

JMTR及び関連施設を活用した実践型オンライン研修 (2018年度)

On-site Training using JMTR and Related Facilities in FY2018

江口 祥平 中野 寛子 大塚 紀彰 西方 香緒里
永田 寛 井手 広史 楠 剛

Shohei EGUCHI, Hiroko NAKANO, Noriaki OHTSUKA, Kaori NISHIKATA
Hiroshi NAGATA, Hiroshi IDE and Tsuyoshi KUSUNOKI

高速炉・新型炉研究開発部門
大洗研究所
環境技術開発センター
材料試験炉部

Department of JMTR
Waste Management and Decommissioning Technology Development Center
Oarai Research and Development Institute
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development

JAEA-Review

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 (<https://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

JMTR 及び関連施設を活用した実践型オンライン研修
(2018 年度)

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所
環境技術開発センター 材料試験炉部

江口 祥平、中野 寛子、大塚 紀彰、西方 香緒里、永田 寛、井手 広史、楠 剛

(2019 年 7 月 5 日受理)

材料試験炉部では、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、昨年度に引き続き、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 11 名の若手研究者・技術者が参加し、2018 年 7 月 31 日から 8 月 7 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、2018 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。

大洗研究所 : 〒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 FY2018

Shohei EGUCHI, Hiroko NAKANO, Noriaki OHTSUKA, Kaori NISHIKATA, Hiroshi NAGATA,
Hiroshi IDE and Tsuyoshi KUSUNOKI

Department of JMTR, Waste Management and Decommissioning Technology Development Center,
Oarai Research and Development Institute,
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development,
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received July 5, 2019)

A practical training course using the JMTR (Japan Materials Testing Reactor) and other research infrastructures was held from July 31st to August 7th in 2018 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, 11 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 FY2018 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. 大洗研究所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 高温ガス炉開発と核熱利用研究	5
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	6
4.3.3 JMTR の照射設備と照射試験技術	6
4.3.4 照射設備の熱解析と熱設計実習	7
4.4 原子炉の核特性	8
4.4.1 JMTR の安全管理	8
4.4.2 炉物理の基礎	9
4.4.3 核計算実習	9
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	10
4.6 施設見学	11
5. まとめ	11
謝辞	11
参考文献	11

Contents

1. Introduction	1
2. Irradiation test research infrastructures in Oarai Research and Development Institute	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 FY2018	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
4.3 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	6
4.3.3 Irradiation facilities and technologies of JMTR	6
4.3.4 Practice of thermal design for irradiation rigs	7
4.4 Nuclear characteristics of nuclear reactors	8
4.4.1 Safety management of JMTR	8
4.4.2 Basics of reactor physics	9
4.4.3 Practice of neutronic calculations	9
4.4.4 Practice of reactor operation using simulator for materials testing reactors	10
4.5 Safety management of nuclear reactors	10
4.6 Technical tour of nuclear facilities	11
5. Summary	11
Acknowledgements	11
References	11

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。)大洗研究所材料試験炉部では、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心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 年度には、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、アジア地域の若手研究者・技術者を対象に研修を実施した。2018 年度は、本研修が同事業に採択され、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 11 名の若手研究者・技術者を迎える、2018 年 7 月 31 日から 8 月 7 日までの期間で研修を実施した。

2. 大洗研究所の照射試験研究基盤施設

大洗研究所は、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。大洗研究所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してきた。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

大洗研究所は、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ノイド(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WASTEF(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

材料試験炉部は、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 年度には、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、アジア地域の若手研究者・技術者を対象に、今後の人材交流や共同研究に繋がる協力関係の構築、人材の往来の活発化を目指して研修を実施した。2018 年度は、前年度に引き続き、同事業に採択されたため、研修を実施した。2018 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、2018 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 2-1~4-4 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 2018 年度の研修カリキュラムを示す。

- ① 参加者の出身国のは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 2018 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株式会社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 800 基の研究炉が建設されてきたが、2018 年 11 月現在、運転中のものは 226 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⁾。

(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⁷⁾。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 日の時点では、世界で 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⁷⁾。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⁸⁾。

(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。

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、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°C 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、大洗研究所の 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⁹⁾、JAEA では、IS プロセスという水素製造法の開発を進めている¹⁰⁾。水の熱分解には 4000°C 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°C 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⁾。

4.3 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、マニピ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ップセル照射装置、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イープキャップセルや、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ラ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 8 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ッ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 9 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¹¹⁾。

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ッ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。キャップセル等は、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、キャッ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 γ 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な。ここでは、キャッ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) キャップセル等の熱設計上の特徴

① 熱の流れ

キャップセル等は、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。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 10 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

γ 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、 γ 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 热抵抗の調整

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 热膨張の影響

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 γ 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) 热設計実習

(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 GENTC¹²⁾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。

4.4 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、遮へい計算、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 MCNP¹³⁾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

4.4.4 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、キャップセル等の照射設備が挿入される。キャップセル等に装荷される試料によって中性子吸收断面積は異なり、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・事故事象時の安全動作

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・事故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・事故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

大洗研究所では、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

大洗研究所では、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、実際に大洗研究所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、研究開発等が行われている現場へ実際に足を運ぶことは、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、大洗研究所内の研究炉（JMTR）、研究施設（水素製造試験施設）、放射線管理施設、環境監視施設の施設見学を行った。

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は、有益な内容であったとの意見とともに、研修期間が短いといった意見も見られた。

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るが、期間だけでなく、JAEA 及び JMTR が取り組んでいる廃止措置に係る講義を行う等、研修の内容についても検討が必要と考える。

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、塙月正雄大洗研究所所長をはじめ、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、深く感謝致します。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、大洗研究所パンフレット、(2018).
- 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、<https://www.jaea.go.jp/> (参照:2018年11月1日).
- 4) 木村 伸明, 竹本 紀之, 大岡 誠, 石塚 悅男, 中塙 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,
<https://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx> (参照:2018年11月1日).

- 7) IAEA, “Nuclear Power Reactors in the World 2018 Edition”, (2018), 79p,
<https://www.iaea.org/publications/13379/nuclear-power-reactors-in-the-world>
(参照:2018年11月1日).
- 8) 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:2018年11月1日).
- 9) 経済産業省資源エネルギー庁, “エネルギー基本計画”, (2014),
http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf
(参照:2018年11月1日).
- 10) 日本原子力研究開発機構, HTTR パンフレット,
https://httr.jaea.go.jp/images/index/panf_2015.pdf
(参照:2018年11月1日).
- 11) 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).
- 12) 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.
- 13) 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 2018 年度の参加者

国名	所属	年齢	人数
カザフスタン	カザフスタン核物理研究所	22	1
	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	21	1
	チュラーロンコーン大学	23	1
マレーシア	マレーシア原子力庁	30	1
	マレーシア原子力庁	26	1
インドネシア	インドネシア原子力庁	26	1
ベトナム	ベトナム原子力庁	27	1
	ベトナム原子力庁	27	1
モンゴル	モンゴル原子力委員会	23	1
	モンゴル国立大学	22	1
		合計	11 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
	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
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 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
	タイ電力公社	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
	マレーシア原子力庁	29	2
マレーシア	マレーシア原子力庁	30	1
	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
	チュラーランコーン大学	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	チュラーランコーン大学	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
	チュラーランコーン大学	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	チュラーランコーン大学	24	1
	カセサート大学	23	1
	マレーシア原子力庁	27	1
マレーシア	マレーシア原子力庁	28	1
	インドネシア原子力庁	27	1
インドネシア	インドネシア原子力庁	29	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 4-4 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	チュラーランコーン大学	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 5 2018 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
原子力 エネルギー	講義	世界の発電用原子炉と研究用原子炉 高温ガス炉開発と核熱利用研究
	施設見学	水素製造試験施設
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 熱設計実習
	施設見学	JMTR 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ホットラボ
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 2018 年度の研修プログラム

月日		午前		午後	
7月 31日	火	オリエンテーション	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	日本原子力研究開発機構の紹介、世界の発電用原子炉と研究用原子炉
8月 1日	水	JMTRの照射設備と照射試験技術			JMTRの見学
8月 2日	木	JMTRホットラボと照射後試験技術		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 ホットラボの見学	高温ガス炉開発と核熱利用研究
8月 3日	金	照射設備の 熱解析	熱設計実習	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 6日	月	環境試料の γ線核種分析実習	炉物理の基礎	核計算実習	JMTRの安全管理
8月 7日	火	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⁾

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
	Ukraine	Multipurpose RR	Pool	20
	USA	HT3R	He Cooled	25
	Viet Nam	Multipurpose RR	Pool	15

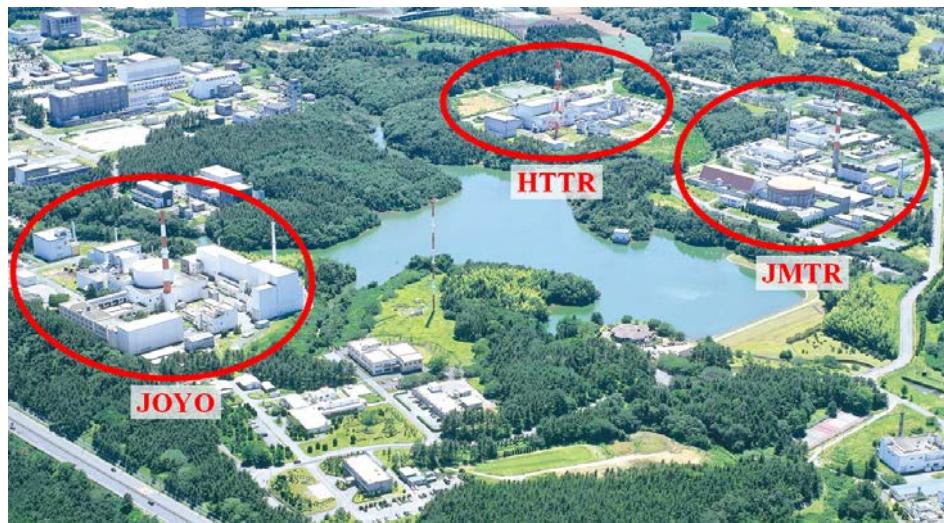
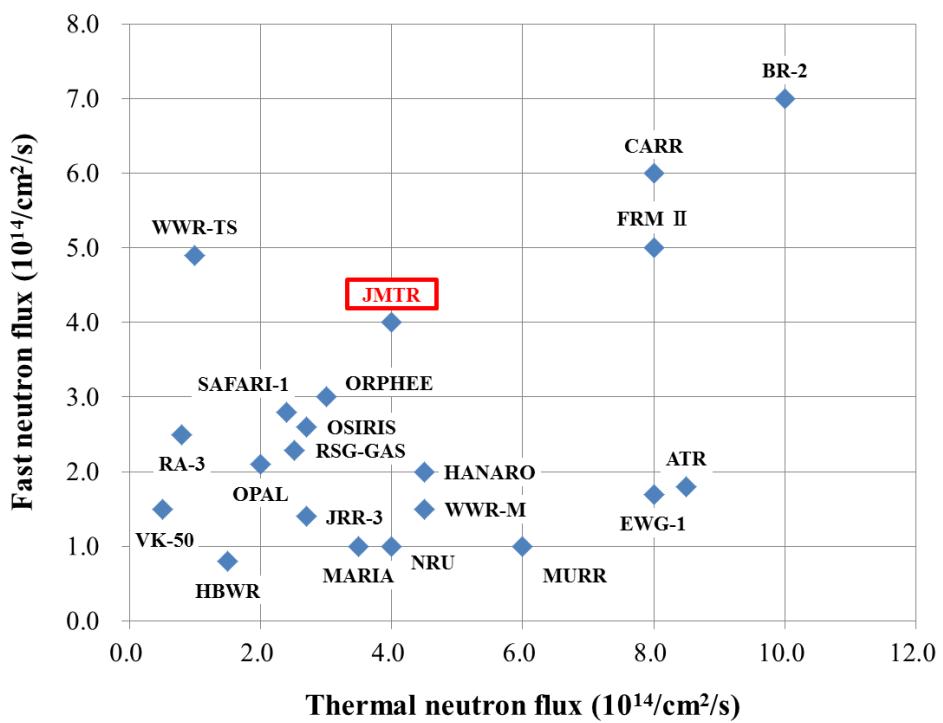
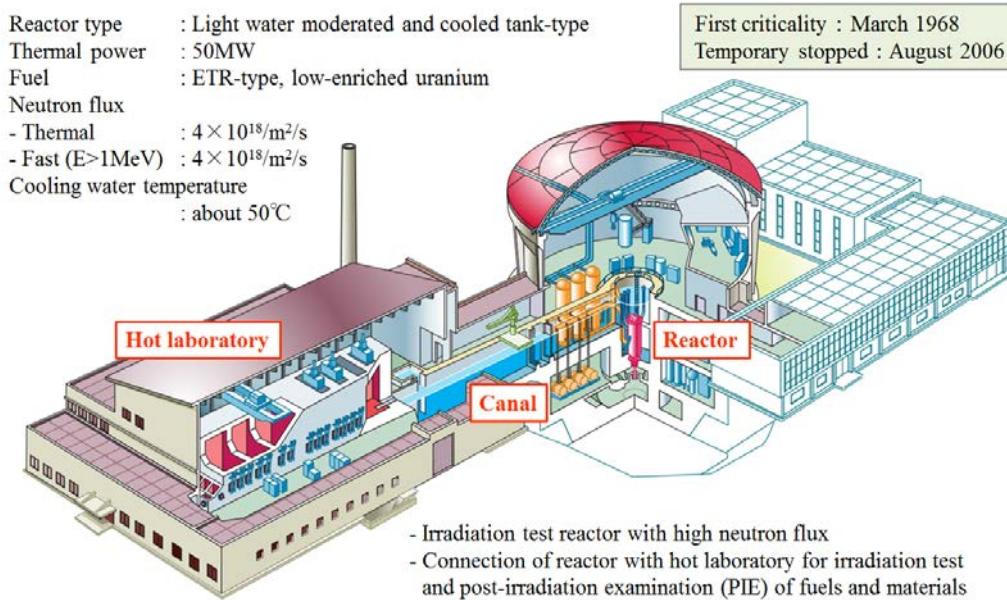
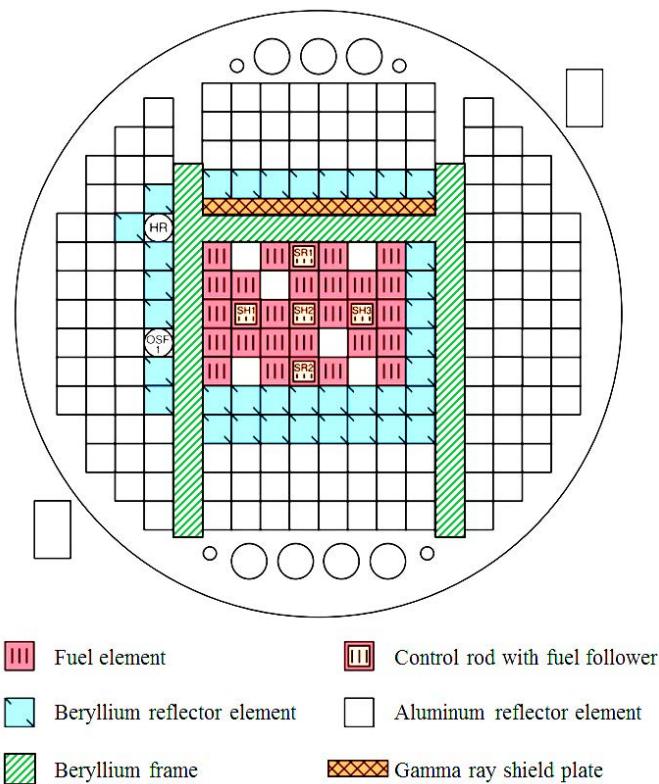
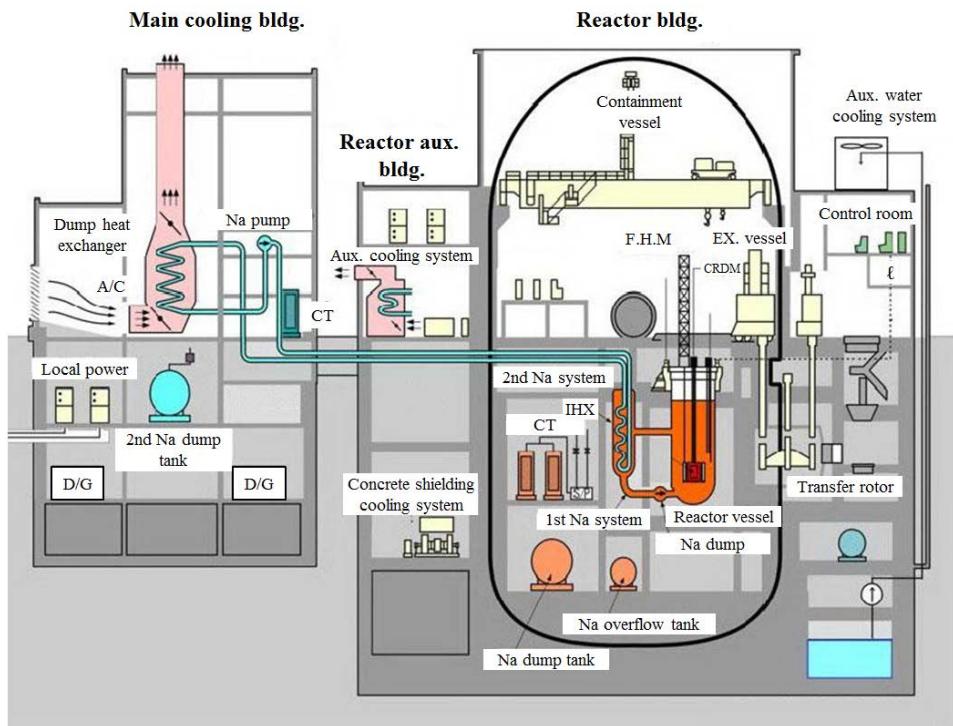
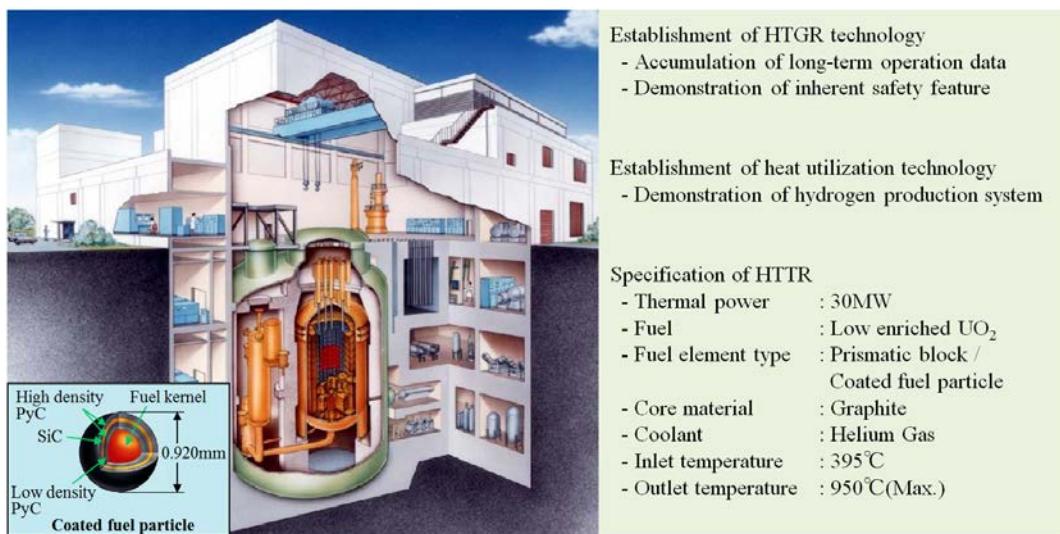


図 1 JAEA 大洗研究所の有する研究炉

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⁾

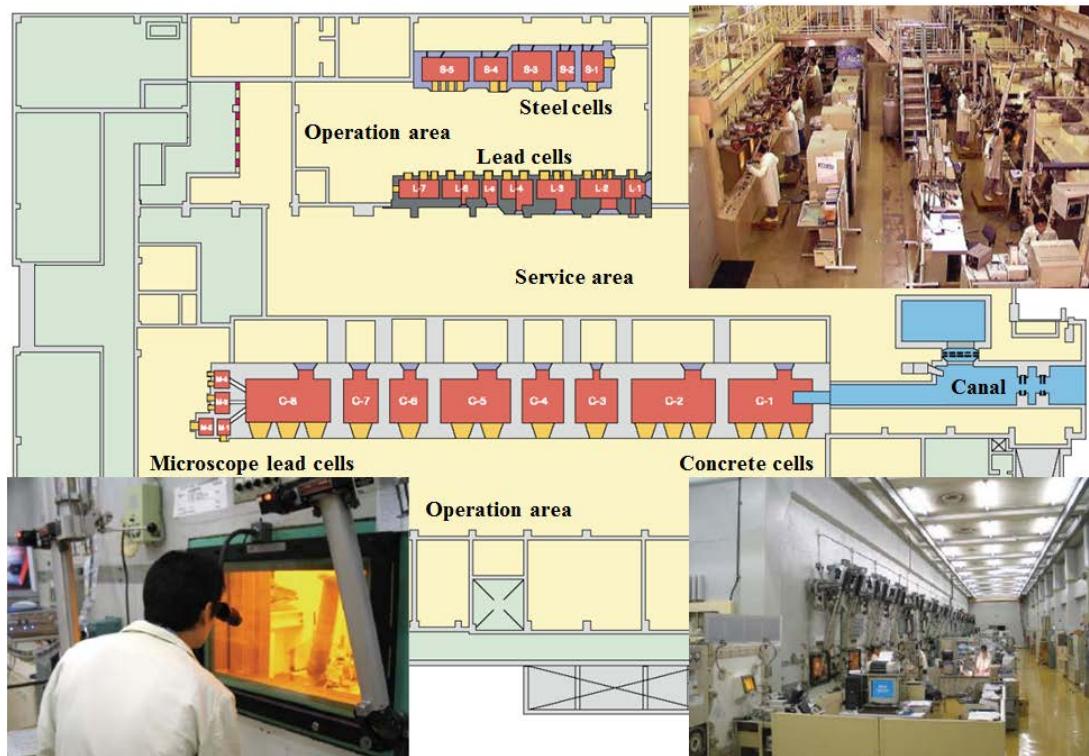
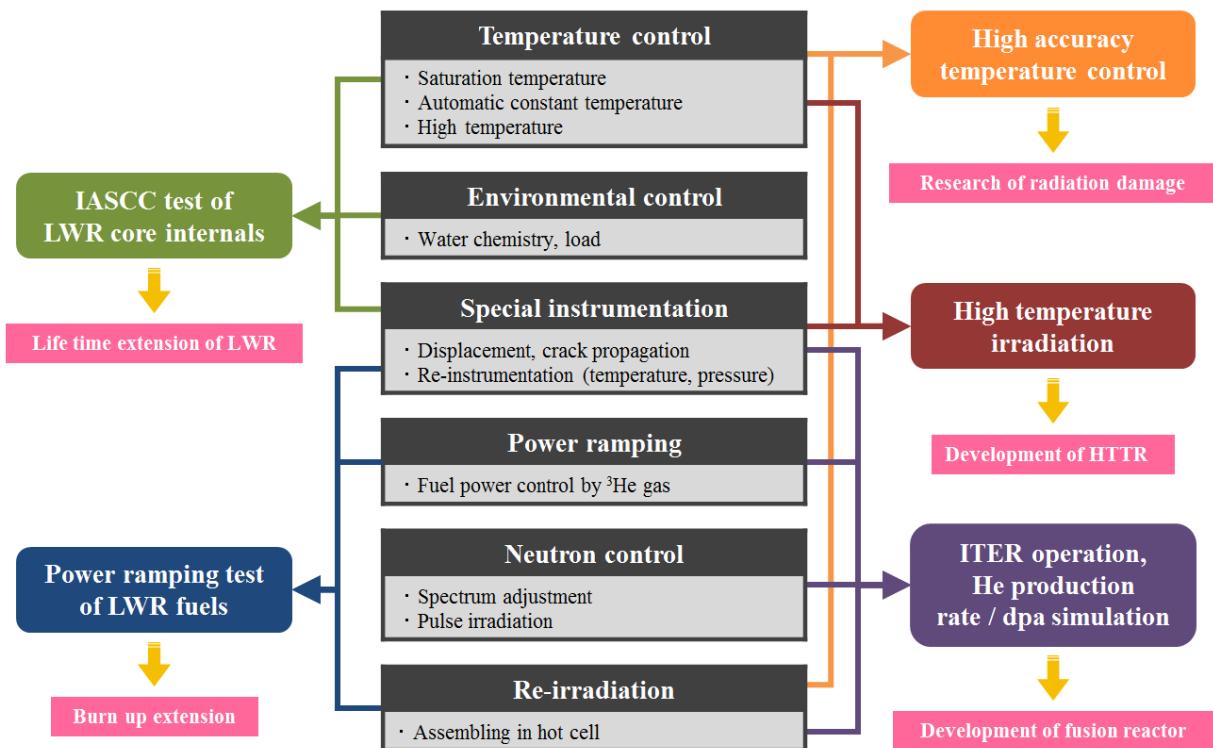
図 7 JMTR HL のホットセルの概要²⁾

図 8 JMTR の照射技術

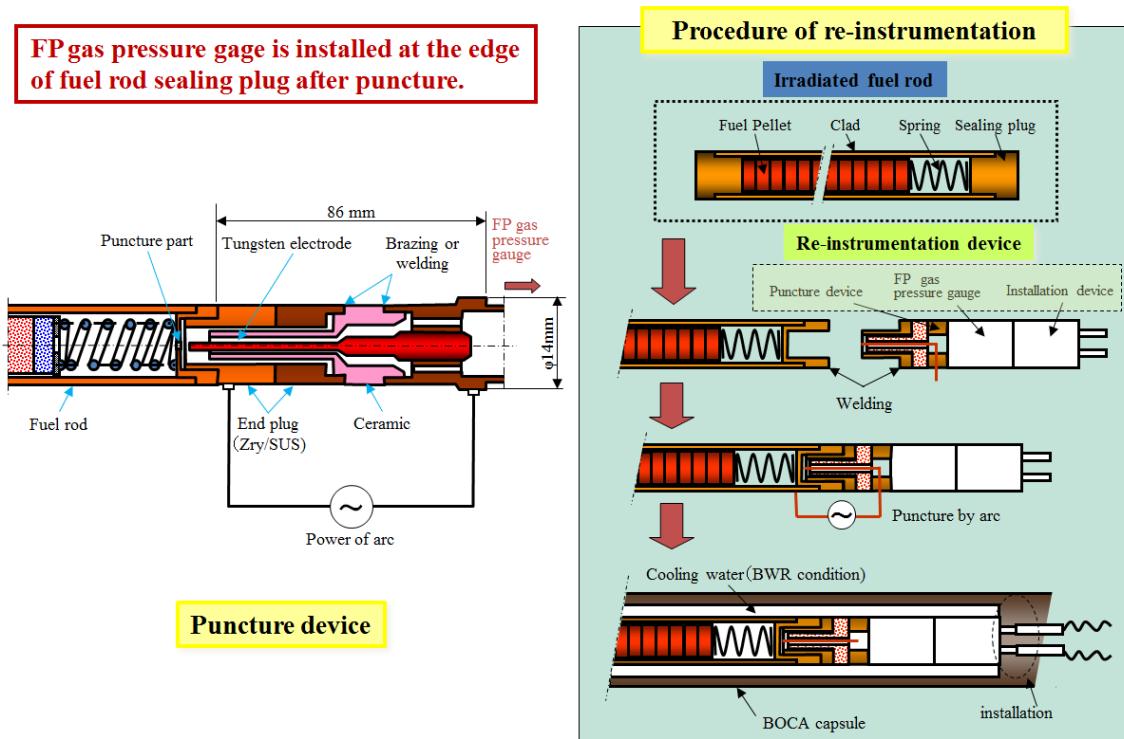


図 9 照射済燃料への熱電対及びFP ガス圧力計の再計装技術

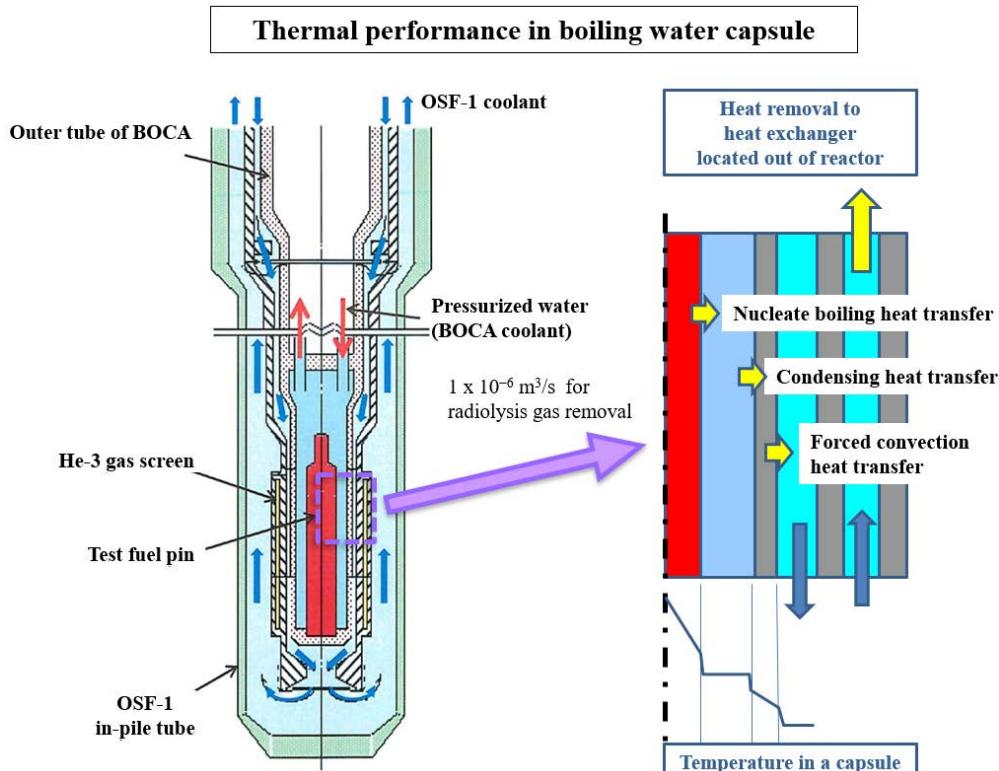


図 10 沸騰水キャプセルの熱移動

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
物質量	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
比體積	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
質量濃度 ^(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
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(b)	1 ^(b)
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	1/s
力	ニュートン	N	m kg s ⁻²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	m ² kg s ⁻²
仕事率、工率、放射束	ワット	W	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	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m ²
セルシウス温度	センチ	°C	kg s ⁻² A ⁻¹
光照度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	lm/m ²
吸収線量、比エネルギー分与、カーマ	グレイ	Gy	m ² s ⁻²
線量当量、周辺線量当量、方向線量当量、個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg
酸素活性	カタール	kat	m ² s ⁻²
			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じである。したがって、温度差や温度間隔を表す數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 ¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	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、比エンントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ³ s A
表面電荷密度	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	ファラード毎メートル	F/m	m ³ kg s ⁻⁴ A ²
透過率	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	グレイ毎秒	Gy/s	m ⁻² s ⁻³
放射強度	ワット毎メートル毎ステラジアン	W/sr	m ¹ kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	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	ゼット	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	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
ノット	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネバール	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
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
ダイーン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	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
フォート	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マックスウェル	Mx	1 Mx=1G 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≈(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「≈」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	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	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」カロリー), 4.1868J(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
ミクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

