

JMTR及び関連施設を活用した実践型オンサイト研修 (2016年度)

On-site Training using JMTR and Related Facilities in FY2016

江口 祥平 竹本 紀之 柴田 裕司 谷本 政隆 楠 剛

Shohei EGUCHI, Noriyuki TAKEMOTO, Hiroshi SHIBATA, 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

March 2017

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, 2017

JMTR 及び関連施設を活用した実践型オンサイト研修
(2016 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、竹本 紀之、柴田 裕司、谷本 政隆、楠 剛

(2017 年 2 月 2 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 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。本年度は、2016 年 7 月 25 日から 8 月 5 日に実施し、7 か国から 13 名の若手研究者・技術者が参加した。

研修では、原子力エネルギー、照射試験研究、原子炉施設の安全管理、原子炉の核特性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及び JMTR 等の施設見学を行った。研修最終日には、各国のエネルギー政策や展望、参加者の出身国が有する研究炉の概要、参加者の現在の研究内容等について、各参加者による発表と討論を行った。本報告書は、2016 年度に実施した研修についてまとめたものである。

On-site Training using JMTR and Related Facilities in FY 2016

Shohei EGUCHI, Noriyuki TAKEMOTO, Hiroshi SHIBATA,
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 February 2, 2017)

A practical training course using the JMTR and other research infrastructures was held from July 25th to August 5th in 2016 for domestic and foreign young researchers and engineers. This course aims to enlarge the number of high-level nuclear researchers/engineers in Japan and foreign countries which are planning to introduce a nuclear power plant, and to promote the use of facilities in future. In this year, 13 young researchers and engineers joined the course from 7 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 and technical tour of nuclear facilities on nuclear energy. At the end of the course, the trainees discussed the energy policy and prospect of each country, each country's research reactor, and trainee's current research. The content of this course in FY 2016 is reported in this paper.

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

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	2
3.1 研修の経緯	2
3.2 カリキュラム	3
3.3 研修プログラム	3
4. 研修内容	4
4.1 日本原子力研究開発機構の原子力施設(東海、大洗)	4
4.2 原子力エネルギー	4
4.2.1 世界における発電用原子炉の状況と過酷事故	4
4.2.2 高温ガス炉開発と核熱利用研究	5
4.2.3 高速炉開発	6
4.3 照射試験研究	6
4.3.1 世界の研究炉	6
4.3.2 原子炉用燃料及び材料の中性子照射挙動	7
4.3.3 JMTR の照射設備と照射試験技術	7
4.3.4 照射後試験施設と照射後試験技術	8
4.3.5 照射設備の熱設計実習	9
4.4 原子炉施設の安全管理	10
4.5 原子炉の核特性	11
4.5.1 JMTR の安全管理	11
4.5.2 炉物理の基礎	11
4.5.3 核計算実習	11
4.5.4 照射試験炉シミュレータ運転実習	12
4.6 施設見学	13
5. 総合討論	13
6. まとめ	16
謝辞	16
参考文献	16

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 the JMTR	2
3.1 The past background of training course using the JMTR	2
3.2 Curriculum	3
3.3 Training program	3
4. Training course in FY 2016	4
4.1 Nuclear facilities in JAEA Tokai and Oarai	4
4.2 Nuclear energy	4
4.2.1 Status and severe accident of power reactors in the world	4
4.2.2 Development of high temperature gas cooled reactor and nuclear heat application	5
4.2.3 Development of fast reactor	6
4.3 Irradiation test research	6
4.3.1 Research reactors in the world	6
4.3.2 Neutron irradiation behavior of materials and fuels	7
4.3.3 Irradiation facilities and technologies of JMTR	7
4.3.4 Post irradiation examination facilities and technologies	8
4.3.5 Practice of thermal design of irradiation rigs	9
4.4 Safety management of nuclear reactors	10
4.5 Nuclear characteristics of nuclear reactors	11
4.5.1 Safety management of JMTR	11
4.5.2 Basics of reactor physics	11
4.5.3 Practice of neutronic calculation	11
4.5.4 Practice of research reactor operation using simulator	12
4.6 Technical tour of nuclear facilities	13
5. Discussion	13
6. Summary	16
Acknowledgements	16
References	16

1. はじめに

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、JMTR(Japan Materials Testing Reactor)及びその関連施設を中核とした実践型の実務研修を、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・技術者を対象に開始した。2014年度からは、これらを統合した研修を実施している。2016年度は、カザフスタン、タイ、マレーシア、インドネシア、ポーランド、ベトナム及び日本の7か国から13名の若手研究者・技術者を迎え、2016年7月25日から8月5日までの2週間の研修を実施した。

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(材料試験炉、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3基の研究用原子炉(以下「研究炉」という。)を有している¹⁾。また、JMTRで照射され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。)や高速炉開発に特化したFMF(Fuel Monitoring Facility、照射燃料集合体試験施設)、MMF(Material Monitoring Facility、照射材料試験施設)及びAGF(Alpha-Gamma Facility、照射燃料試験施設)といった照射後試験施設を有しており、日本の照射試験研究における中核的役割を担っている。

さらに、大洗研究開発センターの敷地内には東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センターがあり、また、日本核燃料開発株式会社(NFD)が同敷地に隣接しており、どちらも照射後試験施設を有している。

本研修は、これらの施設のうち、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、軽水炉の長期化対策、科学技術の向上、産業利用の拡大、原子力人材育成への貢献等の役割を有している²⁾。

JMTRは、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り、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いる³⁾。図3に示すように、原子炉とJMTR HLがカナル(水路)で接続されていることが特徴であり、これによって照射済燃料及び材料を再装荷し、JMTRで再照射する試験等も容易となっている。図4にJMTRの炉心配置例を示す²⁾。

また、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、照射試験、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。

(2) 「常陽」

「常陽」は、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度実験炉である。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、1977 年 4 月の初臨界以降、MK-I 炉心(熱出力 50MW 及び 75MW)、MK-II 炉心(熱出力 100MW)、MK-III 炉心(熱出力 140MW)と機能を向上させながら運転を行ってきた¹⁾。

図 5 に示すように、「常陽」は原子炉建物、原子炉附属建物及び主冷却機建物で構成され、原子炉建物内の原子炉格納容器に原子炉容器や一次冷却系の主要な機器が格納されている。炉心で発生した熱は、主中間熱交換器を介して 1 次冷却系ナトリウムから 2 次冷却系ナトリウムに伝えられ、最終的に主冷却機建物の主空気冷却器から大気中に放出される¹⁾。

(3) HTTR

HTTR は、1998 年 11 月に初臨界に達した高温ガス炉(High Temperature Gas-cooled Reactor、以下「HTGR」という。)の開発の中軸となる試験研究炉であり、安全設計方針の策定に必要なデータの取得や、次世代の HTGR に必要な基盤技術の開発及び高度化を行ってきた。また、冷却材のヘリウムガスで最高 950°C の熱を原子炉から取り出すことが可能であり、取り出した高温の熱を水素製造に利用するための熱利用システムの設計等も行っている¹⁾。図 6 に HTTR の概要を示す。

2.2 照射後試験施設

JMTR HL は、1971 年に運転を開始し、図 7 に示すように、照射済キャプセル等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²⁾。

大洗研究開発センターは、JMTR HL のほかにも 3 つの照射後試験施設(FMF、MMF 及び AGF)を有している。FMF では高速炉用の燃料集合体や燃料ピンに対する非破壊試験や破壊試験、MMF 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っている。また、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。)放出試験等を行っている¹⁾。

3. 研修概要

3.1 研修の経緯

科学技術外交、地球温暖化対策、アジアへの貢献を主眼においた国の施策を受け、照射試験炉センターでは、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ている。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に海外の若手研究者・技術者を対象とした研修を 2011 年度に開始した⁴⁾。一方、国内の若手研究者・技術者を対象とした研修は、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)」事業として採択され、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 年度からは、これら 2 つの研修を統合して実施している。

本研修の参加者は、今後の原子力発電及び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、2016 年度までの 7 年間で 8 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、日本)から延べ 191 名が参加した。表 1-1～表 1-4 に国内の若手研究者・技術者を対象とした研修における各年度の参加者、表 2-1～表 2-3 に海外の若手研究者・技術者を対象とした研修における各年度の参加者、表 3-1～表 3-3 に統合後の国内外の若手研究者・技術者を対象とした研修における各年度の参加者を示す。

3.2 カリキュラム

表 4 に 2016 年度の研修カリキュラムを示す。本カリキュラムでは、以下の点に留意した。

- ① 参加者の出身国では、今後の原子力エネルギー開発が重要な課題となっていることから、発電炉の設計、安全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。また、施設の安全管理の観点から、大洗研究開発センターの危機管理において中心的な活動拠点となる緊急時対策室の見学を計画した。
- ④ 前回の研修終了後のアンケート結果を踏まえ、基礎的な内容についての講義の時間を拡大した。

3.3 研修プログラム

表 5 に 2016 年度の研修プログラムを示す。本研修プログラムは、概要説明や基礎的な講義の後に実践的な実習や関連する施設の見学を行うよう構成した。

4. 研修内容

4.1 日本原子力研究開発機構の原子力施設(東海、大洗)

JAEA は、全国に 11 の研究開発拠点を有する国内唯一の原子力に関する総合的研究開発機関として、原子力に関する基礎的研究、応用研究及び核燃料サイクルを確立するための研究開発を行っている¹⁾。さらに、2011 年 3 月 11 日の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。)以降は、当該事故への対処に係る研究開発として、原因調査研究や廃止措置のための技術開発、放射性物質の除染技術開発等も行っている。ここでは、JAEA の東海、大洗地区における原子力施設について講義を行った。

主要な研究炉及び大型のホットラボは、照射試験研究において欠かせない施設であるが、図 8 に示すように、京都大学の研究炉 KUR (Kyoto University Research Reactor)を除き、日本の主要な照射試験研究施設は茨城県の東海村と大洗町に集中している。このうち、全ての研究炉と多くのホットラボは JAEA が管理しており、その利用は大学、公的研究機関、民間の機関に開放され、原子炉の安全研究、高度化研究及び基礎研究に活用されている。また、大洗地区にある東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センターのホットラボは、全国の大学の共同利用施設として、日本における基礎研究の拠点となっている。東海村にあるニュークリア・デベロップメント株式会社(NDC)や大洗町にある日本核燃料開発株式会社(NFD)のホットラボについても、PWR 及び BWR 発電炉の基盤を支える施設となっている。

4.2 原子力エネルギー

福島第一原発事故以降、原子力発電からの撤退を表明した国や開発の見直しを検討する国はあったものの、エネルギー需要の増大が見込まれている国においては、今後、原子力が欠かせないエネルギー源となることは基本的に変わらない。ここでは、このような原子力エネルギーに関する世界の状況について講義を行った。

4.2.1 世界における発電用原子炉の状況と過酷事故

(1) 世界の発電炉の概要

2016 年 10 月現在、世界では 441 基の発電炉が稼働しており、約 64%(282 基)が PWR、約 18%(78 基)が BWR である。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)である。なお、これらの発電炉の多くは、運転年数が 25 年から 40 年を経過しており、高経年化が課題となっている⁶⁾。

表 6 に示すように、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が⁷⁾、研修を行った 2016 年 7 月の時点では、2015 年 8 月に新規規制基準の策定後初となる再稼働を果たした九州電力株式会社川内原子力発電所 1 号機及び同年 10 月に再稼働を果たした九州電力株式会社川内原子力発電所 2 号機⁸⁾を除く全ての発電炉が停止しており、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)に従って、数基が再稼働に向け

て原子力規制委員会の審査を受けている状況であった。なお、研修終了後の 2016 年 9 月には四国電力株式会社伊方発電所 3 号機が通常運転を再開している⁹⁾。

(2) 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 76%を原子力が占めていることをはじめ、スロバキアが約 56%、ハンガリーが約 53%、ベルギーが約 38%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。また、日本における原子力エネルギーのシェアは、国内のほぼ全ての原子炉が停止していたため、2015 年は 0.5%となっている⁶⁾。

(3) Generation I to Generation IV

発電炉開発の歴史は、Generation I から Generation IV に区分される。現在稼働しているのは Generation II、Generation III 及び Generation III+ の発電炉である。なお、現在開発中の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、各世代の発電炉について概要を説明し、JAEA で開発している高温ガス炉及び高速炉については、それぞれ個別に講義を行った。

(4) 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、米国における 1979 年の TMI 事故、当時のソビエト連邦における 1986 年のチェルノブイリ事故及び日本における 2011 年の福島第一原発事故について、講義を行った。

(5) 福島第一原発事故が世界に与えた影響

福島第一原発事故の規模は、1986 年に発生したチェルノブイリの事故に匹敵するもので、世界のエネルギー政策に影響を与えた。ここでは、参加者が原子力エネルギーの今後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 7 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⁾。また、当該事故を正しく理解するため、プラントや事故の概要、当時の汚染状況等についても説明した。なお、当時は原子力エネルギーのシェアの引下げや原子力からの撤退を表明する国もあったが、研修終了後の 2016 年 8 月にはロシア政府が発電炉 11 基の新設計画及び放射性廃棄物処分場 6 サイトの建設計画を発表し、同時期にポーランドのエネルギー省も国内初となる出力約 100 万 kW の発電炉の建設計画を復活させることを発表する等¹¹⁾、現在は原子力に関する計画を再び推進する動きも見られている。

4.2.2 高温ガス炉開発と核熱利用研究

(1) 高温ガス炉開発

HTGR は、耐熱性に優れたセラミックス被覆燃料、化学的に不活性なヘリウム冷却材、大熱容量かつ高熱伝導の黒鉛構造材(減速材)を用いた原子炉であり、原子炉出口において 1000°C ほどの高温の熱を供給することが可能である。また、冷却材喪失等の事故においても、炉心の温度変化は緩やかで、燃料の健全性が損なわれる温度に至らないという安全性に優れた特徴を持つことから、福島第一原発事故以降、特に関心を集めている¹⁾。JAEA では、大洗研究開発センターの

HTTR を活用し、HTGR 及び HTGR によって供給される熱の利用技術について研究開発を進めている。ここでは、HTGR の開発の歴史や、HTTR の運転実績等について、以下の講義を行った。

- ① HTGR 開発の歴史及び現状
- ② HTTR の運転実績及び試験計画
- ③ HTGR の核熱設計及び安全設計
- ④ HTGR の燃料及び構造材料

(2) 核熱利用研究

水素は、燃料としてだけでなく、化学プロセスや発電等への利用をはじめ、幅広い利用方法が存在し、現在、化石エネルギー等で賄われているエネルギーを水素に置き換えることで、温室効果ガスを削減できると期待されている。ここでは、水素の製造及び利用について説明した。

水素の製造法については、既に水蒸気改質法が実用化されているが、この方法は製造過程で炭酸ガスを放出してしまうため、水電解法や熱化学法等の炭酸ガスを放出しない製造法が望ましく、JAEA では、図 9 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⁾。IS プロセスは、900℃の熱を利用した化学反応の組合せによって水を水素と酸素に分離するもので、その熱も原子炉 (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。

4.2.3 高速炉開発

エネルギー資源が乏しい日本は、資源の有効利用及び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²⁾。高速炉は、発電しながら消費した以上の燃料を生産することによるウラン資源の飛躍的な利用効率の向上やマイナーアクチニド (MA) の核変換による高レベル放射性廃棄物の低減が期待されている。ここでは、以下に示す内容について、講義を行った。

- ① JAEA における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 高速炉の要素技術開発

4.3 照射試験研究

4.3.1 世界の研究炉

多くの参加者が研究炉を有する国から参加しており、中には大型の研究炉の新設を検討している国もあることから、研究炉の数や経年化の状況等、世界の研究炉の現状や動向についても触れつつ、大型の研究炉に焦点を絞って講義を行った。主な講義内容を以下に示す。

(1) 研究炉

研究炉の利用目的による分類としては、ビーム炉、材料試験炉、RI 生産炉、教育訓練炉が挙げられる。設計上の分類については、大きく分けて、スイミングプール型とタンク型の 2 種類がある。前者はプール水(軽水)の底部に炉心が設置されており、水中を通して炉心部を直接見ることができ、また炉心周辺が広くとれるため作業性が良くなっていることが特徴である。一方、後者は比較的高出力の研究炉に採用され、原子炉冷却材の沸騰を抑えるため炉心がタンク(炉容器)の中に収納されている。スイミングプール型に比べ作業性は悪くなるが、高出力であり、中性子束が高いことから燃料や材料の照射挙動評価等が行われる。

(2) 世界の研究炉の現状

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、2016 年 10 月現在、運転中なのは 243 基となっている³⁾。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、主要な研究炉の中性子束等について説明した。

(3) 世界の主要な研究炉の概要

高い中性子束を持ち、発電炉用燃料及び材料の開発や実証試験を行うことが可能な研究炉における、それぞれの原子炉構造や炉心構造、中性子束といった特徴を活かした照射試験手法等について説明した。講義で取り上げた研究炉を以下に示す。

ATR(米国)、BR-2(ベルギー)、OSIRIS(フランス)、HBWR(ノルウェー)、SM-3(ロシア)、RA-3(アルゼンチン)、HFIR(米国)、MURR(米国)、HFR(オランダ)、FRM-II(ドイツ)、ILL-HFR(フランス)、HANARO(韓国)、OPAL(オーストラリア)、LVR-15(チェコ)、MARIA(ポーランド)、BRR(ハンガリー)、WWR-K(カザフスタン)、CARR(中国)

(4) 新たな研究炉の建設計画

欧州では、高経年化等によって近い将来停止する研究炉の代替炉の建設を計画しており、また、新たに原子力発電を導入する国々では、原子力発電の基盤を支えるため、研究炉の建設を計画している。ここでは、表 8 に示す建設中及び計画中の研究炉について紹介した³⁾¹³⁾。

4.3.2 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 通常運転中における燃料の挙動
- ② 事故状況下での燃料の挙動
- ③ 軽水炉の構造材料
- ④ 材料の照射挙動及び機械的挙動
- ⑤ 腐食と水の放射線分解
- ⑥ 応力腐食割れへの中性子照射の影響

4.3.3 JMTR の照射設備と照射試験技術

JMTR を用いた研究を行うため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。

(1) 原子炉とホットラボの連携

図 3 に示すように、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 のチャンネルで直結していることから、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り、軽水炉の高経年化や燃料の高燃焼度化研究等に活用される。

(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、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 10 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 IASCC 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を研究炉で再照射することと、その場試験(照射中の環境制御や計測)が不可欠である。ここでは、照射済燃料及び材料を JMTR で再照射するためにキャプセルに組み込む技術、こ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 11 に照射済燃料棒に熱電対及び FP ガス圧力計を計装する方法を示す¹⁵⁾。

4.3.4 照射後試験施設と照射後試験技術

JMTR HL は、主に JMTR で照射された試料の照射後試験を行うことを目的として建設され、破壊試験や非破壊試験の広範囲な照射後試験が行われている。ここでは、JMTR HL における施設の概要、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、以下の講義を行った。

(1) 照射後試験施設

照射されたキャプセルやラビットは、コンクリートセルで解体され、主に鉄セルや鉛セルで試料の照射後試験が行われる。コンクリートセルでは、再照射試験のために照射済燃料や材料に計装を施してキャプセルに組み込む作業も行われる。また、JMTR HL では、放射性医薬品として利用される ^{99m}Tc の親核種である ^{99}Mo の国産化に向けた技術開発も行っている¹⁾²⁾。

(2) 照射後試験技術

JMTR HL では、材料の引張試験、硬さ試験、破壊靱性試験、疲労試験等の機械試験のほか、金相試験や X 線 CT スキャン、電子線マイクロスコープ、ガンマスキャンニングによる燃料の燃焼度分布測定、渦電流による燃料被覆管の酸化膜厚さ測定、燃料棒ギャップ測定等の照射後試験が行われる²⁾。比較的新しい照射後試験技術のうち、以下の技術について、講義を行った。

- ① 再照射技術 : 発電炉や他の照射施設で照射された材料を JMTR で再照射するため、キャプセルに装荷する技術
- ② 照射後試験技術 : 照射済の原子炉構造材料の IASCC 試験をホットラボで行うため、荷重、温度、腐食環境を制御する技術
- ③ ^{99m}Tc 抽出技術 : 照射により生成された ^{99}Mo から ^{99m}Tc を抽出する技術
- ④ 酸化膜厚さ測定技術 : 渦電流法による燃料棒被覆管の酸化膜厚さを測定する技術
- ⑤ 燃料棒への再計装技術 : 発電炉で照射された高燃焼度燃料の出力急昇試験を JMTR で行うため、燃料の中心温度測定用熱電対、核分裂生成ガス圧力測定用圧力計を計装する技術

4.3.5 照射設備の熱設計実習

照射試験に用いられる一般的な照射設備であるキャプセル及びラビット(以下「キャプセル等」という。)は、図 12 に示すように¹⁴⁾、円筒形の容器(外筒)に照射試料、試料ホルダ、スパーサ等が装荷され、炉心の反射体要素に設けられた照射孔に挿入される。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。容器は、キャプセルの場合、外径 40~65mm、長さ約 1m で、ラビットの場合、外径 36mm、長さ 150mm であり、容器の外表面を流れる冷却水で冷却される。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の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

キャプセル等で発生する熱は、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キャプセル等の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 13 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、キャプセル内に高温高圧水が挿入されるため、図 14 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をしていることから、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

キャプセル及びラビット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。このガスギャップの寸法は、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

ガス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は、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、軸方向の熱流束を抑えるため、適宜、断熱材を配置し、熱の流れを単純化する。

(2) 熱設計実習

熱設計実習は、(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 GENGTC¹⁶⁾を用いて実施した。実際のキャプセルの容器は円筒形であるが、装荷される試料の断面は円形とは限らないため、同心円形へのモデル化が必要になる。モデル化のポイントは、温度上昇に支配的なギャップ層の熱流束を合わせることであり、ここでは、そのための手法について実習を行った。また、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。

4.4 原子炉施設の安全管理

(1) 個人線量測定実習

本実習では、大洗研究開発センターにおける放射線業務従事者の外部被ばく及び内部被ばくの管理に関し、個人線量の測定に用いられるガラスバッジ等の測定器の紹介や、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、モニタリングポストを敷地境界付近に設置し、施設からの放射線による影響がないか、環境中の放射線量を常時測定しており、また、敷地周辺の水や土、農作物、海産物等を採取し、異常がないか定期的に評価している¹⁾。本実習では、実際に大洗研究開発センター敷地内の土を試料として採取し、 γ 線スペクトルを測定するとともに、その測定結果を基に放射能濃度を求め、核種分析への理解を深めた。

4.5 原子炉の核特性

4.5.1 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運転サイクル毎に炉心が大きく変わることが発電炉と異なる特徴であり、運転サイクル毎に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評価及び以下に示すJMTRにおける運転計画の策定から運転実施までの手順について講義を行った。

- ① 運転計画の策定 : 照射試験の目的に沿ったキャプセル等の照射設備及び燃料の炉心配置、原子炉出力上昇から停止までの運転スケジュールを策定する。
- ② 安全確認 : 策定した運転計画に従って炉心が組み立てられていることを外観検査でチェックする。また、制御棒価値や炉心の過剰反応度等の安全上必要な特性の測定等を行う。
- ③ 運転前安全チェック : 原子炉一次冷却系統コールドラン、原子炉圧力容器外観検査、制御棒駆動試験等を行う。
- ④ 運転の実施 : 運転計画に定めた手順に従って制御棒引抜きによる出力上昇、定常運転及び停止を行う。

4.5.2 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、核分裂によるエネルギー及び中性子の放出、中性子の減速等の核分裂連鎖反応に関する講義を行った。さらに、原子炉の基本構成(燃料、減速材、反射材、制御棒、冷却材)、原子炉の運転に関する重要な要素である反応度の概念及び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。

4.5.3 核計算実習

臨界安全評価、燃料キャスクの遮蔽計算、燃料貯蔵施設のスカイシャイン評価、原子炉構造材の中性子照射量評価等に適用されている三次元モンテカルロ計算コード MCNP¹⁷⁾に関する説明を行った上で、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、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。

原子炉の臨界計算については、臨界に関する形状効果、反射体効果について理解するため、原子炉について以下に示す計算条件で計算実習を行った。

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り、照射設備内の試料部の中性子束の評価は重要である。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部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

4.5.4 照射試験炉シミュレータ運転実習

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、キャプセル等の照射設備が反射体要素の照射孔に挿入される²⁾。キャプセル等に装荷される照射試料には、中性子吸収断面積が大きいものや小さいものがあり、また、照射試験の目的によって運転毎に炉心配置が変わり、運転中に照射設備の装荷や取出しも行われるため、これらが炉心の核特性に影響を与える。JAEAで開発した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に対応しており、原子炉の運転や照射試験、事故等を模擬することが可能である。

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体を挿入した際の制御棒の動きから、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) 異常時、事故時等の安全動作

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、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。

4.6 施設見学

原子炉の研究開発、安全管理等の現場を体感するため、施設見学を行った。見学した施設は、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である。表 9 に施設見学先一覧を示す。

5. 総合討論

2016 年度の研修には、カザフスタン、タイ、マレーシア、インドネシア、ポーランド、ベトナムから各 2 名、そして、日本から 1 名が参加した。この中で日本を除く国々は、いずれも化石燃料の産出が多く、主要なエネルギー源も、石油、石炭、天然ガスとなっている。一方、今後の経済の発展に伴うエネルギー需要の増大が想定されており、これに応える新エネルギーの開発が必要とされている。再生可能エネルギーもその 1 つであるが、基幹エネルギーとしての脆弱性から、原子力エネルギーに基幹エネルギーとしての期待が寄せられている。ただし、福島第一原発事故の影響により、各国はエネルギー政策の再検討を余儀なくされている。

以上を踏まえ、各国における原子力分野の状況等を理解し、異なる視点で議論を交わすことにより知見を広め、各参加者の今後の研究開発に活用することを目的として、研修最後のカリキュラムとして総合討論を行った。なお、総合討論は 1 名当たり 15 分の発表と 5 分の討論で構成した。

(1) キーノートスピーチ

討論に先立ち、公表されている各国のエネルギーミックスや福島第一原発事故後のエネルギー政策、再生可能エネルギー及び固定買取り制度に関するキーノートスピーチを講師より行った。キーノートスピーチの内容を以下に示す。

- ① 参加者の出身国及びドイツにおけるエネルギー政策
- ② 福島第一原発事故後の世界のエネルギーポリシー
- ③ 世界の再生可能エネルギーの現状及び日本とドイツにおける取組み
- ④ 再生可能エネルギーの開発のための固定買取り制度の実態及び課題

(2) 参加者の発表

国別に参加者の発表内容を以下に示す。発表は、「福島第一原発事故後のエネルギー政策及びエネルギーミックス」、「出身国の研究炉における照射設備及び照射技術」、「現在の研究内容及び JMTR への要望」という 3 つの中から各自テーマを選択して行った。表 10 に総合討論における発表タイトル一覧を示す。

① タイ

現在、タイのエネルギーミックスは、43.6%が石油、40.6%が天然ガス、13.8%が石炭と、化石燃料が大半を占めているが、石油価格の上昇に伴い、再生可能エネルギーや原子力エネルギーが注目されている。

タイにおける原子力に関する計画については、1966年にタイ発電公社(EGAT)から政府に原子力発電所の計画が提案されたものの、天然ガス田の発見や経済危機によって計画は延期され、福島第一原発事故後の影響で再び延期された。現在、2036年の計画再開が期待されている。

発表では現在の研究内容として、海水からのウラン抽出についての紹介もあった。

② ベトナム

2011年11月21日、ベトナムとロシアの間で原子力科学技術センター「CNEST」の設立についての政府間協定が署名された。CNESTは、発電炉燃料及び材料の照射やRI製造、人材育成等を主な目的としており、この中には、高出力の研究炉、材料試験等のためのホットラボが含まれる。

ベトナム原子力研究所(VINATOM)は、原子力分野での応用研究や放射線及び原子力安全の管理、研修の計画等を主な役割としており、IAEA及びJMTRには継続的な協力を望んでいる。特に、JMTRに対しては、照射後試験技術やホットラボの利用等といった材料試験や特性試験に特化した研修の実施を期待している。

③ カザフスタン

カザフスタンは、世界の埋蔵量の約19%のウラン資源を有している。2009年にはウランの採掘量で世界一となり、2012年にはウランの生産量が世界の生産量の37%を占めた。

しかし、国内にウランの変換及び濃縮、燃料棒や燃料集合体の生産を行う施設がないため、原子力の技術開発及び安全性の実証実験研究、カザフスタンにおける原子力発電所建設の可能性立証調査、カザフスタンにおける原子力技術開発のための研究及び技術的人材の育成等を国の原子力開発支援の下で実施している。

2010年9月には小型トカマク装置(KTM)の運転が実現し、現在、基盤電力として原子力を利用することに焦点を当て、原子炉の建設を検討している。

発表ではカザフスタンの研究炉として、WWR-K、BN-350についての紹介もあった。

④ マレーシア

マレーシアにおけるエネルギー政策及び原子力に関する計画について、福島第一原発事故の影響による変更はなかったが、経済面やパブリックアクセプタンス等の要因により、多少の遅れが生じている。

2014年現在、マレーシアにおけるエネルギーミックスは、天然ガスが49%、石炭が46%を占めており、その他は石油が2%、水力が3%となっている。一方、2011年から2015年にかけてのエネルギー政策では、エネルギー安全保障や経済効率だけでなく、環境や社会への配慮が強調されている。2016年から2020年にかけてのエネルギー政策では、再生可能エネルギー

ギーの発展の促進に焦点を当て、代替エネルギーとしての原子力の利用について更に調査を進めることとしている。

発表では、マレーシア原子力庁の照射設備の概要についての紹介もあった。

⑤ ポーランド

2014年の時点で、ポーランドのエネルギーミックスは、石炭が75%（褐炭23%、無煙炭52%）を占めており、天然ガスが2%、水力が5%、風力が10%となっている。一方、エネルギー需要の増大に伴い、将来のエネルギーミックスにおける原子力エネルギーのシェアは、2030年に15.7%、2050年に23%にすることを目標としている。

今後の原子力発電所の建設計画については、当初の計画では、2018年までに規制当局による計画草案の承認、2024年までに設置許可及び原子炉の建設、2030年中に原子炉2、3基を含む原子力発電所建設完了及び次の原子力発電所の建設開始を予定していたが、これらの計画には5年ほどの遅れが生じている。

発表では、ポーランドの研究炉として、MARIA炉についての紹介もあった。

⑥ インドネシア

インドネシアにおけるエネルギー開発では、経済性を考慮した再生可能エネルギーの最大限の利用、石油使用量の最少化、原子力を含む新エネルギー及び天然ガスの利用の最適化、主幹エネルギーとしての石炭の利用等が重要視されている。原子力エネルギーの利用については、エネルギー供給における安全性及び経済性、二酸化炭素の低減といった観点で検討されている。

今後のエネルギー供給については、化石燃料、特に石油使用量の削減と、天然ガス及び新エネルギーの最大限の利用を主な方針としており、エネルギーシェアについては、2025年に新エネルギーを23%、石油を25%、天然ガスを22%、石炭を30%にすることを目標としており、更に2050年には新エネルギーを31%、石油を20%、天然ガスを24%、石炭を25%にすることを目標としている。

発表では、インドネシアでの発電炉の新設等に関するパブリックアクセプタンスについての紹介もあった。

⑦ 日本

発表者本人の現在の研究内容として、高温ガス炉用Li装荷試験体におけるトリチウム生産及び閉じ込め性能の評価についての紹介があった。

参加者の発表では、各国における原子力に関する計画について、遅れが出ている国はあるものの、着実に進展していることが確認でき、各自が今後のエネルギー政策における原子力エネルギーの重要性を認識し、パブリックアクセプタンスや安全性の問題に対して真摯に向き合う姿勢を示していた。

なお、発表テーマのうち、出身国の研究炉の紹介や各自の現在の研究内容等については、参加者の背景を知るという意味でも、研修の最初もしくは前半に発表を行う等、総合討論の実施方法について検討が必要と思われる。

6. まとめ

本研修の参加者のほとんどは、今後のエネルギー需要の増大が想定されている国の若手研究者・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では、以下のような意見が得られた。

- ・ 照射技術及び照射後試験技術についての理解が深まった。
- ・ 専門分野における基礎的な講義内容については、既に知っている内容が多かった。
- ・ 応用となる実習については、内容に対して時間が短かった。

最終日に行った総合討論においては、エネルギーの安定供給等の観点から、多くの国で原子力エネルギーが必要とされており、そのためにも人材育成は必要であることから、引き続き、本研修を実施して欲しいとの要望があった。

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育成、そして国内の原子力人材の確保の裾野拡大及び育成に貢献していくため、このような研修は有効であり、かつ、今後も必要と考える。

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、武田誠一郎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, ホームページ, <http://www.jaea.go.jp/> (参照:2016年10月17日).
- 2) 日本原子力研究開発機構, JMTR パンフレット, “New JMTR”, (2011).
- 3) IAEA, “Research Reactor Data Base”, Research Reactors, <http://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx> (参照:2016年10月20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, “Nuclear Power Reactors in the World 2016 Edition”,
<http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/11079/Nuclear-Power-Reactors-in-the-World>
(参照:2016年9月2日).
- 7) World Nuclear Association, “Information Library”,
<http://www.world-nuclear.org/information-library/> (参照:2016年10月20日).
- 8) 九州電力株式会社, “川内原子力発電所再稼働関連情報”,
http://www.kyuden.co.jp/torikumi_nuclear_restart.html (参照:2016年10月17日).
- 9) 四国電力株式会社, “伊方発電所3号機の通常運転再開について”,
<http://www.yonden.co.jp/press/re1609/data/pr004.pdf> (参照:2016年11月7日).
- 10) World Energy Council, “Nuclear Energy One Year After Fukushima”,
<http://www.worldenergy.org/publications/2012/world-energy-perspective-nuclear-energy-one-year-after-fukushima/> (参照:2016年10月11日).
- 11) 電機事業連合会, “海外電力関連 トピックス情報”,
http://www.fepc.or.jp/library/kaigai/kaigai_topics/index.html (参照:2016年10月17日).
- 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:2016年9月1日).
- 13) 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:2016年12月1日).
- 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) 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).
- 16) 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.
- 17) J.F.BRIESMEISTER, (Ed.), MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Cord, Version 4B, LA-12625-M, (1997).

表 1-1 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 1-2 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 1-3 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
高専生	福島高専	学科4年	2
	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 1-4 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 2-1 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
	チューラーロンコーン大学	27	1
合計		10 名	

表 2-2 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
	チュー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 2-3 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
	チュー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 3-1 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 3-2 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 3-3 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 4 2016 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原子力施設(東海、大洗)
	施設見学	NSRR
原子力エネルギー	講義	世界における発電用原子炉の状況と過酷事故 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 「常陽」 HTTR 水素製造試験施設
照射試験研究	講義	世界の研究炉 原子炉用燃料及び材料の中性子照射挙動 JMTRの照射設備と照射試験技術 照射後試験施設と照射後試験技術
	実習	照射設備の熱設計実習
	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 緊急時対策室
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
総合討論		

表 5 2016 年度の研修プログラム

月日		午前			午後			
7月25日	月	オリエンテーション	大洗町表敬訪問		日本原子力研究開発機構の原子力施設(東海、大洗)	世界における発電用原子炉の状況と過酷事故	HTTR、水素製造試験施設の見学	
7月26日	火	高温ガス炉開発と核熱利用研究			高速炉開発	「常陽」の見学	世界の研究炉	
7月27日	水	原子炉用燃料及び材料の中性子照射挙動				JMTRの見学		JMTRの照射設備と照射試験技術
7月28日	木	JMTRの照射設備と照射試験技術	照射後試験施設と照射後試験技術		照射設備の熱設計実習			
7月29日	金	JMTRの安全管理			環境監視施設、放射線管理施設の見学	個人線量測定実習、環境試料の γ 線核種分析実習		
8月1日	月	緊急時対策室の見学	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	炉物理の基礎			
8月2日	火	核計算実習						
8月3日	水	照射試験炉シミュレータ運転実習						
8月4日	木	日本原子力発電(株)東海第二発電所、NSRRの見学				総合討論の準備		
8月5日	金	総合討論					修了式	

表 6 日本の保有する発電炉⁷⁾

BWR				PWR			
No.	Reactor	Net capacity (MWe)	Utility	No.	Reactor	Net capacity (MWe)	Utility
1	Fukushima II-1	1067	TEPCO	1	Genkai 2	529	Kyushu
2	Fukushima II-2	1067	TEPCO	2	Genkai 3	1127	Kyushu
3	Fukushima II-3	1067	TEPCO	3	Genkai 4	1127	Kyushu
4	Fukushima II-4	1067	TEPCO	4	Ikata 2	538	Shikoku
5	Hamaoka 3	1056	Chubu	5	Ikata 3	846	Shikoku
6	Hamaoka 4	1092	Chubu	6	Mihama 3	780	Kansai
7	Hamaoka 5	1325	Chubu	7	Ohi 1	1120	Kansai
8	Higashidori 1 Tohoku	1067	Tohoku	8	Ohi 2	1120	Kansai
9	Kashiwazaki-Kariwa 1	1067	TEPCO	9	Ohi 3	1127	Kansai
10	Kashiwazaki-Kariwa 2	1067	TEPCO	10	Ohi 4	1127	Kansai
11	Kashiwazaki-Kariwa 3	1067	TEPCO	11	Sendai 1	846	Kyushu
12	Kashiwazaki-Kariwa 4	1067	TEPCO	12	Sendai 2	846	Kyushu
13	Kashiwazaki-Kariwa 5	1067	TEPCO	13	Takahama 1	780	Kansai
14	Kashiwazaki-Kariwa 6	1315	TEPCO	14	Takahama 2	780	Kansai
15	Kashiwazaki-Kariwa 7	1315	TEPCO	15	Takahama 3	830	Kansai
16	Onagawa 1	498	Tohoku	16	Takahama 4	830	Kansai
17	Onagawa 2	796	Tohoku	17	Tomari 1	550	Hokkaido
18	Onagawa 3	796	Tohoku	18	Tomari 2	550	Hokkaido
19	Shika 1	505	Hokuriku	19	Tomari 3	866	Hokkaido
20	Shika 2	1304	Hokuriku	20	Tsuruga 2	1110	JAPC
21	Shimane 2	791	Chugoku				
22	Tokai 2	1060	JAPC				

表 7 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

(Nuclear Energy One Year After Fukushima Table 2を基に作成)

表 8 建設中及び計画中の研究炉 ⁵⁾¹³⁾

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	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 9 施設見学先一覧

研究炉	JMTR
	「常陽」
	HTTR
	NSRR
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、緊急時対策室
発電炉	日本原子力発電(株)東海第二発電所

表 10 総合討論における発表タイトル一覧

No.	発表タイトル	発表者出身国
1	Extraction uranium in seawater	タイ
2	Introduce my institute and our study and some demands against JMTR	ベトナム
3	Tritium production and containment performance of lithium rod test module for high temperature gas cooled reactor	日本
4	Infrastructure of atomic branch and prospects for nuclear energy development in Republic of Kazakhstan	カザフスタン
5	Research reactor of Kazakhstan	カザフスタン
6	Irradiation rigs and research reactor technologies in nuclear Malaysia agency	マレーシア
7	Overview of MARIA reactor and its irradiation rig	ポーランド
8	Introduction about my research reactor and demands against JMTR	ベトナム
9	Malaysia energy policy before and after Fukushima-Daiichi nuclear severe accident	マレーシア
10	Nuclear power program and energy mix in Poland	ポーランド
11	Energy policy in Thailand	タイ
12	Public acceptance to nuclear power plant in Indonesia	インドネシア
13	Indonesia's government policy about nuclear and mix energy	インドネシア

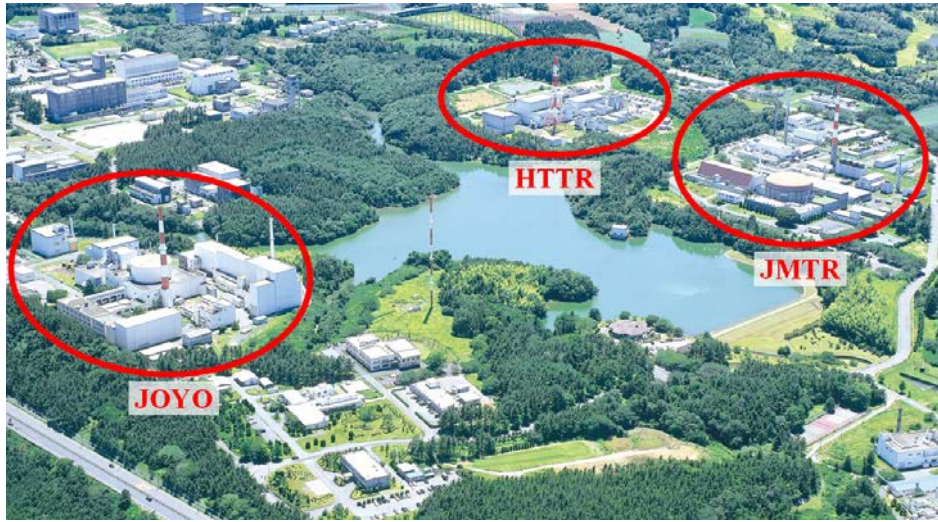


図 1 JAEA 大洗研究開発センターの有する研究炉

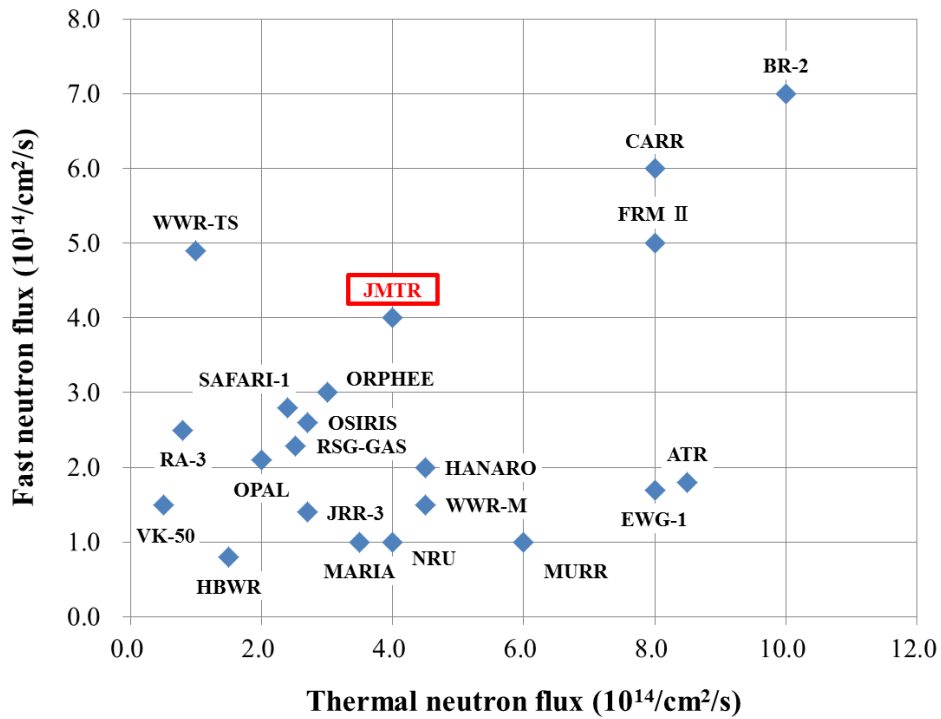


図 2 世界の研究炉の中性子束³⁾

(Research Reactor Data Base の数値を基に作成)

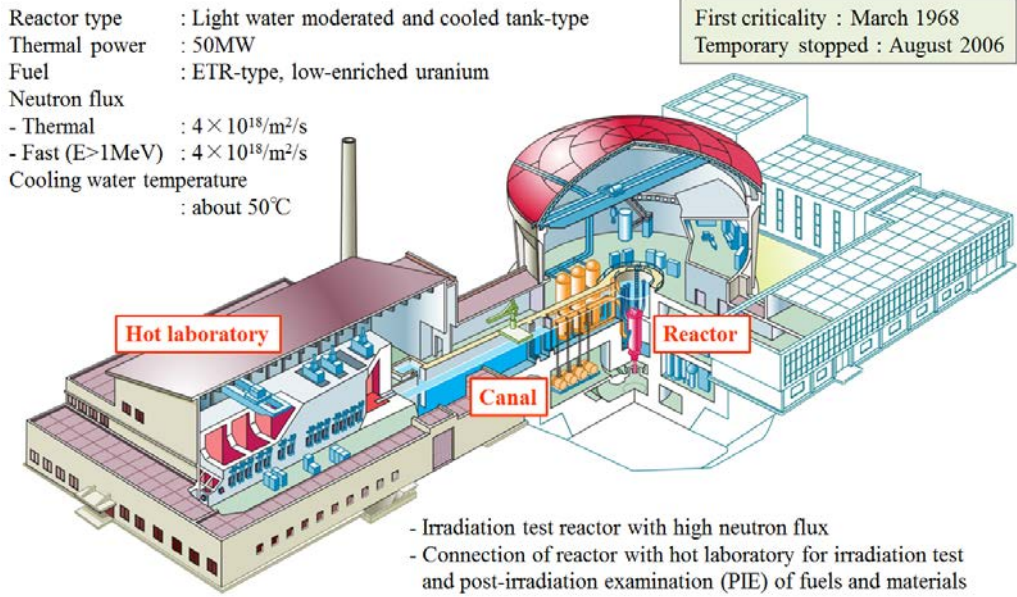


図3 JMTR の概要

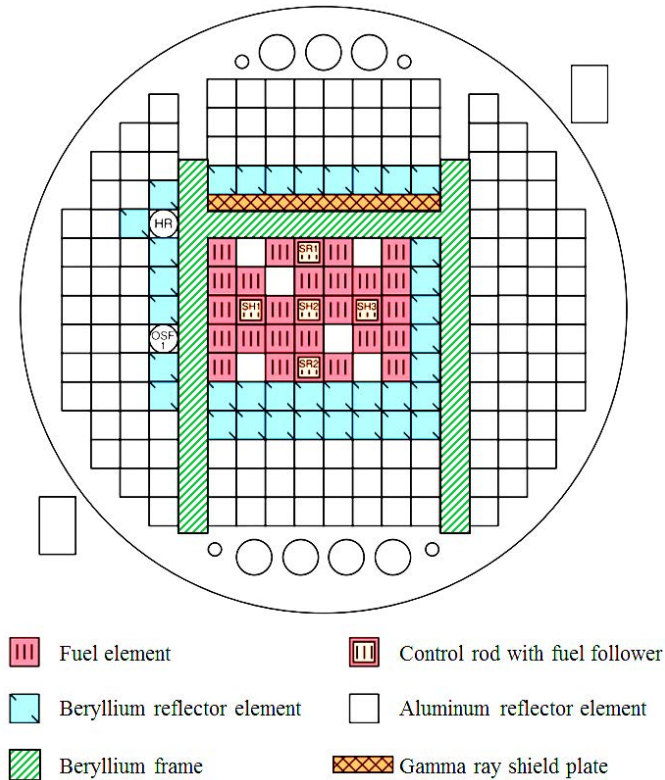


図4 JMTR の炉心配置例²⁾

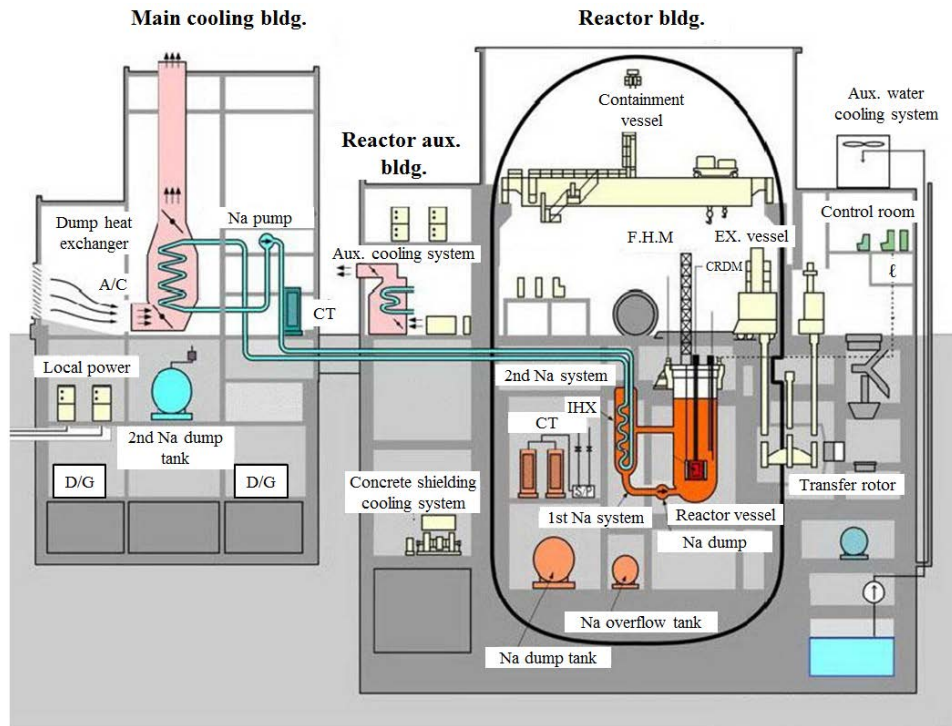


図5 「常陽」の概要³⁾

The figure shows a cutaway view of the HTTR reactor building and a detailed view of a coated fuel particle. The particle consists of a central fuel kernel, surrounded by a SiC layer, and an outer PyC layer. The total diameter of the particle is 0.920mm.

Establishment of HTGR technology

- Accumulation of long-term operation data
- Demonstration of inherent safety feature

Establishment of heat utilization technology

- Demonstration of hydrogen production system

Specification of HTTR

- Thermal power : 30MW
- Fuel : Low enriched UO₂
- Fuel element type : Prismatic block / Coated fuel particle
- Core material : Graphite
- Coolant : Helium Gas
- Inlet temperature : 395°C
- Outlet temperature : 950°C(Max.)

図6 HTTRの概要³⁾

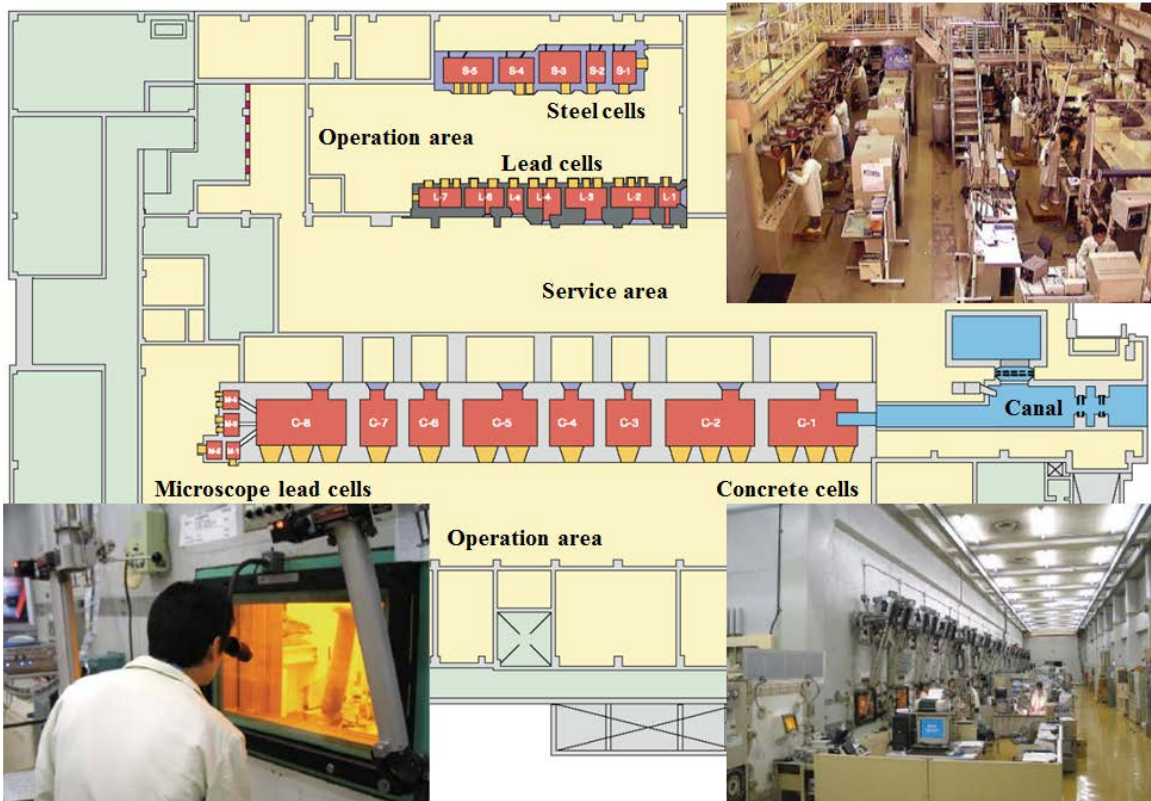


図 7 JMTR HL のホットセルの概要⁴⁾

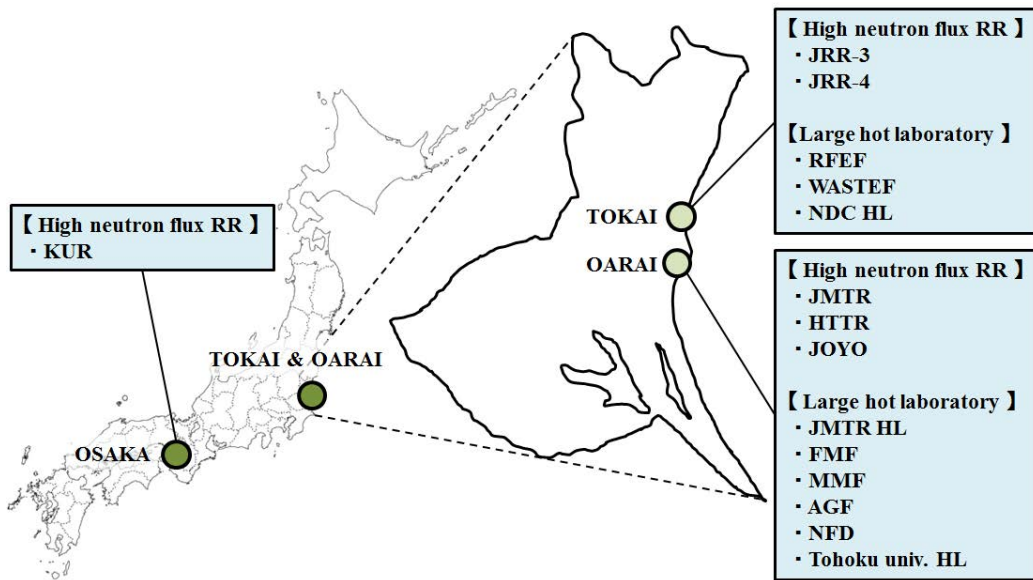


図 8 日本の主要な照射試験研究施設

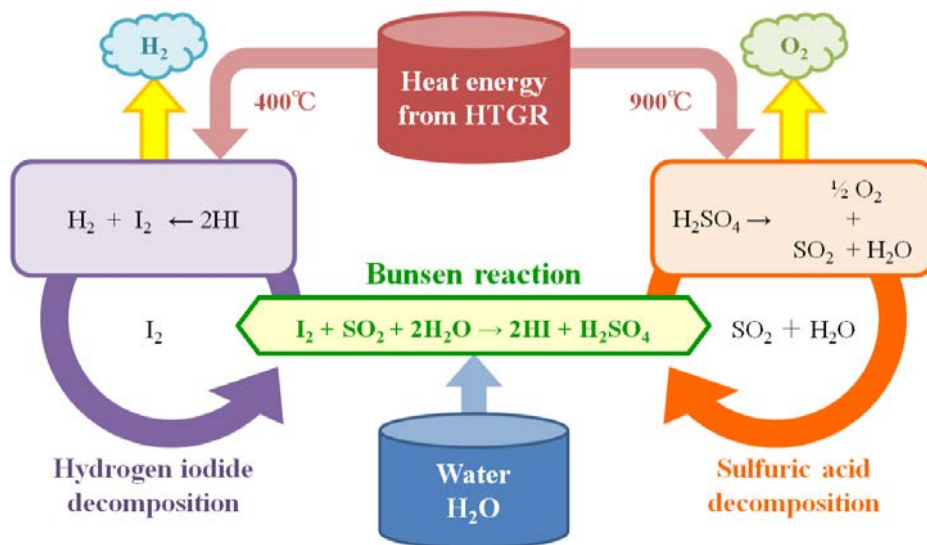


図9 ISプロセスの概要¹²⁾

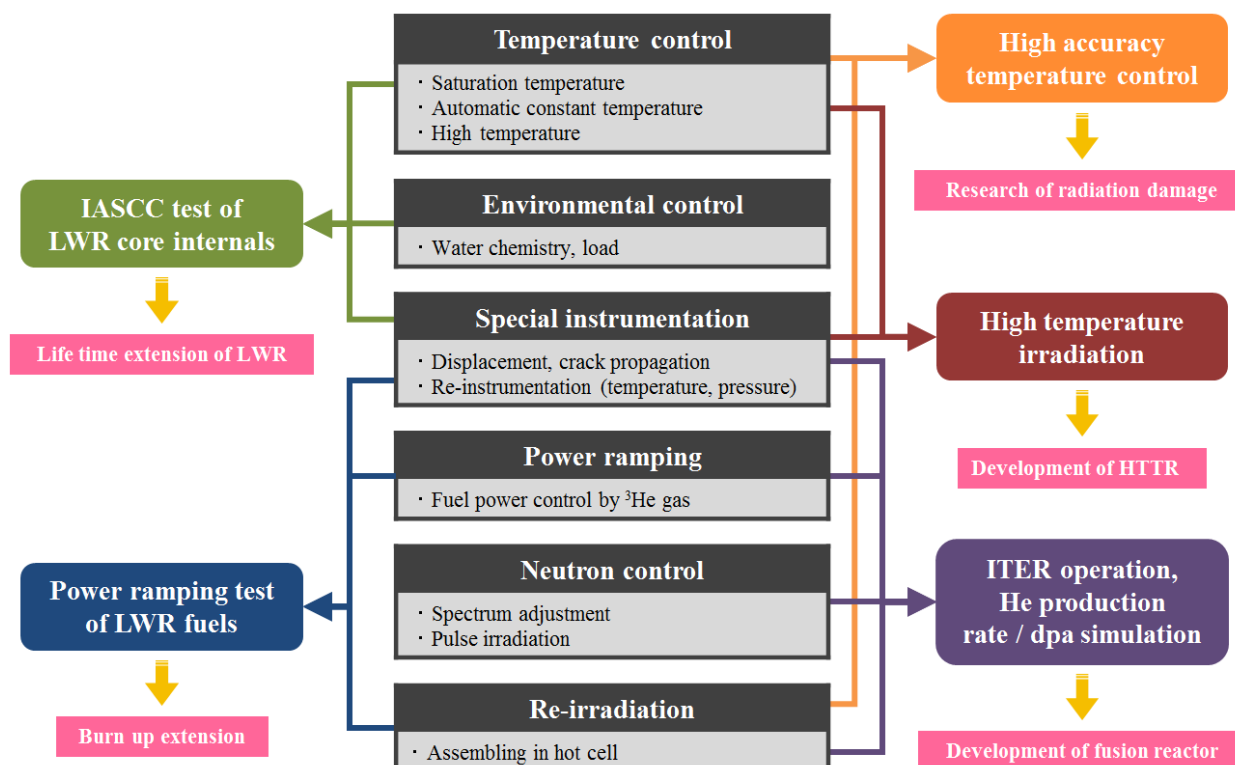


図10 JMTRの照射技術

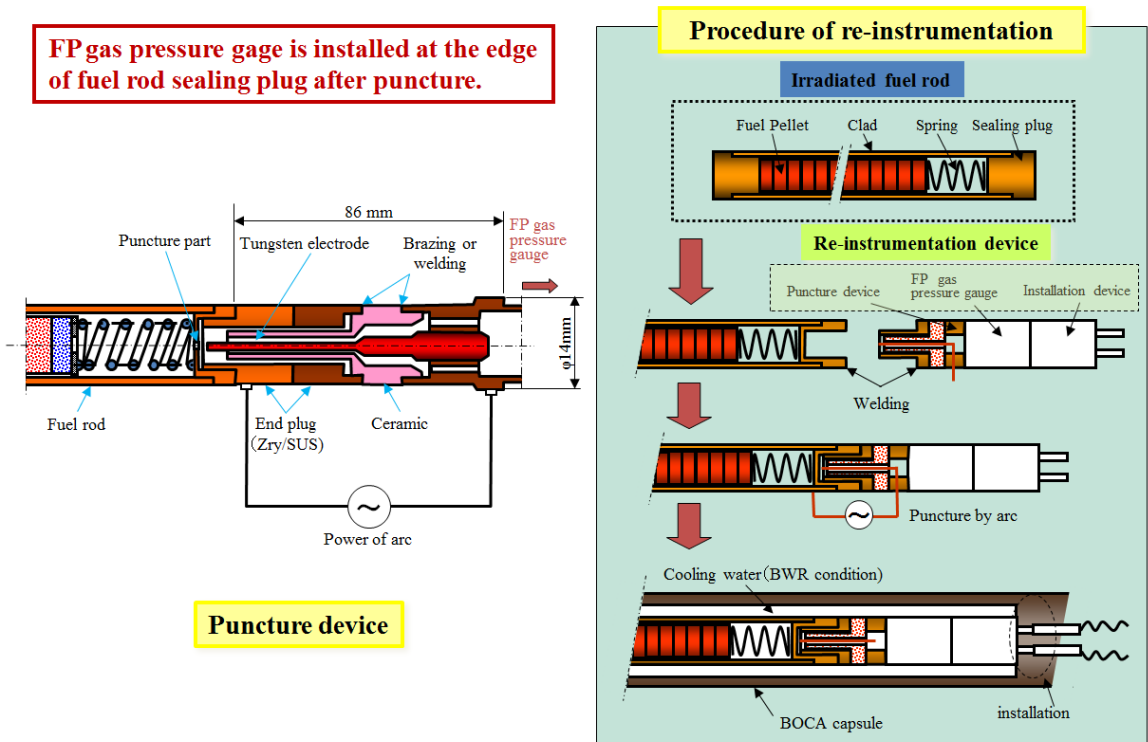


図 11 照射済燃料への熱電対、FP ガス圧力計の再計装技術

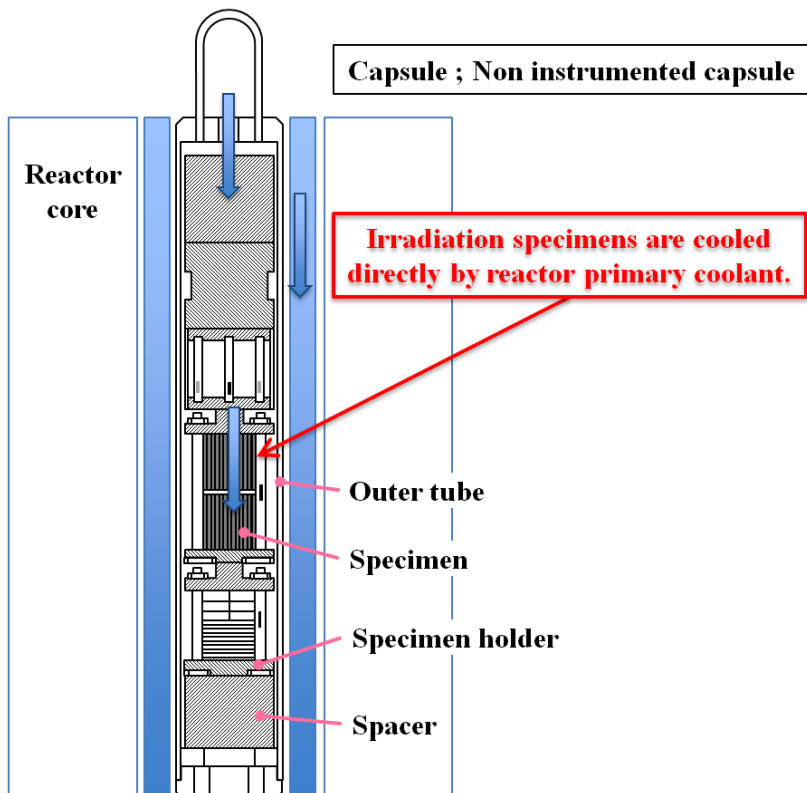


図 12 キャプセルの概略図例¹⁴⁾

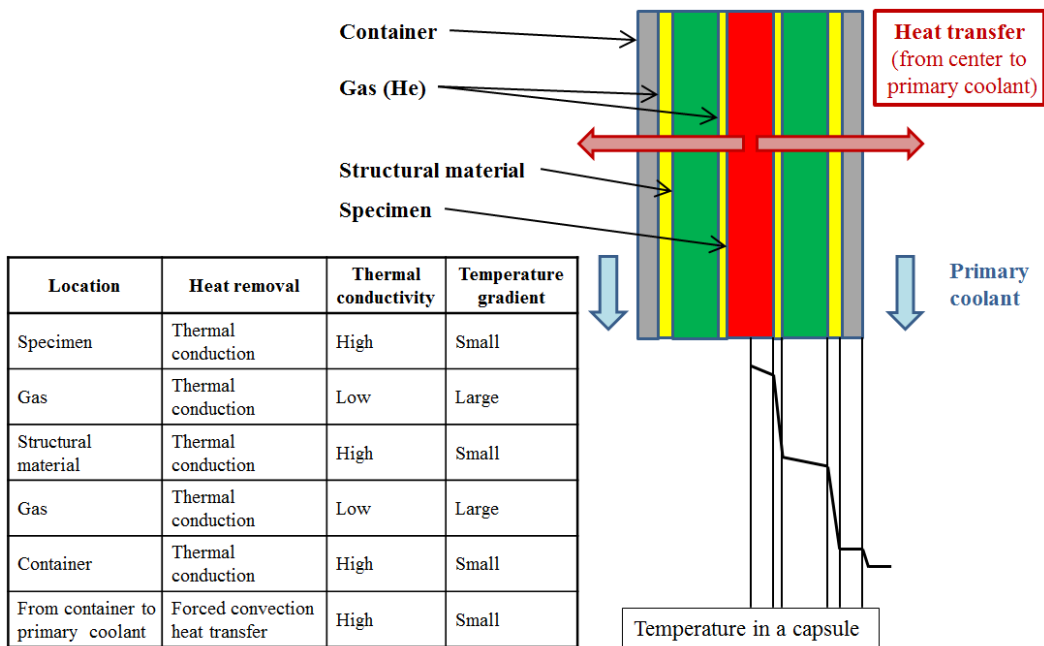


図 13 キャプセルの熱移動と温度分布

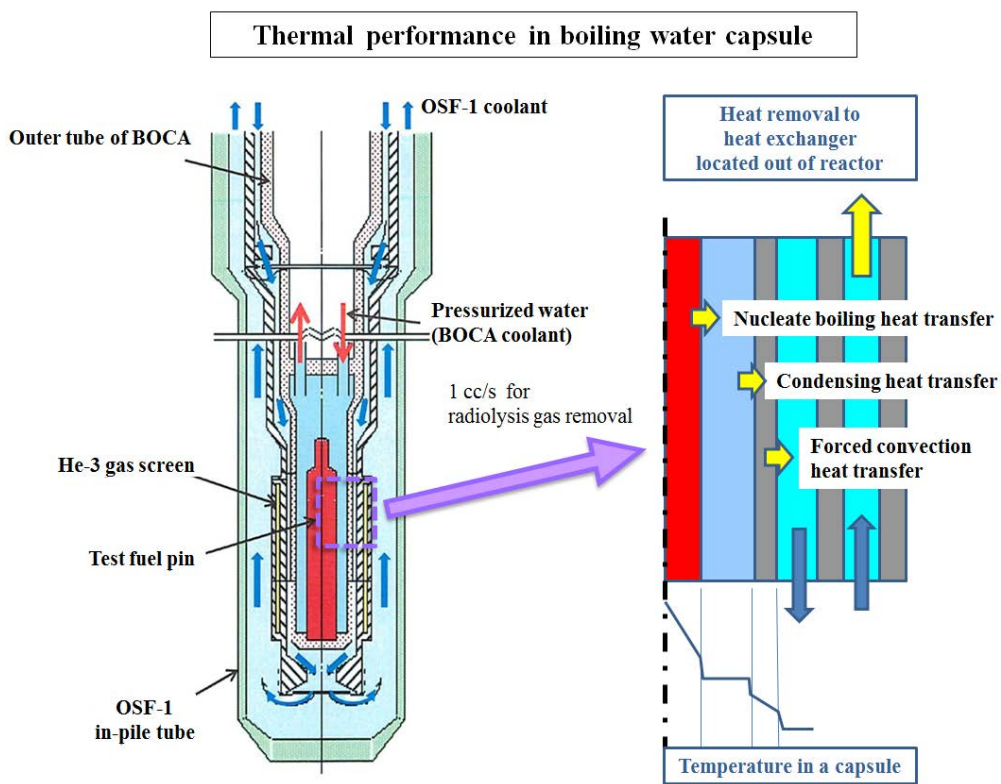


図 14 沸騰水キャプセルの熱移動

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
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 ^(e)	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	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
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射線量当量, 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
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
放射線輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	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=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 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 =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)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「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

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

