



照射試験炉センターの活動報告（2008年度）

Annual Report of the Neutron Irradiation and Testing Reactor Center FY 2008
(April 1, 2008 – March 31, 2009)

照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center

大洗研究開発センター

Oarai Research and Development Center

September 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

照射試験炉センターの活動報告
(2008年度)

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

(2009年 7月15日受理)

世界有数の高中性子束を有する材料試験炉 JMTR (熱出力 50MW) は、軽水炉燃料・材料の照射試験や基礎研究、ラジオアイソトープ (RI) の製造等に利用されてきた。平成 19 年度から改修を開始し、平成 23 年度から再稼働する計画である。再稼働後は、軽水炉の長期化対策、産業利用の拡大、科学技術の向上のために利用される予定である。

本報告は、JMTR の改修工事の進捗、照射試験に係る新技術の開発、原子炉稼働率の向上等について、平成 20 年度の活動をまとめたものである。

**Annual Report of the Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
FY 2008
(April 1, 2008 – March 31, 2009)**

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center

Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received July 15, 2009)

The JMTR, one of the most high flux test reactors in the world, has been used for the irradiation experiments of fuels and materials related to LWRs, fundamental research and radioisotope productions. The JMTR was stopped at the beginning of August 2006 to conduct refurbishment works, and the reoperation will be planned from FY 2011. After reoperation, the JMTR will contribute to many fields, such as the lifetime extension of LWRs, expansion of industrial use, progress of science and technology.

This report summarizes the activities on refurbishment works, development of new irradiation techniques, enhancement of reactor availability, etc.

Keywords : JMTR, Annual Report, Refurbishment, Restart, Utilization Promotion,
Irradiation Technology

目 次

1. はじめに	1
2. JMTR の改修	2
2.1 原子炉機器の一部更新	2
2.2 照射設備の整備	4
3. JMTR の利用性向上	4
3.1 稼働率の向上に向けた検討	4
3.2 ターンアラウンドタイムの短縮	5
3.3 魅力のある照射費用を実現するための検討	6
3.4 ⁹⁹ Mo 国産化に関する検討	6
4. 照射技術の開発	7
4.1 照射試験開発棟の整備	7
4.2 軽水炉燃料及び材料照射に係わる開発	7
4.3 先進照射技術の開発	12
4.4 JMTR 照射場評価の高精度化のための検討	16
5. 国際協力	17
5.1 照射試験炉ネットワークの構築	17
5.2 韓国原子力研究所との研究協力	17
5.3 スタズビックグループとの研究協力	18
5.4 カザフスタン国立原子力センターとの研究協力	18
6. あとがき	18
謝辞	18
付録 1 原子炉機器の一部更新の現状	19
付録 2 照射試験炉センターの組織	25
付録 3 JMTR 保守管理の概要	26
付録 4 外部発表	28
付録 5 研究開発報告書類	33
付録 6 官庁申請許可一覧	35
付録 7 プレス発表・表彰(受賞)・特許一覧	37

Contents

1. Introduction	1
2. Refurbishment of JMTR	2
2.1 Renewal of Reactor Facilities	2
2.2 Preparation of Irradiation Facilities	4
3. Utilization Promotion of JMTR	4
3.1 Improvement of Reactor Operation Rate	4
3.2 Shortening Turnaround Time	5
3.3 Achievement of Attractive Irradiation Expenses	6
3.4 Domestic Fabricating of ⁹⁹ Mo	6
4. Development of Irradiation Technology	7
4.1 Preparation of New Irradiation Engineering Building	7
4.2 Irradiation Technology of LWR Fuel and Material	7
4.3 Advanced Irradiation Technology	12
4.4 Improvement of Neutronic Evaluation for JMTR	16
5. International Cooperation	17
5.1 Construction of World Network	17
5.2 Cooperation Research with Korea Atomic Energy Research Institute	17
5.3 Cooperation Research with Studsvik AB	18
5.4 Cooperation Research with Kazakhstan National Nuclear Center	18
6. Summary	18
Acknowledgement	18
Appendix 1 Present status on Renewal of Reactor Facilities	19
Appendix 2 Organization of the Neutron Irradiation and Testing Reactor Center	25
Appendix 3 Operation and Management of JMTR	26
Appendix 4 Publication and Presentations	28
Appendix 5 JAEA Reports	33
Appendix 6 License and Approval Granted by the Regulatory Authority	35
Appendix 7 List of Press Release, Awards and Patents	37

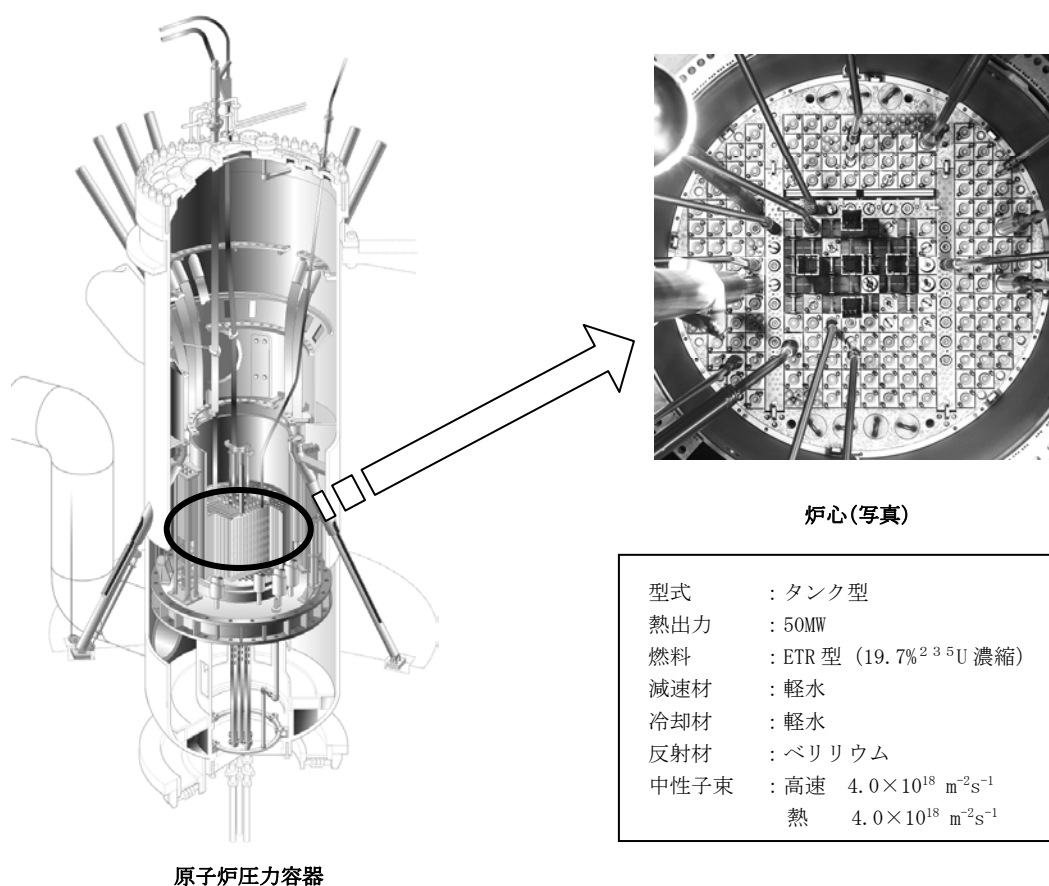
1. はじめに

JMTR (Japan Materials Testing Reactor、熱出力 50MW) は、世界で現在稼働中の試験研究炉の中でも有数の高中性子束を有する軽水減速冷却タンク型の原子炉である (図 1.1.1)。1968 年 3 月に初臨界を達成してから、原子炉の燃料・材料の耐久性、健全性の試験や基礎研究、ラジオアイソトープ (RI) の製造等に利用されてきたが、第 165 サイクルの運転をもって一旦停止 (2006 年 8 月) した。

その後、発電用軽水炉燃料や材料の照射試験を中心に高速炉、高温ガス炉、核融合炉等の燃料・材料照射試験に広く利用されてきた JMTR は、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、さらに、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、平成 19 年度から JMTR を改修して再稼働することを決定し、本格的な改修工事に着手した。

再稼働後の JMTR は、現行軽水炉の高経年化対策、次世代軽水炉の開発等の軽水炉の長期化対策、医療診断用の ^{99m}Tc の製造等の産業利用の拡大、原子力エネルギー基盤研究等の科学技術の向上などの利用が期待されている。これらの幅広い期待に応えるため、改修工事と並行して、照射試験に係る新技術の開発、技術的価値の高い照射データの提供等、利用者にとって魅力的な照射試験の提案に向けた活動を行うとともに、アジアの中核試験炉として国際的にも活用される研究基盤の構築を目指した国際拠点化の達成に向けた取組みを行っている。また、利用者が使いやすい原子炉を目指して、原子炉稼働率の向上、ターンアラウンドタイムの短縮等の利用性を向上させるための取組みを行っている。

平成 20 年度は、改修に当たり許認可申請が必要な設備、機器についての申請を全て完了するとともに、原子炉建家の換気を行う炉室給排気系統、照射設備等に冷却水を供給する UCL 系統等の更新を完了し、平成 23 年度の JMTR 再稼働に向けて計画通り JMTR 原子炉機器の更新を進めた。また、照射設備については、利用者からの資金負担により整備することとなっており、新たな利用ニーズを開拓するための検討を進めた。さらに、再稼働に向けた取組みとしては、技術的価値の高い照射データの提供を目指した照射場評価精度向上のための検討を開始するとともに、軽水炉の長期化対策のための照射試験を実施するための照射試験装置の開発、現在海外から 100% 輸入している医療用 RI の ^{99m}Tc の親核種である ^{99}Mo の JMTR 製造の検討を進めた。また、利用性向上のための取組みとして、JMTR において世界レベルの 70% の年間稼働率を目指した検討を行い、現時点において、従来の 50% から 60% の稼働率に向上できる見通しを得た。



原子炉圧力容器

炉心(写真)

図 1.1.1 JMTR の概要

2. JMTR の改修

2.1 原子炉機器の一部更新

JMTR 原子炉機器の更新は、更新箇所が原子炉施設の多岐にわたっていること等から、平成 19 年度から平成 22 年度までの 4 年間で効率的に実施する必要がある。そのため、更新期間の前半に電源設備、ボイラー設備、炉室給排気系統等の原子炉のユーティリティー設備の更新を行い、その後、原子炉建家内の原子炉制御系統、制御棒駆動装置、原子炉冷却系統等の更新を行う工程としている。原子炉機器等の一部更新の概要を図 2.1.1 に、平成 21 年 3 月 31 日現在の更新工程を表 2.1.1 に示す。

平成 20 年度は、電源設備、ボイラー等、放射性廃棄物の廃棄施設、原子炉冷却系統施設等に関する更新工事を計画通り実施した（付録 1）。

今後は、計測制御系統施設のうち核計装、プロセス計装、安全保護回路及び制御棒駆動機構、原子炉冷却系統施設のうち、一次冷却系統の機器のうち主循環ポンプの電動機、充填ポンプ、移送ポンプ等、二次冷却系統の機器のうち循環ポンプ、補助ポンプ等、放射性廃棄物の廃棄施設のうち排水設備等の更新を行う予定である。

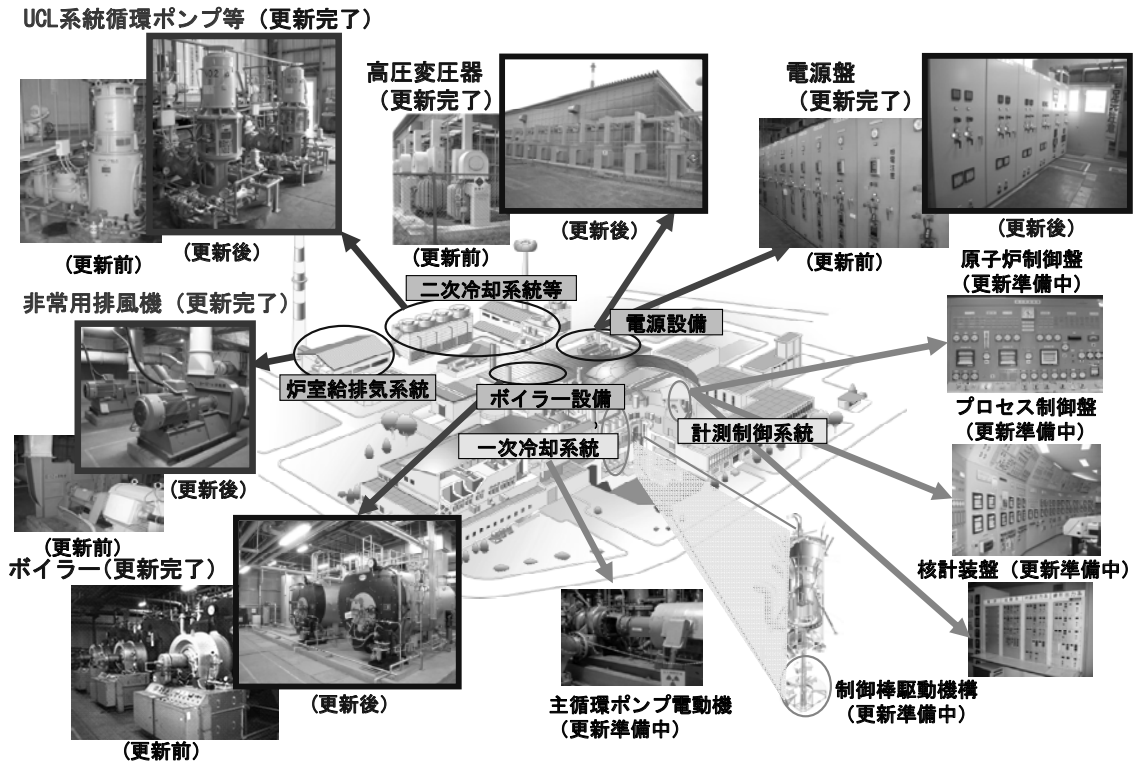


図 2.1.1 JMTR 原子炉機器更新の概要

表 2.1.1 JMTR 原子炉機器の更新工程

項目		年度	H19	H20	H21	H22	H23 (原子炉再稼働)	進捗状況(平成21年3月31日現在)
原子炉本体	ベリリウム枠、ガンマ線遮蔽板、等			設計、製作、据付				製作中
計測制御系統施設	核計装、プロセス計装、安全保護回路				設計、製作、据付			設計中
原子炉冷却系統施設	一次冷却設備、二次冷却設備、等				設計、製作、据付			設計中
放射性廃棄物の廃棄施設	炉室給排気系統排水設備			設計、製作、据付				製作中 (炉室給排気系統は更新完了)
電源設備	高圧電源盤、変圧器、ケーブル等		設計、製作、据付					更新完了
ボイラー等	ボイラー、冷凍機		設計、製作、据付					更新完了
純水製造設備	脱気純水系統、一般純水系統		設計、製作、据付					更新完了

2.2 照射設備の整備

照射設備に関しては、新たな利用ニーズに対応するため、軽水炉材料・燃料の照射設備、医療診断用 RI である ^{99m}Tc の親核種である ^{99}Mo を製造するための設備の整備などを計画している。照射設備整備に係る概略工程を表 2.2.1 に示す。なお、照射設備については、利用者からの外部資金により整備する予定で、現在利用者が資金を確保して設備整備を進めているのは、表中（1）及び（2）である。

表 2.2.1 照射設備整備に係る概略工程

項目	年度	H18	H19	H20	H21	H22	H23 (原子炉再稼働)
(1) 燃料試験 異常過渡試験装置の整備			(概念設計)	(詳細設計)	設備製作	据付	
(2) 材料試験 材料照射試験装置の整備			(概念設計)	(詳細設計)	設備製作	据付	
(3) 新たな産業利用(その1) ^{99}Mo 製造装置の整備		概念設計等				計画中	
(4) 新たな産業利用(その2) Si半導体製造照射装置の整備		概念設計等				計画中	
(5) 燃料試験(検討中) 通常照射試験装置の整備		概念設計等				検討中	

3. JMTR の利用性向上

JMTR 運営・利用委員会を平成 20 年 10 月 17 日（第 2 回）及び平成 21 年 3 月 10 日（第 3 回）に開催した。本委員会は、利用者の意見を的確に反映させる等透明性を確保した JMTR の運営に資するために設置したものである。委員会では、JMTR の利用性を向上させるため、JMTR の稼働率の向上、ターンアラウンドタイムの短縮、世界の試験炉と比べて魅力ある照射費用の実現等について委員から意見や助言を受け、これらを踏まえた利用性向上の検討を進めている。

3.1 稼働率の向上に向けた検討

これまで、JMTR の年間稼働率は最大で 50%程度（年間 180 日運転）であったが、再稼働後は、利用性の向上及び見込まれる照射需要の増大に対処するため、世界レベルの年間稼働率（図 3.1.1 参照）を実現しなければならない。そのため、まず、年間 210 日運転（年間稼働率約 60%）を当面の目標として、稼働率を向上させるための検討を行った。

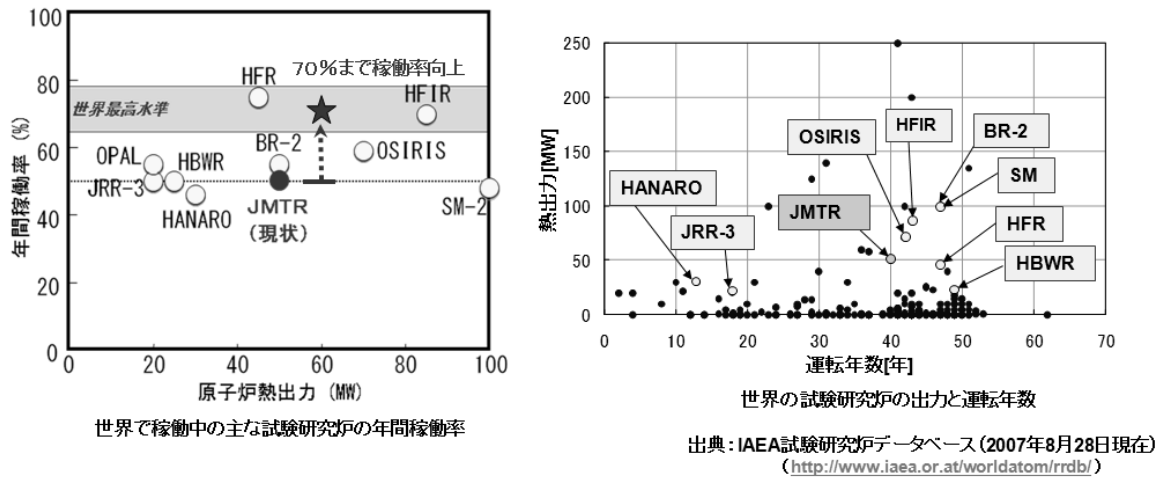


図 3.1.1 世界における試験研究炉の状況

検討結果を図 3.1.2 に示す。原子炉及び照射設備の運転体制の統合による原子炉停止中作業の最適化、原子炉停止中の作業体制、施設定期検査期間中の作業体制の見直し等による作業の効率化及び作業日数の削減により、施設定期検査期間や原子炉停止中作業期間を短縮した。これにより、年間 210 日運転ができる見通しを得た。

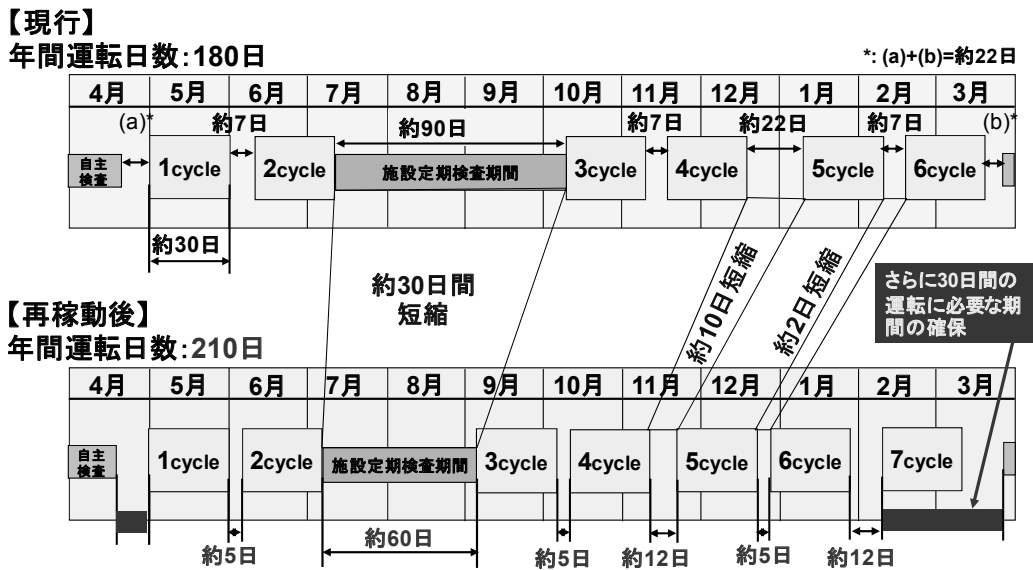


図 3.1.2 再稼働後の運転計画の検討

3.2 ターンアラウンドタイムの短縮

JMTR を利用して照射試験を行う場合、利用申込み後、照射試料を封入するためのキャプセル製作、照射試験、照射後試験を経て、利用者が実測データを得ることとなる。この利用者が申し込みを行ってからデータを得るまでの時間（ターンアラウンドタイム）を短縮させる検討を進めている。

照射試験を行うためのキャプセルには、温度等をオンラインで計測することのできる計測付キャプセルとオンライン計測を行わない無計測キャプセルがあるが、これまでの検討の結果、無計測キャプセルについては、キャプセルの標準化により、製作期間を最大 6 ヶ月程度短縮できる見込みのあることがわかった。

3.3 魅力のある照射費用を実現するための検討

世界の照射試験炉と競争できるよう、市場価格に見合った料金体系について検討を進めている。再稼働後の JMTR の利用料金体系を構築するための準備として、オランダ、ベルギー、韓国等の試験研究炉の照射利用に関する調査を実施した。その結果、将来照射需要が見込まれる照射利用として、RI の需要についてわずかではあるが安定した増加傾向があることがわかった。さらに、国内において 100%を海外からの輸入に頼っている医療診断用放射性同位元素 ^{99m}Tc の親核種である ^{99}Mo 等の RI について、安定供給の観点から国内での製造への期待があること、その反面製造コストも重視しており、海外の製造コストと同程度となるような利用料金の設定が必要であることがわかった。

そのため、利用者からの要望に柔軟に答えられるよう、RI 製造に係る利用料金設定の検討を開始した。

3.4 ^{99}Mo 国産化に関する検討

^{99}Mo (半減期約 66 時間) の娘核種である ^{99m}Tc (半減期約 6 時間) は、がんをはじめとする疾病の画像診断において欠かせない重要な放射性同位元素であり、我が国は現在使用される ^{99m}Tc 製剤の原料である ^{99}Mo の全量を海外からの輸入に依存している。

しかしながら、核分裂法 ((n, f) 法) により、高濃縮ウランの核分裂反応を利用して ^{99}Mo を製造している海外の原子炉 (試験研究炉) 5 基は高経年化が進んでおり、中でも ^{99}Mo 全世界供給量の約 43%を賄っているカナダ原子力公社が有する NRU は、 ^{99}Mo 生産ライセンス (有効期限 2011 年まで) の失効が迫り、確実に更新されるかは定かではない。

また、平成 21 年 1 月 29 日～30 日にパリで開催された「医療用 RI の供給確保に関する OECD/NEA 国際会議」において、今後の ^{99}Mo 安定供給の課題が議論された。この会議は、 ^{99}Mo の安定供給が危機的状況にあることを深刻に受け止めているカナダ政府からの要請で開催されたと伝えられている。

^{99}Mo の安定供給は世界各国共通の課題であるが、特に、世界の全生産量の約 14%を消費している我が国にとって、必要不可欠な量の ^{99}Mo を安定的に確保するための ^{99}Mo の国産化は喫緊の課題であると同時に、国際的な責任を果たす観点でも重要である。

このような情勢に鑑みて、原子力機構の理事長の諮問機関である JMTR 運営・利用委員会の下に「 ^{99}Mo 国産化検討分科会」を設置し、産学協力のもとで ^{99}Mo の国産化に向けた技術的検討を開始した。

分科会では、照射後の処理等の面で、核分裂法に比較して利点のある中性子放射化法 ((n, γ) 法) による ^{99}Mo の製造及び製品化についての検討課題の抽出及び整理を行い (図 3.4.1 参

照) JMTR を用いた ^{99}Mo 製造の技術的検討を行った。照射ターゲットについて、試作試験の結果、焼結密度約 95%T.D.の三酸化モリブデンペレットが製造可能であること、JMTR の水カ
ラビット照射装置を利用することにより、約 1000Ci/week の ^{99}Mo が製造可能であることを明
らかにした。今後は、 ^{99}Mo 吸着剤に係る検討等を行う予定である。

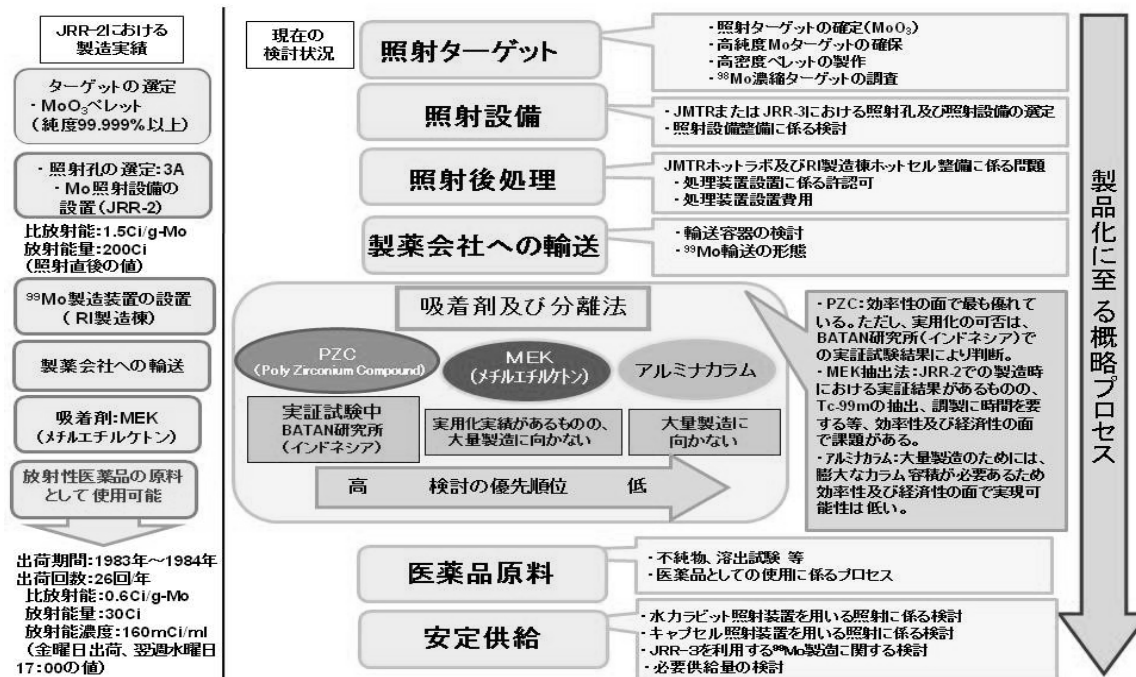


図 3.4.1 ^{99}Mo 国産化に関する技術検討概要と検討課題の整理

4. 照射技術の開発

4.1 照射試験開発棟の整備

照射試験に必要なキャプセルの開発を行うため、大洗研究開発センターの旧 RI 利用開発棟の一部を改築し、照射試験開発棟として整備した。整備工事は平成 20 年 8 月に完了し、高性能表面観察装置、真空電気炉、電子天秤等を設置して供用を開始した。

4.2 軽水炉燃料及び材料照射に係わる開発

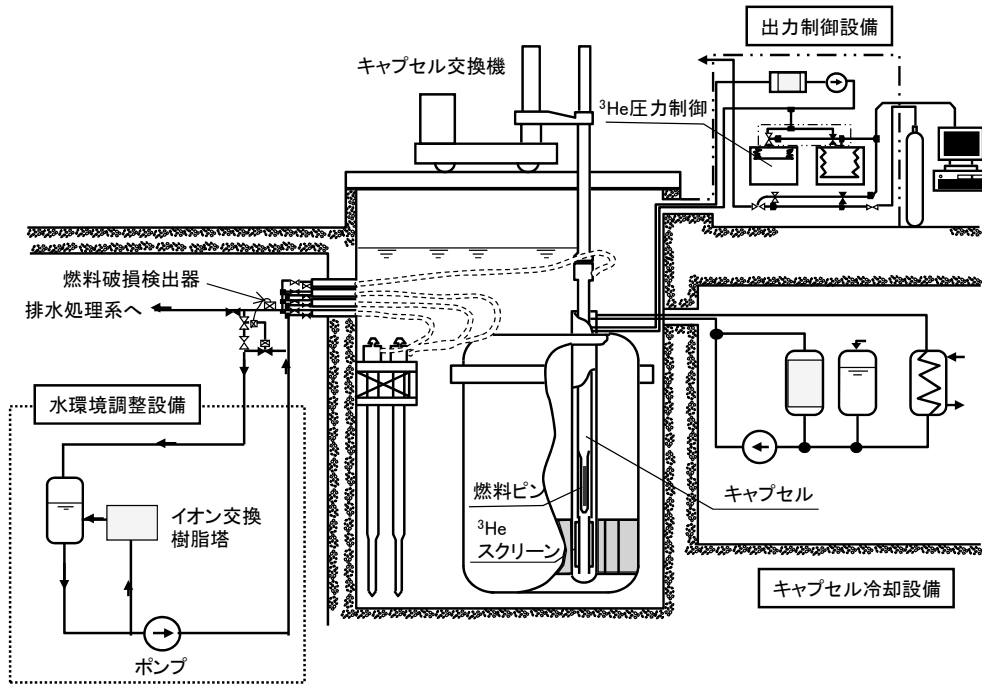
4.2.1 燃料照射試験装置の開発

高燃焼度に達した軽水炉燃料 (ウラン燃料及び MOX 燃料) の安全性評価を行うため、軽水炉燃料試料の出力急昇試験用の燃料異常過渡試験装置の開発を行っている。

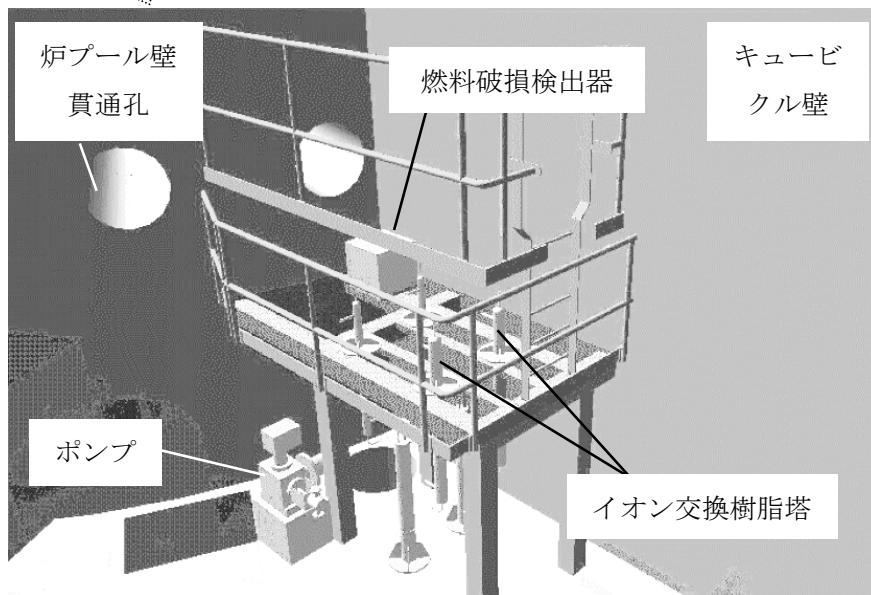
本試験装置は、キャプセル冷却設備、水環境調整設備、出力制御設備等から構成し、平成 20 年度は、主に水環境調整設備の製作設計を進めるとともに、装置の核燃料物質使用変更許可及び原子炉施設の設工認申請を進めた。さらに、装置を設置するキュービクル内の寸法を 3D レーザ

一で計測し、その結果に基づき機器の配置設計を行った。燃料異常過渡試験装置の概要を図 4.2.1 に示す。

なお、本開発は経済産業省原子力安全・保安院からの受託事業「平成 20 年度軽水炉燃材料詳細健全性調査」に関する成果の一部である。



(a) 燃料異常過渡試験装置の系統図



(b) 水環境調整設備のキュービクル内機器配置

図 4.2.1 燃料異常過渡試験装置の概要

4.2.2 燃料異常過渡試験キャプセルの開発

燃料異常過渡試験装置を利用して照射試験を行うための燃料異常過渡試験キャプセルの開発を行っている。

燃料異常過渡試験キャプセルは、燃料棒伸び、燃料中心温度や内圧などの計測を行いながら出力急昇時における燃料挙動を調べることを目的としている。これらには、燃料の伸び測定用キャプセル、中心温度及び FP ガス圧測定用キャプセル、また、燃料試料の出力校正を行うためのヒータキャプセルがあり、平成 22 年度までに製作する予定である。平成 20 年度は、キャプセルの製作設計を進めた。また、キャプセルの核燃料物質使用変更許可及び原子炉施設の設工認の申請を進めた。表 4.2.2 に基本設計条件を示す。

FP ガス圧測定用キャプセルに使用する FP ガス圧力計に関しては、差動トランスをセラミック被覆線から信頼性の高い MI ケーブルに変更し、5MPa 及び 10MPa 用の 2 種類のセンサーを試作した。試作した FP ガス圧力計を用いて、室温及び 300℃にて性能試験を実施した結果、最大誤差±1.8%F.S で計測できる見通しが得られた。試作した FP ガス圧力計の概念図を図 4.2.2 に示す。

なお、本開発は、経済産業省原子力安全・保安院からの受託事業「平成 20 年度軽水炉燃材料詳細健全性調査」に関する成果の一部である。

表 4.2.2 キャプセルの基本設計条件

項 目		条 件
O S F - 1 冷 却 材	運転温度 (炉内管入口温度)	45 °C
	キャプセル外面流速	約 5 m/s
	最高使用圧力	1.76 MPa[gauge]
燃料試料の最大発熱量		24 kW
核的制限値	ループ内試料の落下又は流出する可能性のある部分の等価反応度	+0.5 %Δk/k 以下
	ループ内試料の挿入、取出しによる反応度の変化	+0.1 %Δk/k 以下
設 計 震 度	水 平	0.6
	垂 直	0.3
最大高速中性子照射量 (E > 1MeV)		1×10 ²⁶ m ⁻²
ガンマ加熱率 (鉄相当)	D-9 孔	2.5 W/g

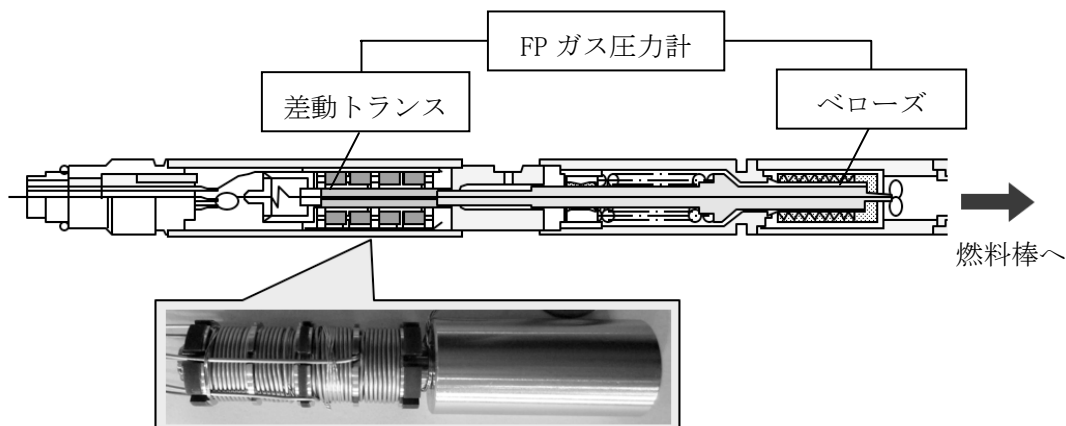
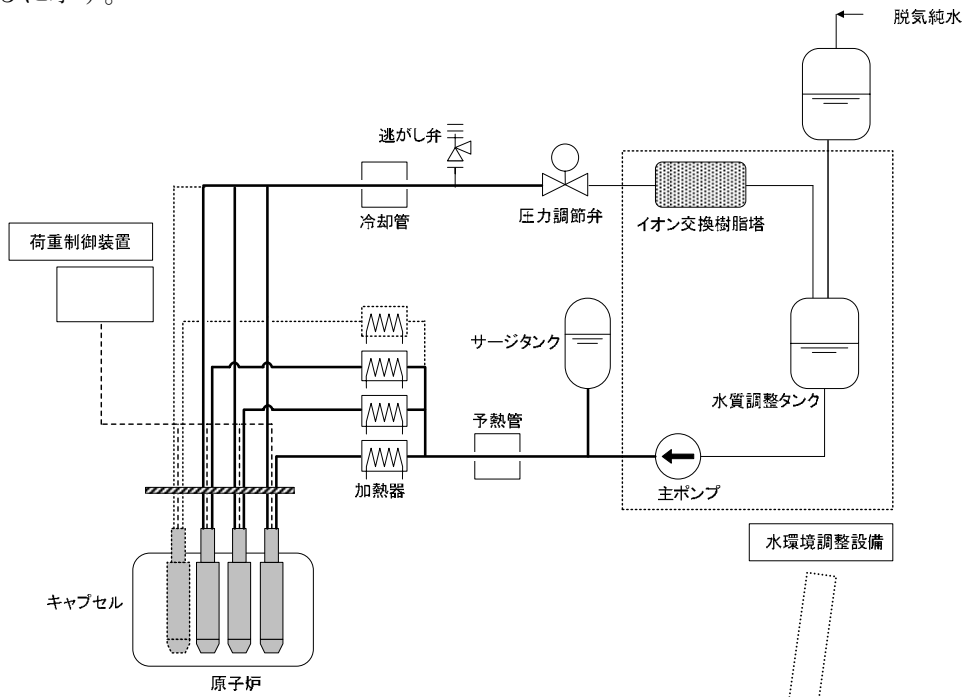


図 4.2.2 FP ガス圧力計の概念図

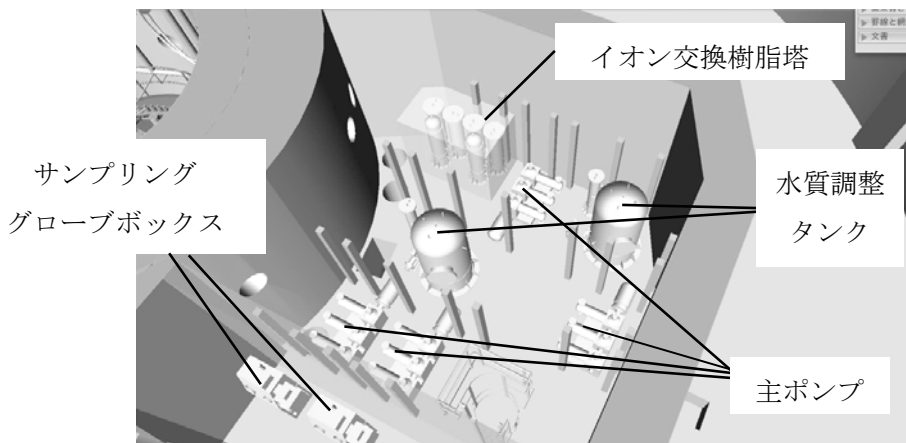
4.2.3 材料照射試験装置の開発

軽水炉の炉内構造物に関して、照射環境下における応力腐食割れ（SCC）評価に必要な中性子照射試験を実施するため、材料照射試験装置を開発している。

本装置は、BWR の温度、圧力、水質等の炉内環境を模擬して照射を行う BWR 用照射装置と、BWR 及び PWR の温度、圧力、水質等の炉内環境を模擬する水化学試験用照射装置からなる。ここで、BWR 用照射装置は、水環境調整設備、荷重制御装置及びキャプセル等からなる。また、水化学試験用照射装置は、水環境調整設備及びキャプセル等からなる。BWR 用照射装置の系統構成を図 4.2.3 に示す。



(a) BWR 用照射装置の系統図



(b) BWR 用水環境調整設備の機器配置（キュービクル内1階）

図 4.2.3 BWR 用照射装置の概要

平成 20 年度は主に水環境調整設備の製作設計を進めるとともに、装置を設置するキュービクル内の寸法を 3D レーザーで計測し、その結果に基づき機器の配置設計を行った。

なお、本開発は経済産業省原子力安全・保安院からの受託事業「平成 20 年度軽水炉燃材料詳細健全性調査」に関する成果の一部である。

4.2.4 照射下 SCC き裂進展試験ユニットの開発

軽水炉の炉内構造材料に使用されているオーステナイト系ステンレス鋼の中性子照射下での照射誘起応力腐食割れ (IASCC) に関する挙動究明のため、照射下 SCC き裂進展ユニット (以下、試験ユニットという。) を開発している。試験ユニットは、材料照射キャプセル内に装荷した試験片に荷重を負荷し、SCC き裂進展試験を行うために必要な装置であり、照射環境下、高温高圧水中での高精度な荷重制御及び 6 端子電位差法によるき裂進展計測が要求される。また、破壊力学的に有効な応力拡大係数(K 値)となるき裂進展試験を実施するために、大型の試験片 (0.5T-CT 試験片) を用いることが不可欠である。このため、昨年度実施した 0.5T-CT 試験片に対応可能なテコ式試験ユニットの構造検討結果に基づいてモックアップユニット (図 4.2.4 参照) を試作し、炉外試験等を実施した。炉外試験は、ロードセルを用いた荷重測定、疲労予き裂を導入しながらの電位差測定等を行った。

荷重測定の結果、試験ユニットは、必要荷重を負荷できること、機械的な機能性が保たれることが明らかとなった。また、電位差測定の結果、試験片とウイングとの接合箇所によるノイズが確認されたが、き裂進展に伴う電位差の変化を測定できる見通しが得られた。今後は、改良を加えたモックアップユニットによって同様の炉外試験を実施し、データ取得及び解析評価を行い、実機用ユニット構造に反映させる計画である。

なお、本開発は、経済産業省原子力安全・保安院からの受託事業「平成 20 年度軽水炉燃材料詳細健全性調査」に関する成果の一部である。

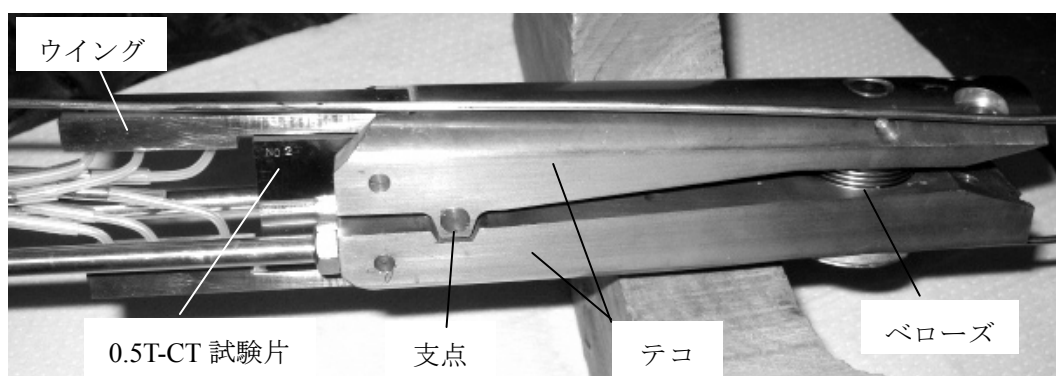


図 4.2.4 SCC き裂進展モックアップユニット

4.2.5 SCC 環境計測技術の開発

水化学環境の指標の一つである腐食電位を炉内の照射環境下でその場測定するため、照射下でも耐久性の高いECPセンサーの開発を進めている。

本年度は、ECPセンサーの材料選定を行い、模擬体（内部構造のないもの）の試作試験を行った。模擬体は、実際の形状を模擬するため安定化ジルコニアと42合金の円筒同士のロウ付けで試作した。接合形状としては、従来型（A型）と接合部の残留応力を低減できるS型を選定した。試作したA型及びS型の模擬試験体を図4.2.5に示す。また、前年度の検討において、突き合わせ構造（T型）でもSUS430を選定すれば残留応力が低下する可能性があることが分かったため、突き合わせ構造（外径8mm、内径4mm）でも試作を行った。この結果、A型に関しては3体中3体、S型に関しては2体中1体、T型に関しては2体中2体が耐圧試験までの健全性を確認できた。

なお、本事業は経済産業省原子力安全・保安院からの受託事業「平成20年度軽水炉燃材料詳細健全性調査」に関する成果の一部である

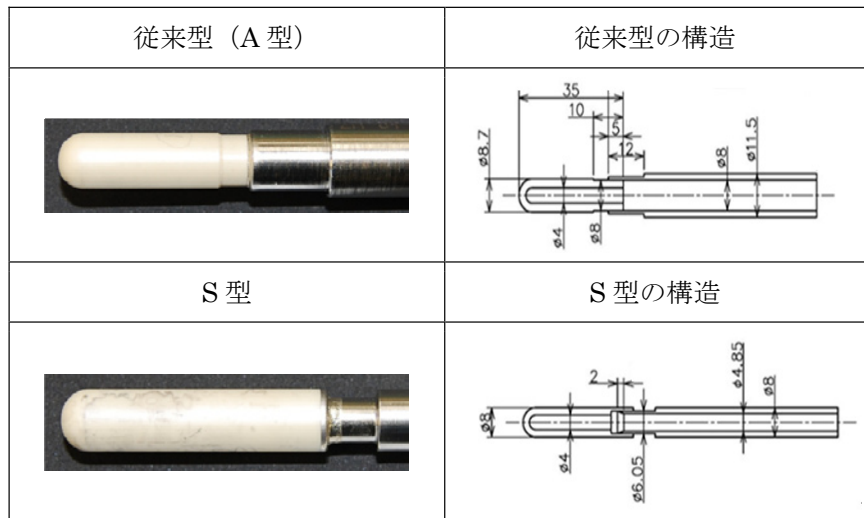


図 4.2.5 A型及びS型の模擬試験体

4.3 先進照射技術の開発

4.3.1 セラミックス酸素濃度センサーの開発

材料の照射試験において、照射中の環境を把握することが重要となっている。たとえば、軽水炉の水環境を模擬した照射試験では、照射試料の腐食特性を解明する上で、酸素や過酸化水素などの濃度をその場で計測することが要求されている。一方、JMTRで用いる照射キャプセルの外径は最大でΦ65mmと限られているため、小型でかつ高精度なセンサーを開発する必要がある。このため、酸素イオン導電体である安定化ジルコニア（YSZ）と白金を一体化させたセラミックス酸素濃度センサーの開発を進めている。

本年度は、センサーの製作性の検討として、アルミナ絶縁部及びYSZ及び白金を一体成形する方法として放電プラズマ焼結（SPS）法を採用し、適切な焼結温度及び荷重範囲を調べた。この

結果、適切な製作条件を選定することによって、一体型のセラミックス酸素濃度センサーを製作できる見通しが得られた。試作したセンサーの構造と試作試験の結果を図 4.3.1 に示す。

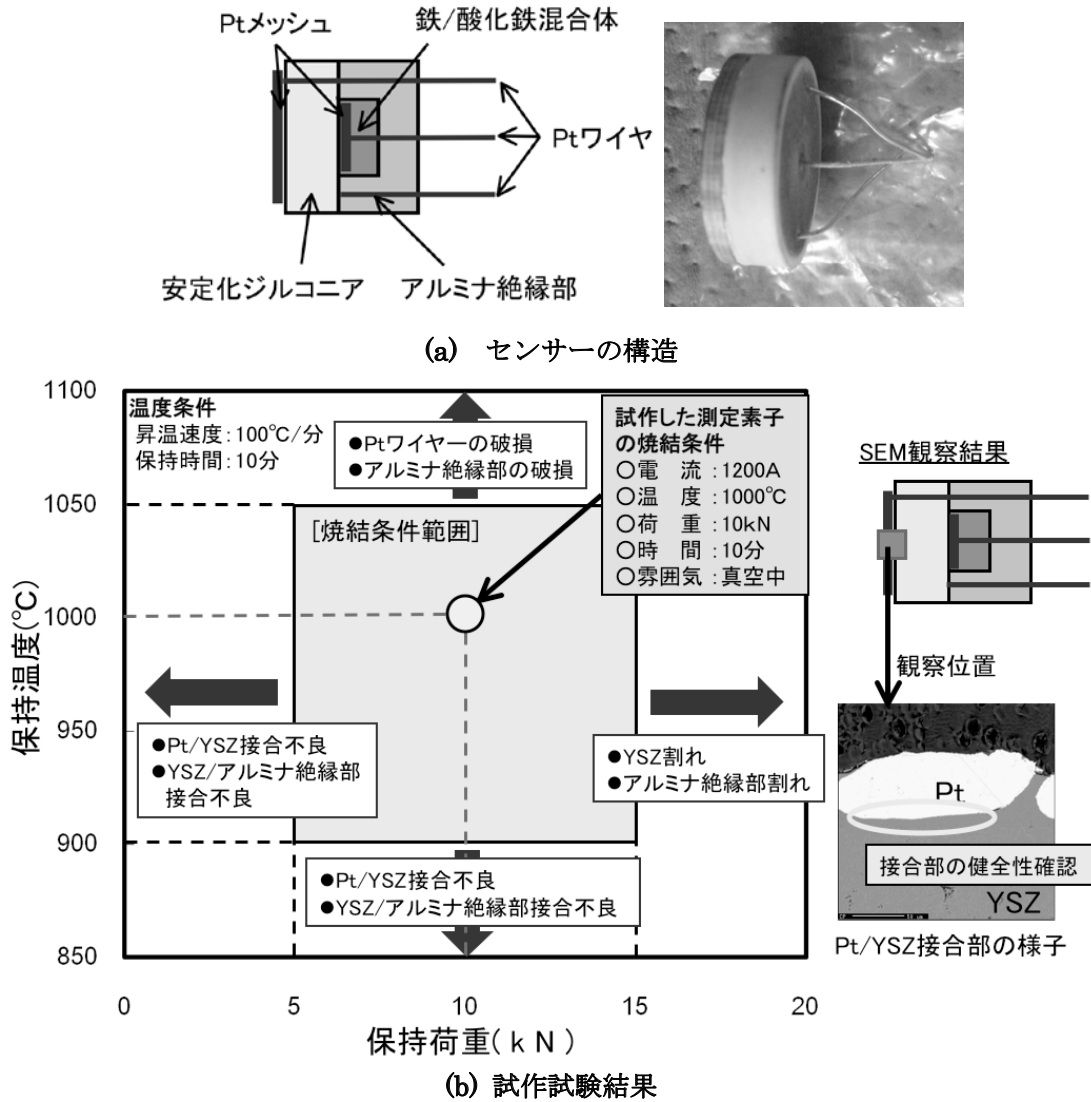


図 4.3.1 酸素センサーの構造と試作試験結果

4.3.2 溶液照射法による ⁹⁹Mo 製造技術の開発

溶液照射法は、放射性医薬品として利用されている ^{99m}Tc の親核種である ⁹⁹Mo を製造する新たな手法として提案しているものである。本方法は、モリブデン水溶液を原子炉内で中性子照射し、(n, γ) 反応とモリブデン吸着剤 PZC を利用することによって、従来の製造方法と比べ効率的に低コストで ⁹⁹Mo を製造できる。昨年度までの検討結果から、照射ターゲットとして水溶液中のモリブデン溶存量が多く水溶液が化学的に安定であるモリブデン酸カリウム水溶液、キャプセルや配管等の構造材料として腐食の少ないステンレス鋼を利用できる見通しが得られた。

今年度は、照射キャプセル等の設計に必要なとなるモリブデン酸カリウム水溶液の物性データを測定するとともに、昨年度に実施した γ 線照射下でのモリブデン酸カリウム水溶液とステンレス鋼の両立性試験で使用した水溶液について放射化分析を行うとともに、モリブデン酸カリウム水溶液中でのステンレス鋼の長期腐食試験を行うための試験装置を製作した。

放射化分析では、不純物として Na 及び W が検出された。Na 及び W は、ともに K 及び Mo と同族元素であるために混入しやすいと考えられる。特に、Na は γ 線エネルギーが高いために遮へい設計に影響すると考えられる。長期腐食試験としては、水溶液を静置して構造材料を浸漬する静置型試験と、水溶液を循環しながら構造材料を浸漬する循環型試験のための装置製作を行った。循環型試験装置の概要を図 4.3.2 に示す。

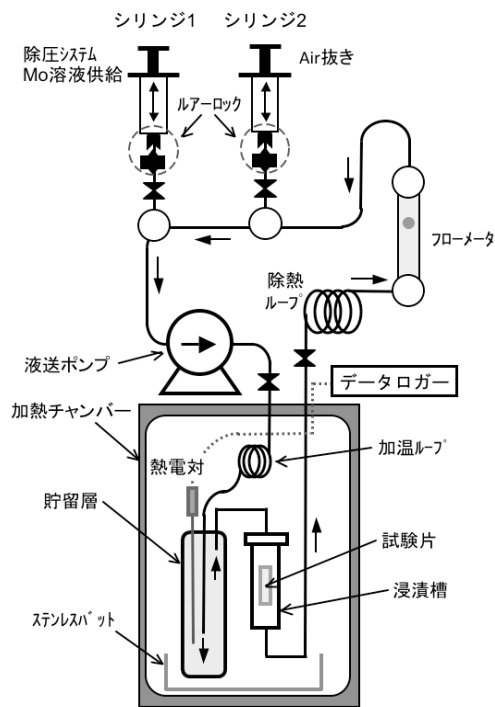


図 4.3.2 長期腐食試験装置 (循環型)

4.3.3 ベリリウムリサイクル技術開発

JMTR の原子炉内構造物である金属ベリリウム (Be) は、中性子吸収断面積が小さく散乱断面積が大きいため中性子反射体として使用されているが、スエリング等による曲がりを生じるため、定期的に交換している。交換期間を可能な限り長くできれば、JMTR の稼働率向上や放射性廃棄物低減に繋がるため、金属 Be 製中性子反射体の長寿命化のための研究開発を進めている。

本年度は、これまで使用していた Be 枠の製造方法や不純物である酸化ベリリウム (BeO) の含有量の異なった 2 種類の金属 Be (表 4.3.3) について、JMTR を用いて照射した試料の照射後試験を実施し、これらの金属 Be の照射効果を調べた。機械的特性評価の結果、未照射 S-65C 及び S-200F の引張特性は、室温及び 200°C ではほぼ同じ特性であったが、約 $1.5 \times 10^{25}/\text{m}^2$ ($E > 1\text{MeV}$)

まで照射した S-65C は、これまで使用してきた S-200F よりも引張強度が高いことが分かった(図 4.3.3)。本成果による照射済 Be の照射特性データは、長寿命化のための照射試験用材料選定に活用される。なお、本年度 10 月に国際科学技術センター (ISTC) のプロジェクトとして「照射済ベリリウムのリサイクル技術」が承認され、カザフスタン共和国で照射済ベリリウムのリサイクル試験を実施することになった。このため、JMTR で照射したベリリウムをカザフスタン共和国に輸送するための検討を開始した。

表 4.3.3 JMTR 予備照射試験に用いた金属ベリリウムの特性

金属ベリリウムのグレード	S-200F	S-65C
製造方法	VHP (真空ホットプレス)	
機械的特性		
引張強度 (MPa)	339	330
0.2% 耐力 (MPa)	265	255
伸び (%)	3.9	3.7
元素 (wt%)		
Be	99.1	99.4
BeO	1.1	0.7
Al	0.04	0.02
C	—	—
Fe	0.10	0.06
Mg	0.013	< 0.01
Si	0.03	0.03
他の元素	—	—

[照射条件] 照射温度: ~50°C (炉水温度)、中性子照射量: $1.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ ($E > 1.0 \text{ MeV}$)

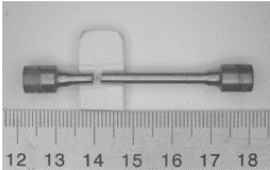
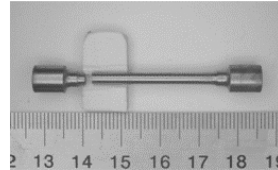
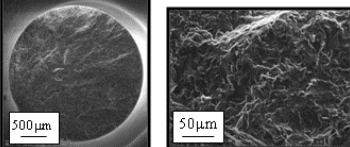
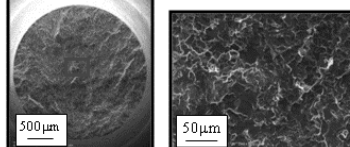
	S-65C	S-200F
引張試験条件	25°C (大気中)	25°C (大気中)
破断強度	392 MPa	344 MPa
伸び	2.8%	2.4%
引張試験後の 外観写真		
破断面のSEM観察		

図 4.3.3 照射済 Be の引張試験結果

4.4 JMTR 照射場評価の高精度化のための検討

材料試験炉 JMTR を用いた照射試験のための解析評価では、実測値に比較して、高速中性子束は±10%程度、熱中性子束は±30%程度、ガンマ加熱率は−3%〜+14%の精度で各々評価してきた。これらの評価精度は世界的に見ても見劣りするものではないが、世界の照射試験炉共通で熱中性子束の評価精度だけが高速中性子束レベルまで改善されず、これまで許容されてきた。一方、JMTR の改修・再稼働に向け、照射利用者から技術的価値の高い照射データの提供が求められている。そのため、JMTR の再稼働（平成 23 年度）までに熱中性子束について、現行の±30%から±10%程度まで評価精度を高めるための検討を開始した。

高速及び熱中性子束の評価には、3 次元連続エネルギーモンテカルロコード MCNP (Ver.4B) 及び核データライブラリ FSXLIBJ3R2 (JENDL-3.2 に基づく) を使用している。中性子束評価の照射領域依存性について調査した結果、高速中性子束では見られなかったが、熱中性子束の場合には、ベリリウム反射体領域 2 層目及びアルミニウム反射体領域 1 層目において計算値が測定値に比較して、特に大きくなる傾向が見られた (図 4.4.1 及び図 4.4.2)。これから、熱中性子束評価精度を低下させている原因は、主に熱エネルギー領域における中性子の散乱、吸収過程にある可能性が高いことがわかった。

今後は、熱エネルギー領域における中性子の散乱、吸収過程について検討する予定である。

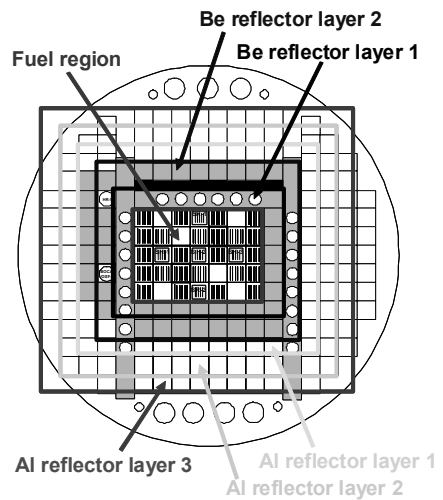


図 4.4.1 JMTR 炉心配置

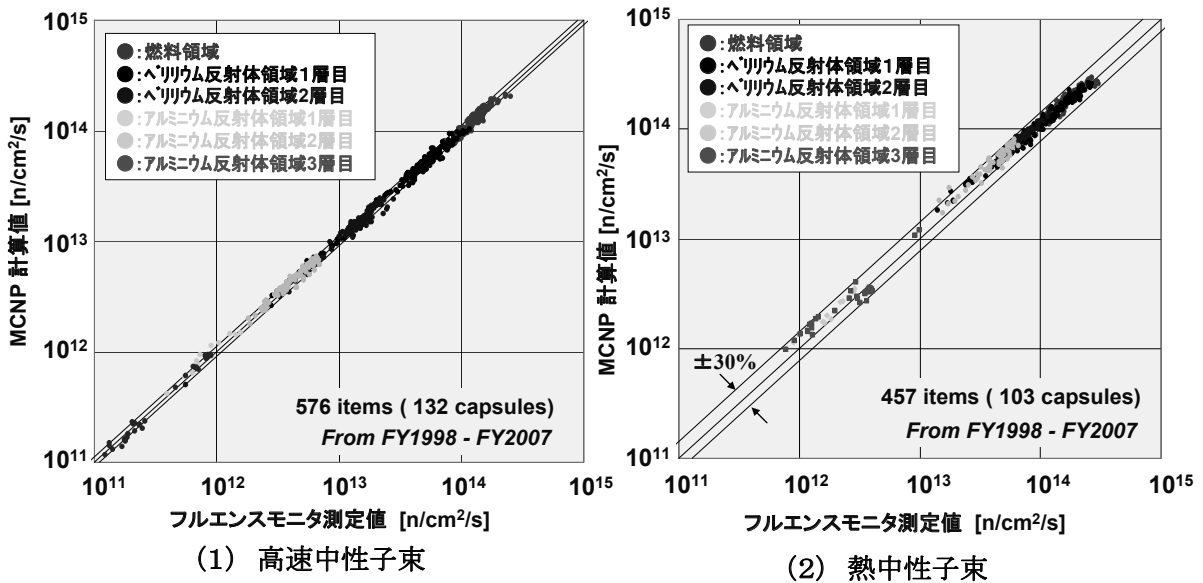


図 4.4.2 JMTR における中性子束評価の現状

5. 国際協力

5.1 照射試験炉ネットワークの構築

JMTR 再稼働後の照射試験炉ネットワークを構築するため、平成 20 年 7 月 16 日（水）～17 日（木）に大洗研究開発センター安全情報交流棟研修ホールにおいて、世界 11 カ国から約 140 名が参加し、「汎用照射試験炉に関する国際会議」を開催した（図 5.1.1）。本国際会議では、口頭発表やパネル討論により、照射試験の世界標準化に向けた活動等の一環として、照射試験炉の現状と将来計画、照射試験に必要な照射技術等について情報交換を行うとともに、急速に進む利用者のグローバル化に対応して照射利用を推進するための世界的照射試験炉ネットワークの構築に関する意見交換を行った。なお、次回の会議は、米国 ATR 炉にて、平成 21 年度秋頃に開催する。

さらに、アジア地域での照射試験炉ネットワーク構築に向けて、韓国原子力研究所(KAERI)と互いに研究員を派遣すると共に、マレーシア、インドネシアに研究員を派遣し、照射試験及び照射後試験に関する情報交換を行った。



図 5.1.1 汎用照射試験炉に関する国際会議

5.2 韓国原子力研究所との研究協力

韓国原子力研究所(KAERI)との研究協力では、原子炉の運転・管理及び利用の分野、照射試験技術開発の分野及び照射後試験技術開発の分野において、情報交換を進めている。

平成 20 年度は、上記 3 つの研究協力分野に関連し、照射試験及び照射後試験技術に関する第 6 回日韓セミナーを KAERI において開催（平成 20 年 11 月 5 日～7 日）し、情報交換を行った。本セミナーは、日本原子力研究所（旧、JAERI）と KAERI との原子力の平和利用分野における協力のための取決めに基づき、1992 年から 3 年毎に JAERI（旧）／KAERI で交互に開催してき

たものである。なお、前回第5回日韓セミナーは、JAEA（大洗研究開発センター）にて開催（2005年11月16日～18日）している。

5.3 スタズビックグループとの研究協力

日本原子力研究開発機構と、スウェーデン王国スタズビックグループ（Studsvik AB）との間の「スタズビックグループと日本原子力研究開発機構との間の原子力開発分野における協力のための実施取決め」（平成19年12月12日締結）に基づき、平成20年7月18日に大洗研究開発センターにて定例会合を実施し、研究協力テーマである「リサイクルを含む放射性廃棄物処理技術」及び「照射試験炉における中性子照射試験に関する技術開発」に関し、双方から現状と課題等について情報交換を行った。

5.4 カザフスタン国立原子力センターとの研究協力

「原子力研究開発における将来の協力のためのカザフスタン国立原子力センターと日本原子力研究開発機構との覚書」に基づき、アルマティのNNC・核物理研究所(INP)を平成20年4月に訪問し、試験研究炉に関する原子力技術の協力項目について情報交換を行った。一方、平成21年2月2日に「日本原子力研究開発機構とカザフスタン原子力センターとの間の原子力科学分野における研究開発協力のための実施取決め」が締結され、試験研究炉に関する原子力技術の協力項目の検討を開始した。

6. あとがき

平成23年度のJMTR再稼働に向け、平成20年度は、原子炉機器等の一部更新及び利用者からの要望による新たな照射設備の整備を計画通り進めた。また、これと並行して、利用者に技術的価値の高い照射データを提供するため、照射試験技術の開発や原子炉稼働率の向上などの取組み、さらにアジアの中核試験炉として国際的にも活用される研究基盤を構築するため、照射試験炉の国際的拠点化などの取組みを行った。

平成21年度からは、JMTR再稼働に向けた照射利用の公募を開始するなどJMTRの再稼働に向けた準備作業が本格化する予定である。今後のJMTRの改修、再稼働に向けた取組みに期待されたい。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、内容等について貴重なご意見を頂きました伊与久 達夫・研究主席に深く感謝の意を表します。

付録1 原子炉機器の一部更新の現状

原子炉機器の更新は、平成19年度より4年間で実施する計画である。計測制御系統、制御棒駆動装置、一次冷却系統、二次冷却系統、ボイラー・冷凍機、電源設備、排水設備、炉室給排気系統などの更新機器のうち、平成19年度は、冷凍機の更新、脱気純水製造設備の一部更新などを計画通り完了させた。

平成20年度のJMTR原子炉機器の一部更新については、電源設備、ボイラー等、放射性廃棄物の廃棄施設、原子炉冷却系統等に関する更新工事を計画通り実施した。また、文部科学省への設計及び工事の方法の認可（以下、「設工認」と略記）が必要なUCL（Utilities Cooling Loop）系統、炉室給排気系統、ベリリウム枠、ガンマ線遮へい板、一次冷却系統、二次冷却系統の一部更新について、平成21年3月までに設工認申請を全て完了した。

今後は、計測制御系統施設のうち核計装、プロセス計装、安全保護回路及び制御棒駆動機構、原子炉冷却系統施設のうち一次冷却系統の主循環ポンプの電動機、充填ポンプ、移送ポンプ等、二次冷却系統の循環ポンプ、補助ポンプ等、放射性廃棄物の廃棄施設のうち排水設備等の更新を行う予定である。

平成20年度までに更新を完了した機器及び更新準備中の原子炉機器について、詳細を以下に示す。

1. 更新を完了した機器

(1) 電源設備

平成19年度から更新機器の設計を開始し、平成20年4月～平成21年1月にかけて高圧電源盤、変圧器、ケーブル等について、既存設備の撤去を行い、これら更新機器の搬入、据付けを行った。高圧受配電盤及び高圧変圧器の更新前後の状況を図A-1及び図A-2に示す。

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、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、信頼性の向上を図った。ケーブルについては、CVケーブルから難燃性のケーブルに変更することにより、火災に対する安全性の向上を図った。



(更新前)

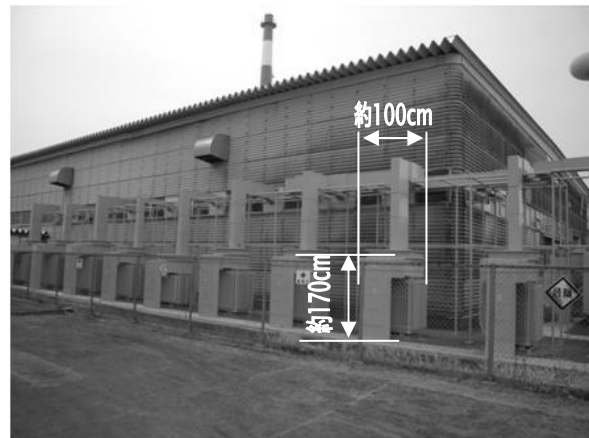


(更新後)

図 A-1 高圧受配電盤の更新



(更新前)



(更新後)

図 A-2 高圧変圧器の更新

(2) ボイラー等

JMTR 設置当初から約 40 年に渡り継続使用している原子炉建家内の冷房を目的とした吸収式冷凍機、冷暖房を目的としたボイラーの更新を行った。

吸収式冷凍機の更新にあたっては、夏場の冷房を行うにあたり、運転時間の細かな調整ができるように、熱源としてボイラーの熱を使用するこれまでの吸収式冷凍機からボイラーの熱がいらぬターボ冷凍機に変更した。冷凍機の更新前後の状況を図 A-3 に示す。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についても、

従来に比較して約 40%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のため、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。

ボイラーの更新にあたっては、JMTR 再稼働に向け、ボイラーに必要な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、ボイラーの基数をこれまでの 4 基から 2 基に変更した。ボイラーの更新前後の状況を図 A-4 に示す。

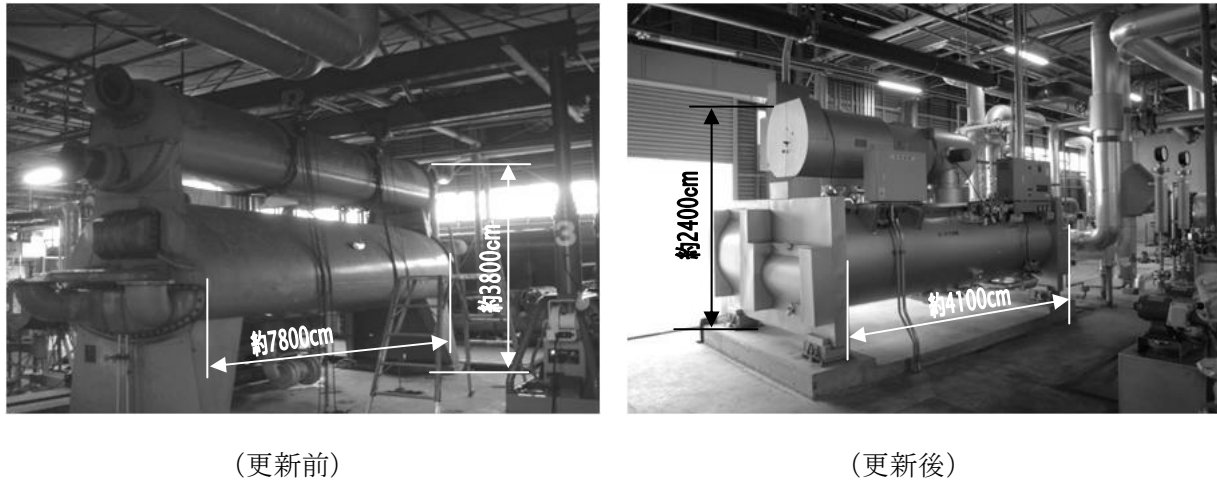


図 A-3 冷凍機の更新

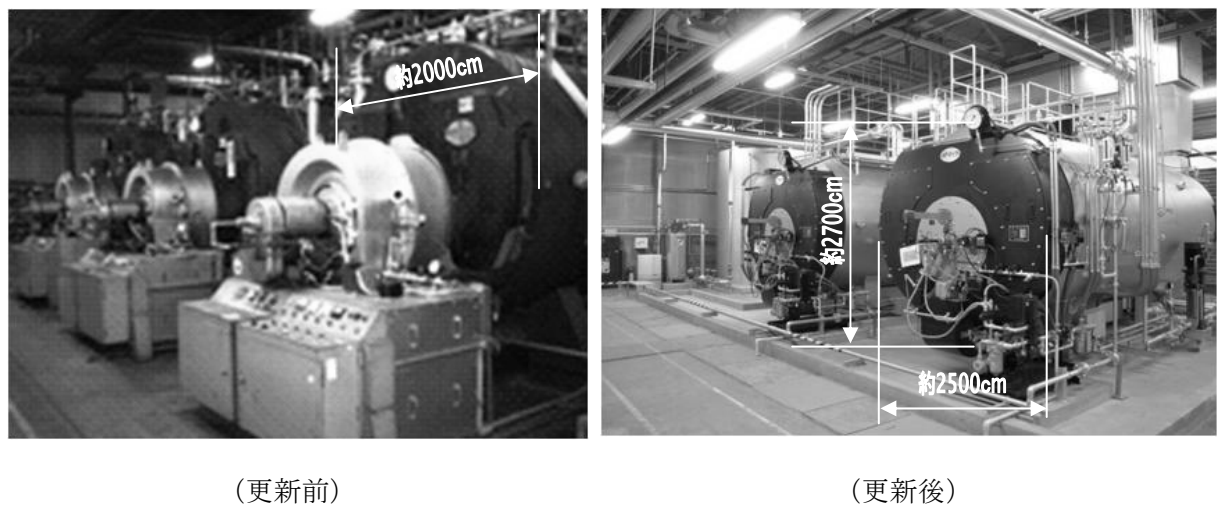


図 A-4 ボイラーの更新

(3) 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おいては、排風機及びその制御回路等の更新工事を実施した。排風機の更新にあたっては、文部科学省への設工認申請が必要であるため、更新工事に先立ち、平成 20 年 5 月 27 日に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、文部科学省が実施する使用前検査を平成 21 年 3 月 30 日に受検し、使用前検査合格証が交付された。更新の内容として、排風機及び送風機については、非常用排風機のファン、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、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。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ため保守が簡単で堅牢であることから、保守性の向上が図れる。

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、故障の低減等が図れる。

非常用排風機の更新前後の状況を図 A-5 に示す。

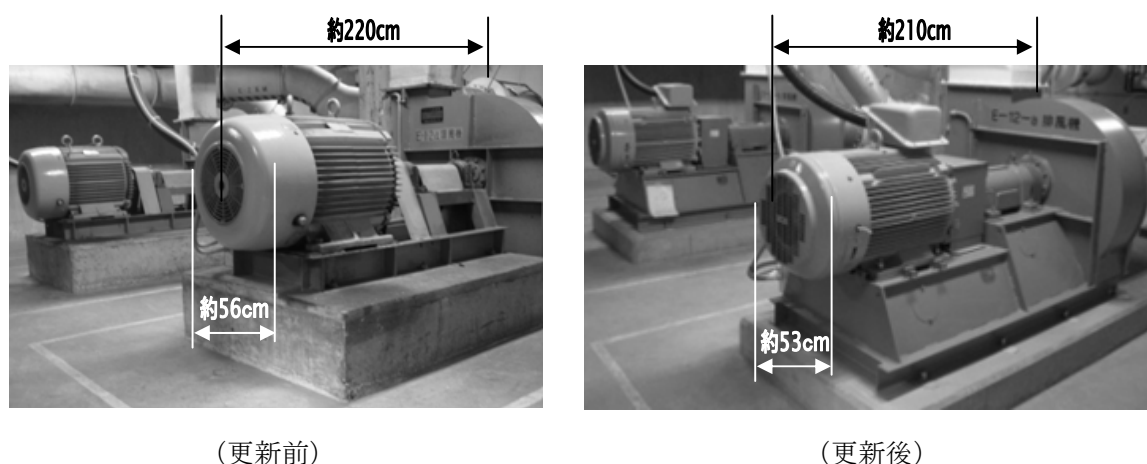


図 A-5 非常用排風機の更新

(4) 原子炉冷却系統施設

原子炉冷却系統施設のうち 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文部科学省への設工認申請が必要であるため、更新工事に先立ち、平成 20 年 5 月 27 日に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、文部科学省が実施する使用前検査を平成 21 年 3 月 30 日に受検し、使用前検査

合格証が交付された。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 再稼働後の安定運転、保守用部品の調達の観点から更新した。

UCL 系統循環ポンプの更新前後の状況を図 A-6 に示す。

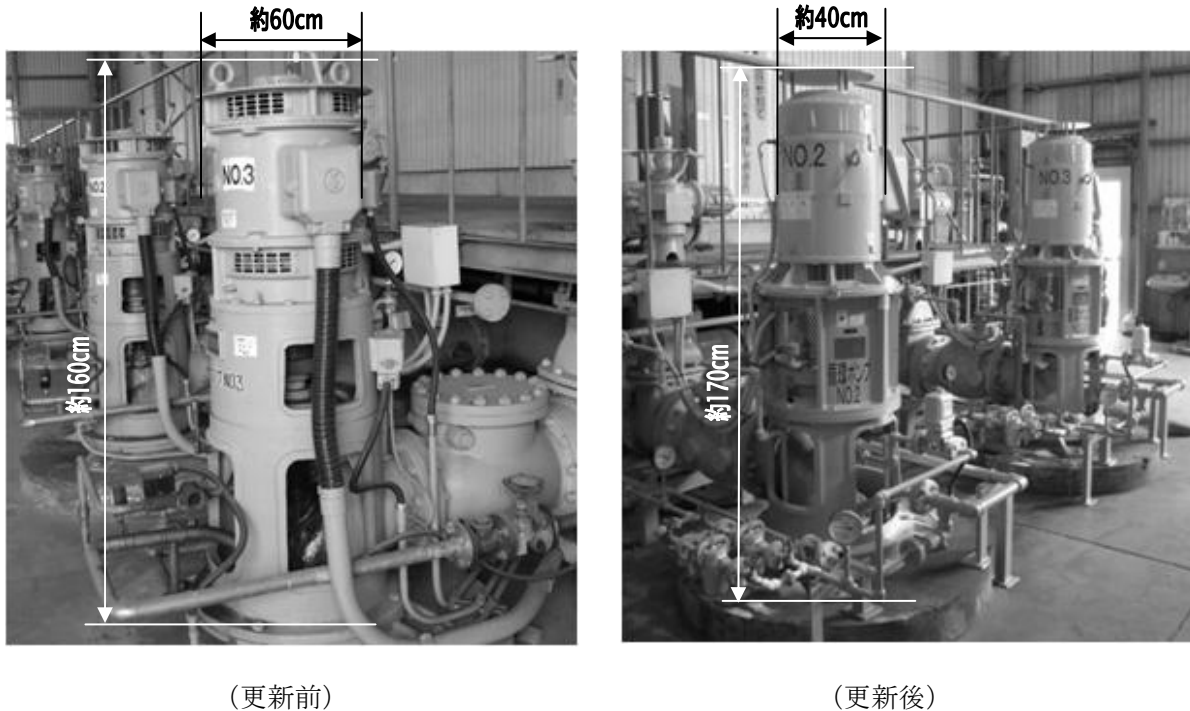


図 A-6 UCL 系統循環ポンプの更新

2. 更新準備中の機器

(1) 計測制御系統施設

計測制御系統施設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こと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で、マンマシーンインターフェイスの改善を図る。また、制御棒駆動機構は構成する部品を交換することで、信頼性及び保守性の向上を図ることとする。更新の準備として、平成 21 年 3 月 27 日に設工認申請を実施した。

(2) 原子炉冷却系統施設

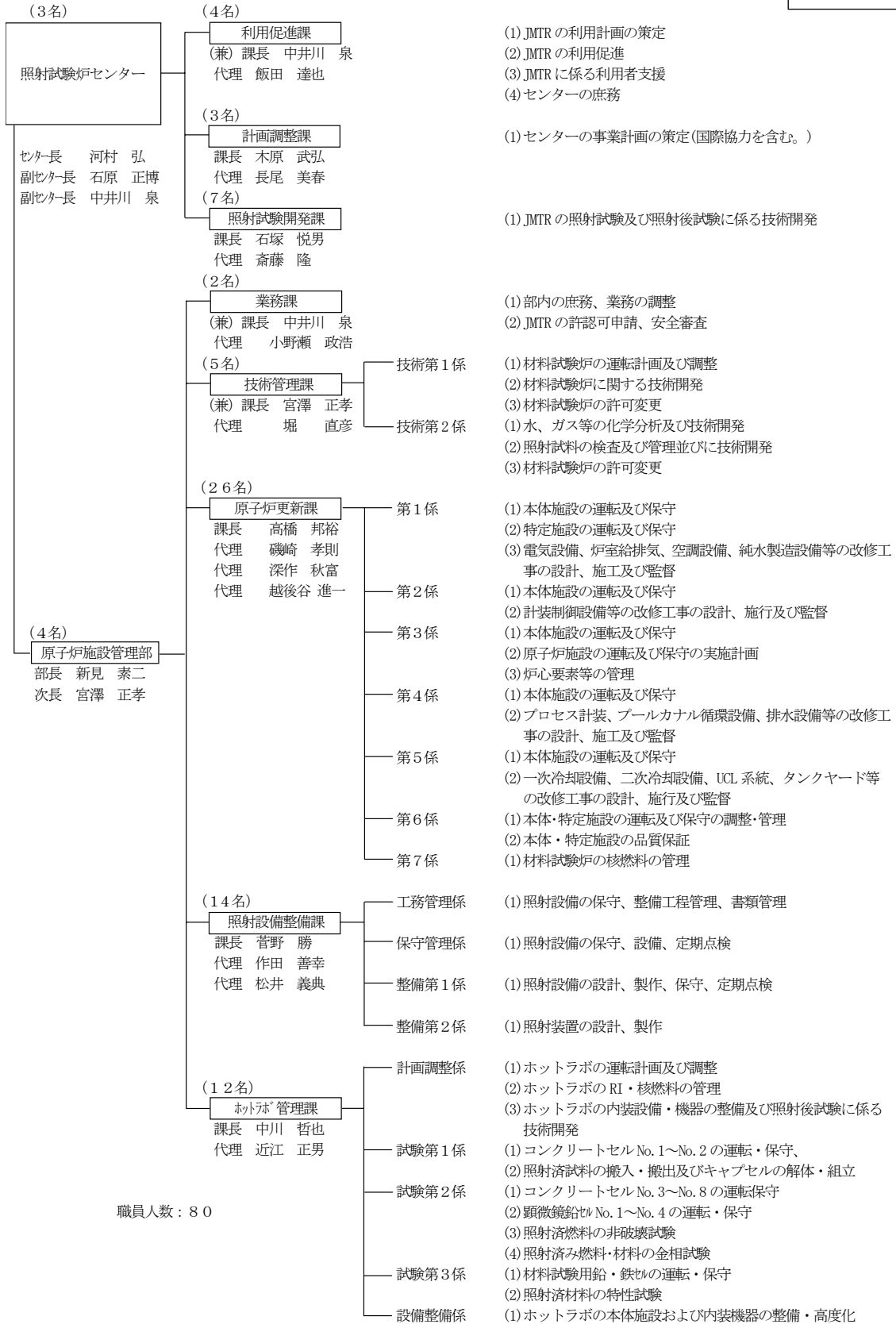
一次冷却系統の機器のうち更新する機器は、主循環ポンプの電動機、充填ポンプ（電動機を含む）、移送ポンプ（電動機を含む）、主要電動弁の駆動部、電磁弁の駆動部等である。これらの機器は、既設品と同等のものに更新し、保守性の向上を図ることとする。更新の準備として、充填ポンプおよび移送ポンプの更新にあたっては設工認申請が必要であるため、充填ポンプの

更新については、平成 21 年 2 月 27 日に設工認申請を実施し、3 月 25 日に認可を受けた。また、移送ポンプの更新については、平成 21 年 3 月 19 日に設工認申請を実施した。

二次冷却システム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、既設品と同等のものに更新し、保守性の向上を図ることとする。更新の準備として、循環ポンプ及び補助ポンプの更新にあたっては設工認申請が必要であるため、平成 20 年 11 月 27 日に設工認申請を実施し、平成 21 年 1 月 28 日に認可を受けた。

付録2 照射試験炉センターの組織

2009. 3



職員人数：80

付録3 JMTR 保守管理の概要

1. JMTR 原子炉施設の保守管理

JMTR 原子炉施設は、原子炉建家、炉心、一次冷却系統等の本体施設、照射試験設備等の照射施設、原子炉のユーティリティ関係の特定施設に分類されている。

JMTR 改修中においても施設定期自主検査は毎年実施されており、平成 20 年度の施設定期自主検査は、7月～12月で実施し、JMTR 原子炉施設の機能が維持されていることを確認した。

一方で、法令に基づいて実施する平成 20 年度の施設定期検査も実施し、平成 19 年度と同様、原子炉停止期間中において継続的に機能を維持する必要がある設備について、文部科学省の検査官立会いのもと、平成 20 年 12 月 17 日～18 日の 2 日間にわたり検査が行われ、原子炉施設の機能が維持されていることが確認された。

2. ホットラボ施設の保守管理

2.1 運転管理

JMTR に併設されているホットラボ（図 B-1 参照）は、昭和 45 年度から原子力分野で使用される燃料や材料の研究、開発のため、主に JMTR で照射された試料の非破壊試験や破壊試験を含む広範囲な照射後試験を行っている。また、照射された RI 試料の搬出等も行っている。

ホットセルは、付属する顕微鏡鉛セルを含むβ・γ取扱い施設であるコンクリートセル、材料試験用鉛セル及び鉄セルの 3 つのラインで構成されている。

平成 20 年度に照射後試験を実施した照射済キャプセル等は 42 本であり、延べ 170 項目の試験を実施し、このうち 13 本のキャプセルについて照射後試験を終了した。

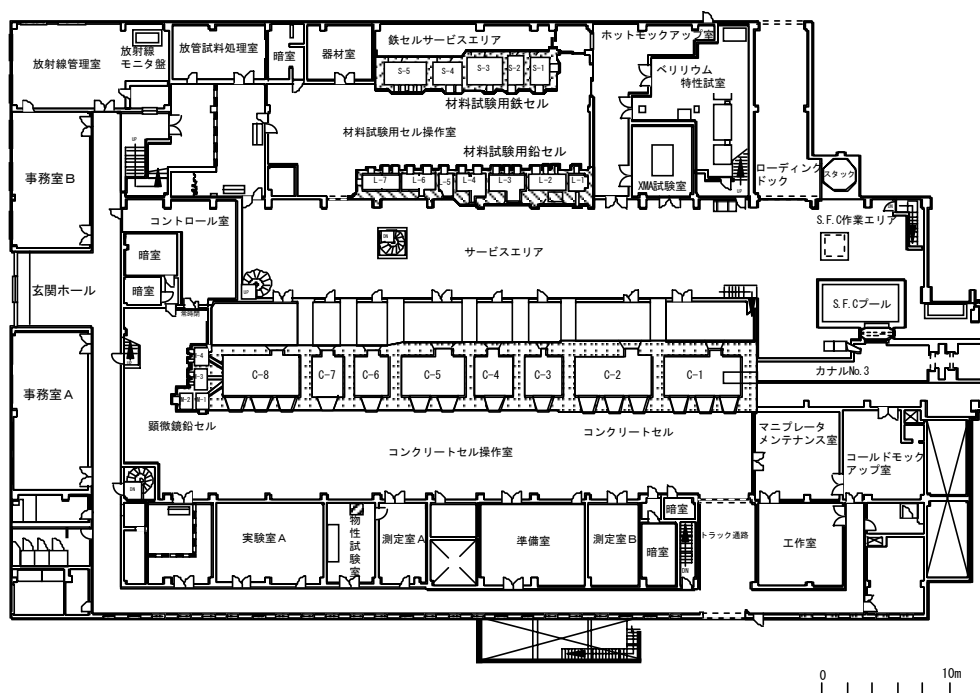


図 B-1 JMTR ホットラボの概要

2.2 保守管理

ホットラボ施設は、ホットセル、ホットラボ建家等の本体施設及びホットラボのユーティリティ関係の特定施設に分類されている。平成 20 年度の施設定期自主検査は、本体施設について平成 20 年 8 月 12 日から 9 月 29 日、特定施設について平成 20 年 8 月 12 日から平成 21 年 2 月 19 日の間に実施し、ホットラボ施設の機能が維持されていることを確認した。

付録4 外部発表

講演・学会発表

1. 河村 弘, “原子炉による RI の製造と供給”, 第 45 回アイソトープ・放射線研究発表会, (2008).
2. 花川 裕規, 塙 善雄, 出雲 寛互, 深作 秋富, 長尾 美春, 宮澤 正孝, 新見 素二, “JMTR 二次冷却系配管の保全計画策定のための予備調査”, 「日本保全学会第 5 回学術講演会」, (2008).
3. 飯村 光一, 坂本 太一, 菅野 勝, 堀 直彦, “JMTR を用いた放射性医薬品製造プロセスの整備計画”, FAPIG, (2009).
4. 竹本 紀之, 長尾 美春, 石原 正博, 新見 素二, 河村 弘, “JMTR 改修の現状”, 平成 20 年度弥生研究会「研究炉の運転・管理及び改良に関する研究会」, UTNL-R0471, pp. 511-518, (2009).
5. 塙 善雄, 田口 剛俊, 北岸 茂, 坪井 一明, 土谷 邦彦, “ベリリウム製中性子反射体の製作と管理”, 平成 20 年度弥生研究会「研究炉の運転・管理及び改良に関する研究会」, UTNL-R0471, pp. 521-528, (2009).
6. 木村 正, 出雲 寛互, 長尾 美春, 河村 弘, “使用済イオン交換樹脂の処理に関する検討”, 平成 20 年度弥生研究会「研究炉の運転・管理及び改良に関する研究会」, UTNL-R0471, pp. 531-5310, (2009).
7. 小沼 勇一, 石田 卓也, 斎藤 隆, 菅野 勝, 伊藤 治彦*, “ループ照射設備の炉外装置に関する解体技術”, 平成 20 年度弥生研究会「研究炉の運転・管理及び改良に関する研究会」, UTNL-R0471, pp. 541-547, (2009).
8. 小川 光弘, 細川 甚作, 富田 健司, 飯村 光, 作田 善幸, “照射設備の不具合事象に関するデータベース化”, 平成 20 年度弥生研究会「研究炉の運転・管理及び改良に関する研究会」, UTNL-R0471, pp. 551-5511, (2009).
9. 米川 実, 相沢 静男, 近江 正男, 中川 哲也, “照射後試験技術の現状”, 平成 20 年度弥生研究会「研究炉の運転・管理及び改良に関する研究会」, UTNL-R0471, pp. 561-567, (2009).
10. 田口 剛俊, 加藤 佳明, 高田 文樹, 近江 正男, 中川 哲也, “IASCC 挙動解明のための照射後試験技術”, 平成 20 年度弥生研究会「研究炉の運転・管理及び改良に関する研究会」, UTNL-R0471, pp. 571-578, (2009).
11. 堀 直彦, 長尾 美春, 新見 素二, 石原 正博, 河村 弘, “JMTR の改修・再稼動計画(1) 全体計画”, 日本原子力学会「2009 年春の年会」, (2009).

12. 花川 裕規, 深作 秋富, 長尾 美春, 宮澤 正孝, 新見 素二, “JMTR の改修・再稼動計画(2)原子炉機器の更新に関する検討”, 日本原子力学会「2009年春の年会」, (2009).
13. 竹本 紀之, 那珂 通裕, 長尾 美春, “JMTR の改修・再稼動計画(3)原子炉稼働率向上のための炉心管理技術の検討”, 日本原子力学会「2009年春の年会」, (2009).
14. 出雲 寛互, 飯村 光一, 堀 直彦, 菅野 勝, “JMTR の改修・再稼動計画(4)ペレット照射による ^{99}Mo の製造プロセスの設計検討”, 日本原子力学会「2009年春の年会」, (2009).
15. 土谷 邦彦, 埴 善雄, 北岸 茂, 田口 剛俊, 井上 修一, 斎藤 隆, “JMTR の改修・再稼動計画(5)ベリリウム反射体要素リサイクル技術の開発”, 日本原子力学会「2009年春の年会」, (2009).
16. 北岸 茂, 井上 修一, 出雲 寛互, 斎藤 隆, 土谷 邦彦, “JMTR の改修・再稼動計画(6) In-situ 腐食環境センシング技術の開発”, 日本原子力学会「2009年春の年会」, (2009).
17. 稲葉 良和, 石川 幸治, 石田 卓也, 石塚 悦男, Huynh Phuong*, 蓼沼 克嘉*, “JMTR の改修・再稼動計画(7)溶液照射法による先進的 ^{99}Mo 製造に関する技術開発”, 日本原子力学会「2009年春の年会」, (2009).
18. 長尾 美春, 竹本 紀之, 奥村 啓介, 千葉 敏, 片倉 純一, 河村 弘, “JMTR の改修・再稼動計画(8)JMTR 照射場評価の高精度化のための検討”, 日本原子力学会「2009年春の年会」, (2009).
19. 松井 義典, 高橋 広幸, 市瀬 健一, 宇佐美 浩二, 遠藤 慎也, 岩松 重美, 米川 実, 伊藤 和寛, 山本 雅也, 曾我 知則, 阿部 和幸, 吉川 勝則, 山県 一郎, 菊地 泰二, 石川 和義, 三宅 収, 青砥 紀身, “長寿命プラント照射損傷管理技術に関する研究開発(2)実炉組合照射(JRR-3⇔常陽)及びホット施設(WASTEF、JMTR-HL、MMF、FMF)作業の報告”, 日本原子力学会「2009年春の年会」, (2009).
20. 高田 文樹, 加藤 佳明, 近江 正男, 若井 栄一, 山内 一男*, 福島 文欧*, 土岐沢 耕一*, “長寿命プラント照射損傷管理技術に関する研究開発(4)遠隔操作型クリーブ試験装置による組合せ照射材の照射後試験”, 日本原子力学会「2009年春の年会」, (2009).

*印：原子力機構以外

論文投稿

1. Y. Nagao, M. Niimi, H. Kawamura, T. Iguchi*, “Improvement of Neutron/Gamma Field Evaluation for Restart of JMTR”, Proc. of 13th International Symposium on Reactor Dosimetry, (2008).
2. A. Shibata, J. Nakano, M. Ohmi, K. Kawamata, T. Saito, K. Hayashi, J. Saito, T. Nakagawa, T. Tsukada, “Technical Development for IASCC Irradiation Experiments at the JMTR”, Proceedings of 16th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-16), (2008).
3. 河村 弘, 堀 直彦, “日本原子力研究開発機構 試験研究炉における放射性同位元素の研究と製造研究 I.供給の現状と将来計画”, ISOTOPE NEWS, No.650, pp. 6-11, (2008).
4. N. Hori, K. Izumo, Y. Nagao, M. Niimi, H. Kawamura, “Outline of JMTR Refurbishment Status”, Proceedings of International Conference of Nuclear Power of Republic Kazakhstan, (2008).
5. Y. Inaba, K. Ishikawa, T. Ishida, K. Kurosawa*, Y. Hishinuma*, K. Tadenuma*, E. Ishitsuka, “Proc. of Preliminary Study on ⁹⁹Mo Production Method by Irradiation of Circulating Molybdenum Solution”, Nuclear Power Engineering in Kazakhstan NP-2008, (2008).
6. K. Tsuchiya, G. Longhurst*, V. Chakin*, I. Tazhibayeva*, F. Druyts*, C. Dorn*, H. Kawamura, “Problems and Future Plan on Material Development of Beryllium in Materials Testing Reactors”, JAEA-Conf 2008-011, pp. 55-58, (2008).
7. C. Dorn*, K. Tsuchiya, D. Hashiguchi*, A. Sayer*, W. Haws*, H. Kawamura, “Material Selection for Extended Life of the Beryllium Reflectors in the JMTR”, JAEA-Conf 2008-011, pp. 59-64, (2008).
8. Y. Nagao, N. Takemoto, K. Okumura, J. Katakura, S. Chiba, H. Kawamura, “JMTR Strategy of Restart and Dosimetry for Standardization of Irradiation Technology”, JAEA-Conf 2008-011, pp. 73-77, (2008).
9. K. Kawamata, T. Nakagawa, M. Ohmi, K. Hayashi, A. Shibata, J. Saito, M. Niimi, “Current Status and Future Plan of JMTR Hot Laboratory”, JAEA-Conf 2008-011, pp. 78-86, (2008).
10. I.L. Tazhibayeva*, T.V. Kulsartov*, E.A. Kenzhin*, O.P. Maksimkin*, T.A. Doronina*, N.S. Silnyagina*, L.G. Turubarova*, K.V. Tsai*, D.A. Zheltov*, V.V. Kashirskiy*, E.V. Chikhray*, V.P. Shestakov*, A.A. Kuykabaeva*, H. Kawamura, K. Tsuchiya, “Structure, Composition and Properties of Lithium Ceramic $\text{Li}_2\text{TiO}_3+5\%$ mole TiO_2 Irradiated in WWR-K Reactor for Solid Ceramic Blanket of Fusion Reactor”, Russian scientific center

- Kurchatov institute, Issues of Nuclear science and equipment, Scientific book, Series Nuclear fusion, pp. 3-11, (2008).
11. I.L. Tazhibayeva*, E.A. Kenzhin*, T.V. Kulsartov*, A.A. Kuykabaeva*, V.P. Shestakov*, E.V. Chikhray*, Sh.Kh. Gizatulin*, O.P. Maksimkin*, I.N. Beckman*, H. Kawamura, K. Tsuchiya, “Tritium Generation in Lithium Ceramics Li_2TiO_3 for Fusion Reactor Blanket”, Issues of Nuclear Science and Equipment, Scientific Book, pp. 3-11, (2008).
 12. 林 克己*, 長尾 美春, 中野 智仁*, 市川 禎和*, 田中 健一*, 高木 朋美*, “私はこうして技術士（原子力・放射線部門）試験を突破した”, 原子力 eye, vol.54, No.10, pp. 44-54, (2008).
 13. T. Oku*, A. Kurumada*, Y. Imamura*, M. Ishihara, “Effects of Ion Irradiation on the Hardness Properties of Graphites and C/C Composites by Indentation Tests”, Journal of Nuclear Materials vol.381, pp. 92-97, (2008).
 14. H. Kawamura, M. Niimi, H. Ishihara, M. Miyazawa, N. Hori, Y. Nagao, “Present Status and Future Plan of JMTR Project”, JAEA-Conf 2008-010, pp. 7-16, (2008).
 15. Y. Inaba, S. Inoue, K. Izumo, S. Kitagishi, K. Tsuchiya, T. Saito, E. Ishitsuka, “Status of Irradiation Technology Development in JMTR”, JAEA-Conf 2008-010, pp. 30-41, (2008).
 16. A. Shibata, M. Ohmi, T. Nakagawa, “Present Activities of Post Irradiation Examinations in the JMTR Hot Laboratory”, JAEA-Conf 2008-010, pp. 54-66, (2008).
 17. N. Takemoto, Y. Hanawa, S. Gorai, A. Fukasaku, M. Miyazawa, M. Niimi, “Refurbishment Status on Reactor Facilities on JMTR”, JAEA-Conf 2008-010, pp. 96-105, (2008).
 18. N. Hori, H. Izumo, M. Kanno, T. Nakagawa, H. Kawamura, “RI-Production Plan Using JMTR”, JAEA-Conf 2008-010, pp. 127-131, (2008).
 19. T. Taguchi, Y. Inaba, K. Kawamata, T. Nakagawa, K. Tsuchiya, “Joining Techniques Development for Neutron Irradiation Tests and Post Irradiation Examinations in JMTR”, JAEA-Conf 2008-010, pp. 193-202, (2008).
 20. K. Iimura, J. Hosokawa, H. Izumo, N. Hori, T. Nakagawa, M. Kanno, H. Kawamura, “Development and Design for Mo-Production Facility in JMTR”, JAEA-Conf 2008-010, pp. 251-258, (2008).
 21. Y. Inaba, K. Ishikawa, T. Ishida, K. Tatenuma*, E. Ishitsuka, “Development on ^{99}Mo Production Technology by Molybdenum Solution Irradiation Method”, JAEA-Conf 2008-010, pp. 259-267, (2008).

22. T. Taguchi, S. Sozawa, Y. Hanawa, S. Kitagishi, K. Tsuchiya, “Preliminary Irradiation Test for New Material Selection on Lifetime Extension of Beryllium Reflector”, JAEA-Conf 2008-010, pp. 343-352, (2008).
23. 榎本 秀一*, 河村 弘, 白川 芳幸*, 中西 友子*, 中村 佳代子*, 矢野 恒夫*, 井戸 達雄* 柴田 徳思*, “新しい RI の利用促進について”, ISOTOPE NEWS No.657, pp. 2-11, (2009).

*印：原子力機構以外

付録5 研究開発報告書類

1. 竹本 紀之, 出雲 寛互, 井上 修一, 阿部 新一, 那珂 通裕, 明石 一朝, 近江 正男, 宮澤 正孝, 馬場 治, 長尾 美春, “JMTR 稼働率向上のための課題とその対策-稼働率 60%を目指して-”, JAEA-Review 2008-051, (2008).
2. M. Ishihara, S. Yanagihara, K. Mikael*, S. Anders*, “The First Studsvik AB-JAEA Meeting for Cooperation in Nuclear Energy Research and Development”, JAEA-Review 2008-059, (2009).
3. 井手 広史, 那珂 通裕, 作田 善幸, 堀 直彦, 松井 義典, 宮澤 正孝, “JMTR 原子炉施設の「水冷却型試験研究炉用原子炉施設に関する安全設計審査指針」への適合性に関する検討”, JAEA-Review 2008-076, (2009).
4. 原子炉施設管理部, “JMTR 運転管理活動報告(2007 年度)”, JAEA-Review 2008-079, (2009).
5. 木村 正, 大戸 勤, 出雲 寛互, 長尾 美春, 河村 弘, “使用済みイオン交換樹脂の海外委託処理に関する調査”, JAEA-Review 2008-080, (2009).
6. 照射試験炉センター, “照射試験センターの活動報告(2007 年度)”, JAEA-Review 2008-081, (2009).
7. Neutron Irradiation and Testing Reactor Center, “Annual Report of the Neutron Irradiation and Testing Reactor Center FY 2007”, JAEA-Review 2008-082, (2009).
8. 富田 健司, 井上 修一, 石田 卓也, 小沼 勇一, 土谷 邦彦, “スweepガス装置用トリチウムモニタの更新”, JAEA-Technology 2008-050, (2009).
9. 小沼 勇一, 石田 卓也, 阪田 生馬*, 小平 顕*, 坂井 純*, 大場 誠一郎*, 菅野 勝, 斎藤 隆, 木名瀬 宗之*, 石塚 悦男, “ループ照射設備解体と廃棄物分別に関する検討”, JAEA-Technology 2008-078, (2009).
10. 北岸 茂, 稲葉 良知, 土谷 邦彦, 石塚 悦男, “中性子照射環境における光学計測を用いた水分析装置の予備検討”, JAEA-Technology 2008-092, (2009).
11. R. Woo-Seog*, M. Ishihara, “Proceedings of 2008 KAERI/JAEA Joint Seminar on Advanced Irradiation and PIE Technologies November 5-7, 2008, Daejeon, Korea”, JAEA-Conf 2008-010, (2009).
12. M. Ishihara, H. Kawamura, “Proceedings of the International Symposium on Materials Testing Reactors July 16-17, 2008, JAEA Oarai R&D Center, Japan”, JAEA-Conf 2008-011, (2009).

13. 竹本 紀之, 奥村 啓介, 片倉 純一, 長尾 美春, 河村 弘, “JMTR 照射場解析のための JENDL/ACに基づく MCNP 用連続エネルギー断面積ライブラリ JAC08T1”, JAEA-Data/Code 2008-029, (2009).

*印：原子力機構以外

付録6 官庁申請許可一覧

(1) 許可

申請年月日	件名	許可年月日
2008.7.11	原子炉設置変更許可申請（使用済燃料の処分の方法の見直し）	2008.12.25
2008.10.10	核燃料物質使用変更許可申請 （BOCA 照射装置の改造等に伴う変更）	2009.3.31

(2) 設計及び工事の方法の認可

申請年月日	内容	認可年月日
2008.5.27	原子炉冷却系統施設の一部、放射性廃棄物の廃棄施設及び原子炉格納施設の一部 （2009.1.9 変更申請）	2008.6.24 （2009.1.28）
2008.8.28	第5次キャプセル用保護管の製作	2008.10.14
2008.11.27	原子炉本体の一部、原子炉冷却系統施設の一部	2009.1.28
2009.2.25	アルミニウム反射体要素の製作、閉止板及び閉止フランジの製作、キャプセルホルダの製作	2009.3.26
2009.2.27	ヘリウム-3 出力制御型沸騰水キャプセル照射装置のうち沸騰水キャプセルの製作	2009.3.26
2009.2.27	充填ポンプの更新	2009.3.25
2009.3.19	移送ポンプの更新、放射性廃棄物の廃棄施設の一部	—
2009.3.27	計測制御系統施設の一部	—

(3) 使用前検査

申請年月日	件名	合格年月日
2008.7.8	原子炉冷却系統施設の一部、放射性廃棄物の廃棄施設及び原子炉格納施設の一部	2009.3.30
2009.2.12	原子炉本体の一部、原子炉冷却系統施設の一部	—
2009.2.24	第5次キャプセル用保護管の製作	—
2009.3.27	ヘリウム-3 出力制御型沸騰水キャプセル照射装置のうち沸騰水キャプセルの製作	—
2009.3.27	アルミニウム反射体要素の製作、閉止板及び閉止フランジの製作、キャプセルホルダの製作	—

(4) 施設検査

申請年月日	件名	合格年月日
2008.11.13	核燃料物質の使用施設等の施設検査	2009.3.30

(5) 施設定期検査

申請年月日	件名	合格年月日
2006.8.25	施設定期検査	(継続中)

付録7 プレス発表・表彰（受賞）・特許一覧

（1）プレス発表一覧

発表年月日	件名	記事掲載新聞
2008.5.27	材料試験炉（JMTR）の新たな挑戦のための改修本格化	2008.5.28 読売新聞、日本経済新聞、日刊工業新聞、常陽新聞
（2008.7.8 取材案内 配布）	照射試験炉に関する国際会議の開催	2008.7.17 茨城新聞
2008.11.17	材料試験炉（JMTR）を用いたモリブデン-99（ ⁹⁹ Mo）の国産化に向けた検討を開始	2008.11.18 茨城新聞、電気新聞 2008.11.20 日刊工業新聞 2008.11.21 常陽新聞 2008.11.23 毎日新聞 2008.12.20 下野新聞 （科学雑誌「原子力 eye 2009年2月号）

（2）表彰（受賞）等一覧

受賞年月日	表彰（受賞）件名	受賞者
2008.5.22	平成20年度原子力エネルギー安全実務功労者表彰（経済産業省）	北島 敏雄
2008.10.20	理事長表彰（創意工夫功労賞） 遠隔操作型結晶方位解析装置及び測定技術の考案	照射材料の結晶方位解析技術開発グループ
2008.10.20	理事長表彰（業務品質改善賞） JMTR 原子炉施設保全の品質改善のための健全性調査	JMTR 原子炉施設保全品質改善グループ
2008.10.30	大洗拠点長賞表彰（創意工夫功労賞） 試験研究炉用中性子反射体の長寿命化に関する照射試験法の考案	土谷 邦彦、塙 善雄、田口 剛俊、齋藤 隆、他

（3）特許一覧

登録年月日	発明の名称（発明者）	登録番号
	該当無し	

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	モル	mol
光	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	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	キログラム毎立方メートル	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
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	ルクス	lx	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、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。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
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ 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	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表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	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm=2=(10 ⁻¹² cm)/2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーバ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	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
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm 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=1 Mx 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=1 cGy=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 f=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
カロリー	cal	1 cal=4.1868 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー) 4.184 J (「熱化学」カロリー)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

