JAEA-Technology 2013-008



JMTR 照射試験用計測キャプセルの 製作期間短縮の検討

Investigation on Shortening Fabrication Process of Instrumented Irradiation Capsule of JMTR

永田 寛 井上 修一 山浦 高幸 土谷 邦彦 長尾 美春

Hiroshi NAGATA, Shuichi INOUE, Takayuki YAMAURA Kunihiko TSUCHIYA and Yoshiharu NAGAO

> 大洗研究開発センター 照射試験炉センター 材料試験炉部

Department of JMTR Neutron Irradiation and Testing Reactor Center Oarai Research and Development Center 日本原子力研究開発機構

June 2013

Japan Atomic Energy Agency

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, 2013

JAEA-Technology 2013-008

JMTR 照射試験用計測キャプセルの製作期間短縮の検討

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 材料試験炉部

永田 寬、井上 修一、山浦 高幸、土谷 邦彦、長尾 美春

(2013年3月6日受理)

JMTR の改修は平成 22 年度に完了し、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 に対する補修も完了し、現在、JMTR 再稼働に向けた準備を実施している。JMTR 再稼働後は、 軽水炉の安全研究や基礎基盤研究、医療用ラジオアイソトープ等の生産のための照射試験が実施 される予定である。一方で、利用者にとって魅力的な試験炉とするため、利用性の向上を検討し てきた。その一環として、照射利用申込から照射試験完了までの期間(ターンアラウンドタイム) 短縮について検討した。検討にあたっては、別途試作した照射キャプセルの製作プロセスを分析 した。その結果、照射キャプセルの部品の共通化や電気ヒータ等の計装類については既製品を利 用し、検査工程の見直し等により、これまで製作に 6 カ月要していた照射キャプセルについては、 その製作期間を約 2 カ月短縮できることがわかった。

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

JAEA-Technology 2013-008

Investigation on Shortening Fabrication Process of Instrumented Irradiation Capsule of JMTR

Hiroshi NAGATA, Shuichi INOUE, Takayuki YAMAURA, Kunihiko TSUCHIYA and Yoshiharu NAGAO

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

(Received March 6, 2013)

Refurbishment of The Japan Materials Testing Reactor (JMTR) was completed in FY2010. For damage caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, the repair of facilities was completed in October 2012. Currently, the JMTR is in preparation for restart. Irradiation tests for LWRs safety research, science and technologies and production of RI for medical diagnosis medicine, etc. are expected after the JMTR restart. On the other hand, aiming at the attractive irradiation testing reactor, the usability improvement has been discussed. As a part of the usability improvement, shortening of turnaround time to get irradiation results from an application for irradiation use was discussed focusing on the fabrication process of irradiation capsules, where the fabrication process was analyzed and reviewed by referring a trial fabrication of the mockup capsule. As a result, it was found that the turnaround time can be shortened 2 months from fabrication period of 6 months with communize of irradiation capsule parts, application of ready-made instrumentation including the sheath heater, reconsideration of inspection process, etc.

Keywords : JMTR, Irradiation Capsule, Fabrication Process, Shortening of Turnaround Time

目 次

1. はじめに	1
2. JMTR の概要	1
3. 参照した試作試験用キャプセル	2
4. 参照キャプセルの製作工程	4
4.1 キャプセル部品の製作	4
4.2 キャプセルの組立	6
5. 参照キャプセルの検査	8
5.1 キャプセル部品の検査	8
5.2 キャプセル組立の検査	9
6. キャプセル製作期間短縮のための検討	11
7. まとめ	13
謝 辞	13
参考文献	13

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of JMTR	1
3. Referred Irradiation Capsule for Verification of Fabrication	2
4. Fabrication of Referred Irradiation Capsule	4
4.1 Parts Fabrication	4
4.2 Assembly of Irradiation Capsule	6
5. Inspection of Reffered Irradiation Capsule	8
5.1 Parts	8
5.2 Assembly	9
6. Discussion of Shortening Fabrication period	11
7. Summary	13
Acknowledgements	13
References	13

This is a blank page.

1. はじめに

原子力機構 大洗研究開発センターにある JMTR は、平成 18 年 8 月に一旦停止し、4 年間か けて改修を実施¹¹し、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震(大洗地区は震度 5 強)に対する施設の補修、健全性確認を行い、再稼動する予定²⁾³⁾である。

JMTR 再稼働後は、軽水炉の安全研究や基礎基盤研究、医療用ラジオアイソトープ等の生産の ため技術開発³⁾等のための照射試験を実施することになっている⁴⁾⁵⁾。

一方で、JMTR を利用した照射試験の利用性を向上させるため、照射利用の申し込みを受けて から照射試験及び照射後試験を行い結果を利用者に報告するまでの一連の期間(ターンアラウン ドタイム)を短くし、一度に多くの照射試験が実施できるようにするための検討を実施してきた。

ターンアラウンドタイムを短縮するための方策としては、照射利用の手続きのための期間、照 射試料を入れるための容器である照射キャプセルの製作期間及び照射試験後のデータを出すまで の期間の短縮等がある。

本報では、キャプセルの製作期間の短縮のための検討を行い、その結果について報告する。検 討にあたっては、これまで JMTR で製作実績があり、今後数多く照射されることが予想させる試 料の装荷を想定し、当該照射試験に必要な温度制御システムを採用した計測付キャプセルと同等 な別途試作した試験用キャプセルのプロセスを分析することにより、設計、製作及び検査の工程 毎の期間短縮のための検討を行った。

2. JMTR の概要

JMTR⁶ (Japan Materials Testing Reactor、50MW) は、軽水炉燃料や材料、核融合炉材料等の中性子照射試験に幅広く利用されている軽水減速冷却タンク型の汎用の材料試験炉であり、高速中性子束、熱中性子束ともに最大 4×10¹⁸ m⁻²s⁻¹の世界でもトップクラスの照射能力を有している。

JMTR 炉心は、燃料要素及び反射体要素からなる燃料領域とその周辺のベリリウム及びアルミ ニウム反射体が配置された反射体領域から構成される。燃料要素は、LEU 燃料の燃料ミートをア ルミニウム合金で被覆した 19 枚の燃料板から構成される。制御棒は、中性子吸収材にハフニウム を用い、下部にはフォロワ燃料が取り付けられている。

各反射体要素には照射試料を挿入できる照射孔があり、そこに試料(試験片)を入れた容器(照 射キャプセル)を配置して照射試験を行う。照射試験に当たっては、照射利用者の希望する中性 子束レベルに合わせて、JMTR 炉心への装荷位置を選択することができる。また、キャプセル内 において照射試料が配置できるのは、熱電対やヒータ、試料スペーサ等を含め、長さ約1000mm、 内径(~100mm)の領域である。

3. 参照した試作試験用キャプセル

JMTR で使用するキャプセルは、外筒管、上下部端栓、試料ホルダ、スペーサ等から構成されている。このうち、温度制御等を行うキャプセル(計測付キャプセル)には、温度測定及び制御を行うための熱電対、照射試料の加熱用のヒータ等が追加される。

図 1 に計測付キャプセルの例を示す。このようにキャプセルは、内部に熱電対、ヒータ及び 真空制御配管を配置することにより、照射中の試料の温度計測や温度制御を行う。

照射キャプセル内に配置された熱電対、ヒータ等の計装は、図 1 に示すように、キャプセル から保護管と呼ばれるステンレス製のチューブを通して原子炉の外に取出され、炉外に設置した 計測装置または制御装置に接続して、温度の計測及び制御を行う。

照射キャプセルの製作期間の短縮のための検討を行うため、別途試作した試験用のキャプセル を対象とした。この試作試験用の照射キャプセルは、JMTR 再稼働後に、多数の使用が見込ま れる温度制御を行う計測付キャプセルを想定している。

この照射キャプセルに装荷する照射試料については、JMTR の利用目的の中でも非常に実績の多い軽水炉の安全研究や材料の基礎研究等の照射試験に多数供されるシャルピー試験片、引張 試験片等としている。

本照射キャプセルの温度制御方式については、真空温度制御、ヒータ温度制御及びこれらを併 用した温度制御があるが、一度の試作で、両方の制御方式の検討が可能な、真空温度制御及ぶヒ ータ温度制御を併用する方式としている。

照射試料の照射試験中の温度データや、照射試験後の中性子照射量をモニターするための計装 品の選定を行い、試料温度のオンライン計測を行うために熱電対を、中性子照射量を測定するた めにフルエンスモニタを試料の周囲、近傍に設置している。

試作試験用キャプセルの詳細を以下に示す。

(1) 試作試験用キャプセルの仕様

本キャプセルの設計条件は、表1及び表2に示す通り。

圧力については、原子炉一次冷却系の最高使用圧力が約 1.5MPa(15kg/cm²)であるため、 原子炉の一次冷却水と接する外筒管及び保護管の最高使用圧力は、原子炉一次冷却系の圧力の約 1.2 倍の 1.76MPa としている。また、外筒管内及び保護管内はガスの温度上昇による圧力上昇 分を考慮して、その内側にかかる最高使用圧力を 0.29MPa としている。

温度については、キャプセルの外周部の温度は、原子炉一次冷却水入口温度の最高温度と同一の49℃とし、キャプセル内に装荷した試料の設計温度を100℃としている。

本キャプセルは、図2に示すように、「本体部」及び「保護管部」より構成される[¬]。本体部 は、φ60mmのステンレス鋼管製の「外筒」の内部に、試験片及びアルミニウム製試料ホルダ 等を内包したステンレス鋼管製の「内筒」(内筒A及び内筒B)を2段積み重ねて装荷する構造 としている。内筒Aには、シャルピー衝撃試験片、小型引張試験片及び硬さ試験片が、内筒B にはリング試験片が照射試料として装荷されている。内筒Aは、電気ヒータによる温度制御を 行えるようにするため、その外側に配置される「ヒータホルダ」にはコイル状にシースヒータが 巻き付けられている。また、温度測定を行う熱電対には軽水炉条件に最適な K 型を、中性子照 射量測定を行うフルエンスモニタにはアルミニウム型を選定し装荷している。

製作に係る工事フローを図 3 に示す。また以下に、本キャプセルを構成する主要な部品及び 部組品の概略を示す。

① 外筒及び外筒上部·下部端栓

外筒には、外径 φ 60mm、内径 φ 56mm の SUS316 (JIS G 3459:冷間仕上継目無鋼管) を使用している。外筒に取り付ける上部・下部端栓は SUS316(JIS G 4303)相当を用いて製 作し、上部端栓は、シースヒータや熱電対等の引出しに支障のないように設計している。ま た、冷却水層を確保するため外筒管表面にパッドを設け、その設置位置は軸方向に 2 箇所と し、それぞれの箇所で径方向に 4 ヶ所設けている。

なお、実際の JMTR キャプセルの製作に用いる外筒及び端栓部材は、SUS316L(低 Co 材) 継目無ステンレス精密鋼管及び SUS316L(低 Co 材)であるが、本製作は、試作試験のため JIS 規格の SUS316 材を用いている。

保護管

保護管は、計測線、管類を原子炉一次冷却水から保護しつつ、キャプセル上部まで引き出 すものであり、外径 φ 25mm の SUS304(JIS G 3459 冷間仕上継目無鋼管)を使用し製作して いる。なお、通常、保護管は、原子炉圧力容器を貫通し容器上部まで引き出されるため、約 6000mm の長さを必要とするが、本キャプセルは試作試験に留められるため、通常より短い もの(約 2000mm)を採用している。

③ 内筒 A、内筒 B 及びヒータホルダ

内筒は、外径 φ 40mm、内径 φ 37mm の SUS316(JIS G 3459)を用いて製作し、内部に試 験片及びアルミニウム製の試料ホルダを装荷している。内筒 A の外側に配置するヒータホル ダには、ヒータをコイル状に巻き付けるための螺旋状の溝を設けている。その他、内筒内に は、試料等の温度を測定するための K 型熱電対、中性子照射量を測定するためのフルエンス モニタが所定の位置に取付けられている。

(2) 照射試料

本キャプセルの製作は、試作試験に留められるため、照射試料は、SUS316 で製作する模擬試 験片とし、内訳は、シャルピー衝撃試験片、小型引張試験片、硬さ試験片及びリング試験片とし ている。これら照射試料の詳細形状及び寸法を図4に、各種試験片毎の主要寸法を表3~表5に 示す。

- (3) 計装品
 - ① 熱電対

熱電対は、各内筒内に配置した照射試料等の温度測定及び温度制御用として装荷されている。

② シースヒータ

電気ヒータによる照射試料の温度制御機能を付加するため、ヒータホルダ外表面の所定位 置に設けた溝部にシースヒータを巻き付けられている。

③ フルエンスモニタ

中性子照射量を測定することを想定し、各内筒内にフルエンスモニタの模擬品を装荷され ている。

4. 参照キャプセルの製作工程

4.1 キャプセル部品の製作

試作試験用キャプセルの部品数は約 60 点である。そのうち、外筒管やヒータなど、既製品を 除いたほとんどの部品は、加工方法の健全性、工程確認、品質管理等の観点から、JIS 規格に適 合したステンレス鋼やアルミニウムの無垢棒から加工・製作した。一部部品の図面と外観写真を 図5に示す。

キャプセルの部品は、大きく分けて、外筒管や端栓など、管材や棒材から削り出して製作する もの、ヒータや熱電対など、既製品または受注品に準備するもの、断熱材等に使用するアルミナ など、成形加工するものに分類される。これらの部品の製作には、部品ごとに製作期間が異なる が、棒材から削り出して加工するものもあるため、最長で3カ月ほどの時間を要する。

なお、フルエンスモニタについては、JMTR においてキャプセルの照射条件及び製作工程に 合わせてその都度製作される。

(1) 管材から削り出して製作するもの

外筒管等は、管材から削り出して製作する。なお、キャプセルで使用する外径 40mm や外径 60mm の鋼管材は、主に発電所の給水加熱器用に使用されているものである。

外筒管等の製作にあたっては、外径や内径寸法が既製品と同一寸法であれば、設計上必要な長 さに切断するだけなので、仕上げ加工等も含めて、数日程度で製作が完了する。しかし、既製品 と外径や内径寸法が異なる場合は、外径または内径を合わせるための機械加工を伴うため、製作 には14日ほど要する。

本キャプセルの試作試験では、外筒管及び内筒管の製作を行っているが、どちらも既製品から 加工等行ったため、同加工製作に要する日数は、4日間であった。

以上のことから、製作日数を出来るだけ短くするためには、既製品の加工で対応できるような キャプセル設計をすることが重要である。 (2) 棒材から削り出して製作するもの

上下部端栓等は、棒材から削り出して製作を行う。

棒材から削り出すキャプセル部品のうち、複雑な加工を必要とする上部端栓やヒータホルダ等 のキャプセル部品に比べて、下部端栓など構造が簡単な部品については、機械加工により 2 週 間程度で製作できる。計測線等を通すための穴加工を必要とする上部端栓については、細径穴に 関しては、ドリル加工後に仕上げを要するため、製作には、1ヵ月ほど要する。

その他、ヒータホルダ等の複雑な構造の部品については、らせん状のヒータの溝や外側に通す 計測線の溝の加工が必要となるため、これについても1カ月ほどの製作期間を要する。

本試作試験においては、上下部端栓やスペーサ等はステンレスの棒材から、ヒータホルダや熱 媒体等はアルミニウム合金の棒材から加工を行っている。その結果、製作期間としては、約2 カ月となっている。

この製作結果から、部品製作は工作機械の性能によるものであり、製作メーカで工作機械を複 数準備して製作する以外に、製作期間の短縮は図れない、ということがわかった。

一方で、これらの部品の製作のための設計にあたっては、部品点数にもよるが、今回試作した 照射キャプセルの場合には、約2カ月の設計期間を要した。そのため、個々の照射キャプセル の仕様に左右されない部品の仕様を同じにする共通化により、部品の設計に要する時間を短縮す ることが可能である。

(3) 既製品または特注品を準備するもの

各種電気ヒータの中で、ヒータホルダに巻き付ける細径(外径 2mm)のシースヒータについ ては、半導体や自動車等の分野で使用されている既製品で対応できる。なお、原子炉の燃料を模 擬した高出力密度のロッドヒータの場合等は、その都度、設計を行い製作することになるため、 その場合には、製作に 6 カ月程度必要である。

本キャプセルの設計では、既製品のシースヒータを用いている。シースヒータについては、既 製品であっても、受注生産品であるため、一般的に海外製品を入手する場合は約 6 カ月、国内 製品の場合は約 3 カ月の期間が必要である。

そのため、キャプセルの設計作業の完了後からシースヒータ入手を開始する場合、長期間照射の実績を有する海外製品を使う場合は、購入まで 6 カ月要するため、その分、製作に時間がかかることになる。これについては、形状や発熱長さ等を標準化したものを JMTR において予め ストックしておけば、製作日数に影響を与えない。

熱電対については、600℃までの測定に使用できる K 型熱電対等、汎用的なスペックのもので あれば、電力や航空機などで使用されている既製品で対応できる(納期は契約後1カ月)。

一方、高温(約1200℃まで)で使用する熱電対(タングステン・レニウム熱電対)や、測温 点が複数ある熱電対(多対式熱電対)などについては、高温部材の入手や測温位置の調整等、製 品によって使用用途が異なるため、特注品扱いとなり、製作に約2カ月の期間を要する。この 場合、キャプセルの詳細仕様が決定してから熱電対発注となるため、組立が遅れてしまう恐れが ある。

本試作試験では、低温(約600℃まで)で使用される外径 1.6mmの K 型熱電対を使用するこ

ととし、約1カ月で入手している。

(4) 成形加工するもの

キャプセルの部品の中では、原子炉内での照射試験中におけるガンマ線による材料の発熱(ガ ンマ加熱)により照射試料等の温度が上昇するが、この熱が、照射キャプセルの高さ方向へ伝わ り、他の照射試料の温度条件に影響がでることのないよう、断熱材としてアルミナなどのセラミ ックスを使用することがある。

アルミナ製の部品は、鋳型に射出して成形することにより製作される。これらの部品は、照射 キャプセルの構造によって、形状が異なるため、その都度、専用の鋳型をつくり、成形する。そ のため、当該部品の完成に2カ月程度の時間を要しているのが現状である。

このことから、これら鋳型から製作される部品の製作日数を短くすることは難しいが、前述の 棒材でも触れたように、個々の照射キャプセルの仕様に左右されない部品の仕様を共通にするこ とで、設計にかかる時間を短縮することにより、製作日数を短縮することが可能である。

4.2 キャプセルの組立

キャプセルの組立においては、まず、照射試料、スペーサ等を組み込んだ内筒を二組(内筒 A 及び内筒 B) 製作している。次に、これら内筒及びスペーサ、スプリング等を外筒に挿入し、キャプセル本体部を組み立て、その後、保護管及びレジューサを取付け、保護管部を作製し、これ とキャプセル本体部を溶接し、キャプセルを完成させている。

このキャプセルの一連の製作・組立に関する詳細を次に示す。

(1) 内筒の組立

図 6 に示すように、組立に着手する前の事前準備として、組立製作図を作業台の上に広げ、 内筒に組み込まれる部品を並べ、員数及び組立手順の確認を行っている。

組立開始後、まず、試験片をアルミニウム製試料ホルダに挿入している。衝撃試験片など大き い試料については、手で挿入しているが、硬さ試験片は 10mm×10mm と小さいためピンセッ ト等を用いて挿入している(図7参照)。

試験片には左右対称でないものも含まれていたことから、挿入の際は、部品図面を確認しなが ら慎重に行っている。試験片の装荷後、アルミニウム製試料ホルダから試験片がはみ出ないよう にするために、仮置き台(図 7 参照)を準備している。この仮置き台にアルミニウム製試料ホ ルダ、スペーサやスプリングなどの部品を並べ、再度、部品の員数確認を行っている。

次に、試料ホルダに計装品である熱電対の装荷を行っている。熱電対の装荷にあたっては、熱 電対を通す必要があるスプリングや上部端栓を先に熱電対の先端の方から挿入し、試料ホルダ内 にセットしている。

その際、熱電対を上部端栓に通す際の穴の位置の確認、装荷する部品の順番を間違えないこと が必要である。内筒内への熱電対の設置にあたっては、上部端栓から熱電対を取り出す際に必要 な計装線スリーブを上部端栓の取付前に設置する必要があることから、事前に熱電対には計装線 スリーブを取付けておく必要がある。計装線スリーブの取付けにあたっては、計装線スリーブか ら測定点までの長さの算定に関し、熱膨張やスプリングの伸縮量等を緩和するためのたわみを考慮することが必須である。

熱電対のキャプセル内への装荷の際には、所定の位置に熱電対を配置させるため、熱電対のシ ースに対して、数回の曲げ加工を行う。一度、曲げ加工を行うと、元に戻すことができないため、 この作業を行う前には、図面等で配置をよく確認にしておく必要がある。曲げ加工には、ペンチ 等の工具を用いるが、試料ホルダ等の表面に設けたスリットに熱電対を這わせる際は、熱電対に 傷がつかないように木のヘラ等で抑え、ヘラを介してハンマー等で叩き少しずつ押し込みながら 行っている。

以上のようにアルミニウム製試料ホルダに熱電対を取り付けるとともに、フルエンスモニタを 取付けた後、試料ホルダやスペーサ等を内筒管内へ挿入し、内筒下部端栓を取付けている。次に、 スプリングを挿入し内筒上部端栓を取付けるが、スプリングを押し込みながら、熱電対のスリー ブと内筒上部端栓が外れないよう注意しながら行っている。

本試作では、スプリングの押し込みには、針金を用いてスプリングを縮めておき、内筒上部端 栓の取付けと同時に、針金を取外す方法を試みたため、針金を取り除くことが困難である。今後、 このような取付け方法を用いる場合、スプリングを抑えるための治具等を準備することが重要で ある。

内筒上部端栓の取付け後、上下の端栓を図 8 に示すように針金で固定し、点溶接を行い、端 栓を固定している。最後に、針金等を取り外した後、端栓部の全周溶接を行っている。

(2) キャプセル本体部の組立

キャプセル本体部は、外筒管、外筒上部端栓、外筒下部端栓及びその他の部材から構成される。 そのうち、外筒上部端栓には、熱電対や内筒用真空制御管、ヒータを取出すためのスリーブや外 筒用真空制御管を先に取り付けている。

ヒータホルダへのシースヒータの巻付けに際しては、予め巻始め端部を決定し、ヒータ発熱部 がホルダ内に収まるようにしている。また、巻付け作業時はペンチのような工具等を用いて行っ ている。

キャプセル本体部の組立もまた、内筒の組立時と同様に、組立に供する部品及び組立方法の確認を行い、外筒下部端栓側から順次上部に向かって行っている。

まず、計装線の位置などの向きを確認し、熱媒体に内筒を装荷している。今回は、油性ペンで 設計図に示した炉心方向(0°方向)がわかるようにマーキングして装荷しているが、キャプセ ルの円滑な製作を行うためには、予め廻り止めやスリット等の適切な配置を検討し、キャプセル 部品の構造に反映しておくことが重要である。

次に、ヒータや計装線を内筒の上下に配置したスペーサの溝に這わせながら取り付けている。 這わせる際は、内筒の組立と同様、ペンチ等工具で曲げ加工を加えながら、木のヘラ等で押し込 んでいる。このとき、計装線やヒータの曲げ作業は、曲げ位置を確認しながら行っている。計測 線やヒータを取付けた後、曲げの反動で外れる可能性があるため、図 9 に示すように、針金、 テープ等で固定しながら行っている。

外筒に装荷する内筒 A、内筒 B、スペーサ等の構成部材を全て組み上げた後、これらを外筒に

装荷している。構成部材は、針金等で拘束しているため、外筒に装荷する直前に、針金を切りな がら装荷している。なお、外筒管と構成部材との間隔が狭いことから、ペンチ等や木ベラ等で随 時押し込みながら、慎重に挿入している(図 10 参照)。

最後に、外筒上部・下部端栓を取り付けている。上部端栓には計装線等を通さなければならな いため、どこの穴に何の計装線が何本通るか、図面を確認しながら通している。取付後、スプリ ングの反発により外れないようにするため、針金等で上下を固定するとともに、その針金をテー プで固定している。その後、端栓を点付け溶接し、針金等を外した後、全周溶接を行っている。

(3) 保護管部の組立

保護管部は、保護管、レジューサ及びツバから構成されている。通常、保護管の長さは、炉心から圧力容器上部まで約6500mmであるが、本キャプセルの場合は、試作試験のため約2000mm としている。組立は、「レジューサと保護管」及び「ツバと保護管」の溶接のみである。

(4) キャプセル全体の組立

キャプセル全体の組立は、本体部と保護管部との接続である。キャプセル本体部からの計装線 等は保護管を通して取出している。

一方、外筒管及び保護管の炉心方向側にはキャプセル名が印字され、また保護管に取り付けた ツバの炉心方向側には切り書き部が付けられているため、外筒管と保護管を接続する際は炉心方 向が一致するようにしている。キャプセル全体を図 11 に示す。

5. 参照キャプセルの検査

試作試験用キャプセルは、JMTR キャプセル等検査基準⁸に従って以下の各項目の検査を行っている。本キャプセルでは、特にキャプセルの立会検査に係る時間短縮の観点から、製作途中で行う部品検査とキャプセルを組立時の試験検査を重点的に行っている。

5.1 キャプセル部品の検査

(1) 材料検査

材料検査は、本キャプセルに用いている全ての部材について、製造メーカが発行する材料検査 成績証明書等による記録確認を行っている。材料検査成績証明書等の機械的性質及び化学成分等 が、所定の規格値等を満足していることを確認している。

(2) 外観検査

ー部部品の外観写真を図 12 に示す。外観検査は、自然光又は白色光のもとで、目視により行い、次の事項に適合することを確認している。

表面は十分に清浄であり、さび、油脂、塗料等が付着していないこと。

- ・ 表面に割れや有害なきず等の欠陥が認められないこと。
- ・ 表面あらさは、検査要領書又は承認図面に記載されたとおりであること。
- (3) 寸法検査

寸法検査は、検査対象物の主要寸法をノギス、マイクロメータ等を用いて測定し、測定値が検 査要領書又は承認図面に記載された許容値内であることを確認している。寸法検査の状況を図 13に示す。

(4) 質量検査

計測付キャプセルのキャプセル本体の質量が 30kg 以下であることを確認するため、天秤等を 用いて、各部品の質量検査を行っている。各部品の質量を合計した結果、全重量が 30kg 以下で あることを確認している。

(5) 真直度検査

真直度検査は、すきまゲージ又はトランシット等を用いて行い、測定値が検査要領書又は承認 図面に記載された許容値内であることを確認している。

5.2 キャプセル組立の検査

(1) 外観検査

外観検査は、自然光又は白色光のもとで、目視により行い、次の事項に適合することを確認している。

- ・ 表面は十分に清浄であり、さび、油脂、塗料等が付着していないこと。
- ・
 表面に割れや有害なきず等の欠陥が認められないこと。
- ・ 表面あらさは、検査要領書又は承認図面に記載されたとおりであること。
- (2) 寸法検査

寸法検査は、検査対象物の主要寸法について、ノギス、長尺等を用いて測定し、測定値が検査 要領書又は承認図面に記載された許容値内であることを確認している。寸法検査の状況を図 14 に示す。

(3) 質量検査

質量検査は、天秤等を用いて、計測付キャプセルのキャプセル本体の質量が、30kg以下であることを確認している。

(4) 真直度検査

真直度検査は、すきまゲージ又はトランシット等を用いて行い、測定値が検査要領書又は承認 図面に記載された許容値内であることを確認している。 (5) 標示検査

標示検査は、名称及び切断マークを目視により確認するとともに、主要寸法についてノギス等 を用いて測定を行っている。印字や切断マークが明確であることを、またそれらの大きさ及び場 所が検査要領書又は承認図面に記載されたとおりであることを確認している。キャプセル名の印 字の外観写真を図 15 に示す。

(6) ヘリウム漏れ検査

ヘリウム漏れ検査は、溶接部について、日本真空技術社製の He リーク試験機(HELIOT model301)を用いて行っている。この結果、各部のヘリウムの漏えい率は 1×10⁻⁶ Pa・m³/s 以下であり、基準値を満足していることを確認している。ヘリウム漏れ検査の状況を図 16 に示 す。

(7) 導通検査

導通検査は、ヒータ及び熱電対について、回路計を用いて行っている。この結果、ヒータ及び 熱電対について所定の導通があり、電線間に断線がないことを確認している。

(8) 絶縁抵抗検査

絶縁抵抗検査は、絶縁抵抗計を用いて行っている。この結果、ヒータ及び熱電対は検査要領書に記載された許容値内であることを確認している。

(9) 浸透探傷検査

浸透探傷検査は、溶接部について、栄進化学社製の浸透液、洗浄液及び現像剤を用いて行って いる。この結果、割れ、線状欠陥、円径上欠陥がないことを確認している。浸透探傷検査の状況 を図 17 に示す。

(10) 耐圧検査

耐圧検査は、検査対象物にガス圧を加えることによる加圧法で行い、検査要領書又は承認図面 に記載された試験圧力に耐え、かつ有害な漏えいのないことを確認している。耐圧検査の状況を 図 18 に示す。

(11) 放射線透過検查

放射線透過検査は、溶接部及び圧接部について、X線透過試験装置を用いて行っている。この 結果、検査要領書に記載された許容値内であることを確認し、キャプセル等の内部確認に対して は照射試料及び構成部材の位置が検査要領書又は承認図面に記載されたとおりであることを確 認している(図 19 参照)。

6. キャプセル製作期間短縮のための検討

所定の工程に従い試作試験用キャプセルの製作を進め、これらの体験、経験を通じ部品製作、 組立及び検査の各工程の分析を行った。更にこの分析結果に基づきキャプセルの製作期間を短縮 するための検討を行った。検討結果の詳細を各項目に分けて以下に記載するとともに、これまで キャプセルの製作に要してきた製作の工程を図 20 に、検討後のキャプセル製作の工程を図 21 に 示す。

(1) 部品製作

部品の製作にあたっては、外筒管や保護管など、管材から加工するものについては、照射試料 の構造や照射キャプセルの温度制御などの仕様に左右されないことから、既製品で対応する又は 既製品に対応したキャプセル構造にすることで、製作する時間を短縮することが出来る。

また、照射キャプセルの部品には、下部端栓、スペーサブロック、スペーサ等、部品の材質、 形状が同じであるか、同じにすることが可能な部品がある。そのため、今後の照射キャプセル設 計において、これらの部品を同じ設計にするという部品の共通化を行うことにより、部品の設計 に要する時間を短縮できるので、製作期間を現在の3カ月から約1カ月短縮することが可能で ある。

共通化の対象部品としては、外筒管、内筒管、上下端栓、保護管やレジューサなどである。こ れら部品は、装荷する試料の形状や、計装品の取り出し状況により、外筒管、内筒管及び保護管 の外径寸法を変更する程度で、その他構造に大きな変更を必要としないことから、共通化が可能 である。

(2) 組立

本キャプセルのように、下部側から部材等を積み上げる構造を有する場合、振動等の衝撃を和 らげるためや、照射中の熱膨張による逃げを確保するために、キャプセル内部にスプリングを配 置している。スプリングを含めた内筒の組立の際には、常にスプリングに応力を加え圧縮し続け なければならないため、作業性を考慮して、予め針金でスプリングを縮めて固定させていた。し かし、この場合、内筒を封じる直前に同固定用の針金を切断し取り除かなければならず、作業性 が悪いうえ、間違って針金を内部に取り残してしまう恐れがあることが分かった。

そのため、作業者が常にスプリングに圧縮荷重を加えながら行うのではなく、内筒の上下部端 栓を治具等で固定しながら組み立てることにより、キャプセル内への不要物の混入を防止できる。

組上げた内筒やその外側へ配置したヒータホルダ等の内部構造物を外筒へ装荷する際、真空制 御管やシースヒータなど、外側の溝部に取りまわしている計測線が外れないように、針金で結束 した状態で装荷していくが、その針金を切断しながら装荷したため、針金とともに計測線まで切 断する危険性があった。そのため、実際に組み立てる際には、計測線を切断しないようにするた めの目視確認等に時間を要していたことがわかった。このことから、固定に使用していた針金に ついては、作業者が手で容易に取り外すことが出来るような、アルミナの紐等の柔軟な素材に変 更することや、計測線が一定間隔で固定されるようなキャプセル設計とすることより、計測線等 の傷、切断等の確認に要していた時間を短縮できるため、組立期間を数日程度、短縮することが 可能である。

これまでのキャプセルの組立に際しては、キャプセル部品の製作完了からキャプセルの組立完 了までに、検査を含めて約 3 カ月を必要としたが、これらのことを考慮することにより、数週 間の製作期間の短縮が見込まれる。

(3) 検査

キャプセル製作に係る検査に関しては、キャプセル等検査基準において、各々の製作過程毎に 適宜、材料検査、部品検査、中間検査、最終検査及び受入検査を行うよう定められている。これ らの検査は、必要に応じて立会によって実施し、キャプセルの組立途中、完成後の健全性を確認 することになっている。立会検査を行うにあたっては、キャプセルの製作を一旦中断して実施す ることから、キャプセルの製作工程毎に行われる検査に費やされる時間は、全体のキャプセルの 製作期間に大きな影響を及ぼす。

このことから、キャプセルの健全性は確実に確認しつつ、一方で効率的に検査立会を行ってい く必要がある。本キャプセルの試作試験では、部品検査においては、キャプセル部品を一点一点 確認していたが、ある程度組立を進めても、その部品の外観や寸法などが測定出来れば、その部 品個々における健全性を確認できるので、制御管や引出管等、特定のものについては、部品一点 ずつの立会検査を簡略化することが可能である(例えば、上部端栓と制御管、引出管などの部組 品など)。

また、耐圧検査などは、溶接部やろう付け部に対して行うが、個々の作業の都度、耐圧試験を 行うと、1回の検査あたり半日は必要であり、それを製作メーカで行う自主検査と機構が立ち合 う立会検査において同一の内容で繰り返し実施するため、検査や検査準備に多大な時間を要する ことになる。そのため、これら作業後の健全性の確認は、別途、浸透探傷検査や放射線透過検査 で確認することにし、耐圧検査については、ある程度組立を進捗させ、複数の検査対象部を同時 に受検し、溶接やろう付け部の健全性を確認できれば、製作及び検査の効率を向上することがで きる。

このような効率化を図ることにより、立会検査のために要する日数のうち数日程度短縮できる 可能性がある。

また、試験検査に必要な治具は事前に検討し準備しておくことや、耐圧検査用の外圧試験検査 治具、Heリーク検査用の治具等を常設しておくことなどにより、さらに工程を短縮することが 可能となる。

これらのことを考慮することにより、製作期間を数週間短縮でき、組立を含めて約3カ月必要としていた製作期間を約1カ月短縮することができると考えられる。

7. まとめ

平成 25 年度の JMTR の再稼働後に伴い JMTR で進める照射キャプセルの設計・製作に関し、 円滑な部品製作、組立製作、試験検査等の実施、効率化などの検討のため、汎用的な構造を有す る計測付キャプセルについて別途実施した試作試験結果に基づき、製作期間の短縮について検討 を行った。

その結果、キャプセル部品の共通化や既製品の活用などにより約1カ月、キャプセル組立に関 するキャプセル部品の組立時に使用する組立治具の事前準備により数週間、立会検査実施に伴う 検査工程の見直しや検査治具の事前準備などを行うことにより数週間短縮でき、これまで6カ月 要していた製作期間を約4カ月にすることが可能であることがわかった。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、大洗研究開発センター 河村 弘副所長(照射試験炉センター 長兼務)及び照射試験炉センター 石原正博副センター長からご指導を頂きました。また、照射 キャプセルの設計にあたっては、照射試験炉センター 照射試験開発課 齋藤 隆氏から、キャ プセル製作及び試験検査にあたっては、照射設備整備課及び技術管理課の職員の適切なご指導及 びご協力を頂きました。以上の方々に、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 照射試験炉センター、照射試験炉センターの活動報告(2008 年度)、JAEA-Review 2009-025, 2008, 37p.
- 2) N. Hori, M. Kaminaga, T. Kusunoki, et al., Present Status of Japan Materials Testing Reactor, JAEA-Conf 2011-003, 2012, pp.87-90.
- H. Izumo, N. Hori, T. Kusunoki, et al., Overview of refurbishment project of JMTR, JAEA-Conf 2011-003, 2012, pp.157-161.
- 4) Y. Inaba, S. Inoue, H. Izumo, et al., Status of irradiation technology development of JMTR, JAEA-Conf 2008-010, 2008, pp.30 41.
- 5) 竹本紀之,出雲寛互、井上修一、他:"JMTR 稼働率向上のための課題とその対策・稼働率 60% を目指して・", JAEA-Review 2008-051, 2008.
- 6) 大洗研究所材料試験炉部: "JMTR 照射ハンドブック", JAERI-M 83-053, 1983.
- 7) 原子炉施設管理部: "JMTR キャプセル等設計基準", 2010.
- 8) 原子炉施設管理部: "JMTR キャプセル等検査基準", 2010.

表1 試作試験用キャプセルの設計条件(冷却条件)

項目	条件
① 冷却材	軽水
2 流速	5 m/s
③ 冷却水入口温度	49 °C
④ 設計温度	100 °C
⑤ 機器等の区分	第3種機器相当

表2 試作試験用キャプセルの設計条件(圧力条件)

百日	圧力[MPa]		
	最高使用圧力(内圧)	最高使用圧力(内圧)	
外筒管	1.76 MPa	0.29 MPa	
内筒管	0.29 MPa	0.29 MPa	
保護管	1.76 MPa	0.29 MPa	

表3 リング試験片の寸法

友 如 友 升		寸法[mm]		
谷部名称		上段	下段	
リング試験片	内径	φ	18	
(SUS304)	外径	φ 26		
試料ホルタ゛	内径	φ 27		
(A1050)	外径	(\ \ D3-0.2)		
内筒 B	内径	φ D3(φ 37)		
(SUS316)	外径	φ D2 (φ 40)		
熱媒体 B	内径	(+0.4)	
(A1050)	外径	(\ \ D1-0.2)		
外筒	内径	φ D1(φ 56)		
(SUS316)	外径	φ	60	

各部名称					
		硬さ試験片	衝撃試験片(1 段目)	引張試験片	
模擬試料		10×10		4.05×0.76	
(SUS	304)				
試料ホルタ゛	試料穴	1	0.2 imes 10.2	$5.2\! imes\!0.96$	
(A1050)	外径	(\ \ D3-0.4)		φ D4(φ 34.4)	
反射筒	内径			(\ \ D4-0.4)	
(SUS304)	外径			(\ \ D3-0.2)	
内筒 A	内径		φ D3 (φ 37)		
(SUS316)	外径		φ D2 (φ 40)		
ヒータホルタ゛	内径	((
(A1050)	外径	(\ \ D1-0.6)		(
外筒	内径	ϕ D1(ϕ 56)			
(SUS316)	外径	$\phi 60$			

表4 衝撃・硬さ試験片及び引張試験片部断面形状及び寸法

表5 衝撃試験片部断面形状及び寸法

友立友	升	寸法[mm]		
谷司名称		衝擊試験件片(2段目)	衝擊試験件片(3段目)	
模擬試	料	10×10	10×10	
(SUS3	04)	10 ~ 10	10 ~ 10	
試料ホルダ	試料穴	$10.2 \! imes \! 10.2$	$10.2 \! imes \! 10.2$	
(A1050)	外径	((
内筒(A)	内径	φ D3 (φ 37)		
(SUS316)	外径	ϕ D2	(φ40)	
ヒータホルタ゛	内径	$(\phi D2+0.4)$ ($\phi D2+0.4$)		
(A1050)	外径	(\ \ D1-0.6) (\ \ D1-0.7)		
外筒	内径	φ 56(φ D1)		
(SUS316)	外径	$\phi 60$		





JAEA-Technology 2013-008

- 17 -



図3 キャプセルの製作フロー

- 18 -







図5 一部部品の図面と外観写真



図6 内筒 A 及び内筒 B の内部構成部材

JAEA-Technology 2013-008



(1) シャルピー衝撃試験片の組込の状況



(2) 硬さ試験片の組込の状況

図7 試料の組み込みの状況



(1) 内筒 B の組立後の外観

(2) 内筒 A の組立後の外観

図8 内筒組立後の外観写真

(1) 外筒内構成部材の組立の状況

(2) 外筒内構成部材の組立の状況

(3) 外筒内構成部材の組立の状況

図9 外筒内構成部材とヒータや計装線等の組立の状況

(1) 外筒管装荷時の状況1

(2) 外筒管装荷時の状況 2

(3) 外筒管装荷後の外観写真1

(4) 外筒管装荷後の外観写真2

図10 外筒管装荷作業の状況

図11 キャプセル全体の写真

(1) 下部端栓の外観写真

(2) スペーサブロックの外観写真

図 12 一部部品の外観写真

図13 部品の寸法検査の状況

(1) 内筒の寸法検査

(2) 内筒の寸法検査

(3) キャプセル本体部の寸法検査

図14 組立途中の寸法検査の状況

(1) キャプセル名の印字の状況

(2) 切断マークの状況

図 15 キャプセルの印字及び切断マークの外観写真

図16 ヘリウム漏れ検査の状況

(2) 浸透探傷検査の状況(現像液塗布時)

図17 浸透探傷検査の状況

(1) 耐圧検査の全体の状況

(2) 耐圧検査の圧力計の状況

図18 耐圧検査の状況

JAEA-Technology 2013-008

(3) 内部確認用 X 線写真(内筒 A の上側)

(4) 内部確認用 X 線写真(内筒 B の下側)

図19 放射線透過検査の結果

図 20 これまでキャプセル製作に要してきた製作の工程

JAEA-Technology 2013-008

図21 検討後のキャプセル製作の工程

JAEA-Technology 2013-008

表 1. SI 基本单位				
甘大昌	SI 基本ì	単位		
巫平里	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		

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例				
如女母 SI 表	基本単位			
和立重 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 キログラム毎立法	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

	SI 組立単位			
組立量	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 鱼	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
· 協 方 立 体 鱼	ステラジア、/(b)	er ^(c)	1 (b)	m^{2/m^2}
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	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	$m^{-1} kg s^{-2}$
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	С		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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{\cdot 2} A^{\cdot 1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2}\text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	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
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	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,	グレイ	Gv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
カーマ				
線量当量,周辺線量当量,方向	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{2}$
性線量当量, 個人線量当量		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

(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み、ベクレルは放射性抜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。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度で表すために使用される。
 (f)数単位を通の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)数単性核種の放射能(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

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘质	Eパスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²	
表 面 張 九	コニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ミラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹	
角 加 速 度	E ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
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	$m^2 kg s^{2} K^{1}$	
比熱容量, 比エントロピー	- ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$	
比エネルギー	- ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$	
熱 伝 導 率	『ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ 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 kg s ⁻²	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹	
電 荷 密 度	E クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA	
表面電荷	ラクーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	エクーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA	
誘 電 率	『ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透 磁 辛	ミ ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²	
モルエネルギー	- ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
モルエントロピー,モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA	
吸収線量率	ミグレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$	
放射 強度	E ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
放射輝 度	E 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	
酵素活性濃度	た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}	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}	ピコ	р
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	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	۰	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1L=11=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
	まとわて粉は	ぶ 中 瞬時 ほう や て そ の	

衣される剱旭が夫缺的に待られるもの					
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 言			SI 単位で表される数値
バ	1	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	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	ar送佐1
ベ		ル	В	▶ 51 単位との 叙 値的 な 阕徐 は 、 対 数 量の 定 義 に 依 存.
デ	ジベ	N	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	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ^{-2} 10 ⁴ lx			
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{\cdot 2} = 10^{\cdot 2} \text{ms}^{\cdot 2}$			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{2} = 10^{4} \text{T}$			
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	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\boldsymbol{\nu}$				L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I		N	11		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	- トル	采	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
\mathbb{P}				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
÷	17		11	_	1	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
13	Ц		<i>y</i>		cal	(「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク			\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています