す。

5. まとめ

使用不能となった TmIRA201 検出部は、照射実験を行う上で重要な測定器である。この TmIRA201 検出部の製作及び交換作業の結果、以下の項目が重要であると思われる。

- (1) TmIRA201 検出部の製作に関して、作業計画、材料管理及び試験検査を品質保証計画に 基づいて実施することにより、順調に製作することができた。
- (2)本照射試験設備のようにトリチウムを扱う機器では、作業時におけるトリチウム濃度 や放出されるトリチウム量を事前に評価し作業を実施する。今回の作業では、これま での作業実績から、トリチウム濃度や放出量の評価を行い、作業上問題にならない程 度であることを把握し、作業を行った。その結果、評価した値とほぼ変わらないこと

が確認され、汚染もなく、作業を恙なく終了することができた。今後高いトリチウム 濃度や放出量が予想される作業では、安全性、被ばくの観点から、より精度の高い評 価方法を確立する必要があると考える。

- (3) 今回の交換作業で設置したグリーンハウスは、設置箇所の寸法に合わせ製作したことにより高い密封性を有するとともに、3つの作業エリアを設けたことで、作業性、放射線防護の面で有効であることが分かった。
- (4)交換作業要領書を事前に策定し、交換作業前のミーティングによる作業内容及び役割 分担を確認した結果、機器の交換、試験検査まで順調に実施することができ、汚染、 被ばくもなく無事終了した。

謝 辞

報告書をまとめるにあたり、河村 弘照射試験炉センター長、新見素二原子炉施設管理部 長から有意義なご助言、ご指導を戴きました。また、トリチウムモニタ検出部の交換作業に あたっては、原子炉施設管理部照射設備整備課各位、放射線防護及び作業時におけるトリチ ウム管理にあたっては、安全管理部放射線管理第2課の近藤吉男技術副主幹、横須賀美幸氏、 網代和広氏及び小杉山匡史氏のご協力を戴きました。また、この他にも多くの関係各位のご 協力を戴き大過なく、トリチウムモニタ検出部の製作及び交換を終了することができました。 この貴重な経験を今後に活かしていく所存であります。

参考文献

- 1) H. Kawamura, K. Tsuchiya,他5名, Tritium Breeding Blanket Development with JMTR, Proc. of the 7th International Workshop on Ceramic Breeder Blanket Interactions, (1998).
- K. Tsuchiya, M. Nakamichi, Y. Nagao, M. Enoeda, T. Osaki, 他2名, In-Situ Tritium Release Experiments of Blanket In-Pile Mockup with Li₂TiO₃ Pebble Bed in Japan, J Nucl Sci. Tech. 38, PP.996-1003, (2001).
- K. Tsuchiya, M. Nakamichi, A. Kikukawa, Y. Nagao, M. Enoeda, 他3名, In-pile Test of Li₂TiO₃ Pebble Bed with Neutron Pulse Operation, J. Nucl. Mater. 307-311, PP. 817-822, (2002).

4) H. Kawamura, H. Sagawa, E. Ishitsuka, K. Tsuchiya, N. Sakamoto, 他1名, New Facilities in Japan Materials Testing Reactor for Irradiation Test of Fusion Reactor Components, Proc. of an ENS Class 1 Topical Meeting, pp.232-239, (1996).

Table.3.1 トリチウムモニタ検出部(TmIRA201 検出部)の詳細仕様

(1)設計条件

項目	設計条件
最高使用圧力	0.15MPa
使用温度	室温~50℃
湿度	90%以下(但し結露しないこと)
機種種別	第4種容器
使用流体	ヘリウム、水素
電源	無停電電源(1φ、50Hz、100V)

(2)設計仕様

項目	条件
数量	1 基
有効体積	0.20
感度	2.7×10 ⁻²⁰ A/(Bq/m ³) 但し値付けはAir,1.101MPa)
気密度	$< 1 \times 10^{-7} \mathrm{Pa} \cdot \mathrm{m}^3 / \mathrm{s}$
結露対策	ヒータ付
耐熱	160℃(但しエレクトロメータを除く)
使用流量範囲	0.60/min以下
	バックグランド増加防止のため、カゴ状の中間電極
この方面	を設ける。

(3)使用材料

使用材料	材質(寸法)
上部フランジ(電極付)	SUS304 (ϕ 240×90mm)
下部容器	
(1) フランジ部	SUS304 (ϕ 240×34mm)
(2) 外筒部	US304TP(φ165×133mm 肉厚 5mm)
(3) 底板部	SUS304 (ϕ 165×t5mm)
(4) 配管部	SUS316L (6LV-8-VCR-3S-4TB7)

Table.3.2 TmIRA201 検出部の耐圧計算条件

① 胴部の評価

項目		条件	
最高使用圧力	Р	0.15	МРа
胴の内径	Di	155	mm
許容引張応力(75℃)	S	129	N/mm^2
継手の効率	η	1	_
材質	_	SUS304TP	—

② 容器の平板

項目		条件				
最高使用圧力	Р	0.15	MPa			
胴部の内径	d	155	mm			
許容引張応力(75℃)	S	129	N/mm^2			
平板取付け方法による係数	К	0.2	—			
材質	_	SUS304	_			

③ 上部フランジ

項目		条件				
最高使用圧力	Р	0.15	MPa			
ボルト穴の中心直径	d	204	mm			
許容引張応力(75℃)	S	129	N/mm^2			
平板取付け方法による係数	К	0.17	_			
材質	—	SUS304	—			

④ 電極付フランジ

項目		条件	
最高使用圧力	Р	0.15	МРа
ボルト穴の中心直径	d	92.2	mm
許容引張応力(75℃)	S	129	N/mm^2
平板取付け方法による係数	К	0.17	—
材質		SUS304	_

Table.3.3 TmIRA201 検出部の耐圧計算結果

① 胴部の評価

項目	結果					
(1) 式で求めた必要厚さ	0.09	mm				
使用する胴の厚さ	5.0	mm				

容器の平板

項目	結果					
(2) 式で求めた必要厚さ	3.4	mm				
使用する胴の厚さ	5.0	mm				

③ 上部フランジ

項目	結果				
(2) 式で求めた必要厚さ	3. 4	mm			
使用する胴の厚さ	5.0	mm			

④ 電極付フランジ

項目	結果		
(2) 式で求めた必要厚さ	1.9 mm		
使用する胴の厚さ	16.5	mm	

Table. 3. 4	TmIRA201	検出部の試験検査実施計画表
-------------	----------	---------------

試験検査項目	工場検査	現地検査	備考
外観検査	0	\bigcirc	
寸法検査	0	0	
員数検査	0	0	
材料検査	0		
浸透探傷検査	0	_	
He リーク検査	0	_	
耐圧検査	0		
性能検査	0	0	
校正試験	0	_	

○ :自主及び立会検査対象項目, - :検査対象外

Table.3.5	TmIRA201	検出部の試験検査要領と判定基準
-----------	----------	-----------------

試験検査項目	試験検査要領	判定基準
从 知校木	目視により構成機器の外観を確認する。	構成機器の外観に有害な
21- 鲵快宜		傷、変形等が無いこと。
十进始本	ノギス等の寸法測定機器を用いて、図面に	承認図の指示公差内である
竹伝俠鱼	示す寸法であることを確認する。	ことを確認する。
昌粉烩本	トリチウムモニタ検出部の員数を確認す	仕様記載通りの員数(1台)
貝奴恢且	る。	であること。
	トリチウムモニタ検出部構成部品の内、通	化学成分及び機械的強度
材料検査	ガスと接触する部品について、ミルシート	が、JIS 規格等を満足して
	の確認を行う。	いること。
	指定された溶接部について、浸透探傷試験	欠陥による指示模様がない
浸透探傷検査	(JIS Z 2343-1)を行い、有害な欠陥がな	こと。
	いことを確認する。	
Ⅱ。川一ク封殿	トリチウムモニタ検出部の He リーク試験	リーク率が1×10- ⁷ Pa・m ³ /s
ロビリーク試験	を行い、リーク率を確認する。	以下であること。
	トリチウムモニタ検出部に内圧 0.19MPa	有害な変形及び圧力降下が
耐圧検査	の気圧をかけて 30 分放置し、各部の変形	無いこと。
	及び圧力降下量を確認する。	
性能試験		
①指示精度	①エレクトロメータの入力に基準電流発	①濃度計モジュールメータ
確認試験	生器を接続し、濃度計モジュールのメー	指示精度が±0.2 デカー
	タ指示値を確認する。	ド以内であること
②動作確認試験	②3.7×10 ⁶ Bq 以下の ²²⁶ Ra の密封線源を定	②自主検査と立会検査の結
	位置に置いて濃度計モジュールの指示	果の差が±10%以内であ
	値を確認する。	ること。
	非密封トリチウムを He ガス中で測定し、	各放射能濃度で指示値を確
拉工论本	He 雰囲気中でのトリチウムの値付けを行	認。濃度換算係数の総合誤
1又工作[]	う。	差は±10%以内であるこ
		と。

Table.4.1 TmIRA201 検出部の交換作業要領書

I. 作業準備

No.	作業項目	作業内容	備考
1	資機材搬入	本作業に使用する資材及び機材を搬入 する。 搬入経路は、重量物・長尺物等は、トラ ック通路から搬入する。その他は人員用 気密扉から搬入する。 仮置き場所まで資材を運搬する。尚、地 下1階まで機材を降ろすのは、施設エレ ベータを使用する。	主要搬入物品 He リーク試験機材 グリーンハウス 足場パイプ 工具
2	養生	酢酸ビシート等で作業場所の床養生を 行う。 養生した足場パイプでグリーンハウス の骨組みを組み立て、グリーンハウスを 設置する。(チェーンブロック設置)	チェーンブロック
3	系内ガススイープ	トリチウムモニタ検出部取外しまで、系 内のトリチウム除去作業を行う。	

Ⅱ. トリチウムモニタ検出部の取外作業

No.	作業項目	作業内容	備考
1	保管容器蓋板取外	グリーンハウス内で保管容器の蓋板を チェーンブロック等で吊り上げる準備 をする。 蓋板の取付ボルトを外す。 蓋板を床に降ろす。	取付ボルト (M16)
2	パネル取外	パネルフレーム押さえに合マークを記 入し、操作ボックスのパネル1枚を取り 外す。 取外したパネルは、養生をして、交換作 業の妨げにならない場所に仮置きをす る。	放管にモニタリング依 頼 袋ナット (M6)
3	コネクタ取外	トリチウムモニタを電源断とする。 トリチウムモニタ検出部の電源・制御ケ ーブルのコネクタを外す。(4箇所)	
4	固定ボルト取外	トリチウムモニタ検出部を固定してい るベースチャンネルのボルト・ナットを ゆるめる。	固定ボルト・ナット (M 10)
5	配管継手取外(VCR)	トリチウムモニタ検出部の配管のVC R継手を取り外す。 取外したVCR継手両端に閉止プラグ と閉止キャップを取り付ける。	

No.	作業項目	作業内容	備考
6	トリチウムモニタ検 出部の取り出し	トリチウムモニタ検出部を固定してい るベースチャンネルとともに操作ボッ クスから取り出す。	
7	固定ボルト・ベースチ ャンネル等の撤去	取り出したトリチウムモニタ検出部か らボルト・ナット・ベースチャンネル・ ヒーターを撤去する。	
8	収 納	トリチウムモニタ検出部を保管容器の 蓋部のズレ止めアングルに取り付ける。	
9	蓋板取付	チェーンブロックにて蓋板を吊り上げ て、閉止できる準備をする。 トリチウムモニタ検出部を保管容器に 装填する。 蓋板にて保管容器を閉止する。 取付ボルトにて蓋板を閉める。	均一トルクにて除々締 めこむ。締付けトルク (kgf/cm) 1回目締付トルク: 2.8 kgf・cm 2回目締付トルク: 5.5 kgf・cm 3回目締付トルク: 8.3 kgf・cm
10	漏えい検査	フランジからの漏洩量をヘリウムリー ク試験にて確認する。 (1×10 ⁻⁷ Pa・m ² /s 以下を確認)	

Ⅲ. 新規トリチウムモニタ検出部の取付作業

No.	作業項目	作業内容	備考
1	トリチウムモニタ検 出部の搬入	更新するトリチウムモニタ検出部をグ リーンハウス内に搬入する。	
2	トリチウムモニタ検 出部の仮据付	トリチウムモニタ検出部をベースチャ ンネルに据え付ける。	
3	トリチウムモニタ検 出部の VCR 継手取外	トリチウムモニタ検出部のVCR継手の閉 止フランジを取り外す。	
4	配管継手の復旧(VCR)	VCR継手両端の閉止プラグと閉止キ ャップを取り外す。 トリチウムモニタ検出部の配管のVC R継手を復旧する。	

No.	作業項目	作業内容	備考
5	トリチウムモニタ検 出部の固定	トリチウムモニタ検出部をボルトにて 固定する。	
6	コネクタ取付	電源断を確認する。 トリチウムモニタ検出部の電源・制御ケ ーブルのコネクタを接続する。	
7	動作確認	トリチウムモニタ検出部の動作を確認 する。	
8	耐圧・漏えい検査	復旧した配管継手部 (VCR) の漏洩量を 確認する。(5×10 ⁻⁷ Pa・m ² /s 以下を確認)	
9	パネル復旧	パネルのパッキンを交換する。 パネルを操作ボックスに取り付ける。	
10	気密検査	操作ボックスを-300Pa とし、1 時間後の 漏洩量を確認する。	

Ⅳ. 後片付け

No.	作業項目	作業内容	備考
1	保管容器搬出	トリチウムモニタ検出部を収納した保 管容器をグリーンハウスの外に搬出す る。 JMTR 施設内の指定場所に保管容器を移 動する。	
2	グリーンハウス内汚染検査	放管にスミヤを依頼	
3	グリーンハウス撤去	グリーンハウスを撤去する。	
4	機材搬出	使用機材の汚染サーベイを行い、所外へ 搬出する。	
5	系内水分除去	系内をスイープし、水分除去を行う。	

Table.4.2 操作ボックスの気密試験結果

測定日 2005.4.11

アクリル板開封	測定時	差圧A	大気圧B	グローブボックス内	グローブボックス	漏れ率
取外し前	間			温度	内温度	
		Pg	PA	Tg	Tg	LA
	(min)	(Pa)	(Pa)	(°C)	(K)	(vol%/h)
	0	311	100875	21.3	294.5	-
	60	315	100907	21.2	294.4	0.062

測定日 2005.4.14

アクリル板開封	測定時	差圧A	大気圧B	グローブボックス内	グローブボックス	漏れ率
取外し後	間			温度	内温度	
		Pg	PA	Tg	Tg	LA
	(min)	(Pa)	(Pa)	(°C)	(K)	(vol%/h)
	0	305	101437	18.1	291.3	-
	60	232	101445	18.1	291.3	0.079

漏れ率計算式

LA= {(Pg - Pg') + (PA / Tg)(Tg - Tg') - (PA - PA')} * 100 / PA

Table.4.3 トリチウムモニタ検出部交換作業におけるスミヤ採取結果

(1)作業前準備

測定箇所	表面密度 (Bq/cm ²)
トリチウムモニタ上部	$< 2.8 \times 10^{-1}$
トリチウムモニタ下部	$< 2.8 imes 10^{-1}$
トリチウムモニタ支持架台	3. 4×10^{-1}
アクリル板内面	$< 2.8 imes 10^{-1}$

(2)交換作業中

①使用不能の TmIRA201 検出部取外し前

測定箇所	表面密度(Bq/cm ²)
トリチウムモニタ出口側既設配管	5. 7×10^{-2}
トリチウムモニタ入口側既設配管	4. 9×10^{-2}
操作ボックス底部	4. 7×10^{-2}
作業エリア1床部	3. 5×10^{-2}

②使用不能の TmIRA201 検出部取外し後

測定箇所	表面密度(Bq/cm ²)
作業エリア1床面	$< 3.5 imes 10^{-2}$
作業エリア2床面	$< 2.9 \times 10^{-2}$
グリーンハウス外側	$< 3.1 imes 10^{-2}$

③新規 TmIRA201 検出部取付け後

測定箇所	表面密度(Bq/cm ²)
操作ボックス内	$< 3.0 imes 10^{-2}$
操作ボックス床	$< 3.1 \times 10^{-2}$
作業エリア1床面	$< 3.3 imes 10^{-2}$
作業エリア2床面	$< 3.4 imes 10^{-2}$
グリーンハウス外側	$< 4.1 \times 10^{-2}$

(3) 交換作業後

測定箇所	表面密度(Bq/cm ²)
作業エリア1床面	$< 3.4 imes 10^{-2}$
作業エリア2床面	$< 3.3 imes 10^{-2}$
着替場所床	$< 3.3 imes 10^{-2}$
全面マスク表面(1)	$< 3.1 \times 10^{-2}$
全面マスク表面(2)	$< 3.1 \times 10^{-2}$
工具 1	$< 3.1 \times 10^{-2}$
工具 2	$< 4.1 \times 10^{-2}$
保管容器表面	$< 3.2 imes 10^{-2}$



Fig. 3.1 トリチウムモニタの全体構成のブロック図



-21 -



Fig. 3.3 TmIRA201 検出部の概略寸法及び溶接箇所

製作した TmIRA201 検出部の外観写真



Fig. 3.4(1) (集電極部)

上部フランシ、補止電極



Fig. 3.4(2) 製作した TmIRA201 検出部の外観写真 (補正電極部)

JAEA-Technology 2008-050



Fig. 3. 4(3) (銅リング (パッキン))



Fig. 3. 4(4)製作した TmIRA201 検出部の外観写真
(上部フランジカバー取付後)

液体浸透試験の写真



Fig. 3.5(1) 検出器内部浸透液吹付け



Fig. 3.5(2) 検出器内部現像液吹付け



Fig. 3.5(3) 検出器外側浸透液吹付け



Fig. 3.5(4) 検出器外側現像液吹付け



Fig. 3.6 トリチウム放射能濃度と濃度計モジュールメータの指示値の依存性





Fig. 4.2 交換作業前準備、交換作業及び交換終了後の処置の3段階に分けた作業手順



Fig.4.3 気密試験(大気圧比較法)の概略図

付録 I トリチウムモニタ検出部の密封型保管容器

1. 概 要

スイープガス装置に設置されている使用不能のトリチウムモニタ検出部(TmIRA201 検出部) を取外し、その TmIRA201 検出部を保管するための密封型保管容器を製作した。

2. 設計及び製作

使用不能のTmIRA201検出部を保管するためには、密封型の保管容器が必要である。このため、Table. I.1に示すような密封型保管容器の製作仕様とした。保管容器の製作にあたっては、品質保証計画書に基づき、以下の法令、基準及び規格に準拠した。

(1) 試験研究の用に供する原子炉等の技術基準に関する規則(総理府令第74号)

- (2) 試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準(15 科原安 第13 号)
- (3) 発電用原子炉設備に関する構造等の技術基準(告示 501 号)
- (4) 日本工業規格 (JIS)
- (5) ASTM 規格及び ANSI 規格

また、密封型保管容器の外形図をFig. I.1に示す。試験検査は、材料検査、外観検査、寸 法検査、溶接部検査(外観検査及び浸透探傷試験(JIS Z2343-1 Ⅱ-C-d))、耐圧検査及び ヘリウムリーク検査を行い、判定基準内であることを確認した。製作したトリチウムモニタ 検出部用密封型保管容器の外観、液体浸透探傷試験、耐圧試験、ヘリウムリーク試験の写真 をFig. I.2~5に示す。

項目	仕 様		
最高使用圧力	0.12MPa		
最高使用温度	50°C		
ヘリウムリーク率	$1 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$		
材質	SUS304		
主要寸法	外観寸法 約460 φ×約637L (mm) (取手を含まず)		
	容器内寸法 約333φ×約370L (mm)		
その他	1)ガス置換用の手動弁及び VCR 継手を取付ける。		
	2)手動弁は、ベローシール方式とする。		
	3)フランジ部のシールは、金属0リングを使用する。		
	4)機械的な接続部を除いた箇所の接続方法は、TIG 溶接とする。		
	5) 脱脂洗浄をする。		

Table. I.1 トリチウムモニタ検出部用密封型保管容器の製作仕様



Fig. I.1 トリチウムモニタ検出部用密封型保管容器の外形図



Fig. I.2(1) トリチウムモニタ検出部用密封型保管容器の外観写真(側面部)



Fig. I.2(2) トリチウムモニタ検出部用密封型保管容器の外観写真(内面部)



Fig. I.3(1) トリチウムモニタ検出部用密封型保管容器の液体浸透探傷試験(浸透液塗付)



Fig. I.3(2) トリチウムモニタ検出部用密封型保管容器の液体浸透探傷試験(現像液塗付)



Fig. I.4 トリチウムモニタ検出部用密封型保管容器の耐圧試験



Fig. I.5 トリチウムモニタ検出部用密封型保管容器のヘリウムリーク試験

表1. SI 基本単位					
甘木昌	SI 基本単位				
本平里	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	А			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光 度	カンデラ	cd			

如去早	SI 基本単位			
和1.12.里	名称	記号		
面 積	平方メートル	m ²		
体積	立法メートル	m ³		
速 さ , 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)	キログラム毎立法メートル	kg/m^3		
質量体積(比体積)	立法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		
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	$mo1/m^3$		
輝 度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2		
屈 折 率	(数の) 1	1		

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号	
10^{24}	Э 9	Y	10^{-1}	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピョ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^{3}	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10 ¹	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	у	

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位 SI 組立畄位

	51 和立中位				
組立量	夕敌	記是	他のSI単位による	SI基本単位による	
	2日 1小	記与	表し方	表し方	
平 面 角	ラジアン ^(a)	rad		$\mathbf{m} \cdot \mathbf{m}^{-1} = 1^{(b)}$	
立 体 角	ステラジアン ^(a)	$\mathrm{sr}^{(\mathrm{c})}$		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$	
周 波 数	、ヘルツ	Hz		s^{-1}	
力	ニュートン	Ν		m•kg•s ⁻²	
压力, 応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	
工率,放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$	
電荷,電気量	フーロン	С		s•A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$	
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$	
磁東	ウェーバ	Wb	V•s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K	
光東	ルーメン	1m	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$	
照度	ルクス	1x	1m/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$	
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹	
吸収線量, 質量エネル	HIZ	Cu	T/kg	22	
ギー分与, カーマ		Gy	J/ Kg	m•s	
線量当量,周辺線量当					
量,方向性線量当量,個	シーベルト	Sv	J/kg	m ² • s ⁻²	
人禄量当量, 組織線量当					

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
(b) 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"1"は明示されない。
(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位			
組工重	名称	記号	SI 基本単位による表し方	
粘度	モパスカル 秒	Pa•s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$	
力のモーメント	ニュートンメートル	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	
表 面 張 ナ	リニュートン毎メートル	N/m	kg • s ⁻²	
角 速 厚	ミラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$	
角 加 速 厚	E ラジアン毎平方秒	rad/s^2	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	E ワット毎平方メートル	W/m^2	kg • s ⁻³	
熱容量,エントロピー	- ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム 毎ケルビン	$J/(kg \cdot K)$	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	
質量エネルギー		x (1	2 _2 _1	
(比エネルギー)	シュール毎キロクフム	J/kg	m ² • s ² • K ¹	
熱伝導率	³ ワット毎メートル毎ケ ルビン	₩/(m•K)	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{K}^{-1}$	
体積エネルギー	ジュール毎立方メート ル	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{A}^{-1}$	
体 積 電 荷	クーロン毎立方メート ル	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$	
電気変位	クーロン毎平方メート ル	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$	
誘 電 🖣	「ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	
透磁率	国ヘンリー毎メートル	H/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2} \cdot \mathbf{A}^{-2}$	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$	
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケル	T (1 12)	2211	
モル熱容量	L ビン	J/(mol·K)	m [*] •kg•s [*] •K [*] •mol [*]	
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$	
吸収線量率	ミグレイ 毎秒	Gy/s	$m^{2} \cdot s^{-3}$	
放 射 強 厚	E ワット毎ステラジアン	W/sr	$\mathbf{m}^4 \cdot \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} = \mathbf{m}^2 \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3}$	
放射輝 厚	リット毎平方メートル	$W/(m^2 \cdot sr)$	$\mathbf{m}^2 \cdot \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} = \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3}$	

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	0	$1^{\circ} = (\pi / 180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1, L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	1B=(1/2)1n10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で 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 単位であらわされる数値			
電子ボルト	eV	$1 \text{eV}=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{J}$			
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg			
天 文 単 位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m			

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と 併用されるその他の単位

伊用されるその他の単位					
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値	
海		里		1 海里=1852m	
1	ツ	F		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s	
P		ル	а	$1 \text{ a=} 1 \text{ dam}^2 = 10^2 \text{m}^2$	
へ ク	ター	ル	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²	
バ	-	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa	
オンク	「ストロ・	- 4	Å	1 Å=0. 1nm=10 ⁻¹⁰ m	
バ	-	\sim	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$	

表9 固有の名称を含むCGS組立単位

	名称		記号	SI 単位であらわされる数値			
工	N	グ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダ	イ	\sim	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポ	ア	ズ	Р	1 P=1 dyn⋅s/cm²=0.1Pa・s			
ス	トーク	ス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s			
ガ	ウ	ス	G	1 G 110 ⁻⁴ T			
T.	ルステッ	F	0e	1 Oe 🛔 (1000/4π) A/m			
7	クスウェ	ル	Mx	1 Mx #10 ⁻⁸ Wb			
ス	チル	ブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$			
朩		ŀ	ph	$1 \text{ ph}=10^4 1 \text{ x}$			
ガ		ル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{m/s}^2$			

	表10. 国際単位に属さないその他の単位の例						
名称				記号	SI 単位であらわされる数値		
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq		
\mathcal{V}	\sim	トク	゛ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ			ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy		
\mathcal{V}			L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv		
Х	線	単	位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm		
ガ		ン	7	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$		
ジ	ャン	(ス:	キー	Jy	$1 \text{ Jy}=10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$		
フ	л.	ル	5		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m		
メー	ートル	系カラ	ット		1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4} kg		
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準	大 気	〔圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
力	口	リ	-	cal			
Ξ	ク		ン	u	$1 \text{ u} = 1 \text{ um} = 10^{-6} \text{ m}$		

この印刷物は再生紙を使用しています