



## 照射試験炉センターの活動報告（2007年度）

Annual Report of the Neutron Irradiation and Testing Reactor Center FY 2007  
(April 1, 2007 – March 31, 2008)

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

March 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

## 照射試験炉センターの活動報告 (2007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

(2008年 12月 19日受理)

材料試験炉(JMTR)は、1968年3月に初臨界を達成して以来、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。2006年8月の第165サイクルの運転をもって一旦停止し、現在、平成23年度からの再稼働に向けて原子炉機器の一部更新及び照射設備の整備を進めている。また、JMTRの再稼働に当たり、利用者からの利用性向上に係る強い要望に応えるため、原子炉稼働率の向上を目指した検討や早く結果が得られるようターンアラウンドタイムの短縮等の検討を進めている。

本報告は、平成19年度のJMTR改修・再稼働に係る活動についてまとめたものである。

**Annual Report of the Neutron Irradiation and Testing Reactor Center**  
**FY 2007**  
**(April 1, 2007 – March 31, 2008)**

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center

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

(Received December 19, 2008)

The Japan Materials Testing Reactor (JMTR), achieving first criticality in March 1968, has been used in testing the durability and integrity of reactor fuels and components, basic nuclear research, the production of radioisotopes (RIs), and other purposes. The JMTR, however, stopped in August 2006 after its 165<sup>th</sup> operation cycle, and is currently under going partial renewal of reactor facilities and installation of new irradiation Facilities, geared toward being restarted in 2011. In addition, to cope with the strong requests from users to improve usability of the JMTR, efforts are being made to increase reactor operation efficiency, shorten the turnaround time for obtaining results, and other necessary tasks for JMTR to commence reoperation.

The present report summarizes the activities carried out in 2007 for the refurbishment and restart of JMTR.

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 概要                      | 2  |
| 2.2 更新機器の選定                 | 4  |
| 2.3 更新機器                    | 4  |
| 2.4 再稼働後の保守計画の基礎とするための健全性調査 | 5  |
| 2.5 照射設備の整備                 | 5  |
| 3. JMTR の利用性向上              | 6  |
| 3.1 原子炉稼働率 50%～70%を目指した運転   | 7  |
| 3.2 ターンアラウンドタイムの短縮          | 7  |
| 3.3 魅力のある照射費用を実現するための検討     | 7  |
| 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       | 8  |
| 4.3 先進計測機器の開発               | 12 |
| 4.4 工業利用に係わる開発              | 15 |
| 4.5 ベリリウムリサイクル技術開発          | 17 |
| 5. 国際協力                     | 20 |
| 5.1 照射試験炉ネットワークの構築          | 20 |
| 5.2 スタズビックグループとの研究協力        | 20 |
| 5.3 カザフスタン国立原子力センターとの研究協力   | 21 |
| 6. あとがき                     | 21 |
| 謝辞                          | 21 |
| 付録 1 照射試験炉センターの組織           | 22 |
| 付録 2 JMTR 保守管理の概要           | 23 |
| 付録 3 外部発表                   | 25 |
| 付録 4 研究報告書類                 | 27 |
| 付録 5 官庁申請許可一覧               | 29 |
| 付録 6 プレス発表・表彰(受賞)・特許一覧      | 30 |

## Contents

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduction .....                                                               | 1  |
| 2. Refurbishment of JMTR .....                                                      | 2  |
| 2.1 Outline .....                                                                   | 2  |
| 2.2 Selection of Renewal Facilities .....                                           | 4  |
| 2.3 Renewal Facilities .....                                                        | 4  |
| 2.4 Investigation of Facilities Condition .....                                     | 5  |
| 2.5 Preparation of Irradiation Facilities .....                                     | 5  |
| 3. Utilization Promotion of JMTR .....                                              | 6  |
| 3.1 Improvement of Reactor Operation Rate .....                                     | 7  |
| 3.2 Shortening Turnaround Time .....                                                | 7  |
| 3.3 Achievement of Attractive Irradiation Expenses .....                            | 7  |
| 4. Development of Irradiation Technology .....                                      | 7  |
| 4.1 Preparation of New Irradiation Engineering Building .....                       | 7  |
| 4.2 Irradiation Technology of LWR Fuel and Material .....                           | 8  |
| 4.3 Irradiation Technology of Advanced Instrumentation .....                        | 12 |
| 4.4 Irradiation Technology for Industry Use .....                                   | 15 |
| 4.5 Irradiation Technology of Beryllium Reflector .....                             | 17 |
| 5. International Cooperation .....                                                  | 20 |
| 5.1 Construction of World Network .....                                             | 20 |
| 5.2 Cooperation Research with Studsvik AB .....                                     | 20 |
| 5.3 Cooperation Research with Kazakhstan National Nuclear Center .....              | 21 |
| 6. Summary .....                                                                    | 21 |
| Acknowledgement .....                                                               | 21 |
| Appendix 1 Organization of the Neutron Irradiation and Testing Reactor Center ..... | 22 |
| Appendix 2 Operation and Management of JMTR .....                                   | 23 |
| Appendix 3 Publication and Presentations .....                                      | 25 |
| Appendix 4 JAEA Reports .....                                                       | 27 |
| Appendix 5 License and Approval Granted by the Regulatory Authority .....           | 29 |
| Appendix 6 List of Press Release, Awards and Patents .....                          | 30 |

## 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) していた。

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、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、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。

特に、原子力機構としては、原子力の安全基盤の強化に向けて、原子力安全・保安院をはじめ多くの関係者の支援を受け、JMTR を「我が国における長期的な軽水炉利用を支える研究基盤」と位置付け、軽水炉の長期利用対策に大いに貢献していくこととし、他の施設と同様に国際的に通用する技術力、利便性、経済性を確保し、国内外からの幅広い利用を図っていくため、最善の体制でこれに臨むこととした。そのため、JMTR の運営に係るこれまでの組織を抜本的に見直し、JMTR の平成 23 年度再稼働に向け、安全確保を第一に改修工事を遂行することはもとより、JMTR に係る幅広い社会の要請に応えるため、平成 19 年度に照射試験炉センターを中核とした推進体制を発足させた。

この新たな体制により、照射試験炉センターの総力を結集して、JMTR の改修・再稼働を安全かつ着実に進めるとともに、利用性向上に努め、利用者の大きな期待に応えることができる世界の中核的照射施設としての照射試験炉「新 JMTR」を目指し、業務を遂行している。

平成 19 年度の活動として、JMTR の改修については、平成 22 年度までの 4 年間で効果的な改修を行うためのスケジュールの策定を行い、改修にあたり許認可申請が必要な設備、機器に対する準備を進めると共に、ユーティリティー設備の更新作業を実施した。

JMTR の今後の運営に関しては、JMTR 再稼働後の海外の照射試験炉との協力関係の検討を開始し、利用者に関かれた施設として利用者が使いやすい炉としての運営を念頭に、利用者等からなる「JMTR 運営・利用委員会」を立ち上げ、利用性向上などについての提案や要望を受入れつつ透明性をもった JMTR の運営構築のための検討を開始した。また、利用者に魅力ある照射試験を提供するために、これまでよりもさらに高精度かつ世界最先端の照射試験を実現させるための照射技術の開発を開始した。

なお、照射設備については、利用者からの資金提供により整備することとなっており、新たなニーズを開拓するため、がんの診断等に用いる医療用ラジオアイソトープ  $^{99m}\text{Tc}$  の製造に関する照射設備の検討等を開始した。

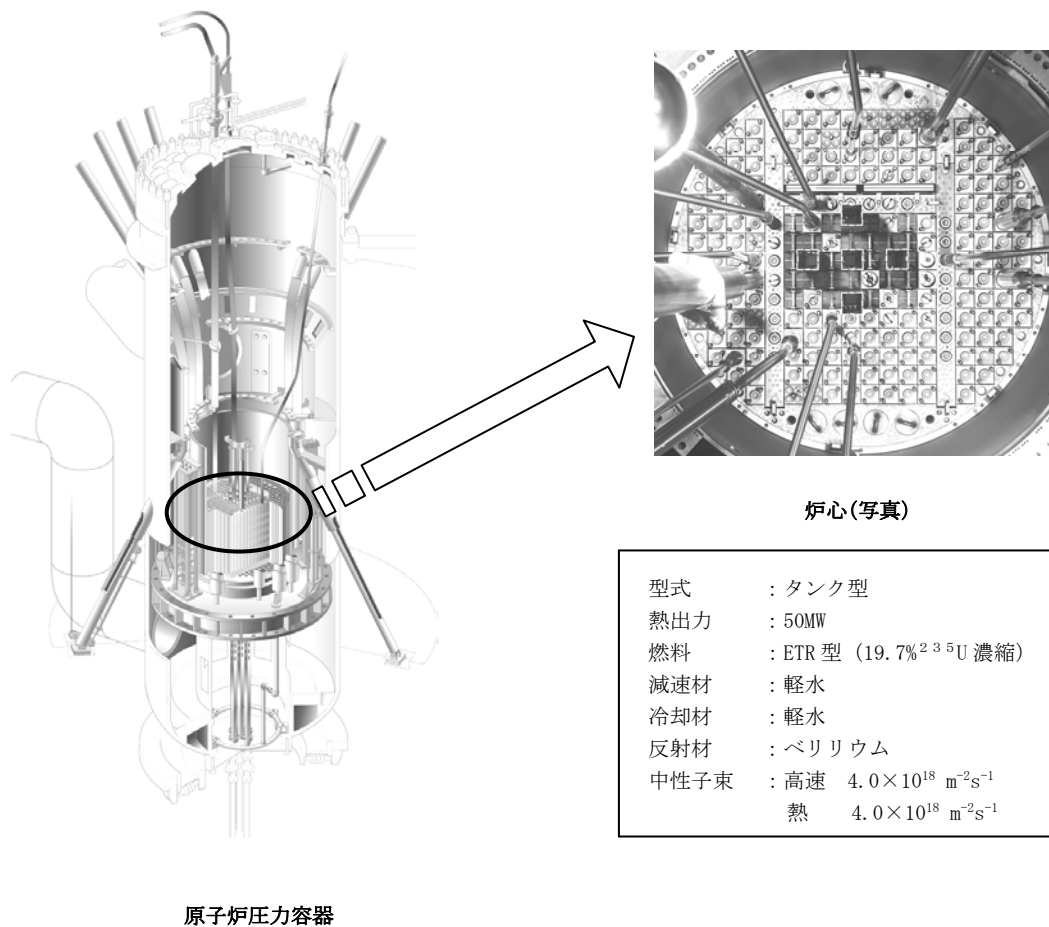


図 1.1.1 JMTR の概要

## 2. JMTR の改修

### 2.1 概要

原子炉機器等の一部更新の概要を図 2.1.1 に、平成 20 年 3 月現在の概略工程を表 2.1.1 に示す。更新機器については、基本的な設計方針や性能は変更しないこととし、現行の原子炉設置変更許可の範囲内で行う。更新機器の詳細については、平成 19 年 6 月～11 月に、原子力機構内に「JMTR 改修計画に係る専門部会」を設置し、更新に関する基本的考え方の妥当性の確認を行い、現在、設工認申請のための準備を行っている状況である。

JMTR の監督官庁である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）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、平成 19 年度から更新を開始し、平成 20 年度に完了する予定である。設工認申請が必要な更新機器については、平成 20 年度中に設工認申請を行い、更新工事を行う予定である。

また、JMTR の改修に並行して、再稼働後の保守計画を策定するための基礎とするため、原子炉施設の健全性評価も実施した。

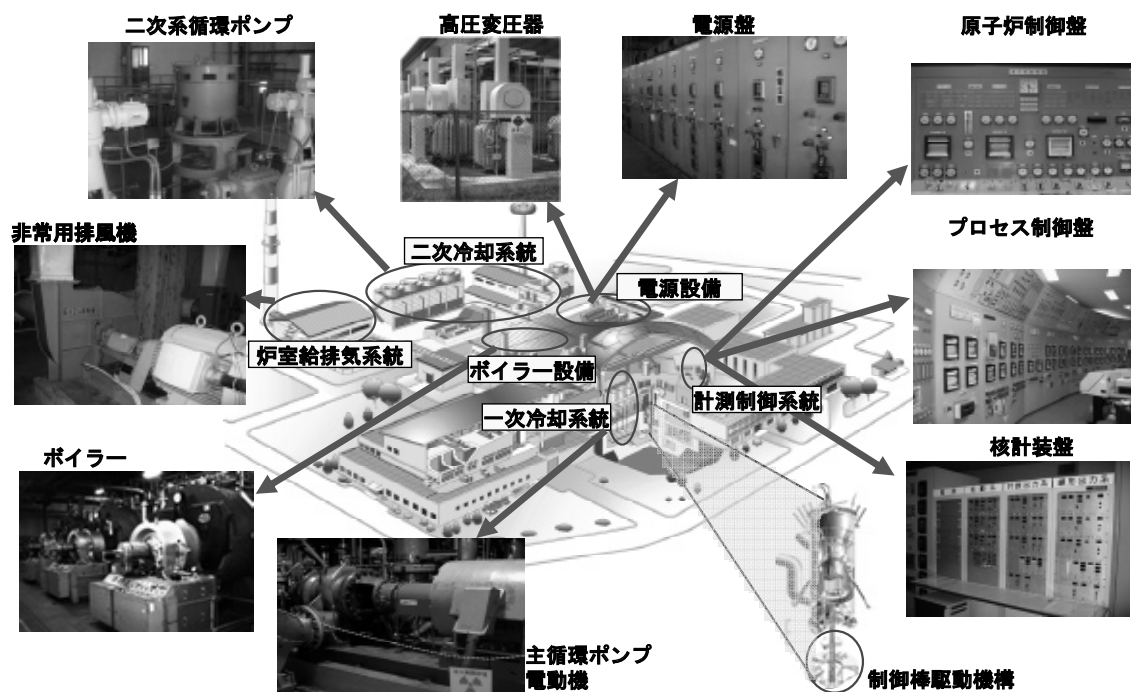


図 2.1.1 JMTR 原子炉機器更新の概要

表 2.1.1 JMTR 原子炉機器の更新工程 (平成 20 年 3 月現在)

| 年度          |                   | H19         | H20         | H21 | H22 | H23<br>(原子炉再移動) |
|-------------|-------------------|-------------|-------------|-----|-----|-----------------|
| 項目          |                   |             |             |     |     |                 |
| 原子炉本体       | ベリリウム枠、ガンマ線遮蔽板等   |             | 設計、製作、工事、検査 |     |     |                 |
| 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、工事、検査 |     |     |                 |
| 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、工事、検査 |     |     |                 |
| 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、工事、検査 |     |     |                 |
| 電源設備        | 高圧電源盤、変圧器、ケーブル等   | 設計、製作、工事、検査 |             |     |     |                 |
| ボイラー等       | 冷凍機、ボイラー          | 設計、製作、工事、検査 |             |     |     |                 |
| 純水製造設備      | 脱気純水系統、一般純水系統     | 設計、製作、工事、検査 |             |     |     |                 |

## 2.2 更新機器の選定

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、保守経験等の安全確保の観点、及び交換部品の調達性等の稼働率向上の観点から検討を行った。選定の基準は、大きく 2 つに分類することとし、その概要を次に示した。

### (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でき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、保守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。

今回、更新せずに継続使用する機器（原子炉建家、原子炉压力容器、一次冷却系統配管等）については、平成 17 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（JMTR 原子炉施設の施設定期評価、平成 17 年 2 月）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、今回更新する機器として選定したものは、最新知見として、次に示す最新の指針の考え方を考慮した。

- (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（平成 13 年 3 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（平成 14 年 9 月）
- (3) 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（平成 18 年 9 月）

## 2.3 更新機器

更新する機器は、信頼性の向上、保守性の向上等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、マンマシーンインターフェイスの改善を図る。

更新機器については、基本的な設計方針や性能は変更しないこととし、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、平成 19 年度から更新を開始し、平成 20 年度までに完了する予定である。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、平成 19 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、平成 20 年度中に設工認申請を行い、更新工事を行う予定である。

## 2.4 再稼働後の保守計画の基礎とするための健全性調査

再稼働後、JMTR は約 20 年間の長期にわたり運転していく計画であるが、原子炉機器の長期使用を確実にするためには、改修期間中に、再稼働後の保全計画を策定するための基礎データを取得する必要がある。このため、平成 19 年度に原子炉施設の健全性調査を行った。主な調査は、電源設備に関してディーゼル発電機絶縁診断、JMTR 原子炉建家等の健全性調査、一次冷却系統施設に関して原子炉圧力容器、熱交換器等の健全性調査、二次冷却系統施設に関して二次冷却系冷却塔、二次冷却系配管内面ライニング等に関するものである。これらの調査結果は、JMTR 再稼働後の予防保全をベースにした保守管理の基礎とする計画である。

## 2.5 照射設備の整備

照射設備の整備については、新たなニーズを開拓するため、がんの診断等に用いる医療用ラジオアイソトープ  $^{99m}\text{Tc}$  の親核種である  $^{99}\text{Mo}$  の製造を行うことを想定し、既存の水力ラビット照射装置の一部の更新および増設を視野に入れた検討を開始した。概念図を図 2.5.1 に示す。

JMTR における  $^{99}\text{Mo}$  の製造プロセスは、 $\text{MoO}_3$  をラビットに封入し、水力ラビット照射装置で

照射し、 $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$  反応により生成した  $^{99}\text{Mo}$  を取出し、JMTR に隣接するホットラボで  $\text{MoO}_3$  を取出し、容器に封入して出荷するものである。本整備により、国内に必要な  $^{99}\text{Mo}$  の全輸入量（88.8TBq/週：2400Ci/週）のうち、約 20%を賄うことが可能となる。

なお、 $^{99}\text{Mo}$  製造工程については、ペレット化した三酸化モリブデン（ $\text{MoO}_3$ ）をラビット内に封入して一定期間の照射を行った後に取り出し、カナルを経由して JMTR に隣接するホットラボに搬入し、セル内において  $^{99}\text{Mo}$  の抽出を行い出荷する。

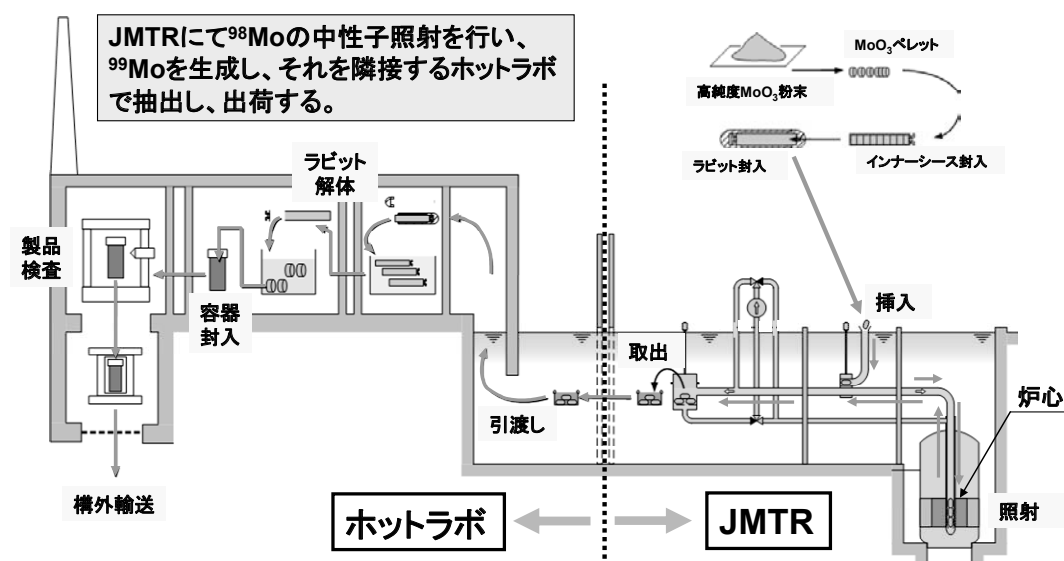


図 2.5.1 JMTR を利用した  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  の製造に関する検討

### 3. JMTR の利用性向上

JMTR の照射利用について、利用者の意見を的確に反映させる等透明性を確保した運営に資するため、平成 20 年 2 月 4 日に JMTR 運営・利用委員会を設置した（図 3.1.1）。第 1 回 JMTR 運営・利用委員会を平成 20 年 3 月 25 日に開催し、JMTR の利用性を向上させるため、以下の項目等について委員から意見や助言を受け、検討を進めている。

- (1) 原子炉稼働率 50%～70%を目指した運転
- (2) ターンアラウンドタイムの短縮
- (3) 世界の試験炉と比べて魅力のある照射費用を実現

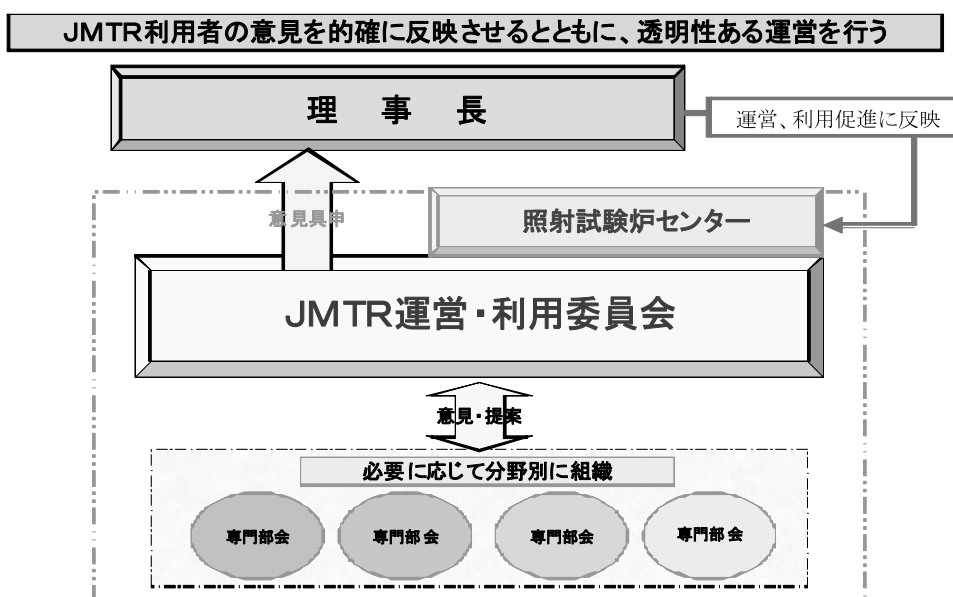


図 3.1.1 JMTR 運営・利用委員会の概略

### 3.1 原子炉稼働率 50%～70%を目指した運転

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、今後は、これまでの事後保全型の保守から予防保全型の保守へ移行し、機器の不具合等による原子炉停止を極力少なくするとともに、運転方式の見直しを行い、再稼働時には、年間稼働率 60%程度（年間 210 日運転）を達成するための検討を開始した。

### 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の製作、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。この利用者が利用込みを行ってからデータを得るまでのターンアラウンドタイムを短縮させる検討として、キャプセルの製作に要する期間について、これまで最大 1.5 年程度要していた期間を数ヶ月程度に短縮するための検討を開始した。

### 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利用料金体系について検討を開始した。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開始した。

## 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の、キャプセル組立、照射試料の材料試験や材料検査・分析等を行うための設備を整備するため、大洗研究開発センターの RI 利用開発棟建家の

整備工事を開始した。整備工事は平成 20 年度に完了する予定であり、その後は、実験装置等の整備を進める予定である。

## 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、破損影響評価を行えるよう、軽水炉燃料試料の出力急昇試験及び沸騰遷移試験を実施するため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するものとし、詳細設計として、系統設計、機器設計等を実施した。

なお、キャプセル冷却設備は、炉内管部、冷却系、キャプセル交換機及び計測制御系からなり、水環境調整設備は、軽水炉環境を模擬する高温高压水を供給し、出力制御設備は、ヘリウム 3 の圧力を変えることにより燃料試料部の出力制御を行うためのものである。

系統設計に関して、水環境調整設備の排水処理系を並列 2 系統とし、燃料破損試験を連続的に実施できるようにするとともに、排水量を低減するため、循環（精製）再利用できる系統とした。水環境調整設備の系統図を図 4.2.1 に示す。

機器設計に関しては、系統設計の結果に基づき、炉内外の構成機器の仕様、構造の詳細を決定した。また、出力制御設備のトリチウムトラップについては、トリチウムの再生、活用を行うことも視野に入れた素材の検討を行った。

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 19 年度軽水炉燃料材料詳細健全性調査」に関する成果の一部である。

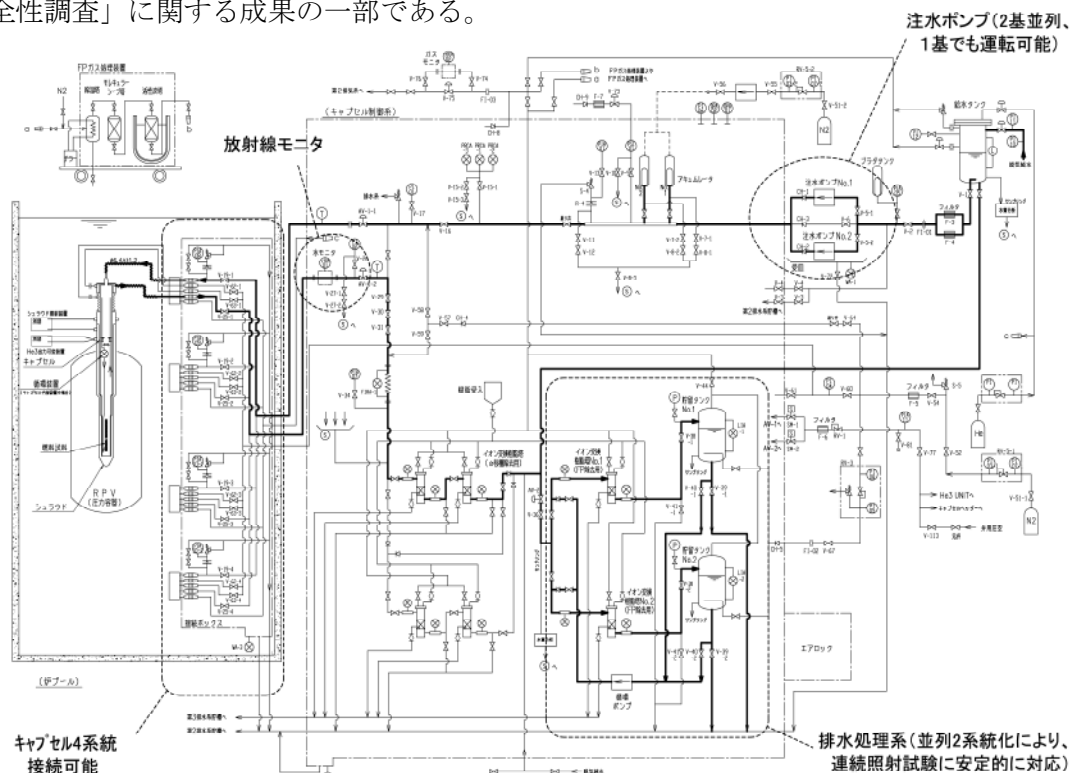


図 4.2.1 水環境調整設備 系統図

#### 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。図 4.2.2 に本キャプセルの概略を示す。従来から使用実績のある自然対流型キャプセルの他、強制対流型キャプセル、ドライアウトキャプセルの 3 種類のキャプセルについて詳細設計を実施した。

自然対流型キャプセルについては、燃料中心温度、燃料棒内圧、被覆管軸方向伸び等をオンライン測定できる構造を検討した。強制対流型キャプセルについては、強制対流を発生させるマグネットカップリング式ポンプの構造とキャプセル内の温度制御方法を検討した。ドライアウトキャプセルについては、燃料の破損限界を試験するため、ドライアウト状態を継続して再現できる構造を検討した。

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 19 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。

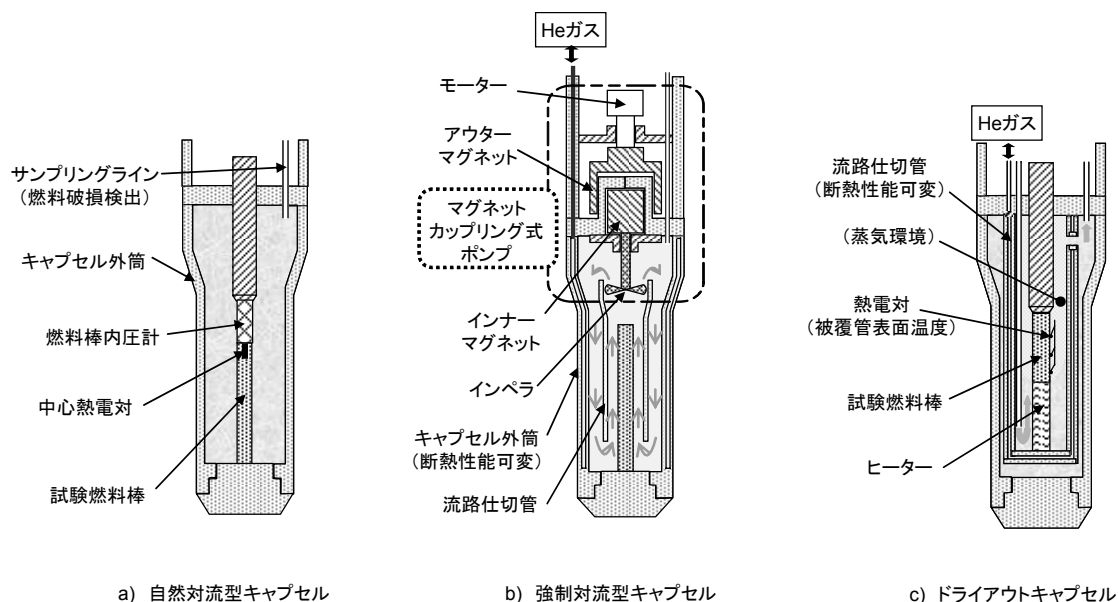


図 4.2.2 燃料異常過渡試験キャプセルの概念図

#### 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、水環境調整設備、荷重制御装置及び材料照射キャプセル（以下、キャプセルという）等から構成される。

水環境調整設備は、キャプセル内において軽水炉の温度、圧力、水質等の炉内環境を模擬するために、キャプセルに水質調整された高温高压水を供給するとともに、キャプセルから排出された水を精製して循環するための装置である。

BWR の照射環境を模擬できる BWR 用と、PWR を含む幅広い照射環境に対応できる BWR/PWR

用の 2 種類の水環境調整設備の設計を行った。BWR 用水環境調整設備は、溶存酸素濃度及び溶存水素濃度の調節、亜鉛の注入を行うための設備を備えると共に、温度、流量に加え、圧力もキャプセル毎に調整できる系統構成とした。系統図を図 4.2.3 に示す。

BWR/PWR 用水環境調整設備は、酸素、水素、亜鉛に加えて、ホウ素およびリチウムの注入を行うことが可能なようにし、添加するホウ素、リチウムを循環する供給水から選択的に除去できる系統構成とするとともに、高温高压水化に対応した設計とした。

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 19 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。

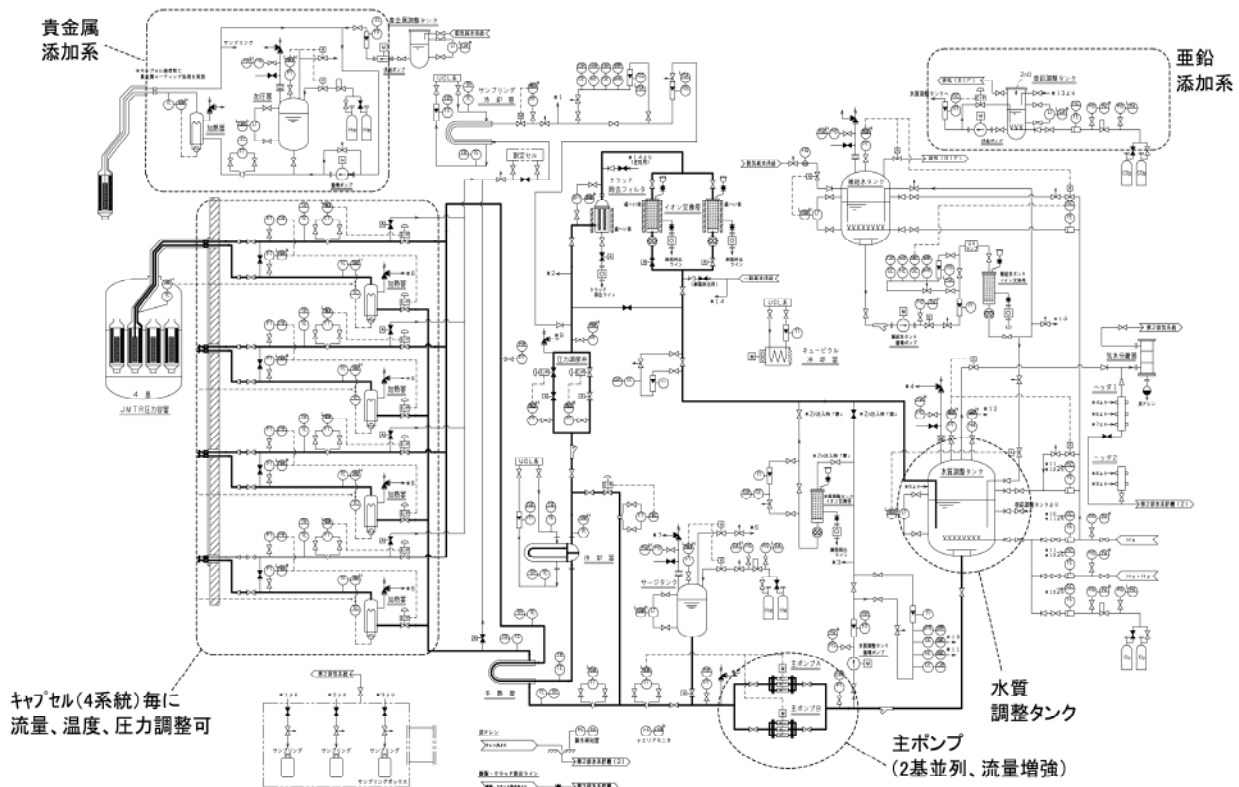


図 4.2.3 BWR 用水環境調整設備 系統図

#### 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には、高線量の中性子照射を受けると照射誘起応力腐食割れ (IASCC) が発生することが知られている。この挙動究明のために、日本原子力研究所 (現 日本原子力研究開発機構) では電気事業者と共同で照射下 IASCC 試験に関する技術開発研究 (平成 12～17 年度) を行い、JMTR を利用した照射下試験 (き裂進展試験、き裂発生試験) を実施した。その際、試験技術に関する多くの課題が抽出された。

き裂進展試験においては、低照射量領域 (降伏応力の小さい材料) で破壊力学的に有効となる応力拡大係数 ( $K$  値) の範囲を考慮すると、試験片の大型化が不可欠となる。従来研究で抽出された課題を踏まえて、試験片の大型化に対応するためのき裂進展試験ユニットの構造について、荷重荷重機構、き裂長さ測定技術等の改良の検討を行った。

その結果、荷重荷重機構を従来の単軸引張方式からテコ式 (図 4.2.4) にすることにより、キャ

プセル内仕切管内径（ $\phi 44\text{mm}$ ）の制限内で荷重容量を従来ユニットよりも増大できることがわかった。本ユニットの構造解析を行い、ユニット本体であるステンレス部（SUS630）の相当応力の最大値は 700 MPa 程度で弾性領域にあることが分かった。また、最大変位は約 2.6 mm（ベローズ側レバー端部）であり、レバー部にこの程度の変位が発生しても、レバー部が対向するレバー部やキャプセル内壁等に当たって荷重が負荷できなくなることはない。以上の解析結果から、0.5T-CT（試験片の厚さ 12.7 mm）試験片に目標荷重（約 7.6 kN）が負荷できる見通しを得た。

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 19 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。

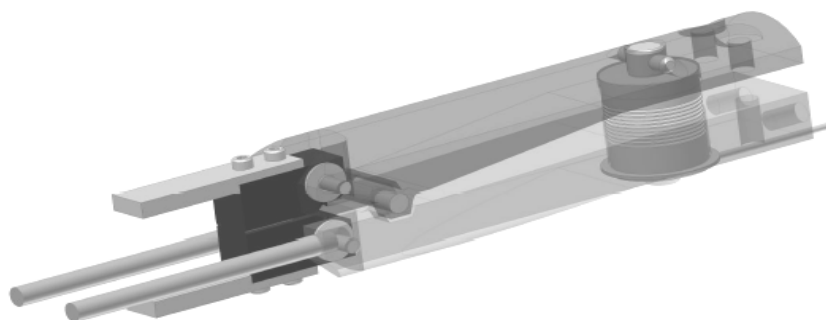


図 4.2.4 検討した新ユニット構造

#### 4.2.5 SCC 環境計測技術の開発

軽水炉内の水化学環境は、中性子・ガンマ線照射による水の放射線分解で発生する化学種により、供給水の水化学環境と大きく異なることが知られている。軽水炉内の水化学環境を測定するには、水化学環境の指標として広く用いられている腐食電位（Electrochemical Corrosion Potential : ECP）を炉内の照射環境下においてその場測定する必要がある。しかし、従来の ECP センサーでは、炉内の中性子束の高い場所で使用すると破損して測定が出来なくなる等、耐久性に問題があり、照射環境下での測定技術は未だ十分に確立されていない。このため、中性子照射下でも耐久性に優れた ECP センサーの開発が必要である。

従来の ECP センサーは、センサー部のジルコニアとスリーブ部の金属との接合部近傍においてジルコニアに割れが生じ、センサーとしての機能が喪失している。この原因の一つとして、ジルコニアと金属の接合により発生する残留応力の影響が考えられる。そのため、残留応力の影響を低減させることを目的として、材料選定及び寸法・形状の最適化のため、接合部の構造解析を行った。接合部の構造解析においては、寸法及び形状をパラメータに有限要素法による解析を行い、従来型センサーより残留応力を低減できる寸法・形状を明らかにした。さらに、スリーブ部の材料選定では、42 合金（鉄ニッケル合金）より SUS430 及び白金を使用することによって残留応力を低減できる可能性があることが明らかとなった。従来型センサー及び代表的な改良型センサーの解析結果を図 4.2.5 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 19 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。

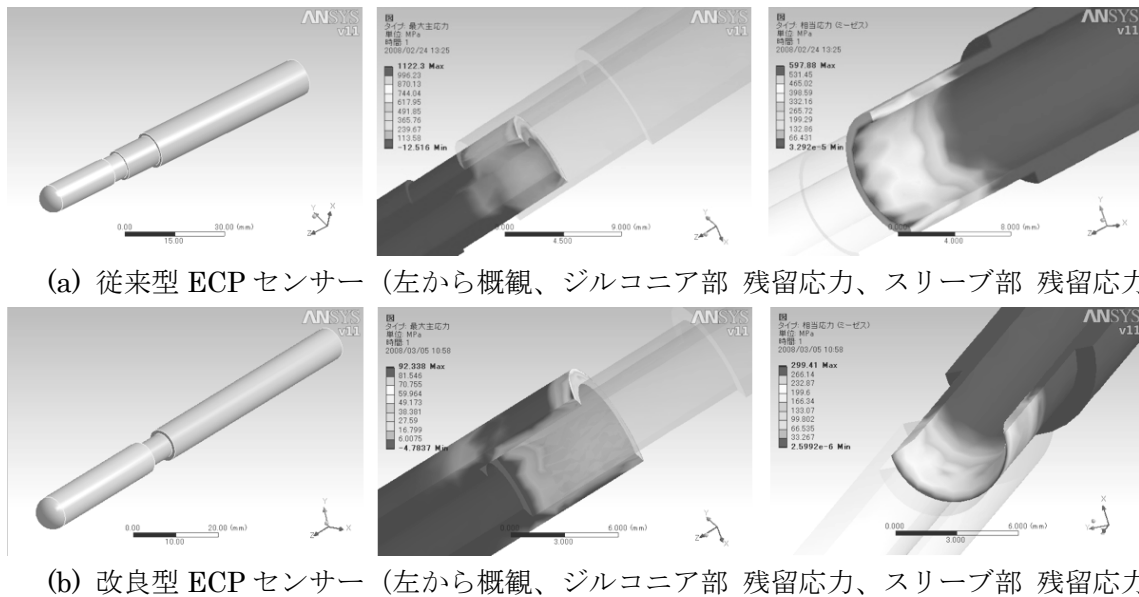


図 4.2.5 残留応力の解析結果

### 4.3 先進計測機器の開発

#### 4.3.1 高温用多対式熱電対の開発

照射試験では、燃料や材料の使用条件（照射雰囲気、照射温度など）を模擬した環境で、照射温度をパラメータにした多様な照射試験が要求されており、照射温度を正確に測定するための熱電対の開発が行われてきた。これまで照射試験で用いられてきた熱電対は、クロメル・アルメル（K 型）熱電対が主であった。この K 型熱電対での最高使用温度は素線の太さによって異なるが、常用で 800℃ 程度、短時間では 1000～1200℃ 程度であり、JMTR では、熱中性子照射量が  $5.0 \times 10^{25} \text{n/m}^2$  までは良好に使用できる実績を有している。しかしながら、1000℃ を超えると、急速に寿命が短くなるため、次世代軽水炉燃料開発、高温ガス炉開発、核融合炉開発の分野での燃材料の照射試験には、従来の K 型熱電対の使用に限界がある。

このため、1000℃ 以上の照射温度でも耐熱性に優れ、熱起電力特性と中性子照射に基づく核変換の少ないニクロシル・ニシル（N 型）多対式熱電対に着目した開発に着手し、今年度は試作試験を実施した。本多対式熱電対は、軽水炉燃料中心の軸方向温度分布測定を想定し、1 本の細径シースに最大 7 点までの測温接点を有するものである。

試作試験として、測温接点位置の軸方向における製作誤差を X 線検査により測定した。この結果を図 4.3.1 に示す。定めた測温接点間距離（A 点：50mm、B 点：30mm、C 点：30mm）に対して、試作した多対式熱電対 3 本とも測温接点の軸方向における製作誤差が設計条件と比較して  $\pm 1 \text{mm}$  以内で製作できることが明らかとなった。

また、試作した多対式熱電対について測温誤差を測定した結果、測温誤差は  $\pm 1\%$  以内で許容誤差の範囲内であることも明らかとなった。今後は、本熱電対を用いて、実際の照射試験への適用性を検討するため、炉外試験にて熱サイクル試験、耐久試験などを行う予定である。

| Positions of hot junctions                             |      | A    | B    | C    |
|--------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| Distance between hot junctions<br>(designed value, mm) |      | 50.0 | 30.0 | 30.0 |
| N type<br>Multi-paired T/C<br>(measured value,mm)      | No.1 | 49.0 | 30.0 | 30.0 |
|                                                        | No.2 | 49.0 | 30.5 | 30.0 |
|                                                        | No.3 | 49.0 | 29.5 | 29.5 |

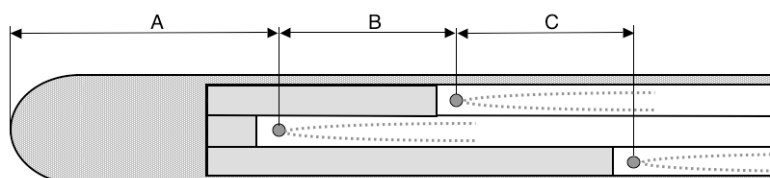


図 4.3.1 N型多対式熱電対の試作試験結果

#### 4.3.2 炉内可視化装置の開発

JMTR の再稼働に向け、炉心管理技術及び計測技術の高度化を図るために、炉内リモートセンシング技術の開発に着手した。本技術は、炉心をリアルタイムで観測し、核的、熱的な各種情報を光情報として取り出すことにより、従来の計測手法では検出できなかった炉内の微妙な変化を正確に検出するものである。炉内光情報利用技術の概念を図 4.3.2(a)に示す。

本装置の予備検討として、原子炉運転中におけるリアルタイムでの光情報伝達の可能性としてチェレンコフ光に着目し、使用済燃料からの発光の解析評価を行った。チェレンコフ光の輝度測定は、JMTR のチャンネル内の使用済燃料ラック内に保管されている使用済燃料をビデオカメラで撮影し、得られた画像からチェレンコフ光の輝度を求めた。また、この測定結果の妥当性を検証するため、使用済燃料から放射されたチェレンコフ光の生成率について、燃焼計算コード（ORIGEN-JR）によりガンマ線強度を計算して生成率を求めた。画像処理による測定データと発光強度計算データを比較した結果を図 4.3.2(b)に示す。この結果、画像処理測定値と発光強度計算値は相関性があり、本手法の適用性について見通しを得ることができた。

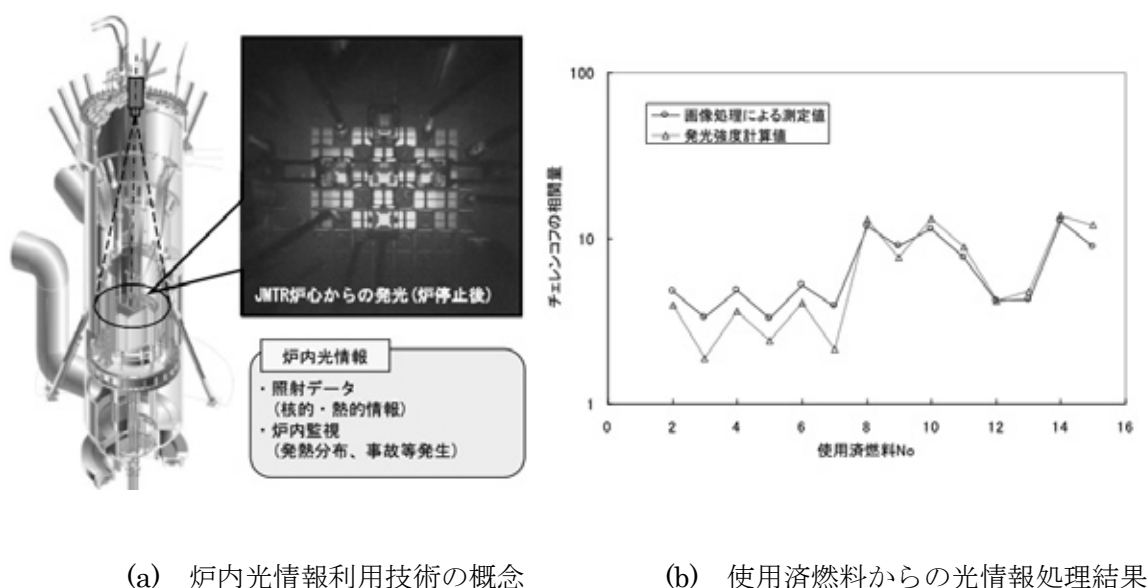


図 4.3.2 炉内光情報利用技術の概念と予備検討結果

#### 4.3.3 炉水モニタの開発

軽水炉の炉内環境における水質管理は、応力腐食割れ（SCC）の発生メカニズムの解明とその対策において重要であり、炉内構造材料の腐食を引き起こすとされる溶存酸素及び過酸化水素濃度などの酸化性化学物質の正確な計測が必要である。現在、水質管理は、主として原子炉压力容器の炉水を採取し、炉外においてその炉水中の溶存酸素や過酸化水素などを計測して、腐食環境を推測している。しかしながら、高温高压かつ高放射線量の炉水環境では短時間で化学物質が変化するため、炉内構造材料の腐食に影響する化学物質を正確に測定することが困難である。このため、このような環境下で生成される化学物質を精度良く測定するための計測機器の開発に着手している。

開発においては、多くの情報を短時間で得ることを目標として、化学物質の吸光特性や化学反応による発光特性に着目し、これらを光ファイバーにより運転中原子炉内の水環境をその場計測する計測装置の開発を目指した。本装置の基本性能を確認するために、光ファイバーを用いた分光測定装置及び化学センサーを組み合わせた装置を試作した。試作した炉水分析装置を図 4.3.3 に示す。また、試作した装置の基本性能を確認するために、分光測定装置及び化学センサーの定量の過酸化水素濃度に対する応答の相関性を調べた。この結果、分光測定結果は、過酸化水素濃度 20ppm 以上で相関性が認められ、本開発装置により水中の化学物質を同定できる見通しが得られた。

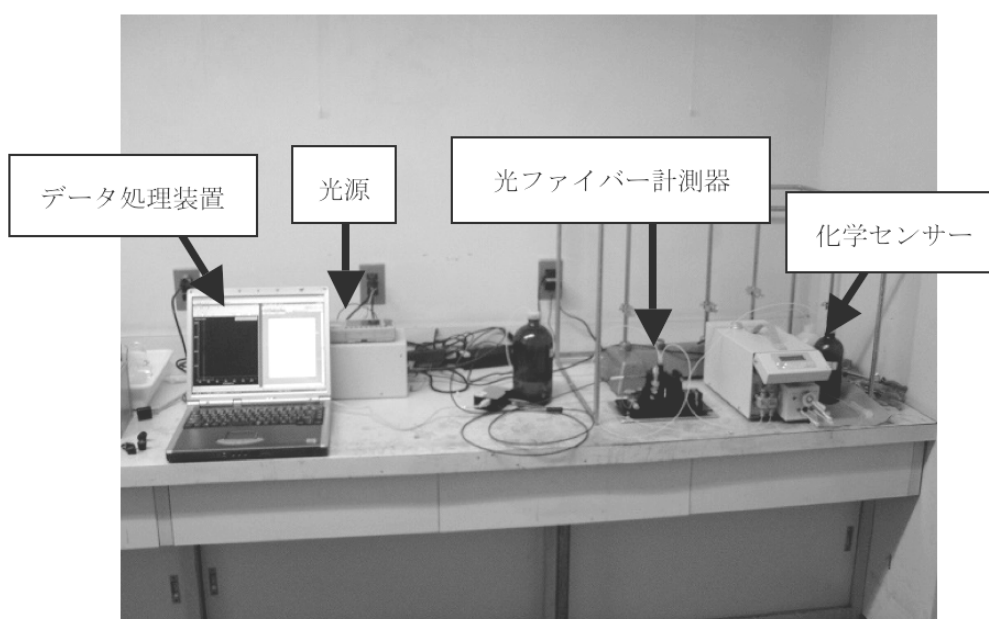


図 4.3.3 試作した炉水分析装置

#### 4.4 工業利用に係わる開発

##### 4.4.1 シリコン照射設備の概念検討

シリコン半導体は、世界各国で使用されており、最近では 6 から 8 インチの大口径シリコン半導体（シリコンウェーハ）の需要が高まってきている。シリコン半導体は、ハイブリッド車、制御用インバータデバイスを搭載した燃料電池自動車、インバータ制御への転換が進んでいる高速車両などに利用されるなど、パワーエレクトロニクス分野における急激な技術革新に寄与しており、産業界からシリコン半導体の製造が求められている。このため、JMTR を利用したシリコン照射装置に関する概念検討を実施した。

JMTR に設置可能なシリコン照射設備について、核的な観点から検討した結果、炉心内において整備可能な位置は、炉心北側の 4×4 孔（J,K,L,M-1,2,3,4）の領域である。そのため、この領域に設置可能なシリコン照射設備を検討した。

シリコン照射設備の概念を図 4.4.1 に示す。シリコン試料は、原子炉プール付近から炉心内に装荷し、回転させながら照射を行う。照射済シリコン試料は取り出した後、冷却のため専用の保管場所へ自動で移動させる。

本概念検討の結果、直径 8 インチまでのシリコン試料の照射ができる見通しを得た。

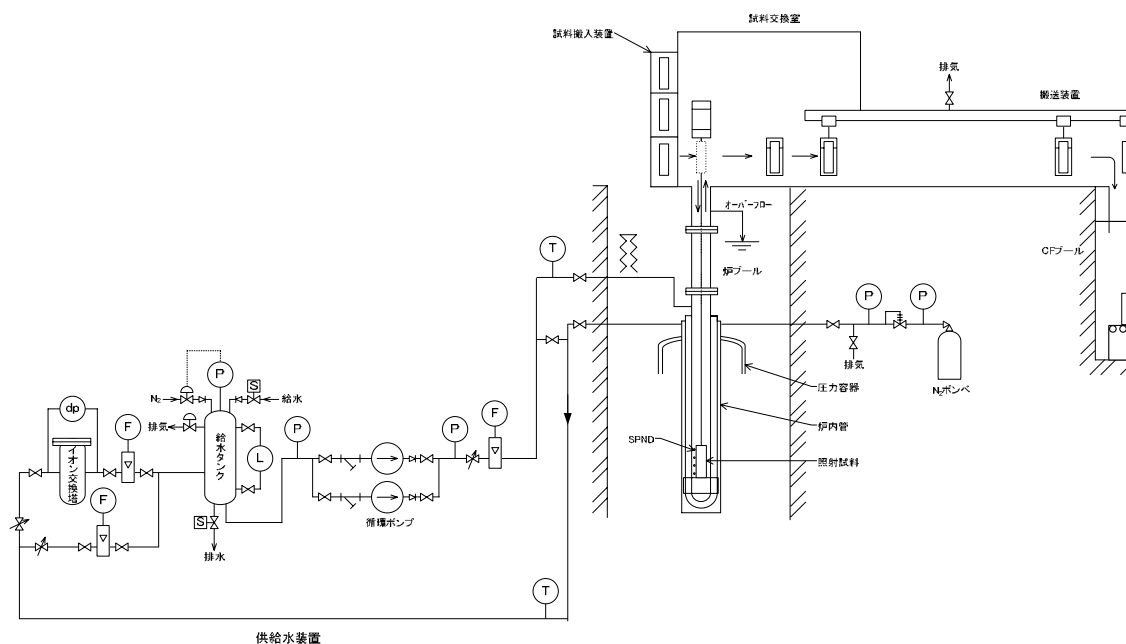


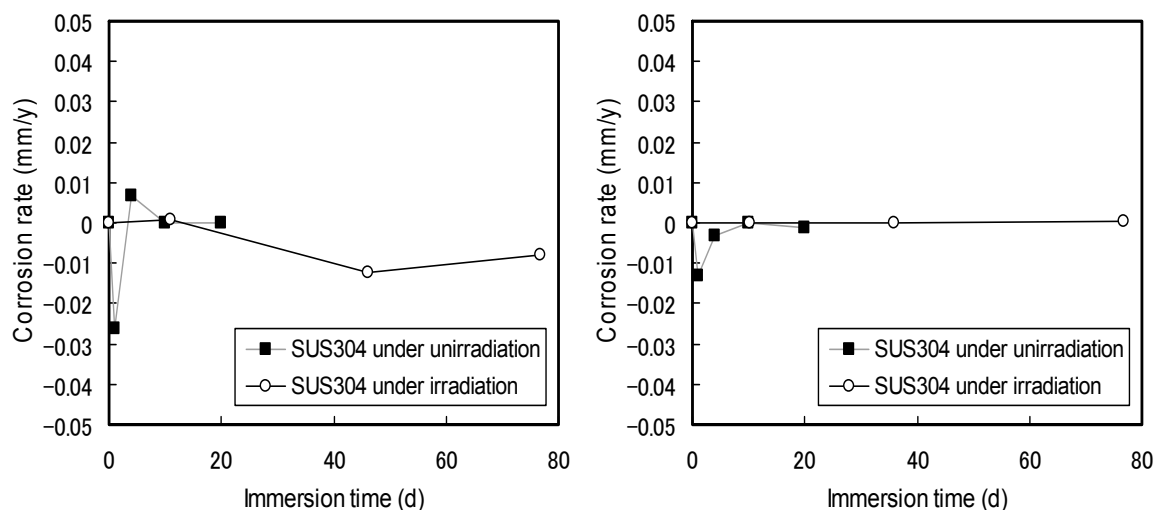
図 4.4.1 シリコン半導体製造装置の概念図

#### 4.4.2 溶液照射法による $^{99m}\text{Tc}$ 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  $^{99m}\text{Tc}$  の親核種である  $^{99}\text{Mo}$  を製造する新たな手法として提案しているものである。この新たな方法では、モリブデン水溶液を原子炉内で中性子照射し、 $(n, \gamma)$  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  $^{99}\text{Mo}$  を製造できる。本方法の実用化に向けて、照射ターゲットとなるモリブデン酸塩水溶液の特性を評価する必要がある。

溶液照射法で用いる照射ターゲットの候補として選定した 2 種類のモリブデン酸塩水溶液（モリブデン酸アンモニウム水溶液及びモリブデン酸カリウム水溶液）を用い、ガンマ線照射下において、選定水溶液と構造材との両立性、選定水溶液の化学的安定性、循環特性、放射線分解及びガンマ発熱について調べた。選定水溶液と構造材との両立性に関しては、選定水溶液中に試験片を浸漬し、浸漬時間と試験片の重量変化量から腐食速度を求めた。試験片として、JMTR において使用実績のあるステンレス鋼（SUS304）を用いた。試験片の浸漬時間と腐食速度との関係を図 4.4.2（①モリブデン酸アンモニウム水溶液浸漬及び②モリブデン酸カリウム水溶液浸漬）に示す。なお、浸漬時間は最大約 77 日間で、そのうち約 61 日間ガンマ線（照射強度： $2.3 \times 10^5 \text{ Gy/d}$ ）を照射した。両溶液ともに腐食速度は小さく、また未照射下の腐食速度と比較して、ガンマ線照射下の腐食速度が大きくなる傾向は認められなかった。その結果、ステンレス鋼をキャプセル材や配管材として使用できる見通しを得た。その他、選定水溶液は化学的に安定であり、水溶液の循環は滞りなく行われること、選定水溶液の放射線分解によって発生したガス中の水素成分の割

合は水の場合と比べて高くなること、選定水溶液のガンマ加熱率は純水と同程度であることがわかった。



①モリブデン酸アンモニウム水溶液浸漬

②モリブデン酸カリウム水溶液浸漬

図 4.4.2 SUS304 試験片の浸漬時間と腐食速度の関係

## 4.5 ベリリウムリサイクル技術開発

### 4.5.1 ベリリウム長寿命化のための照射試験法の開発

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こと、中性子を効率的に利用する中性子反射体として使用されている。しかしながら、金属 Be は、中性子との核反応により He が生成することによる機械的強度の変化、スエリング (体積膨張) による曲りなどの影響から、定期的に交換されている。このため、定期的交換作業を無くすことにより JMTR の稼働率を向上させ、かつ放射性廃棄物も低減させることを目的に、金属 Be の長寿命化のための研究開発に着手した。

まず、これまで使用していた Be 棒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 (S-200F 及び S-65C) について、JMTR を用いて予備照射試験を実施し、これらの金属 Be の照射効果を調べた。

ここで、本研究開発を進めるにあたって、中性子照射により金属 Be 中に生成するトリチウムをホットセル内に放出させないための照射キャプセル開封装置を開発するとともに、レーザーと高精度自動ステージを組合せた遠隔操作型精密寸法測定装置 (図 4.5.1) を開発した。これらの装置開発により、ホットセル内で困難とされていた中性子照射による Be の寸法変化や曲りを数  $\mu\text{m}$  の精度で連続的に測定することが可能となった。

この予備照射試験の結果、 $1 \times 10^{24}/\text{m}^2$  ( $E > 1\text{MeV}$ ) まで照射した S-65C 製金属 Be は、これまで

使用してきた金属 Be (S-200F) よりも引張強度が高く、また開発した遠隔操作型寸法測定装置を用いた曲り測定の結果、本照射条件でほとんど曲がらないことがわかった。

本成果による照射済 Be の照射特性データは、製造方法や不純物含有量の違いによる金属 Be の照射特性に与える影響解明のための基礎データとして活用されるとともに、JMTR の稼働率向上や廃棄物低減化に向けた金属 Be 製中性子反射体の長寿命化に向けての見通しが得られた。

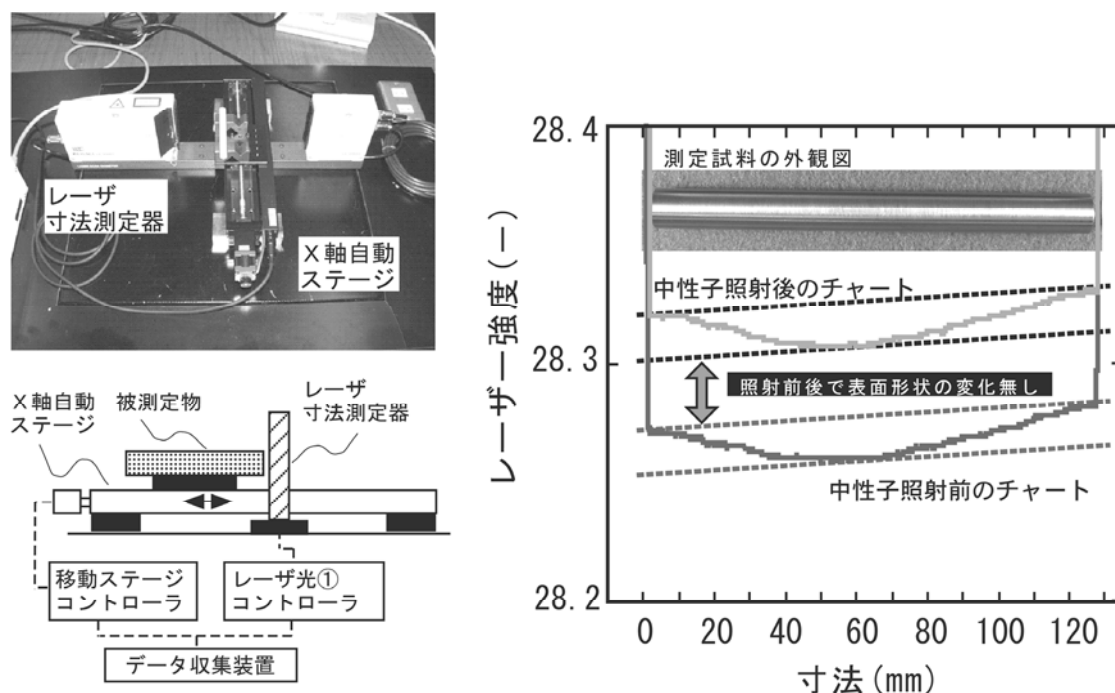


図 4.5.1 遠隔操作型精密寸法測定装置

#### 4.5.2 ベリリウムリサイクルに関する技術開発

ベリリウムは、中性子捕獲断面積が非常に小さく散乱断面積が大きいいため、試験研究炉の中性子反射体及び減速材として重要な役割を担っている。このベリリウムは、

- ・炉内での中性子との核反応により、材料中に有害なトリチウムガスを生成すること、
- ・核兵器の必須構成材料であるために国際規制物質であること、
- ・人体への影響を考慮した特定化学物質に指定されていること、など

により、世界中のほとんどの試験研究炉を有する国において廃棄処理が難しく、主に原子炉施設内で保管されているのが現状である。

JMTR では、照射された使用済ベリリウムが、現在総計約 2～3 トン JMTR カナルに保管されている。一方、米国では中性子照射された使用済ベリリウムを砂漠に埋蔵処分した例があるが、現在、そのベリリウムから長半減期である  $^{14}\text{C}$  が地下水に混入し、汚染しているという環境問題が生じ、米国内で大きな問題になっている。

このような観点から、使用済ベリリウムを処理して再利用することは、資源の有効利用、核不拡散体制の強化などのために行うべき課題であり、この使用済ベリリウムの再利用に関する実験室規模での試験が行われてきた。しかしながら、これまで開発していた再処理方法は、ベリリウムを塩素ガスと反応させた後に金属ベリリウムを分離回収するため、 $1500^{\circ}\text{C}$ 程度の極めて高温状態で熱分解するものである。また、このような高温状態の処理は、高温でもハロゲン元素に対し高い耐食性を有する材料で構成される装置を必要とした。また、ハロゲン元素と反応させて生成する揮発性ハロゲン化ベリリウムを  $1500^{\circ}\text{C}$  の高温で処理することは、ベリリウムの回収率が低く、しかも経済性の面でも課題がある。

このため、使用済ベリリウムからハロゲン化ベリリウムの製造を行い、その熱分解の温度を  $1000^{\circ}\text{C}$  以下にすることにより、ベリリウムの回収効率を向上させる新たな再処理方法の開発に着手した。予備検討の結果、図 4.5.2 に示すような不純物含有ベリリウムからの高純度ベリリウム回収システムの基本概念を構築した。本回収システムでは、ハロゲン元素（塩素ガス、臭素ガス、ヨウ素ガスなど）と  $500^{\circ}\text{C}$  以上で反応させてハロゲン化ベリリウムなどの揮発性物質に変換し、放電励起して化学的に活性な水素ガスを混合させたアルゴンガスやヘリウムガスによって、ハロゲン化ベリリウムを  $500^{\circ}\text{C}$  以上の温度を保ちながら移送することで不揮発性の放射性コバルトを分離することが可能である。

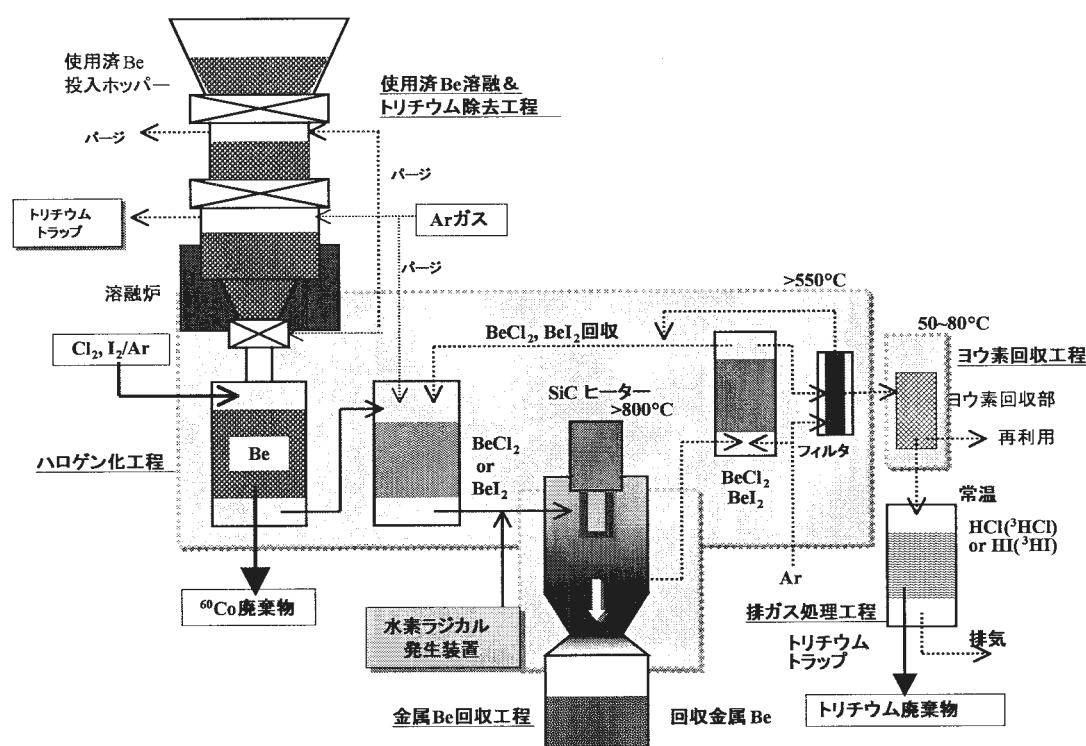


図 4.5.2 ベリリウム再処理システムの概念図

## 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、JMTR 級の大型の照射試験炉を有する米国 (ATR、出力 250MW)、ベルギー (BR-2、出力 100MW)、オランダ (HFR、出力 45MW) 等の原子力研究機関を訪問し、JMTR との連携に関する情報交換を行った。また、JMTR をはじめとする世界各国の主要な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うことを目的とした汎用照射試験炉に関する国際会議の開催 (平成 20 年 7 月開催予定) に向けた準備を開始した。

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ことにより、照射後試験に関する情報交換を行った。

### 5.2 スタズビックグループとの研究協力

平成 19 年 12 月 12 日、日本原子力研究開発機構は、スウェーデン王国スタズビックグループ (Studsvik AB) との間で、「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」を締結した。調印式は、スウェーデン王国ニーショーピン市において行われた (図 5.2.1)。

調印された実施取決めにおいて今後進める協力分野は、照射試験炉センターが進める「照射試験炉における中性子試験に関する技術開発」及びバックエンド推進部門が進める「リサイクルを含む放射性廃棄物処理技術」の 2 分野である。なお、ニーショーピン市と大洗町との間には、「虹の友好都市」として友好都市の締結(平成 18 年 5 月 23 日)がなされている。

今後、照射試験炉センターとスタズビックグループとの間で、中性子照射試験のための技術開発に関する具体的な技術協力を進める予定である。



図 5.2.1 「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」の調印式の様子

### 5.3 カザフスタン国立原子力センターとの研究協力

2007 年 4 月 30 日、日本原子力研究開発機構は、カザフスタン国立原子力センターとカザフスタン共和国のアスタナにて、「原子力研究開発における将来の協力のための日本原子力研究開発機構とカザフスタン国立原子力センターとの間の覚書」を結んだ。

今後、照射試験炉センターとカザフスタン国立原子力センターにおいて、試験研究炉で使用したベリリウム反射体のリサイクル等に係る技術開発等の研究協力を進める予定である。

## 6. あとがき

照射試験炉センターを中核とした推進体制により、平成 23 年度の再稼働に向けた JMTR 原子炉施設の一部更新及び照射設備の整備による JMTR の改修工事を安全かつ着実に進めるとともに、照射試験炉を利用した照射試験で世界をリードすべく開始した新たな照射技術の開発に着手し、利用性など利用者の大きな期待に応えるための取組みを進めている。

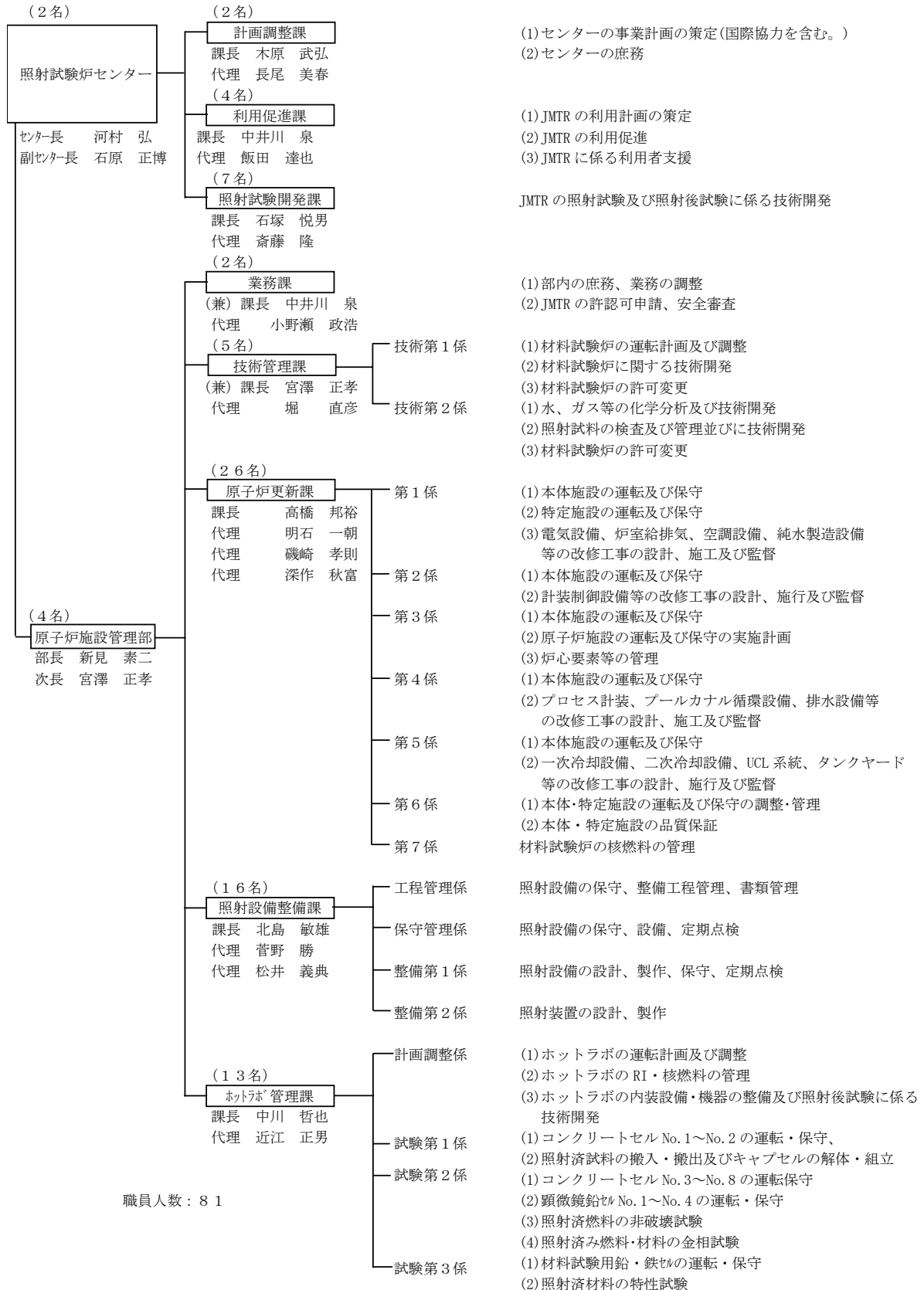
平成 20 年度からは JMTR の改修作業が本格化し、それに対応して照射技術開発も加速する予定である。さらに、新たな JMTR の照射利用の枠組みについても具体化させる予定である。

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齋藤 順市・技術主幹に深く感謝の意を表します。

# 付録1 照射試験炉センターの組織



## 付録2 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。

平成 19 年度の施設定期自主検査は、7 月～12 月まで実施し、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 19 年度の施設定期検査も実施し、平成 18 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 19 年 12 月 19 日～20 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 $\beta \cdot \gamma$ 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 19 年度に照射後試験を実施した照射済キャプセル等は 62 本であり、そのうち 23 本のキャプセルについて照射後試験を終了した。

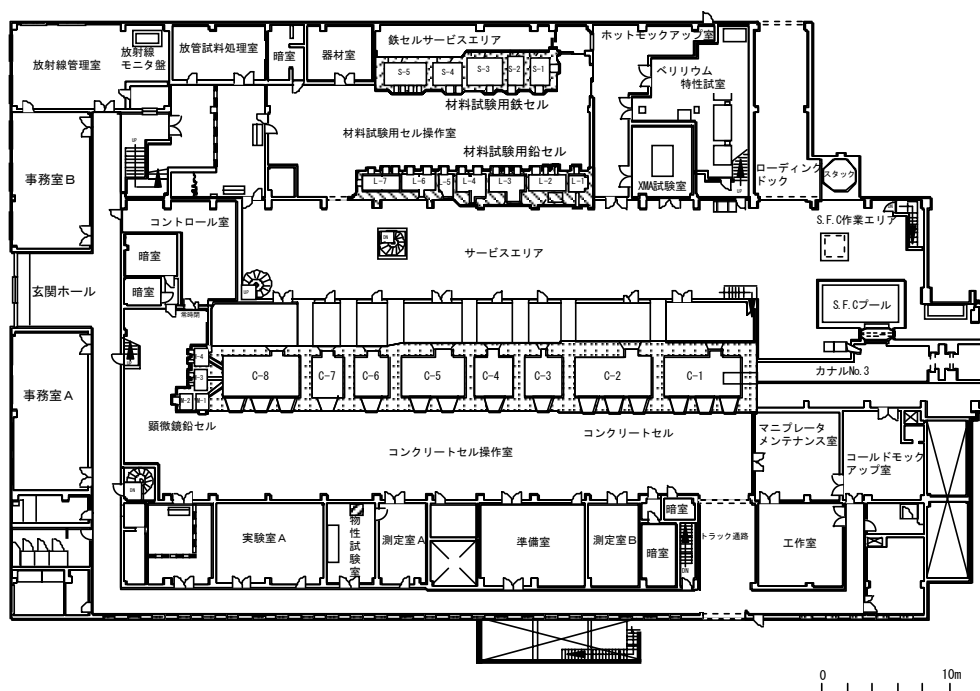


図 B-1 JMTR ホットラボの概要

## 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 19 年度の施設定期自主検査は、平成 19 年 8 月～平成 20 年 3 月まで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3 外部発表

#### 講演・学会発表

堀 直彦, 河村 弘, 片西 昌司, “Refurbishment of Japan Materials Testing Reactor”, International Conference of Nuclear Power of Republic Kazakhstan, (2007.9).

井手 広史, 石塚 悦男, 綿引 俊介, 齋藤 隆, 稲葉 良知, 河村 弘, “STATUS OF IRRADIATION TECHNIQUES OF JAPAN MATERIALS TESTING REACTOR(JMTR)”, International Conference of Nuclear Power of Republic Kazakhstan, (2007.9).

稲葉 良知, 石川 幸治, 石田 卓也, 黒澤 きよ子\*, 菱沼 行男\*, 石塚 悦男, 蓼沼 克嘉\*, “Highly efficient production of natural-Mo(n,gamma)<sup>99</sup>Mo and practical (n,gamma)<sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tc generator for medical use”, International Conference of Nuclear Power of Republic Kazakhstan, (2007.9).

土谷 邦彦, 河村 弘, I. Tazhibayeva\*, V. Shestakov\*, O. Maksimkin\*, P. Chakrov\*, Sh. Gizatuln\*, E. Kenzhin\*, Y. Chikhray\*, T. Kulsartov\*, A. Kuykabaeva\*, “High Lithium Burn-up Test of Tritium Breeder for DEMO Solid Breeding Blanket under the ISTC Project”, International Conference of Nuclear Power of Republic Kazakhstan, (2007.9).

河村 弘, 土谷 邦彦, 綿引 俊介, I. Tazhibayeva\*, A. Vurim\*, V. Kotov\*, V. Savchyk\*, S. Kozhakhmetov\*, V. Shestakov\*, E. Chikhray\*, “Recycling of Used Beryllium Irradiated in Material Testing Reactor”, International Conference of Nuclear Power of Republic Kazakhstan, (2007.9).

相沢 静男, 雨澤 博男\*, 三瓶 真一, 土屋 文\*, 鳴井 実\*, 小無 健司\*, “高速炉用水素化物中性子吸収材の開発”, 日本原子力学会「2007 年秋の大会」, (2007.9).

綿引 俊介, 中道 勝, 那珂 通裕, 齋藤 隆, 井手 広史, 宮澤 正孝, 石原 正博, 河村 弘, “新 JMTR 炉心からの光情報利用技術開発に関する予備的検討”, 日本原子力学会「2007 年秋の大会」(2007.9).

出雲 寛互, 長尾 美春, 新見 素二, 河村 弘, “JMTR 改修の全体概要” 平成 19 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-R0466, (2008.3).

五来 滋, 塙 善雄, 海老沢 博幸, 大戸 勤, 深作 秋富, “原子炉機器の更新計画”, 平成 19 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-R0466, (2008.3).

飯村 光一, 堀 直彦, 菅野 勝, “照射設備の整備計画-<sup>99</sup>Mo 製造に係る照射設備-”, 平成 19 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-R0466, (2008.3).

田口 剛俊, 土谷 邦彦, 近江 正男, “中性子反射体として使用された放射化ベリリウムの輸送検討”, 平成 19 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-R0466, (2008.3).

稲葉 良和, 石川 幸治, 石田 卓也, 石塚 悦男, 黒澤 きよ子, 菱沼 行男, 蓼沼 克嘉, “循環 Mo 溶液の照射による  $^{99}\text{Mo}$  製造法に関する研究(1)-コールド試験(予備試験)結果-”, 日本原子力学会「2008 年春の年会」, (2008.3).

## 論文投稿

三島 良直\*, 吉田 直亮\*, 河村 弘, 石田 清仁\*, 波多野 雄治\*, 柴山 環樹\*, 宗像 健三\*, 佐藤 芳幸\*, 内田 宗範\*, 土谷 邦彦, 田中 知\*, “Recent Results on Beryllium and Beryllides in Japan”, *Journal of Nuclear Materials*, 367-370, 1382-1386, (2007.08).

土谷 邦彦, 河村 弘, 石田 卓也, “Compatibility between Be-Ti Alloy and F82H Steel”, *Journal of Nuclear Materials*, 367-370, 1018-1022, (2007.08).

I.L. Tazhibayeva\*, E.A. Kenzhin\*, P.V. Chachrov\*, F.M. Arinkin\*, Sh. Kh. Gasatulin\*, E.S. Bekmukhabetov\*, V.P. Shestakov\*, E.V. Chikhray\*, T.V. Kulsartov\*, A.A. Kuykabaeva\*, 河村 弘, 土谷 邦彦: “Use of WWR-K Reactor for Long-Term trials of Lithium Ceramic  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  for Fusion Reactor Blanket”, *Proc. International Technical Conference “Research Reactors” (Question of Atomic Science and Technique - Fusion)*, pp.3-10, (2007.09).

土谷 邦彦, 星野 毅, 河村 弘, 三島 良直\*, 吉田 直亮\*, 寺井 隆幸\*, 田中 知\*, 宗像 健三\*, 加藤 茂\*, 内田 宗範\*, 中道 勝, 山田 弘一\*, 八巻 大樹, 林 君夫, “Development of Advanced Tritium Breeders and Neutron Multipliers for DEMO Solid Breeder Blankets”, *Nuclear Fusion*, 47, 1300-1306, (2007.09).

土谷 邦彦, 石田 卓也, 河村 弘, “Effect of  $\alpha$  Be Content on Compatibility between Be-Ti and SS316LN”, *Nuclear Technology*, 159, 228-232, (2007.09).

土谷 邦彦, 清水 道雄, 河村 弘, G. Kalinin\*, “Effect of Re-neutron Irradiation on Mechanical Properties of Un-irradiated/Irradiated SS316LN Weldments”, *Journal of Nuclear Materials*, 373, 212-216, (2008.02).

\*印：原子力機構以外

#### 付録4 研究報告書類

長尾 美春, 佐藤 政四, 新見 素二, “JMTR における核加熱率の評価”, JAEA - Technology 2007-051, (2007).

加藤 佳明, 山本 敏雄, 高田 文樹, 近江 正男, 中川 哲也, “JMTR ホットラボにおける鉛セル内放射線モニターの更新”, JAEA-Testing 2008-004, (2008).

加藤 佳明, 三輪 幸夫, 高田 文樹, 近江 正男, 中川 哲也, “重照射された原子炉材料のための遠隔操作型結晶方位解析装置の整備”, JAEA-Testing 2008-005, (2008).

原子炉施設管理部, “材料試験炉の活動報告 (2006 年度) ”, JAEA-Review 2008-006, (2008).

井手 広史, 松井 義典, 川又 一夫, 田口 剛俊, 金澤 賢治, 小沼 勇一, 渡邊 浩之, 井上 修一, 出雲 寛互, 石田 卓也, 齋藤 隆, 加治 芳行, 宇賀地 弘和, 塚田 隆, 石塚 悦男, 河村 弘, “IASCC 照射試験にかかわるキャプセルの製作, 1; き裂進展試験用キャプセル(共同研究)”, JAEA-Technology 2008-011, (2008).

井手 広史, 松井 義典, 川又 一夫, 田口 剛俊, 金澤 賢治, 小沼 勇一, 渡邊 浩之, 井上 修一, 出雲 寛互, 石田 卓也, 齋藤 隆, 加治 芳行, 宇賀地 弘和, 塚田 隆, 石塚 悦男, 河村 弘, “IASCC 照射試験にかかわるキャプセルの製作, 2; き裂発生試験用キャプセル(共同研究)”, JAEA-Technology 2008-012, (2008).

井手 広史, 出雲 寛互, 石田 卓也, 齋藤 隆, 塙 悟史, 松井 義典, 岩松 重美, 金澤 賢治, 三輪 幸夫, 加治 芳行, 塚田 隆, 石塚 悦男, 河村 弘, “IASCC 照射試験にかかわるキャプセルの製作, 3; 腐食電位計測用キャプセル(共同研究)”, JAEA-Technology 2008-013, (2008).

林 光二, 柴田 晃, 岩松 重美, 相沢 静男, 高田 文樹, 近江 正男, 中川 哲也, “照射済キャプセル外筒管を用いた試験片加工技術の開発とこれを用いた高照射量ステンレス鋼の強度評価試験”, JAEA- Technology 2008-016, (2008).

塙 善雄, 出雲 寛互, 深作 秋富, 長尾 美春, 河村 弘, “JMTR 二次冷却系配管の健全性調査”, JAEA- Review 2008-023, (2008).

細川 甚作, 出雲 寛互, 石塚 悦男, “OPAL 炉における照射技術の調査”, JAEA-Review 2008-028, (2008).

柴田 晃, 川又 一夫, 田口 剛俊, 加治 芳行, 清水 道雄\*, 金澤 賢治, 松井 義典, 岩松 重美, 相沢 静男, 田山 義伸, 近江 正男, 中川 哲也, “IASCC 試験用キャプセル組立てのための溶接技術の開発”, JAEA-Technology 2008-029, (2008).

飯村 光一, 細川 甚作, 堀 直彦, 坂本 太一, 中川 哲也, 菅野 勝, “JMTR を用いた  $^{99}\text{Mo}$  製造設備の概念検討”, JAEA-Technology 2008-035, (2008).

富田 健司, 土谷 邦彦, 小沼 勇一, 井上 修一, 渡邊 浩之, 齋藤 隆, 菊地 泰二, 林 君夫, 北島 敏雄, “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”, JAEA-Technology 2008-036, (2008).

細川 甚作, 菅野 勝, 坂本 太一, “JMTR を用いたシリコン半導体製造装置の概念検討”, JAEA-Technology 2008-038, (2008).

塙 善雄, 田口 剛俊, 坪井 一明, 齋藤 隆, 石川 和義, 綿引 俊介, 土谷 邦彦, “中性子反射体ベリリウムの長寿命化に関する予備検討(1)-中性子照射キャプセル及びキャプセル開封装置の製作-”, JAEA-Technology 2008-039, (2008).

五来 滋, 那珂 通裕, 出雲 寛互, 長尾 美春, 河村 弘, “JMTR 炉心管理システムの高度化に関する検討-SRAC2006 コードシステムの適用性-”, JAEA-Technology 2008-040, (2008).

田口 剛俊, 塙 善雄, 綿引 俊介, 土谷 邦彦, “中性子反射体用ベリリウムの長寿命化に関する予備検討(2)-高精度寸法測定法の開発-”, JAEA-Technology 2008-041, (2008).

富田 健司, 細川 甚作, 松井 義典, “JMTR キャプセル照射温度評価法の開発-有限要素法「NISA」コードによる CT 試験片及び 2 分割熱媒体の温度評価”, JAEA-Technology 2008-043, (2008).

綿引 俊介, 齋藤 隆, 土谷 邦彦, 小原 浩史, 飯村 光一, “高温用 N 型多対式熱電対の開発”, JAEA-Technology 2008-044, (2008).

\*印：原子力機構以外

## 付録5 官庁申請許可一覧

### 5.1 設計及び工事の方法の認可

| 申請年月日 | 内 容  | 認可年月日 |
|-------|------|-------|
|       | 該当なし |       |

### 5.2 使用前検査

| 申請年月日 | 件 名  | 合格年月日 |
|-------|------|-------|
|       | 該当なし |       |

### 5.3 施設検査

| 申請年月日 | 件 名  | 合格年月日 |
|-------|------|-------|
|       | 該当なし |       |

### 5.4 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6 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        |
|---------------------------|--------------------------|---------------|
| (2007.12.21<br>取材)        | 「モリブデン 99」の国産化計画         | 2008.1.6 茨城新聞 |
| (2008.3.21<br>取材案内<br>配布) | 第1回 JMTR 運営・利用委員会の開催について | —             |

## (2) 表彰（受賞）等一覧

| 受賞年月日      | 表彰（受賞）件 名                                               | 受賞者                           |
|------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 2007.10.1  | 理事長表彰（研究開発功績賞）<br>JMTR を用いた放射線誘起表面活性による流動沸騰<br>熱伝達改善の検証 | RISA 効果による熱<br>伝達改善研究グルー<br>プ |
| 2007.10.1  | 理事長表彰（模範賞）<br>大洗研究開発センター品質保証活動の統一                       | 品質保証計画書統合<br>化グループ            |
| 2007.10.17 | 平成 19 年度火力及び原子力発電所現場永年勤務者表彰<br>(社団法人 火力原子力発電技術協会)       | 磯崎 孝則<br>五来 滋                 |

## (3) 特許一覧

| 登録年月日      | 発明の名称（発明者）                                | 登録番号    |
|------------|-------------------------------------------|---------|
| 2007.6.13  | リチウム同位体分離方法とその装置<br>(河村 弘、土谷 邦彦、梅田 幹)     | 1186337 |
| 2007.9.28  | リチウムジルコネート微小焼結粒の製造方法<br>(河村 弘、土谷邦彦、他 3 名) | 4017229 |
| 2007.11.16 | 酸化リチウム粒の製造方法<br>(河村 弘、土谷邦彦、他 3 名)         | 4039646 |

# 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 <sup>2</sup>     |   |
| 体積                        | 立方メートル       | m <sup>3</sup>     |   |
| 速さ, 速度                    | メートル毎秒       | m/s                |   |
| 加速度                       | メートル毎秒毎秒     | m/s <sup>2</sup>   |   |
| 波数                        | 毎メートル        | m <sup>-1</sup>    |   |
| 密度, 質量密度                  | キログラム毎立方メートル | kg/m <sup>3</sup>  |   |
| 面積密度                      | キログラム毎平方メートル | kg/m <sup>2</sup>  |   |
| 比体積                       | 立方メートル毎キログラム | m <sup>3</sup> /kg |   |
| 電流密度                      | アンペア毎平方メートル  | A/m <sup>2</sup>   |   |
| 磁界の強さ                     | アンペア毎メートル    | A/m                |   |
| 量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度   | モル毎立方メートル    | mol/m <sup>3</sup> |   |
| 質量濃度                      | キログラム毎立法メートル | kg/m <sup>3</sup>  |   |
| 輝度                        | カンデラ毎平方メートル  | cd/m <sup>2</sup>  |   |
| 屈折率 <sup>(b)</sup>        | (数字の)        | 1                  | 1 |
| 比透磁率 <sup>(b)</sup>       | (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 <sup>(b)</sup>   | rad               | 1 <sup>(b)</sup>     | m/m                                                            |  |
| 立体角                           | ステラジアン <sup>(b)</sup> | sr <sup>(c)</sup> | 1 <sup>(b)</sup>     | m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>                                 |  |
| 周波数                           | ヘルツ <sup>(d)</sup>    | Hz                |                      | s <sup>-1</sup>                                                |  |
| 力                             | ニュートン                 | N                 |                      | m kg s <sup>-2</sup>                                           |  |
| 圧力, 応力                        | パスカル                  | Pa                | N/m <sup>2</sup>     | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                             |  |
| エネルギー, 仕事, 熱量                 | ジュール                  | J                 | N m                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                              |  |
| 仕事率, 工率, 放射束                  | ワット                   | W                 | J/s                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>                              |  |
| 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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>              |  |
| 静電容量                          | ファラド                  | F                 | C/V                  | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup> |  |
| 電気抵抗                          | オーム                   | Ω                 | V/A                  | m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>              |  |
| コンダクタンス                       | ジーメンズ                 | S                 | A/V                  | m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup> |  |
| 磁束                            | ウェーバ                  | Wb                | Vs                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>              |  |
| 磁束密度                          | テスラ                   | T                 | Wb/m <sup>2</sup>    | kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>                             |  |
| インダクタンス                       | ヘンリー                  | H                 | Wb/A                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>              |  |
| セルシウス度 <sup>(e)</sup>         | セルシウス度 <sup>(e)</sup> | °C                |                      | K                                                              |  |
| 光束流                           | ルーメン                  | lm                | cd sr <sup>(c)</sup> | cd                                                             |  |
| 放射                            | ルクス                   | lx                | lm/m <sup>2</sup>    | m <sup>-2</sup> cd                                             |  |
| 放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>      | ベクレル <sup>(d)</sup>   | Bq                |                      | s <sup>-1</sup>                                                |  |
| 吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ           | グレイ                   | Gy                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |  |
| 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 <sup>(g)</sup>  | Sv                | J/kg                 | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                 |  |
| 酸素活性化カタール                     | kat                   |                   |                      | s <sup>-1</sup> 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)ヘルシウス度は周期現象についてのみ、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                                                                        |
| 粘度                            | パスカル秒             | Pa s                  | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>                                                   |
| 力のモーメント                       | ニュートンメートル         | N m                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>                                                    |
| 表面張力                          | ニュートン毎メートル        | N/m                   | kg s <sup>-2</sup>                                                                   |
| 角速度                           | ラジアン毎秒            | rad/s                 | m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>                                   |
| 角加速度                          | ラジアン毎秒毎秒          | rad/s <sup>2</sup>    | m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>                                   |
| 熱流密度, 放射照度                    | ワット毎平方メートル        | W/m <sup>2</sup>      | kg s <sup>-3</sup>                                                                   |
| 熱容量, エントロピー                   | ジュール毎ケルビン         | J/K                   | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                    |
| 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 <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>                                       |
| 比エネルギー                        | ジュール毎キログラム        | J/kg                  | m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>                                                       |
| 熱伝導率                          | ワット毎メートル毎ケルビン     | W/(m K)               | m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>                                                 |
| 体積エネルギー                       | ジュール毎立方メートル       | J/m <sup>3</sup>      | m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>                                                   |
| 電界の強さ                         | ボルト毎メートル          | V/m                   | m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>                                                 |
| 電荷密度                          | クーロン毎立方メートル       | C/m <sup>3</sup>      | m <sup>-3</sup> sA                                                                   |
| 表面電荷                          | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> sA                                                                   |
| 電束密度, 電気変位                    | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>      | m <sup>-2</sup> sA                                                                   |
| 誘電率                           | ファラド毎メートル         | F/m                   | m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>                        |
| 透磁率                           | ヘンリー毎メートル         | H/m                   | m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>                                                 |
| モルエネルギー                       | ジュール毎モル           | J/mol                 | m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>                                  |
| 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 <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>                  |
| 照射線量 (X線及びγ線)                 | クーロン毎キログラム        | C/kg                  | kg <sup>-1</sup> sA                                                                  |
| 吸収線量                          | グレイ毎秒             | Gy/s                  | m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>                                                       |
| 放射強度                          | ワット毎ステラジアン        | W/sr                  | m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> |
| 放射輝度                          | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m <sup>2</sup> sr) | m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>                |
| 酵素活性濃度                        | カタール毎立方メートル       | kat/m <sup>3</sup>    | m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol                                                  |

| 表 5. SI 接頭語      |     |    |                   |      |    |
|------------------|-----|----|-------------------|------|----|
| 乗数               | 接頭語 | 記号 | 乗数                | 接頭語  | 記号 |
| 10 <sup>24</sup> | ヨタ  | Y  | 10 <sup>-1</sup>  | デシ   | d  |
| 10 <sup>21</sup> | ゼタ  | Z  | 10 <sup>-2</sup>  | センチ  | c  |
| 10 <sup>18</sup> | エクサ | E  | 10 <sup>-3</sup>  | ミリ   | m  |
| 10 <sup>15</sup> | ペタ  | P  | 10 <sup>-6</sup>  | マイクロ | μ  |
| 10 <sup>12</sup> | テラ  | T  | 10 <sup>-9</sup>  | ナノ   | n  |
| 10 <sup>9</sup>  | ギガ  | G  | 10 <sup>-12</sup> | ピコ   | p  |
| 10 <sup>6</sup>  | メガ  | M  | 10 <sup>-15</sup> | フェムト | f  |
| 10 <sup>3</sup>  | キロ  | k  | 10 <sup>-18</sup> | アト   | a  |
| 10 <sup>2</sup>  | ヘクト | h  | 10 <sup>-21</sup> | ゼプト  | z  |
| 10 <sup>1</sup>  | デカ  | da | 10 <sup>-24</sup> | 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    | 1h =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 <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>                                     |
| リットル                     | L, l | 1L=1l=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> |
| トン                       | t    | 1t=10 <sup>3</sup> 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 <sup>-19</sup> J   |
| ダルトン     | Da | 1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> 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 <sup>11</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>-10</sup> m                                              |
| 海里                           | M    | 1 M=1852m                                                                        |
| バイン                          | b    | 1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm)2=10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup> |
| 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。                                                         |
| ベベル                          | B    |                                                                                  |
| デジベール                        | 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 <sup>-7</sup> J                                                                |
| ダイン                   | dyn | 1 dyn=10 <sup>-5</sup> N                                                                |
| ボア                    | P   | 1 P=1 dyn s cm <sup>2</sup> =0.1Pa s                                                    |
| ストークス                 | St  | 1 St =1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> |
| スチルブ                  | sb  | 1 sb =1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>                         |
| フォトル                  | ph  | 1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx                                         |
| ガリ                    | Gal | 1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>                           |
| マクスウェル                | Mx  | 1 Mx = 1G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb                                          |
| ガウス                   | G   | 1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T                                           |
| エルステッド <sup>(c)</sup> | Oe  | 1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>                                           |

(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「 $\doteq$ 」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 <sup>10</sup> Bq                                     |
| レントゲン                | R    | 1 R = 2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg                                 |
| ラド                   | rad  | 1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy                                   |
| レム                   | rem  | 1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv                                  |
| ガンマ                  | γ    | 1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T                                      |
| フェルミ                 | f    | 1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m                                   |
| メートル系カラット            |      | 1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> 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℃」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 <sup>-6</sup> m                                      |

