

JMTR 及び関連施設を活用した実践型オンサイト研修 (2017 年度)

On-site Training using JMTR and Related Facilities in FY2017

江口 祥平 柴田 裕司 今泉 友見
永田 寛 谷本 政隆 楠 剛

Shohei EGUCHI, Hiroshi SHIBATA, Tomomi IMAIZUMI
Hiroshi NAGATA, Masataka TANIMOTO and Tsuyoshi KUSUNOKI

原子力科学研究部門
大洗研究開発センター
照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Sector of Nuclear Science Research

February 2018

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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, 2018

JMTR 及び関連施設を活用した実践型オンサイト研修 (2017 年度)

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 大洗研究開発センター
照射試験炉センター

江口 祥平、柴田 裕司、今泉 友見、永田 寛、谷本 政隆、楠 剛

(2017 年 12 月 1 日受理)

照射試験炉センターでは、発電用原子炉の導入を検討しているアジア諸国をはじめとした海外の原子力人材育成及び将来の照射利用拡大、並びに国内の原子力人材の育成及び確保を目的とし、国内外の若手研究者・技術者を対象に、JMTR (Japan Materials Testing Reactor) 等の研究基盤施設を活用した実践型の実務研修を実施している。本年度の研修は、国立研究開発法人科学技術振興機構の日本・アジア青少年サイエンス交流事業「さくらサイエンスプラン」に採択され、アジア地域の 6 か国から 10 名の若手研究者・技術者が参加し、2017 年 7 月 24 日から 8 月 4 日までの期間で実施した。

今回の研修では、原子力エネルギー、照射試験、原子炉の核特性、原子炉施設の安全管理等に関する講義を行うとともに、シミュレータを用いた運転等の実習や JMTR 等の施設見学を行った。本報告書は、2017 年度に実施した研修についてまとめたものである。

本研修は、国立研究開発法人科学技術振興機構の日本・アジア青少年サイエンス交流事業「さくらサイエンスプラン」に採択され、日本原子力研究開発機構が実施したものである。

大洗研究開発センター : 〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

On-site Training using JMTR and Related Facilities in FY 2017

Shohei EGUCHI, Hiroshi SHIBATA, Tomomi IMAIZUMI, Hiroshi NAGATA,
Masataka TANIMOTO and Tsuyoshi KUSUNOKI

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center, Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 1, 2017)

A practical training course using the JMTR (Japan Materials Testing Reactor) and other research infrastructures was held from July 24th to August 4th in 2017 for Asian young researchers and engineers. This course was adopted as Japan-Asia Youth Exchange Program in Science (SAKURA Exchange Program in Science) which is the project of the Japan Science and Technology Agency, and this course aims to enlarge the number of high-level nuclear researchers/engineers in Asian countries which are planning to introduce a nuclear power plant, and to promote the use of facilities in future. In this year, 10 young researchers and engineers joined the course from 6 countries.

This course consists of lectures, which are related to irradiation test research, safety management of nuclear reactors, nuclear characteristics of the nuclear reactors, etc., practical training such as practice of research reactor operation using simulator and technical tour of nuclear facilities on nuclear energy. The content of this course in FY 2017 is reported in this paper.

Keywords : On-site Training, JMTR, Nuclear Energy, Irradiation Test, Safety Management,
Nuclear Characteristics

This course was adopted as Japan-Asia Youth Exchange Program in Science (SAKURA Exchange Program in Science) which is the project of the Japan Science and Technology Agency.

目 次

1. はじめに	1
2. 大洗研究開発センターの照射試験研究基盤施設	1
2.1 原子炉施設	1
2.2 照射後試験施設	2
3. 研修概要	3
3.1 研修の経緯	3
3.2 カリキュラム、プログラム	3
4. 研修内容	4
4.1 日本原子力研究開発機構の概要	4
4.2 原子力エネルギー	4
4.2.1 世界の照射試験炉、発電用原子炉	4
4.2.2 高温ガス炉の開発と核熱利用研究	5
4.2.3 高速炉の開発	6
4.3 照射試験	6
4.3.1 原子炉用燃料及び材料の中性子照射挙動	6
4.3.2 JMTR ホットラボの照射後試験技術	7
4.3.3 JMTR の照射設備と照射試験技術	7
4.3.4 照射設備の熱解析と熱設計実習	8
4.3.5 研究用原子炉の利用	9
4.4 原子炉の核特性	9
4.4.1 JMTR の安全管理	9
4.4.2 炉物理の基礎	9
4.4.3 核計算実習	10
4.4.4 照射試験炉シミュレータ運転実習	10
4.5 原子炉施設の安全管理	11
4.6 施設見学	11
5. まとめ	12
謝辞	12
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Irradiation test research infrastructures in Oarai Research and Development Center	1
2.1 Reactor facilities	1
2.2 Post irradiation examination facilities	2
3. Outline of training course using JMTR	3
3.1 Background of training course using JMTR	3
3.2 Curriculum and program	3
4. Training course in FY 2017	4
4.1 Outline of JAEA	4
4.2 Nuclear energy	4
4.2.1 Research reactors and power reactors in the world	4
4.2.2 Development of high temperature gas cooled reactor	5
4.2.3 Development of fast reactor	6
4.3 Irradiation test	6
4.3.1 Neutron irradiation behavior of materials and fuels	6
4.3.2 Post irradiation examination technologies of JMTR Hot Laboratory	7
4.3.3 Irradiation facilities and technologies of JMTR	7
4.3.4 Practice of thermal design for irradiation rigs	8
4.3.5 Application of research reactors	9
4.4 Nuclear characteristics of nuclear reactors	9
4.4.1 Safety management of JMTR	9
4.4.2 Basics of reactor physics	9
4.4.3 Practice of neutronic calculations	10
4.4.4 Practice of reactor operation using simulator for materials testing reactors	10
4.5 Safety management of nuclear reactors	11
4.6 Technical tour of nuclear facilities	11
5. Summary	12
Acknowledgements	12
References	12

1. はじめに

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下「JAEA」という。)大洗研究開発センター照射試験炉センターでは、原子力人材育成の取組みとして、2010 年度から国内の若手研究者・技術者を対象に、2011 年度からアジア諸国をはじめとした海外の若手研究者・技術者を対象に、材料試験炉(以下「JMTR」という。)及びその関連施設を中核とした実践型の実務研修を開始した。その後、2014 年度から 2016 年度にかけては、これらを統合し、国内外の若手研究者・技術者を対象とした研修を実施した。

2017 年度は、本研修が国立研究開発法人科学技術振興機構の日本・アジア青少年サイエンス交流事業「さくらサイエンスプラン」に採択され、アジア地域の 6 か国(カザフスタン、タイ、マレーシア、インドネシア、ベトナム、モンゴル)から 10 名の若手研究者・技術者を迎え、2017 年 7 月 24 日から 8 月 4 日までの期間で研修を実施した。

2. 大洗研究開発センターの照射試験研究基盤施設

大洗研究開発センターは、図 1 に示すとおり、JMTR(Japan Materials Testing Reactor、熱出力 50MW)、「常陽」(高速実験炉、熱出力 140MW)、HTTR(High Temperature engineering Test Reactor、高温工学試験研究炉、熱出力 30MW)という仕様の異なる 3 基の研究用原子炉(以下「研究炉」という。)と、それらの研究炉に関連する照射後試験施設を有しており、国内のみならず国際的にも新型炉研究における中核的な役割を担っている¹⁾。また、これらの施設が有する研究実績は、福島技術支援や国内外の人材育成への貢献に役立てられている。本研修は、主に JMTR 及びその関連施設を活用して実施した。大洗研究開発センターの原子炉施設及び照射後試験施設の概要を以下に示す。

2.1 原子炉施設

(1) JMTR

JMTR は、発電用原子炉(以下「発電炉」という。)等で使用する燃料及び材料等に中性子を照射し、それらの耐久性や適性を試験する「原子炉を作るための原子炉」として建設され、1968 年 3 月に初臨界に達した国内最大の軽水減速冷却タンク型の材料試験炉である。図 2 に示すように世界でも有数の高い中性子束を有しており、これまでに 165 サイクルの運転を行い、軽水炉の燃料及び材料の照射試験等に広く利用されてきた。図 3 に JMTR の概要、図 4 に JMTR の炉心配置例を示す²⁾³⁾。なお、JMTR は、2017 年 4 月 1 日に公表された施設中長期計画において廃止施設に分類されており、今後は、これまでに蓄積してきた照射試験技術の継承を図りつつ、計画的に廃止措置を進めていくこととしている³⁾。

(2) 「常陽」

「常陽」は、1977 年 4 月に初臨界に達したウラン・プルトニウム混合酸化物(MOX)燃料を用いたナトリウム冷却型の高速実験炉である。運転試験を通じた技術の高度化、燃料及び材料の照射、高速炉実用化のための新技術の実証を主な役割としており、これまで、増殖炉心(MK-I 炉心)、照射炉心(MK-II 炉心)、高性能照射炉心(MK-III 炉心)と機能を向上させながら運転を行ってきた。今後は、放射性廃棄物の減容及び有害度の低減に係る研究や高速炉の安全研究等を行うこととしている。図 5 に「常陽」の概要を示す³⁾。

(3) HTTR

HTTR は、1998 年 11 月に初臨界に達した黒鉛減速ヘリウムガス冷却型の試験研究炉であり、これまで、次世代の高温ガス炉(High Temperature Gas-cooled Reactor、以下「HTGR」という。)に必要な基盤技術開発及び高度化、並びに HTGR から供給される熱を利用した水素製造法の研究開発を行ってきた。今後は、HTTR への水素製造設備をはじめとした熱利用設備の接続を計画しており、HTGR の実用化に向けた研究開発を進めることとしている。図 6 に HTTR の概要を示す³⁾。

2.2 照射後試験施設

大洗研究開発センターは、JMTR で照射した試料の照射後試験を行う JMTR ホットラボ(以下「JMTR HL」という。)、 「常陽」で照射した試料の照射後試験を行う FMF(Fuel Monitoring Facility、照射燃料集合体試験施設)、AGF(Alpha-Gamma Facility、照射燃料試験施設)、MMF(Material Monitoring Facility、照射材料試験施設)及び MMF-2(第 2 照射材料試験施設)を有している³⁾。

JMTR HL は、図 7 に示すように、照射されたキャプセル及びラビット(以下「キャプセル等」という。)の解体や各種試験を行うコンクリートセル 8 基、材料強度試験等を行う鉛セル 7 基及び鉄セル 5 基並びに顕微鏡専用の鉛セル 4 基を有している。また、図 3 に示すように、JMTR HL と原子炉がカナル(水路)によって結ばれていることが特徴であり、水中を通して効率的かつ安全に照射試料を移送することが可能である²⁾。

FMF は、「常陽」に隣接した大型照射後試験施設であり、燃料集合体及び燃料ピンの非破壊試験や破壊試験が行われ、更に詳細な試験については AGF 及び MMF で行う。AGF では、高速炉燃料に対する金相試験や核分裂生成物(Fission Product、以下「FP」という。)放出試験等やマイナーアクチニド(Minor Actinide、以下「MA」という。)核種含有量の分析を行い、MMF 及び MMF-2 では、高速炉用の構造材料や制御材料等に対する材料強度試験や物性試験等を行う³⁾。

なお、これらの施設のうち、JMTR HL、AGF、MMF、MMF-2 は、2017 年 4 月 1 日に公表された施設中長期計画において廃止施設に分類されており、JMTR HL は機能の一部を RFEF(Reactor Fuel Examination Facility、燃料試験施設)及び WASTE(F(Waste safety Testing Facility、廃棄物安全試験施設)に集約し、使用済燃料等の搬出後に廃止、MMF-2 は核燃料を用いる試験機能を FMF に集約して RI 使用施設化、MMF 及び AGF は機能の一部を FMF 及び MMF-2 等に集約することとしている³⁾。

3. 研修概要

3.1 研修の経緯

照射試験炉センターは、国際的に活用される研究基盤を活用した技術向上及び人材育成を行うためのワールドネットワークの構築を目指し、その一環として、エネルギー需要の急激な増加が見込まれ、原子力発電所の新設や増設が検討されているアジア諸国をはじめとした海外の原子力人材育成及び JMTR の照射利用拡大を目的とした海外の若手研究者・技術者を対象とする研修を 2011 年度に開始した⁴⁾。一方、国内の若手研究者・技術者を対象とする研修は、文部科学省の「国際原子力人材育成イニシアティブ(原子力人材育成等推進事業補助金)」事業に採択され、原子力産業の世界展開を視野に、将来における国際的な原子力人材を育成するため、2010 年度に開始した⁵⁾。2014 年度から 2016 年度にかけては、これら 2 つの研修を統合して実施した。

2017 年度は、国立研究開発法人科学技術振興機構の日本・アジア青少年サイエンス交流事業「さくらサイエンスプラン」に採択されたため、アジア地域の若手研究者・技術者を対象とし、今後の人材交流や共同研究に繋がる協力関係の構築、人材の往來の活発化を目指して研修を実施した。2017 年度の研修における参加者を表 1 に示す。

本研修の参加者は、原子力発電を含む原子力関連の研究に積極的な姿勢を示す 20 代から 30 代前半の若手研究者・技術者が中心であり、2017 年度までの 8 年間で 9 か国(カザフスタン、タイ、マレーシア、インドネシア、ベトナム、ポーランド、アルゼンチン、モンゴル、日本)から延べ 201 名が参加している。これまでの研修における参加者を表 2-1～4-3 に示す。

3.2 カリキュラム、プログラム

本研修のカリキュラムは、以下の点に留意して策定した。表 5 に 2017 年度の研修カリキュラムを示す。

- ① 参加者の出身国の多くは発電炉を有しており、新たな発電炉の建設を計画している国もあることから、発電炉の設計や安全性評価の基となる原子炉用燃料及び材料の照射試験を主要テーマとした。
- ② 放射線業務従事者の外部被ばく及び内部被ばくの線量管理について理解を深めるため、測定器や測定方法に関する講義及び関連施設の見学を計画した。また、環境放射線モニタリングに関する業務を体験するため、環境試料を用いた γ 線核種分析実習及び関連施設の見学を計画した。
- ③ 研究炉の特性や運転についての理解を深めるため、JMTR の安全管理に関する講義、核特性に関する講義、熱設計実習、核計算実習、照射試験炉シミュレータ運転実習等を計画した。特に、各実習には多くの時間を割り当てた。
- ④ 前回の研修を踏まえ、各参加者の背景を知り、講義での説明における時間配分等を見直すため、研修初日に参加者の業務や出身国についてのプレゼンテーションを計画した。

また、本研修のプログラムは、より理解が深まるよう、概要説明や基礎的な内容の講義を行ってから、実習や関連施設の見学を行うように構成した。表 6 に 2017 年度の研修プログラムを示す。

4. 研修内容

4.1 日本原子力研究開発機構の概要

JAEA は、旧日本原子力研究所と旧核燃料サイクル開発機構が統合し、2005 年 10 月 1 日に発足した。現在は、国内唯一の原子力に関する総合的研究開発機関として、2011 年 3 月 11 日に発生した福島第一原子力発電所事故（以下「福島第一原発事故」という。）への対処、原子力の安全性向上、原子力基礎基盤研究と人材育成、高速炉の研究開発、核燃料サイクルに係る再処理、燃料製造及び放射性廃棄物の処理処分に関する研究開発等に重点を置き、様々な研究開発に取り組んでいる。特に、福島第一原発事故への対処については、東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所近傍に廃炉国際共同研究センターの中核となる国際共同研究棟を整備し、2017 年 4 月から運用を開始しており、今後は、国内外の大学や研究機関等の人材が交流できるネットワークを形成しつつ、産学官による研究開発と人材育成を一体的に進める体制を構築し、廃止措置を推進することとしている³⁾。ここでは、JAEA が保有する拠点及び原子力施設をはじめ、現在取り組んでいる研究開発等の概要について説明した。

4.2 原子力エネルギー

4.2.1 世界の照射試験炉、発電用原子炉

(1) 世界の照射試験炉

世界では、これまでに約 770 基の研究炉が建設されてきたが、2017 年 11 月現在、運転中なのは 217 基となっている⁶⁾。ここでは、世界の研究炉の現状として、世界における研究炉の数の推移、高経年化、主要な研究炉の概要について説明した。また、表 7 に示す建設中及び計画中の研究炉についても概要を説明した⁶⁾⁷⁾。

(2) 世界の原子力エネルギーのシェア

原子力エネルギーのシェアは国によって大きく異なり、フランスで約 72%を原子力が占めていることをはじめ、スロバキアが約 54%、ベルギーが約 52%、ハンガリーが約 51%を占めている等、ヨーロッパは比較的原子力エネルギーのシェアが高い国が多い。一方、日本における 2016 年の原子力エネルギーのシェアは 2.2%となっている⁸⁾。ここでは、参加者の出身国を含めた、世界各国における原子力エネルギーのシェアの状況について説明した。

(3) 世界の発電炉

2016 年 12 月 31 日の時点で、世界では 448 基の発電炉が稼働しており、約 65% (289 基) を PWR、約 17% (78 基) を BWR が占めており、その他は、加圧重水炉 (49 基)、軽水冷却黒鉛減速炉 (15 基)、ガス冷却炉 (14 基)、高速炉 (3 基) となっている⁸⁾。これらの中で、多くの発電炉は高経年化が進んでおり、その対策が課題となっている。ここでは、世界の発電炉の概要について説明した。

日本は、BWR 及び ABWR を 22 基、PWR を 20 基、計 42 基の発電炉を有している。研修を実施していた 2017 年 7 月の時点では、5 基の発電炉が稼働しており、そのほかの多くの発電炉は、福島第一原発事故後に策定された新規規制基準(2013 年 7 月 8 日施行)への適合性審査への対応を行っている状況であった⁹⁾。

(4) Generation I to Generation IV

これまでに開発が行われてきた発電炉は、Generation I から Generation IV に区分される。現在、世界で稼働しているのは Generation II、Generation III 及び Generation III+ の発電炉であり、JAEA でも研究開発に取り組んでいる高温ガス炉及び高速炉は Generation IV に位置づけられる。ここでは、各世代の発電炉の概要について説明した。

(5) 世界における発電炉の過酷事故

炉心溶融が発生した発電炉の事故として、1979 年 3 月 28 日に発生した米国におけるスリーマイルアイランド原子力発電所 2 号機の事故、1986 年 4 月 26 日に発生した当時のソビエト連邦におけるチェルノブイリ原子力発電所 4 号機の事故及び 2011 年 3 月 11 日に発生した日本における福島第一原発事故の概要について説明した。

(6) 福島第一原発事故が世界に与えた影響

福島第一原発事故は、その被害の深刻さから世界のエネルギー政策に大きな影響を与えた。ここでは、プラントや事故の概要、当時の汚染状況等について説明し、また、参加者が今後の原子力エネルギーを考える上で参考となる世界のエネルギー政策の状況について説明した。表 8 に福島第一原発事故後の世界の原子力政策の動向(2012 年)を示す¹⁰⁾。

4.2.2 高温ガス炉の開発と核熱利用研究

(1) 高温ガス炉開発

HTGR は、炉心の主な構成材に黒鉛を中心としたセラミック材料を用い、核分裂による熱を取り出すための冷却材にヘリウムガスを用いた原子炉である。耐熱性に優れたセラミック材料を使用することによって原子炉から 1000℃程度の熱を取り出すことができ、この熱は発電をはじめ、化学や工業等の様々な分野で利用可能である。また、炉心を構成する黒鉛材料は熱容量が大きく、異常時においても炉心の温度変化が緩慢であることから、冷却材が喪失するような事故が発生した場合においても、炉心で発生した熱は原子炉の容器表面から放熱されて自然に除去され、燃料が破損することはない。このような固有の安全性を持ち、多様な熱利用が可能なことから、福島第一原発事故以降、高温ガス炉に大きな注目が集まっている³⁾。

JAEA では、大洗研究開発センターの HTTR を活用し、HTGR に関する研究を進めている。ここでは、HTTR の概要や HTGR の研究に関する内容について、以下の講義を行った。

- ① HTTR の概要
- ② HTGR の核熱設計
- ③ HTGR の燃料及び構造材料
- ④ HTGR の核熱利用

また、講義では、HTGR を利用した水素製造及びその利用についても説明した。水素は、電気や熱に加えて将来の 2 次エネルギーにおける中心的役割を担うことが期待されており¹¹⁾、JAEA では、図 8 に示すような IS プロセスという水素製造法の開発を進めている¹²⁾。水の熱分解には 4000℃以上の高温熱が必要であるが、IS プロセスでは、ヨウ素と硫黄の化学反応を利用することによって約 900℃の熱で熱分解することができる。この熱も原子炉 (HTGR) から供給するため、熱の供給源を含む一連の過程において、炭酸ガスを放出せずに水素を製造することが可能である³⁾。

4.2.3 高速炉の開発

日本は、資源の有効利用や高レベル放射性廃棄物の減容化等の観点から、核燃料サイクルの推進を基本方針としている¹¹⁾。高速炉は、MA を核燃料としてリサイクルすることによって放射性廃棄物の量を低減する能力を有しており、核燃料サイクルは、発電とともに新たな燃料を生み出し、ウランの利用効率を飛躍的に高め、エネルギーの輸入依存度の改善にも貢献すると期待されている³⁾。ここでは、以下に示す内容について、講義を行った。

- ① 放射性廃棄物の減容及び有害度の低減に係る研究開発
- ② 核燃料サイクルを含む高速炉の有効性
- ③ 原子炉及びプラントシステムの概要
- ④ 高速炉開発の進め方
- ⑤ 日本における高速炉開発の現状と展望

4.3 照射試験

4.3.1 原子炉用燃料及び材料の中性子照射挙動

JMTR の照射設備及び照射試験技術、並びに照射後試験施設及び照射後試験技術に関する講義の前段として、原子炉用の燃料及び材料の中性子照射挙動について、以下の講義を行った。

- ① 通常運転時の燃料の挙動
- ② 照射試験及び照射後試験
- ③ 事故状況下における燃料の挙動
- ④ 軽水炉の構造材料
- ⑤ 材料の照射挙動及び機械的挙動
- ⑥ 腐食と水の放射線分解
- ⑦ 中性子照射による応力腐食割れへの影響
- ⑧ JMTR における照射誘起応力腐食割れ試験

4.3.2 JMTR ホットラボの照射後試験技術

JMTR HL では、原子炉で照射した試料の各種照射後試験が行われ、その試験結果は、原子力分野における広範囲な燃料・材料の研究開発に役立てられている。試料は、目的に応じたセルに運ばれ、コンクリートセルにて解体、鉛セル及び鉄セルにて材料強度試験等が行われる。そのほか、JMTR HL は顕微鏡専用の鉛セルを有しており、これらのセルにおける全ての操作は、マニプレータ等の遠隔操作装置を用いて遮へい窓越しに行われる²⁾。ここでは、JMTR HL の施設の概要、照射後試験の内容及び研究に必要な照射後試験技術開発について、講義を行った。

4.3.3 JMTR の照射設備と照射試験技術

JMTR を用いた研究に必要な照射設備及び照射試験技術について、以下の講義を行った。また、講義内容に関連する JAEA が現在取り組んでいる研究開発等の概要についても説明した。

(1) JMTR の概要

JMTR は、照射場である原子炉と照射後試験施設である JMTR HL が水深 6m のカナルで直結していることによって、発電炉やほかの研究炉等で照射された試料に計装を施して再照射することが容易となっている。ここでは、その特徴を含む JMTR の概要について説明した。

(2) 照射設備

基礎基盤研究に広く用いられるキャプセル照射装置、発電炉と同様な冷却材環境下で照射でき、主に燃料の実証試験に供されるループ照射装置、任意に照射時間を設定でき、RI 製造や材料の基礎研究に用いられる水力ラビット照射装置等の JMTR が有する照射設備について、概要を説明した。そのほか、HTGR 用燃料からの FP ガス放出特性を研究するためのガススweepキャプセルや、軽水炉出力変動時の燃料破損特性を研究するための出力急昇試験装置、軽水炉の高経年化における発電炉の水質制御の有効性を検証するための水環境制御装置等についても概要を説明した。

(3) 環境制御と計装

照射損傷は、中性子照射量のほかにも温度や荷重、水質等が影響するため、照射中のこれらの環境制御及び計測が重要となる。ここでは、これらの環境制御技術について説明した。特に、温度については原子炉が定格出力になるまでの低温時の照射履歴が問題となることから、その間の温度を一定に制御する技術について説明した。また、照射試料への荷重制御技術や中性子スペクトル制御技術についても説明した。

計装技術については、照射中の温度、中性子束、燃料の伸びと直径の計測、FP ガス圧力測定、材料の亀裂発生と進展の測定技術等について説明した。図 9 に JMTR における照射技術の概要を示す²⁾。

(4) 再計装及び再照射技術

軽水炉材料の照射誘起応力腐食割れに関する研究や、軽水炉燃料の PCMI 破損に関する研究では、発電炉で照射された材料及び燃料の研究炉での再照射や、その場試験(照射中の環境制御及び計測)が不可欠である。ここでは、照射された材料及び燃料を再照射するためにキャプセ

ルに組み込む技術、それらの燃料に中心温度測定用熱電対や FP ガス圧力計、燃料棒伸び測定装置を計装する技術、材料の亀裂発生及び亀裂進展測定装置を計装する技術について説明した。図 10 に照射済燃料棒への熱電対及び FP ガス圧力計の再計装技術を示す¹³⁾。

4.3.4 照射設備の熱解析と熱設計実習

JMTR の照射試験は、試料を装荷したキャプセル等を炉心の反射体要素に設けられた照射孔に挿入して行われる。キャプセル等は、図 11 に示すように¹⁴⁾、円筒形の容器(外筒)、照射試料、試料ホルダ、スペーサ等で構成され、通常、キャプセル等の内部にはヘリウムガスが封入される。試料が燃料の場合は主に核分裂によって発熱するが、そのほかの構造材はガンマ線によって発熱する。材料や燃料の照射損傷は温度による影響が大きいため、目的に合った温度で照射するためには熱設計が極めて重要となる。ここでは、キャプセル等の熱設計に関する講義と実習を行った。講義及び実習の内容を以下に示す。

(1) キャプセル等の熱設計上の特徴

① 熱の流れ

キャプセル等は、容器の外表面を流れる冷却水で冷却される。したがって、燃料や材料で発生する熱は中心から容器表面に向かって流れ、その間の熱抵抗の大きさと熱流束によって温度が上昇する。図 12 にキャプセル等の熱の流れとそれに伴う温度上昇を示す。なお、燃料の出力急昇試験に使用されるキャプセルの場合は、キャプセル内に高温高圧水が挿入されるため、図 13 に示すような高圧水の沸騰や凝縮による熱移動が生じる。

② 発熱密度の調整

ガンマ線束及び中性子束は、軸方向の炉心中心に近い程大きくなり、全体として軸方向にコサイン分布していることから、発熱量はキャプセル等を装荷する軸方向の位置によって変化する。一方、ガンマ線による発熱は材料の密度に依存することから、キャプセル等に装荷する材料の種類を変えることによって発熱量の調整を行う。

③ 熱抵抗の調整

キャプセル等に装荷される試料や試料ホルダ等の構造物間のギャップは、ヘリウムガスで満たされている。このギャップの寸法は、1mm 以下と極めて小さいため、対流による熱伝達はほとんどない。したがって、このギャップ層の熱抵抗はガスの熱伝導率に依存する。また、ガスの熱伝導率が固体に比べて極めて小さいことから、設計温度はギャップの寸法の調整によって、ほぼ設定される。

④ 熱膨張の影響

ギャップの寸法が極めて小さく、また、ここでの温度上昇が大きいことから、構造材の熱膨張によるギャップの寸法変化の評価が必要である。

⑤ 軸方向の熱流動

炉心内でのガンマ線束及び中性子束は、軸方向に大きな分布をもっており、キャプセルのような長尺のものの場合、発熱密度が小さくなる軸方向の上下への熱流動が発生する。そこで、

キャプセルの場合には、軸方向の熱流束を抑えるため、適宜、断熱材を配置することで熱の流れを単純化する。

(2) 熱設計実習

(1) で示したキャプセル等の熱設計上の特徴を理解するため、一次元の熱計算コード GENGTC¹⁵⁾を用いて熱設計実習を行った。キャプセル構成部材の材質や部材間のギャップ寸法を変更することで照射温度が変わることを計算によって確認するとともに、熱膨張評価の重要性を認識するため、熱膨張係数をゼロにする計算も行った。また、キャプセル内に装荷したシースヒータやガスギャップ層の真空度調整により所定の温度に調整する照射温度制御手法についても実習を行った。

4.3.5 研究用原子炉の利用

参加者の出身国の多くが研究炉を有していることから、研究炉の利用について、以下の講義を行った。

- ① 放射線利用の経済規模
- ② 産業及び医療への利用

RI の概要、BNCT (Boron Neutron Capture Therapy、ホウ素中性子捕捉療法)、シリコン半導体の製造研究炉を活用した RI 製造方法

4.4 原子炉の核特性

4.4.1 JMTR の安全管理

原子炉の運転管理及び保守管理は、規制当局によって認可される保安規定やその下部規定である運転手引等に従って行われる。研究炉の場合、照射試料の交換によって炉心が運転サイクル毎に大きく変わるため、その都度、原子炉の安全性を確認する必要がある。

ここでは、研究炉の設計から建設、運転及び廃止措置に関する日本の法体系、JMTR の制御棒の異常な引抜きによる過渡変化や冷却材流出事故等に対する安全性評価について説明し、研究炉及び JMTR における安全性評価について、以下の講義を行った。

- ① 安全性評価の概要
- ② JMTR の特徴
- ③ 施設の評価
- ④ 計画時の安全性評価
- ⑤ 運転時の安全性評価

4.4.2 炉物理の基礎

核計算実習及び照射試験炉シミュレータ運転実習に先立ち、核分裂、中性子の吸収と散乱、核反応による核変換、反応断面積等の概念、中性子増倍率、中性子スペクトル等の炉物理の基礎について、講義を行った。また、基本的な原子炉の構成や、原子炉の運転に関する重要な要素であ

る反応度の概念や燃料の燃焼による反応度変化、原子炉の核特性計算手法についても説明した。

4.4.3 核計算実習

臨界安全評価、遮蔽計算、スカイシャイン評価等に使用されている三次元モンテカルロ計算コード MCNP¹⁶⁾について、概要を説明し、計算のためのモデリング方法及びコードの使用方法を説明した上で、原子炉の臨界計算、中性子束(中性子スペクトル)計算等の実習を行った。

なお、原子炉の臨界計算については、臨界に関する形状効果及び反射体効果について理解するため、以下に示す条件で計算を行った。

① 形状

球

三辺の寸法をパラメータにした直方体

径寸法と軸方向寸法をパラメータにした円筒

② 反射体

燃料領域の外側に水反射体を設けた場合と設けない場合

照射試験における中性子束は、燃料試料の発熱量及び材料試料の放射線損傷に直接影響する要素であるため、照射設備内の試料部の中性子束評価は重要である。また、試料部の中性子束は、試料部及びその近傍の材料による中性子吸収によって局所的に変化することから、その影響を把握するため、以下に示す計算を行った。

① 水カラビット照射装置に挿入するラビットの配置を変えた計算

② ラビット内に挿入する試料の数と配置を変えた計算

③ ラビット内の構造材の材質を変えた計算

④ 水カラビット照射装置の炉心内位置を変えた計算

4.4.4 照射試験炉シミュレータ運転実習

JMTR は、国内外の原子力人材育成に貢献することを目的として、文部科学省の 2010 年度「最先端研究基盤事業」の補助対象事業に選定され、本事業の一環として、研究炉の運転や照射試験、異常・事故事象等を模擬し、これらの運転操作訓練が可能な照射試験炉シミュレータを整備した。

図 4 に示すように、JMTR の炉心は、燃料要素、制御棒、反射体要素等で構成されており²⁾、反射体要素の照射孔には、キャプセル等の照射設備が挿入される。キャプセル等に装荷される試料によって中性子吸収断面積は異なり、また、照射試験の目的によって炉心配置も運転毎に変わり、運転中には照射設備の装荷及び取出しも行われ、炉心の核特性に影響を与える。照射試験炉シミュレータは、これらの照射設備の設計変更や炉心配置の変更を模擬することも可能である。

本実習では、研究炉の特性を理解するため、照射試験炉シミュレータを用いて以下の運転実習を行った。

(1) 通常運転

制御棒の操作により、原子炉の出力上昇、臨界探索、定常運転及び出力降下を行う。

(2) 照射設備の運転

定常運転状態の原子炉にラビット 3 体を挿入し、制御棒の動きを観察することによって原子炉の反応度変化を実感し、原子炉の自動運転が維持されることを確認する。

(3) 異常・事象時の安全動作

定常運転状態で地震、商用電源喪失、全交流電源喪失等の異常・事象を模擬的に発生させ、制御棒位置、中性子実効増倍率、燃料温度、冷却材流量等の経時変化を観察し、各安全動作によって、異常・事象時においても原子炉が正常に停止することを確認する。また、原子炉出力急昇に伴う負の反応度フィードバック効果についても確認する。

4.5 原子炉施設の安全管理

(1) 個人線量測定実習

大洗研究開発センターでは、管理区域内で作業する職員の被ばく線量を定期的に評価し、管理している³⁾。本実習では、外部被ばくを測定するガラスバッジ等の個人線量計の紹介や、ホールボディカウンタによる内部被ばくの測定体験を行った。

(2) 環境試料の γ 線核種分析実習

大洗研究開発センターでは、敷地周辺付近に設置されたモニタリングポストにより、敷地周辺の放射線を常時監視するとともに、敷地周辺の水や土、農作物、海産物等の試料を定期的に採取し、それらに含まれる放射能に異常がないか評価している³⁾。本実習では、実際に大洗研究開発センター敷地内の土をコンテナやライナー採土器を用いて採取する体験や、 γ 線スペクトルの測定結果の例から計算によって放射能濃度を求める実習を行った。

4.6 施設見学

講義だけでなく、実際に研究開発等が行われている現場へ足を運び、体感することは、原子炉の研究開発や安全管理等についての理解を深めるためにも有効である。そのため、JAEA の研究炉、研究施設、放射線管理施設等及び民間の発電炉の施設見学を行った。表 9 に施設見学先一覧を示す。

5. まとめ

本研修の参加者は、今後のエネルギー需要の増大が想定されているアジア地域の若手研究者・技術者であり、原子力エネルギーの必要性を強く認識していたため、研修にも積極的に取り組んでいた。研修終了後に行った参加者に対するアンケート調査においても、若手研究者・技術者にとって有益な内容であったとの意見が得られた。

また、今回いくつかの講義や実習の講師を若手職員が担当した。培ってきた技術や知識の継承という観点からも、このような研修は有効と考える。

以上を踏まえ、発電炉の導入を検討している海外の原子力人材の育成、そして国内の原子力人材の育成に貢献していくため、このような研修は今後も必要であり、継続して実施していきたいと考える。

謝辞

本報告書の作成に際し、貴重なご意見をいただきました石塚悦男高温工学試験研究炉部 HTTR 技術課長に深く感謝するとともに、塩月正雄大洗研究開発センター所長をはじめ、本研修の計画及び実施にあたりご協力いただいた方々に、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, 大洗研究開発センターパンフレット, (2017).
- 2) 日本原子力研究開発機構, JMTR パンフレット, “New JMTR”, (2011).
- 3) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, ホームページ, <http://www.jaea.go.jp/> (参照:2017年10月26日).
- 4) 木村 伸明, 竹本 紀之, 大岡 誠, 石塚 悦男, 中塚 亨, 伊藤 治彦, 石原 正博, “最先端研究基盤としての JMTR 及び関連施設を活用した研修(2012 年度)”, JAEA-Review 2012-055, (2013), 40p.
- 5) 今泉 友見, 竹本 紀之, 出雲 寛互, 井手 広史, 松井 義典, 相沢 静男, 堀 直彦, “最先端研究基盤 JMTR 及び関連施設を用いた研修講座の新設”, JAEA-Review 2012-012, (2012), 25p.
- 6) IAEA, “Research Reactor Data Base”, Research Reactors, <http://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx> (参照:2017年11月2日).
- 7) Ir. Paul G.T. de Jong, “PALLAS a nuclear reactor fit for the future!”, http://www.pallasreactor.com/wp-content/uploads/2014/10/IAEA_PALLAS-a-nuclear-reactor-fit-for-the-future_16-to-20-May-2011.pdf (参照:2017年11月2日).

- 8) IAEA, “Nuclear Power Reactors in the World 2017 Edition”,
<http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/12237/Nuclear-Power-Reactors-in-the-World-2017-Edition> (参照:2017 年 11 月 2 日).
- 9) 経済産業省資源エネルギー庁, “我が国における原子力発電所の現状”,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf
 (参照:2017 年 8 月 31 日).
- 10) World Energy Council, “Nuclear Energy One Year After Fukushima”,
<https://www.worldenergy.org/publications/2012/world-energy-perspective-nuclear-energy-one-year-after-fukushima/> (参照:2016 年 11 月 17 日).
- 11) 経済産業省資源エネルギー庁, “エネルギー基本計画”,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf (2014).
- 12) 日本原子力研究開発機構, HTTR パンフレット, <http://httr.jaea.go.jp/>
 (参照:2017 年 10 月 26 日).
- 13) 日本原子力研究開発機構, “JMTR で利用可能な照射試験技術”, シンポジウム 材料試験炉 JMTR の新たな挑戦, 2007 年 3 月 8 日, (2007).
- 14) 中野 純一, 原子力環境におけるオーステナイトステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れに関する研究(学位論文), JAEA-Review 2008-064, (2008), 175p.
- 15) 染谷 博之, 小林 敏樹, 新見 素二, 星屋 泰二, 原山 泰雄, GENGTC-JB:照射用キャプセル内温度評価プログラム, JAERI-M 87-148, (1987), 25p.
- 16) J.F.BRIESMEISTER, (Ed.), MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B, LA-12625-M, (1997).

表 1 海外の若手研究者・技術者を対象とした研修における 2017 年度の参加者

国名	所属	年齢	人数
カザフスタン	アルファラビカザフスタン国立大学	23	1
タイ	チュラーロンコーン大学	40	1
マレーシア	マレーシア原子力庁	29	1
	マレーシア原子力庁	30	1
インドネシア	インドネシア原子力庁	28	1
	インドネシア原子力庁	30	1
ベトナム	ベトナム原子力研究所	24	1
	ベトナム原子力研究所	32	1
モンゴル	モンゴル国立大学	26	1
	モンゴル国立大学	23	1
合計			10 名

表 2-1 国内の若手研究者・技術者を対象とした研修における 2010 年度の参加者

区分	所属	学年	人数
大学院生	長岡技術科学大学大学院	修士1年	1
大学生	長岡技術科学大学	学部3年	7
	茨城大学	学部2年	1
	東海大学	学部4年	1
合計			10 名

表 2-2 国内の若手研究者・技術者を対象とした研修における 2011 年度の参加者

区分	所属	学年	人数
大学院生	茨城大学大学院	修士1年	1
	東海大学大学院	修士1年	1
	東海大学大学院	修士2年	1
	東北大学大学院	修士1年	8
	室蘭工業大学院	修士1年	2
	東京都市大学大学院	修士1年	2
大学生	長岡技術科学大学	学部4年	1
	室蘭工業大学	学部3年	1
	東海大学	学部4年	2
高専生	八戸高専	専攻1年	4
国内技術者(9社)		—	12
合計			35 名

表 2-3 国内の若手研究者・技術者を対象とした研修における 2012 年度の参加者

区分	所属	学年	人数
大学院生	長岡技術科学大学大学院	修士1年	7
	茨城大学大学院	修士1年	3
	室蘭工業大学院	修士1年	3
大学生	東海大学	学部3年	1
	東北大学	学部4年	1
	室蘭工業大学	学部4年	1
	東京都市大学	学部3年	1
	福井大学	学部4年	1
	福島高専	学科4年	2
高専生	八戸高専	学科5年	2
	八戸高専	専攻1年	3
	旭川高専	学科4年	2
	鹿児島高専	専攻1年	1
	長岡高専	学科4年	1
国内技術者(4社)		—	6
合計			35 名

表 2-4 国内の若手研究者・技術者を対象とした研修における 2013 年度の参加者

区分	所属	学年	人数
大学院生	長岡技術科学大学大学院	修士1年	4
大学生	東海大学	学部3年	1
	東京都市大学	学部4年	1
	福井大学	学部4年	2
高専生	福島高専	学科4年	1
	旭川高専	学科4年	2
	奈良高専	学科5年	5
国内技術者(2社)		—	2
合計		18 名	

表 3-1 海外の若手研究者・技術者を対象とした研修における 2011 年度の参加者

国名	所属	年齢	人数
カザフスタン	アルファラビカザフスタン国立大学	19	1
	アルファラビカザフスタン国立大学	21	3
	アルファラビカザフスタン国立大学	22	1
タイ	タイ原子力技術研究所	26	1
	タイ原子力技術研究所	34	1
	タイ電力公社	27	1
	タイ電力公社	28	1
	チュラーロンコーン大学	27	1
合計		10 名	

表 3-2 海外の若手研究者・技術者を対象とした研修における 2012 年度の参加者

国名	所属	年齢	人数
カザフスタン	アルファラビカザフスタン国立大学	20	2
	アルファラビカザフスタン国立大学	21	2
	アルファラビカザフスタン国立大学	22	1
タイ	タイ電力公社	28	1
	チュラーロンコーン大学	27	1
	カセサート大学	25	1
マレーシア	マレーシア原子力庁	26	1
	マレーシア原子力庁	29	1
	テナガナショナル大学	29	1
インドネシア	インドネシア原子力庁	25	1
	インドネシア原子力庁	28	1
	インドネシア原子力庁	29	1
ポーランド	ポーランド国立原子力研究センター	25	1
	ポーランド国立原子力研究センター	29	1
合計		16 名	

表 3-3 海外の若手研究者・技術者を対象とした研修における 2013 年度の参加者

国名	所属	年齢	人数
カザフスタン	アルファラビカザフスタン国立大学	20	3
	アルファラビカザフスタン国立大学	21	1
タイ	タイ電力公社	27	1
	チュラーロンコーン大学	24	1
	カセサート大学	24	1
マレーシア	マレーシア原子力庁	29	2
	マレーシア原子力庁	30	1
インドネシア	インドネシア原子力庁	25	1
	インドネシア原子力庁	29	1
ポーランド	ポーランド国立原子力研究センター	29	1
	ポーランド国立原子力研究センター	31	1
ベトナム	ベトナム原子力研究所	24	2
	ベトナム原子力研究所	25	1
アルゼンチン	アルゼンチン原子力委員会	25	1
合計		18 名	

表 4-1 国内外の若手研究者・技術者を対象とした研修における 2014 年度の参加者

国名	所属	年齢	人数
カザフスタン	アルファラビカザフスタン国立大学	20	1
	アルファラビカザフスタン国立大学	21	3
タイ	タイ電力公社	28	1
	チュラーロンコーン大学	24	1
	カセサート大学	23	1
マレーシア	茨城大学	21	1
	マレーシア原子力庁	29	1
	マレーシア原子力庁	30	1
インドネシア	インドネシア原子力庁	28	2
	インドネシア原子力庁	29	1
ポーランド	ポーランド国立原子力研究センター	26	2
ベトナム	ベトナム原子力研究所	24	1
	ベトナム原子力研究所	25	1
	ベトナム原子力研究所	26	1
日本	東京理科大学	21	1
合計			19 名

表 4-2 国内外の若手研究者・技術者を対象とした研修における 2015 年度の参加者

国名	所属	年齢	人数
カザフスタン	アルファラビカザフスタン国立大学	19	1
	アルファラビカザフスタン国立大学	20	1
	アルファラビカザフスタン国立大学	21	1
	アルファラビカザフスタン国立大学	27	1
タイ	チュラーロンコーン大学	24	1
	カセサート大学	24	1
マレーシア	マレーシア原子力庁	25	2
	マレーシア原子力庁	31	1
	チュラーロンコーン大学	24	1
インドネシア	インドネシア原子力庁	28	1
ポーランド	ポーランド国立原子力研究センター	26	1
	ポーランド国立原子力研究センター	27	1
	ポーランド国立原子力研究センター	28	1
ベトナム	ベトナム原子力研究所	24	1
日本	室蘭工業大学	21	1
	室蘭工業大学	23	1
合計			17 名

表 4-3 国内外の若手研究者・技術者を対象とした研修における 2016 年度の参加者

国名	所属	年齢	人数
カザフスタン	アルファラビカザフスタン国立大学	20	1
	アルファラビカザフスタン国立大学	22	1
タイ	チュラーロンコーン大学	24	1
	カセサート大学	23	1
マレーシア	マレーシア原子力庁	27	1
	マレーシア原子力庁	28	1
インドネシア	インドネシア原子力庁	27	1
	インドネシア原子力庁	29	1
ポーランド	ポーランド国立原子力研究センター	26	1
	ポーランド国立原子力研究センター	29	1
ベトナム	ベトナム原子力研究所	26	1
	ベトナム原子力研究所	28	1
日本	九州大学大学院	23	1
合計			13 名

表 5 2017 年度の研修カリキュラム

概要	講義	日本原子力研究開発機構の紹介
	施設見学	J-PARC JRR-3
原子力 エネルギー	講義	世界の照射試験炉、発電用原子炉 高温ガス炉開発と核熱利用研究 高速炉開発
	施設見学	日本原子力発電(株)東海第二発電所 HTTR 水素製造試験施設 「常陽」
照射試験研究	講義	原子炉用燃料及び材料の中性子照射挙動 JMTRホットラボと照射後試験技術 JMTRの照射設備と照射試験技術 照射設備の熱解析 研究用原子炉の利用
	実習	マニピュレータ操作実習 熱設計実習
	施設見学	JMTR
原子炉施設の 安全管理	実習	個人線量測定実習 環境試料の γ 線核種分析実習
	施設見学	環境監視施設 放射線管理施設
原子炉の 核特性	講義	JMTRの安全管理 炉物理の基礎
	実習	核計算実習 照射試験炉シミュレータ運転実習

表 6 2017 年度の研修プログラム

月 日		午前		午後		
7月 24日	月	オリエンテーション	研修生による プレゼンテーション	日本原子力研究 開発機構の紹介	世界の照射試験炉、 発電用原子炉	マニピュレータ 操作実習
7月 25日	火	大洗町表敬訪問	原子炉用燃料及び材料の中性子照射挙動			JMTRの見学
7月 26日	水	高温ガス炉開発と核熱利用研究		HTTRの見学	高速炉開発	「常陽」の 見学
7月 27日	木	JMTRホットラボと照射後試験技術		JMTRの照射設備と照射試験技術		
7月 28日	金	日本原子力発電(株)東海第二発電所、J-PARC、JRR-3の見学				照射設備の熱解析
7月 31日	月	JMTRの安全管理		熱設計実習		
8月 1日	火	個人線量測定実習		環境試料の γ線核種分析実習	環境監視施設、 放射線管理施設の 見学	研究用原子炉の利用
8月 2日	水	環境試料の γ線核種分析実習	炉物理の基礎			
8月 3日	木	核計算実習				
8月 4日	金	照射試験炉シミュレータ運転実習				修了式

表 7 建設中及び計画中の研究炉 ⁶⁾⁷⁾

Status	Country	Facility Name	Type	Thermal Power (MW)
Under Construction	Argentina	CAREM 25	PWR	100
	France	JULES HOROWITZ	Tank in Pool	100
	France	RES	PWR	100
	Jordan	JRTR	Tank in Pool	5
	Russian Federation	MBIR	Fast	150
	Russian Federation	IRV-2M	Pool	4
	Russian Federation	PIK	Tank	100
Planned	Argentina	RA-10	Pool	30
	Belgium	MYRRHA	Fast	85
	Brazil	RMB	Pool	30
	Korea	KJRR	Pool	15
	Netherlands	PALLAS	Tank in Pool	30 to 80
	Ukraine	Multipurpose RR	Pool	20
	USA	HT3R	He Cooled	25
	Viet Nam	Multipurpose RR	Pool	15

表 8 福島第一原発事故後の世界の原子力政策の動向 (2012 年) ¹⁰⁾

2012 年 12 月

1. Countries with “existing” nuclear installations	
Use of nuclear power in principle not being contested	Argentina, Armenia, Belgium, Brazil, Bulgaria, Canada, China, Czech Republic, Finland, France, Hungary, India, Iran, Mexico, Netherlands, Pakistan, Romania, Russia, Slovakia, Slovenia, South Africa, South Korea, Spain, Sweden, Taiwan, Ukraine, United Kingdom, United States
Use of existing nuclear power being contested	Japan
Use of existing nuclear power being phased-out	Germany, Switzerland
2. Countries “currently constructing” new nuclear installations	
Construction projects not being contested	Argentina, Brazil, Bulgaria, China, Finland, France, India, South Korea, Pakistan, Russia, Slovakia, Taiwan, Ukraine, United States
Construction projects cancelled, scaled-back or delayed	Japan
3. Countries with “plans and/or proposals to construct” new nuclear installations	
Plans/proposals for new constructions not being contested	31 countries mentioned except Germany, Switzerland, Italy
Plans/proposals for new constructions prohibited	Germany, Switzerland, Italy

(Table 2¹⁰⁾を基に作成)

表 9 施設見学先一覧

研究炉	JMTR
	「常陽」
	HTTR
	J-PARC
	JRR-3
研究施設	水素製造試験施設
放射線管理施設等	環境監視施設、放射線管理施設
発電炉	日本原子力発電(株)東海第二発電所

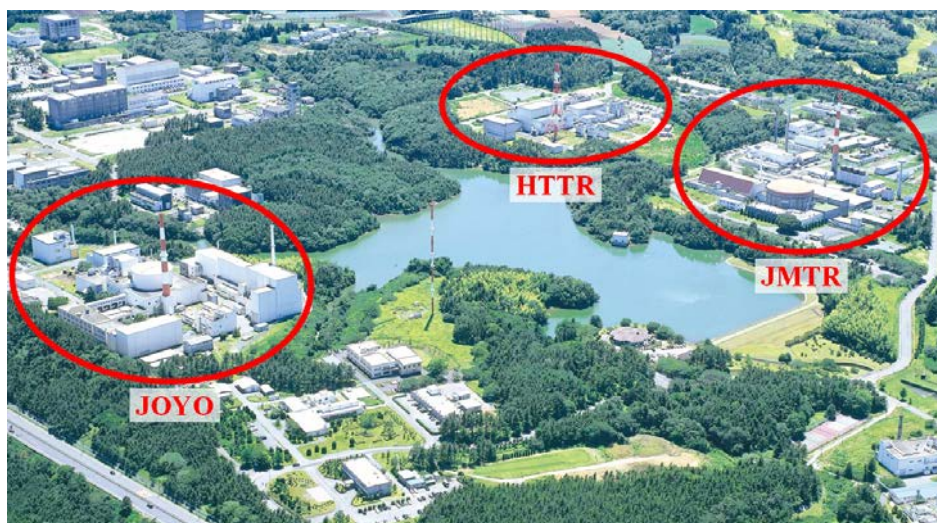


図1 JAEA 大洗研究開発センターの有する研究炉

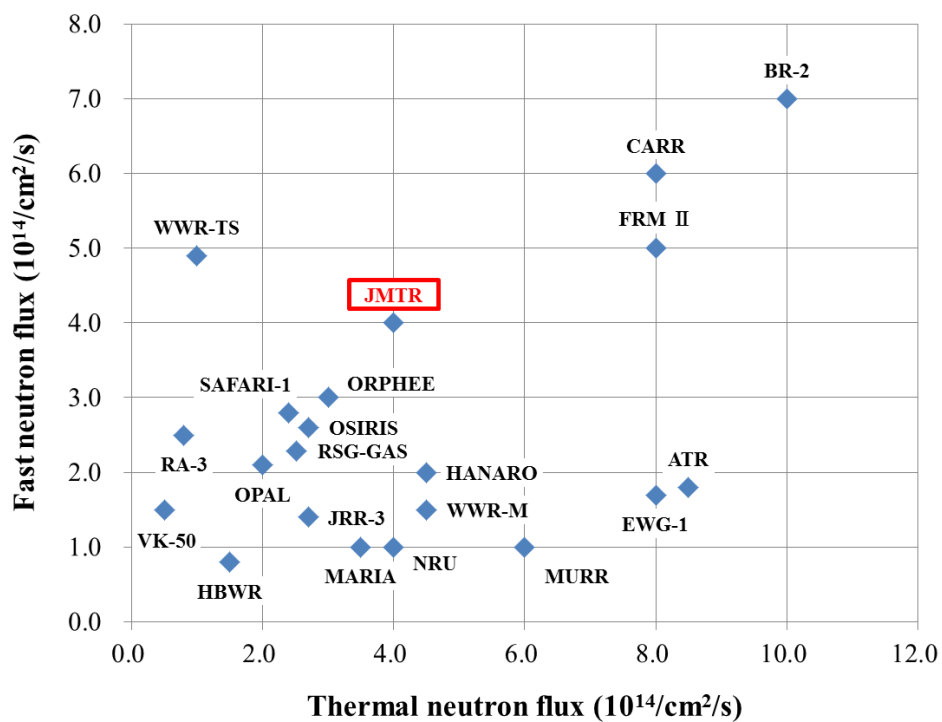


図2 世界の研究炉の中性子束⁶⁾

(Research Reactor Data Base の数値を基に作成)

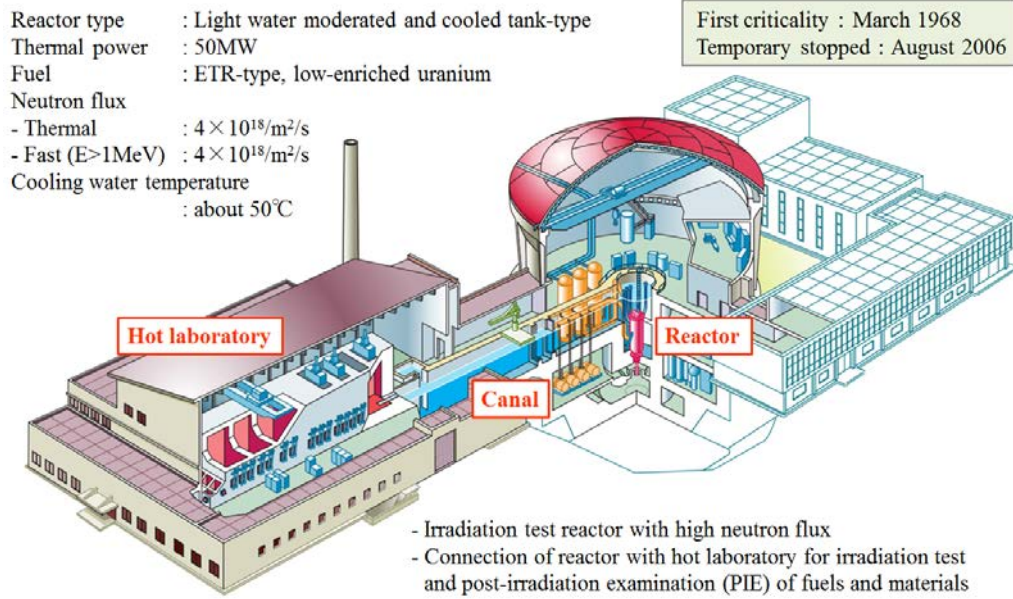


図3 JMTR の概要³⁾

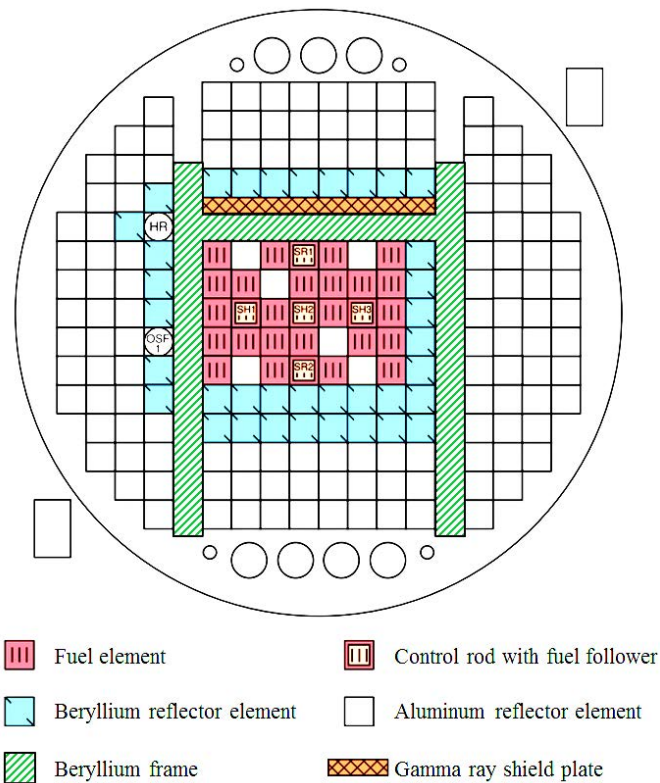


図4 JMTR の炉心配置例²⁾

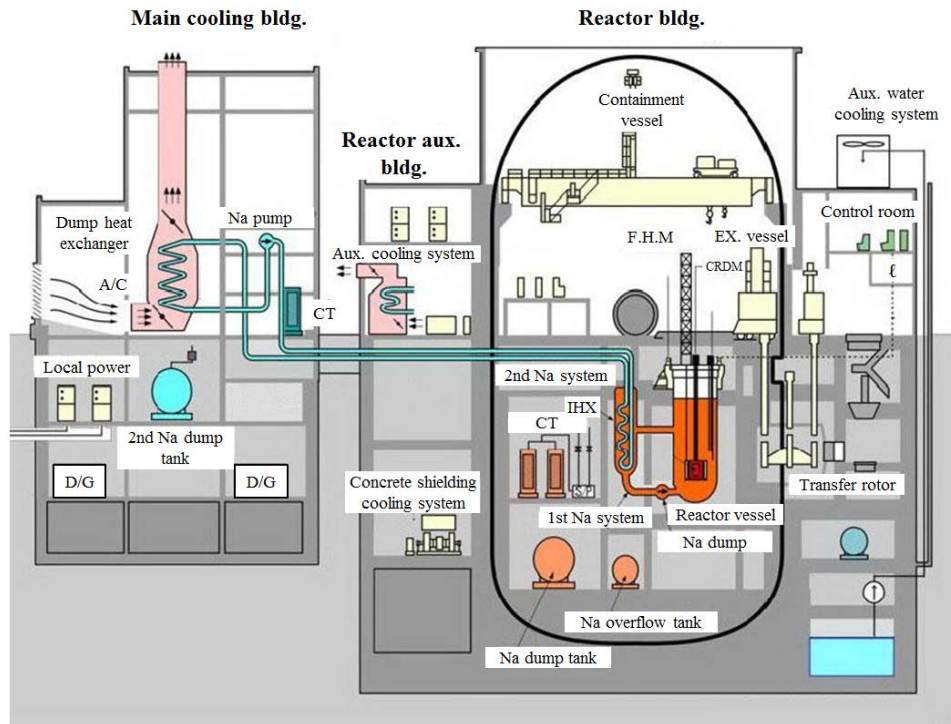


図5 「常陽」の概要³⁾

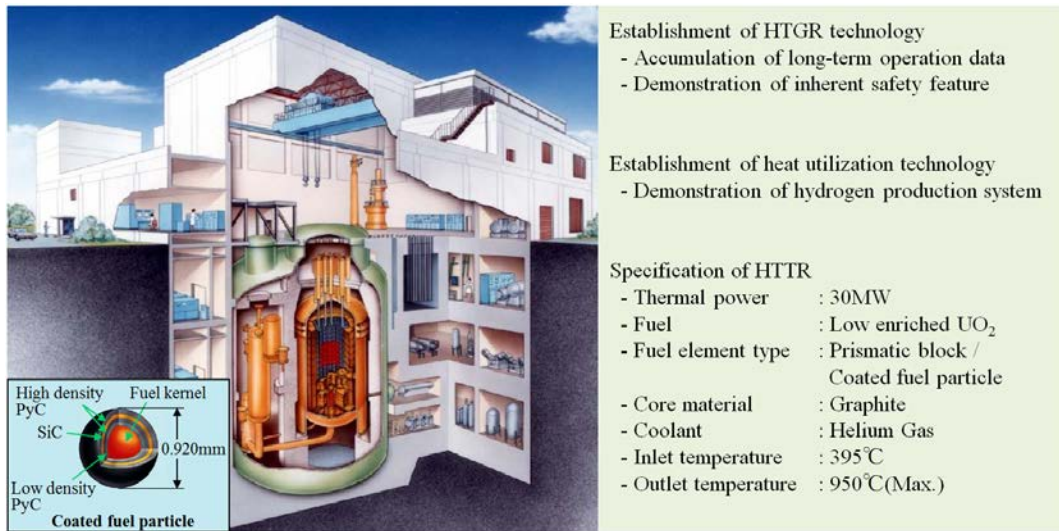


図6 HTTR の概要³⁾

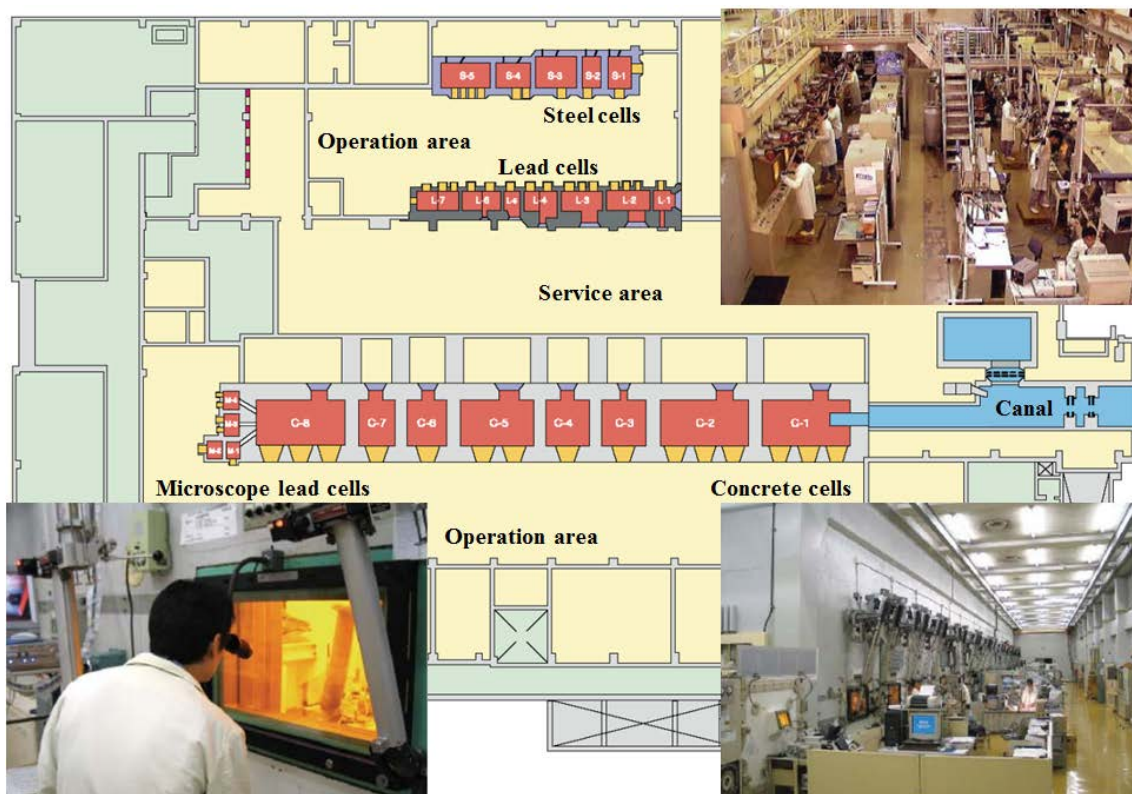


図 7 JMTR HL のホットセルの概要²⁾

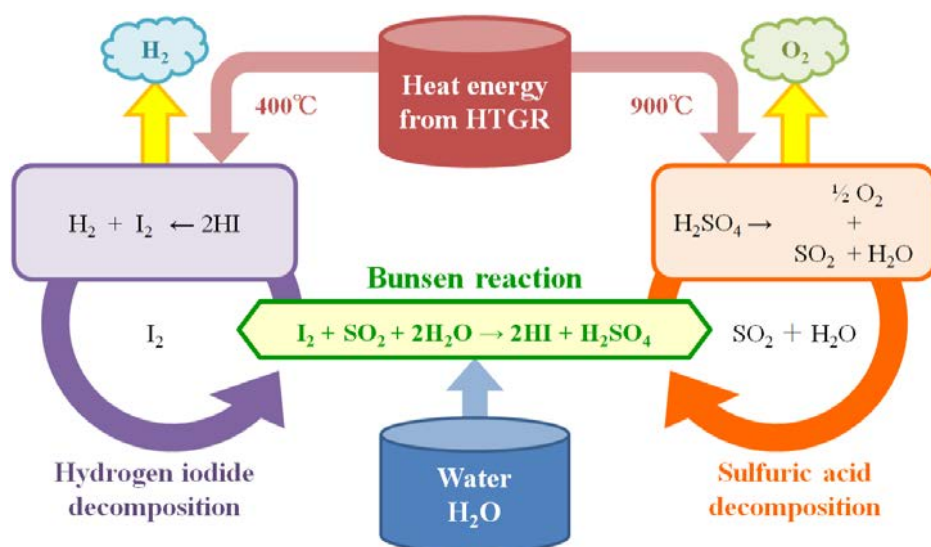


図 8 IS プロセスの概要¹²⁾

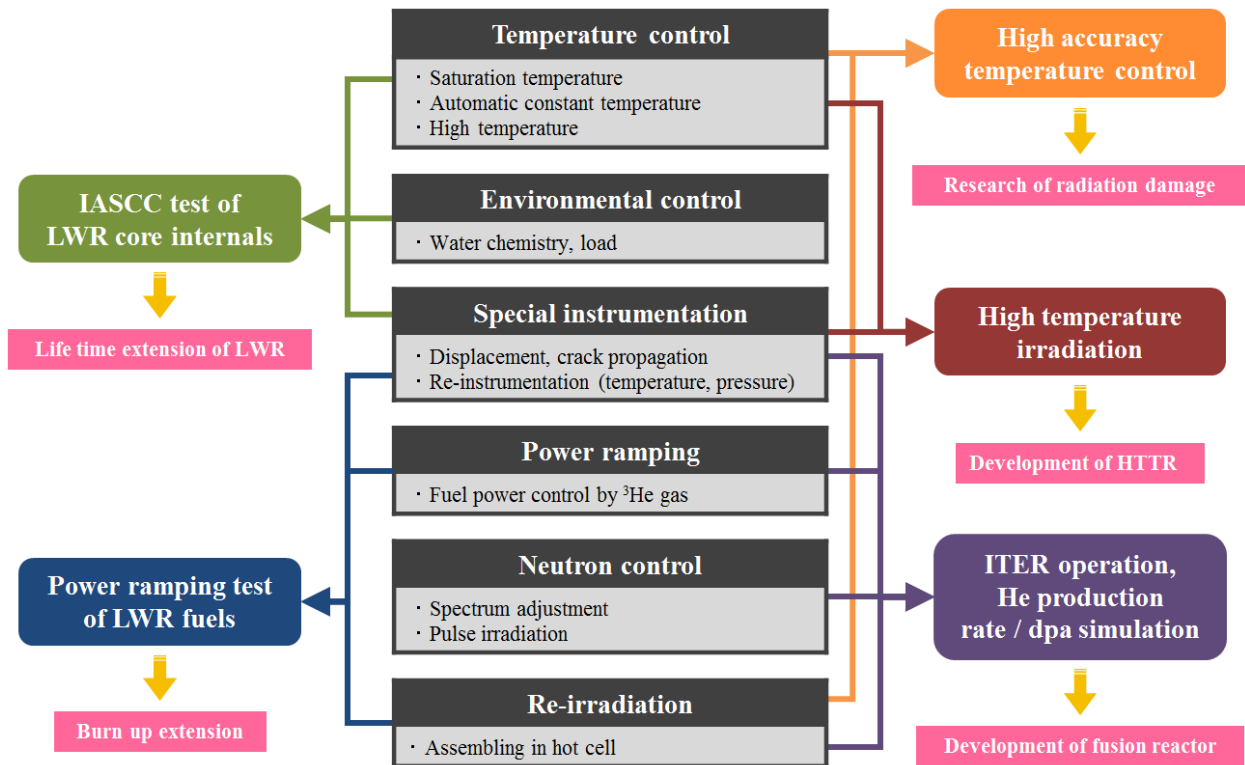


図9 JMTRの照射技術

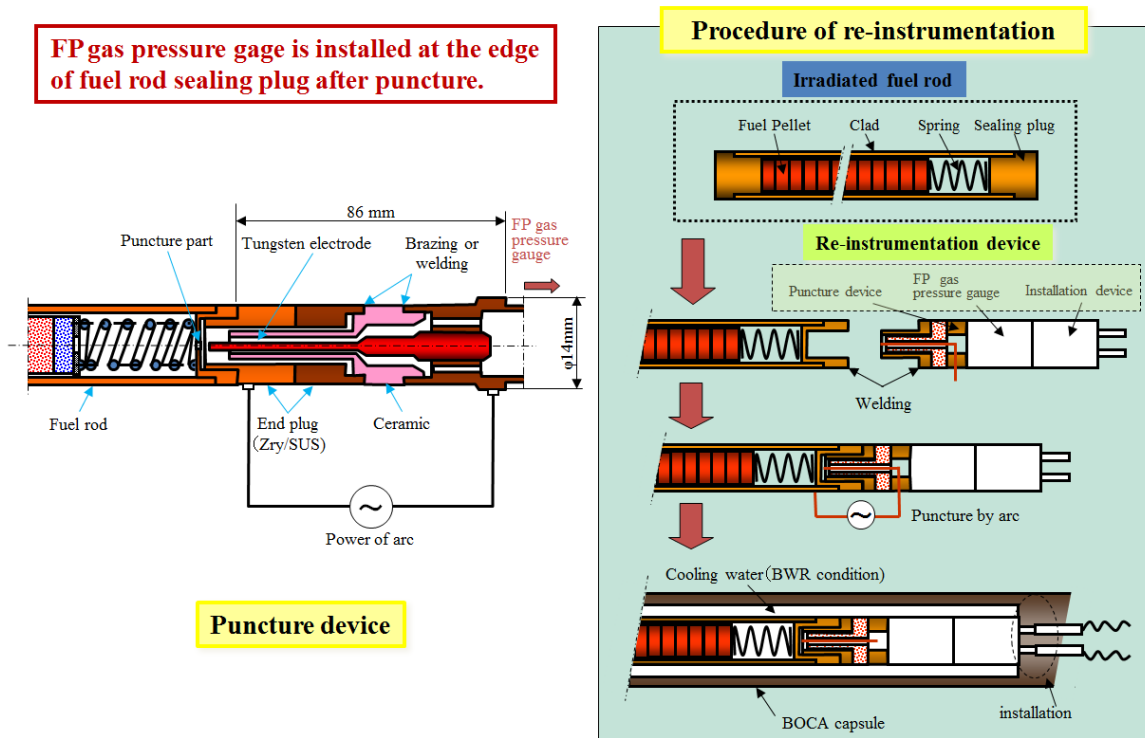


図10 照射済燃料への熱電対及びFPガス圧力計の再計装技術

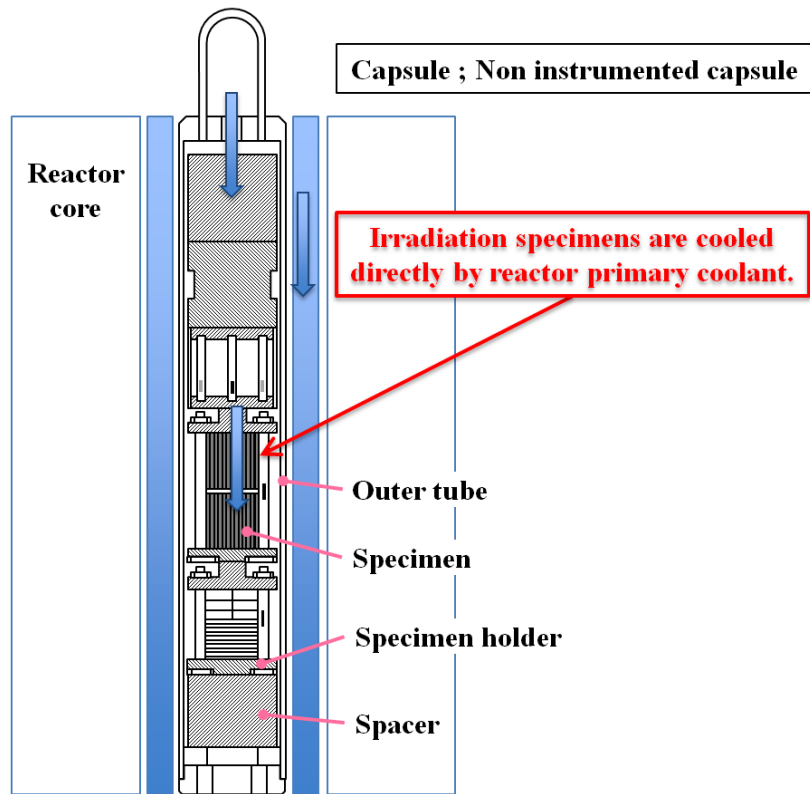


図 11 キャプセルの概略図例 ¹⁴⁾

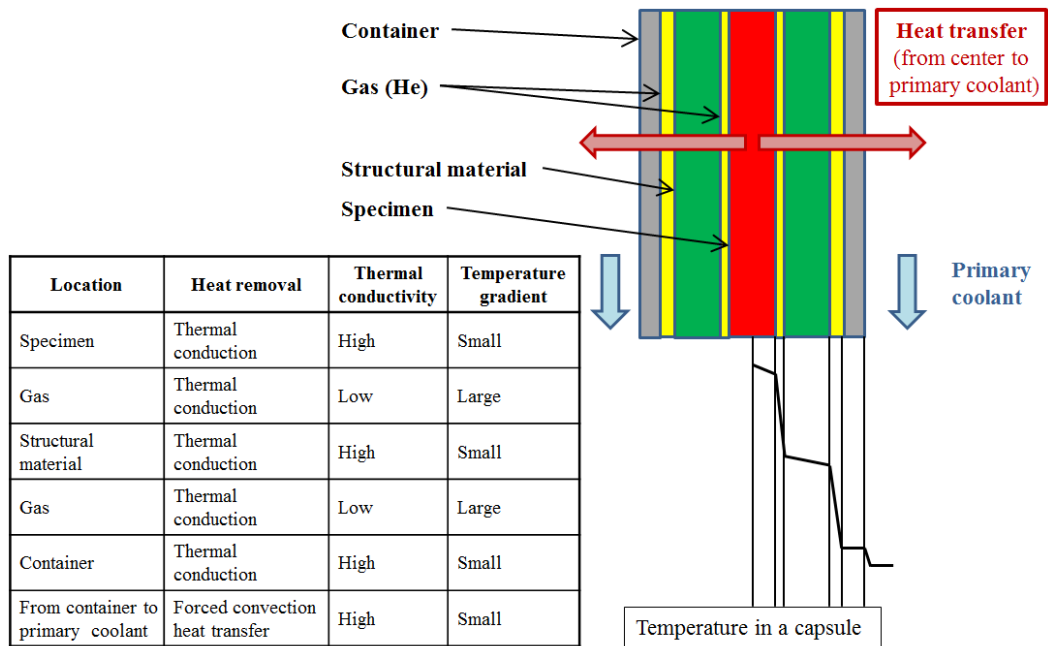


図 12 キャプセルの熱移動と温度分布

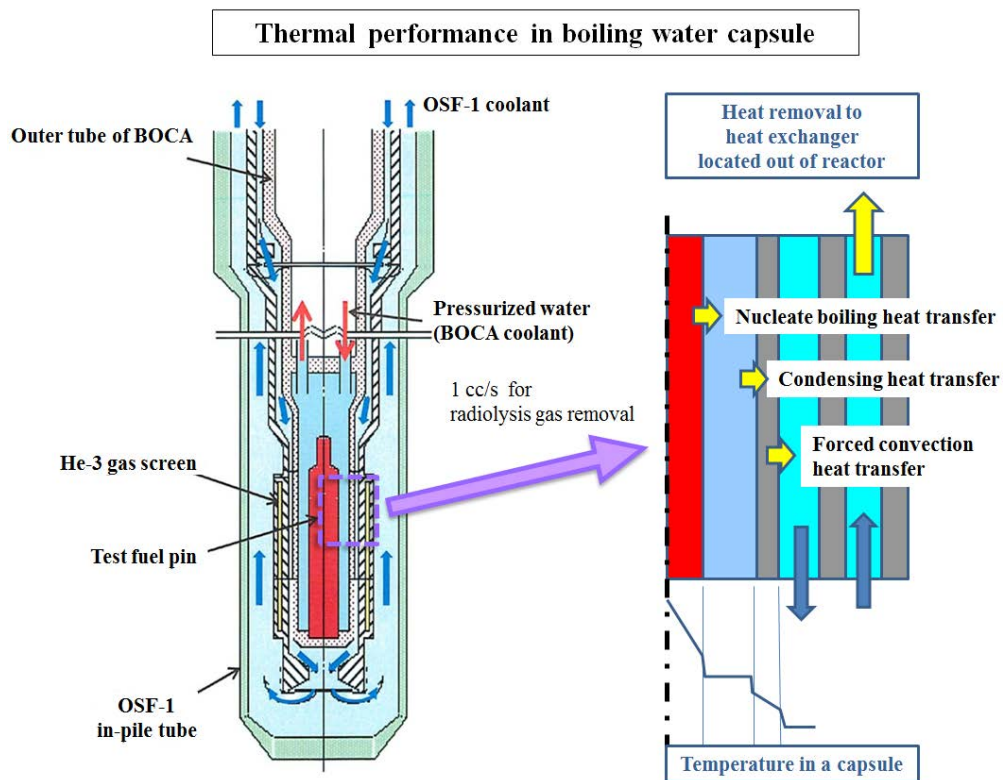


図 13 沸騰水キャプセルの熱移動

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	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	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。
(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。
(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
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毎ケルビン	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	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電位	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
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	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	名称	記号	乗数	名称	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=60 s
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/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) 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
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 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
フオト	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 ^(a)	Oe	1 Oe Δ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

(a) 3 元系の CGS 単位系と SI では直接比較できないため、等号「 Δ 」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 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

