

トリチウムを含んだ照射試験体の JMTR 炉心からの取出試験

Detaching Test of an Irradiated Mock-up
Containing with Tritium from the Core of JMTR

富田 健司 土谷 邦彦 小沼 勇一 井上 修一
渡邊 浩之 斎藤 隆 菊地 泰二 林 君夫 北島 敏雄

Kenji TOMITA, Kunihiko TSUCHIYA, Yuichi ONUMA, Shuichi INOUE
Hiroyuki WATANABE, Takashi SAITO, Taiji KIKUCHI, Kimio HAYASHI
and Toshio KITAJIMA

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

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

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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

トリチウムを含んだ照射試験体の JMTR 炉心からの取出試験

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

富田 健司・土谷 邦彦⁺¹・小沼 勇一・井上 修一⁺²

渡邊 浩之・斎藤 隆⁺²・菊地 泰二⁺³・林 君夫⁺¹・北島 敏雄

(2008 年 3 月 27 日受理)

材料試験炉（JMTR）を照射場として、トリチウム増殖材（Li₂TiO₃）微小球充填体を装荷した照射試験体を用いた第 2 期照射試験（ORIENT-II, JMTR キャプセル名：99M-54J）の終了に伴い、JMTR 炉心からの照射試験体の取出方法の検討及び取出試験を行った。

まず、照射試験体、スイープガス配管、接続箱・保護管等に残留するトリチウムの除去試験を行うとともに、微小球を充填した充填体の配管からのトリチウム漏洩を防止するための閉止栓の炉外溶封試験を行った。その結果に基づき、照射試験体の取出試験時のトリチウム放出量を評価するとともに、閉止栓の溶封操作方法を決定した。次に、策定した照射試験体の取出方案に基づいて、試験体の取出試験を行い、作業環境へのトリチウムの放出を抑制するとともに、新たに開発した閉止栓の溶封もリークがないことが確認し、計画通り取出試験を完遂することができた。

本報告書は、Li₂TiO₃微小球充填体を装荷した照射試験体の取出しに備えて行った、1) トリチウム除去に関する特性試験、2) 閉止栓の炉外溶封試験結果、3) 照射試験体の実際の取出し試験前に行った取出方法の検討、4) 実際の取出試験や作業から得られた知見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

+1：核融合研究開発部門 核融合エネルギー工学研究開発ユニット

+2：大洗研究開発センター 照射試験炉センター

+3：東海研究開発センター 原子力科学研究所 工務技術部

Detaching Test of an Irradiated Mock-up Containing with Tritium from the Core of JMTR

Kenji TOMITA, Kunihiko TSUCHIYA⁺¹, Yuichi ONUMA
Shuichi INOUE⁺², Hiroyuki WATANABE, Takashi SAITO⁺², Taiji KIKUCHI⁺³
Kimio HAYASHI⁺¹ and Toshio KITAJIMA

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

(Received March 27, 2008)

The second in-situ irradiation experiment using a mock-up (ORIENT-II, JMTR capsule Number : 99M-54J) with a tritium breeder (Li_2TiO_3) pebble bed in the Japan Materials Testing Reactor (JMTR) was finished on Aug. 1, 2006. Correspondingly an investigation on the detaching procedure of the irradiated mock-up containing with tritium was carried out, followed by the actual detaching test of this mock-up.

Firstly, tritium removal characteristics were studied for the irradiated mock-up, the sweep gas tube, the protective tube and the junction box. Out-of pile melting/enclosing tests of the sealing plug were also carried out for prevention of tritium leakage from sweep gas lines of Li_2TiO_3 pebble bed. From the results, tritium release amount were estimated during the detaching test of the real irradiated mock-up was estimated, and the melting/enclosing procedures of sealing plug were fixed. Then, the actual detaching test of the Li_2TiO_3 pebble bed was carried out. The tritium release to the area of detaching test was favorably suppressed, decreased, and the irradiated mock-up was safely detached from the core of JMTR as planned.

This report describes the results of 1) tritium removal tests for the sweep gas line and the protective tube, 2)out-of pile melting/enclosing test of the sealing plug, 3) examination of the detaching procedure before the detaching test of the irradiated mock-up, and 4) the actual detaching test, as well as knowledge obtained from these tests and works.

Keywords : In-situ Irradiation Test, Tritium, Tritium Breeder, Li_2TiO_3 , Pebble Bed, Detaching Method, Irradiated Mock-up, Internal Exposure, JMTR

+1 : Division of Fusion Energy Technolosy, Fusion Research and Development Directorate

+2 : Neutron Irradiation and Testing Reactor Center, Oarai Research and Development Center

+3 : Engineering Services Department, Nuclear Science Research Institute,
Tokai Research and Development Center

目 次

1.はじめに.....	1
2.トリチウム増殖材照射試験の概要.....	1
2.1 照射試験設備.....	1
2.2 Li ₂ TiO ₃ 微小球充填体を装荷した照射試験体.....	2
3.照射試験体取出試験の全体計画.....	2
4.照射試験体取出試験前のトリチウム放出に関する検討	3
4.1 接続箱解放時のトリチウム放出量評価.....	4
4.2 スイープガス配管解放時のトリチウム放出量評価.....	5
4.3 トリチウム放出に伴う安全対策.....	7
4.4 金属中に溶解するトリチウム量の評価.....	8
5.炉外における閉止栓の溶封操作試験.....	9
5.1 スイープガス配管内の容積測定検証試験	9
5.2 閉止栓の同時操作模擬試験	10
5.3 炉外での溶封操作モックアップ試験	11
5.4 スイープガス装置の容積測定試験	12
6.照射試験体の取出試験.....	13
6.1 取出試験作業要領	13
6.2 実施体制	15
6.3 取出試験結果	16
6.4 考察	18
7.まとめ.....	19
謝 辞.....	20
参考文献.....	21
付録I スイープガス装置の配管系統図.....	51
付録II 電磁弁の寿命評価 -99M-54J キャプセルの電磁弁の弁座漏れについて-	52
付録III 照射試験体の取出試験確認表及び試験結果.....	57

Contents

1. Introduction	1
2. Irradiation Test of Mock-up with Li_2TiO_3 Pebble Bed	1
2.1 Irradiation Test Facilities	1
2.2 Mock-up with Li_2TiO_3 Pebble Bed	2
3. Whole Plan of Detaching Test for Irradiated Mock-up	2
4. Tritium Release Estimation before Detaching Test of Irradiated Mock-up	3
4.1 Estimation of Tritium Release Amount from Junction Box and Protective Tube	4
4.2 Estimation of Tritium Release Amount from Sweep Gas Tube in Attaching/Detaching of Quick Connector	5
4.3 Safety Assessment of Detaching Test of Irradiated Mock-up	7
4.4 Estimation of Tritium Dissolution Amount in Metal	8
5. Out-of-pile Melting/Enclosed Test of Sealing Plug in Out-pile	9
5.1 Verification Test of Free Volume in Sweep Gas Tube	9
5.2 Simulation Experiment for Simultaneous Melting of Sealing Plug	10
5.3 Out-of-pile Mock-up Experiment on Melting of Sealing Plug in Out-pile	11
5.4 Measurement of Free Volume in Sweep Gas Apparatus	12
6. Detaching Test of Irradiated Mock-up with Li_2TiO_3 Pebble Bed	13
6.1 Procedure of Detaching Test of Irradiated Mock-up	13
6.2 Implementing Organization	15
6.3 Results of Detaching Test	16
6.4 Discussion	18
7. Summary	19
Acknowledgments	20
References	21
Appendix I Schematic Diagram of Gas Line for Sweep Gas Apparatus	51
Appendix II Life Time Estimation of Electromagnetic Valve	52
Appendix III Check Sheet and Result of Detaching Test of Irradiated Mock-up	57

1. はじめに

「第3段階核融合研究開発基本計画」¹⁾においては、核融合炉用増殖ブランケット技術に関する研究開発の必要性について、「核融合炉の実用化のために必須の炉工学技術であって、その実現までに長期の研究開発を必要とするため、早期に開発する必要があるものについては、その研究開発を進める。」と記載されている。また、国際熱核融合実験炉(ITER)建設のための工学設計²⁾及び核融合原型炉用ブランケット開発研究³⁾も急務となっている。それらの研究開発の一環として、トリチウム増殖材の中性子照射下におけるトリチウムの生成・放出特性等を明らかにするため、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(Li_2TiO_3)微小球充填体を装荷した照射試験(ORIENT-II, JMTR キャプセル名：99M-54J キャプセル)を平成 12 年 11 月から開始した。本照射試験は、大小 2 種類の Li_2TiO_3 微小球(直径 0.3 mm と 2mm の球)を充填した微小球充填体を製作し、ITER の運転条件を模擬することができるハフニウム製中性子吸収体を装荷した照射試験体を開発し、JMTR 炉室地下 1 階(以降、B1F と称す)に整備したブランケット照射試験設備⁴⁾を用いて、照射温度 150°C から 650°C におけるトリチウム生成・放出特性等を明らかにした⁵⁻⁷⁾。本照射試験の実施期間は、JMTR 第 136 サイクル(平成 12 年 11 月 17 日開始)から第 165 サイクル(平成 18 年 8 月 1 日終了)までの 30 サイクルであった。第 165 サイクル終了後、JMTR 炉心から本照射試験体の取出しを行った。

本報告書は、トリチウムで汚染された照射試験体の取出手順を策定する上で実施したトリチウム除去試験、スイープガス配管の閉止栓の溶封操作試験及び照射済試験体の JMTR 炉心からの取出試験の結果及びその実績をまとめたものである。

2. トリチウム増殖材照射試験の概要

2.1 照射試験設備

ブランケット照射試験設備は、中性子照射下におけるトリチウム増殖材からのトリチウムの生成・放出特性を把握するための設備として平成 8 年 10 月に JMTR に整備されたものである。本照射試験設備は、キャップセルに装荷したトリチウム増殖材から生成・放出されるトリチウムをオンラインで測定するスイープガス装置、トリチウム増殖材領域の温度制御と中性子束測定を行うキャップセル制御盤等から構成されている。99M-54J キャップセルを用いた照射試験の概要を Fig. 2-1 に、スイープガス装置の概略系統図を Fig. 2-2 に示す。

本照射試験設備を用いて、JMTR 第 136 サイクルから第 165 サイクルの約 7 年間、 Li_2TiO_3 微小球充填体を装荷した 99M-54J キャプセルの照射試験が実施された。99M-54J キャプセルの照射試験実績を Fig. 2-3 に、各照射サイクルで回収されたトリチウム量を Table 2-1 に示す。照射試験では、水素を添加した He ガスを Li_2TiO_3 微小球充填体に流して生成したトリチウムをスイープガス装置に輸送し、スイープガス装置のトリチウム測定系で全トリチウム ($\text{HTO}+\text{HT}$) 成分とトリチウムガス (HT) 成分の濃度を測定した。濃度測定後のトリチウムは、白金触媒を装荷した酸化反応器を通してトリチウム水にし、トリチウム回収系の吸着塔 (モレキュラーシーブ) で回収した。JMTR スタックからの He ガスの排気にあたっては、トリチウムモニタ TmIRA502 (Fig. 2-2 参照) によりトリチウム濃度を常時監視した。99M-54J キャプセルの JMTR 炉心への装荷状態の概略図を Fig. 2-4 に示す。

2. 2 Li_2TiO_3 微小球充填体を装荷した照射試験体

Fig. 2-5 に 99M-54J キャプセルの概略図を示す。99M-54J キャプセルは、「JMTR キャプセル等設計基準」における 1 孔反射体 ($\phi 62$) 用計測付キャプセルとして設計された。トリチウム増殖材には、ITER 増殖ブランケット設計において候補材の一つとして取り上げられている Li_2TiO_3 微小球 (直径: 0.3mm と 2mm、焼結密度: 約 80% T. D.) が約 170g 充填され、ITER の中性子パルス運転模擬ができるようにキャプセル内にハフニウム製中性子吸収体を装荷し、中性子照射下でかつ温度領域 150~650°C でのトリチウム生成・放出特性を明らかにする照射試験を行った。

Li_2TiO_3 微小球充填体部の照射温度は、K 型多対式熱電対を用いてその場 (In-situ) 計測を行い、電気ヒータで加熱することにより温度を制御した。微小球充填体中に生成するトリチウムは、水素ガスを添加した He ガスを連続的に流すことにより、スイープガス装置に輸送され、トリチウム濃度の測定後、スイープガス装置内のトリチウム回収系で回収した。99M-54J キャプセルの主な照射試験条件を Table 2-2 に示す。

3. 照射試験体取出試験の全体計画

99M-54J キャプセルの照射試験において、トリチウム増殖材で生成・放出したトリチウムは、スイープガス配管を通してスイープガス装置に輸送されるが、一部のトリチウムはスイープガス配管壁を透過して保護管や案内管、接続箱内に滞留している。99M-54J キャプセルの炉心からの取出しでは、接続箱の開放やスイープガス配管の切離しが必要なため、これらに

残留しているトリチウムが作業環境に放出される。このため、99M-54J キャプセルの炉心からの取出しに当たっては、残留トリチウムによる内部被ばくを防止するため、スイープガス配管、保護管、案内管、接続箱内の残留トリチウムを極力除去すると共に、接続箱等の開放による作業環境のトリチウム濃度上昇やトリチウム放出量を予め評価し、適切な防護措置を取ることが重要である。

接続箱等の開放時における作業環境のトリチウム濃度限度については、「試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則等の規定に基づき、線量限度等を定める告示」⁸⁾及び「大洗研究開発センター(北地区)放射線障害予防規定」に基づき、対象となるトリチウムの化学形を「元素状水素、メタン、水、有機物等を除く化合物」とみなし、 $0.7\text{Bq}/\text{cm}^3$ (8時間平均)で検討することとした。また、トリチウム放出量については、原子炉設置変更許可申請書¹⁰⁾に記載された年間放出量 $1 \times 10^{11}\text{Bq}$ を十分下回ることを確認することとした。

99M-54J キャプセルには、ホットラボでのキャプセル解体時に、微小球充填体からトリチウムが放出されるのを防止するため、微小球充填体部上部のスイープガス配管に低融点金属を用いた溶封式の閉止栓が取付けられている。本閉止栓は、99M-54J キャプセルの製作において新たに開発したもので、この開発試験の中で操作手順が定められていた¹⁰⁾。しかし、この操作手順の中で重要な役割を持つ保護管内の電磁弁に弁座漏れがあり、予め定めていた操作手順が使用できないことが判明した。このため、99M-54J キャプセルの取出試験に先立ち、閉止栓の炉外溶封試験を再度実施することとした。

99M-54J キャプセルの JMTR 炉心からの取出試験では、平成 11 年 8 月に実施した 96M-37J キャプセルの取出試験手順¹¹⁾を参考にすると共に、96M-37J キャプセルには無かった閉止栓の溶封操作や保護管内のトリチウム除去効率を高めるために設けた保護管ガス置換用配管 (Fig2-4 参照)を考慮して全体計画を見直し、トリチウム除去試験の結果並びに閉止栓の炉外溶封試験の結果を基に作業手順書を作成する。99M-54J キャプセルの JMTR 炉心からの取出試験手順の概略と主な作業内容を Fig. 3-1 に、取出試験に関する安全評価等の全体検討計画を Fig. 3-2 に示す。

4. 照射試験体取出試験前のトリチウム放出に関する検討

JMTR 炉心から 99M-54J キャプセルを取出すには、接続箱を開放してスイープガス配管を切離す必要があり、この時、接続箱や案内管、スイープガス配管内に残留するトリチウムが作業環境に放出される。このため、99M-54J キャプセルの取出試験に先立ち、以下の項目について検討した。

- (1) 接続箱解放時のトリチウム放出量評価
- (2) スイープガス配管解放時のトリチウム放出量評価
- (3) トリチウム放出に伴う安全対策
- (4) 金属中に溶解するトリチウム量の評価

4. 1 接続箱解放時のトリチウム放出量評価

(1) 目的

トリチウムは金属を透過する性質があり、照射試験中にスイープガス配管を流れたトリチウムの一部は、管壁を透過して保護管や案内管、接続箱内に放出される。保護管や案内管の内部には熱電対やヒータ、自己出力型中性子検出器のリード線が収納されており、透過したトリチウムはこれらの表面にも付着している。

99M-54J キャプセルには、保護管及び案内管内のトリチウムを除去するため、照射試験体の上部端栓付近までガス置換用の配管が挿入されている(Fig2-4 参照)。この配管は、前回照射した 96M-37J キャプセルには無かったもので、トリチウム除去やトリチウム濃度の評価が困難であったことから、新たに追加したものである。

今回は、このガス置換用配管を用いて保護管、案内管及び接続箱内のトリチウム除去を行い、効率的にトリチウム除去ができる事を確認すると共に、接続箱の開放によるトリチウム放出量に問題がないことを確認する。

(2) 試験方法

保護管、案内管、接続箱内のトリチウム除去は、スイープガス供給系から接続箱にヘリウムガスを流し、保護管内に挿入したガス置換用配管を通してガススイープする方法で実施した。ヘリウムガスの流量は約 $650\text{cm}^3/\text{min}$ とし、1日当たり約 5 時間の連続ガススイープを 11 回実施した。これは、保護管、案内管、接続箱の合計容積が約 35 リットルであることから、約 60 回のガス置換回数に相当する。トリチウム除去試験におけるガスフローを Fig. 4-1 に、トリチウム除去試験の経過を Table 4-1(a) に示す。

連続ガススイープの前後で、回収系のトリチウムモニタ TmIRA301 を用いて保護管内のトリチウム濃度を測定した。測定は、回収系の移送ポンプでトリチウムモニタを真空引きしておき、ガス置換用配管を通して保護管内のガスを徐々に引込む方法で行った。この測定では、トリチウムモニタのバックグラウンドを上昇させないため、トリチウムモニタの指示値が $10\text{Bq}/\text{cm}^3$ を超えないよう管理した。

トリチウムモニタに引込んだトリチウムは、トリチウム回収系の循環運転を行い、トリチ

ウム濃度を $1\text{Bq}/\text{cm}^3$ 以下に低下させて排気した。

(3) 試験結果

保護管、案内管、接続箱内のトリチウム除去試験結果を Fig. 4-2 に示す。頭初（8月7日） $75\text{Bq}/\text{cm}^3$ あったトリチウム濃度は1回目のガススイープで急激に低下し、4回目のガススイープ後で $10\text{Bq}/\text{cm}^3$ まで低下した（8月21日）。その後、9月4日、5日の連日でガススイープを行った際には $3.7\text{Bq}/\text{cm}^3$ までトリチウム濃度を低下させることができた。その後は2~3週間毎にトリチウム除去を行った。このため、ガススイープ前のトリチウム濃度は、リード線等に付着したトリチウムの再放出により $8\text{Bq}/\text{cm}^3$ 程度まで上昇していたが、約5時間のガススイープにより $5\text{Bq}/\text{cm}^3$ 程度まで低下させられることを確認した。

99M-54J キャプセルの取出しでは、作業の流れからトリチウム除去後、直ちに接続箱を解放することはできない。このため、トリチウム除去後、接続箱解放までの時間を45時間（実際の接続箱解放は、トリチウム除去16時間後と想定されるが、安全側に評価するため接続箱閉止までの時間とした。）とし、トリチウム濃度の上昇特性から接続箱解放時のトリチウム濃度を推定する。

Fig. 4-3 に9月19日から10月3日のトリチウム濃度上昇特性を示す。この図より、9月19日のトリチウム濃度は $4.9\text{ Bq}/\text{cm}^3$ 、10月3日のトリチウム濃度は $7.2\text{ Bq}/\text{cm}^3$ である。この間のトリチウム濃度が直線的に上昇するものと仮定すれば、45時間後のトリチウム濃度は $5.2\text{Bq}/\text{cm}^3$ である。

保護管、案内管、接続箱の全体積は約35リットルであり、内蔵するガスのトリチウム濃度は $5.2\text{Bq}/\text{cm}^3$ である。従って、保護管、案内管、接続箱内のトリチウム量は $1.8 \times 10^5\text{Bq}$ である。実際の作業では、接続箱の圧力を大気圧まで低下させて開放するため、全てのトリチウムが作業環境に放出されるわけではないが、全量が放出されたとしても、原子炉設置変更許可申請書に記載された年間放出量 $1 \times 10^{11}\text{Bq}$ に比べて十分小さな値である。

4.2 スイープガス配管解放時のトリチウム放出量評価

(1) 目的

スイープガス配管の内、トリチウム増殖材で生成したトリチウムをスイープガス装置に輸送する排気側配管については、照射試験中において高濃度のトリチウムが流れている。99M-54J キャプセルの炉心からの取出しでは、この排気側配管を切離す必要がある。このため、排気側配管のトリチウム除去を十分行うと共に、排気側配管内のトリチウム濃度を把握して排気側配管の切離しに伴うトリチウム放出量に問題がないことを確認する。スイープガ

ス配管の仕様を Table 4-2 に示す。

(2) 試験方法

スイープガス配管内のトリチウム除去は、照射運転中と同様に、スイープガス供給系からスイープガス配管にヘリウムガスを流し、トリチウム測定系、トリチウム回収系を通してガススイープする方法で実施した。ヘリウムガスの流量は約 $200\text{cm}^3/\text{min}$ とし、1 日当たり約 5 時間の連続ガススイープを 9 回実施した。スイープガス配管内のトリチウム除去試験におけるガスフローを Fig. 4-4 に、トリチウム除去試験の経過を Table 4-1(b) に示す。

スイープガス配管内のトリチウム濃度は、回収系のトリチウムモニタ TmIRA301 を用いて測定した。測定は、回収系の移送ポンプでトリチウムモニタを真空引きしておき、スイープガス配管内のガスを直接モニタに引込む方法で行った。この測定では、トリチウムモニタのバックグラウンドを上昇させないため、トリチウムモニタの指示値が $10\text{Bq}/\text{cm}^3$ を超えないよう管理した。

トリチウムモニタに引込んだトリチウムは、トリチウム回収系の循環運転を行い、トリチウム濃度を $1\text{Bq}/\text{cm}^3$ 以下に低下させて排気した。

(3) 試験結果

スイープガスラインの切離しは、作業工程上、スイープガス配管のトリチウム除去試験後、約 30 時間後の作業と考えられる。本検討ではトリチウム除去試験後の時間経過によるトリチウム濃度の上昇をトリチウム除去試験結果から調べ、スイープガスラインの切離し時のトリチウム濃度を推定した。トリチウム除去試験後トリチウム濃度上昇の測定結果を Fig. 4-5 に示す。この測定結果から、トリチウム濃度の上昇が直線的であると仮定すると、約 30 時間放置した後のスイープガス配管のトリチウム濃度は、約 $40\text{Bq}/\text{cm}^3$ と推定できる。

スイープガスラインの切離しはクイック・コネクタにより行う。カタログによれば、クイック・コネクタは 1 回の着脱により 0.3cm^3 以下のガス放出があるとされている。ここでは、安全側の評価とするため、着脱 1 回当たりの放出量を 0.3cm^3 とする。

99M-54J キャプセルの取出しに伴うクイック・コネクタ着脱回数は 3 回（接続箱内の配管切離し作業、接続箱内スイープ配管へのバイパス管の取付け作業、案内管と保護管の間の配管切離し作業）であり、全放出量は 0.9cm^3 となる。放出するガスのトリチウム濃度は約 $40\text{Bq}/\text{cm}^3$ であるから、放出するリチウム量は約 36Bq である。これは、原子炉設置変更許可申請書に記載された年間放出量 $1 \times 10^{11}\text{Bq}$ に比べ、殆ど無視できる値である。

4.3 トリチウム放出に伴う安全対策

4.1項及び4.2項で推定したトリチウム放出量から作業環境のトリチウム濃度、トリチウムの吸入摂取による内部被ばく実効線量を評価し、必要な安全対策を検討した。その結果を以下に示す。

(1) 作業環境のトリチウム濃度評価と安全対策

4.1項において、接続箱開放時点で、保護管、案内管及び接続箱内に残留するトリチウム量は $1.8 \times 10^5 \text{Bq}$ と推定された。接続箱の開放は内部の圧力を大気圧に低下させて行うため、残留するトリチウムの全てが放出されるわけではないが、全量が放出されたとしても原子炉設置変更許可申請書に記載された年間放出量 $1 \times 10^{11} \text{Bq}$ に比べて十分小さな値である。また、クイック・コネクタの着脱により放出されるトリチウム量は 36Bq であり、年間放出量に比べて無視できる値である。

接続箱の開放及びクイック・コネクタの着脱作業は炉プール内で行われる。この作業エリアは約 $1 \times 10^8 \text{cm}^3$ の容積があり、換気も行われている。このため作業環境のトリチウム濃度は放射線業務従事者の呼吸する空気中のトリチウム濃度限度 0.7Bq/cm^3 (8時間平均) を十分下回ると考えられる。

これらより、接続箱の開放及びクイック・コネクタの着脱において特別な対策を取る必要はないが、作業環境のトリチウム濃度を極力低下させ、無用な内部被ばくを防止する観点から以下の対策を行うこととした (Fig. 4-6 参照)。

- ① 接続箱の開放に当たっては、接続箱全体をポリエチレンシートで覆い、内部のガスを局部排気装置で第2排気系に排気する。
- ② クイック・コネクタの着脱作業は、スイープガス配管内を負圧状態とし、クイック・コネクタを濡れタオルで包んで行う。
- ③ 作業環境のトリチウム濃度を監視するため、トリチウムモニタを設置する。

(2) 内部被ばくの評価と防護対策

接続箱の開放及びクイック・コネクタ着脱により放出されるトリチウムを吸入摂取した場合の内部被ばく実効線量を次式により算出する。

$$E = e \times I \quad \dots \dots \dots (4-1)$$

E : 内部被ばく実効線量 (mSv)

e : 線量告示の別表第 1 に定める実効線量係数 ($2.8 \times 10^{-8} \text{mSv/Bq}$)

I : 吸入摂取した放射性物質の量 (Bq)

4. 1 項において、接続箱開放時点で、保護管、案内管及び接続箱内に残留するトリチウム量は $1.8 \times 10^5 \text{Bq}$ と推定された。また、4. 2 項において、クイック・コネクタの着脱により放出されるトリチウム量は 36Bq と推定された。99M-54J キャップセルの炉内取出作業で、これらのトリチウムの全量を吸入摂取すると仮定した場合、(4-1) 式から、内部被ばく実効線量は $5.0 \times 10^{-3} \text{mSv}$ である。これは、放射線業務従事者の線量限度（1 年間につき 50mSv）に比べて十分に小さな値であり、作業に当たって特別な装備は必要ないと考える。しかし、可能な限り内部被ばくを防止する観点から、エアラインマスクを着用して作業を行うこととした。また、エアラインマスクを着用することから、作業環境のトリチウム濃度は 7Bq/cm^3 （放射線業務従事者の呼吸する空気中のトリチウム濃度限度の 10 倍）で管理することにした。

4. 4 金属中に溶解するトリチウム量の評価

99M-54J キャップセルの本体部分は、照射後試験プロセスが確立された後、ホットラボ施設に引渡す予定である。他の部分は放射性廃棄物として廃棄物管理施設に引渡す必要があるが、トリチウム汚染物の引き渡しは処理方法が確立していないのが現状である。このため、当面は原子炉施設内で保管することになるが、保管中及び将来の廃棄物管理施設引渡におけるトリチウム量を把握するため、保護管や案内管及びスイープガス配管の金属中に溶解するトリチウム量を評価する。

金属中に溶解するトリチウム量は(4-2)式¹²⁾で与えられる。本評価において、スイープガス配管の排出側配管中のトリチウム濃度は $2 \times 10^4 \text{Bq/cm}^3$ 、保護管及び案内管内のトリチウム濃度は $1 \times 10^2 \text{Bq/cm}^3$ とした。また、保護管内の温度は 50°C、案内管内の温度は 20°C とした。計算結果を Table 4-3 に示す。

$$K_s = K_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_s}{RT}\right) \cdot P^{0.5} \quad (4-2)$$

K_0 : ステンレス鋼 1cm^3 中に溶解する標準状態のトリチウムガス ($\text{molT}_2/\text{cm}^3$)

ΔH_s : 溶解のエンタルピー (kJ/mol)

R : 気体定数 (J/mol/K)

T : 温度 (K)

P : トリチウムの分圧 (Pa)

5. 炉外における閉止栓の溶封操作試験

99M-54J キャプセルの保護管内に装荷した電磁弁 (AV001、AV002 及び AV003) が、照射期間が長かったなどの理由により、弁座漏れを生じていることが確認された（付録 I）。このため、JAERI-Tech2004-026 に記載されている閉止栓の溶封操作では、事前に定めていた操作方法が使用できないことから、一部操作方法を変更して、閉止栓の溶封操作を行った。

そのため、炉外における閉止栓の溶封操作試験を行い、その閉止栓の操作手順と溶封確認のための検査方法について検討した。炉外における閉止栓の溶封操作試験の検討手順を Fig. 5-1 に示す。

5.1 スイープガス配管内の容積測定検証試験

(1) 目的

スイープガス配管内のガスの圧力変化を測定し、配管の容積を評価することにより、閉止栓が溶封されていることを確認するために、スイープガス配管内の容積測定検証試験を行い、バルブの開閉手順を決定する。

(2) 試験方法

本試験では、Fig. 5-2 に示すスイープガス装置の配管系統を模擬した試験ラインを組み立て、バルブ開閉操作を行った。また、定量タンクを配管系統に取付け、バルブの開閉による配管系統内を真空もしくは He ガスの導入を行うことで圧力を変化させ、容積を測定した。

Fig. 5-2 中の各機器及び計測機器の番号は、実際のスイープガス装置に設置されている機器及びバルブ番号と対応させた。なお、本試験では、99M-54J キャプセルの 3 個の閉止栓は手動弁で模擬し、それぞれの手動弁番号は、閉止栓供給管側閉止栓（閉止栓(供)）を SV-001、閉止栓排出管側下部閉止栓（閉止栓(排下)）を SV-002 及び閉止栓排出管側上部閉止栓（閉止栓(排上)）を SV-003 とした。

(3) 試験結果

スイープガス配管内の容積測定検証試験における容積測定の結果を Table 5-1 に示す。配管系を模擬した Fig. 5-2 において、最初に全体の容積 (SV-001 と SV-002 を開とし AV101～AV201 間の容積) を測定した結果 89.9cm^3 であった。その後、各弁間の容積 (AV101～AV102 間の容積) (AV102～AV201 間の容積) を測定し、その和と全容積の差は 0.4cm^3 であり、ほぼ合致した。

また、同様に閉止栓 SV-001, SV-002 を閉めた状態で、上記と同様な方法で全容積から模擬容器の容積を差し引いた部分の容積を確認した (AV101～AV201 間の全容積) 結果 74.2cm^3 であり、また、各弁間の容積 (AV101～AV102 間の容積) (AV102～AV201 間の容積) を測定し、その和と全容積の差は 0.3 cm^3 でほぼ合致した。

これらのことから、配管の全容積は約 90cm^3 、模擬容器の容積は約 16cm^3 であり、配管内の体積をほぼ正確に評価することができた。また、2つの閉止栓を同時に閉止操作した時には、全容積測定時の評価から、閉止栓が完全に閉止していることを確認できることが判った。

5. 2 閉止栓の同時操作模擬試験

(1) 目的

電磁弁の弁座漏れにより、SV-001（閉止栓供給管側閉止栓（閉止栓(供)））と SV-002（閉止栓排出管側下部閉止栓（閉止栓(排下)））を同時に溶封操作することが必要になった。このため、溶封操作を同時にできる電気回路を構築するとともに、はんだを用いた溶解昇温試験を行い、操作方法を確立する。

(2) 試験方法

同時閉止栓操作模擬試験では、スイープガス装置の供給側及び排気側の2つの閉止栓を模擬し、2本のセラミックヒータの温度制御を同時に操作できる電気回路 (Fig. 5-3 参照) を作り、実機に装備されている液体金属の模擬金属として、「はんだ」を用いた昇温試験を行った。この際、実際に 99M-54J キャップセル取出試験時の閉止栓操作上、過大な電流が流れないよう模擬試験で十分な確認を行った。

(3) 試験結果

セラミックヒータ取付け及び模擬液体金属として選定した「はんだ」を入れた容器の加熱試験の結果を Fig. 5-4 に示す。この結果、溶封を同時に操作できる電気回路を用いることにより、2 本のセラミックヒータは問題なく昇温できることを確認した。「はんだ」内に装荷した熱電対の温度指示の上昇傾向が昇温中において、なだらかになる領域が観測され、それが「はんだ」の融点であることが判明したことから、実機の 99M-54J キャップセルの閉止栓の溶封操作においても、この現象を利用して温度指示を確認することとした。以上の結果から、加熱温度及び電流値を確認しながら溶封操作行こととした。

5.3 炉外での溶封操作モックアップ試験

(1) 目的

スイープガス配管内容積確認試験と同時閉止栓操作模擬試験に基づいて、実際の閉止栓を用いた溶封操作モックアップ試験を行った。

(2) 試験方法

前述の2つの試験の結果により、2本の予備閉止栓をスイープガス配管内の容積確認試験で用いた配管ラインに取付け、炉外における閉止栓操作試験を行い、バルブ開閉操作手順を確認するとともに、閉止栓の検査方法を検討した。本試験で用いた閉止栓及びセラミックヒータの写真をFig. 5-5に示す。また、組み立てた溶封操作装置をFig. 5-6に示す。本試験では、99M-54J キャプセルに装荷されている3個の閉止栓の内、「SV-001 及び SV-002」について、実際に使用している閉止栓に取り替えた。また、同時閉止栓操作模擬試験の電気回路にて、閉止栓ヒータ及び熱電対を設置し、モックアップ試験（温度測定、容積測定）を行った。なお、閉止栓操作モックアップ試験後、溶封させた閉止栓について、X線検査、He リーク検査及び閉止栓を切断し、液体金属の溶解状態の確認を行った。加圧後、閉止栓の温度を下げ、容積測定を行った。

閉止栓の溶封試験における温度測定結果をFig. 5-7に示す。まず、供給側及び排出側の下部に取付けている閉止栓の溶封を行った。約10分間で室温から200°C（溶融金属が溶解しない温度）まで閉止栓を加熱し、15分間保持した。次に、200°Cから300°Cに加熱し、閉止栓の溶融金属を溶解させた。約250°Cの温度で溶融金属が溶解したと考えられる部分が観測された。300°Cに到達した後、10分間保持し、溶融金属が配管内を十分に閉止するために、配管内の圧力を950Torrまで加圧した。

(3) 試験結果

炉外での溶封操作モックアップ試験における配管ライン容積測定の結果をTable 5-2に示す。

5.1項では、スイープガス配管内の容積測定検証試験として、閉止栓を模擬した弁を使用したが、今回は実際のキャプセルで使用した閉止栓（液体金属入りの閉止栓）を使用して、5-1項と同様な試験を行った。その結果、各容積は5.1項(3)で示した結果とほぼ同じであった。

容積測定後、給気側の閉止栓は、配管の細い部分まで溶融金属が溶込んでいることが、X線観察から確認された。He リーク検査の結果、He リーク率は $4 \times 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であり、十分満

足している結果であった。一方、X線観察から、排気側の閉止栓は、配管の細い部分まで溶融金属が溶込んでいなかった。また、He リーク率は $1 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であり、給気側の閉止栓の結果と比較して、悪い値であった。このため、排気側の閉止栓について、液体金属溶融時に負荷する圧力を 0.125MPa (950Torr) から 0.197MPa (1500Torr) に上げた加熱試験を行った。この溶封試験結果を Fig. 5-8 に示す。この結果、配管の細い部分まで溶融金属が溶込んだこと、He リーク率が $2 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であったことから、本条件で満足した結果を得ることができ、溶封操作の内、加圧を 0.197MPa (1500Torr) に変更して行うこととした。

5.4 スイープガス装置の容積測定試験

(1) 目的

実際の 99M-54J キャプセルの閉止栓容積の評価による閉止の確認を行うため、定量タンク及び圧力計をスイープガス装置に設置し、真空もしくは He ガス導入を行うことにより、スイープガス配管内の圧力変化を測定した。

(2) 試験方法

スイープガス装置に定量タンク及び圧力計を設置し、前述した試験結果に基づいて策定した操作方法を確認するために、バルブの開閉操作、配管内圧力変化測定等の試験を行った。本測定にあたり、供給系の V107 のサンプリングラインを用いて、定量 (75cm^3) のタンクと圧力計を設置した。スイープガス装置に設置した試験フロー図及びタンク・圧力計部の写真を Fig. 5-9 に示す。

(3) 試験結果

これまでの容積測定において実証された圧力変化法により、実機のスイープガス装置に接続した状態で (Fig5-9 参照) ガススイープ配管の容積測定を行った。それらの結果は、スイープガス装置の AV101～AV201 の配管容積は 689.7 cm^3 であり、スイープガス装置の AV101～AV102 及び AV102～AV201 の平均値は、それぞれ 211.7 cm^3 と 476.4 cm^3 であったことから、全配管 (AV101～AV201) 容積の平均値は、 688.1 cm^3 であった。この圧力変化法による容積測定は、測定の都度若干誤差を生じる可能性があることから、99M-54J キャプセルの引抜き作業までの間、数回測定を行い、実際に閉止栓操作作業のバックデータとした。

6. 照射試験体の取出試験

JMTR 炉心からの 99M-54J キャップセルの取出試験にあたっての留意点は、放射化による γ 線遮へいを行うことと残留トリチウムの作業環境への放出を極力低減することである。99M-54J キャップセルの取扱いについては、既に計測付きキャップセル等の取出し作業により経験を有していることから、そのマニュアルを参考とするとともに、残留トリチウムの放出に配慮した取出試験を進める必要がある。本 99M-54J キャップセルの取出試験にあたっては、トリチウムの作業環境への放出防止に配慮し、第 4 章で実施した残留トリチウムの除去試験結果を反映した取出試験確認表を作成し、安全対策を講じ、取出試験を実施した。

なお、99M-54J キャップセルの取出試験にあたっての基本方針を以下の通り定めた。

- (1) リスクアセスメントの徹底及び作業要領書の説明を確実に行い、作業者一人一人の持ち場を認識し作業に臨む。
- (2) 大洗研究開発センター(北地区)放射線障害予防規定に基づき、適切な放射線管理及び放射線防護資材を準備することにより安全作業に努める。
- (3) 照射試験体の取出試験にあたっては、スイープガス配管及び接続箱・保護管等に残留するトリチウムの除去に努めるとともに、作業環境へのトリチウム放出の低減に努め、作業者の内部被ばくを防止する。
- (4) 大洗研究開発センター(北地区)放射線障害予防規定の内部被ばく防護方法に照らして、エアラインマスクを着用するなど対策を講ずる。
- (5) トリチウム濃度管理は、放射線管理用に特設する放管モニタの連続測定により行う。トリチウム濃度が空気中濃度限度の十倍を超えるおそれがある場合には直ちに作業を中断する。
- (6) 閉止栓の溶封操作は、確立した操作手順に従って行う。
- (7) 照射試験体は、案内管と保護管を切離し、第 1 カナルに仮保管し、排気管については BFT 操作ボックス内保管とする。

6.1 取出試験作業要領

先に述べた計測付キャップセルマニュアルを参考とし、残留トリチウムの放出に配慮した取出試験要領書を作成した。作業場所は、JMTR 炉上・炉廻り及び B1F・スイープガス照射装置に分かれているため、要領書を別に作成し、相互に連絡を取りあう部分を明確とした要領書とした。

また、連絡は無線装置を使用し、隨時連絡を取り合う事とした。作業時間については、各部のトリチウム除去及び閉止栓の溶封作業等を配慮し、3日間の作業とした。

以下に作業手順を示す。

(1) 接続箱・保護管及びスイープガスライントリチウム除去作業

接続箱・保護管及びスイープガスライントリチウム除去作業は、炉室 B1F・スイープガス装置で1日目に行う作業である。先に述べた接続箱・保護管等の内部及びスイープガス配管内のトリチウム除去作業を同時進行にて行うものである。トリチウム除去作業終了後には、接続箱・保護管のトリチウム濃度が確実に低下していることを確認する。また、2日目の接続箱開放の準備として、接続箱内を降圧し開放可能な状態とする。

(2) キャップセル取出作業準備

キャップセル取出作業準備は、JMTR 炉上・炉廻りでの1日目に行う作業である。

炉内のキャップセル支持具(サポートアーム)取外し、接続箱周りの養生及び局所排気準備、放管トリチウムモニタの設置を行い、2日目の作業の準備を行うこととした。

(3) 閉止栓ヒータ接続作業

閉止栓ヒータ接続作業は、JMTR 炉上・炉廻りでの2日目に行う作業である。局所排気及び放管モニタリングを行いながら、接続箱の開放作業を行う。次に閉止栓溶封作業を行うための準備として、接続箱内の閉止栓ヒータ線2本の接続を行う。ヒータ線接続後、炉室 B1F・スイープガス装置側へ連絡し、閉止栓溶封作業開始の指示を行う。接続箱は、作業終了まで開放したままの状態とし、ビニールシートを覆った状態で終了する。

(4) 閉止栓接続作業

閉止栓接続作業は、炉室 B1F・スイープガス装置で2日目に行う作業である。JMTR 炉上・炉廻り作業者から閉止栓ヒータ線2本の接続の連絡を受けたのち、閉止栓の溶封作業を実施する。閉止栓の溶封作業終了後、スイープガス管内のガススイープを行う。ガススイープ終了後、スイープガス管内のトリチウム濃度測定を行い、確実に濃度低下が低下していることを確認する。3日目のクイック・コネクタ取外し準備として、スイープガス管内を真空状態とする。

(5) スイープガス管クイック・カプラ取外し、キャップセル取出・保管作業

スイープガス管クイック・カプラ取外し、キャップセル取出・保管作業は、JMTR 炉上・炉廻

りでの3日目に行う作業である。

- ①炉室 B1F・スイープガス装置担当者から連絡を受けた後、局所排気・放管モニタリングを行いながら、給気管及び排気管のクイック・コネクタ（接続箱内）の取外しを行う。
- ②給気管及び排気管のクイック・コネクタ取外し後、バイパス管の取外しを行う。
- ③接続箱から案内管を取り外し、接続箱を閉止する。
- ④局所排気・放管モニタリングを行いながら案内管、保護管を切離す。
- ⑤計測線等を切断し、給気管及び排気管のクイック・コネクタを取外す。
- ⑥保護管に吊り具を付け、炉プール水張りを行う。
- ⑦炉プール水張り後、キャップセルを第1カナルへ移動し、所定の場所に保管する。
- ⑧キャップセルを第1カナル保管板へ保管後、保護管吊具を取り外して大気開放状態とする。
また、排気管を第2排気系に接続する。

(6) スイープガスバイパス管及び接続箱漏洩確認作業

スイープガスバイパス管及び接続箱漏洩確認作業は、炉室 B1F・スイープガス装置で3日目に行う作業である。炉上・炉周り作業者から、接続箱内バイパス管の取付け終了の連絡を受けた後、スイープラインの通ガス確認及びバイパス管接続部の漏洩確認を行う。また、接続箱閉止作業終了後、漏洩試験を行う。

6.2 実施体制

99M-54J キャップセルの取出試験は、作業場所が分かれることから、作業が確実かつ円滑に進行するため、Table 6-1 に示すとおり、指揮命令系統を明確にした実施体制を定め、さらに、取出試験確認表に基づき記録をとりながら進めることとした。

- (1) スイープガス配管内のトリチウム濃度測定及び接続箱・保護管等の内部のトリチウム除去操作のためのスイープガス装置の運転監視。
- (2) 原子炉圧力容器上の接続箱開放作業及び照射試験体の JMTR 炉心からの取り出し・保管作業。
- (3) 閉止栓の溶封操作。
- (4) 炉廻りにおけるトリチウム濃度測定管理及び作業支援。

6.3 取出試験結果

99M-54J キャプセルの取出試験の結果及び経過を Table 6-2～Table 6-4 に示す（付録 II 参照）。また、Fig. 6-1 に照射試験体の取出試験時の写真を示す。取出試験は、要領書どおり進行し、滞りなく終了した。主な試験結果の概要は、以下の通りであった。

(1) 取出試験 1 日目（11月13日）

取出試験 1 日目は、接続箱を開放及びキャプセルを炉内より取り出すための準備を行い、要領書どおり終了した。また、接続箱・保護管内トリチウム除去試験を実施し、トリチウム回収系トリチウムモニタ TmIRA301 による測定値で $4.3\text{Bq}/\text{cm}^3$ まで低下していることを確認した。接続箱開放時に、残留トリチウムが作業環境へ放出しないようにするために、要領書どおり内部を大気圧とした。

(2) 取出試験 2 日目（11月14日）

取出試験の 2 日目は、接続箱を開放し、接続箱内のトリチウム濃度が推定値以内であることを確認するとともに、閉止栓の溶封操作を行った。作業内容を、以下に示す。

- ① 接続箱を開放するため、接続箱全体をポリエチレンシートで覆い、その内部を局所排気により連続排気するとともに、放管モニタによりトリチウム濃度の測定を行い、作業を実施した。作業者はエアラインマスクを着用し、作業に臨んだ。接続箱開放時のモニタリング結果及び汚染状況についての測定結果は次に示す通りである。

- ・ポリエチレンシート内のトリチウム濃度（放管モニタ 0.18 レンジ）

接続箱開放前（バックグラウンド）：	$4.5 \times 10^{-2}\text{Bq}/\text{cm}^3$
接続箱開放後	$1.8 \times 10^{-1}\text{Bq}/\text{cm}^3$ (最高値)
接続箱開放後 30 分経過	$7.0 \times 10^{-2}\text{Bq}/\text{cm}^3$
・接続箱内表面密度	: $12.2\text{Bq}/\text{cm}^2$ (接続箱内 2 箇所の平均値)

接続箱開放時のトリチウム濃度の値は、前日(11月13日)のトリチウム除去後の実測値 $4.3\text{Bq}/\text{cm}^3$ より低い値 ($0.18\text{Bq}/\text{cm}^3$) であったが、僅かながらトリチウム濃度上昇が見られた。適切な防護方法を取られていることから、計画通り作業を進めた。

- ② 接続箱開放後、溶封操作試験で構築したヒータの電気回路をスイープガス装置の制御盤に接続するために、Fig. 6-2 に示すように変更した。閉止栓の溶封操作に用いた電気回路、データ収集装置等の外観写真を Fig. 6-3 に示す。まず、接続箱内で切断していたセラミックヒータ用の 2 本の電気配線を接続した。絶縁・導通を確認した後、スイープガス装置にあるキャップセル制御盤のヒータ回路の接続替えを行った

後、閉止栓のセラミックヒータの温度が上昇することを確認した。

- ③ 閉止栓の溶封操作は要領書に従い実施した。まず、供給管及び排出管の下部に取付けている閉止栓の溶封を行った。約 5 分間で室温から 200°C（溶融金属が溶解しない温度）まで閉止栓を加熱し、15 分間保持した。次に、200°Cから 300°Cに加熱し、閉止栓の溶融金属を溶解させた。閉止栓の溶封操作における温度結果を Fig. 6-4 に示す。この結果、約 250°Cの温度で溶融金属が溶解したと考えられる部分が観測された。300°Cに到達した後、10 分間保持し、溶融金属が配管内を十分に閉止するために、配管内の圧力を 0.197MPa (1500Torr) まで加圧した。配管内圧力変化による容積測定を行った結果、溶封終了後の容積は 663.5cm³ であり、溶封前容積 696.0cm³ と比較して 32.5cm³ 減少した。微小球充填体部の実際の容積は約 37.0cm³ であり、測定結果に多少の誤差はあったが、温度上昇時の溶融金属が溶解した部分が観測されたことから、溶封されたと判断した。溶封後、30 分間配管内の漏洩検査（加圧法）を行った結果、圧力の変化はなく、良好に閉止栓の溶封操作ができたことを確認した。溶封作業後のスイープラインの濃度測定結果を、Table 6-4 に示す。また、閉止栓の溶封操作終了後の容積測定結果を Table 6-5 に示す。

(3) 取出試験 3 日目(11月 15 日)

取出試験の 3 日目は、接続箱内のクイック・コネクタ着脱、接続箱胴部からの案内管用フランジの取外し、案内管と保護管切離しの順序で作業を行った。接続箱内のクイック・コネクタ着脱時において、ポリエチレンシート内のトリチウム濃度が 0.9Bq/cm³、保護管部のクイック・コネクタ着脱時におけるポリエチレンシート内のトリチウム濃度が 9.3Bq/cm³ と一時的に高い値を示した。各作業共、放管モニタ指示値の経過観察を行いながら作業を実施し、約 20 分以内でバックグランドレベルまで低減したことから、環境への放出は問題なしと判断した。接続箱内のクイック・コネクタ着脱終了後、接続箱内の供給管・排出管クイック・コネクタにバイパス管を取り付け、通ガス確認及びクイック・コネクタ接続部の加圧漏洩試験を行い、問題のないことを確認した。クイック・コネクタ接続部の加圧漏洩試験終了後、炉プール水の水張りに備えて接続箱の加圧漏洩試験を行い、漏洩のないことを確認した。接続箱漏洩試験終了後に接続箱内のトリチウム除去試験を行い、 2.7×10^{-1} Bq/cm³ まで確実に濃度が低下していることを確認した。

炉心からの 99M-54J キャップセルの取出しにおいても、要領書どおりスムーズに行われた。99M-54J キャップセルは、保護管に専用吊具を取付けた後、第 1 カナルに移動し仮保管した。99M-54J キャップセル仮保管後、保護管を大気開放とするため、保護管専用吊具下部にクランプによりワイヤーを取付け、また、ワイヤーと保護管専用吊具の吊り替えを行い、専用

吊具の取外しを行った。排気管は、第2排気系に接続し、連続で排気しながら 99M-54J キャプセル引渡しまで保管することとした。保管終了後、JMTR 壓力容器にノズル閉止フランジの取付けを行い、一連の作業を終了した。JMTR 炉心からの照射試験体取出し、第1カナルへの移動、保管は当初の計画どおり終了した。

6.4 考 察

- (1) JMTR 炉心からの 99M-54J キャプセルの取出しに伴う接続箱の開放時間は約 25 時間であったが、接続箱開放時のトリチウム濃度の上昇は僅かであった。
- クイック・カプラ取外し時においては、予測濃度より多少高いトリチウム濃度上昇が観測されたが、放管モニタによる約 20 分後のトリチウム濃度はバックグランドレベルになり、点検表に従って問題なく進めることができた。これは事前に取出試験確認表の作成を行い、それをもとに準備し、慎重かつ迅速に作業を進めた成果であり、トリチウムによる内部被ばく防止等の観点から重要である。また、作業は総てポリエチレンシート内において実施し、局所排気を用いたことで、作業環境へのトリチウム放出は抑えられたものと思われる。さらに、作業者はエアラインマスクを着用して、トリチウム防護に配慮し、常に安全側のトリチウム防護を基本に対応した。なお、放管トリチウムモニタの吸引ノズル位置等により、トリチウム濃度の変動が大きいことも考えられるため、適切なトリチウムモニタリングの検討も行う必要がある。
- (2) 本作業における JMTR スタックへのトリチウム総放出量は、 $3 \times 10^5 \text{Bq}$ となる。この値は、原子炉設置変更許可申請書に記載されている年間放出量 $1 \times 10^{11} \text{Bq}$ に比べて極めて少ない値であり、トリチウム除去試験の成果が出たものである。
- (3) 作業の安全性を確保するためには、原子炉停止期間中における 99M-54J キャプセルのスイープガス配管及び接続箱・保護管等の内部のトリチウム除去試験を定期的に行い、可能な限りトリチウム濃度を低減させることが重要である。また、それらの結果をもとに、原子炉からの照射試験体の取出し手順、その作業結果等を網羅した一連の取出試験確認表（付録III）を作成することが重要かつ有効であった。

7. まとめ

トリチウム増殖材(Li_2TiO_3)微小球充填体を装荷した 99M-54J キャプセルは、照射試験終了後もスイープガス配管や接続箱内にトリチウムが吸着・残留していることから、炉内からの取出しにあたっては、スイープガス配管や接続箱内のトリチウム除去をいかにして行うかが課題であった。特に、接続箱は長時間の開放が必要なことから、残留トリチウムの脱離特性を把握し、接続箱開放中のトリチウム濃度を予測して適切な安全対策を講ずることが重要である。

保護管や案内管、接続箱内には種々の計測線、配管類が複雑に装荷されているが、99M-54J キャプセルには保護管下端までガス置換配管が挿入されており、保護管等のガススイープが効率良く行えるようになったことで、計測線等の表面に吸着・残留しているトリチウムの除去が確実なものとなり、作業上問題ないレベルまでトリチウム濃度を低下できることが明らかになった。また、溶封式の閉止栓が取付けられ、試料部のトリチウムを確実に密封できるようになったことで、取出し時のトリチウム放出低減及びキャプセル解体時の切断が安全にできるようになった。

安全対策面では、残留トリチウムが作業環境へ放出しないようにするために、接続箱全体をポリエチレンシートで覆い、その中を連続排気することにより、作業環境へのトリチウム放出を極力抑えることができた。また、詳細な作業要領書を作成してリスクアセスメントを実施し、作業者一人一人の作業分担を明確化することで作業がスムーズに進行できた。

今回実施した 99M-54J キャプセル取出し時のスイープガス配管や接続箱内のトリチウム濃度は、前回実施した 96M-37J キャプセル取出し時より低い値であった。これは照射試験中に生成したトリチウム量の違いもあるが、キャプセル取出し及び解体に必要な改良が加えられたことで取出し時のトリチウム濃度の低減ができるようになり、前回の 96M-37J キャプセルの取出し経験が生かされた結果である。また、99M-54J キャプセル照射期間中の原子炉停止後には必ず接続箱のガススイープを実施し、トリチウム濃度を低下させいたことが取出し時の作業安全につながったと考える。

本報告書が、今後実施予定のブランケット部分モジュール照射試験において、照射終了後の取出し手順作成に役立つことを期待する。

謝　　辞

本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、齋藤順市 原子炉施設管理部技術主幹から有意義な助言、指導を戴きました。99M-54J キャプセルの取出作業では照射設備整備課各位、取出作業の放射線管理では近藤吉男氏、横須賀美幸氏、網代和広氏、小杉山匡史氏（放射線管理第2課）の協力を戴きました。また、データをまとめるにあたり、石田卓也（出向職員（照射試験炉センター））、長谷川貞司（出向職員（核融合研究開発部門 ブランケット照射開発 Gr.））の協力を戴きました。この他、多くの関係各位の協力を戴き、大過なく 99M-54J キャプセルの取出しを完了することができました。この貴重な経験を今後の業務に活かしていく所存であります。

参考文献

- 1) 原子力委員会, 「第3段階核融合研究開発基本計画」, (1992年6月).
- 2) International Atomic Energy Agency, "ITER Blanket, Shield and Material Data Base", ITER Documentation Series, No. 29, (1991).
- 3) 榎枝幹男, 小原祥裕, 秋場真人, 佐藤 聰, 秦野歳久, 他18名, 「超臨界水冷却固体増殖ブランケットシステムの概念検討」, JAERI-Tech 2001-078, (2001).
- 4) H. Kawamura, H. Sagawa, E. Ishitsuka, K. Tsuchiya, N. Sakamoto, T. Niiho, "New Facilities in Japan Materials Testing Reactor for Irradiation Test of Fusion Reactor Components", Proc. of an ENS Class 1 Topical Meeting, p. 232-239, (1996).
- 5) K. Tsuchiya, M. Nakamichi, Y. Nagao, J. Fujita, H. Sagawa, S. Tanaka, H. Kawamura, "Integrated Experiment of Blanket In-pile mockup with Li_2TiO_3 Pebbles", Fusion Engineering and Design, 51-52, p. 887-892 (2000).
- 6) K. Tsuchiya, A. Kikukawa, D. Yamaki, M. Nakamichi, M. Enoeda, H. Kawamura, "In-situ Tritium Release Behavior from Li_2TiO_3 Pebble-bed", Fusion Engineering and Design, 58-59, p. 679-682, (2001).
- 7) K. Tsuchiya, M. Nakamichi, Y. Nagao, M. Enoeda, T. Osaki, S. Tanaka, H. Kawamura, "In-Situ Tritium Release Experiments of Blanket In-Pile Mockup with Li_2TiO_3 Pebble Bed in Japan", Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 38, No. 11, p. 996-1003, (2001).
- 8) 編著 原子力規制関係法令研究会, 「原子力規制関係法令集 一試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則等の規定に基づき、線量限度等を定める告示(改定平成17年11月30日)」, 2007年度版.
- 9) 日本原子力研究所, 「日本原子力研究所大洗研究所原子炉設置変更許可申請書」, 平成13年7月.
- 10) 菊地泰二, 山田弘一, 斎藤 隆, 中道 勝, 土谷邦彦, 河村 弘, 「スイープガスライン閉止栓の開発」, JAERI-Tech 2004-026, (2004年3月).
- 11) 池島義昭, 石田卓也, 土谷邦彦, 富田健司, 海老沢博幸, 馬籠博克, 中道 勝, 北島敏雄, 河村 弘, 「 Li_2TiO_3 微小球充填体を装荷した照射済試験体の JMTR 炉心からの取出方法に関する検討」, JAERI-Tech 2005-005, (2005年2月).
- 12) 核融合特別研究総合総括班事業, 「昭和62年度文部省科学研究費補助金研究成果報告書 トリチウム資料集・1988」, (1988年3月).

Table 2-1 99M-54J キャプセル照射試験における回収トリチウム量

サイクル No.	照射期間	トリチウム回収量 (Bq)	備考
136	H12. 11. 17～H12. 12. 12	3.1×10^{11}	
137	H13. 1. 12～H13. 2. 6	3.7×10^{11}	
138	H13. 2. 26～H13. 3. 23	4.3×10^{11}	
139	H13. 4. 19～H13. 5. 14	5.2×10^{11}	
140	H13. 5. 31～H13. 5. 31	3.4×10^8	JMTR/50MW 時のスクラム (H13. 5. 31)
141	H13. 10. 7～H13. 10. 28	3.8×10^{11}	
142	H13. 11. 20～H13. 12. 8	1.5×10^{11}	JMTR/50MW 時のスクラム (H13. 12. 8)
143	H14. 1. 18～H14. 2. 10	1.1×10^{11}	
144	H14. 3. 8～H14. 4. 7	6.2×10^{11}	JMTR/50MW 時のスクラム (H14. 3. 31) : 落雷
145	H14. 5. 9～H14. 5. 14	1.3×10^{11}	JMTR/50MW 時のスクラム (H14. 5. 14)
146	H14. 7. 3～H14. 7. 19	1.5×10^{11}	
147	H14. 11. 17～H14. 12. 10	—	JMTR/50MW 時の計画外停止 (H14. 12. 10)
148	H15. 6. 17～H15. 6. 20	—	JMTR/50MW 時の計画外停止 (H15. 6. 20)
149	H15. 10. 4～H15. 11. 3	8.79×10^{10}	
150	H15. 11. 22～H15. 12. 25	1.17×10^{11}	計画停止 (H15. 12. 9) 中間炉停止 (H15. 12. 10～12) 原子炉再起動 (H15. 12. 13)
151	H16. 1. 22～H16. 2. 29	2.06×10^{11}	JMTR/10MW 時の計画外停止 (H16. 1. 22) 原子炉再起動 (H16. 1. 31)
152	H16. 3. 8～H16. 4. 4	2.04×10^{11}	JMTR/50MW 時のスクラム (H16. 4. 4) : 地震
153	H16. 5. 9～H16. 6. 7	2.15×10^{11}	
154	H16. 6. 15～H16. 7. 14	2.60×10^{11}	
155	H16. 10. 22～H16. 11. 21	2.10×10^{11}	
156	H16. 11. 29～H16. 12. 27	1.83×10^{11}	
157	H17. 1. 27～H17. 2. 26	2.59×10^{11}	
158	H17. 3. 6～H17. 4. 4	2.59×10^{11}	
159	H17. 5. 11～H17. 6. 9	4.72×10^{11}	
160	H17. 6. 18～H17. 7. 18	5.22×10^{11}	JMTR/50MW 時のスクラム (H17. 7. 7) 原子炉再起動 (H17. 7. 9)
161	H17. 12. 17～H18. 1. 28	2.28×10^{11}	計画停止 (H17. 12. 27) 原子炉停止 (H17. 12. 28～H18. 1. 8) 原子炉再起動 (H18. 1. 9)
162	H18. 2. 23～H18. 3. 26	5.01×10^{11}	
163	H18. 4. 20～H18. 5. 16	3.86×10^{11}	セットバック信号により JMTR/40MW まで出力降下 (H18. 4. 30)
164	H18. 5. 24～H18. 6. 18	4.13×10^{11}	
165	H18. 7. 5～H18. 8. 1	4.18×10^{11}	JMTR/50MW 時のスクラム (H18. 7. 15) 原子炉再起動 (H18. 7. 17)
全回収トリチウム量		8.11×10^{12}	

Table 2-2 99M-54J キャプセルの照射試験条件

照射条件	
熱中性子束	約 $2 \times 10^{17} \text{n}/\text{m}^2/\text{s}$
高速中性子束	約 $8 \times 10^{15} \text{n}/\text{m}^2/\text{s}$
試験温度	150～650°C
トリチウム生成量	～ $2 \times 10^{10} \text{Bq}/\text{day}$
照射試験日数	第 136～165 サイクル (675 日)
スイープガス条件	
スイープガス	He + H ₂
スイープガス流量	50～950 cm ³ /min
水素添加量	50～10,000 ppm

Table 4-1(a) 試験体の取出試験までの接続箱トリチウム除去特性試験の経緯

	月 日	試 験 内 容	試 験 条 件
トリチウム除去試験	8月7日	接続箱・保護管内のトリチウム除去試験	流量 : 950cm ³ /min (2h)
		接続箱・保護管内のトリチウム濃度測定 : 2回	流量 : 950cm ³ /min (45min)
	8月11日	接続箱・保護管内のトリチウム除去試験	流量:650cm ³ /min (5h)
	8月17日	接続箱・保護管内のトリチウム除去試験	流量:650cm ³ /min (5h)
	8月21日	接続箱トリチウム除去試験	流量:650cm ³ /min (5h)
	9月4日	接続箱・保護管内のトリチウム除去試験	流量:650cm ³ /min (5h)
	9月5日	接続箱・保護管内のトリチウム除去試験	流量:650cm ³ /min (5h)
	9月19日	接続箱・保護管内トリチウム除去試験及び濃度測定 (接続箱・保護管内濃度評価開始)	流量:650cm ³ /min (5.3h)
	10月3日	接続箱・保護管内トリチウム除去試験及び濃度測定 (接続箱・保護管内濃度評価終了)	流量:650cm ³ /min (5h)
	10月4日	接続箱・保護管内のトリチウム濃度測定	
	10月5日	接続箱・保護管内のトリチウム濃度測定	
取出試験	10月25日	接続箱・保護管内のトリチウム除去試験	流量:650cm ³ /min (4h)
	11月2日	接続箱・保護管内のトリチウム除去試験	流量:650cm ³ /min (5h)
	11月13日	接続箱・保護管内のトリチウム除去試験	流量:650cm ³ /min (5h)
	11月14日	接続箱の開放	
	11月15日	クイック・コネクタ取外し 接続箱：閉	
		接続箱トリチウム除去試験	流量:650cm ³ /min (1.5h)

Table 4-1(b) 試験体の取出試験までのスイープ配管トリチウム除去特性試験の経緯

	月 日	試 験 内 容	試 験 条 件
ト リ チ ウ ム 除 去 試 験	8月11日	スイープガス配管のトリチウム除去試験	流量:200cm ³ /min(5h)
	8月17日	スイープガス配管のトリチウム除去試験	流量:200cm ³ /min(5h)
	8月21日	スイープ配管のトリチウム除去試験	流量:200cm ³ /min(5h)
	9月4日	スイープガス配管のトリチウム除去試験	流量:200cm ³ /min(5h)
	9月5日	スイープガス配管のトリチウム除去試験	流量:200cm ³ /min(5h)
	9月19日	スイープガス配管のトリチウム除去試験	流量:200cm ³ /min(5.3h)
	10月3日	スイープガス配管のトリチウム除去試験 (スイープガス配管の濃度評価開始)	流量:200cm ³ /min(5h)
	10月4日	スイープガス配管トリチウム濃度測定	
	10月5日	スイープガス配管トリチウム濃度測定 (スイープガス配管の濃度評価終了)	
	10月25日	スイープガス配管のトリチウム除去試験	流量:200cm ³ /min(4h)
取 出 試 験	10月27日	スイープガス配管トリチウム濃度測定	
	11月2日	スイープガス配管のトリチウム除去試験	流量:200cm ³ /min(5h)
	11月13日	スイープガス配管のトリチウム除去試験	流量:200cm ³ /min(5h)
	11月14日	接続箱の開放 スイープガス配管のトリチウム除去試験	流量:900cm ³ /min(1h)
	11月15日	クイック・コネクタ取りし 接続箱:閉	
		スイープガス配管のトリチウム除去試験	流量:200cm ³ /min(1.5h)

Table 4-2 スイープガス配管仕様

項 目	条 件
圧 力	約 0.085Mpa(約 640Torr)
温 度	案内管部(Fig. 2-3 参照) 20°C
	保護管部(Fig. 2-3 参照) 50°C
流 量	50～950cm ³ /min (平均: 200cm ³ /min)
寸 法	^{OD} 3.2 × ^t 0.7mm
材 質	SUS316 (CRP 处理したステンレス鋼製シームレス管)

Table 4-3 排出管、案内管及び保護管に溶解するトリチウムの評価結果

	排出管 (保護管内)	排出管 (案内管内)	保護管	案内管
K_0 (mol T ₂ /cm ³)			1.97×10^{-7}	
ΔH_s (kJ/mol)			10.2	
R (J/mol/k)			8.314	
内蔵する He ガス中の T 濃度 (Bq/cm ³)	2.0×10^4	2.0×10^4	1.0×10^2	1.0×10^2
分圧 (Pa)	2.08×10^{-7}	2.08×10^{-7}	1.04×10^{-9}	1.04×10^{-9}
使用温度 (°C)	50	20	50	20
配管中に含まれる T 濃度 (Bq/cm ³)	7.2×10^2	4.9×10^2	5.1×10^1	3.5×10^1
ステンレスの体積(cm ³)	34.6	23.1	1059.8	500.4
ステンレスに含まれる全 T 量 (Bq)	2.5×10^4	1.1×10^4	5.4×10^4	1.8×10^4

Table 5-1 スイープガス配管内の容積測定検証試験における容積測定の結果

閉止栓模擬バルブを用いた場合							
閉止栓の状態	測定方法	AV101～AV102 容積① (cm ³)	AV102～ AV201 容積② (cm ³)	容積の和③ (①+②) (cm ³)	AV101～ AV201 全容積④ (cm ³)	平均値 (cm ³)	容積の差 ΔV (③-④) (cm ³)
開	全容積	—	—	—	90.3	89.9	0.4
		—	—	—	90.1		
		—	—	—	90.0		
		—	—	—	89.4		
		—	—	—	89.8		
		—	—	—	89.8		
閉	各容積	38.2	51.3	89.5	—	89.5	0.3
		38.1	51.3	89.4	—		
		38.2	51.3	89.5	—		
		38.2	51.2	89.4	—		
		38.3	51.2	89.5	—		
		38.4	51.5	89.9	—		
閉	全容積	—	—	—	74.2	74.2	0.3
		—	—	—	74.0		
		—	—	—	74.3		
		—	—	—	74.2		
		38.2	35.7	73.9	—		
		38.3	35.6	73.9	—		
		38.2	35.7	73.9	—		
		38.4	35.6	74.0	—		

Table 5-2 炉外での溶封操作モックアップ試験における配管ライン容積測定の結果

閉止栓模擬バルブを用いた場合								
閉止栓の状態	測定方法	AV101～AV102 容積① (cm ³)	AV102～AV201 容積② (cm ³)	容積の和 ③ (①+②) (cm ³)	AV101～AV201 全容積④ (cm ³)	容積の差 ΔV (③-④) (cm ³)	配管部容積 (cm ³)	
開	全容積	—	—	—	89.7	0.1	15.6	
	各容積	38.3	51.3	89.6	—			
閉	全容積	—	—	—	74.2	0.2		
	各容積	38.3	35.7	74.0	—			

閉止栓を用いた場合								
閉止栓の状態	測定方法	AV101～AV102 容積① (cm ³)	AV102～AV201 容積② (cm ³)	容積の和 ③ (①+②) (cm ³)	AV101～AV201 全容積④ (cm ³)	容積の差 ΔV (③-④) (cm ³)	配管部容積 (cm ³)	
開	全容積	—	—	—	93.0	0.5	18.9	
	各容積	38.3	54.2	92.5	—			
閉	全容積	—	—	—	73.9	0.1		
	各容積	38.2	35.6	73.8	—			

* : 閉止栓として模擬バルブを用いた場合と閉止栓に変更した場合では、模擬バルブと閉止栓容積が異なるため、測定値が異なっている。

Table 5-3 スイープガス装置を用いた配管ライン容積測定の結果

閉止栓の状態	測定方法	AV101～AV102 容積① (cm ³)	AV102～AV201 容積② (cm ³)	容積の和 ③ (①+②) (cm ³)	AV101～AV201 全容積④ (cm ³)	平均値 (cm ³)	容積の差 ΔV (③-④) (cm ³)	
開	全容積	—	—	—	689.7	689.7	1.6	
	各容積	211.4	478.3	689.7	—	688.1		
		211.6	479.9	691.5	—			
		212.3	476.4	688.7	—			
		211.5	470.8	682.3	—			

Table 6-1 照射試験体の取出試験時における実施体制

項目	必要人員
(1) 照射試験体取出準備作業及び接続箱保護管内トリチウム除去特性試験(平成 18 年 11 月 13 日)	
指揮	1名
炉上作業	3名
炉周り (汚染区域)	1名
スイープガス装置運転	1名
データ監視	1名
放射線管理	2名
現場記録	1名
(2) 接続箱「開」、ヒーター線接続作業及び閉止栓閉止、閉止栓閉止後のトリチウム除去特性試験 (平成 18 年 11 月 14 日)	
指揮	1名
炉上作業	3名
炉周り (汚染区域)	2名
スイープガス装置運転	1名
データ監視	1名
閉止栓閉止作業	2名
閉止栓導通確認	1名
放射線管理	3名
現場記録・連絡	1名
(3) J M T R 炉心からの照射試験体取出試験及びバイパス管取付後のトリチウム除去特性試験 (平成 18 年 11 月 15 日)	
指揮	1名
炉上作業	3名
炉周り (汚染区域)	2名
スイープガス装置運転	1名
データ監視	1名
放射線管理	3名
現場記録・連絡	4名

Table 6-2 接続箱・保護管等内のトリチウム除去試験結果（平成 18 年 11 月 13 日）

時系列	項目	実施内容	主計器の指示値
9:30～ 10:40	スイープガス 装置起動	スイープガス装置の酸化反応器、電解セル等を起動し、トリチウム除去特性試験が出来る状態にした。	酸化反応器温度： 200°C 電解セル温度：500°C
10:40～ 10:45	回収系起動	回収系使用バルブを「開」、移送ポンプを ON とし、真空引き（通ガス）が可能な状態とした。	
10:47～ 16:15	接続箱・保護管内 ガススープ	純 He ガスを 700cm ³ /min 導入し、接続箱・保護管内のガススープ開始。	
11:15～ 16:15	スイープガス配 管ガススープ	He + 1000ppmH ₂ ガスを 200cm ³ /min 導入してガススープ開始。	
接続箱・保護管内及びガススープラインを同時進行でのガススープ（トリチウム除去） を実施。			
16:16～ 16:50	接続箱・保護管内 トリチウム濃度 測定準備	トリチウム濃度測定のため、接続箱内に He ガスを 0.2 MPa に加圧した。また、濃度測定用回収系トリチウムモニタ部を 300Torr まで減圧（真空引き）し、接続箱内 He ガスを引込むための準備を行った。	
16:52～ 17:09	接続箱・保護管内 トリチウム濃度 測定	トリチウム濃度測定用の手動バルブを徐々に「開」として、回収系トリチウムモニタに He ガスを取り込み、回収系圧力計の指示値で 600Torr、900Torr、1330Torr における回収系トリチウムモニタ指示値を測定した。 圧力補正を行い、接続箱内のトリチウム濃度を算出した。	600Torr での指示値 <u>0.821 Bq/cm³</u> 900Torr での指示値 <u>1.41 Bq/cm³</u> 1330Torr での指示値 <u>2.43 Bq/cm³</u> 接続箱内トリチウム 濃度 <u>4.25 Bq/cm³</u>
17:09～ 17:41	回収系トリチウム 除去 (除去循環運転)	回収系トリチウムモニタ指示値が高く、排気作業が出来ないため、回収系の循環運転を実施した。循環運転は、トリチウム濃度が 1Bq/cm ³ になるまで 32 分間運転を継続した。1Bq/cm ³ 以下確認後、回収系を約 600Torr まで降圧（排気）した。	
17:42～ 18:13	接続箱降圧	翌日（11 月 14 日）、接続箱を開放するため、接続箱内圧力を大気圧（0MPa）まで降圧した。	
18:16～	スイープガス 装置停止	酸化反応器・電解セル等の停止、装置電源 OFF	

Table 6-3 閉止栓の溶封操作結果（平成 18 年 11 月 14 日）

時系列	実施内容	主計器の指示値
(1)供給管、排気管下側閉止栓閉止操作		
11:00～ 13:16	キャプセル電磁弁（入口弁 AV001、出口弁 AV002、バイパス弁 AV003）「開」とし、キャプセル内圧力を供給系入口圧力計 PICRA102 で約 760Torr に調整し、封じ込めを実施。（He + 1000ppmH ₂ ガス使用）	PICRA102 指示値 ： <u>749.6 Torr</u>
13:17～ 14:13	閉止栓閉止回路のスライダック (A), (B) を調整し、供給管及び排気管下側の溶封栓ヒータを昇温し、200±5°C で安定させる。	200°C 時 供給管溶封栓 ヒータ電流 : <u>0.9 A</u>
	供給管及び排気管下側の閉止栓温度を 200±5°C で 15 分間保持する。	排気管下側溶封栓 ヒータ電流 : <u>0.9 A</u>
	閉止栓閉止回路のスライダック (A), (B) を調整し、供給管及び排気管下側の溶封栓ヒータを昇温し、300±5°C で安定させる。	300°C 時 供給管溶封栓 ヒータ電流 : <u>1.2 A</u>
	供給管及び排気管下側の閉止栓温度を 300±5°C で 10 分間保持する。	排気管下側溶封栓 ヒータ電流 : <u>1.2 A</u>
	供給系入口圧力計 PICRA102 で約 1500Torr まで昇圧し、5 分間保持する。	PICRA102 指示値 ： <u>1475 Torr</u>
閉止栓閉止回路のスライダック (A), (B) の出力を 0V とし、閉止栓を常温まで自然冷却する。（閉止作業終了）		
(2)供給管、排気管下側閉止栓閉止確認		
14:13～ 14:27	基準容積タンク止め弁 V107 を「開」とし、AV101 から AV201 の圧力を供給系入口圧力計 PICRA102 で約 2100Torr に調整し、封じ込める。圧力安定後、PICRA102 の指示値(P1)を記録し、V107 を「閉」とする。	溶封開始前容積 ： <u>696.0cm³</u> 基準容積タンクから V107 までの容積 ： <u>90.6cm³</u> P1 : <u>2097.4 Torr</u>
	AV201 を「開」とし、供給系入口圧力計 PICRA102 の指示値を 300Torr まで真空引を行う。到達後、AV201 を「閉」。圧力安定後、PICRA102 の指示値(P2)を記録し、V107 を「開」とする。	P2 : <u>329.6 Torr</u>
	圧力安定後、PICRA102 の指示値(P3)を記録し、AV101 から AV201 までの容積（閉止後の容積）計算する。	P3 : <u>542.0 Torr</u>
	閉止栓閉止前の容積（696.0cm ³ ）と比較し、閉止後の容積が約 37cc（キャプセル内実容積）減少していることを確認する。	容積減少計算結果 ： <u>32.6cm³</u>
(3)供給管、排気管下側閉止栓閉止漏洩検査		
14:27～ 15:20	AV101 を開閉し、供給系入口圧力計 PICRA102 の指示値を約 2100Torr に加圧する。	PICRA102 指示値 ： <u>1955.6 Torr</u>
	AV102 を「閉」とし、キャプセル入口圧力計 PI103 の指示値が低下しないことを 30 分間確認する。	14:50～15:20 漏洩無し確認
(4)排気管上側閉止栓閉止操作		
14:53～ 16:21	AV102、AV201 を「開」とし、キャプセル内圧力を供給系入口圧力計 PICRA102 で約 760Torr に調整し、封じ込める。（He + 1000ppmH ₂ ガス使用）	PICRA102 指示値 ： <u>750.0 Torr</u>

時系列	実施内容	主計器の指示値
14:53～ 16:21	閉止栓電源ラインの繋ぎ換えを行う。	
	閉止栓閉止回路のスライダック (A) を調整し排気管上側の溶封栓ヒータを昇温し、200±5°Cで安定させる。	200°C時 排気管上側閉止栓 ヒータ電流 : <u>0.9 A</u>
	排気管上側の閉止栓温度を 200±5°Cで 15 分間保持する。	
	閉止栓閉止回路のスライダック (A), (B) を調整し、供給管及び排気管下側の溶封栓ヒータを昇温し、300±5°Cで安定させる。	300°C時 排気管上側閉止栓 ヒータ電流 : <u>1.2 A</u>
	排気管下側の溶封栓温度を 300±5°Cで 10 分間保持する。	
	供給系入口圧力計 PICRA102 で約 1500Torr まで昇圧し、5 分間保持する。	PICRA102 指示値 : <u>1530 Torr</u>
	閉止栓閉止回路のスライダック (A) の出力を 0V とし、閉止栓を常温まで自然冷却する。(溶封作業終了)	

(5) 排気管上側閉止栓閉止確認

14:13～ 14:27	基準容積タンク止め弁 V107 を「開」とし、AV101 から AV201 の圧力を供給系入口圧力計 PICRA102 で約 2100Torr に調整し、封じ込める。圧力安定後、PICRA102 の指示値(P1)を記録し、V107 を「閉」とする。	閉止開始前容積 : <u>663.4cm³</u> 基準容積タンクから V107 までの容積 : <u>90.6cm³</u> P1 : <u>2058.4 Torr</u>
	AV201 を「開」とし、供給系入口圧力計 PICRA102 の指示値を 300Torr まで真空引を行う。到達後、AV201 を「閉」。圧力安定後、PICRA102 の指示値(P2)を記録し、V107 を「開」とする。	P2 : <u>322.3 Torr</u>
	圧力安定後、PICRA102 の指示値(P3)を記録し、AV101 から AV201 までの容積（閉止後の容積）計算する。	P3 : <u>532.2 Torr</u>
	閉止栓閉止前の容積 (663.4cm³) と比較し、閉止後の容積が減少していることを確認する。	容積減少計算結果 <u>4.7cm³減少</u>

※：単位は制御盤計器の指示値とした。

Table 6-4 閉止栓の溶封操作終了後のトリチウム除去試験結果（平成 18 年 11 月 14 日）

時系列	項目	実施内容	主計器の指示値
スイープ管閉止栓閉止作業終了			
16:21～ 17:23	スイープガスライナガススイープ	He + 1000ppmH ₂ ガスを 900cm ³ /min 供給し、キャプセル入口、出口、バイパス弁を「開」状態にて、ガススイープ開始。	
	スイープガスライントリチウム濃度測定準備	溶封後のスイープガスライントリチウム濃度測定のため、溶封栓上部に水素添加ガス (He + 1000ppmH ₂) を加圧 (供給系入口圧力計 PICRA102) に加圧した。また、濃度測定のため、回収系酸化反応器 2 基をバイパスするとともに、濃度測定用回収系トリチウムモニタ部を約 300Torr まで減圧(真空引き)し、接続箱内 He ガスを引込むための準備を行った。	濃度測定用回収系トリチウムモニタ部圧力 : <u>435 Torr</u>
17:24～ 18:01	スイープガスライントリチウム濃度測定	トリチウム濃度測定用の手動バルブ V217 を徐々に「開」として、回収系トリチウムモニタに He ガスを取り込み、供給系圧力計 PICRA102 の圧力を徐々低下させ、回収系トリチウムモニタ指示値を測定した。 圧力補正を行い、接続箱内のトリチウム濃度を算出した。	1878Torr での指示値 : <u>0.252 Bq/cm³</u> 1719Torr での指示値 : <u>0.343 Bq/cm³</u> 1492Torr での指示値 : <u>0.455 Bq/cm³</u> スイープガス配管トリチウム濃度 <u>8.480 Bq/cm³</u>
	回収系・スイープライン降圧	酸化反応器 2 基のバイパスを解除。回収系が 1Bq/cm ³ 以下であるため、回収系循環運転は行わず、約 600Torr までスイープラインを降圧(排気)した。	
18:01～	スイープガス装置停止	回収系停止、酸化反応器停止、装置電源 OFF	

Table 6-5 閉止栓の溶封操作前後におけるスイープガス配管の容積測定の結果

(1) 閉止栓の溶封操作前

測定時刻	出口温度 (°C)	操作温度 (°C)	既設圧力計 PICRA102 (Torr)	設置圧力計 (横河電機製デジタルマノメーター) Type2654		容積 (cm ³)
				圧力計指示値 (kPa)	圧力計指示 変換値 (Torr)	
真空排気後 (*印 : 容積計算に使用した圧力)						
				322.3 *	166.9	2011.9 *
				516.9 *	-32.2	518.5
						695.98

(2) 給気側及び排気側（下部）の閉止栓の溶封操作後及び漏洩検査結果

測定時刻	出口温度 (°C)	操作温度 (°C)	既設圧力計 PICRA102 (Torr)	設置圧力計 (横河電機製デジタルマノメーター) Type2654		容積 (cm ³)
				圧力計指示値 (kPa)	圧力計指示 変換値 (Torr)	
真空排気後 (*印 : 容積計算に使用した圧力)						
14:22				329.6 *	178.3	2097.4 *
14:23				542.0 *	-27.4	554.5
加圧(14:27)・・・漏洩検査前圧力安定待時間						
14:30				1953.3		
14:33	22.4	20.5		1953.1		
14:43				1951.8		
加圧(14:48)・・・漏洩検査 (30分)						
14:50	23.4	20.5		1955.6		
15:00	23.5	20.7		1955.6		
15:10	23.6	20.7		1955.6		
15:20	23.6	20.7		1955.6		

(3) 排気側（上部）の閉止栓の溶封操作後結果

測定時刻	出口温度 (°C)	操作温度 (°C)	既設圧力計 PICRA102 (Torr)	設置圧力計 (横河電機製デジタルマノメーター) Type2654		容積 (cm ³)
				圧力計指示値 (kPa)	圧力計指示 変換値 (Torr)	
真空排気後 (*印 : 容積計算に使用した圧力)						
16:16				322.3 *	173.1	2058.4 *
16:16				532.2 *	-29.1	541.7
						658.72

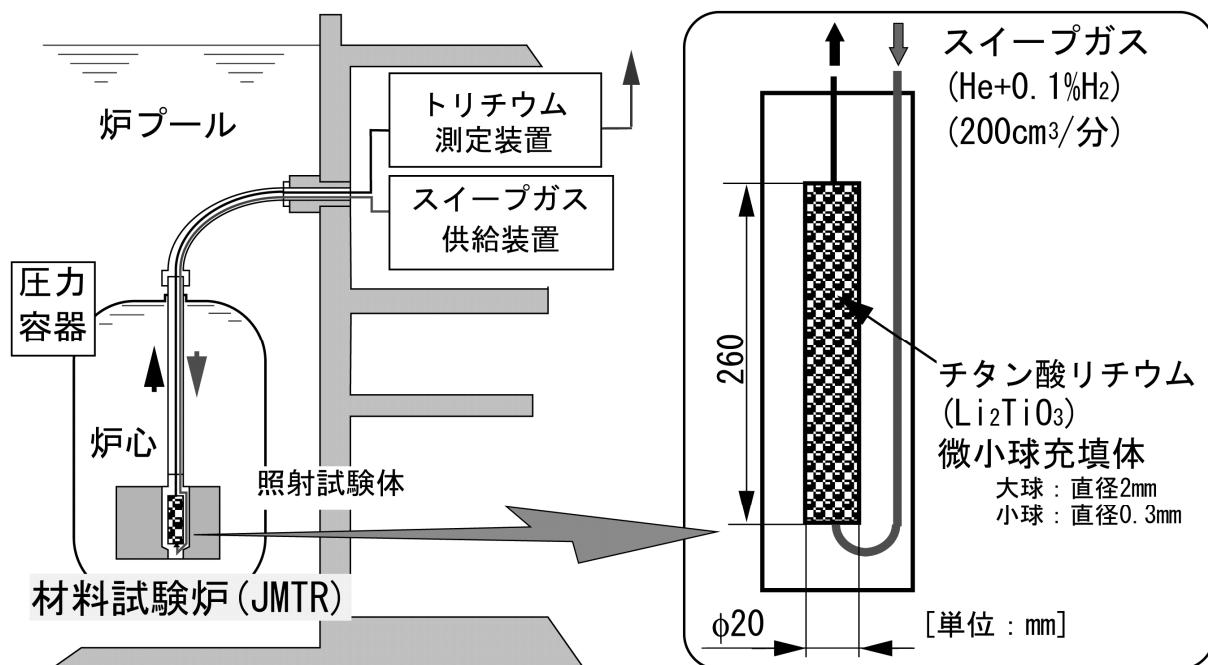


Fig. 2-1 99M-54J キャプセルを用いた照射試験 (ORIENT-II) の概要

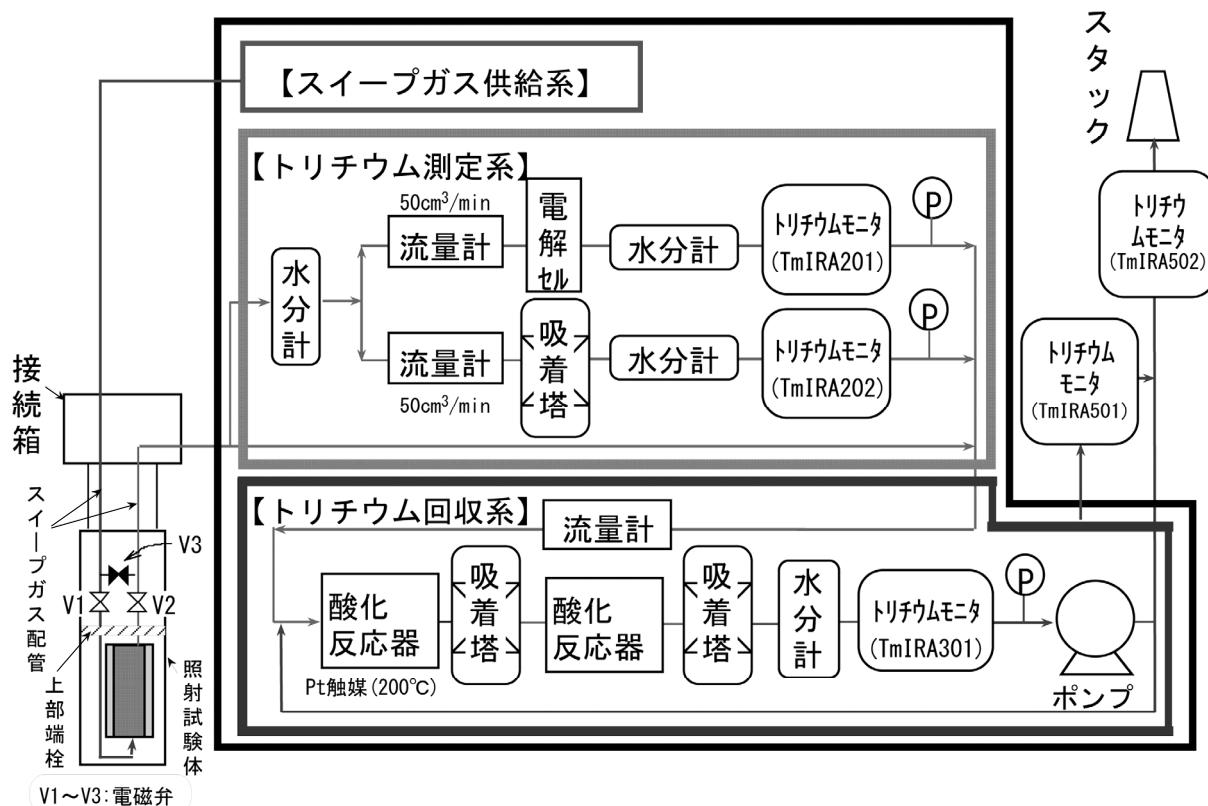


Fig. 2-2 スイープガス装置の概略系統図

年度		平成12年度											
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
JMTR 運転 サイクル									26日		26日		26日
第136サイクル													
年度		平成13年度											
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
JMTR 運転 サイクル		26日	1日				22日	19日		24日		31日	
第139サイクル 第140サイクル 第141サイクル 第142サイクル 第143サイクル 第144サイクル													
年度		平成14年度											
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
JMTR 運転 サイクル			6日		17日				24日				
第145サイクル 第146サイクル 第147サイクル													
年度		平成15年度											
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
JMTR 運転 サイクル				3日			31日	31日		31日		28日	
第148サイクル 第149サイクル 第150サイクル 第151サイクル 第152サイクル													
年度		平成16年度											
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
JMTR 運転 サイクル			30日	29日			30日	29日		30日		30日	
第153サイクル 第154サイクル 第155サイクル 第156サイクル 第157サイクル 第158サイクル													
年度		平成17年度											
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
JMTR 運転 サイクル			29日	31日						31日		32日	
第159サイクル 第160サイクル 第161サイクル 第162サイクル													
年度		平成18年度											
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
JMTR 運転 サイクル		26日	25日	26日									
第163サイクル 第164サイクル 第165サイクル													

Fig. 2-3 99M-54J キャプセルの照射試験実績 (ORIENT-II)

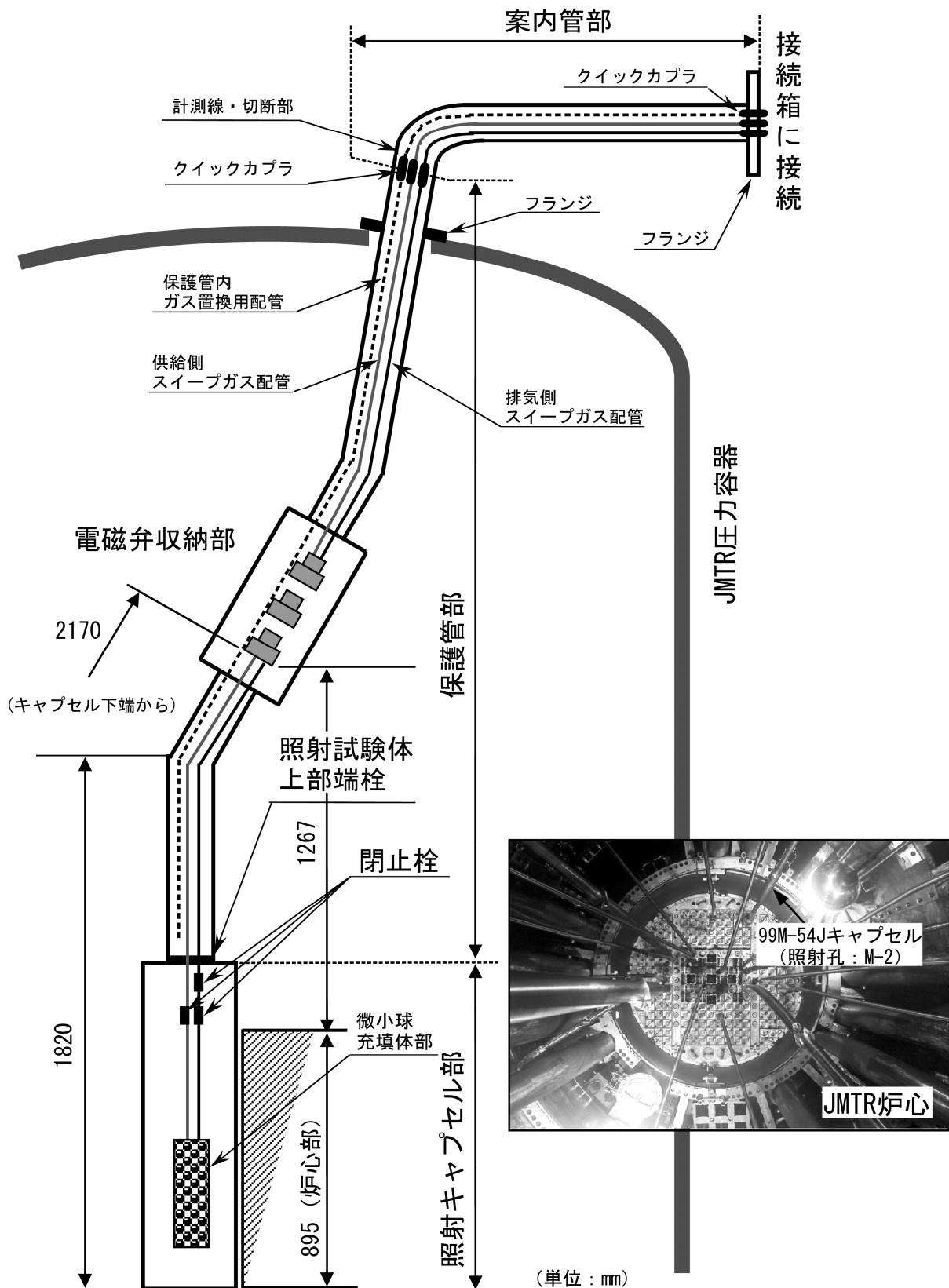


Fig. 2-4 99M-54J キャップセルの JMTR 炉心への装荷状態の概略図

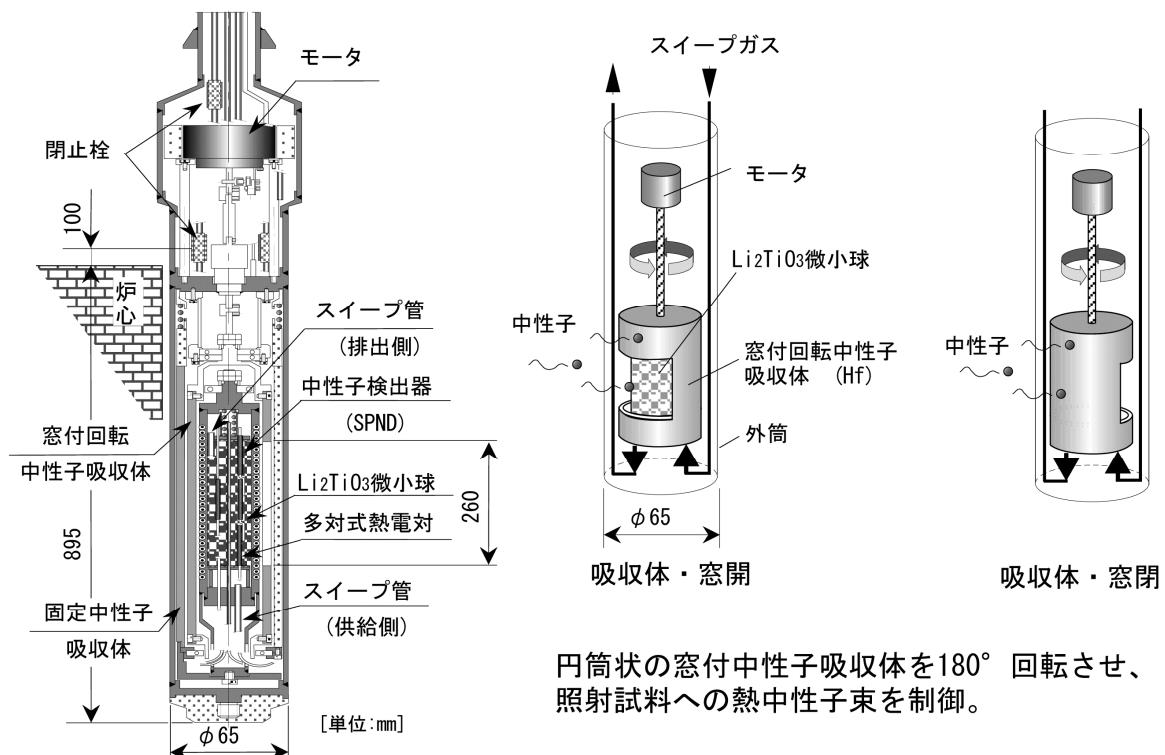


Fig. 2-5 99M-54J キャプセル（中性子パルス運転模擬照射試験体）の概略図

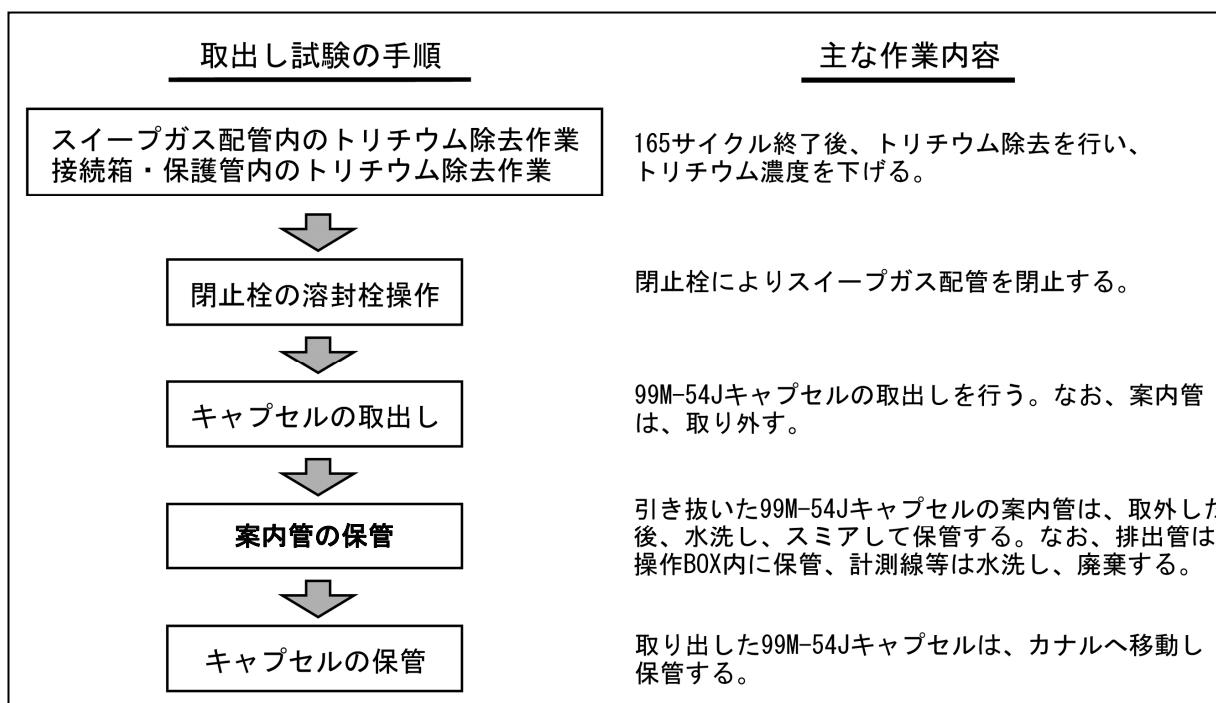


Fig. 3-1 99M-54J キャップセルの取出試験手順の概要と主な作業内容

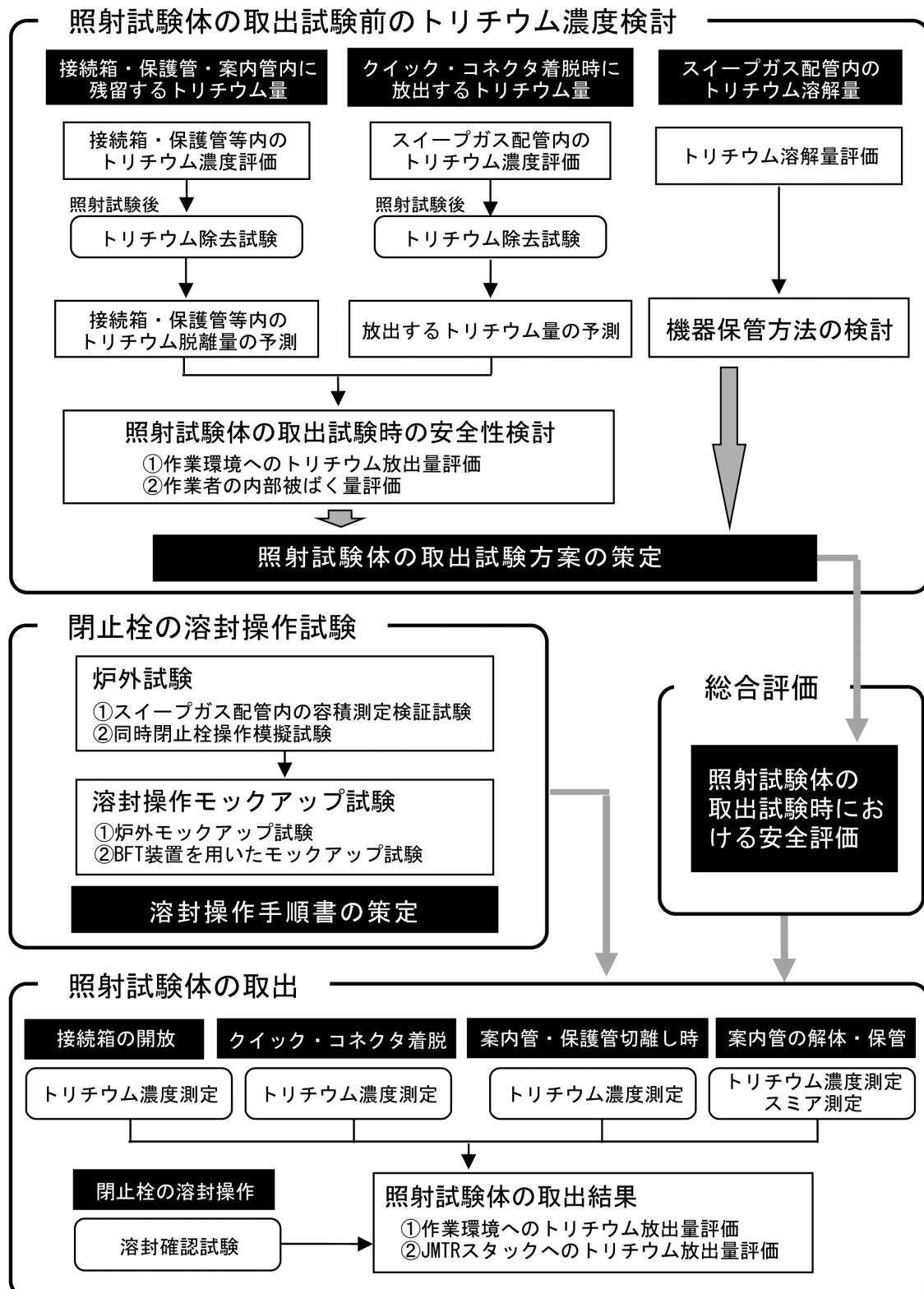
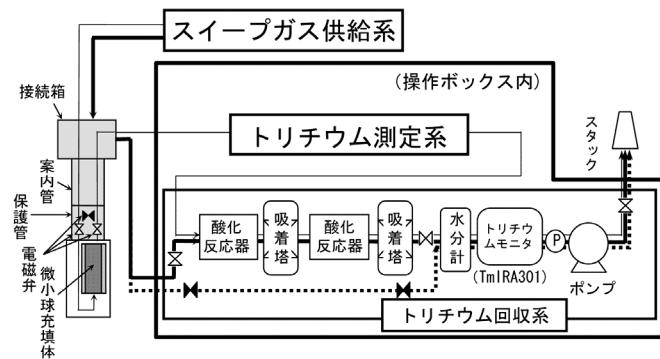
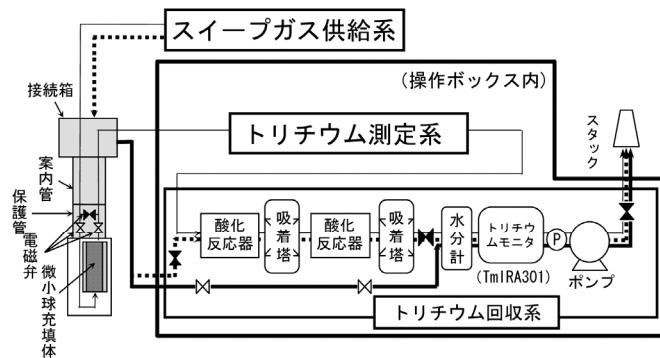


Fig. 3-2 照射試験体の取出試験に関する安全評価等の全体検討計画



(1) 接続箱・保護管等内のトリチウム除去ライン



(2) 接続箱・保護管等内のトリチウム濃度測定ライン

Fig. 4-1 保護管・案内管・接続箱内トリチウム除去試験時のガスフロー

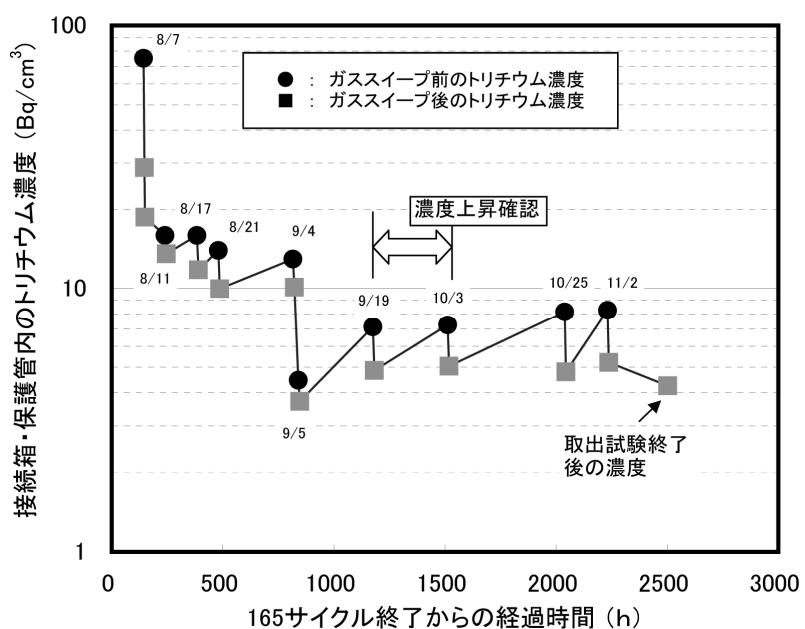


Fig. 4-2 保護管・案内管・接続箱内のトリチウム除去試験結果

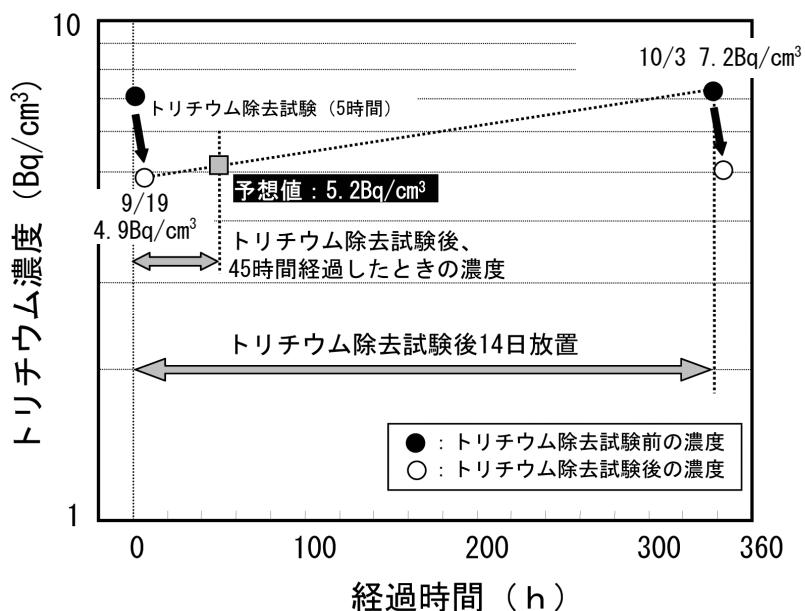


Fig. 4-3 トリチウム除去後の保護管・案内管・接続箱内トリチウム濃度上昇特性

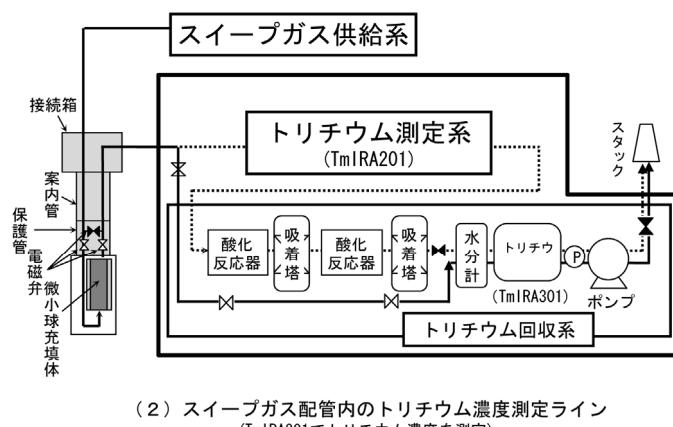
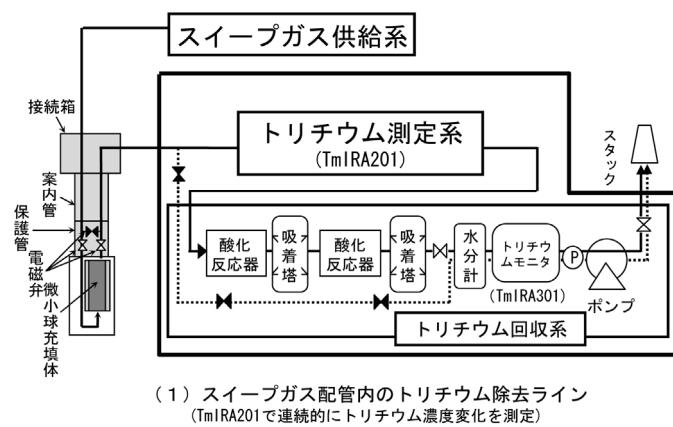


Fig. 4-4 スイープガス配管内トリチウム除去試験時のガスフロー

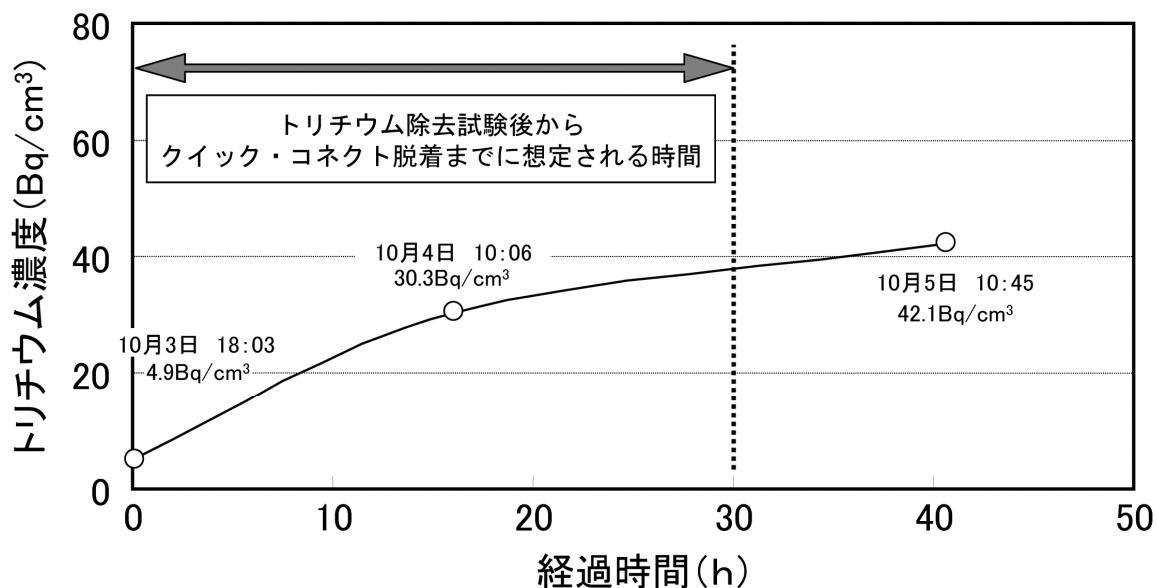


Fig. 4-5 トリチウム除去後のスイープガス配管内トリチウム濃度上昇特性

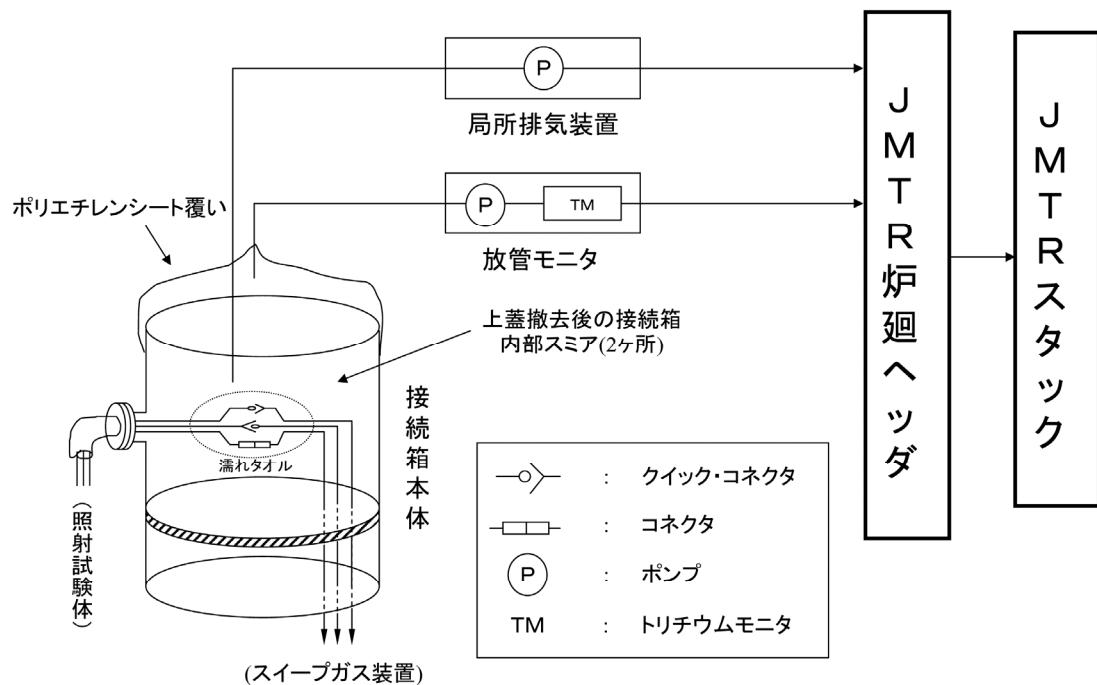


Fig. 4-6 接続箱開放時におけるトリチウム放出防止対策

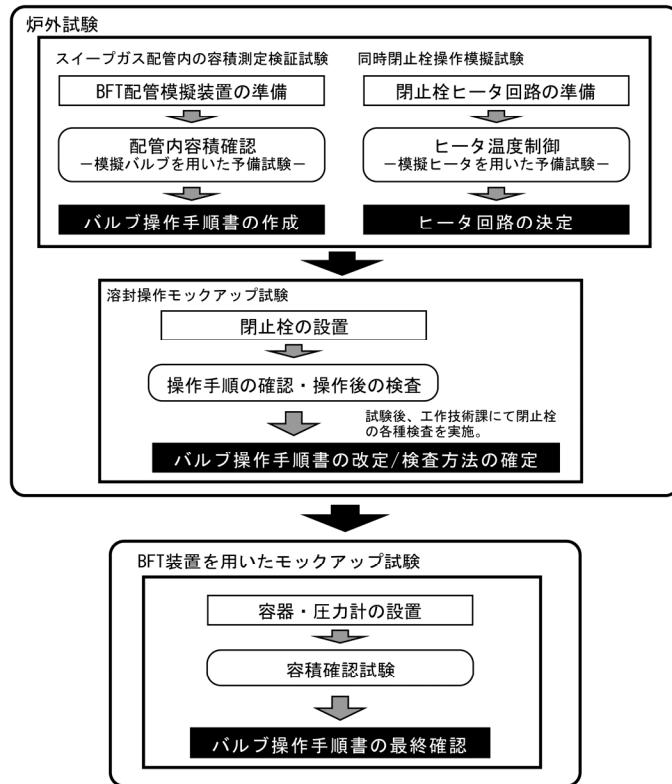


Fig. 5-1 炉外における閉止栓の溶封操作試験の検討手順

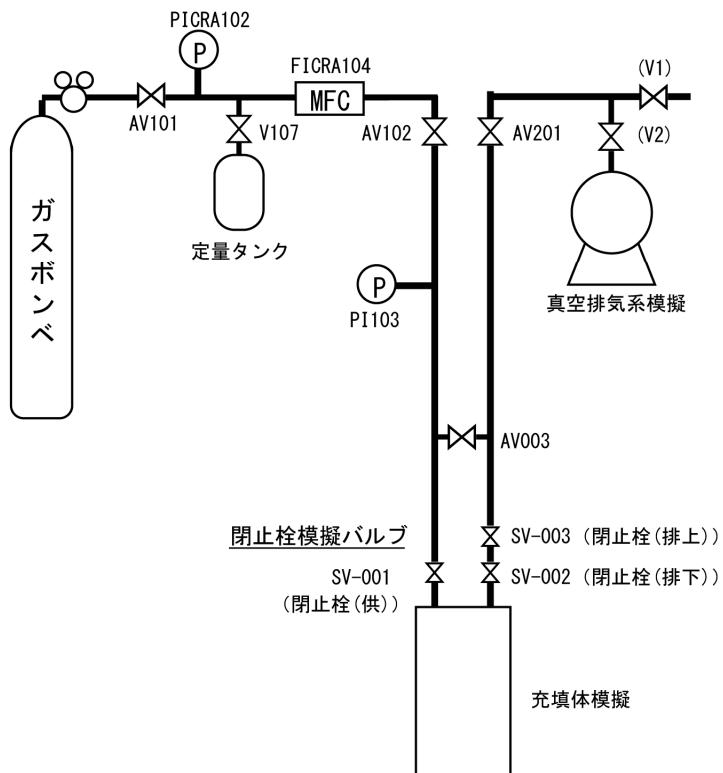


Fig. 5-2 スイープガス装置の配管系統を模擬した試験①の配管系統

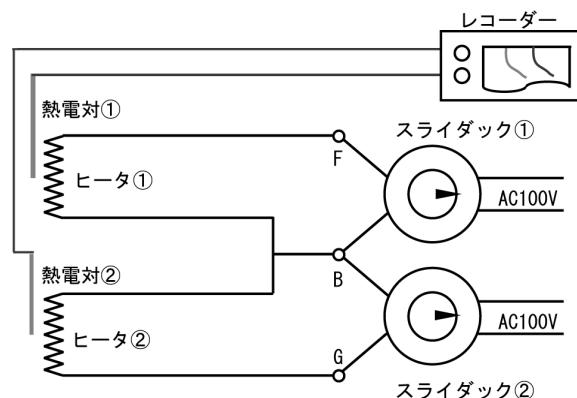


Fig. 5-3 閉止栓加熱用セラミックヒータの配線回路

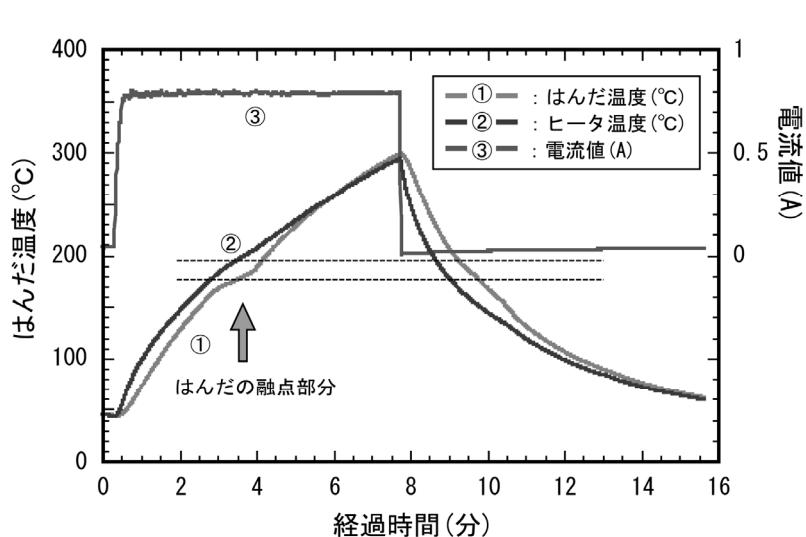
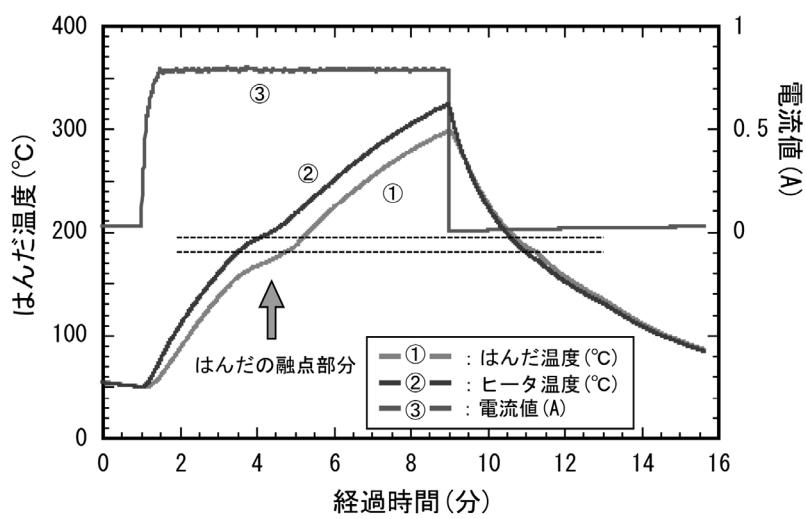
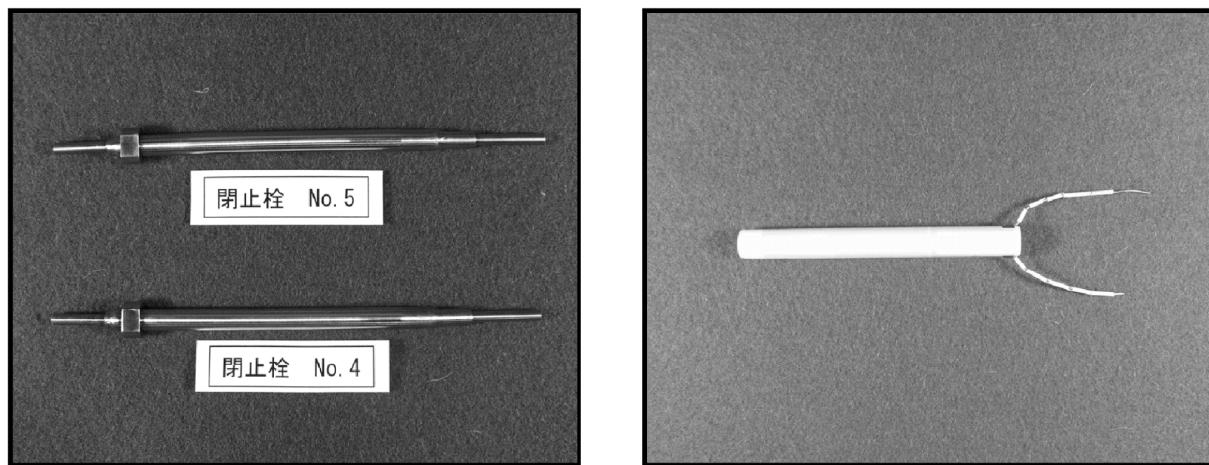


Fig. 5-4 セラミックヒータを用いた昇温試験結果



(1) モックアップ試験用閉止栓

(2) セラミックヒータ

Fig. 5-5 炉外モックアップ試験で用いた閉止栓及びセラミックヒータの外観写真

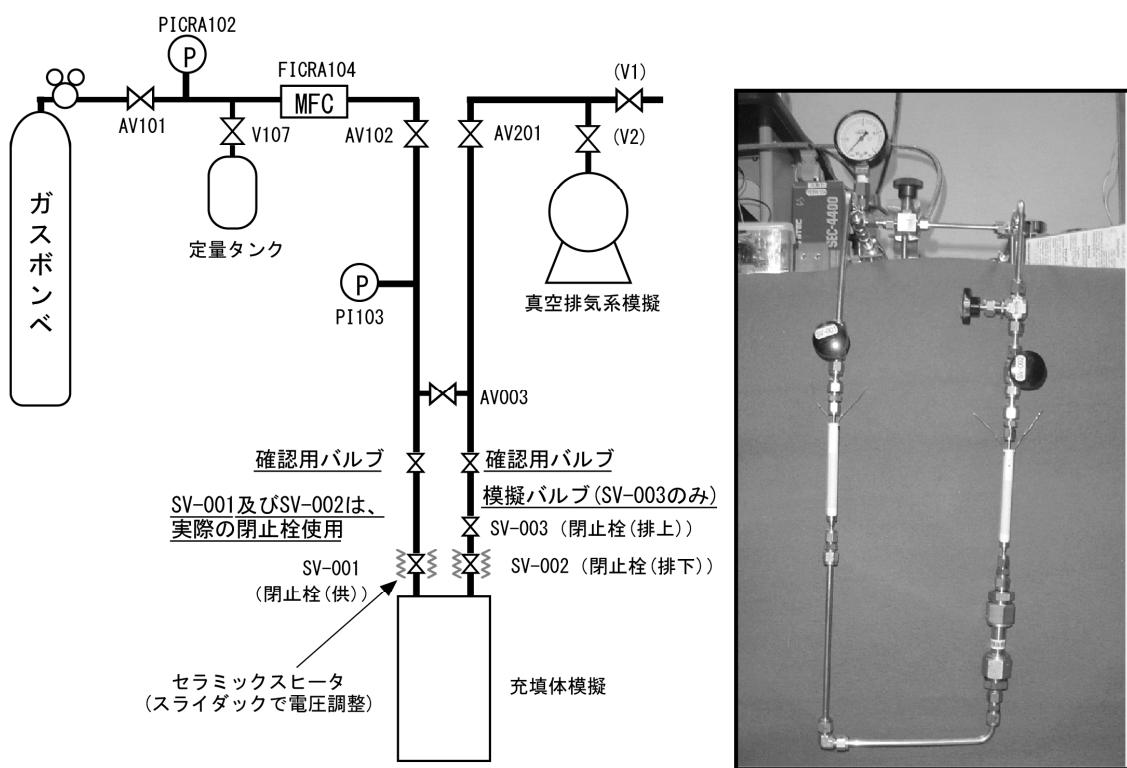
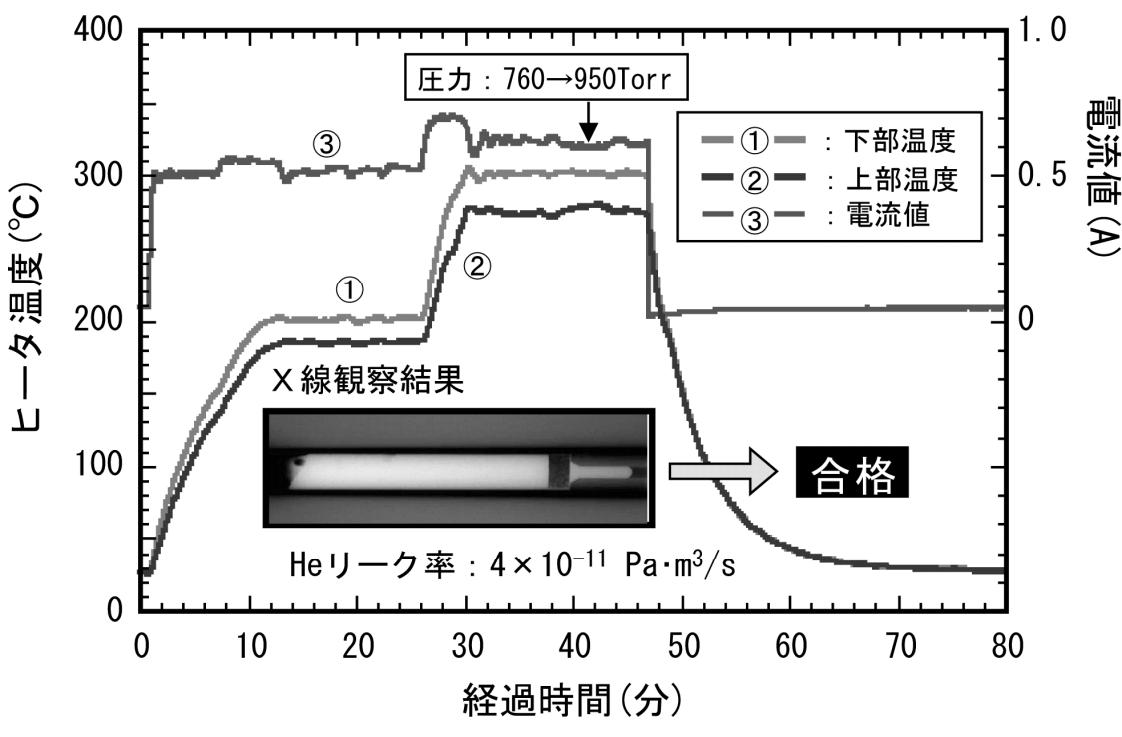
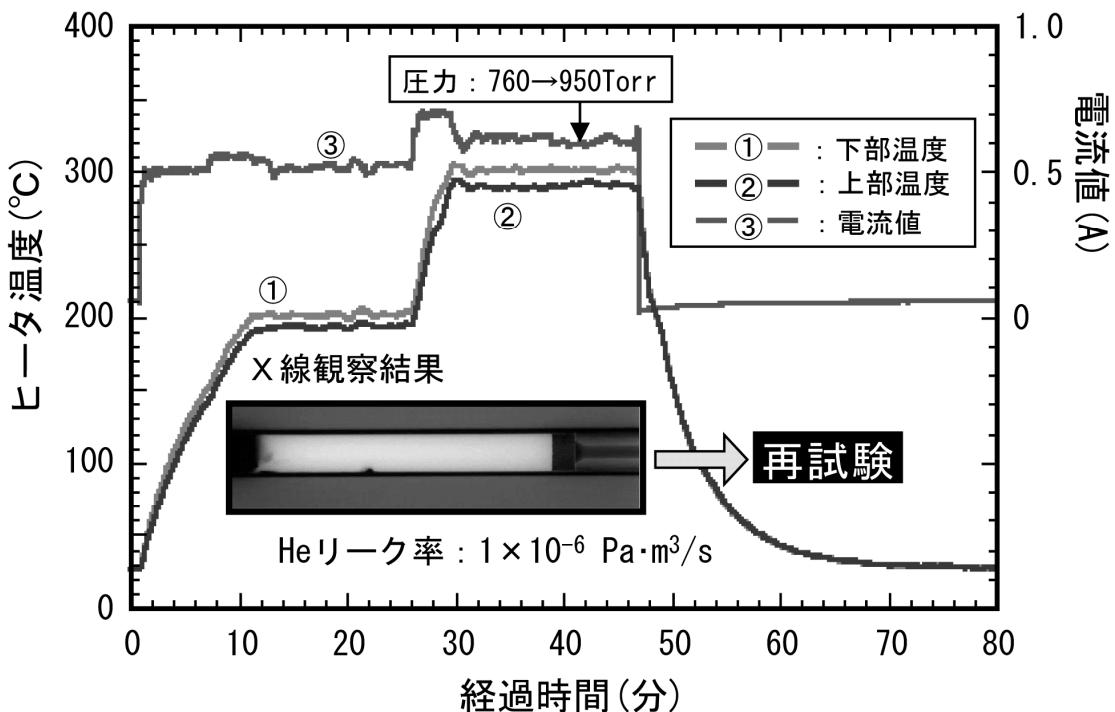


Fig. 5-6 炉外での溶封操作モックアップ試験の概略図

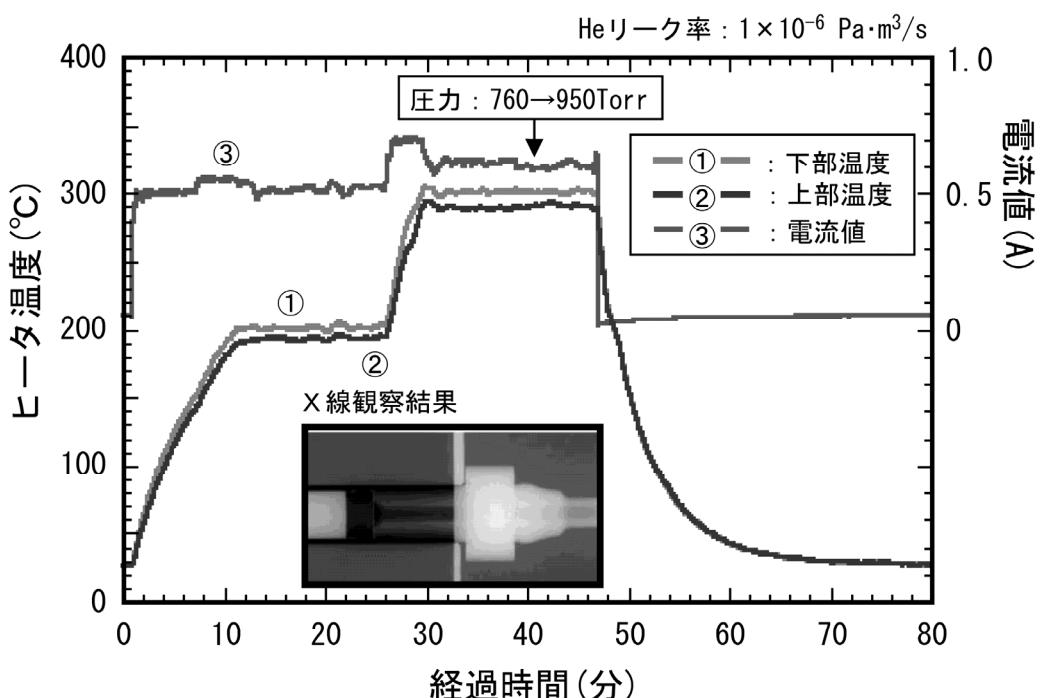


(1) 供給側閉止栓(SV001)の試験結果

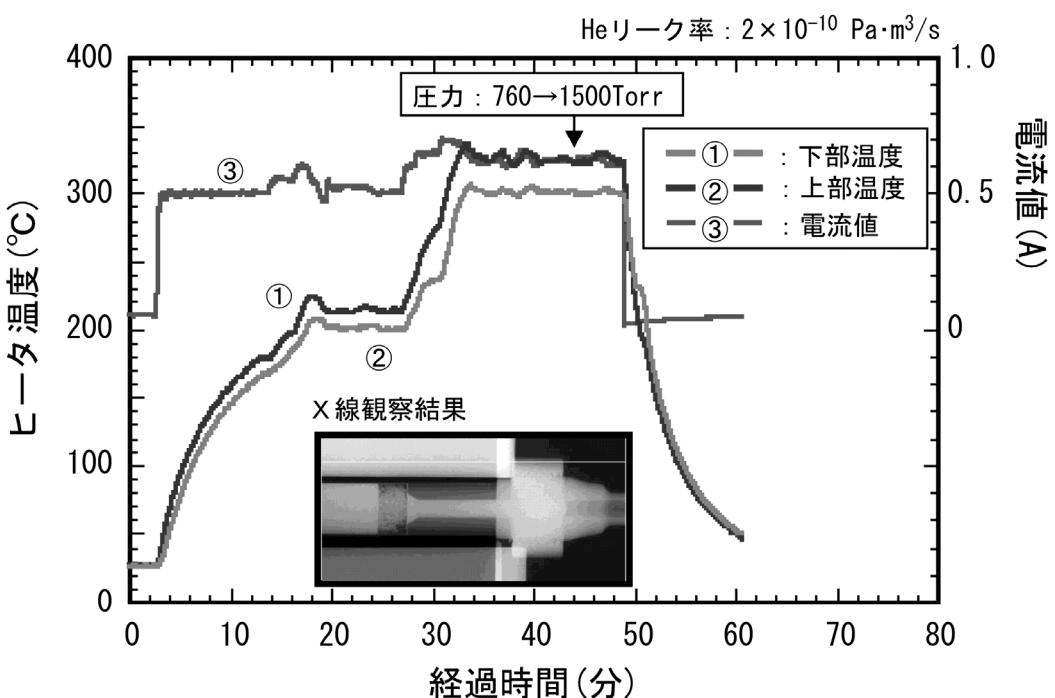


(2) 排気側閉止栓(SV002)の試験結果

Fig. 5-7 炉外での溶封操作モックアップ試験における試験結果



(1) 排気側閉止栓(SV002)の試験結果



(2) 再試験後(圧力: 1500Torr)の排気側閉止栓(SV002)の試験結果

Fig. 5-8 炉外での溶封操作モックアップ試験における閉止栓の再試験結果

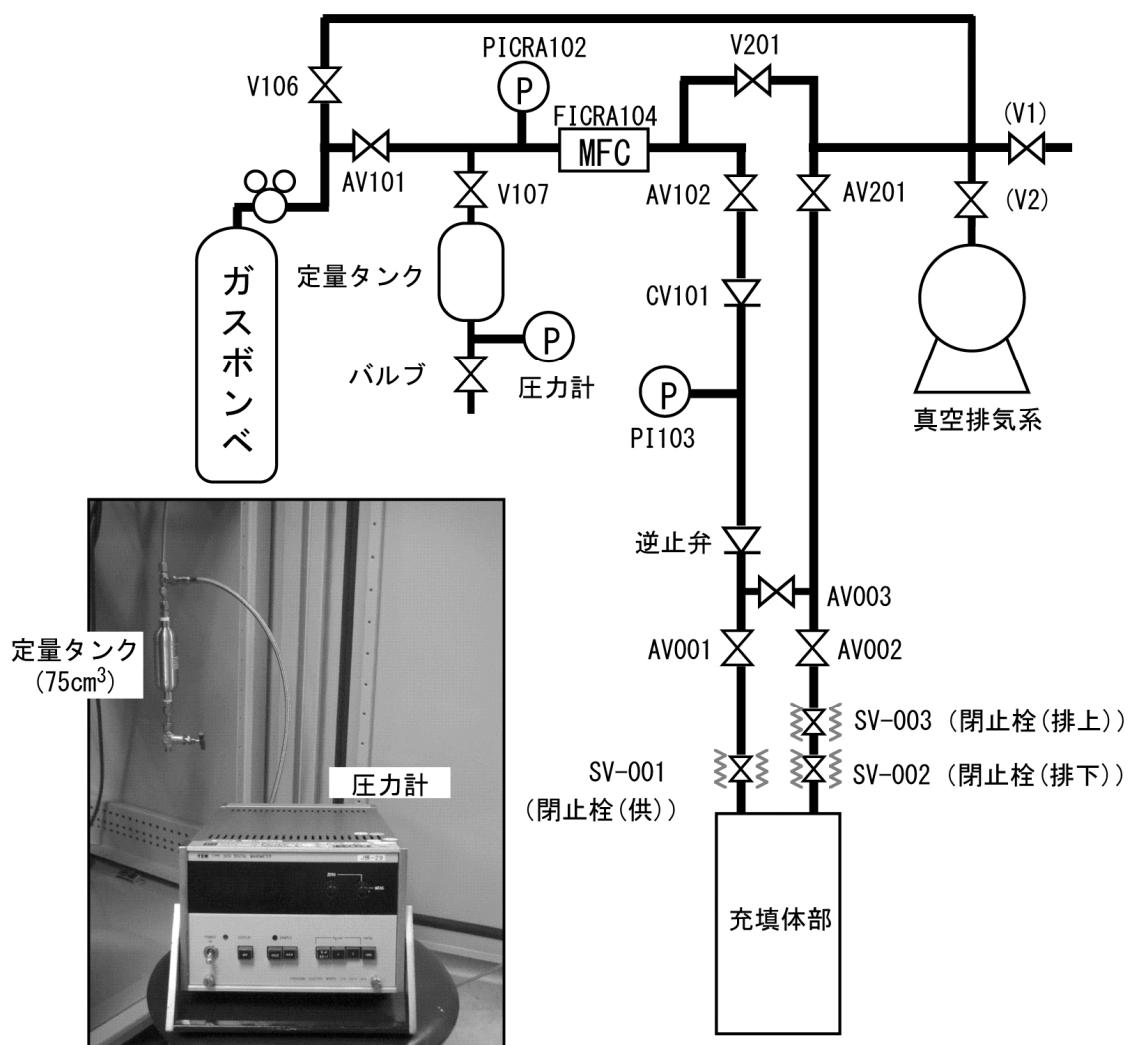
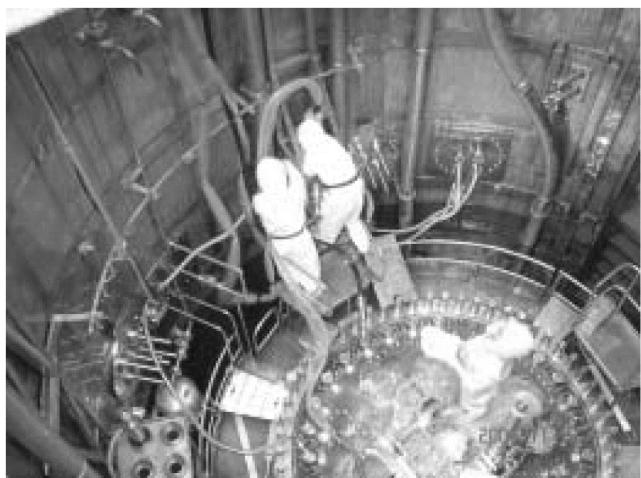


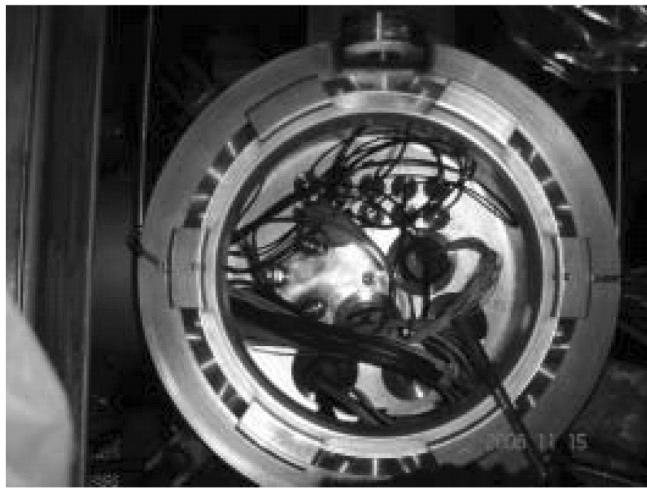
Fig. 5-9 スイープガス装置に設置した試験概略図及び定量タンク・圧力計部の写真



照射試験体の取出試験（1）



照射試験体の取出試験（2）



BFT接続箱内部

Fig. 6-1 照射試験体取出試験時の炉頂作業の様子

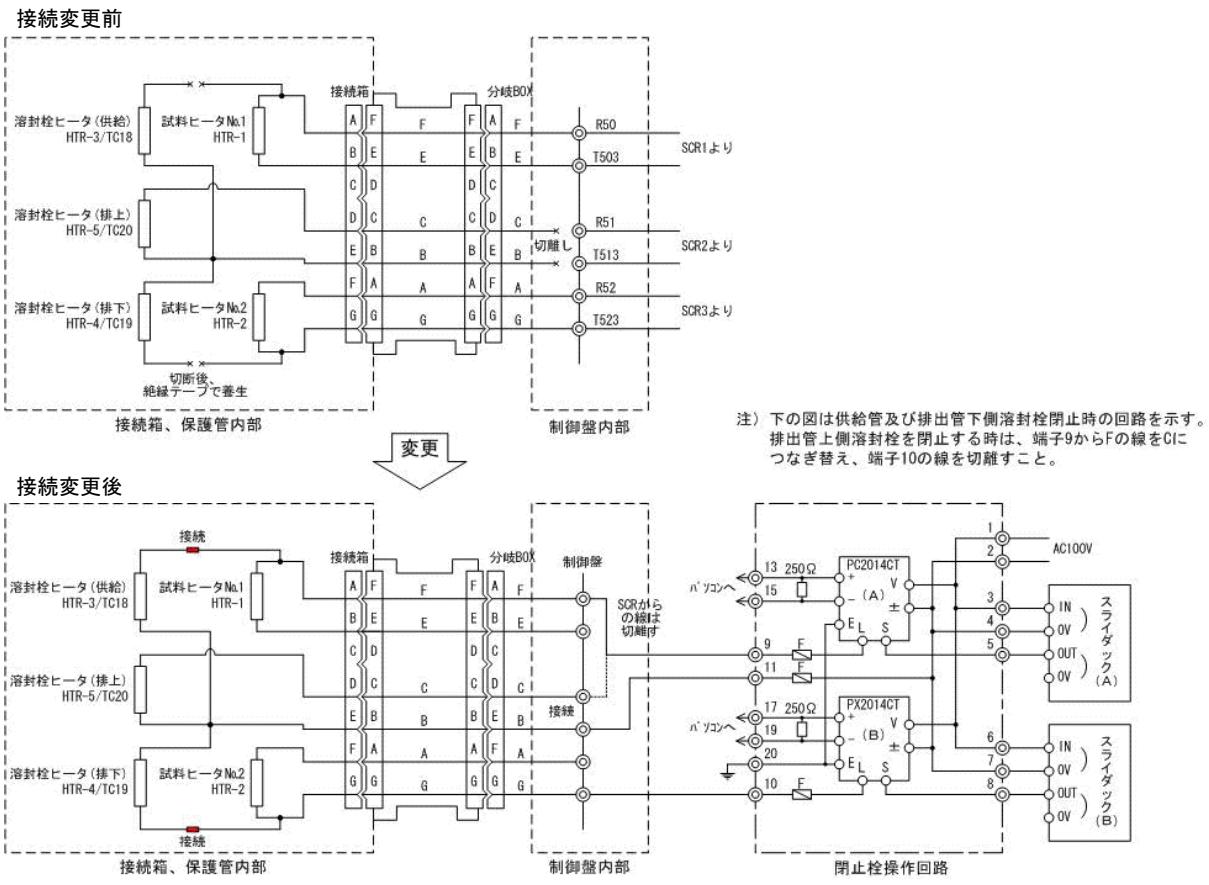
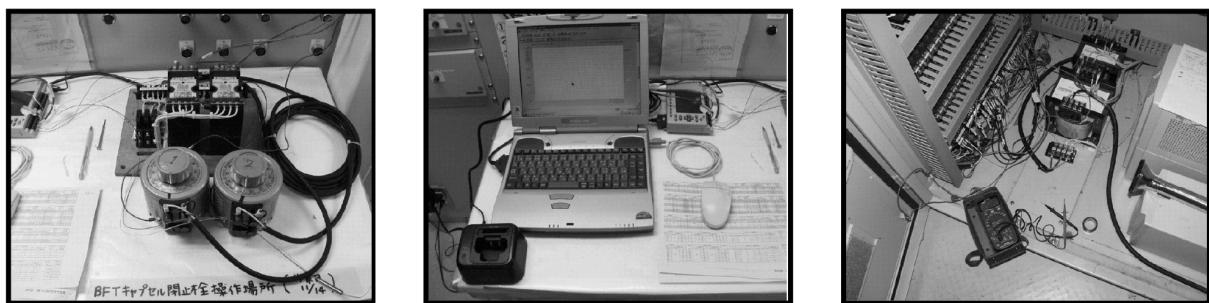


Fig. 6-2 99M-54J キャップセル用閉止栓の溶封操作回路接続図

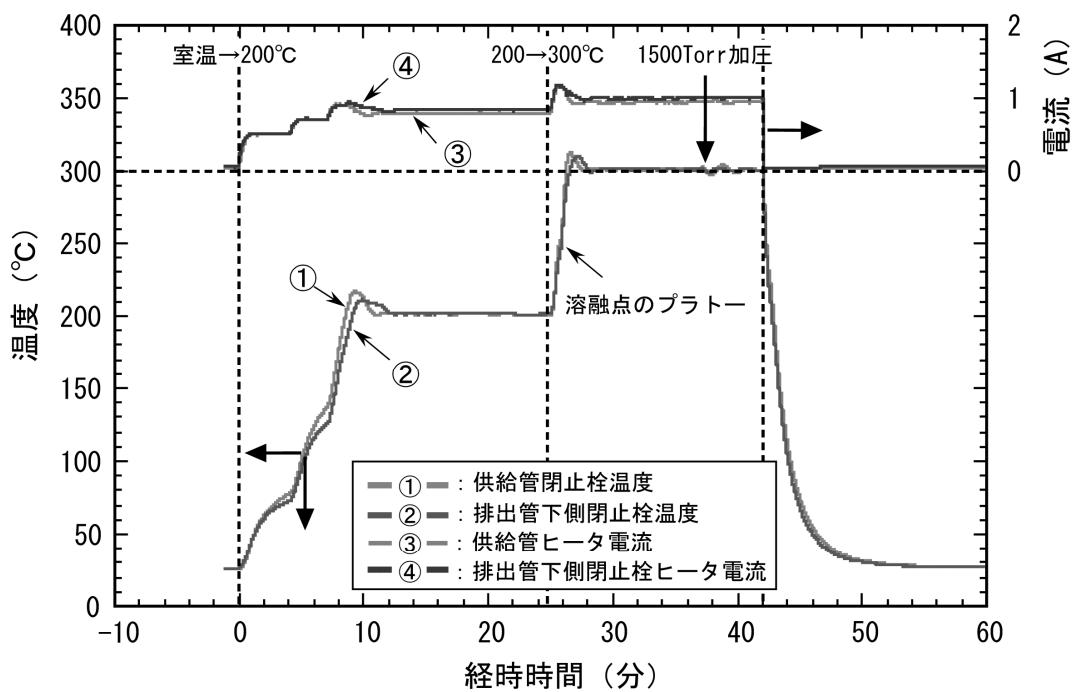


(1) 閉止栓操作回路

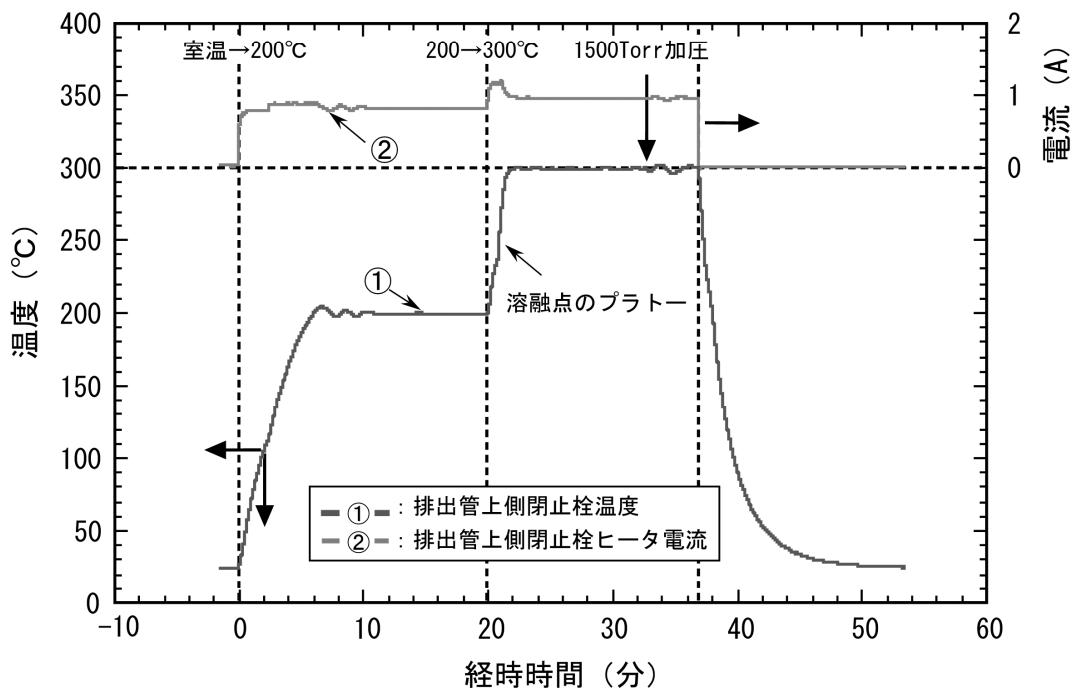
(2) データ収集装置

(3) 制御盤内の回路変更

Fig. 6-3 閉止栓溶封試験の電気回路等の外観写真



(1) 供給管閉止栓及び排出管下側閉止栓溶封時のトレンド記録



(2) 排出管上側閉止栓溶封時のトレンド記録

Fig. 6-4 99M-54J キャプセル用閉止栓の溶封操作時のトレンド記録

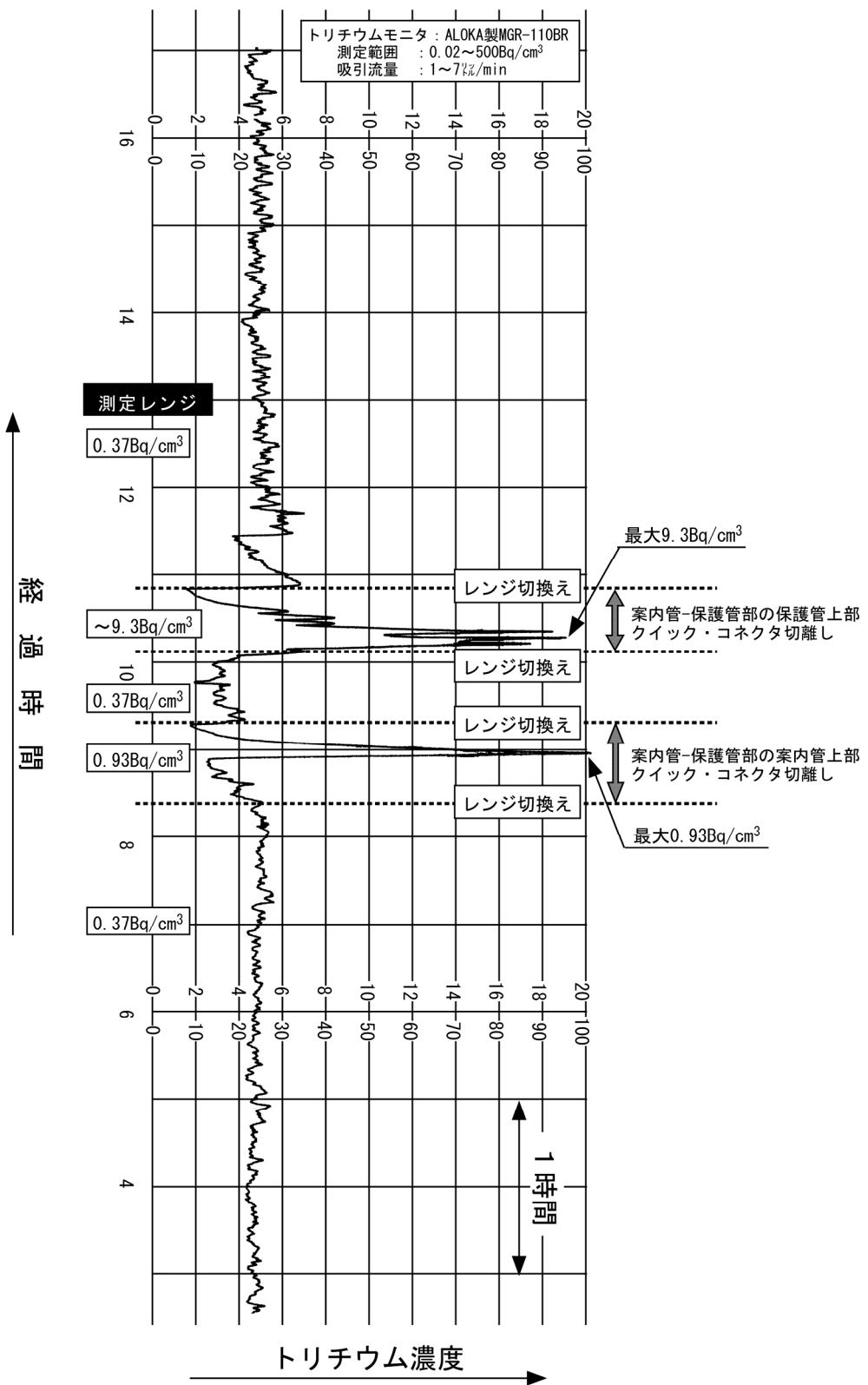
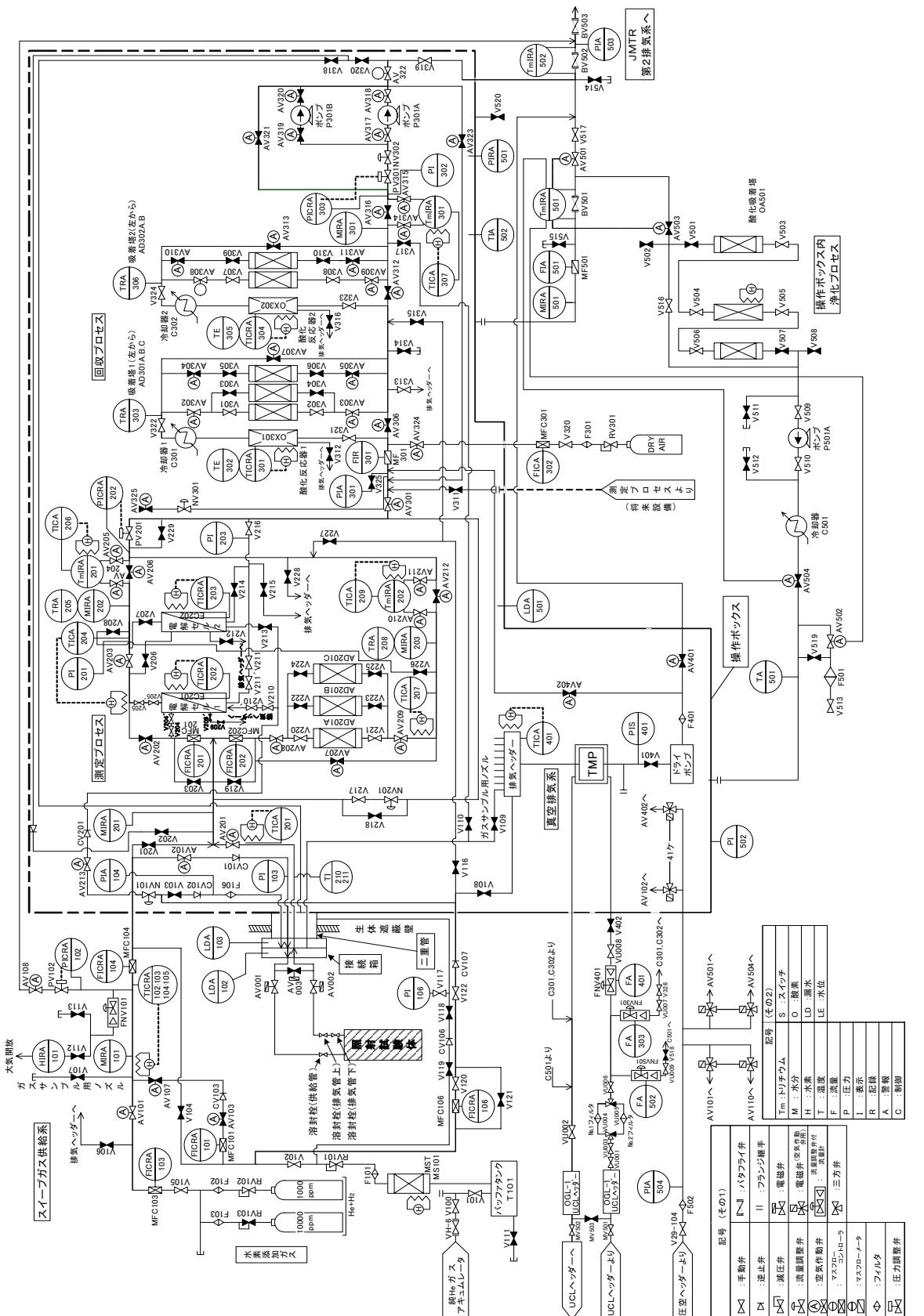


Fig. 6-5 放射線管理課のトリチウムモニタの測定結果 (11月15日)



付録 I スイープガス装置の配管系統図

付録 II 電磁弁の寿命評価

－99M-54J キャプセルの電磁弁の弁座漏れについて－

1. 概 要

核融合炉運転モード模擬条件下におけるトリチウム増殖材(チタン酸リチウム:Li₂TiO₃)微小球からのトリチウム生成放出特性、微小球充填体の有効熱拡散率等を明らかにするため、中性子パルスモードが模擬可能な99M-54Jキャプセルの照射試験を実施した。

4月30日に起こったJMTRのディーゼル電源不良から、スイープガス装置のキャプセル制御盤の電源がOFFとなった。この時、99M-54Jキャプセルに設置している3つの電磁弁(AV001, AV002及びAV003)が閉になり、スイープガスがLi₂TiO₃微小球充填体内に供給が停止するはずであった。しかしながら、スイープガスは供給され続けていたため、163サイクル終了後、電磁弁の開閉試験を行い、電磁弁の状態を確認した。

2. 開閉試験及び試験結果

5月16日から、99M-54Jキャプセルに設置している3つの電磁弁(AV001, AV002及びAV003)の開閉試験を行い、BFT装置の流量計(FICRA104, FICRA201, FICRA202及びFIR301)と圧力計(PI103)の変動を調べた。また、スイープガス装置側の電磁弁(AV102及びAV201)の開閉試験を行い、各計器の変動を調べた。Fig. A2-1に今回行った電磁弁の開閉試験における確認計器の概略図を示す。

3. 試験結果

Table A2-1に電磁弁開閉試験の結果をまとめた。まず、スイープガス装置側の電磁弁(AV102及びAV201)の開閉試験を行った結果、FICRA104、FICRA201及びFICRA202計器指示値の変動があり、警報の発報も起こったことから、両電磁弁とも正常であることが分かった。

次に、99M-54Jキャプセルに設置している3つの電磁弁(AV001, AV002及びAV003)の開閉試験を行った。試験No.③で行った3つの電磁弁とも閉状態にしたとき、PI103及びFIR301計器指示値の変動は見られたが、FICRA104、FICRA201及びFICRA202計器指示値の変動はなく、警報の発報も起らなかった。この結果より、3つの電磁弁について弁座漏れがあることが分かった。

さらに、各々の電磁弁における弁座漏れ状態を調べた(試験No.④～No.⑧)。この結果、AV001及びAV003の電磁弁の開閉時には、FIR301計器指示値の変動が見られることから、弁座漏れはあるものの多少のシール性能はあるものと考えられる。一方、試験④からAV001を開けたとき、PI103及びFIR301計器指示値が正常状態で運転している値に変化した。この結果より、AV002はほとんどシール性能がなくなったものと考えられる。

4. 考察

この電磁弁は、ASCO 社製 X8262C15V であり、シート材としてバイトン、コイル（H 種モールドコイル）材としてポリエステルイミドが使用されている。99M-54J キャップセルに装荷した電磁弁の使用条件は以下の通りである。また、電磁弁のキャップセル内装荷位置を Fig. A2-2 に示す。電磁弁は反射体上面より約 1300mm に取り付けられている。

- (1) 使用期間：約 6 年（時間；約 17000 時間）
- (2) 流体：ヘリウムガス等
- (3) 流体温度：50°C 程度
- (4) 霧囲気温度：50°C 程度
- (5) 作動回数(開閉)：200 回程度

反射体上面での γ 線束は、Fig. A2-3 の JMTR 特性試験データ（M-2 孔での測定データがないため J-11 孔での測定データを用いる。）によれば 4.0×10^3 (R/MW·h) となり、全照射期間(17000h) の吸収線量は約 34MGy と推定できる。

電磁弁材質の内、コイルにはポリエステルイミド、シート材にはバイトンを使用している。これらの耐放射線性については、試料の調整法、添加物の存在等種々の因子によって複雑に変化するので、使用条件を明確に設定した上での実用試験が必要と考えられる。一例として、高分子材料の放射線抵抗性データ¹⁾を Fig. A2-4 に示す。図中のポリエステルガラス積層物で 10MGy までは充分使用可、40MGy までは中程度の損傷であり使用可の場合ありとある。

電磁弁の弁座漏れの原因について、検討を行った結果を Table A2-2 に示す。Table A2-2 の結果、使用期間に関して、シート材は 4 年間での交換が推奨されているが、本電磁弁はキャップセル保護管内に装荷されているため、交換は不可能である。照射延長時には、最高使用条件下での電磁弁の故障についての評価を行い、特に問題ないと評価されていた。一方、コイル材は、ポリエステルガラス積層物で 10MGy までは充分使用可、40MGy までは中程度の損傷で使用可の場合ありと評価されていた。

実際、今回起きた事象は、電磁弁が動作不良を起こしたという故障ではなく、電磁弁の動作はしていることから、コイル材の劣化によるものではなく、シート材であるバイトンの劣化によることが大きな原因と考えられる。

照射キャップセル内の電磁弁の位置は、Fig. A2-2 に示すように配置されている。このことから、炉心に一番近い AV002 の電磁弁のシート材（約 30MGy : 163cy までの吸収線量）は、AV001 及び AV003 のシール材（約 20MGy : 163cy までの吸収線量）より高い吸収線量を受けたため、シール性がほとんどなくなったのではないかと考えられる。

参考資料

- 1) 新保 正樹、高分子材料（高分子工学シリーズ 4）、日刊工業新聞社（1982）.

Table A2-1 電磁弁開閉試験の結果

No.	開閉試験					試験結果				
	供給	99M-54J 電磁弁			回収	供給側計器指示値		回収側計器指示値		
		AV102	AV001	AV002		AV003	AV201	FICRA104	PI103	FICRA201・202
①	◆	◇	◇	◇	◇	◇	約 50 秒後、流量低	—	約 3~4 分後、流量低	約 3~4 分後、流量低
②	◇	◇	◇	◇	◆	◆	4.5 分後、流量低	—	約 15 秒後、流量低	約 15 秒後、流量低
③	◇	◆	◆	◆	◆	◇	発報無	0.05→0.1MPa に増大	発報無	0.16 → 0.11 リッ/分に低下
④	◇	◇	◆	◆	◆	◇	発報無	0.1→0.05MPa に低下	発報無	0.11 → 0.20 リッ/分に増大
⑤	◇	◆	◆	◆	◆	◇	発報無	0.05→0.1MPa に増大	発報無	0.20 → 0.11 リッ/分に低下
⑥	◇	◆	◇	◆	◆	◇	発報無	変化無	発報無	変化無
⑦	◇	◆	◆	◆	◆	◇	発報無	0.05→0.1MPa に増大	発報無	0.20 → 0.11 リッ/分に低下
⑧	◇	◆	◆	◇	◇	◇	発報無	0.1→0.05MPa に低下	発報無	0.12 → 0.25 リッ/分に増大

Table A2-2 電磁弁の弁座漏れの原因究明

	カタログ・文献値等 による推奨値	165cyまでの評価	判 定
使用期間	—	6年間(約 17,000h)	
シート材	4年での交換*	—	×
コイル材	30,000h(連続通電)	—	◎
流 体	ヘリウムガス等	ヘリウムガス等	◎
流体温度	60°C以下	50°C程度	◎
雰囲気温度	60°C以下	50°C程度	◎
作動回数(開閉)	30~30万回	200回程度	◎
・線束	—	4.0×10^3 R/MW・h	△
吸収線量	—	34MGy	△

* : 周囲温度 60°C以下、電磁弁の最高使用条件下 (作動回数;30~30 万回)

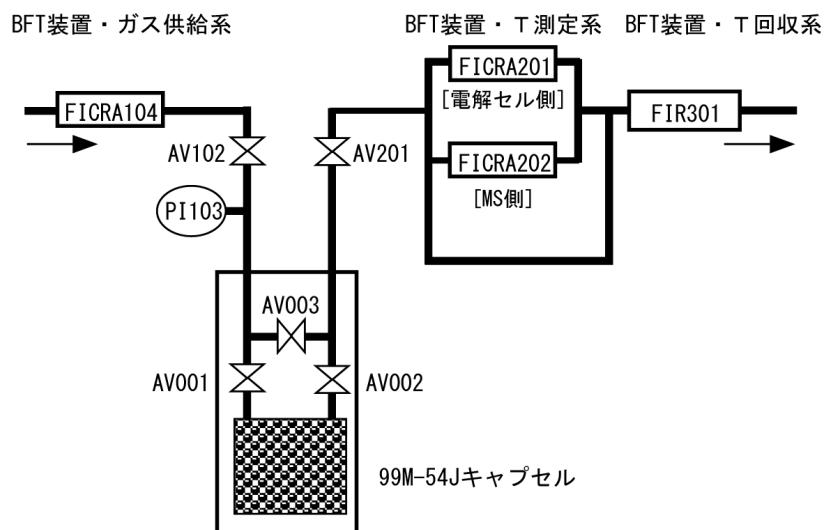


Fig. A2-1 電磁弁の開閉試験における確認計器の概略図

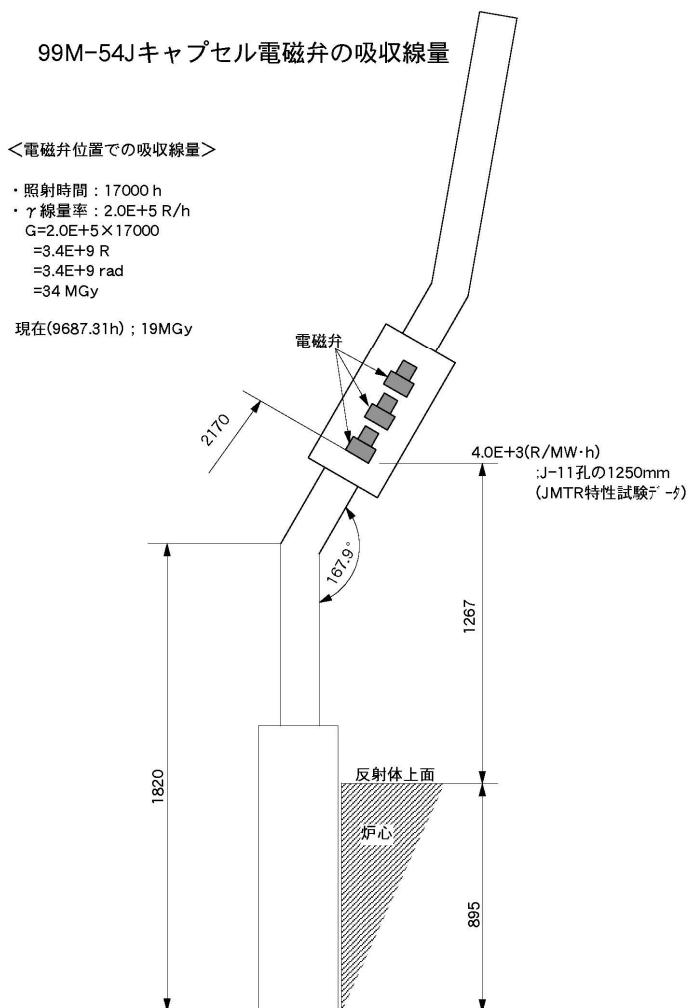


Fig. A2-2 電磁弁の装荷位置

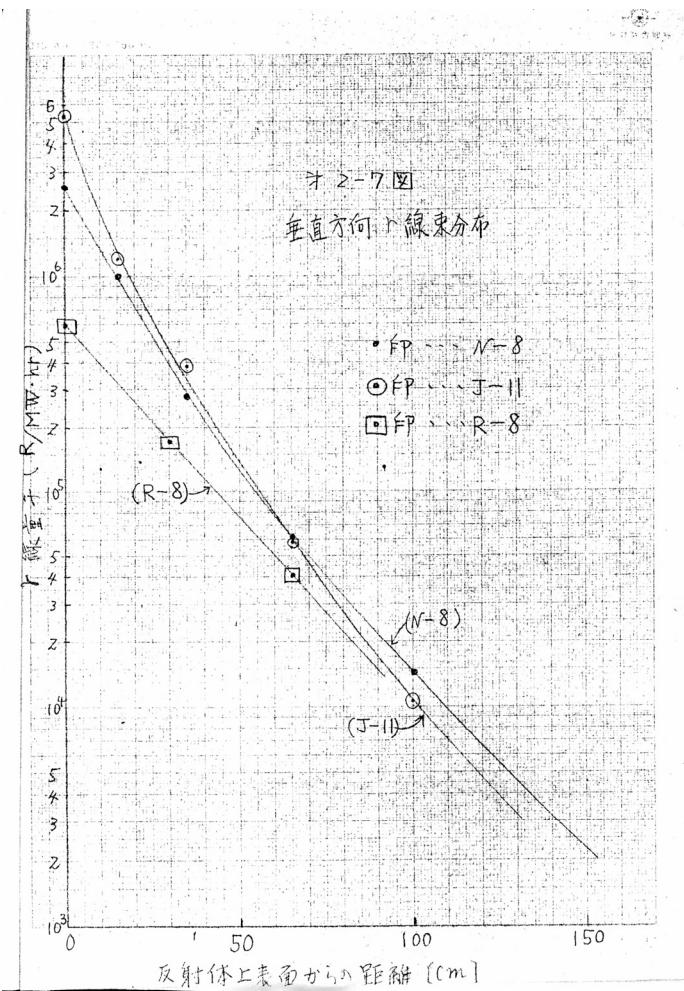
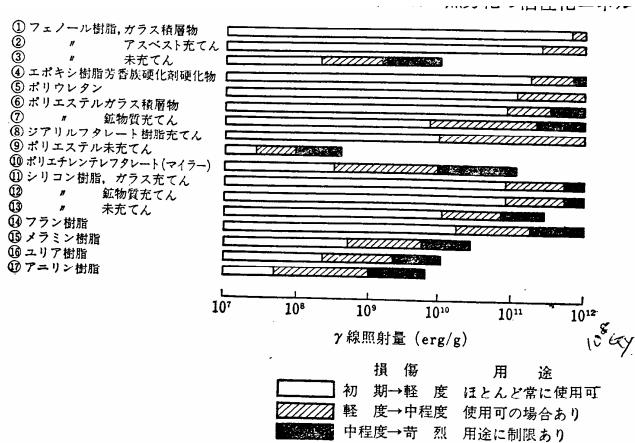
図 2 垂直方向 γ 線束分布 (JMTR 特性試験データ)

図 1.41 高分子の放射線抵抗性 (熱硬化性樹脂)

図 3 高分子の放射線抵抗性
(新保 正樹、高分子材料 (高分子工学シリーズ 4) より)

付録III 照射試験体の取出試験確認表及び試験結果

P. 1

No.	手 順	確認	備 考
照射試験体取出準備作業（11/13の作業）————— 1日目			
1	作業前手続き (1) 放射線作業連絡表を区域放管に提出し、作業前打合せを行う。 (2) 照射施設炉停止中作業計画書の確認	済 済 済	
2	作業前準備 (1) 作業開始を JMTR 原子炉課長及び原子炉制御室に連絡 区域放管に立会要請 (2) 防護資材、空間線量計、工具等準備 (3) ハンドリングツール点検	— 済 済 済	
3	接続箱開放前準備 (1) 炉プール壁及び RPV 上フラッシング (2) 局所排気及び放管トリチウムモニタ準備 (3) RPV 内に水中灯を下ろし、点灯。 (4) サポートアーム取外し。 (5) サポートアームの線量当量率を測定しながら、RPV 上に引上げ。 (6) サポートアームをポリエチレン袋で梱包した後、炉廻りに引上げ、保管する。 (7) RPV 内に異物のないことを確認。 (8) 小上蓋及び小判蓋に仮蓋取付け。	— 済 済 済 済 済 済 済 済	サポートアーム番号(3-2)
4	炉上作業終了 (1) ハンドリングツール、工具等の引上げ（数量確認） (2) RPV 上に不要物品のないことを確認。 (3) RPV 上及び炉周りのスミヤを行い、汚染のないことを確認。 (4) 炉プール壁及び RPV 上フラッシング。 (5) 作業終了を原子炉制御室及び区域放管に連絡	— 済 済 済 済 済	

P. 2

No.	手 順	確認	備 考
接続箱「開」、溶封栓用ヒータ線接続換え作業（11/14の作業）—— 2日目			
1	作業前準備	—	9:30～10:08
	(1) 作業開始を JMTR 原子炉課長及び原子炉制御室に連絡 区域放管に立会要請、作業前ミーティング。	済	
	(2) 防護資材、空間線量計、工具等準備	済	
	(3) 炉上作業者——給気式全面マスク、タイベックスーツ着用	済	
2	接続箱開放前準備	—	10:08～10:12
	(1) 炉プール壁及び RPV 上フラッシング	済	
	(2) 工具等落下防止のため、接続箱周りをポリエチレンシート で養生。	済	
	(3) 接続箱上蓋の水気を除去。	済	
3	接続箱開放作業	—	10:12～10:20
	(1) 接続箱開放のため、接続箱内圧力 PIA104 が大気圧であるこ とをスイープガス装置担当者に確認。	済	PIA104 圧力計 0 MPa
	(2) 局所排気及び放管トリチウムモニタを接続箱付近にセッ ト。	済	トリチウムモニタ B.G : 0.045Bq/cm ³
	(3) 放管モニタの指示値が 7Bq/cm ³ 以下であることを確認しな がら、接続箱上蓋を取り外す。	済	
	(4) 接続箱上蓋内面のスミヤ採取	済	
	(5) 接続箱上蓋を濡れウエスで除染し、ポリエチレン袋で梱包 し、炉廻りに引上げ。	済	
4	閉止栓用ヒータ線接続換え	—	10:25～10:41
	(1) 接続箱内で切離されている溶封栓ヒータのリード線を接続 し、ビニールテープで絶縁処理を行う。	済	トリチウムモニタ最大値 : 0.18 Bq/cm ³
	(2) スイープガス装置担当者にヒータ線接続終了を連絡する。	済	
	(3) スイープガス装置側で絶縁・導通を確認し、合格したこと を炉上担当者に連絡。	済	
	(4) 接続箱開放部をポリエチレンシートで覆う。 ～スイープガス装置側で、閉止栓（供給管、排気管）の閉止 操作を実施～	済	
5	炉上作業終了	—	10:41～11:12
	(1) ハンドリングツール、工具等の引上げ（数量確認）	済	
	(2) RPV 上に不要物品のないことを確認。	済	
	(3) RPV 上及び炉周りのスミヤを行い、汚染のないことを確認。	済	
	(4) 炉プール壁及び RPV 上フラッシング。	済	
	(5) 作業終了を原子炉制御室及び区域放管に連絡	済	

* 17:30 時の放管トリチウムモニタ指示値 : 0.11 Bq/cm³

P. 3

No.	手 順	確認	備 考
JMTR炉心からの照射試験体取出試験 (11/15の作業)			3日目
1	作業前準備	—	9:35~10:17
	(1) 作業開始を JMTR 原子炉課長及び原子炉制御室に連絡 区域放管に立会要請、作業前ミーティング	済	
	(2) 防護資材、空間線量計、工具等準備	済	
	(3) ハンドリングツール点検	済	
	(4) 炉上作業者——給気式全面マスク、タイベックスーツ着用	済	
2	スイープ管クイック・コネクタ切離し準備	—	10:17~10:18
	(1) 炉プール壁及び RPV 上フラッシング	済	トリチウムモニタ B.G : 0.09Bq/cm ³
	(2) 工具等落下防止のため、接続箱周りをポリエチレンシートで養生。	済	
	(3) スイープ管クイック・コネクタ切離しのため、スイープガスライン圧力が大気圧以下であることをスイープガス装置担当者に確認。	済	
	(4) 接続箱周りの水気を除去し、ポリエチレンシートを外す。	済	
	(5) 局所排気及び放管トリチウムモニタホースを接続箱のスイープ管クイック・コネクタ部にセット。	済	
3	スイープ管クイック・コネクタ切離し、バイパス管取付け	—	10:19~10:37
	(1) 接続箱から SPND、熱電対、ヒータ用のコネクタを外し、リード線を切断してコネクタを取り外す。	済	
	(2) 供給側スイープ管のクイック・コネクタ部を濡れウエスで覆い、接続箱から切離す。	済	
	(3) 排出側スイープ管のクイック・コネクタ部を濡れウエスで覆い、接続箱から切離す。(10:29)	済	トリチウムモニタ最大値 : 0.4 Bq/cm ³
	(4) 接続箱クイックカプラ部にバイパス管を取付ける。	済	
	(5) 排出側スイープ管(キャップセル側)のクイック・コネクタに閉止栓を取付ける。	済	
	(6) スイープガス装置担当者にバイパス管取付け作業終了を連絡。	済	
4	バイパス管取付け後の通ガス確認及び漏洩検査	—	10:28~11:51
	(1) スイープガス装置にてスイープガスラインに水素添加ガスを通ガスし、流量が出ることを確認	済	FICRA104(供給系)、FIA301(回収系)にて、流量 <u>900cm³/min</u> 確認
	(2) バイパス管ラインを加圧し、30分間圧力降下の無いことを確認。(10:33~11:03)	済	PICRA102 にて漏洩無し確認 <u>2028.8→</u> <u>2028.8 Torr</u>

P. 4

No.	手 順	確認	備 考
4	(3)炉上担当者にバイパス管漏洩試験修了を連絡し、接続箱閉止作業開始を指示する。 (4)スイープガス装置にてスイープラインガススイープを約1時間行う。(11:05~11:51)	済	
5	接続箱閉止作業 (1)炉プール壁固定金具から案内管を取り外す。 (2)案内管及び保護管固定金具を取り外す。 (3)案内管フランジ部にロープを取り付け、炉廻り手摺りに固定する。 (4)接続箱から案内管を取り外す。 (5)接続箱閉止フランジ及び上蓋取付け。 (6)接続箱閉止作業が終了したことを、スイープガス装置担当者に連絡。(11:08)	—	11:18~11:50
	(7)スイープガス装置にて接続箱内を加圧し、30分間圧力降下のないことを確認。(11:20~11:50)	済	PIA104 : 0.2 → 0.2 MPa 漏洩無確認
6	案内管と保護管切離し (1)案内管の保護管クランプ等を緩め、案内管と保護管を切離す。	—	10:44~11:10
7	保護管上部スイープ管クイック・コネクタ切離し (1)案内管をスイープ管のクイック・コネクタが見えるところまで引抜く。 (2)保護管の先端に近いところで、熱電対、ヒータ線等のリード線を切断する。 (3)局所排気及び放管トリチウムモニタホースをスイープ管のクイック・コネクタ部にセットする。 (4)スイープ管のクイック・コネクタ部を濡れウエスで覆い、切離す。(供給管、排出管)(10:55) (5)切離したクイック・コネクタに閉止カプラを取り付ける。(4箇所)	—	
8	ノズル小フランジ、大フランジ取外し (1)保護管クランプ、特殊ボルト取外し。 (2)Oリング押しを緩める。 (3)小フランジの固定ボルトを取り外し、保護管から引抜く。 (4)大フランジの固定ボルトを取り外し、保護管から引抜く。	—	11:10~11:37
9	保護管吊具取付け (1)保護管吊具にキャプセル名を記入 (2)保護管吊具を保護管に挿入。 (3)保護管吊具のOリング押し、保護管クランプ締付け。	—	11:10~11:37

P. 5

No.	手 順	確認	備 考
10	案内管引き上げ	—	11:30~12:02
	(1)案内管から計測線、スイープ管を引抜く。	済	
	(2)スイープ管を濡れウエスで除染し、ポリエチレン袋で梱包。	済	
	(3)計測線を純水で洗浄し、洗浄水のトリチウム濃度測定を放管に依頼する。	済	
	(4)案内管先端にタオルフィルターを取り付け、内面を炉周り純水で洗浄する。	済	
	(5)案内管をポリエチレン袋で梱包し、炉周りに引上げる。	済	
11	キャップセル仮抜き	—	11:30~11:56
	(1)RPV 内に水中灯を下ろし、点灯する。	済	
	(2)原子炉制御室にキャップセル仮抜き開始を連絡。	済	
	(3)線量を確認しながら、保護管の第 2 曲げ点が出る程度までキャップセルを引上げ、ロープで炉周り手摺りに固定する。	済	
	(4)キャップセル引上げ状態、炉内の異物の有無を確認。	済	
	(5)水中灯を消し、炉周り架台に引上げる。	済	
	(6)ハンドリングツール、工具を炉周りに引上げ、員数を確認。	済	
	(7)RPV 上の不要物品確認。	済	
	(8)原子炉制御室に炉プール水張りを依頼。	済	
12	キャップセル取出、保管作業	—	13:30~15:09
	(1)炉プール水張り終了後、線量を確認しながら RPV からキャップセルを引抜く。	済	
	(2)キャップセルをキャスク台車ハンガーに固定する。	済	
	(3)炉プール水密ゲートを「開」	済	
	(4)キャスク台車を第 1 カナルに移動する。	済	
	(5)キャップセルを指定保管板に吊下げる。	済	保管板 : 2-1
	(6)炉プール水密ゲートを「閉」	済	
	(7)原子炉制御室に炉プール水下げを依頼。		
13	キャップセル取出後の炉上作業	—	15:10~16:00
	(1)炉プール水下げ終了後、炉プール壁、RPV 上をフラッシング。	済	
	(2)照射ノズルに閉止フランジ取付け。	済	大フランジ : N-2 小フランジ閉止板 : No.24
	(3)工具等引上げ。(員数照合)	済	
	(4)炉プール壁、RPV 上をフラッシング。	済	
	(5)作業エリアをスミヤし、汚染の無いことを確認する。	済	<0.4Bq/cm ² 以下
	(6)作業終了を原子炉制御室、放管に連絡	済	

This is a blank page.

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	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル毎秒	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	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)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
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}$ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}$ ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率、電気量	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	C/V
静電容量	フアード	F	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジemens	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	K
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq	$lm \cdot m^{-2}$
吸収線量、質量エネルギー一分率	グレイ	Gy	lm/m^2
線量当量、周辺線量当量	カーマ		$m^2 \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	シーベルト	Sv	$m^2 \cdot s^{-2}$

(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る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°C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	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
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)	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	毎ケルビン		
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	ワット每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	ボルト每メートル	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	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	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	ジュール毎モル每ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム		
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每スチラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每スチラジアン	W/(m ² ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

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}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

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	°	°=(π/180) rad
分	'	'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーベル	Np	1Np=1
ペル	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	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1 dam^2=10^2 m^2$
ヘクタール	ha	$1 ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
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	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ポアソン	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m/s$
ガウス	G	$1 G \triangleq 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe \triangleq (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx \triangleq 10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホル	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

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	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	X unit	$1 X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 γ=1 nT=10^{-9} T$
ジャニスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
カリヨン	cal	$1 atm = 101.325 Pa$
ミクロ	μ	$1 μ = 1 μm = 10^{-6} m$

