



JMTR の施設更新と長期停止期間中の安全管理

Refurbishment and Safety Management of JMTR in Extended Showdown

井手 広史 堀 直彦 五来 滋 楠 剛

Hiroshi IDE, Naohiko HORI, Shigeru GORAI and Tsuyoshi KUSUNOKI

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

June 2011

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

JMTR の施設更新と長期停止期間中の安全管理

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

井手 広史、堀 直彦、五来 滋、楠 剛

(2011 年 3 月 31 日受理)

JMTR (Japan Materials Testing Reactor) は、軽水減速軽水冷却タンク型の原子炉であり、熱出力は 50MW である。JMTR は、1968 年に初臨界を達成し、1970 年より共同利用運転が開始され、JMTR 第 165 サイクルの運転完了（2006 年 8 月）まで 38 年間運転を行ってきた。

2004 年には、施設定期評価を行い、施設の健全性を確認するとともに、その後の 10 年間の保全計画を策定した。その後、利用者からの強い要望等に対応して JMTR を 2030 年頃まで運転を継続することを決定し、2007 年度から JMTR の一部更新を行っている。

JMTR 再稼働後に継続使用する機器及び更新する機器の選定にあたっては、機器の経年変化、安全機能の重要度、保守経験からの安全確保の観点及び交換部品の調達性等からの稼働率向上の観点から検討を行い、現在までに、電源設備、ボイラー、放射性廃棄物、放射性廃棄物の廃棄施設等の一部更新が終了した。計測制御系統、原子炉冷却系統施設の一部を更新中である。

原子炉供用期間中の安全管理については、設備及び機器等の健全性、信頼性を維持することを目的として、施設定期自主検査及び日常点検を実施して、設備、機器等の性能が維持されていることを確認している。放射線管理については、法令により放射線業務従事者の線量限度が定められているため、これを遵守させるとともに、国際放射線防護委員会（ICRP）の放射線防護の基本的考え方「合理的に達成できる限り低く」とした ALARA（As Low As Reasonably Achievable）の精神を踏まえ、被ばく低減に努めている。

原子炉更新工事期間中の安全管理についてもまた、原子炉供用期間中と同様に行っている。ただし、更新中の機器の検査の在り方については、原子炉供用期間中とは異なる。また、機器更新中には、特別な措置を伴う作業に留意しながら作業を行っている。

本報告書では、JMTR の施設更新の状況と長期停止期間中の安全管理について述べる。

Refurbishment and Safety Management of JMTR in Extended Showdown

Hiroshi IDE, Naohiko HORI, Shigeru GORAI and Tsuyoshi KUSUNOKI

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

(Received March 31, 2011)

Japan Materials Testing Reactor (JMTR) is a testing reactor dedicated to the irradiation tests of materials and fuels. The reactor type of the JMTR is light water moderated and cooled tank type. It achieved first criticality in 1968. Operation was started in 1970. The JMTR had been being operated for 38 years from first criticality to the JMTR No.165cycle finished.

Periodic Safety Review (PSR) was carried out with confirming the integrity inspection of the JMTR reactor facilities. And the 10 years maintenance plan was made in 2004. After that, the restart of the JMTR has been strongly requested from various users as the only irradiation testing reactor in Japan. Finally, Japan Atomic Energy Agency (JAEA) decided the refurbishment and restart of the JMTR in December 2006, and the refurbishment works was started from FY 2007.

The equipment to remain in use and that which needs replacing before the restart of the JMTR was selected after having been evaluated on its damage and wear due to aging significance in safety functions, past safety-related maintenance date, and the enhancement of facility operation. The renewal work of power supply system, boiler, radioactive waste facility, etc. was already carried out as scheduled. The renewal work of reactor control system, nuclear instrumentation system and so on is being carried out.

As for the safety management during reactor operation, the facility periodical own inspection and daily inspection is carried out for the purpose of maintaining soundness and reliability of facilities and equipments. And it is confirmed that the performance of facilities and equipments is maintained. As for the radiation control, irradiation dose limit determined by the law is obeyed. Based on the Concept of radiation protection of the International Commission on Radiation Protection (ICRP), reduction of dose

is endeavored.

The safety management during reactor shutdown is also carried out as well as it of reactor operation term. However, the inspection of equipments during reactor refurbishment is difference from it of reactor operation term. And, refurbishment work is paid attention to work with special measures during reactor refurbishment.

This report summarized JMTR refurbishment and safety management during reactor shutdown.

Keywords: JMTR, Refurbishment, Safety Management

This is a blank page.

目 次

1. はじめに	1
2. JMTR の概要	1
3. 施設定期評価	1
4. JMTR 原子炉施設の一部分更新	2
4.1 更新機器の選定	2
4.2 更新する機器	3
4.3 原子炉機器の一部分更新の進捗状況	4
4.4 2010 年（平成 22 年）3 月までに更新を完了した機器	4
4.5 更新中の機器	6
5. 原子炉供用期間中の安全管理について	7
6. 原子炉更新工事期間中の安全管理について	7
6.1 原子炉更新工事期間中の施設保全の考え方	7
6.2 施設定期検査	8
6.3 施設定期自主検査	9
6.4 特別な措置を伴う作業の留意点	9
7. まとめ	10
謝辞	10
参考文献	10
付録 国際 TSO 会議資料	15

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of JMTR	1
3. Periodic Safety Review (PSR)	1
4. Renewal of JMTR Reactor Equipments	2
4.1 Selection of Refurbishment of Equipment	2
4.2 Replacing Equipments	3
4.3 Status of Renewal of Reactor Equipments	4
4.4 Equipments which Completed Renewal by March 2010	4
4.5 Renewing Equipments	6
5. Safety Management during Reactor Operation Period	7
6. Safety Management during Reactor Renewal Work	7
6.1 View of Facility Maintenance during Reactor Renewal Work Period	7
6.2 Periodical Inspection of Facilities	8
6.3 Voluntary Periodical Inspection	9
6.4 Notes of Work with Special Measures	9
7. Summary	10
Acknowledgements	10
References	10
Appendix: Explanation Documents	15

1. はじめに

JMTR (Japan Materials Testing Reactor) は、軽水減速軽水冷却タンク型の原子炉であり、熱出力は 50MW である。JMTR は、1968 年に初臨界を達成し、1970 年より共同利用運転が開始され、JMTR 第 165 サイクルの運転完了（2006 年 8 月）まで 38 年間運転を行ってきた。2004 年には、施設定期評価を行い、施設の健全性を確認するとともに、その後の 10 年間の保全径計画を策定した。その後、利用者からの強い要望等に対応して 2030 年頃まで運転を継続すること決定した。そこで、長期に安定運転を継続するための改修計画を立案し、2007 年度から改修を行ってきている。現在は、改修のための長期の停止期間である。改修に際しては、施設定期評価の結果及び原子炉施設の設備機器等の状況を考慮して改修する設備機器を選択した。改修後の再稼働は、2011 年を予定している。本報告では、JMTR の施設定期評価、JMTR の改修の概要、停止期間中の安全管理、行政庁が行う施設定期検査について述べる。

2. JMTR の概要

JMTR は、軽水減速軽水冷却タンク型で熱出力 50MW の汎用型の材料試験炉である。JMTR は、動力炉国産化技術の確立と国産動力炉などの発展に寄与するため、原子炉用材料、燃料の各種照射試験及び放射性同位元素の生産を行うことを目的として建設され、1968 年（昭和 43 年）3 月に濃縮度約 93% の高濃縮ウラン燃料を使用した炉心で初臨界に達した。JMTR 原子炉圧力容器概略図を図 1 に示す。

JMTR には、各種の照射試験を実施するためにキャプセル照射装置やループ照射装置等の各種実験設備が設置されている他、照射後試験施設としてホットラボ施設が付設されている。JMTR 施設の鳥瞰図を図 2 に示す。

JMTR の特徴は高速中性子束及び熱中性子束ともに最高約 $4 \times 10^{18} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ と我が国最高レベルの中性子性能を有することから、燃料・材料の加速照射、大型試験片の照射、温度や荷重等を制御した照射環境下でのキャプセル照射、大型ループによる照射試験等、幅広い照射需要に応じることができることである。また、原子炉とホットラボが水路（カナル）で連結されていることから、照射済試料を安全かつ容易にホットラボ施設に移動させ、照射後試験を実施できることである。さらに、照射済試験片等をキャプセルに再計装して原子炉での再照射が容易であることも大きな特徴である。JMTR の概要を表 1 に示す。

3. 施設定期評価

2004 年 2 月に日本の「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」に従い、JMTR 施設の経年変化に関する技術的な評価及び保全計画の策定を含む JMTR 原子炉施設定期評価を行い、2005 年 3 月に旧日本原子力研究所より文部科学省に報告した。

経年変化に関する技術的評価では、JMTR 原子炉施設が利用運転開始後 33 年を経過していることに鑑み、過去の保守点検の実績をもとに経年変化の監視と評価の方法、保守管理との対応について調査し、評価した。また、安全上重要な機器において、補修・取替が難しい設備機器について、経年変化の事象に対して今後長期にわたって十分に安全を維持できるかについて調査し、評価した。

改善計画及び保全計画では、運転経験の包括的評価（保安活動の評価）の結果並びに保守点検の実績調査の結果及び設備機器の経年変化に関する評価の結果を受けて、保安活動の改善計画と評価後 10 年の原子炉機器長期保全計画について述べた。

この施設定期評価に基づいて策定した長期保全計画に従って保全活動を実施することにより、原子炉機器の長期健全性を維持できることが確認された。

4. JMTR 原子炉施設の一部更新

JMTR は、2005 年 10 月に策定された原子力機構の中期計画において、「廃止の準備を行う施設」として位置づけられたが、多くの利用者から国内唯一の照射試験炉としての JMTR の運転再開についての強い要望を受け、更に、原子力委員会、原子力安全委員会、総合科学技術会議等において、「幅広い分野の利用ニーズに応えるべく早期に JMTR を再稼働すべきである」との提言を受け、独立行政法人日本原子力研究開発機構（原子力機構）は、2011 年度再稼働を目指し、2006 年 12 月に 2007 年度から改修に着手することを決定した。

JMTR は、初臨界以来、約 40 年が経過し、施設の高経年化も進んでいた。施設定期評価の結果より、大部分の機器については、健全性が確保されていることが確認されていたので、施設の安定運転を確保する上で必要な更新計画を立案した。再稼働後の JMTR は、2030 年頃までの運転継続を目指すこととしている。

4.1 更新機器の選定

機器の更新に設置許可変更を伴う場合、許可変更等の作業に多大な時間を要することが考えられる。JMTR 停止期間中は JMTR での照射利用ができないため、利用の観点から更新工事期間を短くするために、更新は、設置許可の範囲内で行うこととし、基本的な設計方針や性能は変更しないこととした。

JMTR 再稼働後に継続使用する機器及び更新する機器の選定にあたっては、機器の経年変化、安全機能の重要度、保守経験からの安全確保の観点及び交換部品の調達性等からの稼働率向上の観点から検討を行った。選定の基準を以下に示す。

(1) 安全確保の観点からの判断基準

再稼働後 20 年の運転期間を考慮し、経年変化等により更新が必要となると予想される機器を更新機器の判断基準とし、更新の優先順位の決定にあたって、安全機能の重要度を考慮した。継続使用する機器に関しては、再稼働後、機器の適切な状態監視が出来ることを

判断基準とした。

(2) 稼働率向上の観点からの判断基準

再稼働後 20 年の運転期間を考慮した場合の保守性等について、補修に必要な部品について、すでに交換部品が製造中止になっている機器、今後製造中止になる可能性がある機器を更新の判断基準とした。

(3) 更新せずに継続使用する機器の判断基準

今回、更新せずに継続使用する機器（原子炉建屋、原子炉压力容器、炉プールライニング、格子板、一次冷却系統配管等）については、2005 年 2 月にまとめた、JMTR 原子炉施設の施設定期評価における報告で、これまでの保全活動を継続することにより健全性は維持できると評価されており、再稼働後もこの施設定期評価に基づく保全計画に従った保全活動を行い、施設定期自主検査等により健全性を確認していく。

また、今回更新する機器選定にあたっては、最新知見として、①水冷却型試験研究用原子炉施設に関する安全設計審査指針（2001 年 2 月）②発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針（2002 年 9 月）③発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（2006 年 9 月）の考え方を考慮した。また、JMTR 再稼働後に継続使用する機器及び更新する機器の選定結果を含む更新に関する基本的考え方の妥当性については、原子力機構大洗研究開発センター内に「JMTR 改修計画に係る専門部会」を設置し、妥当性確認を実施している（2007 年 6 月～11 月）。

4.2 更新する機器

更新する機器は、信頼性の向上、保守性の向上を目指し設計することとした。以下に更新する主な機器の概要を示す。

(1) 一次冷却系統

一次冷却系統の機器のうち更新する機器は、主循環ポンプの電動機、主要電動弁の駆動部、電磁弁の駆動部等である。これらの機器は、既設品と同等のものに更新する。

(2) 二次冷却系統

二次冷却系統の機器のうち更新する機器は、循環ポンプ（電動機を含む）、補助ポンプ（電動機を含む）、主要電動弁、冷却塔ファンの電動機等である。これらの機器は、既設品と同等のものに更新する。

(3) UCL 系統

UCL 系統の機器のうち更新する機器は、循環ポンプ（電動機を含む）、揚水ポンプ（電動機を含む）、主要電動弁、冷却塔ファンの電動機等である。これらの機器は、既設品と同等のものに更新する。

(4) 計測制御系統

計測制御系統の機器のうち更新する機器は、原子炉制御盤（全面更新）、プロセス計装（全面更新）、核計装（全面更新）、制御棒駆動機構の一部等である。これらの計装機器は、表示器、操作スイッチ等について機能毎に分類・整理し、運転員の操作性及び視認性を考慮した設計とし、マンマシンインターフェースの改善を図る。

更新機器については、基本的な設計や性能は変更しないこととした。JMTR の監督官庁である文部科学省への設工認申請を伴わないボイラー設備、純水製造装置等については、2007 年度から更新を開始し、2008 年度までに完了した。なお、ボイラー設備等のうち、原子炉施設内の冷房を行う冷凍機については、2007 年度に更新を完了した。

設工認申請が必要な更新機器については、2008 年度中に設工認申請を行い、更新工事を進めている。

4.3 原子炉機器の一部更新の進捗状況

JMTR の改修は、図 3 に示すように更新する箇所が、「原子炉施設の多岐にわたっていること」及び「2007 年度から 2011 年度までの 4 年間で行うこと」から、効率的に改修工事を行うことが必要であった。

例えば、一次冷却系統の使用前検査を受検する際には、プロセス計装が使用できる状態になければならないため、一次冷却系統の使用前検査スケジュールに合わせてプロセス計装の更新工事を行い、互いの工程が重ならないようにした。また、換気設備である炉室給排気系統が運転状態でなければ、原子炉建家内における更新工事は実施できないため、炉室給排気系統は他の系統に先立って更新工事を実施するとともに、この時期には原子炉建家外での更新工事を実施した。

このように、最初にボイラー設備、電源設備、炉室給排気系統等の原子炉のユーティリティ設備の更新工事を行い、その後、原子炉制御系統、制御棒駆動装置及び原子炉冷却系統の更新工事を行うよう、表 2 に示す更新工程で実施している。

4.4 2010 年（平成 22 年）3 月までに更新を完了した機器

(1) 設工認を要しない機器

①電源設備

電源設備については、2007 年度から更新機器の設計を開始し、2008 年 4 月～2009 年 1 月にかけて高圧電源盤、変圧器、ケーブル等の既存設備の撤去及び更新機器の搬入・据付けを行った。なお、高圧電源盤については、コンパクト化、継電器類のデジタル化及び盤内への除湿器設置による結露防止対策を施すことにより、保守性及び信頼性の向上を図った。ケーブルについては、難燃性のケーブルへの更新により火災対策を行った。

②ボイラー等

JMTR 設置当初から約 40 年間継続使用している「原子炉建家内の冷房を目的とした冷凍機」、「暖房を目的としたボイラー」及び「原子炉の冷却水などに使用する純水を製造する純水製造装置」の更新を行った。

冷凍機の更新にあたっては、熱源としてボイラーの熱源を使用するこれまでの吸収式冷凍機から、夏場の冷房を行うに当たり、運転時間の細かな調整ができるようにボイラーからの熱源が不要なターボ冷凍機に変更した。

これにより、夏場のボイラーの運転による重油代が大幅に節約でき、冷凍機の全体的な運転コストを約 4 割削減することができた。また、ターボ冷凍機は、吸収式冷凍機に比較して構造が簡単なため、保守が容易となるとともに、今後の保守用部品の調達についても見通しを得ることができた。

ボイラーについては、JMTR 再稼働に向け、必要な熱容量を見直すとともに、ボイラー 1 基当たりの伝熱面積を大きくすることにより、これまでの 4 基から 2 基に変更した。

(2) 設工認を要する機器

①放射性廃棄物の廃棄施設

放射性廃棄物の廃棄施設の炉室給排気系統については、排風機、送風機及びそれらの制御回路等の更新を行うとともに、液体廃棄物の廃棄設備については、主に手洗い水等、通常は放射性汚染がないが、事故時に汚染する恐れのあるものを扱う原子炉建家内の排水貯槽の排水をタンクヤードに送水するための「排水ポンプとその配管」及び「タンクヤード内の放射性廃液を扱う廃液タンクの排水ポンプ」の更新を行った。

排風機及び送風機等の更新については、非常用排風機のファン及びモータを更新するとともに、「給気系統のバタフライ弁の駆動部」、「排気系統バタフライ弁の一部」及び「通常用排気設備の排気ダクトの一部」を更新した。

そのうち、炉室内に空気を送り込むための送風機用の電動機については、その型式をこれまでの巻線型から、かご型へ変更した。その理由は、かご型の電動機は、巻線型に比較して構造が単純で、回転子に絶縁部がなく、高熱に耐えられるため、高速域の過負荷に強く、ブラシやスリップリングのような摩耗・接触通電部分がない。この変更により、保守が簡単で堅牢であるため、保守性の向上が図ることが可能になった。

排風機の更新にあたっては、2008 年 5 月 27 日に文部科学省へ設工認申請を行い、6 月 24 日に認可を受け、更新工事を開始した。その後、2009 年 3 月 30 日に文部科学省が実施する使用前検査を受検し、それに合格したことをもって、更新を完了した。

制御回路については、これまでのパワーリレーユニット制御装置からシーケンサー制御装置に変更した。これにより、従前の制御回路と比較して構成部品を少なくできるため、保守・運転管理の簡素化、故障の低減等を図ることが可能になった。

排水設備については、原子炉建家内の排水貯槽の排水をタンクヤードに送水するための「排水ポンプ及び配管の更新」を行うとともに、「タンクヤード内の放射性廃液を扱う廃液タンクの排水ポンプ（7 基のうち 1 基）の更新」を行った。排水設備の更新にあたっては、

2009年3月19日に文部科学省へ設工認申請を実施し、5月13日に認可を受け、更新工事を開始した。その後、2010年2月18日に文部科学省が実施する使用前検査を受検し、それに合格したことをもって、更新を完了した。

②原子炉冷却系統施設

UCL 系統においては、循環ポンプ（電動機を含む）、揚水ポンプ（電動機を含む）、主要電動弁、冷却塔ファンの電動機等の更新工事を実施した。循環ポンプ及び揚水ポンプの更新にあたっては、2008年5月27日に文部科学省へ設工認申請を実施し、6月24日に認可を受け、更新工事を開始した。その後、2009年3月30日に文部科学省が実施する使用前検査を受検し、それに合格したことをもって、更新を完了した。

なお、これらの機器は、JMTR 設置以来 40 年間以上使用しているもので、JMTR 再稼働後の安全運転や保守用部品の調達の観点から、既設品と同等の性能を有するものに更新した。

一次冷却系統で更新する機器の内、移送ポンプ（電動機を含む）の更新については、2009年3月19日に文部科学省へ設工認申請を実施し、2009年5月13日に認可を受け、更新工事を開始した。その後、2010年2月18日に文部科学省が実施する使用前検査を受検し、それに合格したことをもって、更新を完了した。

二次冷却系統の機器のうち更新する機器は、循環ポンプ（電動機を含む）、補助ポンプ（電動機を含む）、主要電動弁、冷却塔ファンの電動機等である。これらの機器についても、既製品と同等のものに更新し、保守性の向上を図ることとした。循環ポンプ及び補助ポンプの更新にあたっては、2008年11月27日に文部科学省へ設工認申請を実施し、2009年1月28日に認可を受け、更新工事を開始した。その後、2010年3月4日に文部科学省が実施する使用前検査を受検し、それに合格したことをもって、更新を完了した。

4.5 更新中の機器

(1) 計測制御系統施設

計測制御系統の機器のうち更新する機器は、核計装、プロセス計装、安全保護回路及び制御棒駆動機構の一部である。これらの計装機器は、ノイズ混入や接触不良等への対策を強化する等により信頼性の向上を図るとともに、表示器、操作スイッチ等については、機能毎に分類・整理し、運転員の操作性及び視認性を考慮した設計とすることにより、マンマシンインターフェースの改善を図ることとした。

これらの計装機器の更新については、2008年3月27日に文部科学省へ設工認申請を実施し、2009年6月10日に認可を受け、更新工事を開始した。

(2) 原子炉冷却系統施設

現在更新中の一次冷却系統機器は、主循環ポンプの電動機、充填ポンプ（電動機を含む）、主要電動弁の駆動部、電磁弁の駆動部等である。これらの機器は、既製品と同等のものに更新し、保守性の向上を図ることとした。

なお、充填ポンプの更新にあたっては、2009年2月27日に設工認申請を実施し、3月

25 日に認可を受け、更新工事を開始した。

5. 原子炉供用期間中の安全管理について

原子炉供用期間中の安全管理として、原子炉施設の運転管理、放射線管理等がある。原子炉施設等の保守管理は、原子炉の安全・安定運転を確保するため、設備及び機器等の健全性、信頼性を維持することを目的としている。この目的を達成するため、施設定期自主検査（旧保安規定における定期自主検査、定期的な検査を含む）及び日常点検を実施して、設備及び機器等性能が維持されていることを確認している。

JMTR では、JMTR 本体施設及び特定施設に係る主要な設備・機器の点検内容、周期等を定めた保守管理に関する年次計画を 1979 年（昭和 54 年）に策定している。この計画は、軽水炉の供用期間中検査計画を参考に、機器の重要度、使用条件、運転時間、構造、運転実績等を考慮して、その性能を維持するのに必要な検査内容、検査頻度を検討して作成したものである。以降、年次計画を実情に合わせて随時見直し改定を行いながら、施設定期自主検査を実施してきている。

放射線管理については、法令により放射線業務従事者の線量限度が定められているため、これを遵守させるとともに、国際放射線防護委員会（ICRP）の放射線防護の基本的考え方「合理的に達成できる限り低く」とした ALARA（As Low As Reasonably Achievable）の精神を踏まえ、被ばく低減に努めている。

作業環境の管理としては、管理区域内の作業環境における放射線及び放射能レベルについて放射線管理用監視装置で連続監視し、異常の早期発見に努めるとともに、保安規定に基づいて毎週 1 回線量当量率、表面密度等の測定を行っている。なお、作業環境の測定に使用する放射線モニタ及びサーベイメータは、保安規定に基づき、放射線管理課長が施設定期検査を受ける時期ごと（2001 年度までは毎年 1 回以上）に校正を行い、測定値の信頼性を確保している。また、被ばくを伴う放射線作業では、事前に放射線防護に関しての打合せを作業担当者で行うとともに、作業立会いを通じて作業場の放射線レベルのモニタリングを実施するなど、特定作業に対し被ばくの低減及び汚染の拡大防止の助言を行っている。

6. 原子炉更新工事期間中の安全管理について

原子炉長期停止期間中の安全管理もまた、原子炉供用期間中と同様に行っている。ただし、更新中の機器の検査の在り方については、原子炉供用期間中とは異なる。また、機器更新中には、特別な措置を伴う作業があるため、その留意点についても述べる。

6.1 原子炉更新工事期間中の施設保全の考え方

JMTR の更新工事期間中の施設保全については、(1)更新期間中において継続的に機能を維持

する必要のある施設、(2)更新期間中において継続的に機能を維持する必要のない施設に分類して、施設の保全活動を実施する。(1)、(2)の分類に係わらず、更新工事に伴い連続運転しない施設に関して、従前通りの保全活動に加え、更新工事に留意した保全活動を実施するとともに、保安上特に管理を必要とする施設に関して、施設定期検査を受検する時期毎に施設定期自主検査を実施し、原子炉施設の機能の維持に努める。また、施設を健全な状態に維持する上で工程管理に留意するとともに、更新工事をする上で特別な措置を伴う作業についても留意する。

6.2 施設定期検査

試験研究炉の施設定期検査は、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第 29 条の定めにより、原子炉施設の性能が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第 3 条の 5 で定める性能の技術上の基準に適合しているかどうかについて、文部科学大臣が毎年一回定期に行う検査を受けなければならない。性能の技術基準の主な項目としては、原子炉の停止装置、崩壊熱除去装置及び非常用動力源、非常用制御電源、安全弁、非常用閉鎖装置その他の非常用安全装置が、原子炉設置変更許可申請書等及びその添付書類に記載した条件において申請書等及びその添付書類に記載した時間内に確実に動作すること等がある。また、この施設定期検査は、文部科学省が実施する。

JMTR 原子炉施設では、例年、8 月から 11 月にかけて施設定期検査を実施し、定格出力運転時における飽和値確認検査終了後の施設定期検査合格をもって運転を実施していた。

現在原子炉の一部更新を行っているため、原子炉長期停止期間中に継続的に機能を維持されていることを確認する必要がある施設について、検査を実施している。

更新工事期間中において、安全性確保の観点から継続的に機能を維持する必要のある施設に分類し、以下に示す。

- (1)炉心の冠水機能維持として必要とする原子炉冷却材バウンダリを構成する原子炉圧力容器及び主循環系統
- (2)未使用及び使用済核燃料の未臨界性及び貯蔵能力の維持のため必要とする核燃料物質を貯蔵する施設
- (3)原子炉停止期間中において、作業環境の維持のために必要とする気体廃棄物の排気設備
- (4)放射性物質の閉じ込め機能の維持として必要とする原子炉格納施設及び換気設備
- (5)商用電源の停電時の安全性確保のため必要とする非常用電源設備のディーゼル発電機
- (6)関連する警報設備

これらの施設に関しては、毎年施設定期検査を受検してその機能が維持されていることを確認する。

更新工事期間中において、安全性確保の観点から継続的に機能を維持する必要のない施設を分類し、主要な施設を以下に示す。

- (1)燃料が全て取り出されているため必要としない原子炉の停止装置、崩壊熱除去装置、計測制御系統施設等
- (2)炉心の冷却機能であることから必要としない一次冷却系統設備及び二次冷却系統設備

(3)原子炉の未臨界性維持装置であるため必要としない非常用制御設備

これらの施設に関しては、原子炉施設の保全の観点から設備・機器の定期的な保守点検または整備を行い、原子炉施設の機能の維持に努める。

更新期間中の施設定期検査期間は、長期にわたるため、2006年度の検査において、検査の基準に達していると確認された施設については、1年を超えない期間毎に再度検査を実施し、検査の基準に達していることを確認している。また、運転再開の時期が確定した段階で、施設定期検査の全項目を実施する予定である。

長期停止期間中のJMTRに対する主な検査項目としては、新燃料貯蔵施設の外観検査、使用済み燃料貯蔵施設の未臨界性及び貯蔵能力確認検査、原子炉建家の漏えい検査、圧力容器及び主循環システムの漏えい検査等がある。

6.3 施設定期自主検査

原子炉施設の施設の自主検査は、原子炉等規制法第35条第1項の規定及び、試験炉規則第10条の定めにより、施設定期検査を受ける時期ごとに、計測制御系統施設の緊急遮断検査を行い、緊急遮断のための性能検査は毎月1回以上行うこととしている。

また、核計装及びプロセス計装の主要な計器類及び冷却系統の放射線モニタの校正検査、並びに、保安上特に管理を必要とする設備の性能が維持されているかどうかについて、圧力容器の漏えい検査、核燃料物質貯蔵設備の外観検査等を行っている。

ただし、JMTRの運転の予定がなく、炉停止中作業計画において、燃料要素が炉心からすべて取り出され、挿入されないことが明らかな場合には、原子炉出入口温度差計、熱出力計、一次冷却水モニタ等の施設定期自主検査のための校正を省略している。

設備についてもまた、主配管逃し弁、圧力サージタンク安全弁等の検査を省略している。このように、原子炉施設の一部更新期間中は、検査内容を合理化して、必要な計器、機器の校正、検査を施設定期自主検査で行っている。

6.4 特別な措置を伴う作業の留意点

労働安全衛生上、特別な措置が必要な作業としては、放射線被ばく作業、高所作業、閉所における酸欠作業、重量物取扱作業、石綿の除去作業等を想定している。

これらの作業を行う上で、原子炉施設保安規定、放射線安全取扱手引、安全衛生管理規則等及び関係する法令、規定、規則類を遵守する。

また、今回の更新工事においては、放射線安全取扱手引に定められた放射線作業届を提出する作業(1回の作業又は1週間以内の連続作業による実効線量が1mSvを超える被ばくを伴う、等)はない。主要な設備・機器の更新に伴う作業上の留意点を表3に示す。

7. まとめ

JMTR (Japan Materials Testing Reactor) は、JMTR 第 165 サイクルの運転完了 (2006 年 8 月) まで 38 年間運転を行ってきた。2004 年には、施設定期評価を行い、施設の健全性を確認した。その後、利用者からの強い要望等に対応して JMTR を 2030 年頃まで運転を継続すること決定し、2007 年度から JMTR 一部更新を行っている。JMTR 再稼働後に継続使用する機器及び更新する機器の選定にあたっては、機器の経年変化、安全機能の重要度、保守経験からの安全確保の観点及び交換部品の調達性等からの稼働率向上の観点から検討を行い、現在までに、電源設備、ボイラー、放射性廃棄物、放射性廃棄物の廃棄施設等の一部更新が終了した。計測制御系統、原子炉冷却系統施設の一部を更新中である。

原子炉長期停止期間中の安全管理もまた、原子炉供用期間中と同様に行っており、更新期間中も施設定期検査の受検及び施設定期検査を行い、原子炉施設の安全性を確認している。

このように、適切に、原子炉施設の検査を継続的に行うこと、及び、適切な更新作業を行うことにより JMTR の長期安全運転を行うことができる。

謝辞

本報告書をまとめる上で、内容について貴重なご意見を頂きました河村 弘大洗研究開発センター副所長、新見素二原子炉施設管理部長、石原正博照射試験炉副センター長に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 照射試験炉センター:“照射試験炉センターの活動報告(2007年度)”,JAEA-Review 2008-081, (2008)
- 2) 照射試験炉センター:“照射試験炉センターの活動報告(2008年度)”,JAEA-Review 2009-025, (2009)
- 3) 今泉友見、長尾美春、神永雅紀、他:“JMTR 改修の全体概要”,UTNL-R0475 (2010)
- 4) 井手広史、飛田健治、遠藤泰一、他:“JMTR 原子炉施設における経年変化に関する技術的評価に関する検討”,JAEA-Review, 2010-043 (2010)
- 5) 日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部:”施設定期評価(初回)報告書 (JMTR 原子炉施設) ”, (2004)

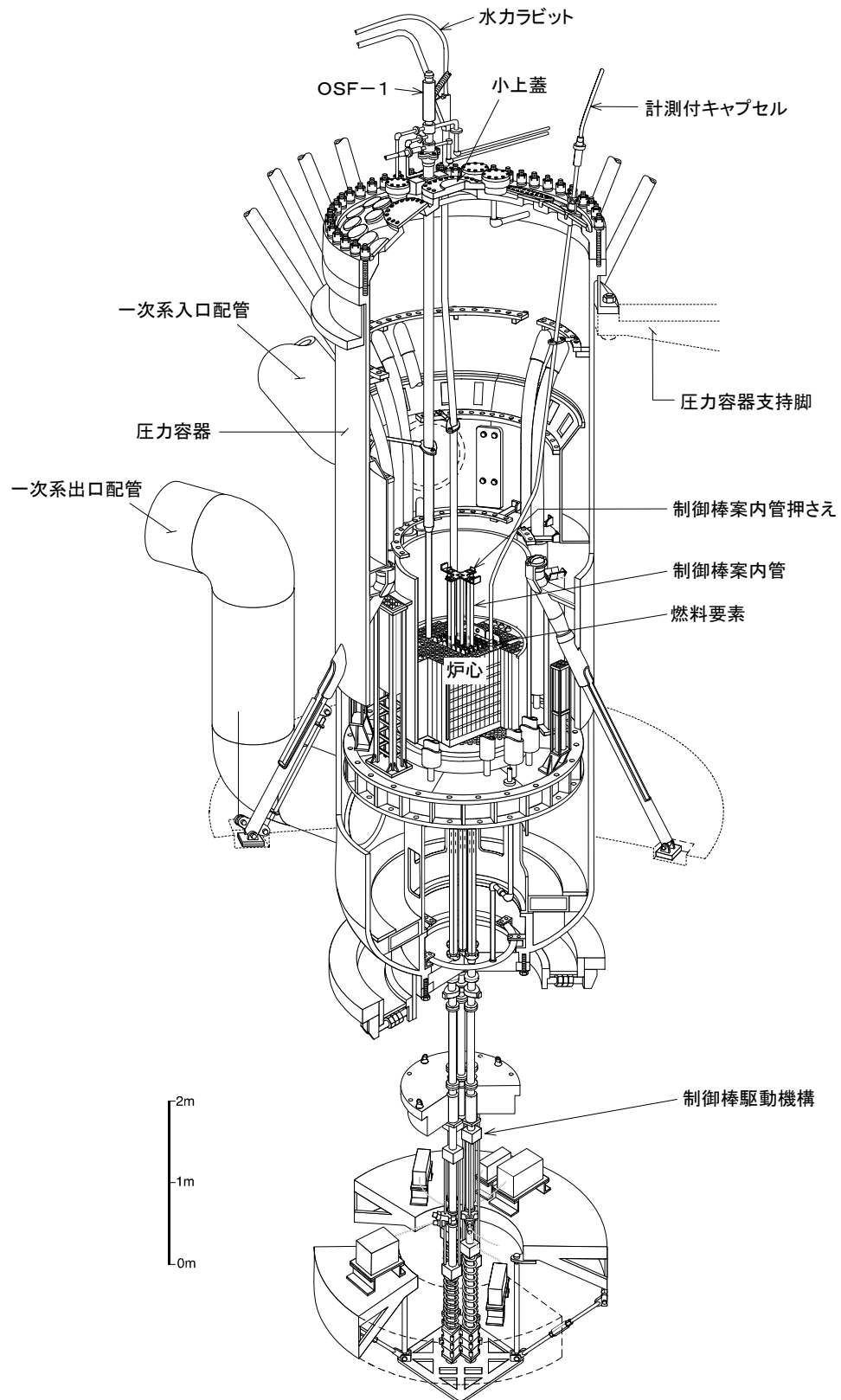
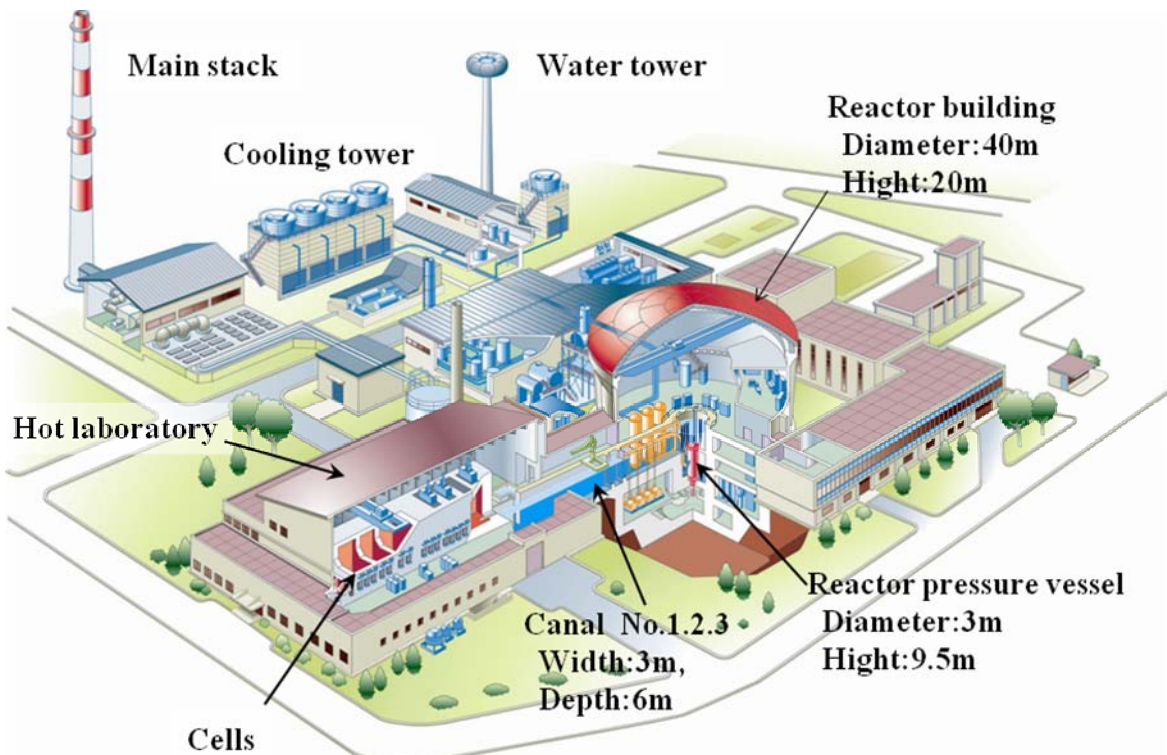


図1 JMTR 原子炉圧力容器概略図



1

図2 JMTR 施設の鳥瞰図

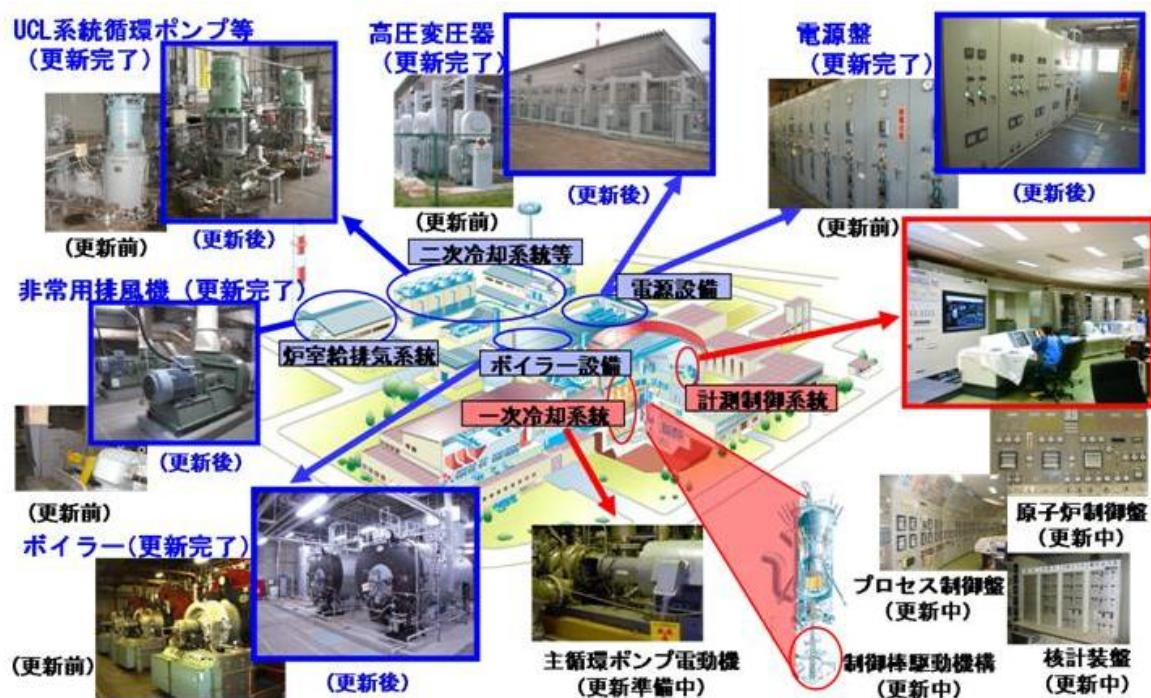


図3 JMTR 原子炉機器更新の概要と進捗

表 1 JMTR の概要

炉型式		軽水減速軽水冷却タンク型
熱出力		50,000 [kW] (50 MW)
燃料要素	ウラン 235 濃縮度 燃料芯材 ウラン密度	約 20 [wt%] U ₃ Si ₂ -Al 分散型合金 4.8 [g/cm ³]
反射体		ベリリウム
制御棒		ボックス型ハフニウム（燃料フォロア付）
中性子束	熱中性子束 高速中性子束	4×10 ¹⁸ /[m ² s] (Max.) 4×10 ¹⁸ /[m ² s] (Max.)
出力密度		425 [MW/m ³]
一次冷却水	炉心入口温度 炉心出口温度 流量 圧力	322K (Max.) 329K (Max.) 6000 [m ³ /h] 約 1.5 [MPa]

表 2 JMTR 原子炉機器の更新工程と進捗状況

年度 項目		2007	2008	2009	2010	2011	Status
原子炉本体	ベリリウム棒 γ線遮蔽板、等						据付準備中
計測制御系 系統施設	核計装、プロセス計 装、安全保護回路						製作中
原子炉冷却 系統施設	一次冷却設備、二次 冷却設備等						製作中（二 次冷却系統 設備につい ては完了）
放射性廃棄 物廃棄施設	炉室給排気系統 排水設備						更新完了
電源設備	高圧電源盤、変圧 器、ケーブル等						更新完了
ボイラー等	ボイラー、冷凍機						更新完了
純水製造設 備	脱気純水系統、一般 純水系統						更新完了

■ : 設計、製作、据付

表3 主要な設備・機器の更新に伴う作業上の留意点

作業内容	留意点	対応
ベリリウム枠及びガンマ線遮へい板の交換作業	・被ばく及び汚染を伴う作業	・過去の実績を参考に作業者の被ばく量の低減化を図る
主循環ポンプ、緊急ポンプの電動機の交換作業	・重量物取扱作業	・クレーン作業、玉掛等の安全面に注意する
二次冷却系統配管の内面ライニング補修	・閉所作業 ・高所作業	・酸素濃度計による酸素濃度の測定する ・滑落防止のため安全帯を着用する
高圧受配電盤、変圧器、高圧ケーブル等の交換作業	・感電の危険性	・感電の防止措置を行う
冷凍機冷水配管の保温材、ボイラ蒸気管の断熱材除去作業	・石綿除去による身体への影響	・防塵マスクの着用、粉塵防止等の措置を行う

付録

国際 TSO 会議資料

国際原子力委員会（IAEA）は、世界中から原子力安全に係る技術支援機関（TSO : Technical Support Organization）が参加する第2回国際TSO会議を2010年10月に開催した。この会議では、日本における原子力規制行政を担う経済産業省原子力安全・保安院の技術支援機関である、独立行政法人原子力安全基盤機構が会議の運営を支援した。会議では、各国のTSO（技術支援機関）、規制機関等が集まり、規制支援のあり方などが熱心に議論された。

また、本会議では、JMTRの改修の状況や安全管理について説明が行われた。これらの説明に用いた会議資料を付録として添付する。

会議資料



Contents



1. Introduction
2. Outline of JMTR
3. Periodic Safety Review (PSR)
4. Refurbishment of JMTR Reactor Facility
5. Safety Management During Reactor Operating Period
6. Safety Management During Reactor Renewal Period
7. Summary

2

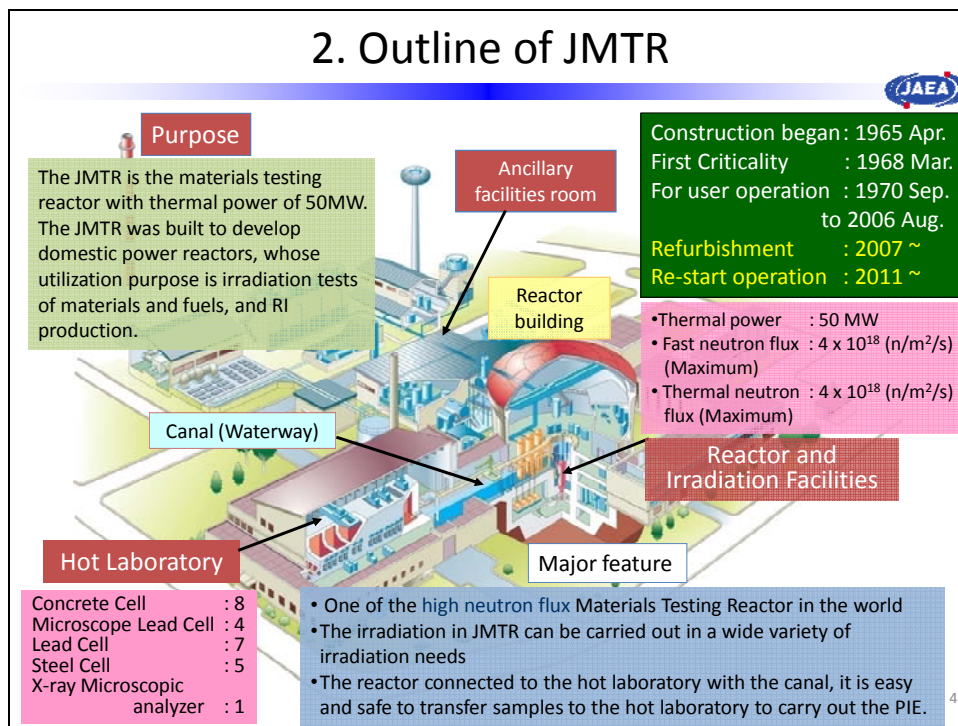
1. Introduction



- The Japan Materials Testing Reactor (JMTR) had been operated for 38 years with 165 cycles for various users since the first criticality in 1968.
- The JMTR has been in an extended shutdown period since August, 2006 for its refurbishment, and will restart in 2011.
- In order to improve the reliability and the safety of the reactor, kinds of reviews and inspections were conducted in parallel to the refurbishment.
- The experiences of the JMTR during the period could be shared with other organizations which currently or potentially have the similar situation.

3

2. Outline of JMTR



3. Periodic Safety Review (PSR)

- A Periodic Safety Review (PSR) for JMTR was carried out in 2004.
- Aging was evaluated based on the past maintenance record.
- The facilities, which were difficult to be replaced and important for safety, were investigated and evaluated whether they can maintain long-term safety operation or not.
- Improvement of maintenance activity and the 10-year maintenance plan was mentioned. <= result of the evaluation of the operation experience, investigation of the maintenance record and technical evaluation of equipment on aging
- Result of PSR : Long term integrity of reactor facilities can be maintained by carrying out maintenance activity.

4. Refurbishment of JMTR Reactor Facility



- JMTR was once categorized as one of the facilities to be shutdown in the middle-term plan of JAEA (2005).
- After that, the long term operation has been strongly requested by various users as it is the only irradiation testing reactor in Japan.
- JAEA decided the refurbishment and restart of the JMTR in Dec. 2006, and the refurbishment work has been carried out since 2007.
- It was confirmed that the integrity of almost all facilities was maintained in the PSR(2004).
- Necessary refurbishment schedule **for maintaining the stable operation** of the facility was planned.

6

4.1 Selection of Renewal Facility



- Renewal facilities were selected from evaluation on
 - their damage and wear in terms of aging,
 - significance in safety functions,
 - past safety-related maintenance date,
 - enhancement of facility operation.
- Facilities that could be used without renewal will keep their integrity assessed by continuing current maintenance based on the PSR.
 - e.g., a reactor building, a reactor pressure vessel, a reactor pool lining, a grid plate and primary cooling pipes
- “the special task force for JMTR renewal plan” was established in JAEA Oarai R&D Center to discuss the fundamental idea on renewal, and it confirmed validity of the renewal plan.

7

4.2 Renewal Procedure of Reactor Facilities



No.	Item	Year	2007	2008	2009	2010	2011 Re-operation	Status
1	Reactor	Beryllium frame, Gamma ray shielding						Renewed
2	Instrumentation and control system	Nuclear instruments, Process instruments, Safety guard circuit						Manufacturing
3	Reactor cooling system	Primary cooling facility, Secondary cooling facility						Manufacturing Renewed
4	Radioactive waste disposal facility	Feed and exhaust air system, Drainage facility						Renewed
5	Power supply system	High voltage power supply control board, Transformer, Cables						Renewed
6	Boiler	Boiler, Refrigerator						Renewed
7	Pure water Production equipment	Degassed demineralizer, Regular demineralizer						Renewed

➤ Components which are required to obtain "Approval of design and construction method"*, have been applied to the MEXT for approvals by March 2009.

* Primary cooling system, secondary cooling system, UCL system, Process and control system, Reactor room air supply and exhaust system, Beryllium frame, Gamma ray shielding plate

8

4.3 Major renewed Equipment by March 2010



- Power supply system ;
 - Improvement : compaction of control board, digitization of the relay, the insertion of the dehumidifier in the control, incombustible cable
- Refrigerator for cooling of the reactor building;
 - Improvement : operation cost can be reduced
- Feed and exhaust air system of the radioactive waste disposal facility
 - Improvement : number of component was reduced
=> maintenance and operation management are simplified, and reduction of the trouble is expected.
 - the approval procedure to the regulatory authority in May, 2008
 - pre-operational inspection, in March, 2009

9

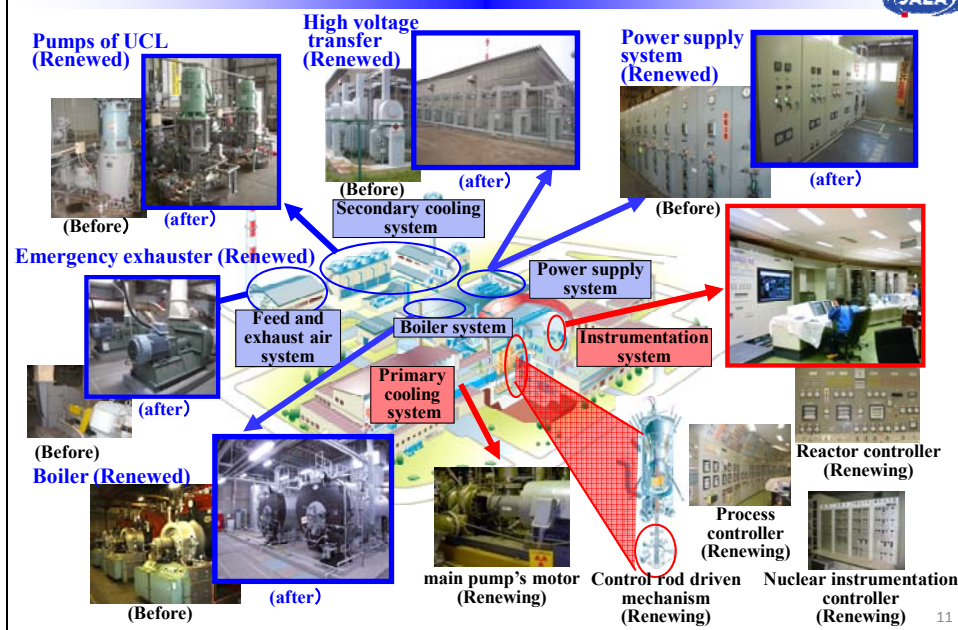
4.4 Renewing Equipment



- Instrumentation and control system
 - Their reliability was improved by reinforcing with the provision for the noise mixture and the break in the circuit.
 - Equipment will be upgraded to improve operational efficiency and visibility in creating better man-machine interface.
 - approval procedure in March, 2008
 - Approval in June, 2009
 - Renewal work is undergoing.
- Primary cooling system
 - the main circulating pump motors, filler pump including motor, main electric valve's drive mechanism and so on
 - approval procedure in February, 2009
 - Approval in March, 2009.
 - Renewal work is undergoing.

10

4.5 Renewal Equipment



11

5. Safety Management During Reactor Operating Period (1/2)



- The operational management of the reactor facility and the radiation control are important.
- Operational management of the reactor facility
 - to maintain the integrity and reliability of facilities and equipment for the safety and the steady operation of the reactor
 - The voluntary periodical inspection and daily inspection for facilities
 - The voluntary periodical inspection : performed with the annual plan for the JMTR.
 - The annual plan of maintenance ; inspection contents and frequencies of inspection in consideration of the importance, the service conditions, the operating time, the structures, the past operating records of the equipment

12

5. Safety Management During Reactor Operating Period (2/2)



- The radiation dose exposed to the personnel
 - restricted by laws and regulations
 - Efforts are made to reduce the exposure
 - Management of working environment by the radiation control division
 - measures the dose equivalent rate, the surface density and so on once a week based on the operational safety program.
 - continuously monitors the radiation, the radioactivity level, etc. within the radiation control area.
 - Calibrate the radiation monitors and the survey monitors in every period of the facility's periodical inspection
- Periodical Inspection
 - According to the law, "any licensee of reactor operation shall, pursuant to the provision of the ordinance of the competent ministry, undergo an annual inspection by the competent minister concerning the performance of the reactor facilities specified by Cabinet Order".
 - The periodical inspection on the JMTR during operating period : carried out from August to November

13

6. Safety Management During Reactor Renewal Period (1/4)



- The safety management of the reactor during the extended shutdown period for renewal is carried out in a way different from that of the reactor operation period.
- In facility maintenance during reactor renewal period, facilities are classified into two groups;
 - (1) facilities needed to keep the function continuously during renewal period
 - (2) facilities not needed to keep the function continuously during renewal period
- Maintenance work and periodical inspections, including those by the regulatory authority, are carried out based on the special classification.
- Under the renewal work, special attention should be taken into account work with the special measure.

14

6. Safety Management During Reactor Renewal Period (2/4)



- Periodical Inspection
 - Major inspection items for JMTR in the extended shutdown
 - the visual inspection of the new fuel storage facility,
 - the non-criticality inspection and the storage ability verification inspection for the spent fuel storage facility,
 - the leakage inspection in the reactor building and the leakage inspection of the pressure vessel,
 - the leak check of the main circulation system and so on.
 - The periodical inspection is carried out every period, not exceeding one year.
 - The MEXT carries out the periodical inspection of research reactors in Japan directly based on the law.

15

6. Safety Management During Reactor Renewal Period (3/4)



- Voluntary periodical inspection
 - Examinations of the facilities in a wider range during the periodical inspection period
 - Inspections on emergency shutdown for the instrumentation and control system facility
 - the performance examination for the emergency shutdown (once or more in every month)
 - the leakage inspection of the pressure vessel
 - the visual inspection of the nuclear fuel storage equipment
 - the calibration inspection of the measuring gauges for the nuclear instrumentation, the process instrumentation, the radiation monitors of the cooling system and so on
 - Omitted items ;
 - when there is no operation plan of the JMTR and if it is clear that fuels are taken out of the reactor core during the reactor shutdown period
 - the calibration on the temperature difference indicator between reactor inlet and outlet, the thermal output meter, the primary cooling water monitor and so

16

6. Safety Management During Reactor Renewal Period (4/4)



- Notes of work with special measures
 - In accordance with occupational safety and health laws, it is required to assume the special measures for particular work
 - the radiation exposure work,
 - the high-place work,
 - work with risk of hypoxia in the closed place,
 - The heavy component handling work and the asbestos removal work
 - Attention should be paid to the work with the renewal of the main equipment and the instrument.

17

7. Summary



- The JMTR operated for 38 years and the refurbishment work started in 2007.
- Equipment to be renewed was selected based on the evaluation on its damage and wear in terms of aging, significance in safety functions, safety-related maintenance experiences, in order to enhance the operational capability.
- During the refurbishment period in the extended shutdown, facilities were classified into a special manner from viewpoints whether their functions are required even in the refurbishment period.
- Maintenance work and periodical inspections by the regulatory authority are carried out based on the special classification in the extended shutdown period.
- Long-term safety operation of the JMTR will be realized by the refurbishment on the appropriate components with the justified inspection and the renewal work.

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량	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
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV.2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≡ 」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

