JAEA-Technology
2006-046

JRR-3冷中性子源装置の減速材容器ユニットの更新

Replacement of the Moderator Cell Unit of JRR-3's Cold Neutron Source Facility

羽沢 知也　永堀 和久　楠 剛

Tomoya HAZAWA, Kazuhisa NAGAHORI and Tsuyoshi KUSUNOKI

東海研究開発センター
原子力科学研究所
研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

October 2006

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは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/index.shtml）より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っております。

〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4　日本原子力研究開発機構内

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 +81-29-282-5901

© Japan Atomic Energy Agency, 2006

JAEA-Technology 2006-046

JRR－3冷中性子源装置の減速材容器ユニットの更新

日本原子力研究開発機構　東海研究開発センター
原子力科学研究所　研究炉加速器管理部
羽沢　知也、永堀　和久、楠　剛

（2006年　8月　30日受理）

冷中性子源装置(CNS：Cold Neutron Source)は、原子炉で発生した中性子を液体水素中に通過させることによりエネルギーの低い冷中性子へ変換するための装置である。冷中性子は、中性子散乱等の物質生命科学の研究に用いられている。

減速材容器は液体水素を貯留するためのステンレス鋼製の容器で、中性子照射脆化により、その寿命が約7年と定めている。1990年にJRR－3の利用運転を開始後、初めて実施した交換では、JRR－3改造時にフランスで製作した減速材容器ユニットの予備品を用いて交換作業を実施した。今回（2006年）の交換作業では減速材容器ユニットを国産化し、これを用いて交換作業を行った。この減速材容器ユニットを製作するにあたり、以下に示す技術開発を行った。

①減速材容器外表面の輻射率を高めるための黒化処理技術の開発
②液体水素が自然落下する内管、気化した水素が上昇する外管、高真空状態を保持する真空断熱管を同心円状に重ねた三重管の曲げ加工技術の開発
③複雑な曲面から成る減速材容器の成形技術の開発

また、交換工事は、詳細に検討した作業計画に従い実施した。その結果、従前の交換作業の約80％の工期で交換作業を終えることができた。また、炉内での作業時間が短縮され、被ばく線量を低減した。交換作業終了後、中性子特性測定を行い、従前のフランス製の減速材容器と同等な性能を有していることを確認し、減速材容器の国産化に成功した。また、減速材容器ユニットの国産化により、更新費用を大幅に削減することができた。

原子力科学研究所：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根2－4

Replacement of the Moderator Cell Unit of JRR-3's Cold Neutron Source Facility

Tomoya HAZAWA , Kazuhisa NAGAHORI and Tsuyoshi KUSUNOKI

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 30, 2006)

The moderator cell of the JRR-3's cold neutron source(CNS) facility, converts thermal neutrons into cold neutrons by passing through liquid cold hydrogen. The cold neutrons are used for material and life science research such as the neutron scattering.

The CNS has been operated since the start of JRR-3's in 1990. The moderator cell containing liquid hydrogen is made of stainless steel. The material irradiation lifetime is limited to 7 years due to irradiation brittleness. The first replacement was done by using a spare part made in France.

This replacement work of 2006 was carried out by using the domestic moderator cell unit. The following technologies were developed for the moderator cell unit production.

1) Technical development of black treatment on moderator cell surface to increase radiation heat.
2) Development of bending technology of concentric triple tubes consisting from Inside tube, Outside tube and Vacuum insulation tube.
3) Development of manufacturing technique of the moderator cell with complicated shapes.

According to detail planed work procedures, replacement work was carried out. As results, the working days were reduced to 80% of old ones. The radiation dose was also reduced due to reduction of working days.

It was verified by measurement of neutrons characteristics that the replaced moderator cell has the same performance as that of the old moderator cell. The domestic manufacturing of the moderator cell was succeeded. As results, the replacement cost was reduced by development of domestic production technology.

Keywords : Cold Neutron Source, JRR-3, Moderator Cell, Research Reactor

目　　次

1. はじめに …… 1
2. CNS の概要 …… 2
2.1 CNS の構成 …… 2
2.2 ヘリウム冷凍設備 …… 2
2.3 本体設備 …… 2
2.4 減速材容器ユニット …… 4
3. 減速材容器交換周期の評価 …… 7
4. 黒化処理方法の調査 …… 8
4.1 概要 …… 8
4.2 黒化処理方法の選定 …… 8
4.3 評価試験 …… 9
5. 製作 …… 17
5.1 設計条件及び設計仕様 …… 17
5.2 既存減速材容器の調査 …… 18
5.3 三重管曲げ試験 …… 21
5.4 減速材容器の試作試験 …… 23
5.5 耐圧試験 …… 25
5.6 実機製作 …… 26
6. 現地交換工事 …… 27
6.1 交換工事計画 …… 27
6.2 減速材容器ユニット移送前の線量当量率確認作業 …… 28
6.3 放射線管理 …… 30
6.4 交換作業 …… 34
6.5 試験検査 …… 39
7. 冷中性子特性測定 …… 40
8. まとめ …… 43
謝 辞 …… 44
参考文献 …… 44

Contents

1. Introduction 1
2. Outline of CNS 2
2.1 Component of CNS 2
2.2 Helium refrigerator plant 2
2.3 Hydrogen plant 2
2.4 Moderator cell unit 4
3. Moderator cell replacement period 7
4. Investigation of black treatment 8
4.1 Outline 8
4.2 Selection of black treatment 8
4.3 Evaluation test 9
5. Manufacturing 17
5.1 Design condition and design specification 17
5.2 Survey of existing moderator cell 18
5.3 Bending test 21
5.4 Experiment of prototype moderator cell 23
5.5 Pressure test 25
5.6 Manufacturing of moderator cell unit 26
6. Replacement work on the spot in site 27
6.1 Planning 27
6.2 Dose rate evaluation before replacement work 28
6.3 Radiation management 30
6.4 Replacement work 34
6.5 Test and inspection 39
7. Characteristic measurement of cold neutron 40
8. Conclusion 43
Acknowledgments 44
References 44

1. はじめに

JRR－3冷中性子源装置（以下「CNS」という）は、JRR－3の改造計画に伴って、利用性能向上の目的から設置された。冷中性子を得る方法として熱中性子を極低温の減速材中を通し、冷中性子に変換する方法が一般的である。JRR－3においては極低温の減速材に液体水素を用いており、水素ガスを液化するための冷凍設備と組み合わせた装置となっている。

CNSによって得られた冷中性子は、中性子導管を通り中性子ビーム実験設備へと導き出され、中性子散乱などの中性子物理実験や物質内における原子や分子の動きを観測して、生体高分子などを調べる研究に用いられている。

CNSは、原子炉で発生した中性子を液体水素中を通過させることにより、エネルギーの低い冷中性子へ変換するための装置であり、国内では唯一の大型設備である。

CNSの減速材容器は薄肉のステンレス鋼製であり、中性子の照射により脆化するため、一定期間の使用ごとに交換が義務付けられている。JRR－3改造時に設置された減速材容器は、平成10年度に一度交換し、このときは、JRR－3改造時にフランスで製作した予備の減速材容器を所持しており、交換作業のみを行った。平成17年度の交換作業では予備品がないため、製作から作業を開始する必要があった。

製作に当たっては、メーカーの選定から設計及び工事の方法の認可申請、使用前検査、現地据付工事までに約2年の時間を要した。

本稿は、減速材容器ユニットの製作準備作業、製作作業及び現地交換作業をまとめたものである。

2. CNSの概要

2．1 CNSの構成

JRR－3原子炉で発生した中性子は減速材により熱中性子に減速される。熱中性子は液体水素減速材を通過してさらに減速され、エネルギーの低い冷中性子に変換される。

CNSには水素ガスを凝縮して液化するため、大型の冷凍機が設けられており、この設備をヘリウム冷凍設備と呼んでいる。また、主に水素ガス等を取り扱う設備を本体設備と呼んでおり原子炉プールに隣接するサブプールに設置されている。CNS系統概略図を図2．1に示す。

2．2 ヘリウム冷凍設備

ガスは圧縮されると温度が上昇し、膨張させると温度が低下する。一般的にこの性質を利用して冷蔵庫やクーラーなどの冷気を作り出している。JRR－3のCNSもこの原理を利用しヘリウムの圧縮、膨張を繰り返すことにより約-250℃の極低温ヘリウムを作り出している。

ヘリウム冷凍設備は、ヘリウム圧縮機、熱交換器、低温精製器、膨張タービン、コントロールヒータ、ヘリウム貯槽、弁及び配管等で構成されている。このうち低温となる熱交換器、低温精製器、膨張タービンは、外気と断熱するためにコールドボックスと呼ばれる大型の真空容器内に収納されている。同じく低温となる配管についても、外気と断熱するため、二重管構造となっており、内側の管を低温ヘリウムガスが流れ外側の配管は真空状態を維持している。

冷却されたヘリウムガスはコンデンサへ流入し水素ガスを冷却し、液化する。その後ヘリウムガスは熱交換器を通り、圧縮機へと流れる閉ループを形成している。

2．3 本体設備

本体設備は、コンデンサ、水素緩衝タンク、低温流路管、減速材容器ユニット等で構成されている。ヘリウム冷凍設備から送られてくる極低温ヘリウムにより水素ガスを冷却液化し、減速材容器ユニットの先端に設置されている減速材容器に貯留する設備である。主要な設備である水素緩衝タンク、コンデンサは、原子炉プールに隣接するサブプールに水没させており、万一、水素ガスが漏洩した場合でも直ちに大気中に発散しないよう措置されている。

原子炉で発生した熱中性子は、減速材容器に貯留された液体水素で、さらに減速され冷中性子となる。冷中性子は、中性子導管を通り実験利用棟へと導かれ、各実験設備に提供される。

減速材容器に貯留される液体水素量を一定に保つためには、減速材容器内の圧力を一定とすることが必要である。CNSでは減速材容器と同じ系統に接続される水素緩衝タンクの圧力を制御することにより、貯留する液体水素量を一定に保っている。原子炉の出力や冷却水温度の変化などによって変動する水素圧力を検知し、ヘリウム配管に設置されたコントロールヒータの出力を制御し、コンデンサに導入する冷凍ヘリウムガスの温度を調節している。

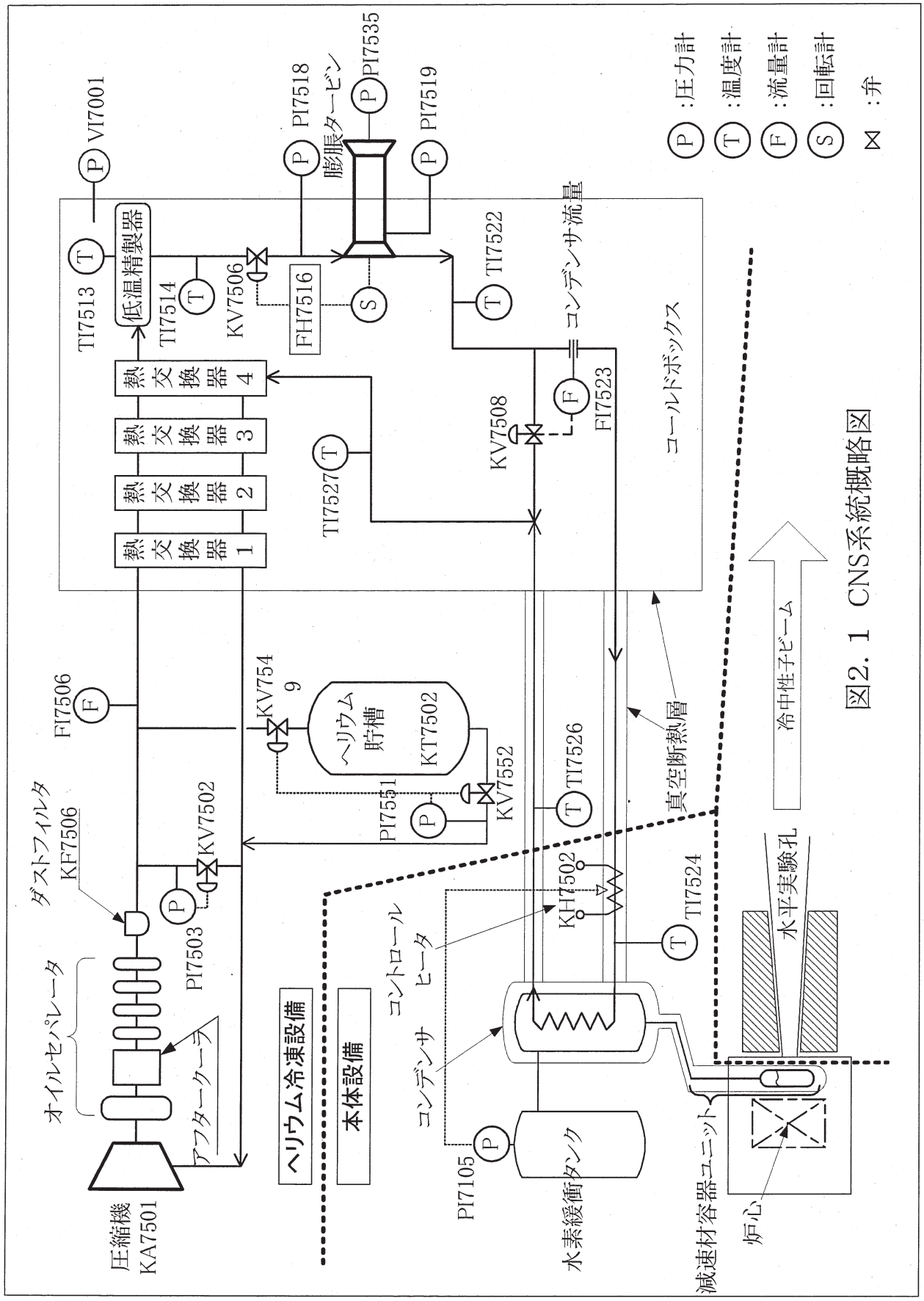


図2．1 CNS系統概略図

2．4 減速材容器ユニット

減速材容器ユニットは液化した水素を貯留するための機器で、先端に設置された減速材容器は重水タンク内に位置している。図2．2に減速材容器の設置位置を図2．3に減速材容器ユニットの構造図を示す。

水素を液化するためには、約－250℃まで冷却する必要があるが、重水タンクは常温～50℃程度の温度であり、減速材容器を約300℃の温度差のある重水タンク内環境から断熱しなければならない。このため、減速材容器が設置されている重水タンク内に真空容器を設け、真空断熱層を形成している。減速材容器ユニットの概要図を図2．4に示す。

コンデンサで液化した水素は、内管を減速材容器まで自然落下し貯留される。減速材容器に貯留された液体水素は核発熱等により気化され、気化した水素は外管を通りコンデンサへと導かれる。コンデンサでは再び冷却、液化され、減速材容器へ自然落下する。このようなサイクルをサーモサイフォンと呼んでいる。

減速材容器ユニットは、外管、内管、減速材容器、真空断熱管Ⅰ及びⅣ等からなる。真空断熱管Ⅳと真空断熱管Ⅰの間は、放射線遮蔽のため原子炉プール水が入り込む構造となっている。このため、内管や外管内を通る約20Kの水素と原子炉プール水を断熱するため、真空断熱管Ⅰが設けられており、内部は真空状態を維持する。また、内管、外管、真空断熱管Ⅰの配管は3重管となっており、ストリーミング防止のためにスネーク状に曲げて設置されている。

減速材容器ユニットは、真空断熱管Ⅱで三重管を接続するための特殊なフランジで接続され、この部分までが一体構造となっている。

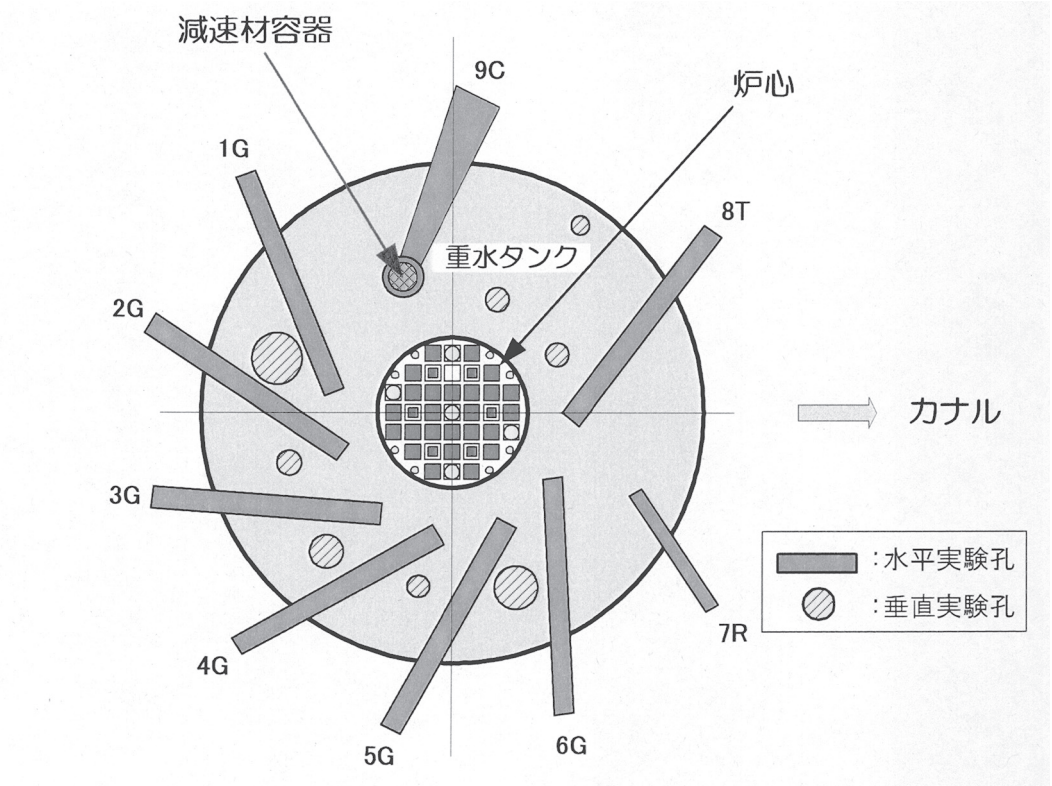


図2．2 減速材容器の設置位置

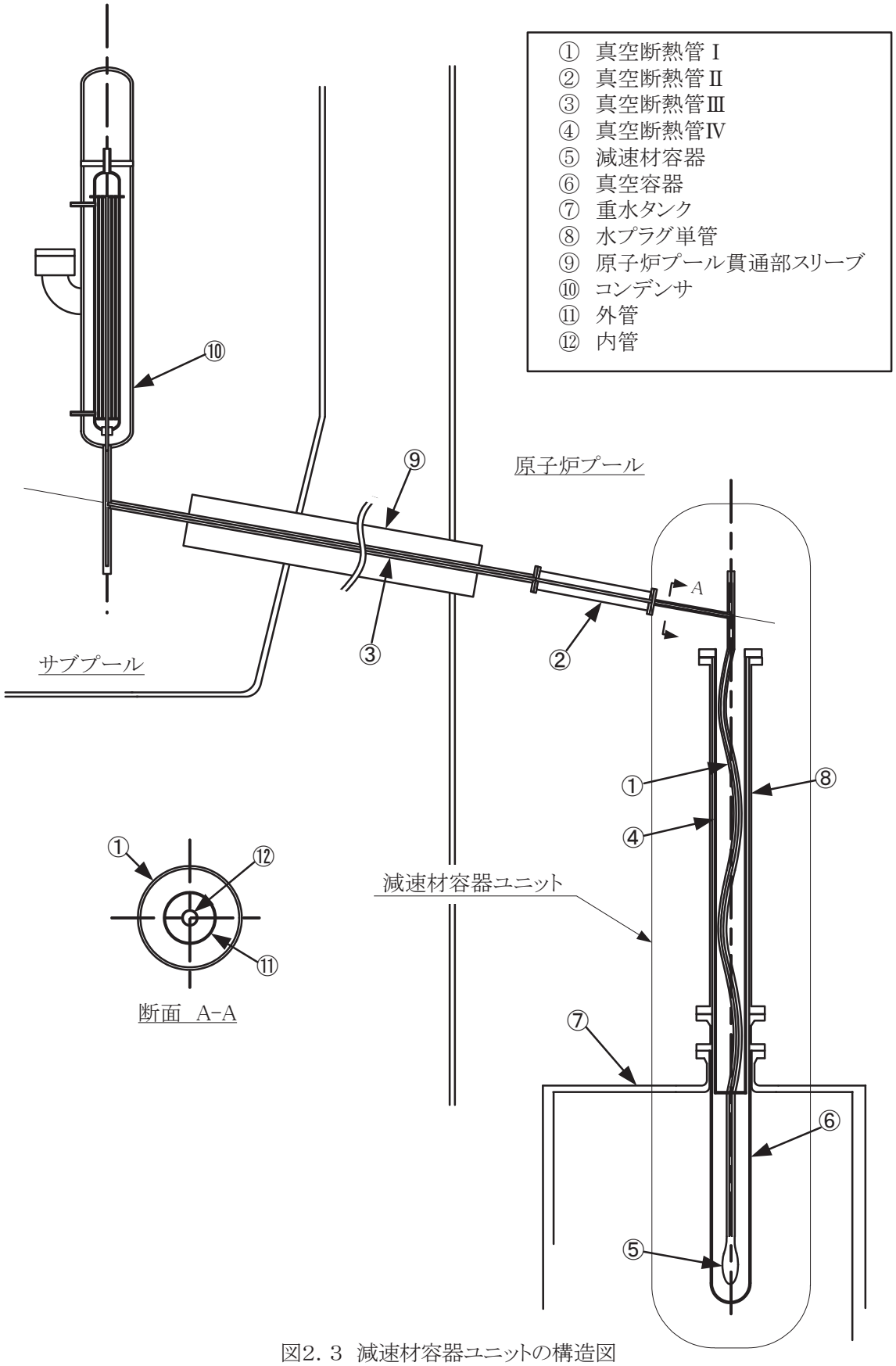


図2．3 減速材容器ユニットの構造図

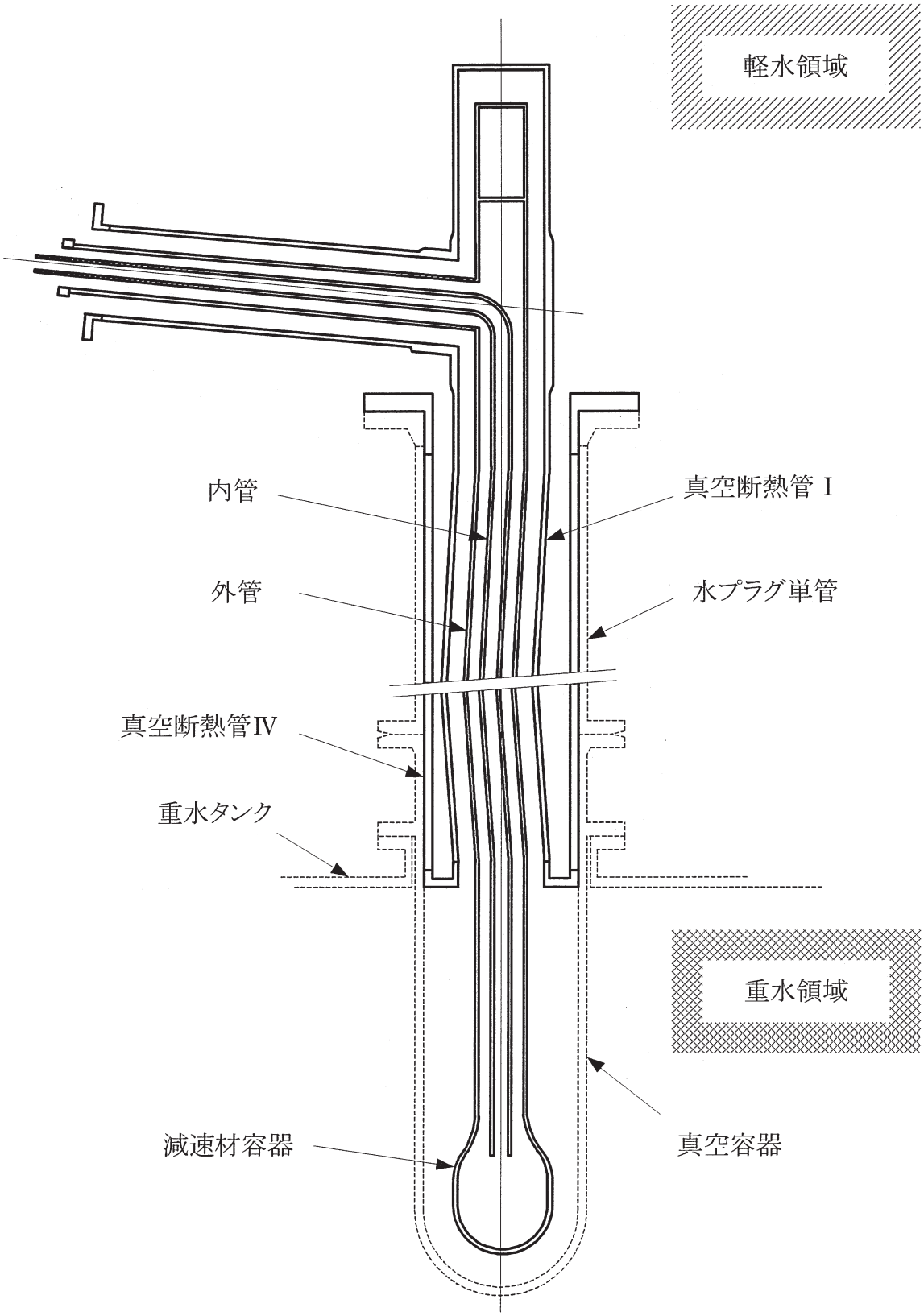


図2．4 減速材容器ユニットの概要図

3. 減速材容器交換周期の評価

減速材容器はオーステナイト系ステンレス鋼（SUH660）であり、中性子照射を多量に受けると機械的性質が変化すると言われている。JRR－3のCNSは設工認申請において、高速中性子(E＞0．1MeV)の照射量が2．0×10^{24} m^{-2}に達するまでに交換することを義務付けており、これは、原子炉の定格出力運転時間に換算すると約3万時間に相当する。

一方、中性子照射を受けると核変換によりヘリウムや水素が生成される。ヘリウムは金属内に析出して気泡を作り、金属はこれにより脆くなる現象が表れる。JRR－3のCNSに先行して製作されたオルフェ炉（フランス）では、ヘリウム生成量の上限を1000ppmとしており、JRR－3のCNSにおいても同等なヘリウムの生成量を規定している。

核変換は主に1MeV以上の速中性子により、ほとんどの核種について起こることがわかっている。しかしJRR－3の減速材容器は重水タンク位置にあり、熱中性子と高速中性子の比は約100倍であり、熱中性子成分が多くを占めている。減速材容器の材質であるSUH660において熱中性子により核変換を起こして機械的性質に影響を与えるのはBとNiである。これらの（n、α）反応により生成されるヘリウム生成量は、3万時間の照射で、およそ1000ppmと推定されており[1]、設工認申請で規定した照射時間と一致する。

JRR－3は 4 週間の連続運転を年間7サイクル行う。運転時間で換算すると約7年で交換時期に達することになる。前回の交換は平成10年度の施設定期自主検査期間に実施しているため[2]、2回目の交換時期は、平成17年度の施設定期自主検査期間中と設定した（平成17年度施設定期自主検査期間は、平成17年12月から平成18年3月）。このため、製作メーカーの選定や官庁手続き等を平成15年から開始した。

4. 黒化処理方法の調査

4．1 概要

JRR－3CNSの場合、減速材容器ユニット内に液体水素を貯留しない場合においても原子炉の運転が可能なように無冷却運転モードが設けられている。液体水素が貯留されていれば約－250℃の極低温状態を維持するが、液体水素がない場合は中性子やγ線照射による発熱により容器が破損に至ることが考えられる。このため、減速材容器表面の輻射熱を利用した冷却モードがあり、輻射熱の効率を上げるため容器表面には黒化皮膜処理が施されている。

これまで使用してきた減速材容器ユニットはフランスで製作されたものである。黒化処理はフランスの軍事技術を使っていることもあり、その施工方法については明確な処理方法が示されていない。このため、今回の減速材容器製作にあたり最適な黒化処理方法を導き出すため、事前に黒化処理方法についての試作および試験を行った。

4．2 黒化処理方法の選定

金属表面を黒化処理する方法として、黒色ニッケルめっきを中心として検討した。その手法として、電気めっきと無電解めっきの2種類に着目し、簡易的な予備試験を行った。なお、平成元年に製作した減速材容器の破壊試験に使用した試験片が残っていたため、この試験片の黒化処理状態と比較し、黒化処理方法を検討した。

4．2．1 予備試験

選定した2種類のめっき方法を比較するための予備試験の項目として、表面の外観と密着性の確認の2つについて行った。

試験片の表面処理については、SUH660材の素材のままの状態、バフ研磨処理（Rmax:0．6μm程度）、ブラスト処理の3種類について表面処理を行った。その後、黒色皮膜の外観観察を行い、平成元年製作時試験片と最も近い状態のものを選定することとした。また、電気めっきに関しては、均一な黒色皮膜が得られる電流密度を決定するため、事前にハルセル試験を行い、電流密度は0．25～0．3A/dm^2 と決定した。

4．2．2 めっき工程

各めっきは以下の工程を経て行った。

（1）電気めっき

脱脂、酸活性、ストライクめっき（Niを1μm以下）、黒色めっき（約1μm）

（2）無電解めっき

脱脂、酸活性、ストライクめっき、無電解ニッケルめっき（2層）、黒色処理

4．2．3 外観確認

素材のままの状態、バフ研磨処理、ブラスト処理の3種類の試験片に対して、電気めっき及び無電解めっきを行い、表面の状態を観察した。その結果、両めっき処理において素材のまま及び研磨後で

は、表面の光沢が大きく、平成元年製作時試験片のつや消し状態とはかけ離れているため、黒化処理表面の状態が最も近いブラスト処理を施す方法が最も適しているとした判断した。

4．2．4 密着性確認

密着性の確認は、試験片の90° 曲げ試験及びテープ試験（使用テープ：住友3M製#851A）を実施した。以下に結果を示す。

（1）電気めっき

折り曲げ試験　　：剥離なし。

テープ試験　　：剥離なし。

（2）無電解めっき

折り曲げ試験　　：皮膜剥離あり。

テープ試験　　：皮膜剥離あり。

無電解めっきの密着性試験（90° 折り曲げ試験及びテープ試験）において、ニッケルーリン皮膜と黒色皮膜との界面で剥離が見られる。素材とニッケルーリン皮膜との間には剥離は見られない。

4．2．5 予備試験結果

電気めっきでは黒色皮膜自体を成長させているのに対して、無電解めっきでは、金属色のニッケルーリン皮膜の最外層に黒色皮膜を付着するという手法であることから、無電解めっきではニッケルーリン皮膜との界面の密着性を得ることは困難である。外観的にはどちらも差異はないが、電気めっきの接着強度が強く、めっきの手法としては電気めっきが適していると判断した。

また、素材の表面処理に関しては、ブラスト処理にて表面を荒らしてからめっきを施すことにより平成元年製作時試験片に近い状態が得られることから、ブラスト処理を行うこととした。

4．3 評価試験

予備試験の結果により、黒化処理方法として黒色ニッケル電気めっきを採用することとした。次はめっき厚さをパラメータとして各種試験を行い、最適な皮膜成形方法を見つけ出すこととした。

めっき厚さに関しては、1，3，5μmの3種類を選定し試験することとした。

4．3．1 試験項目及び試験条件

試験項目として以下を選定した。

（1）輻射率測定

（2）接着強度

（3）組成観察

（4）真空アウトガス測定

また、上記試験項目に対し、試験条件は、

（1）製作のまま

（2）熱サイクル後

（3）高温試験後

の3種類を採用した。
試験項目と試験条件を表4．1に示す。また、試験片の作成方法は次項に示す。

表4．1 試験項目と試験条件

試験項目	製作のまま	熱サイクル後	高温試験後
輻射率測定	3	1	1
接着強度	6	6	3
組織観察	3	3	3
真空アウトガス測定	1	1	－

表内数値は、試験片数を示す。

4．3．2 試験片の状態

各試験項目における試験片の状態を以下に示す。試験片の大きさは、輻射率測定用：38×20mm、組成観察用：10×10mm、それ以外用：10×70mmの試験片とした。

(1)製作のまま

各種試験片の状態と比較するため、熱ストレスを与えない状態の試験片の製作を行った。

(2)熱サイクル後

熱サイクル試験片は、減速材容器の耐用年数である約7年間の使用状態（7サイクル×7年）を考慮し、常温と約―250℃（減速材容器内に液体水素が貯留している温度）の温度差を勘案し、液体窒素（－196℃）と恒温槽（70℃）の温度サイクルを50回与えた。熱サイクル試験状況を図4．1に示す。

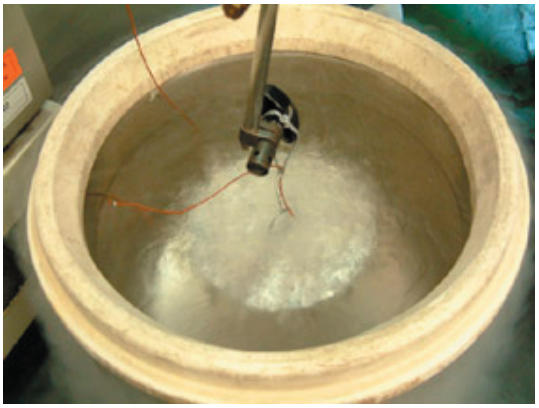
(3)高温試験後

高温試験は、短冊状の試験片（10×70mm）を用いて、高温試験装置（Arガス置換熱処理炉）により実施した。試験準備として高温試験装置内を真空排気後、Arガスをパージする処置を5回繰り返してArガスへの置換を行った。

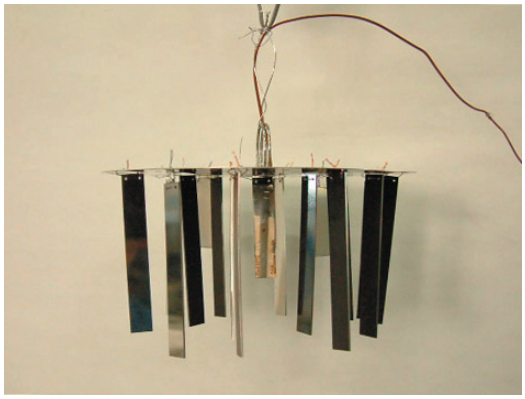
めっき厚さ3種類の試験片に対して、約2時間で450℃まで昇温し、24時間保持後に約8時間かけて自然冷却した。なおダミーの試験片に熱電対を取り付けて温度を管理した。

高温試験の予備試験を実施したところ、Arガスを用いたにもかかわらず試験片の変色（特に母材側）が著しいため、真空状態にしたガラス管に試験片を入れて同様な試験を試みたが、同様に変色が見られたため、真空状態での高温試験ではなくArガス中での高温試験を採用した。

①熱サイクル試験用恒温槽(70℃)



②熱サイクル試験用冷却槽(液体窒素:約－196℃)



③試験片の取り付け状況

図4．1 熱サイクル試験状況

4．3．3 試験方法と結果

（1） 輻射率

輻射率の測定は、短冊状の試験片（38mm×20mm）を用い、それぞれ1，3，5μmのメッキ厚に対して試験を行った。また、各試料を100，300，450℃まで加熱し、3～30μmの赤外線領域での分光輻射エネルギーをFT－IR（日本分光FT－IR550）及び標準黒体炉を用いて測定し、黒体放射と比較して輻射率を求めた。

輻射率測定の各条件及び測定結果について表4．2に示す。

表4．2の結果から輻射率は概ね0．82～0．94であり、メッキ厚さ及び熱サイクル・高温試験にかかわらず大きな差異はなく0．8以上を確保できることを確認した。

表4．2 輻射率測定結果

試験片の状態	めっき膜厚	温度(℃)	輻射率			
			1回目	2回目	3回目	平均
製作のまま	1μm	100	0.886	0.873	0.876	0.88
		300	0.903	0.906	0.905	0.90
		450	0.821	0.821	0.818	0.82
	3μm	100	0.830	0.825	0.823	0.83
		300	0.919	0.906	0.907	0.91
		450	0.912	0.914	0.915	0.91
	5μm	100	0.844	0.844	0.842	0.84
		300	0.910	0.909	0.910	0.91
		450	0.912	0.921	0.924	0.92
熱サイクル試験後	3μm	100	0.858	0.879	0.864	0.87
		300	0.932	0.941	0.936	0.94
		450	0.918	0.912	0.911	0.91
高温試験後	3μm	100	0.865	0.867	0.864	0.86
		300	0.850	0.852	0.848	0.85
		450	0.885	0.891	0.904	0.89

(2)接着強度

接着強度試験は、10×70mmの短冊状の試験片を用いて、一般的にめっき等の接着強度を評価するために用いられるJIS H 8504に準拠した曲げ試験を採用した。

試験は、曲げ半径10mmの当て金を使用して約10kgfの重錘により実施した。接着強度の加速試験要領を図4．2に示す。 ①90° 曲げる、②元に戻す、③逆方向に90° 曲げる、④元に戻す。この操作を1サイクルとし、観察を行いながら5サイクルの曲げ試験を行った。当て金には試験片との接触を緩和させるために0．08mm厚さのテフロンシートを敷いた。

試験の結果、著しく剥がれているところは見られなかったが、めっきが厚いほどめっき表面にクラックが発生し、部分的に剥離して白く見られる部分があった。

接着強度試験の結果を表4．3に示す。製作のままの試験片及び熱サイクル後の試験片では膜厚が3μmと5μmの試験片において、2サイクル目の曲げ試験時に若干の割れが認められたが、膜厚1μmの試験片では異常が見られず、全ケースにおいて黒化皮膜が完全に剥離してしまうような致命的な欠陥は認められなかった。

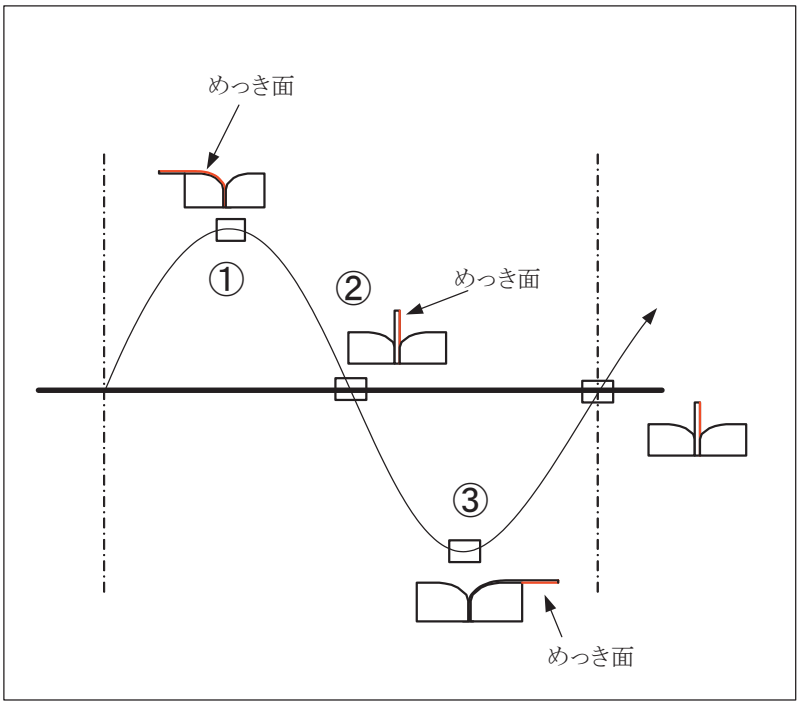


図4．2 接着強度の加速試験要領

表4．3 接着強度試験結果の一覧

試験片の状態	膜厚	観察時期	拡大観察 サイクル 1	2	3	4	5	SEM観察 5	結果
製作のまま	1μm	①	○	○	○	○	○	－	剥離や割れなどの異常なし。
		②	○	○	○	○	○	－	
		③	○	○	○	○	○	●	
	3μm	①	○	●	●	●	●	－	2回目の①の時、めっき表面が少し白色となる。白色領域は5回目も変化なし。
		②	○	●	●	●	●	－	
		③	○	●	●	●	●	●	
	5μm	①	○	●	●	●	●	－	2回目の①の時、めっき表面が全体的に白色となる。白色領域は5回目も変化なし。
		②	○	●	●	●	●	－	
		③	○	●	●	●	●	●	
	1μm	①	○	○	○	○	○	－	剥離や割れなどの異常なし。
		②	○	○	○	○	○	－	
		③	○	○	○	○	○	－	
	3μm	①	○	●	●	●	●	－	2回目の①の時、めっき表面の一部が白色となる。白色領域は3回目以降徐々に拡大した。
		②	○	●	●	●	●	－	
		③	○	●	●	●	●	－	
	5μm	①	○	●	●	●	●	－	2回目の①の時、めっき表面が少し白色となり、一部に剥離が認められた。剥離面積は、3回目以降徐々に拡大した。5回目には広範囲がまだら状となった。
		②	○	●	●	●	●	－	
		③	○	●	●	●	●	－	
熱サイクル試験後	1μm	①	○	○	○	○	○	－	剥離や割れなどの異常なし。
		②	○	○	○	○	○	－	
		③	○	○	○	○	○	－	
	3μm	①	○	●	●	●	●	－	2回目の①の時、めっき表面が全体的に白色となる。白色領域は5回目も変化なし。
		②	○	●	●	●	●	－	
		③	○	●	●	●	●	－	
	5μm	①	○	●	●	●	●	－	2回目の①の時、めっき表面が全体的に白色となる。白色領域は5回目も変化なし。
		②	○	●	●	●	●	－	
		③	○	●	●	●	●	－	
	1μm	①	○	○	○	○	○	－	剥離や割れなどの異常は認められなかった。
		②	○	○	○	○	○	－	
		③	○	○	○	○	○	－	
	3μm	①	○	●	●	●	●	－	2回目の①の時、めっき表面が全体的に白色となる。白色領域は5回目も変化なし。
		②	○	●	●	●	●	－	
		③	○	●	●	●	●	－	
	5μm	①	○	●	●	●	●	－	2回目の①の時、めっき表面が全体的に白色となる。白色領域は5回目も変化なし。
		②	○	●	●	●	●	－	
		③	○	●	●	●	●	－	
高温試験後	1μm	①	○	○	○	○	○	－	剥離や割れなどの異常なし。
		②	○	○	○	○	○	－	
		③	○	○	○	○	○	●	
	3μm	①	○	○	○	○	○	－	剥離や割れなどの異常なし。
		②	○	○	○	○	○	－	
		③	○	○	○	○	○	●	
	5μm	①	○	○	○	○	○	－	剥離や割れなどの異常なし。
		②	○	○	○	○	○	－	
		③	○	○	○	○	○	●	

（備考）⑴表中1～5は曲げサイクル数を、①～③はそれぞれのサイクルでの負荷状況を示す。
⑵○：めっき面の剥離・割れなし。
●：めっき面の剥離・割れ発生。

(3)組成観察

走査電子顕微鏡(SEM)により、表面を拡大して観察した。拡大の倍率は90倍及び900倍とした。

製作のままの試験片のめっき面は微細な粒状面であり、膜厚5μmには非常に小さな割れが認められた。この表面形態は熱サイクル後の試験片も同様であった。これに対して高温試験後の試験片では、すべての膜厚で亀甲状の割れが発生しており、めっき厚の増加に伴い亀甲サイズも大きくなる傾向が見られた。この原因は、熱膨張差によるものと思われた。一般的に低温では熱膨張率は低下することと高温試験の試験片の方が熱サイクル試験よりも温度差が大きいため、熱膨張率が大きくなり、結果割れが多く発生したと推定した。

各試験条件における組成の観察では、温度差が大きくめっき厚が厚いほど、割れが大きくなる傾向が認められた。

(4)真空アウトガス測定

減速材容器は、断熱のため高真空状態にさらされる。この際にめっき表面から放出されるアウトガスが懸念されるため、アウトガスの測定試験を行った。

試験片は短冊状(10×70mm)で、めっきの影響をもっとも大きく受けると思われる5μmのめっき厚を対象とした。また試験条件は、減速材容器が通常使用時ともっとも近い条件の熱サイクル試験後の試験片とした。また、試験容器自体のアウトガスの影響を考慮して、試験片を入れない状態での真空度上昇をバックグランドとした。なお、真空ポンプ停止後の測定時間は60分とした。

各試験片のアウトガス測定結果を表4．4に示す。

試験片の真空度上昇は、製作のままの試験片では、5．3 × 10^{-3} Pa(0．04×10^{-3} Torr)に対し、熱サイクル試験後の試験片では、2．7 × 10^{-3} Pa(0．02×10^{-3}Torr)であった。この値を試料の単位面積あたりに換算すると、

2．8×10^{-6} Pa･m^3／s･m^2 となり。通常のニッケルめっき表面のアウトガス量(5．6×10^{-6} Pa･m^3／s･m^2)と同等であった。

表4．4 アウトガス測定結果

	真空試験時 真空度上昇 ×10^{-3} Pa (×10^{-3} Torr)	バックグランド 真空度上昇 ×10^{-3} Pa (×10^{-3} Torr)	真空度差分 ×10^{-3} Pa (×10^{-3} Torr)	アウトガス量 Pa･m^3 (Torr･L)
製作のまま 膜厚5μm	6.7 (0.05)	1.3 (0.01)	5.4 (0.04)	1.4×10^{-5} (1.06×10^{-4})
熱サイクル試験後 膜厚5μm	6.7 (0.05)	4.0 (0.03)	2.7 (0.02)	7.1×10^{-6} (5.3×10^{-5})

(注)アウトガス測定系容積:2．66×10^{-3} m^3

4．3．4 評価試験まとめ

評価試験の結果、実機を模擬した各試験条件では大きな劣化はなく、めっき厚さにかかわらず輻射率、アウトガス等も十分低いことを確認した。

輻射率は、膜厚、熱サイクル試験、高温暴露試験に関係なく0．8以上の輻射率が得られ、要求する0．6以上を十分満足することを確認した。

接着強度試験や組成観察では板厚が厚いほど、加えた温度差が大きいほど亀裂等が大きくなる傾向が見られたが、致命的な欠陥はないと判断した。

以上の結果、黒化処理手法として、ブラスト処理を施した素材に黒色ニッケル電気めっきを用いて、めっき厚さ1～5μm程度を採用すれば、輻射率、接着強度、アウトガスにおいても要求を満たす条件が得られることを確認した。

5. 製 作

5．1 設計条件及び設計仕様

減速材容器ユニットを製作するにあたり、設計及び工事の方法の認可申請の設計条件及び使用について若干の変更が生じた。これは、材質や形状を変更するものではなく、従来のフランスでの製作に加え、国内での製作も可能にするため、材料規格値をフランス規格と日本工業規格を併記したものである。また、減速材容器についても管種別を第4種管とした。

表5．1に平成元年製作時と平成17年製作時の設計条件及び仕様を示す。

表5．1 設計条件及び仕様

			平成元年製作時	平成17年製作時
管種別			第3種管：真空断熱管Ⅰ 真空断熱管Ⅳ 第4種管：外管	第3種管：真空断熱管Ⅰ 真空断熱管Ⅳ 第4種管：減速材容器 外管
最高使用圧力 (kPa)	真空断熱管Ⅰ	内圧	588．4 (6 kg/cm^2)	←
		外圧	196．1 (2 kg/cm^2)	←
	真空断熱管Ⅳ	内圧	196．1 (2 kg/cm^2)	←
		外圧	588．4 (6 kg/cm^2)	←
	外管及び減速材容器	内圧	441．3 (4.5 kg/cm^2)	←
		外圧	196．1 (2 kg/cm^2)	←
耐震クラス			A	←
減速材容器材質			NF Z6NCTDV25-15B	SUH660 又は相当 (NF Z6NCTDV25-15B)
真空断熱管Ⅰ、Ⅳ材質			AG3NET	AG3NET 又は A5052
外管（重水タンク内）材質			NF Z6NCTDV25-15B	SUH660 又は相当 (NF Z6NCTDV25-15B)
外管（上記以外）及び内管材質			ASME SA312 TP304L SA182 F304L	SUSF304L 又は相当 (ASME SA182 F304L) SUS304LTP 又は相当 (ASME SA312 TP304L)
主要寸法 (mm)	減速材容器	幅	129．5	←
		厚さ	50	←
		高さ	260	←
		板厚	0．8	←
	内管		φ9 × 0．5t	←
	外管		φ25 × 1 t	←
	真空断熱管Ⅰ		φ47 × 3 t	←
	真空断熱管Ⅳ		φ147 × 16t	←
減速材容器表面処理			黒化処理	←
黒化処理輻射率			0．6以上	←

←：左欄と同じ

5．2 既存減速材容器の調査

平成元年当時に減速材容器ユニットを2体製作しており、このときに破壊試験に使用した減速材容器が残っていたため、この容器を用いて表面状況の観察、素材の引張強度確認、溶接部の非破壊検査条件の確認試験等を行った。残された減速材容器は破壊試験を実施しているため、容器自体が変形しており、炉内へ組み込んだ減速材容器とは異なる形状であったが、できる限りの情報を得るため切断して各試験を行った。

既存容器の調査に使用した容器を図5．1に、減速材容器の構造を図5．2に示す。

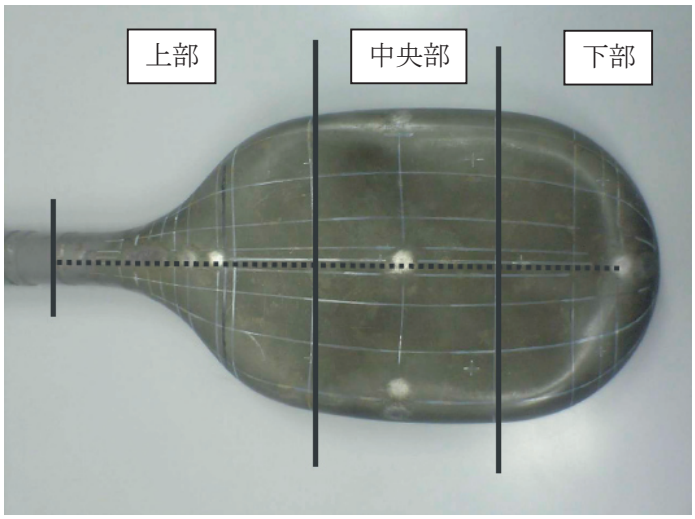


図5．1 調査に使用した容器

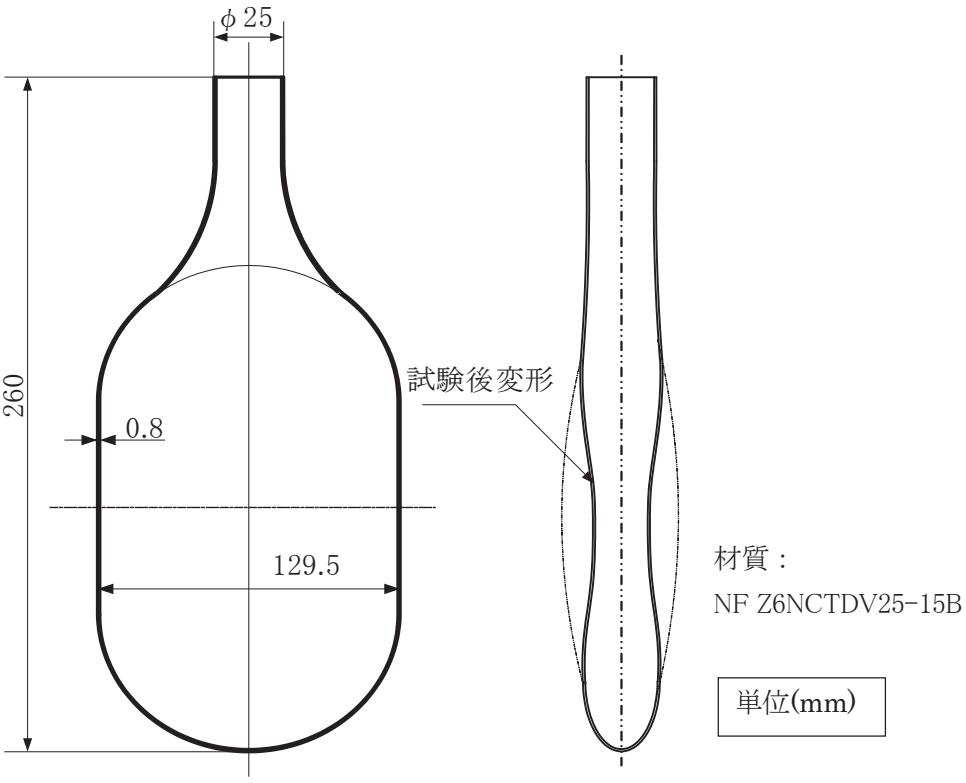


図5．2 減速材容器の構造図

5．2．1 試験項目

(1)表面観察

溶接状況確認を主目的として、溶接部、溶接による熱影響部、母材部に対して溶接部裏波確認、板厚分布測定、ミクロ観察、粒度測定、硬さ測定を実施した。

(2)引張強度確認

溶接部、母材部の強度を確認するために減速材容器のほぼ中央部から各2本の引っ張り試験片を切り出し、引張強度の確認を行った。

(3)溶接部非破壊検査

溶接部に対して液体浸透探傷試験(PT)、放射線透過試験(RT)を実施し、容器の非破壊検査条件の確認を実施した。

5．2．2 試験結果

(1)表面観察

1)溶接部裏波確認

代表的な溶接箇所として上部肩部、中央直線部、下部肩部の裏波の確認を行った。その結果どの溶接個所においても同等の仕上がりであった。裏波が若干膨れている箇所も見られたが、ビードも揃っており綺麗な溶接状況であった。加工方法は冷間又は熱間プレス加工と推定され、表面の状況から細部の曲げ加工は叩き出しと考えられた。

2)板厚分布測定

板厚測定は、代表的な位置をポイントマイクロメータを用いて測定した結果、約0．08mmの板厚分布があり、最小～最大で、0．718～0．789mmであった。規定の0．8mmよりも若干薄い結果となったが、測定した容器は耐圧破壊試験に使用した容器であり、容器の形状が著しく変形していたことから、実機で用いている容器とは状態が異なると推定される。

3)ミクロ観察・粒度測定

溶接部、溶接による熱影響部及び母材部に対してミクロ観察及び粒度測定を実施した結果、溶接部ではデントライト(樹枝状結晶)が成長し、母材部は熱処理の影響で結晶粒度が増大していた。粒度測定は、溶接金属部はデントライト状態であり、母材の粒度番号は約4～5の結晶粒度であった。溶接熱影響部では、母材よりも若干大きな結晶粒度であった。

4)硬さ測定

溶接部硬さの変化を確認するため、切断した容器の側面を、容器表面から板厚の1／4の位置について、母材部、溶接熱影響部、溶接部についてビッカース硬さ試験にて実施した。その結果は、表5．2に示すとおりであった。溶接部の硬さがもっとも低く、溶接熱影響部、母材部の順に硬さが増していた。

表5．2 硬さ測定結果

測定部位	ビッカース硬さ
母材部	320～348
溶接熱影響部	252～278
溶接部	254～258

(2)引張強度確認

引張試験は、既存減速材容器の中央部分から、溶接部2箇所、母材部2箇所の試験片を切り出し、図5．3に示す試験片形状に加工し、引張速度は5mm／minで実施した。

引張試験結果を表5．3に示す。

JISのSUH660材の規格と比べて、母材の強度は規格値以上であるが、溶接部の一部において、母材の引張強さを下回る部分が見られた。

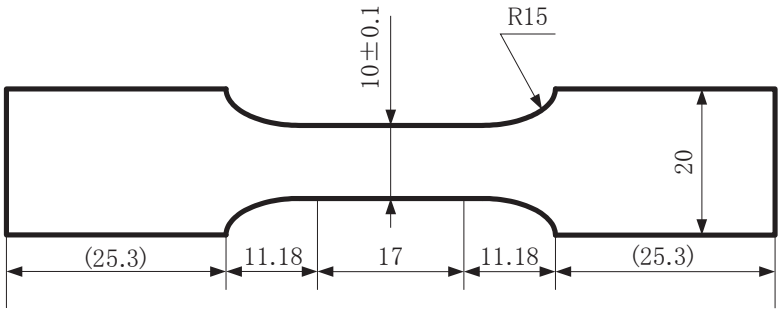


図5．3 引張試験片形状

表5．3 引張試験の結果

試験片部位	試験温度 (℃)	標点距離 (mm)	引張強さ		破断位置
			(N)	(N/mm^2)	
JIS規格	－	－	－	900 以上	－
母材	23	16	7181	988	最細部
			7198	993	最細部
溶接部			7052	889	溶接線境界部
			7170	926	溶接線境界部

(3)溶接部非破壊検査

1)液体浸透探傷試験(PT)

既存の減速材容器を3分割に切断後、外側溶接部に対し、JIS Z 2343にしたがって PT を実施した結果、「試験研究の用に供する原子炉等の溶接の技術基準に関する総理府令(以下、「構造基準」と言う。)」の合格基準を満足していることを確認した。また、内側についても PT を実施したが、φ0．1mm以下の指示模様が若干見られた。

2)放射線透過試験(RT)

既存の減速材容器の切断の前後で RT を実施し比較した。これは、減速材容器の形状が RT を実施する上で、斜め方向にしか撮影できないため、判定が困難となることが予想されていたためである。

平成元年の減速材容器製造時に実施した RT とほぼ同条件(斜め二重壁撮影)にて RT を実施したところ、欠陥は検出されなかった。また、減速材容器切断後に単壁で RT を実施したが、同様に欠陥は認められなかった。

5．2．3 既存減速材容器の調査結果まとめ

(1)溶接部に関しては、外観上ビードも均一で良好な状態であった。

(2)加工方法は、金型、ゴム膜を用いたハイドロフォーミング加工(プレス加工)などが考えられ、細部の曲げ加工は表面の状態から叩き出しと思われる。

(3)板厚測定及び RT により溶接部のすぐ近くの部分で母材よりも薄くなっている部分が確認された。

(4)RT については、容器の形状から斜め二重壁撮影を実施せざるを得ないが、本調査で確認したところ、溶接欠陥は認められなかった。

(5)PT、RT の撮影要領、評価の方法は基本的に構造基準を摘要できると判断した。

5．3 三重管曲げ試験

図5．4に三重管の構造を示す。

減速材容器ユニットのうち減速材容器と接続される垂直配管は、放射線ストリーミング防止のために、スネーク状に曲げ加工している。この配管は三重管構造をしており、外側の配管を真空断熱管Ⅰ(A5052)、中間部配管を外管(SUS304LTP)、内側の配管を内管(SUS304LTP)と呼んでいる。スネーク状の三重管は、各配管を曲げた後では内側の管を挿入できないため、最初に直管を挿入しておき三重管を同時に曲げる必要がある。

三重管の製作に当たっては、曲げ精度を上げるために曲げ加工試験を実施して要領を確立した。

5．3．1 加工方法の検討

三重管の曲げ加工は、内部配管の隙間に固形物を詰め込んだ状態で、外部から力を加える方法が最も簡便であると考えた。内部に詰める固形物については、砂、粉上の物質、氷等が考えられたが、詰め込んだ固形物を完全に取り除くためには氷が最適と考え、内部に水を注入し、凍らせた状態で曲げ加工を行う手法を採用した。

5．3．2 曲げ試験での問題点

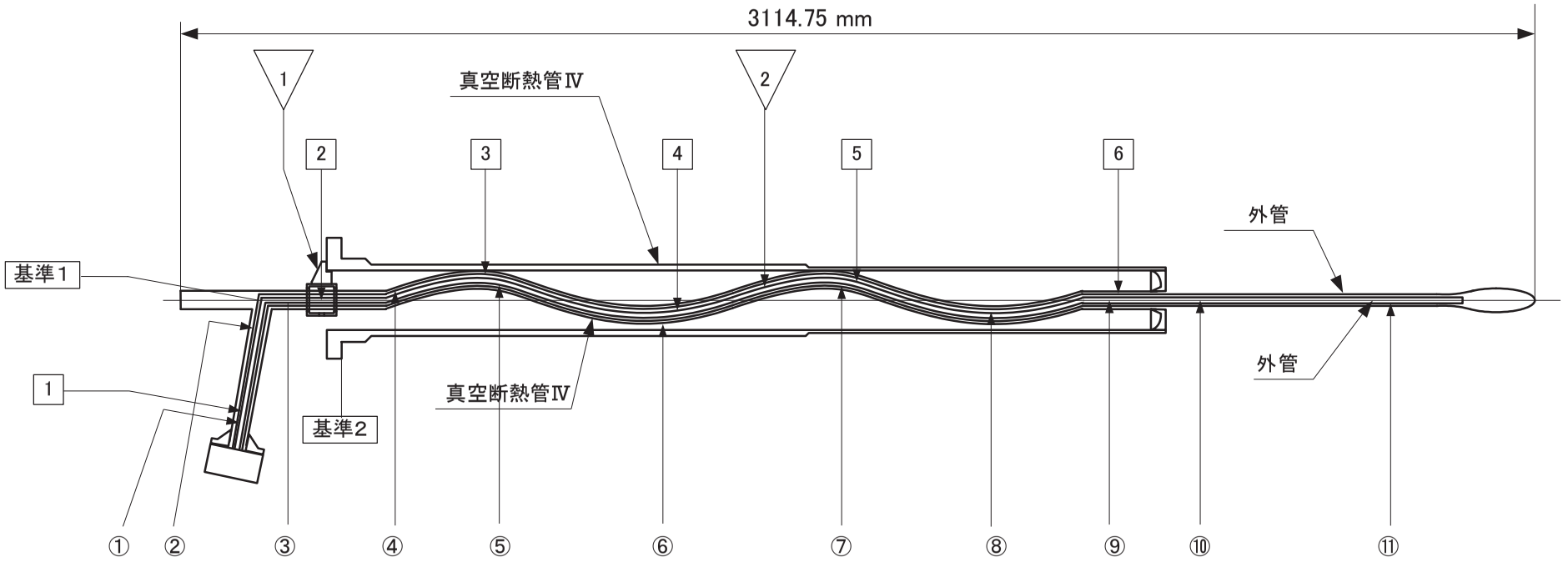
(1)曲げによって生ずる窪み対策

試験初期の段階で、短管(約60cm)の三重管で曲げ試験を行ったところ、真空断熱管Ⅰの曲げ中心部の頂点付近に窪みができる現象が見られた。この現象は、最も外側にある真空断熱管Ⅰの曲げ頂点付近が両側に引っ張られるため、部分的に薄くなっている現象であると推定された。検討の結果、素材の機械的性質の伸びが7%であり、曲げによって生ずる伸びがこの値を超えることが判明した。

対策として、材料を A5052TDS から同じ材料の焼きなまし処理を行う A5052TDS-O を使用することにより、伸びが27%まで上昇し、問題を解決することができた。

(2)三重管の間隙の確保

三重管曲げ試験で最も重要な課題は隙間の確保であった。真空断熱管Ⅰは、温度差約300℃を断熱するため真空状態を保つ構造となっているが、管が接触していては断熱できない。特に真空断熱管Ⅰと外管の隙間寸法は図面寸法の1／2以上確保を条件としていたため、様々な条件で曲げ試験を実施して、要求を満たす加工方法を検討した。



記号	番　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
○	内管と外管のスペーサ	424.5	64.5	−187.0	187.0	545.0	877.0	1287.0	1655.0	1905.0	2217.0	2717.0
□	外管と真空断熱管Ⅰのスペーサ	410.5	−65.0	484.0	933.0	1343.0	1930.0					
▽	真空断熱管Ⅰと真空断熱管Ⅳのスペーサ	−	989.0									

	基準1からの距離
	基準2からの距離

図5．4　三重管構造図

隙間の確認は外部から観察できないため、RTにより行った。観察の結果、管の隙間を保持するスペーサのない箇所での隙間寸法が小さくなる傾向が見られた。スペーサを増やせば隙間を確保できるがスペーサ自体が熱を伝達するため、数を増やすことは得策ではない。

曲げ加工時に内部の管を拘束するのは氷であるため、氷の温度管理と曲げ手順の最適化を図った。氷の管理については、1箇所の曲げ毎に再氷結させた状態で次の曲げ加工を行う手順を踏んだ。曲げの順番については、それまでの試験結果を踏まえ、片寄りの傾向とスペーサの位置関係より、曲げと隙間を机上にてシュミレートして決定した。この結果、最終的な隙間は図面寸法の1／2以上を確保することが可能となった。

(3)内部配管の変形

試験段階で、曲げ部分を切断し、内部配管の変形や偏りを観察したところ、三重管配管のうち2重目の外管に変形が見られた。この現象は、管の隙間部分の水を凍らせているため氷の割れが影響していると推定した。三重管の状態で一気に曲げ加工を行う方法では、氷が割れる現象が考えられるため、曲げ加工時に氷を融かしながら加工を行う対策を考えたが最終的には(2)に示す管理方法で内部配管の変形の防止を行った。また、三重管の間隙部分に空気溜りが生じて、これが管の変形に影響を与えることも考えられたため、水を凍らせるときに空気溜りができないよう、三重管を垂直に立てた状態で凍らせる方法を採用した。

5．4 減速材容器の試作試験

減速材容器ユニットの先端に位置する減速材容器(液体水素を貯留する部分)について、成形、溶接及び試験方法についての試験を実施し、実機の製作に反映させた。

5．4．1 減速材容器のプレス試験

減速材容器は、SUH660 材の0．8mmと非常に薄い板であることから冷間プレスで加工できると判断し、プレス試験を行った。

まず、素材から減速材容器の形と周囲の抑え部分(フランジ)だけ大きく切断し、これを予め作成しておいた金型を使ってプレスを行った。プレス試験では、以下のような課題が発生し、対策を行った。

(1)減速材容器の首の部分にしわ状のものができる

プレス加工は、材料の引張りと圧縮を行って加工するため、引張りと圧縮の過程でしわ状になる部分が生じてしまうものと推定した。これに対しては、金型の修正を行うことと、素材の切断時に、フランジ部分を大きくとることによって圧縮と引張の影響をフランジ部分に現れるようにすることで解決できた。

(2)プレス後の板厚のばらつき

プレス後に板厚がばらつき、引張られる部分は薄くなり、圧縮される部分は厚くなってしまう現象が見られた。減速材容器の板厚については、0．8mm以上確保を条件としたため、最も薄い部分でも0．8mmを下回らない範囲で板厚を調整することとした。金型は、オスとメスの金型により板材をプレスして成形するが、オス、メスの角部分のＲを大きく取ることにより、引っ張られる箇所をできるだけ分散させるように修正を行った結果、最も薄い部分でも0．8mmを確保することができた。

5．4．2 容器のプレス試験後の形状確認

減速材容器は、0．8mm薄板の SUH660 材を冷間プレスにより成形する方法を採用した。事前にプレス試験を実施したが、容器の形状が製作図通りに成形されているかを確認した。容器はプレス後、溶接前の形状について3次元測定器（デジタル輪郭形状測定器 コントレーサ CV-6000 シリーズ）を用い、図5．5に示す①～⑦の周方向（Y及びZ方向）について測定した。測定点①の測定結果について図5．6に示す。測定の結果、製作図面との差違はなく、図面通りの寸法形状であることを確認した。

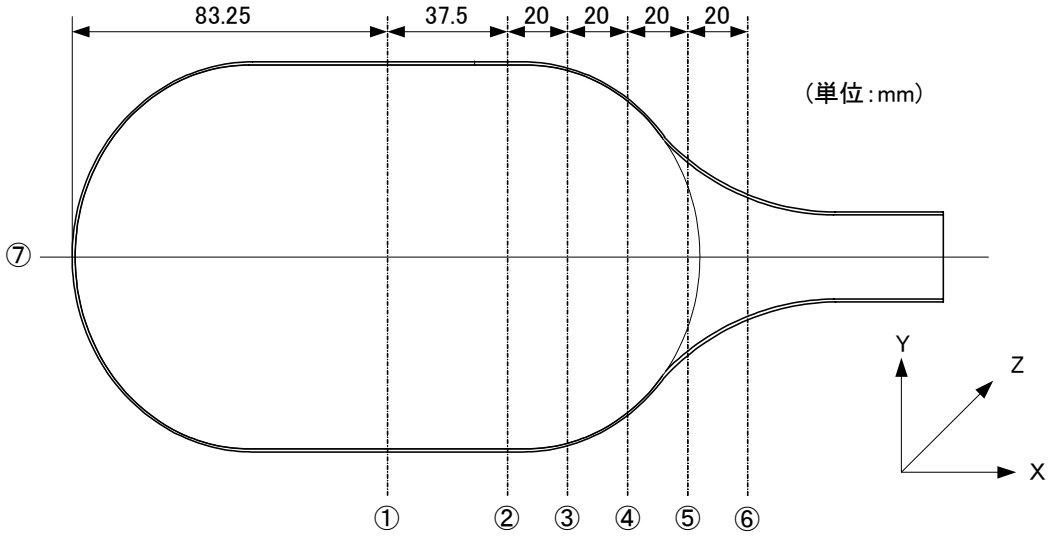


図5．5 減速材容器プレス後の形状確認位置

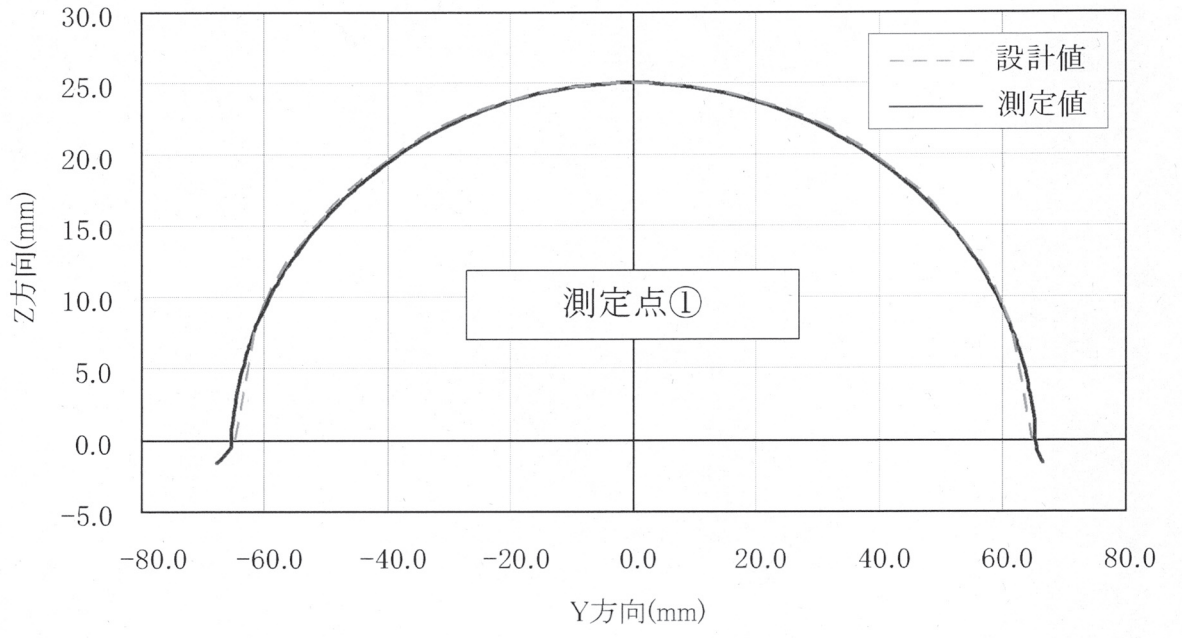


図5．6 減速材容器プレス試験後の形状測定

5．4．3 溶接方法の事前試験と評価方法の検討

溶接については当初から、薄肉であるため作業性や検査の方法、特にRTの判定基準がJIS等の基準を満足できるか懸念があった。このため溶接方法の試作試験は、平板の状態で溶接を行った後、引張試験及びRT評価試験を行った。平板溶接後の引張試験の結果を表5．4に示す。引張試験条件は、「5．2 既存減速材容器の調査」で行った引張試験と同条件である。

表5．4に示すとおり、既存の減速材容器の調査で実施した引張強度試験と比較してほぼ同じ強度が得られているが、溶接部について母材の引張強さを下回る部分が見られた。溶接後は時効処理を行い強度を増すこととしていたが、本試験では複数の溶接片をまとめて時効処理したため温度管理が不十分であり、期待する強度が得られなかったと推定した。最終的には溶接後の時効処理時に母材部、溶接部に熱電対を取付け、温度管理を適切に行うことで母材の JIS 規格値を超える 985 N/mm^2 の引張強さを得ることができた。

RT 評価方法について、平板溶接後に RT を実施した結果、一部に黒い筋がみられ、これが欠陥であるかどうかに着目した。溶接部を切断し断面マクロ撮影を実施したところ欠陥は見当たらず、組織的な疑似欠陥（溶接部の組織に干渉して現れるX線の回析による回折像）であることがわかった。実機のRT においてもこのような擬似欠陥が現れると思われるが、「JIS Z 3106 ステンレス鋼溶接継手の放射線透過試験方法（付属書5）」を適用し、欠陥ではないと判断できることを確認した。

表5．4 平板溶接後の引張試験結果

試験片部位	試験温度 (℃)	標点距離 (mm)	引張強さ		破断位置
			(N)	(N/mm^2)	
母材	23	16	9403	1109	最細部
			9429	1116	最細部
溶接部			8065	887	溶接線境界部
			8271	942	溶接線境界部
溶接部 ※1	17	－	－	985	溶接部
規格値				900 以上	―

※1 別途、溶接施工法確認試験にて実施したデータ（試験片形状は本試験とは異なる。）

5．5 耐圧試験

減速材容器ユニットは、減速材容器、真空断熱管Ⅰ及びⅣの内圧、外圧について耐圧試験を実施することを計画していた。このうち、三重管の内部配管については、耐圧後の変形の確認ができないため、製作過程で耐圧試験を追加で実施した。

各配管は溶接により接続されるが、予長部を長くとり一度溶接して耐圧試験を実施後に余分な配管を切断し、加工を進めて行く手順を採用した。

加工過程で耐圧試験を追加実施した箇所を表5．5に示す。

表5．5 耐圧試験の追加個所

	追加試験個所
1	外管（曲げ加工前）
2	真空断熱管Ⅰ（曲げ後）
3	外管（水平部）
4	外管（下部：減速材容器と接続する部分）
5	真空断熱管Ⅰ（水平部）
6	真空断熱管Ⅳ

5．6 実機製作

減速材容器ユニットは前項までに述べたように各種試験を重ね、その結果から最適な加工方法を見出しながら製作を行ってきた。特に三重管曲げについては、何度も試験を行い最終的には仕様を満足する加工方法を見出した。このように各種の試験を重ねた経験を基に製作を進めることとしたが、完全に確立された技術ではないため、製作に当たっては、各パーツについて3体分以上製作し、減速材容器ユニットとして組み立てて行くこととした。組み立てられた減速材ユニットの中から品質の良いものを選び出し、完成体とする方法が採られた。

最終的に1体について全ての検査に合格、完成させ、納入品として据付けられた。

6. 現地交換工事

6．1 交換工事計画

減速材容器ユニットの交換は原子炉の炉心近辺まで近づくこととなり、高線量が予想された。交換に当たっては、原子炉の燃料はすべて使用済燃料プールへ移動し、原子炉プール水は FL＋3900まで排水し、この状態で真空断熱管Ⅱの特殊な三重管継手フランジ部の切り離し等の作業を行った。

交換に先立って、減速材容器の放射化量を推定し作業計画を立案した。

6．1．1 減速材容器の線量当量率の推定

減速材容器ユニットの更新は、中性子照射量により定められている。JRR－3の場合は運転時間に換算して約3万時間と設定されている。これを照射時間とした。また、熱中性子束は平成10年度に評価した値を用いた。評価対象部分は、減速材容器ユニットのうち原子炉の重水タンク内に設置されているステンレス鋼とし、減速材容器とこれに接続される内管及び外管とした。

作業計画の立案にあたっては、求められた放射化量に基づきγ線量を評価する必要がある。従って放射化量から1m位置における線量当量率に変換した値を比較することとした。表6．1に1m位置における推定線量当量率を示す。

平成10年度の交換の際は原子炉のトラブルにより約5ヶ月の冷却期間後の作業であったが、今回は、原子炉停止後約50日後に旧減速材容器を引き抜くことを想定し、工事計画を立案した。

50日冷却のときは 3．46×10^6μSv／h、5ヶ月冷却のときは 2．92×10^6μSv／h となりその比は1．2倍である。平成10年度と比べると若干の上昇が見られるため、今回の作業での推定線量当量率は平成10年度の作業時の1．5倍とした。

表6．1 1m位置における推定線量当量率 （μSv／h）

冷却日数	0	10	20	30	40	50	60	70
冷却時間	0	240	480	720	960	1200	1440	1680
Cr-51	1.00E+06	7.82E+05	6.09E+05	4.74E+05	3.69E+05	2.88E+05	2.24E+05	1.74E+05
Mn-56	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe-59	4.78E+05	4.09E+05	3.50E+05	3.00E+05	2.57E+05	2.20E+05	1.88E+05	1.61E+05
Co-60	3.01E+06	3.00E+06	2.99E+06	2.98E+06	2.97E+06	2.96E+06	2.94E+06	2.93E+06
Ni-65	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	4.49E+06	4.19E+06	3.95E+06	3.75E+06	3.59E+06	3.46E+06	3.36E+06	3.27E+06

冷却日数	80	90	100	110	120	130	140	150
冷却時間	1920	2160	2400	2640	2880	3120	3360	3600
Cr-51	1.36E+05	1.06E+05	8.23E+04	6.41E+04	4.99E+04	3.89E+04	3.03E+04	2.36E+04
Mn-56	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe-59	1.38E+05	1.18E+05	1.01E+05	8.64E+04	7.40E+04	6.34E+04	5.42E+04	4.64E+04
Co-60	2.92E+06	2.91E+06	2.90E+06	2.89E+06	2.88E+06	2.87E+06	2.86E+06	2.85E+06
Ni-65	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	3.20E+06	3.14E+06	3.09E+06	3.04E+06	3.01E+06	2.97E+06	2.95E+06	2.92E+06

6．1．2 減速材容器取出方法の検討

減速材容器ユニットの取り出しは、水中で作業を行う湿式と空気中を移動させる乾式の2通りが考えられる。前者は、水中での作業のため高線量の減速材容器ユニットを取り扱うには有利であるが、減速材容器ユニットが収められている真空容器内に水が入り込むことになる。真空容器は液体水素温度の約20K とプール水温を断熱するため高真空を維持しなければならない。内部に水分が残留すると高真空にならないため、線量的には不利であるが真空容器内の乾燥作業を必要としない乾式で交換する方法を採用した。平成10年度の交換方法も乾式を採用している。

乾式工法は、一時的ではあるが炉室空間に減速材容器ユニットが露出するため、炉室内の空間線量率が高くなる。この被ばく線量低減対策としては、①取り出した旧減速材容器ユニットを保管する保管容器を予め減速材容器取り付け位置に可能な限り近くに設置しておくこと。②上部遮へい体は最小限の開度とすること。③作業員は ITV による遠隔操作により原子炉プールより離れた位置でクレーン操作を行うこと。④作業時は炉室内を立ち入り制限とすること。などを実施した。

交換時の原子炉及びCNSの状態を表6．2に示す。

表6．2 減速材容器交換時の原子炉及びCNSの状態

名称等	状　態
燃　料	使用済み燃料プールへ移動
照射試料	取り出し
炉プール水位	FL＋3900まで排水
CNS水素ガス	排出（ヘリウムガスにて大気圧状態）
真空断熱層	真空破壊（窒素にて大気圧状態）

6．2 減速材容器ユニット移送前の線量当量率確認作業

減速材容器の線量率は6．1．1に示すとおり事前に推定しているが、作業前に実際の線量当量率を確認することにより、作業の安全性等について再確認した。減速材容器ユニット取出前の線量確認概略図を図6．1に示す。また測定結果について表6．3に示す。

約100φのアルミニウム案内管の中にラドコン線量計を挿入し、原子炉の重水タンク上部に設置した。このとき案内管外表面に概略寸法を記し、減速材容器ユニットの引上げ距離の目印とした。減速材容器ユニットはクレーンの芯出しを行い、遠隔により引上げ操作を行った。

測定結果のうち最も減速材容器に近い測定点①における、前回（平成11年1月17日）測定時の最大線量当量率は、2520μSv／hであり、今回は3500μSv／hであった。ラドコン線量計の設置位置が前回測定時とまったく同じとは考えられないため、多少の誤差が考えられるが、6．1．1で推定した線量当量率（前回交換時線量当量率との比1．5）は、妥当であった。

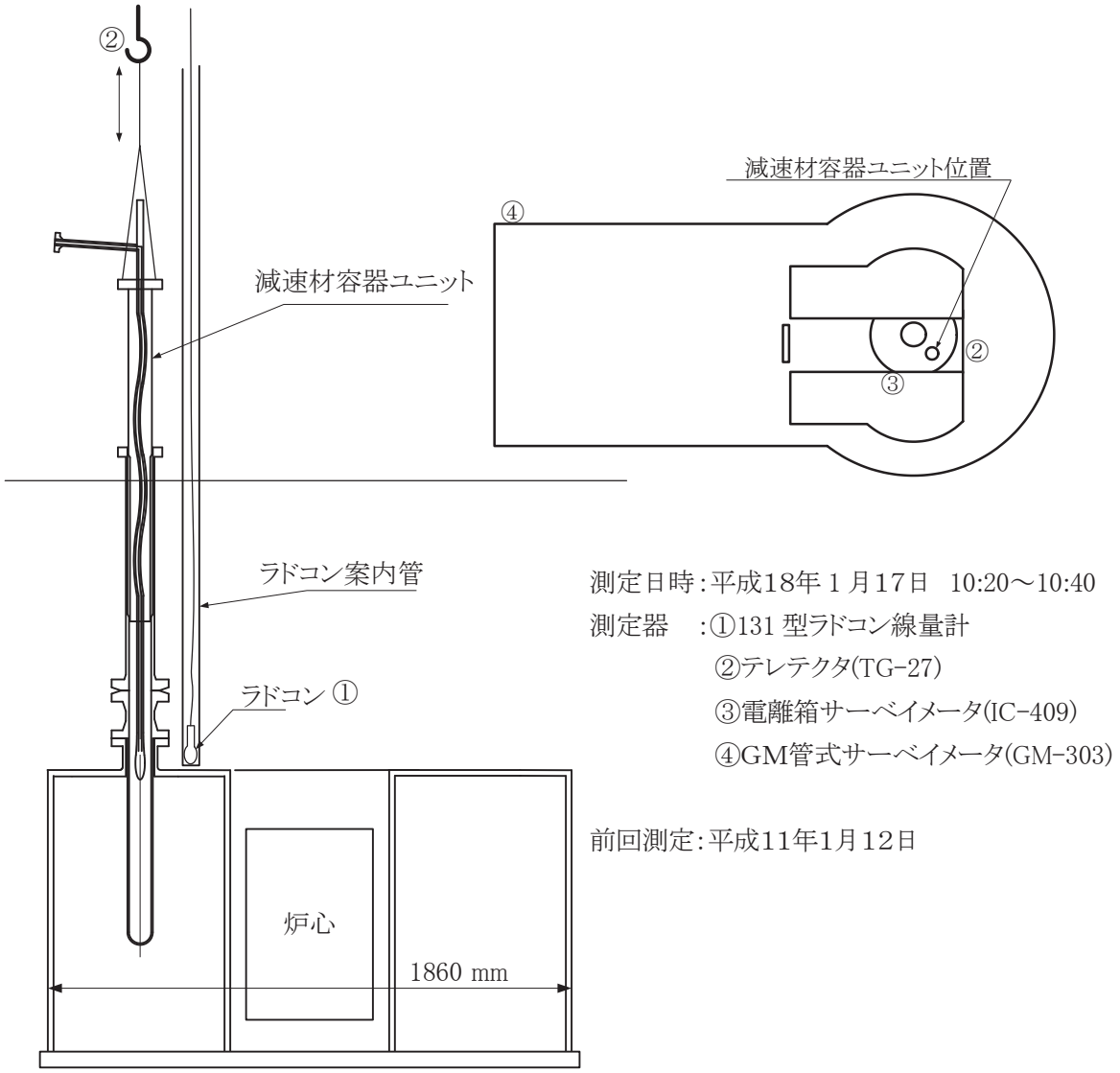


図6．1　減速材容器ユニットの取出し前の線量確認概略図

表6．3　減速材容器ユニットの線量当量率確認結果

測定点 (cm) 引上距離	線量当量率（μSv／h）							
	①		②		③		④	
	今回	前回	今回	前回	今回	前回	今回	前回
0	920	288	－	－	－	－	－	－
30	1580	－	1	－	0.5	－	0.2	－
50	2210	966	2	8.5	0.5	6	0.2	1.6
80	3500	－	7	－	1.0	－	0.2	－
100	3290	2520	16	84	2.0	30	0.2	12.5
110	3200	－	18	－	2.0	－	0.2	－
150	－	738	－	760	－	600	－	210
170	－	378	－	2100	－	2500	－	800

6．3 放射線管理

6．3．1 計画被ばく線量の設定

減速材容器ユニットの交換作業は、高線量下での作業が予想されるため、計画被ばく線量を設定した。

交換工事における作業者の計画線量と実績は以下のとおりであった。

	1日被ばく線量	期間中被ばく線量
計画線量	0．3 mSv	3．0 mSv
実績(最大)	0．03 mSv	0．135 mSv

6．3．2 放射線防護

減速材容器ユニットの交換作業は、炉内作業が伴うため表面汚染が予想された。作業に当たっては図6．2に示すように、放射線防護装備を脱衣するためグリーンハウスを設置した。また、作業に使用する工具等搬入用に工具搬入エリアを設けた。作業員の放射線防護は表6．4に示す装備を採ることとした。

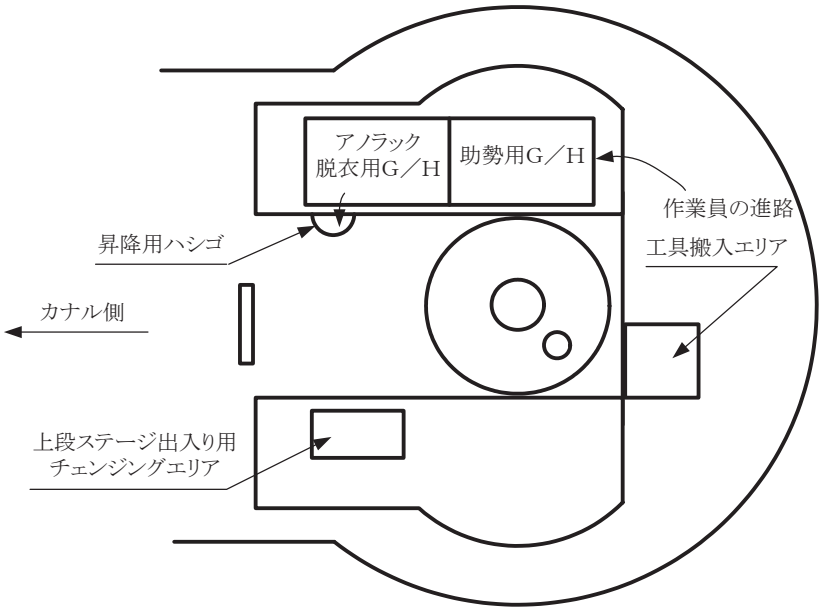


図6．2 作業エリアの確保図

表6．4 放射線防護装備

作業場所	装　　備
中断ステージ	全面マスク、ビニールアノラック、長靴、ゴム手3重
上段ステージ	同上
グリーンハウス内(助勢用)	半面マスク、タイベックスーツ、ゴム手3重
グリーンハウス内(アノラック脱衣用)	全面マスク、ビニールアノラック、長靴、ゴム手3重
工具上げ下ろしエリア	ゴム手、腕カバー、ガーゼマスク

6．3．3 作業場所の放射線サーベイ

作業前に炉内中段ステージにおける表面汚染密度及び線量当量率を測定し、作業環境の確認を行った。各場所の線量当量率は平成10年度の交換作業時と比較して低い値であった。

作業開始前の表面汚染密度及び線量当量率の測定位置を図6．3に、その結果を表6．5に示す。

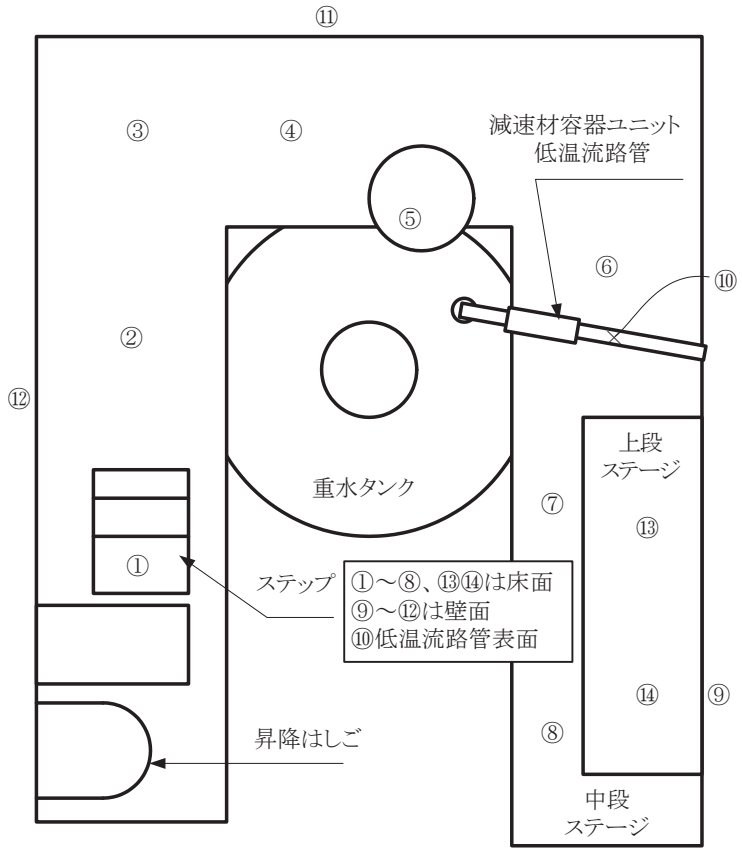


図6．3 表面汚染密度及び線量当量率の測定位置

表6．5 作業開始前の測定結果

測定点	線量当量率（μSv／h）	表面汚染密度（Bq／cm²）	測定点	線量当量率（μSv／h）	表面汚染密度（Bq／cm²）
①	10.0	39	⑧	6.0	26
②	10.0	52	⑨	—	11
③	11.0	39	⑩	—	39
④	11.0	52	⑪	—	13
⑤	11.0	43	⑫	—	9
⑥	11.0	39	⑬	5.5	8.5
⑦	10.0	34	⑭	3.5	19.0

6．3．4 作業員の被ばく状況

作業は、10人の体制で行った。作業員の1日あたりの集積被ばく線量と主な作業内容を表6．6に示す。

作業は、平成17年12月下旬から教育訓練等を含む準備を開始し、平成18年1月5日から炉室での作業に取り掛かった。約1月半で旧減速材容器ユニットの取り出しから新減速材容器ユニットの据付、検査までを完了した。

被ばくの観点からは、旧減速材容器ユニット取り出し移送作業に遠隔操作方式を取り入れることにより、被ばくを抑えることができた。反面、新減速材容器ユニットの取付けでは、水プラグ単管に減速材容器ユニットを当てないように慎重に挿入しなければならず、炉心付近で行う作業に時間を要したため、据付調整作業の被ばくの方が多くなってしまったが、設定した作業期間における計画被ばく線量3mSv を下回る0．135mSv の被ばくに抑えることができた。

表6．6 作業員の集積被ばく線量と主な作業内容

年月日	集積被ばく線量（μSv）	主な作業内容
2006/1/5	0	仮設事務所の設置
2006/1/6	0	使用物品搬入
2006/1/7	0	炉頂グリーンハウス設置
2006/1/8	−	
2006/1/9	−	
2006/1/10	0	炉心保護キャップ設置、原子炉プール水排水
2006/1/11	8	炉内線量測定、昇降用梯子取付け、中断ステージ養生設置
2006/1/12	6	炉内補助架台設置、新減速材容器ユニット搬入
2006/1/13	31	炉内落下防止ネット取付け、炉内干渉物撤去
2006/1/14	33	垂直照射設備取外し
2006/1/15	−	
2006/1/16	41	減速材容器ユニットフランジ取外し
2006/1/17	11	減速材容器ユニット線量測定、保管容器設置
2006/1/18	39	減速材容器ユニット取外し移送
2006/1/19	17	新減速材容器ユニット据付準備、水プラグ単管フランジ手入れ
2006/1/20	108	新減速材容器ユニット挿入
2006/1/21	21	ケノール継手接続、漏れ試験
2006/1/22	−	
2006/1/23	20	低温流路管復旧、漏えい検知管復旧、漏れ試験
2006/1/24	0	機密漏えい試験
2006/1/25	11	旧減速材容器ユニット及び保管容器固縛材取り付け
2006/1/26	0	耐圧漏洩試験（ケノール継手漏れあり）
2006/1/27	18	低温流路管、ケノール継手分解
2006/1/28	48	低温流路管、ケノール継手再接続、漏えい試験
2006/1/29	−	
2006/1/30	30	炉内干渉物の復旧
2006/1/31	0	耐圧漏えい試験
2006/2/1	24	炉内補助架台設置撤去、養生撤去
2006/2/2	0	昇降用梯子撤去、炉心保護キャップ撤去、グリーンハウス撤去
2006/2/3	0	機材、工具の搬出
2006/2/4	−	
2006/2/5	−	
2006/2/6	0	原子炉プール水補給
2006/2/7	0	旧減速材容器ユニット移動（SFプールへ）
2006/2/8	0	
2006/2/9	0	水張り後の外観耐圧検査、外観検査
2006/2/10	0	CNS試験運転準備
2006/2/11	−	
2006/2/12	−	
2006/2/13	0	CNS試験運転
2006/2/14	0	CNS試験運転
2006/2/15	0	
2006/2/16	0	文科省使用前検査（耐圧漏洩試験、外観検査）
2006/2/17	0	

6．4 交換作業

減速材容器ユニットの交換作業は、事前に交換作業要領書を作成し検討を行った。交換作業は図6．4に示すフローチャートに従って実施した。

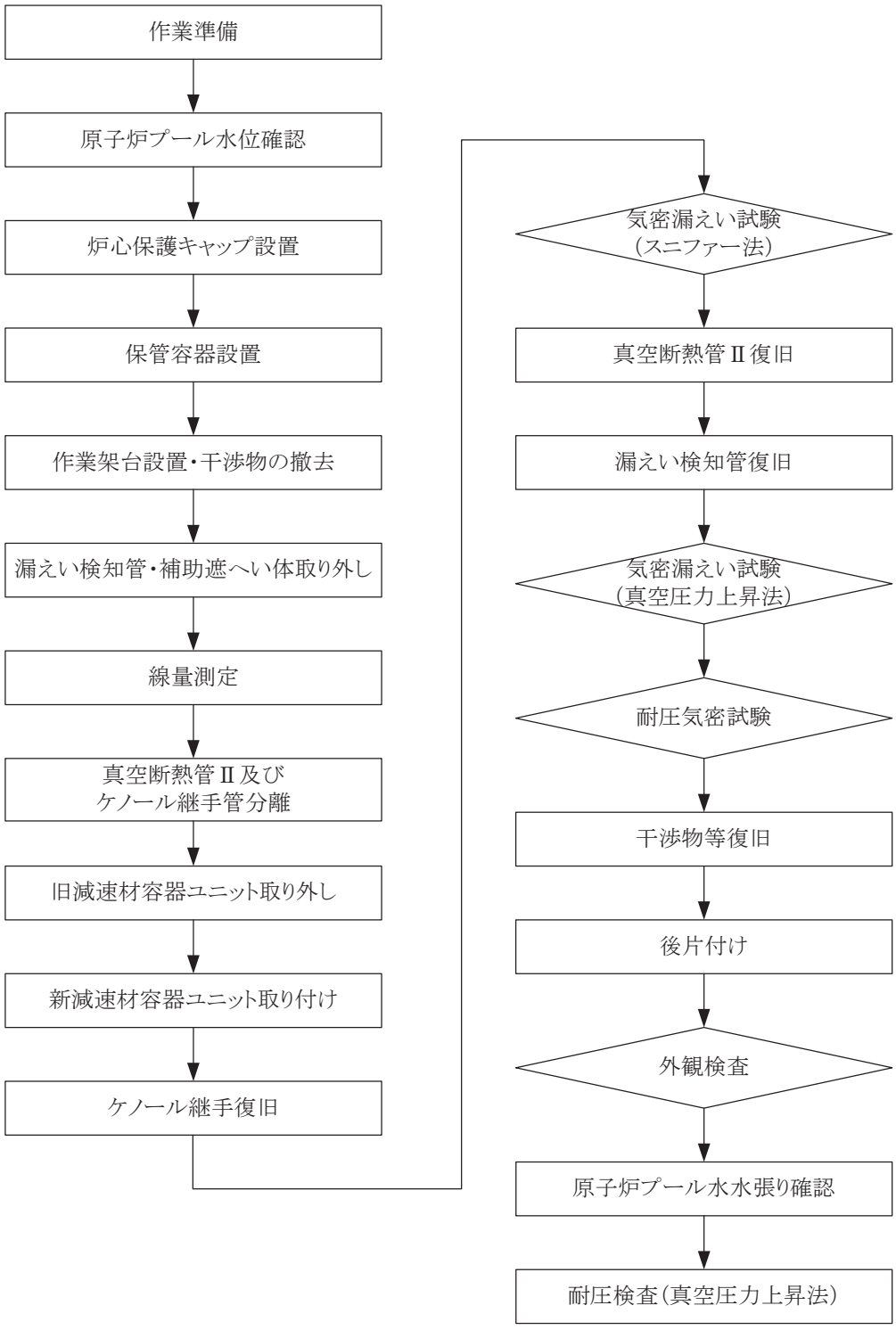


図6．4 交換作業フローチャート

6．4．1 準備作業

減速材容器ユニットを固定している真空断熱管Ⅳフランジは重水タンクの上部より約2mに位置している。炉心近傍での作業となり、使用する工具等の落下防止のためワイヤリング等の処置を施すものの、さらに慎重を期して炉心部への工具類の落下防止のため炉心保護キャップの設置を行った。

減速材容器ユニットの据付位置は、炉心を取巻く重水タンクに設置されている。減速材容器ユニットの交換作業には真空断熱管Ⅳフランジの取り外しが伴うため、同フランジにアクセスするための中段ステージ仮設架台の設置を行った。また、中段ステージ仮設架台も含めて作業範囲には全てビニールにて養生を行った。さらに工具や作業員の落下防止のため、落下防止ネットの敷設も行った。

炉心から取り出す減速材容器ユニットを一時保管するための保管容器の設置は、作業性や被ばくの観点から、炉内に仮設置しておき、取り出した減速材容器ユニットを素早く収納しなければならない。特に被ばくの面で炉内に設置するのが最適と考え、重水タンク脇に仮設架台を設置することとした。図6．5に中段ステージ仮設架台と保管容器の設置位置を示す。旧減速材容器ユニットの移送作業では、クレーンの遠隔操作により実施したが、およそ15分で保管容器内に収納することができた。

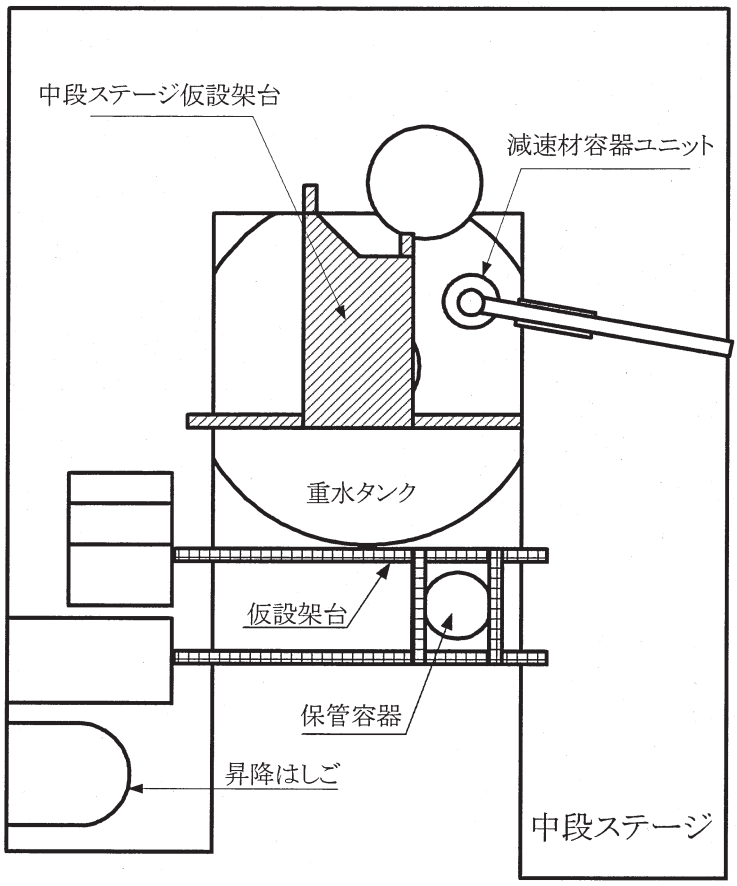


図6．5 中段ステージ仮設架台と保管容器の設置位置

6．4．2 減速材容器ユニットの分離と接続

減速材容器ユニットの分離は、低温流路管の三重管特殊フランジと真空断熱管Ⅳフランジにより接続されている。この部分を開放することにより、ユニット全体を引き抜ける状態となる。

低温流路管継手の構造を図6．6に示す。

低温流路管継手のうち、二重管目の外管は内部配管を液体水素又は水素ガスが通り、外部は真空状態を維持する構造である。この外管継手をケノール継手と呼んでおり、シール材はアルミニウム製の金属パッキンを用いている。平成8年にケノール継手から真空断熱層に水素が漏れ出すトラブルを経験していることから、分解、接続に当たっては慎重に実施した。

ケノール継手はトルク管理を行い最適な締め付け力を得るよう管理したが、ねじ部に若干の当たりがあるためか、適度な締め付け力が得られなかった。当初の接続では前回の交換工事の実績値である157N・mを超える196N・mのトルクで締め付けたにもかかわらず、その後に実施した漏えい検査にて漏れが確認されたため、再度分離する作業を行った。

ケノール継手の分離後にねじ部の観察を行ったところ、キズやねじ山の荒れは見られなかったが、同じねじ規格とはいっても約20年前に作られためねじと最近製作したおねじでは、寸法公差に若干違いがあるのではないかと思われた。このため、一般的には真空部分にオイル、水等の不純物成分は一切用いてはならないが、ケノール継手の漏れを止めることが最優先であるとの判断から潤滑材を用いることにした。

潤滑材は原子力発電所等で広く用いられるネオリューベ（NEOLUBE No.2:HURON INDUSTORIES.INC 社 米国）を用いた。ネオリューベは、高純度の黒鉛粒子と熱可塑性樹脂をイソプロピルアルコールに分散させた製品で、塗布後は5分程度で乾燥し、潤滑性を有した黒鉛被膜として機能するものである。

ケノール継手のおねじ側に極薄く塗布し完全に乾燥後に157N・mのトルクで締め付けを行った。ケノール継手接続後にヘリウム漏えい試験及び真空断熱管Ⅱ接続後に耐圧漏えい試験を実施した結果、ケノール継手部の漏れは認められなかった。また、交換工事完了後の CNS 試験運転の結果、真空断熱層への不純物成分の放出（アウトガス）も認められなかった。

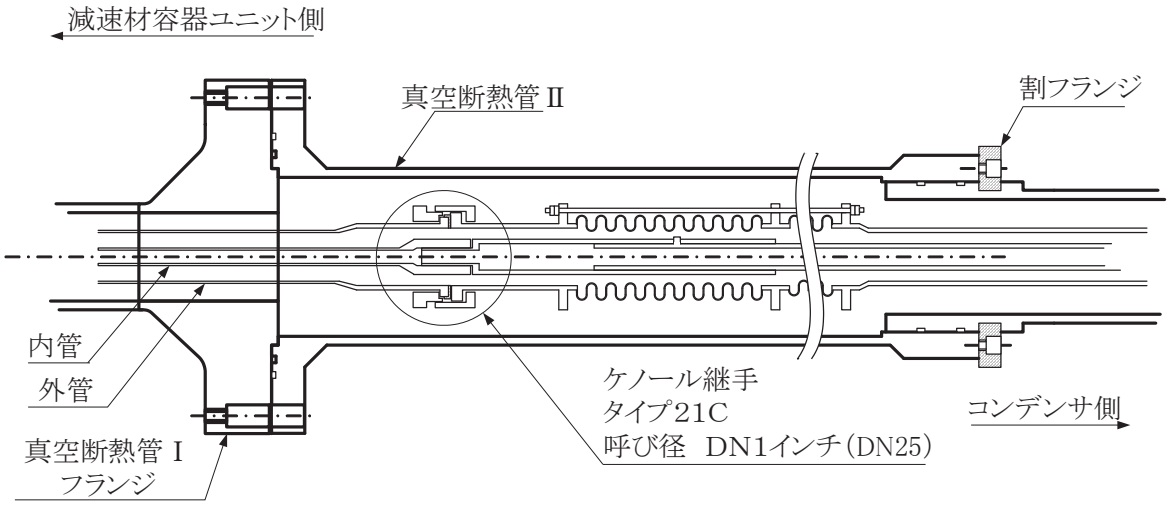


図6．6 低温流路管継手の構造図

6．4．3 旧減速材容器ユニットの引き抜きと移送作業

減速材容器は、重水タンクに接続された真空容器と二重の金属パッキンによりシールされている。平成10年に据え付けられた減速材容器ユニットが容易に引き抜ければ良いが、フランジ部分で固着していることが懸念された。減速材容器ユニットに過大な力を加えて引き抜くことは、重水タンクにその力が加わることとなり、最悪の場合重水タンクの破損を招くことも考えられため、最初に減速材容器ユニットが重水タンクより容易に引き抜けるかを確認する必要がある。つり上げ荷重を監視するために、天井クレーンフックにはチェーンブロックを介して荷重計を取付けた。チェーンブロックの取付けは、引き抜き力を人力により微調整できるようにするためである。

減速材容器ユニットの自重が約80Kgであるため、荷重計の引き抜き荷重100Kgを上限とし、引き抜き作業を行った。作業の結果、固着等はなく約80Kgの引き抜き荷重で、減速材容器ユニットの引き抜きを確認した。

減速材容器ユニットの先端はステンレス製の容器構造であるため、相当な放射化が懸念された。旧減速材容器ユニットを重水タンクから引き抜き保管容器へ納めるまでの間に空中を移動するため、高線量化での作業が要求される。被ばくを極力低減するため、クレーン操作による遠隔移送作業を計画し、ITVカメラを炉頂付近に合計3台設置し、遠隔監視するテレビモニターは炉室1階に設置した。

クレーン操作員は事前にクレーンの移動範囲を覚え、遠隔操作によるクレーン操作を習得した。テレビモニター設置位置でのクレーン旋回位置のマーキングや、ITVカメラ位置の微調整を行うなど、遠隔操作による移送作業を模擬した訓練を何度も実施し、作業に臨んだ。

また、減速材容器を空中移送する際に、線量が炉室内へ漏れ出てくることを極力避けるため、No.1上部遮へい体のみを約30cm閉とした。さらに減速材容器移送作業中は、炉室内を立ち入り制限とし、関係者以外が全て炉室から退出していることを確認した上で引き抜き、移送作業を開始した。

炉頂ITVカメラ及び炉室1階のテレビモニター設置位置を図6．7に示す。

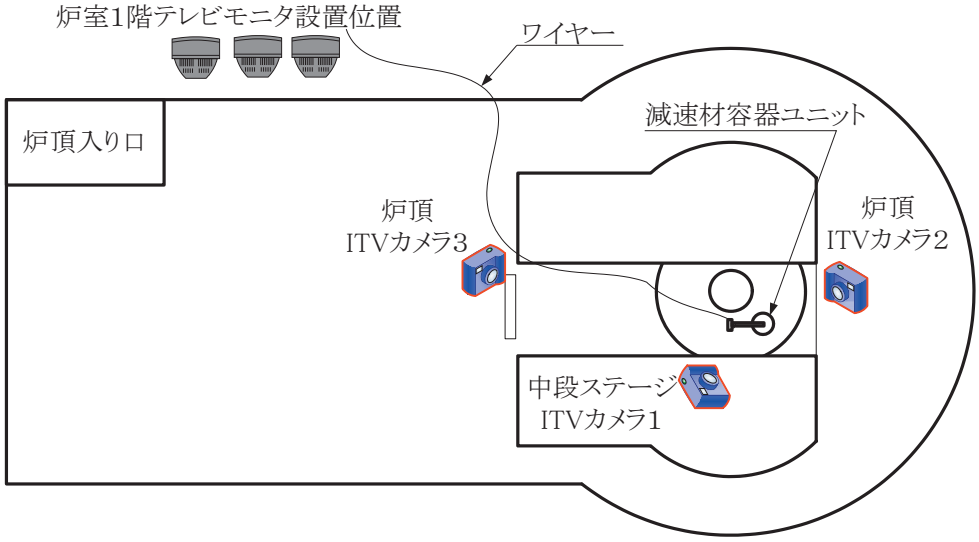


図6．7 ITVカメラ及びテレビモニターの設置位置図

減速材容器ユニットのうち真空断熱管Ⅰフランジ側の配管は横に突き出た構造となっており、この部分が炉内の構造物に干渉することが考えられたため、この水平部分に細いワイヤーを取り付け、炉

室1階のテレビモニター設置位置まで延長し、テレビモニターを監視しながら操作できるようにした。テレビモニターを監視しながら、炉内構造物に干渉しそうな場合はワイヤーを操作し、炉内構造物をかわすよう操作した。

6．4．4 新減速材容器の挿入

旧減速材容器ユニットを取り出した後、水プラグ短管フランジを観察したところ、金属パッキン接触面外側に粉状のものが付着していた。このフランジ面をきれいに清掃しないと、新たな減速材容器ユニットを据え付けてもシールできなくなるため、アルコールや竹べら等により、フランジ面を傷つけないように注意を払い、入念に清掃を行った。

減速材容器は、約3．1mの管の上部に真空断熱管Ｉフランジが突き出た形状となっているため、クレーンで吊り上げると若干斜めに傾いてしまう。このため、減速材容器ユニットの上部に図6．8に示すバランサーとチェーンブロックを使うことにより垂直に吊り上げることができるよう対応した。

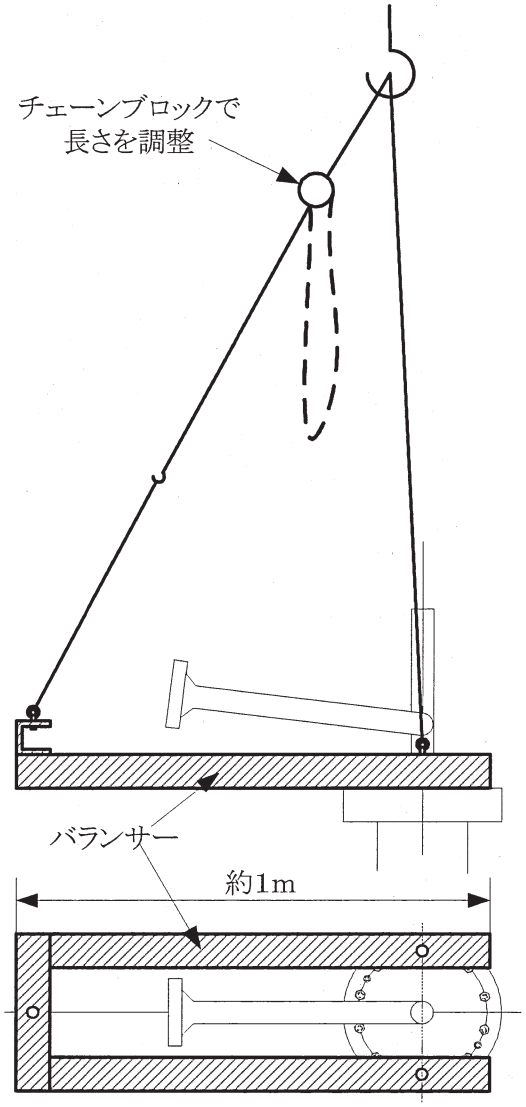


図6．8 減速材容器ユニットバランサー

6．4．5 養生の撤去作業

減速材容器ユニットの交換作業が終わり、炉内に仮設置した仮設足場や養生の撤去を残すのみとなった。炉内の作業範囲はビニールシートにて養生しており、交換作業時の汚染拡大は未然に防ぐことができた。

作業開始当初はプール水を排水したばかりであり、炉内の構造物は濡れている状態であったため、汚染がダストとして飛散することはなかったが、養生を撤去する段階では炉内構造物が乾燥しており、ダストの飛散が考えられた。このため、ビニール養生撤去の際、炉内構造物に噴霧器により純水を噴霧し、湿らせた状態で養生撤去作業を行った。また、Siキャスクの排気ダクトにホースを接続し、炉内を局所排気することにより炉外へのダストの飛散を抑える方法を採った。これにより炉外へのダストの飛散が抑えられ、汚染等の発生はなく、養生等の撤去作業を終えることができた。

6．4．6 旧減速材容器の保管

取り出した減速材容器ユニットは原子炉プール水を復旧後、原子炉プール→カナル→使用済み燃料プールへと移動し、使用済み燃料プールに保管した。旧減速材容器ユニットは高線量であるため、水中を移動しなければならない。基本的にはクレーンにより吊り上げ、水中を移動する方法であるが、燃料搬送台車をかわす必要があるため、燃料搬送台車の部分は人力によりかわした。その後はまたクレーンにより水中移動を行い、使用済み燃料プール内に仮保管した。

旧減速材容器ユニットは、先端付近が高線量であるため、廃棄するためには減速材容器部分を切断後、遮へい容器に入れて廃棄する必要がある。既に廃棄容器は製作済みであり、平成10年度に取り出した旧減速材容器も同梱できる構造としている。平成18年度以降に減速材容器部分の切断を行い、廃棄する予定である。

6．5 試験検査

減速材容器ユニット交換後、取り外した部分については全て漏えい検査を実施した。各継手の漏えい検査は、耐圧検査又は真空圧力上昇法等により実施し、漏えい等のないことを確認した。また、減速材容器ユニット内に液体水素を貯留するCNS 試運転を行い、運転状態が交換前の状況と同じ状態であることを確認した。減速材容器ユニット交換前後の水素圧力及びその他の主要計器の指示値を表6．7に示す。

表6．7 交換前後の主要計器の指示値

データ記録日時			H18.2.14　9:12	H17.10.31　9:00
水素圧力	kPa･abs	PI7105	117.67	117.67
真空断熱層真空圧力	Pa	VI7204	9.99×10^{-6}	1.09×10^{-5}
膨張タービンブロア圧力	kPa	PI7635	990.47	990.47
膨張タービンホイール圧力	kPa	PI7619	333.42	323.61
膨張タービン出口圧力	kPa	PI7521	194.17	194.17

7. 冷中性子特性測定

減速材容器ユニットの更新作業後、交換前と同等の性能が得られていることを確認するため、冷中性子導管で得られる中性子束とスペクトルを比較した。特性測定は、図7．1のJRR－3ビーム実験設備に示す冷中性子導管C2－1の位置で行った。測定時期は、減速材容器の更新直前サイクルである、R3－17－07サイクルと更新直後の R3－18－01サイクルとした。

表7．1に中性子束の測定結果を示す。表7．1に示すとおり、減速材容器更新前後の中性子束は同等である。また、図7．2に減速材容器の更新前後の冷中性子スペクトル比較図を示す。C2―1ビームポートは冷中性子導管の途中に設置されているため、モノクロメータにより特定のエネルギー範囲の中性子のみを分離した結果である。測定の範囲が狭いが、スペクトル形状としては概ね同等である。なお、図中の約3．8meVに窪みが見られるが、これは中性子導管内を気密にするためのアルミニウム板によるブラッグ反射の影響である。

これらのことから、国内で製作した減速材容器ユニットは、従前のフランスで製作した減速材容器ユニットと同等の性能が得られていることを確認した。

表7．1　中性子束測定値

測定サイクル	測定値
R3－17－07 (2005.10.31)	2．0 × 10^{12} $m^{-2}\cdot s^{-1}$
R3－18－01 (2006.4.6)	2．0 × 10^{12} $m^{-2}\cdot s^{-1}$

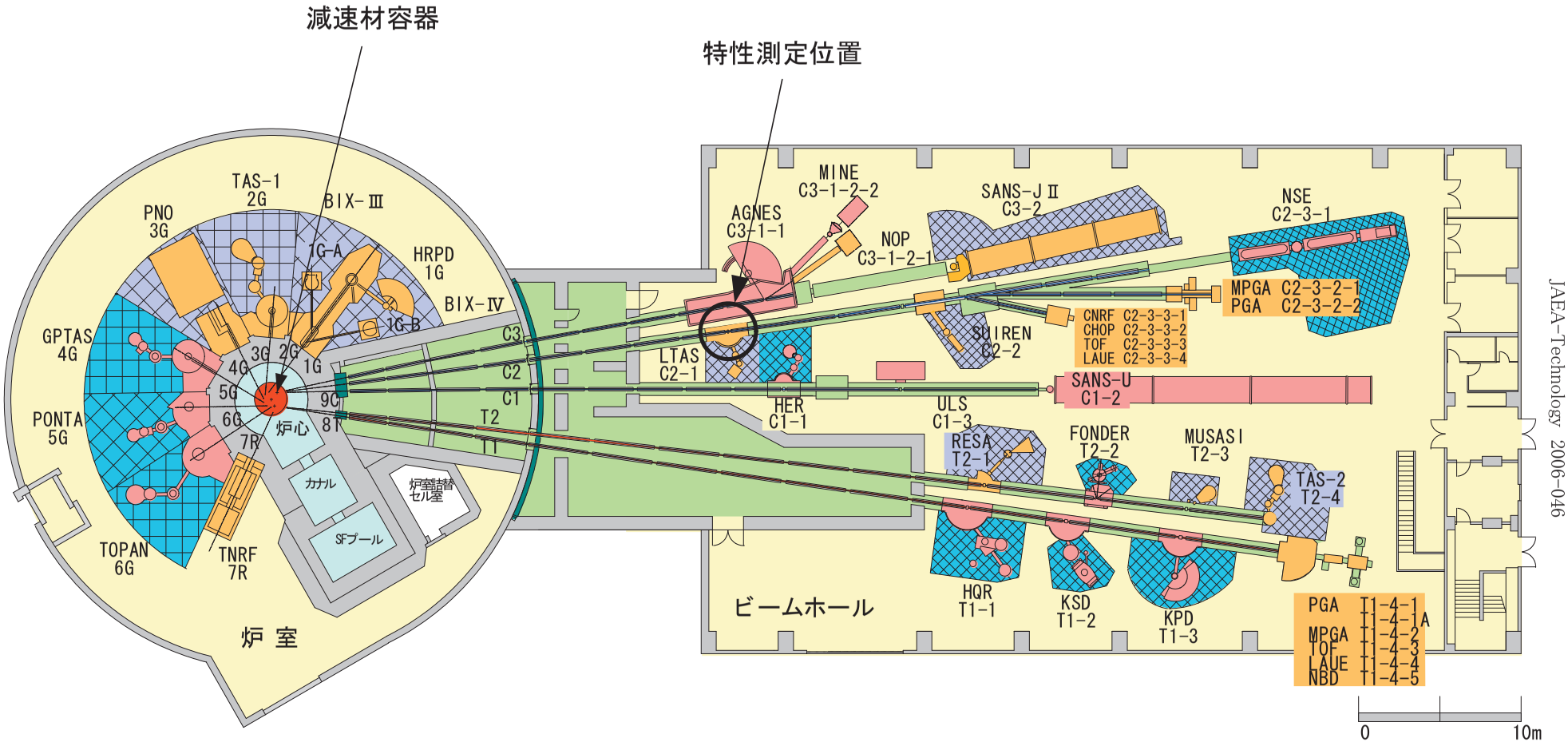
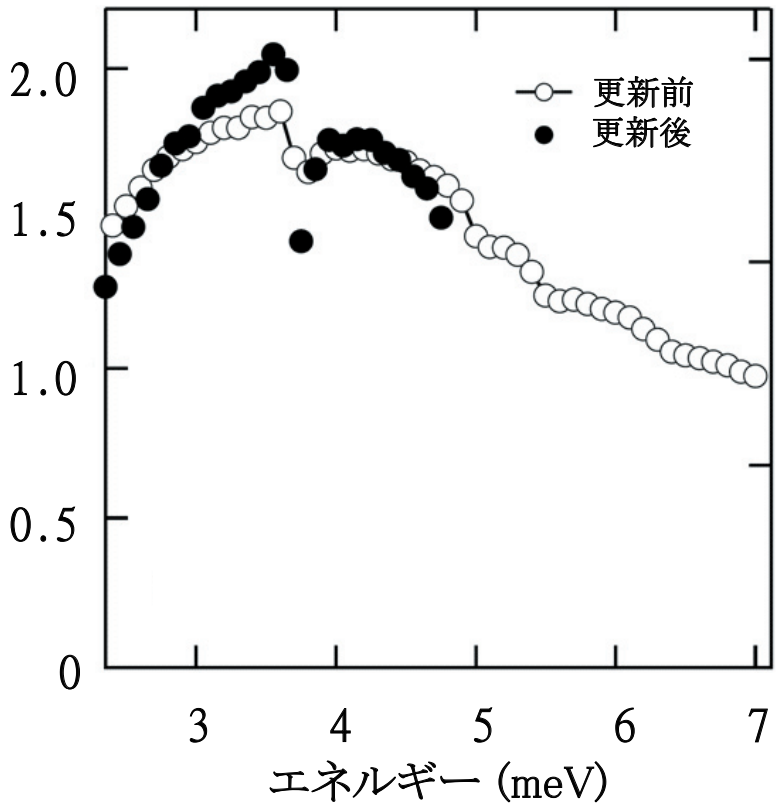


図7．1　JRR－3ビーム実験設備



（約4meVのエネルギーで規格化した）
先端基礎研究センター　金子耕士　測定

図7．2　減速材容器の更新前後の冷中性子スペクトル比較（C2－1ビームポート）

8. まとめ

平成2年、JRR－3の改造に伴ってCNSが設置された。国内では唯一大型の実験設備であり、平成3年から共同利用運転を開始し、中性子ビーム実験設備へ冷中性子を安定的に供給してきた。

冷中性子を生成するための心臓部とも言える減速材容器は、約7年の周期で交換が義務付けられており、平成10年度に続き2回目の交換作業を実施した。

平成10年度の交換では、CNS 設置時に製作し、予備品として保管してあった減速材容器を使用し交換作業を行った。今回平成17年度の交換作業では予備品がないため、製作から作業を開始しなければならなかった。

もともとJRR－3CNSの減速材容器ユニットはフランスで製作したものであり、当初は、フランスの製作メーカーとコンタクトを取っていたが、より効率的な予算執行を行うため、国内メーカーも視野に入れた競争入札方式を採用した。その結果、国内メーカーで製作、交換作業を実施することとなった。減速材容器ユニットの基本設計はまとめられていたが、詳細設計については不明の部分も多く、各試験を繰り返しながらの製作であった。特に減速材容器表面の黒化処理方法については、フランスの軍事技術を使用しているため、その加工方法については一切明らかにされていなかった。このため事前に製作技術についての試験を行い最適な黒化処理方法を確立した。また減速材容器ユニット内部の三重管の曲げ加工方法や減速材容器の成形技術などの試験を繰り返し行い、最終的に仕様を満足する加工技術を確立した。

交換作業については、工事手順を詳細に検討した作業計画を立案し、短期間で交換作業を終えることができた。このことは、放射線被ばくの低減につながった。

製作メーカーの選定から開始して据付作業が終了するまで、約2年半の時間を要したが、これまでのフランス製の減速材容器ユニットから国産の減速材容器ユニットに変更しても十分な性能を得ることを確認した。

今後は、減速材容器自体の材質や形状の変更など、より高性能な容器を開発する計画もあがっている。今回、国内でも減速材容器の製作が可能となった実績を踏まえ、性能の向上を目指して新たな開発に臨んでゆきたいと考えている。

謝　辞

本報告は、三菱重工業(株) 神戸造船所 原正秀氏他をはじめ、研究炉利用課笹島課長代理、和田課長代理のご協力によるものである。また、現地交換工事に当たってはJRR－3管理課村山課長、放射線管理第1課角田係長及び減速材容器更新後の冷中性子特性測定について、先端基礎研究センター金子耕士氏に御協力いただいた。さらに、本報告書の作成にあたり研究炉利用課鈴木正年氏、熊井敏夫氏に熱心なご鞭撻を賜った。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

1） 川端 祐司、高橋秀武：JAERI-M 86-139 冷中性子源装置材料強度に対する極低温照射の影響評価(1986 年)

2） 鈴木正年、他：JAERI-Tech 2004-060(2004) JRR-3冷中性子源装置(CNS)の運転・管理(2004 年)

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	mol/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}	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３．固有の名称とその独自の記号で表される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(a)	rad		$m \cdot m^{-1}=1$(b)
立体角	ステラジアン(a)	sr(c)		$m^2 \cdot m^{-2}=1$(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力，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	クーロン	C		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	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	V・s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	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)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr(c)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd=cd$
照度	ルクス	lx	lm/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，質量エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

(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

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	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	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	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	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg \cdot s^{-3}$
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），質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー（比エネルギー）	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
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	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
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	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	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	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
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，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}=kg \cdot s^{-3}$

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	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
リットル	l、L	1l=1 $dm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2)ln10(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	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19}J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27}kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11}m$

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

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 $dam^2=10^2m^2$
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10^5Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10^{-10}m
バーン	b	1 b=100$fm^2=10^{-28}m^2$

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
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 =$1cm^2/s=10^{-4}m^2/s$
ガウス	G	1 G ^10^{-4}T
エルステッド	Oe	1 Oe ^(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ^10^{-8}Wb
スチルブ	sb	1 sb =$1cd/cm^2=10^4cd/m^2$
ホト	ph	1 ph=10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =$1cm/s^2=10^{-2}m/s^2$

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
X線単位		1X unit=1.002×10^{-4}nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10^{-9}T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=$10^{-26}W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ		1 fermi=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 metric carat = 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
カロリー	cal	
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第７版，1998年改訂）

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています