JAEA-Review
2016-001
DOI:10.11484/jaea-review-2016-001

JAEA-Review

JMTR 及び関連施設を活用した実践型オンサイト研修（2015 年度）

On-site Training using JMTR and Related Facilities in FY 2015

江口 祥平　竹本 紀之　柴田 裕司　那珂 通裕
中村 仁一　谷本 政隆　伊藤 治彦

Shohei EGUCHI, Noriyuki TAKEMOTO, Hiroshi SHIBATA, Michihiro NAKA
Jinichi NAKAMURA, Masataka TANIMOTO and Haruhiko ITO

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

May 2016
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, 2016

JAEA-Review 2016-001

JMTR 及び関連施設を活用した実践型オンサイト研修
（2015 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、那珂 通裕、中村 仁一、谷本 政隆、伊藤 治彦*

（2016 年 1 月 12 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 JMTR の照射利用拡大を目的とし、海外の若手研究者・技術者を対象に、JMTR 等の研究基盤施設を活用した実践的な研修を平成 23 年度に開始した。一方、国内の若手研究者・技術者を対象とした同様の研修を平成 22 年度に開始した。平成 26 年度からは、これら国内及び海外の研修を統合して実施している。

平成 27 年度は 7 か国から 17 名が参加し、2 週間の研修を実施した。参加者は、原子力に関する講義や実習を通して、原子力研究の概要、原子力エネルギーの現状と開発、原子炉の安全管理、原子炉用燃料及び材料の中性子照射によるふるまい、照射と照射後試験施設及び技術、原子炉の核特性等について学んだ。また、研修の最後には各国のエネルギーミックスの現状と将来及び再生可能エネルギーを題材として、参加者間での討論を行った。本報告は、平成 27 年度に実施した研修の内容と結果についてまとめたものである。

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
＊ 2015 年 3 月にて退職

JAEA-Review 2016-001

On-site Training using JMTR and Related Facilities in FY 2015

Shohei EGUCHI, Noriyuki TAKEMOTO, Hiroshi SHIBATA, Michihiro NAKA,
Jinichi NAKAMURA, Masataka TANIMOTO and Haruhiko ITO*

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 January 12, 2016）

Since FY 2011, a practical training course using the JMTR and other research infrastructures has been provided by Neutron Irradiation Testing Reactor Center for foreign young researchers and engineers in Asian and other countries which are planning to introduce power reactors. The aim of this course is to contribute to the human resource development in nuclear research field and to increase the future use the JMTR. On the other hand, a training course for Japanese young researchers and engineers has been conducted since FY 2010. These two separate courses were integrated.

In FY 2015, this training course was conducted for 2 weeks and 17 young researchers and engineers from 7 countries were participated. They studied about the general outline of nuclear research, current status and R&D about nuclear energy, safety management of nuclear reactor, irradiation behavior of materials and fuels, facilities and technologies for irradiation and post irradiation, and nuclear characteristics of the reactor through lectures and practical trainings. At the end of the course, we had a discussion about the current status and future of energy mix and renewable energy of each country. The content of this training course in FY 2015 is reported in this paper.

Keywords : On-site Training, JMTR, Human Resource Development, Safety Management, Irradiation Behavior, Nuclear Characteristics

* Retired on March 2015

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 平成 27 年度までの研修の経緯 …… 3
3.2 カリキュラム …… 3
3.3 研修プログラム …… 4
4. 研修内容 …… 4
4.1 概要 …… 4
4.1.1 日本原子力研究開発機構のミッションと東海、大洗地区原子力研究基盤施設 4
4.1.2 研究用原子炉の利用 …… 4
4.2 原子力エネルギー …… 5
4.2.1 世界における発電用原子炉の状況と開発 …… 5
4.2.2 高速炉開発 …… 6
4.2.3 高温ガス炉開発と核熱利用研究 …… 6
4.3 照射試験研究 …… 7
4.3.1 原子炉用燃料及び材料の中性子照射挙動 …… 7
4.3.2 世界の研究炉 …… 7
4.3.3 JMTR の照射設備と照射試験技術 …… 8
4.3.4 照射後試験施設と照射後試験技術 …… 9
4.3.5 照射設備の熱設計実習 …… 10
4.4 原子炉の安全管理 …… 11
4.4.1 東京電力福島第一原子力発電所事故 …… 11
4.4.2 JMTR の安全管理 …… 12
4.4.3 放射性核種分析実習 …… 13
4.5 原子炉の核特性 …… 13
4.5.1 炉物理の基礎 …… 13
4.5.2 核計算実習 …… 13
4.6 照射試験炉シミュレータ運転実習 …… 14
4.7 施設見学 …… 15
5. 総合討論 …… 15
6. まとめ …… 17
謝辞 …… 17
参考文献 …… 17

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 ····· 3
3.1 The past background of training course using the JMTR ····· 3
3.2 Curriculum ····· 3
3.3 Training program ····· 4
4. Training course in FY 2015 ····· 4
4.1 Outline ····· 4
4.1.1 JAEA missions and nuclear research facilities in Tokai and Oarai area ····· 4
4.1.2 Utilization of research reactors ····· 4
4.2 Nuclear energy ····· 5
4.2.1 Status and development of power reactors in the world ····· 5
4.2.2 Development of fast reactor ····· 6
4.2.3 Development of high temperature gas cooled reactor and nuclear heat application 6
4.3 Irradiation test research ····· 7
4.3.1 Neutron irradiation behavior of materials and fuels ····· 7
4.3.2 Research reactors in the world ····· 7
4.3.3 Irradiation facilities and technologies of JMTR ····· 8
4.3.4 Post irradiation examination facilities and technologies ····· 9
4.3.5 Practice of thermal design of irradiation rigs ····· 10
4.4 Safety management of reactors ····· 11
4.4.1 Severe accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station ····· 11
4.4.2 Safety management of JMTR ····· 12
4.4.3 Practice of radionuclide analysis ····· 13
4.5 Nuclear characteristics of nuclear reactor ····· 13
4.5.1 Basic reactor physics ····· 13
4.5.2 Practice of neutronic calculation ····· 13
4.6 Practice of research reactor operation using simulator ····· 14
4.7 Technical tour to nuclear facilities ····· 15
5. Discussion ····· 15
6. Summary ····· 17
Acknowledgements ····· 17
References ····· 17

1. はじめに

東京電力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、世界では原子力発電の安全性とともに、再生可能エネルギーを含むエネルギーミックスに関する議論が活発化している。一方、アジアを中心とした開発途上国では、エネルギーの急激な需要増加が見込まれており、地球環境保全の観点から、化石エネルギーに代わる安定したエネルギー源として原子力を利用することが考えられているものの、それを支える技術や人材等が不足している。

日本原子力研究開発機構（Japan Atomic Energy Agency、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、アジアを中心とする開発途上国の若手研究者・技術者を対象とした研修を平成23年度から実施してきた。

本研修は、先端研究基盤施設である JMTR 及びその関連施設を中核とし、JAEA 大洗研究開発センターの原子力施設を活用した原子力基盤研究及び技術に関する実践的な体験型研修である。

平成 27 年度は、7 か国から 17 名の若手研究者・技術者を迎え、平成 27 年 7 月 21 日から 7 月 31 日まで実施した。

2. 大洗研究開発センターの照射試験研究基盤施設

図1に JAEA 大洗研究開発センターの全景を示す [1)]。大洗研究開発センターは、JMTR（Japan Materials Testing Reactor、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。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（以下「FBR」という。）開発に特化した照射後試験施設である FMF、MMF 及び AGF を有しており、日本における照射試験研究の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（以下「NFD」という。）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、これらの原子力施設のうち、主に JMTR、JMTR HL 及び照射試験炉シミュレータを活用した実践的な体験型研修として計画し、実施したものである。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」として建設された材料試験炉

であり、軽水炉の安全対策高度化、科学技術の向上、産業利用の拡大、原子力人材育成等の役割を有している。

JMTR は、昭和 43 年 3 月に初臨界に達した、我が国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トップクラスの中性子束を有している[2)]。JMTR の特徴は、図 3 に示すように原子炉と JMTR HL がカナルで接続されていることであり、これによって照射済燃料及び材料に再計装し、JMTR で再照射する試験等を容易にしている[1)]。

また、JAEA は、JMTR の使用目的に「教育訓練」を追加し（平成 23 年 1 月 31 日原子炉設置変更許可取得）、原子力人材の育成においても重要な施設と位置づけた。さらに、先端研究基盤施設として国内外の原子力人材育成に貢献することを目的に、文部科学省の平成 22 年度「最先端研究基盤事業」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、事故を模擬し、これらの運転操作訓練ができる照射試験炉シミュレータを整備した。

（2）「常陽」

「常陽」は FBR の実験炉であるが、FBR 開発のための照射試験にも供される。

「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高速炉であり、昭和 52 年 4 月の初臨界以来、30 年間にわたって、MK-Ⅰ炉心（50MWt 及び 75MWt）、MK-Ⅱ炉心（100MWt）へと推移し、その後、中性子束の増加のため、原子炉出力を 140MWt に増加した現在の MK-Ⅲ炉心での運転を行ってきた[1)]。この間、ナトリウム冷却高速炉の運転及び保守技術の確立、燃料及び材料の照射試験、新技術の実機プラントでの実証試験等を行っている。

図 4 に「常陽」の概要を示す[1)]。プラントは原子炉建物、原子炉附属建物、主冷却機建物で構成され、原子炉建物の原子炉格納容器の地下部分に原子炉容器が設置されている。炉心で発生する熱は、2 基の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に設置された 4 台の主空気冷却器によって大気に放散される。

（3） HTTR

HTTR は、平成 10 年 11 月に臨界に達した高温ガス炉（High Temperature Gas-cooled Reactor ; 以下「HTGR」という。）の研究開発のための試験炉であり、高温ガス炉の実証試験や原子炉の特性試験のほか、高温ガス炉用燃料及び材料の照射試験、高温の He ガス（出口温度 950℃）を活用した水素製造技術開発にも供される。この中でも、水素製造等の核熱利用研究は、特に重要なミッションになっている。図 5 に HTTR の概要を示す[1)]。

2.2 照射後試験施設

JMTR HL は、主に JMTR で照射された燃料及び材料の照射後試験を行うために建設されたホットラボである。図 3 に示したように、JMTR HL と JMTR はカナルで接続されており、照射済燃料及び材料の再計装、再照射試験等で大きな成果を挙げている。図 6 に JMTR HL のホットセルの配置を示す[3)]。

大洗研究開発センターは、JMTR HL のほかに 3 つの照射後試験施設（FMF、MMF 及び AGF）を有している。これらの施設は、いずれも FBR の開発に特化した照射後試験施設として、FMF

（照射燃料集合体試験施設）は FBR の実用燃料の確証試験、MMF（照射材料試験施設）は FBR 材料の照射後試験、AGF（照射燃料試験施設）は FBR 燃料ペレットを主体とした照射後試験にそれぞれ活用されている。

3. 研修概要

3.1 平成 27 年度までの研修の経緯

海外の若手研究者・技術者を対象とした研修は、原子力白書（平成 21 年度版、第 5 章）に示された「相手国の原子力に関する知的基盤の形成、経済社会基盤の向上等に寄与する」ということを目的に、平成 23 年度から開始し、平成 27 年度まで継続している。平成 23 年度は、2 か国（カザフスタン、タイ）から 10 名が参加し、10 日間の研修を行った。その後、平成 24 年度からは参加者数と研修期間を拡大してきたが、平成 27 年度は、研修期間を 3 週間から 2 週間に短縮した。また、本研修には、平成 27 年度までの 4 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 80 名が参加している。なお、参加者は 20 代から 30 代前半であり、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若手研究者・技術者である。表 1 に平成 27 年度の参加者を示す。

3.2 カリキュラム

表 2 に平成 27 年度の研修カリキュラムを示す。本カリキュラムの作成では、以下の点について留意した。

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、安全評価のベース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 照射試験については、JMTR 及び JMTR HL を対象として、照射試験装置及び照射後試験装置、並びにその基盤となる技術についての講義を計画した。また、本講義の理解を深めるため、中性子による材料照射損傷や燃料のふるまいに関する基礎講義を別途設けた。

③ 研究炉の安全運転と特性の理解を深めるため、JMTR の安全設計や運転管理に関する講義、核特性に関する講義、核計算実習及び照射試験炉シミュレータ運転実習等を計画した。特に、核計算実習及び照射試験炉シミュレータ運転実習には多くの時間を割いた。

④ 世界の原子力エネルギー利用の動向に関する理解のため、発電炉とそれを支える研究炉のこれまでの動向と今後の展開に関する講義、福島第一原発事故に関する講義及び当該事故前後の世界のエネルギーポリシーに関する講義を計画した。特に、エネルギーポリシーに関しては参加者間での議論の時間を設けた。

⑤ 発電炉の Generation Ⅳとして位置づけられている高速炉の開発と、参加者の出身国が興味を持っている高温ガス炉開発及び核熱利用研究についての講義及び関連施設の見学を計画した。

3.3 研修プログラム

表 3 に研修プログラムを示す。本研修プログラムは、概要説明と基礎的な講義を行った上で本論に入るように構成するとともに、適宜、見学や実習を入れた。なお、照射試験炉シミュレータ運転実習等については、2 班に分かれて行うこととした。

4. 研修内容

4.1 概要

4.1.1 日本原子力研究開発機構のミッションと東海、大洗地区原子力研究基盤施設

JAEA は、全国に 13 の研究開発拠点を有し、我が国唯一の総合的原子力研究開発機関として、原子力基盤研究や軽水炉の安全研究、加速器等を用いた量子科学研究から、新型炉開発や核融合開発、使用済燃料再処理技術開発、放射性廃棄物の処理・処分技術開発まで行っている。福島第一原発事故以降は、さらに、当該事故の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、高速炉開発、高レベル放射性廃棄物の処理・処分技術開発、核融合炉開発、量子科学、軽水炉安全研究及び福島第一原発事故に関する事故評価、デコミッショニング及び除染技術開発等の現状と将来計画について講義を行った。

照射試験研究において、主要な研究炉と大型のホットラボは欠かせない施設である。これらの施設は図 7 に示すように、京都大学の研究炉（KUR）を除いて、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、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の中核となっている。

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であり、日本における原子力基礎基盤研究の拠点となっている。東海村にある NDC のホットラボ及び大洗町にある NFD のホットラボは、それぞれ日本の原子炉メーカーの関連会社が管理し、PWR 及び BWR 発電炉の基盤を支えている。

4.1.2 研究用原子炉の利用

参加者は、研究炉を有している国から参加しており、原子炉用燃料及び材料の工学的照射試験のほか、研究炉を利用した RI 製造、放射化分析等の研究、中性子ビーム利用による基礎研究や医療照射については共通の課題となっていることから、ここでは、研究炉の利用について、以下の講義を行った。

① 放射線の概要と利用

② 研究炉を活用した RI の製造方法

③ RI の製造とその利用

日本の RI 製造と頒布体制、RI の医療利用（診断、治療）、工業利用（非破壊検査）及び農業利用（ジャガイモの芽止め、品種改良）の現状

④ 中性子ビームを活用した核科学研究とがん治療

⑤ そのほかの利用（シリコン半導体製造、放射化分析等）

4.2 原子力エネルギー

平成 23 年 3 月 11 日の福島第一原発事故以来、原子力発電からの撤退を明確にした国や開発の見直しを検討している国があるものの、地球温暖化ガスの低減は継続した課題である。また、開発途上国では、今後見込まれるエネルギー需要増大への対応のため、原子力が欠かせないエネルギー源であることは基本的に変わっていない。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関する講義を行った。

4.2.1 世界における発電用原子炉の状況と開発

（1） 世界の発電用原子炉の概要

原子力発電は、1951年に稼働した世界初の発電炉である EBR-1 から始まり、現在、世界では 438 基の原子力発電所が稼働している。そのうち約 63％（277 基）が PWR、約 19％（80 基）が BWR であり、PWR が主流となっている。その他は、重水炉（49 基）、軽水冷却黒鉛減速炉（15 基）、ガス冷却炉（15 基）及び高速炉（2 基）である [4)]。また、発電炉の建設は 1970 年代がピークであり、多くの原子炉の運転年数は 25 年から 40 年が経過しているため、高経年化が一つの課題となっている [4)]。日本は、表 4 に示すように BWR が 22 基、PWR が 21 基、合わせて 43 基の発電炉を有しているが [5)]、研修を行った平成 27 年 7 月の時点では、福島第一原発事故の影響で全ての原子炉が停止しており、福島第一原発事故後に策定された新たな規制基準に従って、数基が再稼働に向けて原子力規制委員会に審査の申請を行っている状況であった。

（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るが、フランスで約 77％を原子力が占めていることをはじめ、スロバキアが約 57％、ハンガリーが約 54％、ベルギーが約 48％を占めている等、ヨーロッパでは比較的原子力のエネルギーシェアが高い国が多くなっている [4)]。

また、日本については、平成 22 年には原子力のエネルギーシェアが約 29％を占めていたが、福島第一原発事故の影響によって全ての原子炉が停止していたため、平成 26 年は 0％となっている [4)]。

（3） Generation Ⅰ to Generation Ⅳ

発電炉は、安全性向上と経済性に力点をおいて開発が進められてきた。開発の歴史は、Generation Ⅰから Generation Ⅳに区分けされる。現在稼働しているのは Generation Ⅱ、Ⅲ及びⅢ+であり、現在開発中の高温ガス炉及び高速炉は、Generation Ⅳに位置づけられている [6)]。本講義では、各世代の発電炉について概要を説明した。なお、高速炉及び高温ガス炉については、JAEA で開発していることから、それぞれ個別に講義を行った。

4.2.2 高速炉開発

エネルギー資源に乏しい我が国は、資源の有効利用、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。高速炉は、発電しながら消費した以上に燃料を生産することにより、ウラン資源の利用効率を飛躍的に高めることや、高レベル放射性廃棄物の量を低減できる可能性を有している。そのため、JAEA では、高速実験炉「常陽」、高速増殖原型炉「もんじゅ」をはじめとする様々な研究施設を活用し、高速炉サイクルの研究開発に取り組んでいる。図 8 に、我が国における高速炉開発の進め方を示す[7)]。ここでは、大洗研究開発センターを中心に進めている高速炉の研究開発について、以下の講義を行った。

① JAEA における FBR 開発体系
② 燃料サイクルを含む FBR の有効性
③ 原子炉及びプラントシステムの概要
④ FBR 開発の進め方
⑤ FBR の要素技術開発

4.2.3 高温ガス炉開発と核熱利用研究

(1) 高温ガス炉開発

HTGR は、耐熱性の高いセラミックス被覆燃料や化学的に不活性なヘリウム冷却材、大熱容量及び高熱伝導性をもつ黒鉛減速材を用いた原子炉であり、原子炉出口において 1000℃近い高温の熱を供給することが可能である。また、出力密度を低く抑えた設計により、万一の事故に際しても炉心温度の変化が緩やかで、燃料の健全性が損なわれる温度には至らないという安全性に優れた原子炉であることから、国際的な関心を集めている。JAEA では、大洗研究開発センターに HTTR を建設し、民間企業と協力して HTGR 及びその熱利用技術の研究開発を進めている。

本講義では、下記に示すように、HTGR 開発の歴史と現状、HTGR 設計コンセプト及び HTTR による実証試験等について、以下の講義を行った。

① HTGR 開発の歴史と現状
② HTTR における試験計画
③ HTGR の核熱設計及び安全設計と評価
④ HTGR 燃料と構造材料

(2) 核熱利用研究

水素には、燃料、化学プロセス原料、発電等の多様な利用方法が存在し、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、二酸化炭素の排出削減ができると期待されている。水素の製造方法については、水蒸気改質法が既に実用化されているが、この方法では製造過程で炭酸ガスが放出されることから、水電解法や熱化学法等の水を原料とした製造法が望ましい。JAEA では、図 9 に示す熱化学法 IS プロセスの開発を進めている[8)]。熱化学法 IS プロセスは、900℃の熱を利用した化学反応の組み合わせにより、水を水素と酸素に分離するもので、この過程で炭酸ガスが放出されない点で優れた方法である。さらに、熱化学法 IS プロセス

で利用する熱は炭酸ガスを放出しない原子炉（HTGR）から供給するため、原子炉から水素の製造までのプロセスを炭酸ガスフリーで進行させることができる。

4.3 照射試験研究

4.3.1 原子炉用燃料及び材料の中性子照射挙動

照射試験研究は、発電炉の高度化及び安全性確証を主な目的として、中性子照射による燃料及び材料の挙動を研究するものであり、照射試験研究のための装置の設計及び技術開発はそのためにも重要である。本講義は、JMTR における照射設備と照射試験技術及び照射後試験装置と照射後試験技術についての講義の前段として行った。

ここでは、不純物生成、原子の弾き出し、イオン化等の中性子と材料の反応に関する基礎過程、中性子照射による材料の機械特性変化等、材料の照射損傷現象に関する一般論に加え、原子炉のプロジェクト研究として、軽水炉の高経年化、軽水炉用燃料の高燃焼度化及び加圧熱衝撃に関する安全性研究について、講義を行った。

また、軽水炉の高経年化に伴う大きな課題は原子炉構造材の照射誘起応力腐食割れ（以下「IASCC」という。）であり、軽水炉用燃料の高燃焼度化の大きな課題は被覆管の腐食量の増加、ペレットからの核分裂生成物（以下「FP」という。）ガスの放出及び燃料のペレット・被覆管機械的相互作用（以下「PCMI」という。）破損であるが、いずれも中性子照射とそのほかの環境の相乗効果によるものである。ここでは、そのメカニズムについても説明した。図 10 と図 11 に原子炉構造材料における IASCC 現象のメカニズムと燃料被覆管における PCMI 破損メカニズムを含む照射下の燃料棒のふるまいを示す [9)]。

4.3.2 世界の研究炉

世界の研究炉については、参加者の多くが小型の研究炉を有している国からの参加であることから、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、大型の研究炉の新設を考慮している国もあることから、燃料の工学的照射試験ができる大型の研究炉に焦点を絞った内容にした。主な講義内容を以下に示す。

（1） 研究炉

研究炉は、原子炉で発生する中性子により、原子炉用燃料及び材料の中性子損傷等の研究を行うことを主な目的としており、スイミングプール型のものを除いて炉心の上部にできるだけ構造物を置かず、試料の挿入及び取り出しが行いやすい設計を基本としている。

（2） 世界の研究炉の現状

世界の研究炉の現状として、数の推移、高経年化、主要な研究炉の中性子束等について、講義を行った。

世界では、これまで 750 基の研究炉が建設されてきたが、現在運転中のものは 247 基である。研究炉の建設は 1960 年代がピークで、その後は建設した原子炉より停止した原子炉の方が多くなっている [10)]。研究炉の場合、利用研究の進展に対応できなくなって停止するケースが多いが、

大型の材料試験炉の場合は、運転開始から 40 年を超えているものが多く、高経年化の問題が顕著になりつつある[11)]。

(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、講義を行った。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いる。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に研究炉を新設する計画がある。これらの中には、新たな研究の創生を期待できるようなユニークな設計のものもある。ここでは、これらの研究炉について紹介した。表 5 に建設中及び計画中の研究炉の出力と型式を示す[2)]。

4.3.3 JMTR の照射設備と照射試験技術

JMTR は、今後の研究ニーズへの対応や施設の高経年化対策のため、平成 19 年から施設の更新と新たな照射設備の設置を進めている。ここでは、JMTR を用いた研究とそのために必要な技術について、以下の講義を行った。

(1) 再稼働後の利用計画と新たな照射設備

再稼働後の JMTR は、キャプセル及び水力ラビット照射装置による基礎基盤研究のための照射を継続するとともに、軽水炉の高経年化対策及び燃料の高燃焼度化を主要テーマとして、新たな照射設備を設置する。また、医療用モリブデンの国産化とシリコンドーピングによる半導体の製造にも着手する。図 12 に再稼働後の主要な照射設備を示す。

(2) 原子炉とホットラボの連携

図 3 に示したように、JMTR の照射場（原子炉）と JMTR HL は水深 6m のカナルで直結している。これによって、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、JMTR で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。

(3) 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され、主に燃料の実証試験に供されるループ照射装置、任意に照射時間を定められ、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、一般的な照射設備の概要を説明した。そのほか、HTGR 用燃料からの FP 放出特性を研究するためのガススィープキャプセル、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化学制御照射装置等の JMTR の照射設備についても概要を説明した。

(4) 環境制御と計装

照射損傷は中性子照射量のほか、温度、荷重、水質等にも影響されるため、照射中のこれらの環境制御と計測が重要である。ここでは、これらの環境制御技術について講義を行った。特に温度については、原子炉出力が定格になるまでの低温時の照射の履歴が問題となることから、原子炉起動前から定格出力に達するまでの間、温度を一定に制御する技術について説明した。そのほか、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 13 に JMTR の照射技術について示す[12)]。

(5) 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燃料及び材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を紹介した。図 14 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[13)]。

4.3.4 照射後試験施設と照射後試験技術

JMTR HL は、JMTR で照射された試験片の照射後試験を行うことを目的に建設されたものである。ここでは、JMTR HL 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) 施設及び設備の概要

図 6 に示したように、JMTR HL は、コンクリートセル、鉄セル、鉛セルで構成されており、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、照射後試験は主に鉄セルや鉛セルで行われる。なお、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、キャプセルに組み込む作業も行われる。

(2) 照射後試験

JMTR HL では、材料の引張試験、硬さ試験、破壊靭性試験、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、ほかのホットラボでも行われる標準的な照射後試験は一通り行われる。

(3) 照射後試験技術開発

比較的最近に開発された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 で再照射するために、キャプセルに装荷する技術
② 照射後試験 ;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の、荷重、温度、腐食環境を制御する照射後試験
③ テクネチウム抽出技術 ;照射されたモリブデンから、がん診断用テクネチウム 99m 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 15 に示すように、円筒形の容器等に照射試料、試料ホルダ及びスペーサ等が装荷され、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、キャプセル等内部にはヘリウムガスが挿入される。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、4.3.1 項の「原子炉用燃料及び材料の中性子照射挙動」で述べたように、温度による影響が大きい。そのため、目的に合った温度で照射するための熱設計が、極めて重要である。

ここでは、キャプセル等の熱設計上の特徴に関する講義と熱設計の実習を行った。

(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 16 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 17 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、対流による熱伝導はほとんどない。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いる。したがって、キャプセルのように長尺のものは、発熱密度が小さくなる軸方向の上下への熱流動が問題となる。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、断熱材を配置する。

(2) 熱設計実習

熱設計実習には、(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 GENGTC[14] を用いた。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、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の実習を行った。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 原子炉の安全管理

4.4.1 東京電力福島第一原子力発電所事故

福島第一原発事故は、世界の原子力エネルギー政策にも影響を及ぼす、極めて大きな事故であった。そのため、この事故を正しく理解することは重要であり、学ぶべきことも非常に多い。このような観点から、以下に示す内容について講義を行った。なお、本講義は、カリキュラムの「世界における発電用原子炉の状況と開発」の中で行った。

(1) 世界における発電炉の過酷事故

炉心溶融を発生させた発電炉の事故として、昭和 54 年の米国における TMI 事故、昭和 61 年の当時のソビエト連邦におけるチェルノブイリ事故及び平成 23 年の日本における福島第一原発事故について講義を行った。また、福島第一原発事故については、復旧計画と現状を併せて説明した。

(2) 福島第一原発事故の概要及び復旧計画

① プラントの概要

② 事故の概要

1 号機～3 号機の津波による衝撃後の炉心損傷、水素爆発までの経緯、格納容器からの放射性物質放出経路の推測、水素爆発の原因の推測等

③ 事故による放射性物質放出と福島、宮城、岩手から関東に至るまでの汚染状況

④ 廃止措置までの道のり

30～40 年後をターゲットとした廃止措置中長期計画と現状、JAEA における解体技術開発（遠隔操作技術、燃料デブリによる未臨界コントロール、事故解析、デブリ再処理技術、遠隔除染技術）

⑤ 汚染モニタリングと除染

汚染モニタリング結果、当面の除染目標（20mSv/h 以下、20～50mSv/h、50mSv/h 以上）と除染ロードマップ等

(3) 世界の原子力エネルギー計画に与えた影響

福島第一原発事故の被害規模は、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大きな影響を与えた。特に、日本はその政策に大きな転換を余儀なくされた。一方、開発途上国等では今後見込まれているエネルギー需要の増大への対策が課題となっている。ここでは、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、講義を行った。

福島第一原発事故後には、世界の 49 か国と EU が今後のエネルギー戦略を公開した。表 6 に原子炉の運転継続、建設の続行及び新たな建設計画に関する各国の当時の動向を示す [15)]。現在、当該事故の影響から、原子力エネルギーのシェアの引き下げや、原子力からの撤退を表明している国も少なくない。

エネルギーシェアの約 77%を原子力が占めているフランスは、当該事故直後は原子力政策を維持する姿勢を崩さなかったものの、原子力エネルギーのシェアを最終的に 50%まで引き下げる法案を掲げており、当時、原子力政策を維持すると表明していた米国も、原子力の重要性は認識しつつも、経済性の観点から原子力発電所の閉鎖を進めている [16)]。原子力からの撤退を表明している国としては、ドイツが 2022 年までに既存の原子炉を段階的に閉鎖しながら再生可能エネルギーとエネルギー効率の改善によって代替していく計画としており [16)]、スイスも原子炉の新設はせず、運転期間については審議中であるものの、2034 年までには既存の原子炉を段階的に閉鎖していくという戦略を発表している [17)]。

4.4.2 JMTR の安全管理

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、制御棒異常引抜き等の核的異常事象や冷却材喪失等の熱的異常事象を含む JMTR の安全評価について、講義を行った。

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る。したがって、炉心サイクル毎に原子炉の安全性を確認する必要がある。また、研究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。ここでは、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、以下の講義を行った。

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　；確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、制御棒反応度や炉心の過剰反応度等の安全上必要な特性の計算及び測定を行う。

③ 運転前安全チェック；原子炉一次冷却系コールドラン、原子炉圧力容器外観検査及び制御棒駆動試験を行う。

④ 運転の実施　；運転計画に定めた手順に沿った制御棒引抜きによる出力上昇と停止を行う。

4.4.3 放射性核種分析実習

JMTR では、原子炉施設の安全管理として、原子炉一次冷却水、原子炉プール及びカナル水をサンプリングして放射性核種分析を行い、異常のないことを確認している。ここでは、カナル水の核種分析に係る実習を行った。

4.5 原子炉の核特性

4.5.1 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と荷電粒子放出、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と中性子放出及び中性子の減速という核分裂連鎖反応に関する講義を行った。さらに、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。

また、これらに加えて原子炉の核制御やエネルギー取り出しに欠かせない原子炉の基本構成（燃料、減速材、反射材、制御棒、冷却材）についても講義を行った。

4.5.2 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を行う三次元モンテカルロ計算コード MCNP[18] の適用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、原子炉の臨界計算及び中性子束計算（中性子スペクトル）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に、以下に示す幾何学形状についての計算実習を行った。

① 形状

球形

三辺の寸法をパラメータにした矩形

径寸法と軸方向寸法をパラメータにした円筒形

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

照射試験において、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り局部的に変化することから、その影響を把握するために次に示す中性子束を求める計算を行った。

① 水力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 ラビット内の試料以外の構造材の材質を変えた計算

④ 水力ラビット照射装置の炉心内位置を変えた計算

4.6 照射試験炉シミュレータ運転実習

JAEA で開発した照射試験炉シミュレータを用いて運転実習を行った。本実習は、研究炉の特性を理解するために行うものである。

JMTR は、図 12 に示したように、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は反射体要素内に挿入される。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る。また、実験の目的によっては水雰囲気で照射されるものもあり、キャプセル内の蒸気含有率が変化することが想定され、炉心の核特性に与える影響は小さくない。そのため、照射試験炉シミュレータは、原子炉の運転や照射試験、事故等を模擬することにより、これらの核的、熱的挙動を評価できるようになっている。

本実習では、以下のシミュレーションを行った。

(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

原子炉定常運転状態で水力ラビットを 3 体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

原子炉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・事故事象を模擬発生させ、制御棒の位置、中性子実効増倍率、冷却材温度、冷却材、流量、燃料温度データ等の経時変化から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。

4.7 施設見学

原子炉の研究及び開発、安全管理等の現場を体感することを目的として施設見学を行った。見学した施設は、JAEA の施設のうち、研究炉、研究施設、放射線管理施設及び安全研究・防災支援施設である。また、民間の発電炉も見学した。表 7 に見学した施設の一覧を示す。

5. 総合討論

本研修には、カザフスタン、タイ、マレーシア、インドネシア、ポーランド、ベトナム及び日本から、それぞれ 1～4 名が参加した。これらのうち、日本を除く国々は、いずれも化石燃料の産出が多く、石油、石炭、天然ガスが主要なエネルギー源となっている開発途上国であり、経済の発展に伴う今後のエネルギー需要の大幅な増大が想定されている。また、地球環境問題や将来のエネルギー需要の増大に応える新エネルギーの開発も必要とされている。再生可能エネルギーもその一つであるが、基幹エネルギーとしての脆弱性から、原子力に基幹エネルギーとしての期待が寄せられている。しかし、平成 23 年の福島第一原発事故の影響により、エネルギー政策に若干の変更を余儀なくされている。

以上のことから、各国のエネルギー政策の現状と原子力を含む将来計画についての討論を行った。なお、討論に先立って、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ポリシー、再生可能エネルギー及び固定買い取り制度に関するキーノートスピーチを行った。ここで、図 18 にドイツの固定買い取り制度に関する電力料金への影響を示す [19)]。

(1) キーノートスピーチの内容

① インドネシア、タイ、ベトナム、ポーランド、日本の公表されているエネルギー政策

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と日本とドイツの再生エネルギーへの取り組み及び再生可能エネルギー開発のための固定買い取り制度の実態と課題

(2) 参加者の報告及び討論

以下に各国の参加者の報告内容を示す。表 8 に報告及び討論のアジェンダを示す。

① マレーシア

マレーシアは天然ガスと石炭が豊富で、エネルギー源はこの 2 つが主体（天然ガスと石炭のエネルギーシェアが 95%）であるが、エネルギーのリスク低減を目的に、水力エネルギーのシェア増加と新エネルギーの開発を検討している。原子力については、開発の対象になっているものの、2035 年までの具体的な開発目標は設定されていない。

② タイ

タイは天然ガスがエネルギーの主体であり、水力やバイオマス等の再生可能エネルギーの開発も行っている。再生可能エネルギーとしては、太陽光、風力、水力、廃棄物、バイオマス等の多様なエネルギー源が検討されている。また、環境負荷を低減する石炭エネルギーを重要視している。なお、将来のエネルギー需要の増大を考慮し、原子力発電プラントの検討を

行っている。しかし、福島第一原発事故の教訓から、安全評価の実施、規制基準の整備、パブリックアクセプタンス等が課題となっており、具体化は遅れている。

③ ベトナム

ベトナムのエネルギーシェアの現状は、天然ガスと石炭がそれぞれ 35%と 21%であり、それに水力の 38%を加えると 94%になる。このように、他の国に比べて水力エネルギーの割合が高いのが特徴的である。また、今後エネルギー需要の急激な伸びが想定されており、その対応として、原子力エネルギーの導入が、立地の選定まで具体的に検討されている。

④ ポーランド

ポーランドでは、石炭がエネルギーシェアの 80%を超える基幹エネルギーとなっているが、石炭への依存から脱するため、天然ガス、原子力及び再生可能エネルギーを含めたエネルギーミックスを目指している。なお、原子力については、エネルギーシェアを 2030 年には 16%、2050 年には 23%まで増やし、基幹エネルギーにすることを目指している。

⑤ インドネシア

インドネシアは石油、石炭及びガスが主体であるが、人口の増加と工業の成長が見込まれていることから、石油、石炭、ガス及び再生可能エネルギーによるバランスのとれたエネルギーミックスを目指している。なお、原子力については肯定的であり、福島第一原発事故後は、特に HTGR に注目している。

⑥ カザフスタン

カザフスタンは、エネルギーシェアの 87%を石油、石炭及び天然ガス等の化石燃料が占めており、次いで水力が 12%となっている。原子力については、ウラニウム資源が 1,750,000 トンと豊富で、世界のウラン供給の 37%を賄っており、ウランの転換、濃縮、燃料棒製造施設等の開発に積極的である。なお、将来的には、原子力エネルギーによってエネルギー需要の増大に対応することが計画されている。また、軽水炉のほかには、高温ガス炉の開発も進めている。

⑦ 日本

日本はほとんどのエネルギー源を海外に依存している現状から、原子力エネルギーへの依存度が高かったが、福島第一原発事故の経験から、再生可能エネルギーの開発を推進し、原子力エネルギーへの依存度を下げる政策が出されている。

参加者の報告では、再生可能エネルギーの開発のキーポイントとして、スマートグリッドや固定買い取り制度、省エネルギーに関する国の施策についても説明していた。

総合討論における参加者からの報告は、それぞれの国の施策を肯定するものであった。各参加者の出身国における原子力エネルギーへの取り組みについては、計画に沿って着実に進展している国と将来の選択肢の 1 つに留めている国があったものの、参加者からの意見としては、原子力エネルギーの必要性を主張するものが大半を占めた。

今回は、各国の施策に基づく報告が主であったため、今後は参加者個々のそれぞれの主張を強く出せるよう、進行の方法等について工夫が必要と思われる。

6. まとめ

本研修の参加者のほとんどは開発途上国の若手研究者・技術者であり、今後のエネルギー需要の増大への対策としても原子力エネルギーの必要性が高いという意識が強く、研修にも積極的な姿勢で取り組んでいた。また、本研修を通して、原子力施設の安全管理及び照射試験炉の運転、原子炉内での中性子の挙動、照射試験研究に必要な照射技術と照射後試験技術等についての理解が十分に深まったことが確認できた。

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、本研修に対して肯定的な意見が大半を占めていた。一方、基礎的な内容についての解説や簡単な例題を増やして欲しいとの意見もあり、原子力の多様な分野の研究者・技術者が参加していることを考慮し、各講義の内容や講義時間について再考する必要がある。

また、研修最終日に行った総合討論においては、福島第一原発事故を経ても、エネルギー安定供給の観点から原子力は必要であり、そのための原子力人材の育成が急務である等の意見が各参加者から挙げられた。

以上を踏まえ、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、引き続き、研修プログラムや各講義の内容を改善して本研修を実施する計画である。

謝辞

本報告書の作成に際し、伊与久達夫高温工学試験研究炉部上席嘱託より、内容について貴重なご意見をいただきました。また、本研修の計画及び実施にあたり、武田誠一郎大洗研究開発センター所長、荒木政則大洗研究開発センター副所長及び砂押有一計画推進課長にご尽力いただきましたことを深く感謝いたします。

参考文献

1） 日本原子力研究開発機構, 大洗研究開発センターHP,
http://www.jaea.go.jp/04/o-arai/index.html (参照：2015 年 10 月 13 日).

2） IAEA, “Research Reactor Data Base”, Research Reactors,
http://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx (参照：2015 年 10 月 13 日).

3） 日本原子力研究開発機構, JMTR パンフレット, “New JMTR”, (2011).

4） IAEA, “Nuclear Power Reactors in the World 2015 Edition”, Reference Data Series No.2,
http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/10903/Nuclear-Power-Reactors-in-the-World,
(参照：2015 年 10 月 13 日).

5） World Nuclear Association, “Information Library”,
http://www.world-nuclear.org/information-library/ (参照：2015 年 10 月 13 日).

6） William D. Magwood, “Generation Ⅳ Reactor : Looking Back”,Ⅳ Commissioner, November 13, 2012, (2012).

7） Ohira, H., Uto, N., “Progress on Fast Reactor Development in Japan”, “Meeting of the Technical Working Group on Fast Reactors (TWG-FR) (45th Annual Meeting), June 20-22, 2012, (2012).

8） Shiozawa, S., “Overview of HTTR Project”, Proceedings of 1st JAEA/KAERI Information Exchange Meeting on HTGR and Nuclear Hydrogen Technology, JAEA-Conf 2007-005, (2007), pp.5-20.

9） Kaji, Y., “Materials Engineering for Light Water Reactors”, International Training Program on Reactor Engendering, August 22, (2011).

10） IAEA, “Directory of Nuclear Research Reactors”, (1998).

11） IAEA, “Research Reactor Aging Data Base”, (2009).

12） Ishihara, M. et al, “Refurbishment State and Future Program of Japan Materials Testing Reactor”, 12th International Group on Research, October 2009, (2009).

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, 平成 19 年 3 月 8 日, (2007).

14） 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.

15） 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:2015 年 10 月 13 日).

16） 経済産業省資源エネルギー庁, "「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」（エネルギー白書 2015）", http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/ (参照:2015 年 10 月 13 日).

17） 一般社団法人日本原子力産業協会, 原子力産業新聞, “スイス:議会上院が既存原子炉の運転期間に政治的制限を設けないと決定”, http://www.jaif.or.jp/150930-a/ (参照:2015 年 10 月 13 日).

18） J.F.BRIESMEISTER, (Ed.), MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Cord, Version 4B, LA-12625-M, (1997).

19） Ito, Y., “The FIT System in Europe and Information about the Cost for Companies and Measures to Reduce the Cost”, November 29, 2011, (2011).

表 1 平成 27 年度の研修参加者

国名	所属	専門	性別	年齢
カザフスタン	アルファラビカザフスタン国立大学	宇宙線	男	27
	アルファラビカザフスタン国立大学	原子炉構造材料	男	20
	アルファラビカザフスタン国立大学	原子炉構造材料	男	21
	アルファラビカザフスタン国立大学	原子核物理	男	19
タイ	チュラーロンコーン大学	原子力工学	男	24
	カセサート大学	RI・放射線利用	女	24
マレーシア	マレーシア原子力庁	原子炉開発	男	25
	マレーシア原子力庁	保険物理	男	31
	マレーシア原子力庁	プラント安全評価	女	25
	チュラーロンコーン大学	原子力工学	女	24
インドネシア	インドネシア原子力庁	RI・放射線利用	女	28
ポーランド	ポーランド国立原子力研究センター	研究炉管理	男	26
	ポーランド国立原子力研究センター	研究炉管理	男	27
	ポーランド国立原子力研究センター	原子炉開発	女	28
ベトナム	ベトナム原子力研究所	原子核物理	男	24
日本	室蘭工業大学	機械航空創造	男	21
	室蘭工業大学	機械航空創造	男	23
合計		17名		

表 2 平成 27 年度研修カリキュラム

概要	日本原子力研究開発機構のミッションと東海、大洗地区原子力研究基盤施設
	研究用原子炉の利用
	施設見学
	日本原子力発電(株)東海第二発電所、原子力緊急時支援・研修センター、大洗研究開発センター
原子力エネルギー	世界における発電用原子炉の状況と開発
	高速炉開発
	高温ガス炉開発と核熱利用研究
	施設見学
	「常陽」、HTTR、水素製造試験施設
照射試験研究	原子炉用燃料及び材料の中性子照射挙動
	世界の研究炉
	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
原子炉の安全管理	東京電力福島第一原子力発電所事故
	JMTRの安全管理
	実習
	放射性核種分析実習
	施設見学
	環境監視施設・放射線管理施設
原子炉の核特性	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	各国のエネルギーポリシー

表 3 平成 27 年度研修プログラム

月日		午前			午後		
7月21日	火	オリエンテーション		JAEA、大洗研究開発センターの概要	大洗町表敬訪問	研究用原子炉の利用	世界の研究炉
7月22日	水	世界における発電用原子炉の状況と開発		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
7月23日	木	JMTRの照射設備と照射試験技術		キーノートスピーチ（総合討論）	JMTRの安全管理	大洗研究開発センターの見学	
7月24日	金	環境監視施設・放射線管理施設の見学			照射後試験施設と照射後試験技術		高速炉開発
7月27日	月	高温ガス炉開発と核熱利用研究			HTTR、水素製造試験施設の見学	炉物理の基礎	
7月28日	火	「常陽」の見学		核計算実習			
7月29日	水	A班	照射試験炉シミュレータ運転実習				
		B班	放射性核種分析実習	総合討論の準備		照射設備の熱設計実習	
7月30日	木	B班	放射性核種分析実習	総合討論の準備		照射設備の熱設計実習	
		A班	照射試験炉シミュレータ運転実習				
7月31日	金	日本原子力発電(株)東海第二発電所、原子力緊急時支援・研修センターの見学			総合討論		修了式

表 4 日本の発電炉型式 [5)]

in operation							
BWR				PWR			
No.	Facility	Power (MW)	Utility	No.	Facility	Power (MW)	Utility
1	Fukushima-Daini-1	1067	Tokyo Electric Power Co.,Inc.	1	Genkai-2	529	Kyushu Electric Power Co.,Inc.
2	Fukushima-Daini-2	1067	Tokyo Electric Power Co.,Inc.	2	Genkai-3	1127	Kyushu Electric Power Co.,Inc.
3	Fukushima-Daini-3	1067	Tokyo Electric Power Co.,Inc.	3	Genkai-4	1127	Kyushu Electric Power Co.,Inc.
4	Fukushima-Daini-4	1067	Tokyo Electric Power Co.,Inc.	4	Ikata-1	538	Shikoku Electric Power Co.,Inc
5	Hamaoka-3	1056	Chubu Electric Power Co.,Inc	5	Ikata-2	538	Shikoku Electric Power Co.,Inc
6	Hamaoka-4	1092	Chubu Electric Power Co.,Inc	6	Ikata-3	846	Shikoku Electric Power Co.,Inc
7	Hamaoka-5	1325	Chubu Electric Power Co.,Inc	7	Mihama-3	780	Kansai Electric Power Co.
8	Higashi-Dori-1 (Tohoku)	1067	Tohoku Electric Power Co.,Inc	8	Ohi-1	1120	Kansai Electric Power Co.
9	Kashiwazaki Kariwa-1	1067	Tokyo Electric Power Co.,Inc.	9	Ohi-2	1120	Kansai Electric Power Co.
10	Kashiwazaki Kariwa-2	1067	Tokyo Electric Power Co.,Inc.	10	Ohi-3	1127	Kansai Electric Power Co.
11	Kashiwazaki Kariwa-3	1067	Tokyo Electric Power Co.,Inc.	11	Ohi-4	1127	Kansai Electric Power Co.
12	Kashiwazaki Kariwa-4	1067	Tokyo Electric Power Co.,Inc.	12	Sendai-1	846	Kyushu Electric Power Co.,Inc.
13	Kashiwazaki Kariwa-5	1067	Tokyo Electric Power Co.,Inc.	13	Sendai-2	846	Kyushu Electric Power Co.,Inc.
14	Kashiwazaki Kariwa-6	1315	Tokyo Electric Power Co.,Inc.	14	Takahama-1	780	Kansai Electric Power Co.
15	Kashiwazaki Kariwa-7	1315	Tokyo Electric Power Co.,Inc.	15	Takahama-2	780	Kansai Electric Power Co.
16	Onagawa-1	498	Tohoku Electric Power Co.,Inc	16	Takahama-3	830	Kansai Electric Power Co.
17	Onagawa-2	796	Tohoku Electric Power Co.,Inc	17	Takahama-4	830	Kansai Electric Power Co.
18	Onagawa-3	796	Tohoku Electric Power Co.,Inc	18	Tomari-1	550	Hokkaido Electric Power Co.,Inc.
19	Shika-1	505	Hokuriku Electric Power Co.	19	Tomari-2	550	Hokkaido Electric Power Co.,Inc.
20	Shika-2	1108	Hokuriku Electric Power Co.	20	Tomari-3	866	Hokkaido Electric Power Co.,Inc.
21	Shimane-2	789	The Chugoku Electric Power Co.,Inc.	21	Tsuruga-2	1108	Japan Atomic Power Co.
22	Tokai-2	1060	Japan Atomic Power Co.				

under construction			
BWR			
No.	Facility	Power (MW)	Utility
1	Ohma	1325	Electric Power Development Co.,Ltd.
2	Shimane-3	1325	The Chugoku Electric Power Co.,Inc.

表 5 新たな研究炉 [2)]

Nation	Name	Power (MW)	Type
Under construction			
Argentina	CAREM 25	100	PWR
France	JHR	100	Tank in Pool
	RES	100	PWR
Russia	PIK	100	Tank
Planned			
Argentina	RA-10	30	Pool
Belgium	MYRRHA	85	Fast
Brazil	RMB	30	Pool
Russia	MBIR	150	Fast
Ukraine	Multipurpose RR	20	Pool
USA	HT3R	25	He Cooled
Vietnam	Multipurpose RR	15	Pool

表 6 福島第一原発事故後の世界の原子力政策 [15)]

2012 年 12 月

Continues 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
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
Continues with "***plans and /or proposals to construct***" new nuclear installations	Plans/proposals for new constructions ***not being contested***	All 31conutries except Germany, Switzerland, Italy
	Plans/proposals for new constructions ***prohibited***	Germany, Switzerland, Italy

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

表 7 施設見学一覧

研究炉	「常陽」
	HTTR
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・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
安全研究・防災支援施設	原子力緊急時支援・研修センター

表 8 総合討論アジェンダ

時間	報告者
13:00 ～ 13:20	マレーシア
13:20 ～ 13:40	タイ
13:40 ～ 14:00	ベトナム
14:00 ～ 14:20	ポーランド
14:30 ～ 14:50	インドネシア
14:50 ～ 15:10	カザフスタン
15:10 ～ 15:30	日本

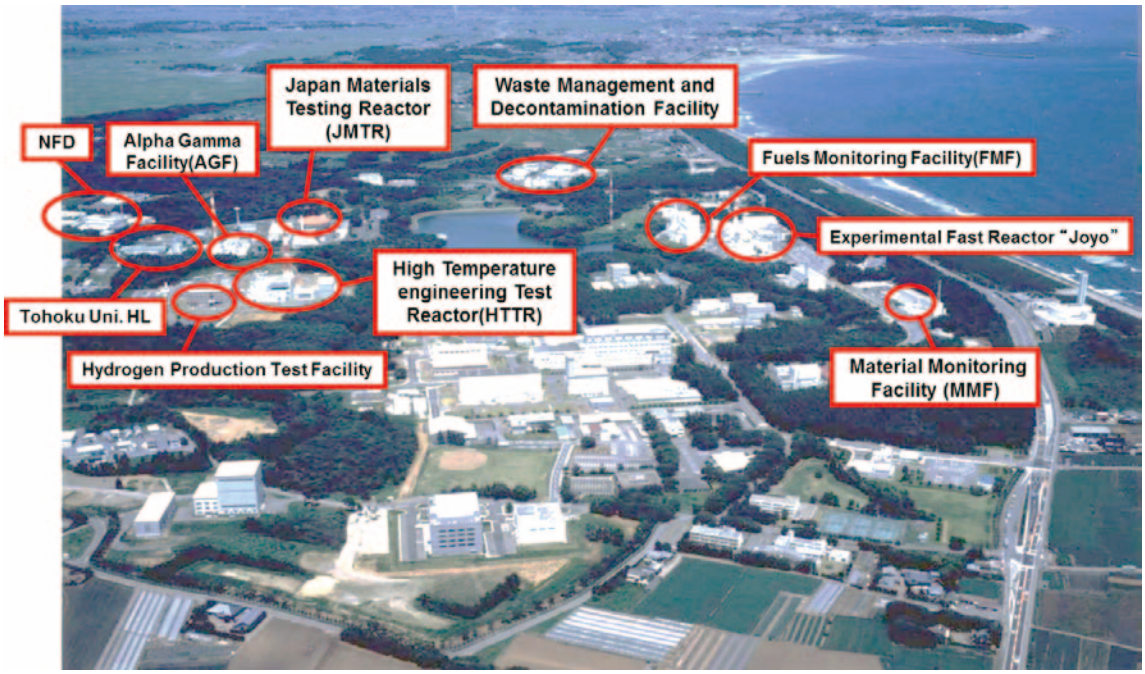


図 1　JAEA 大洗研究開発センター全景 [1)]

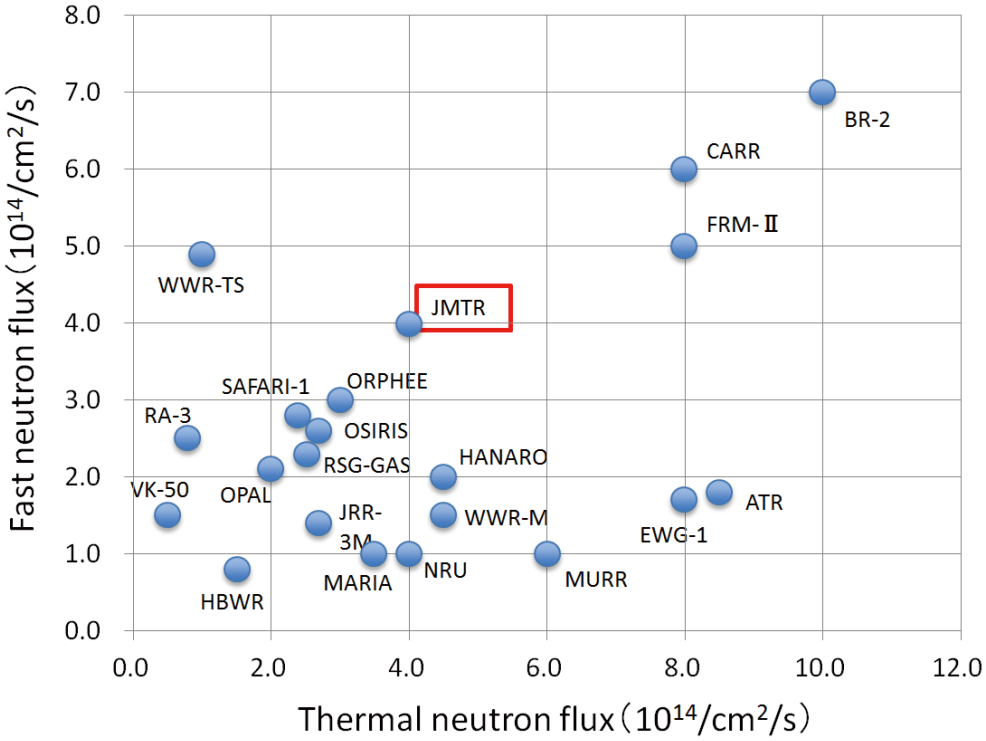


図 2　研究炉の中性子束

（Research Reactor Data Base [2)] の数値を基に作成）

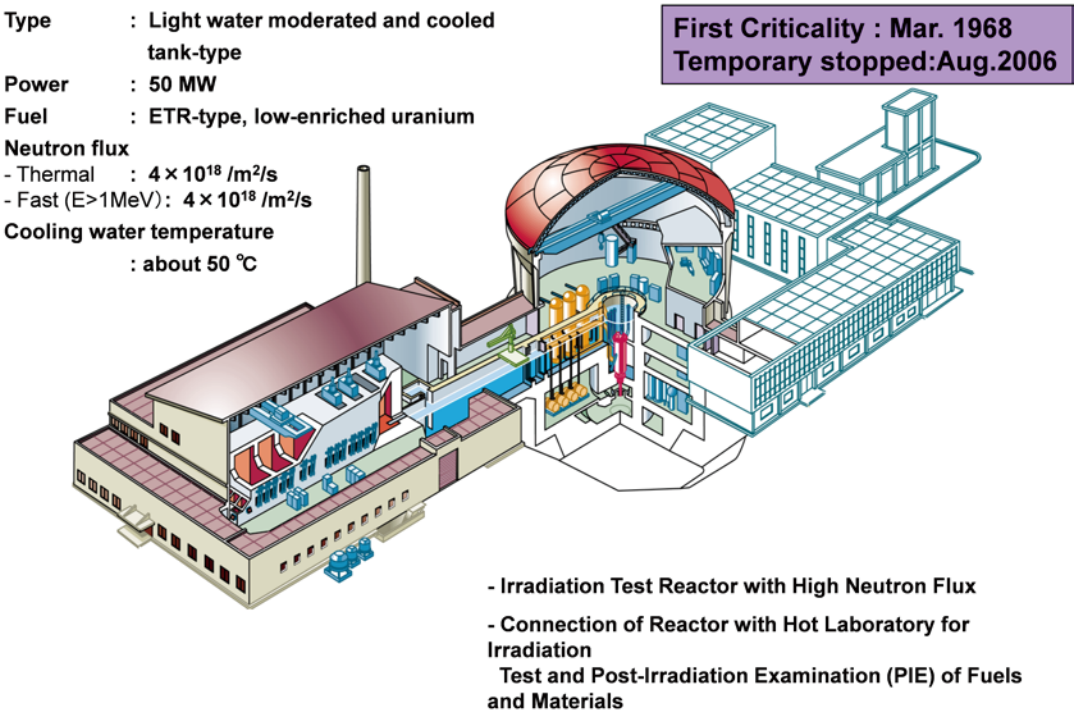


図 3 JMTR の概要 [1)]

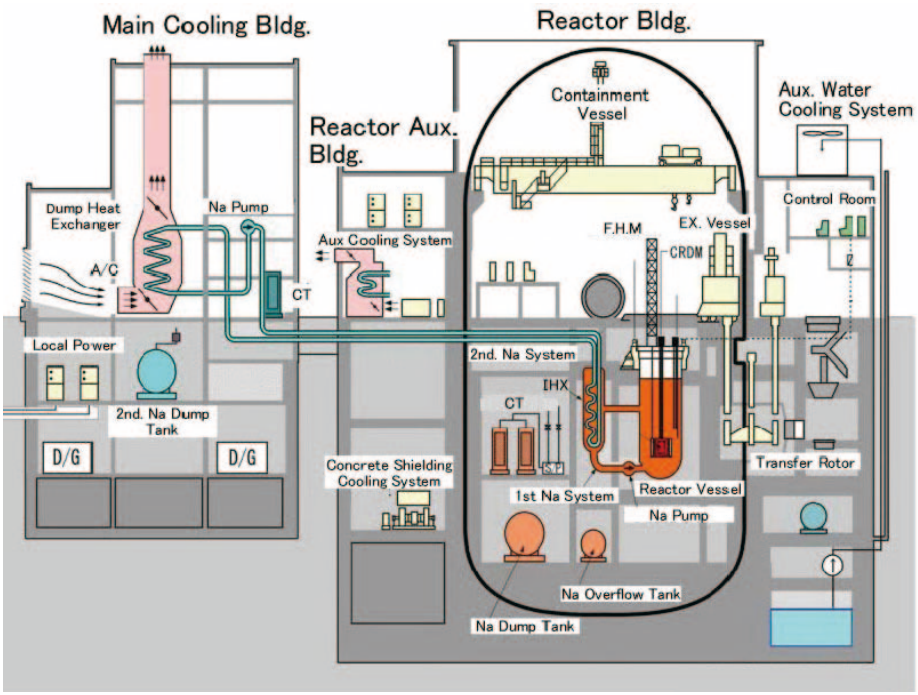


図 4 「常陽」の概要 [1)]

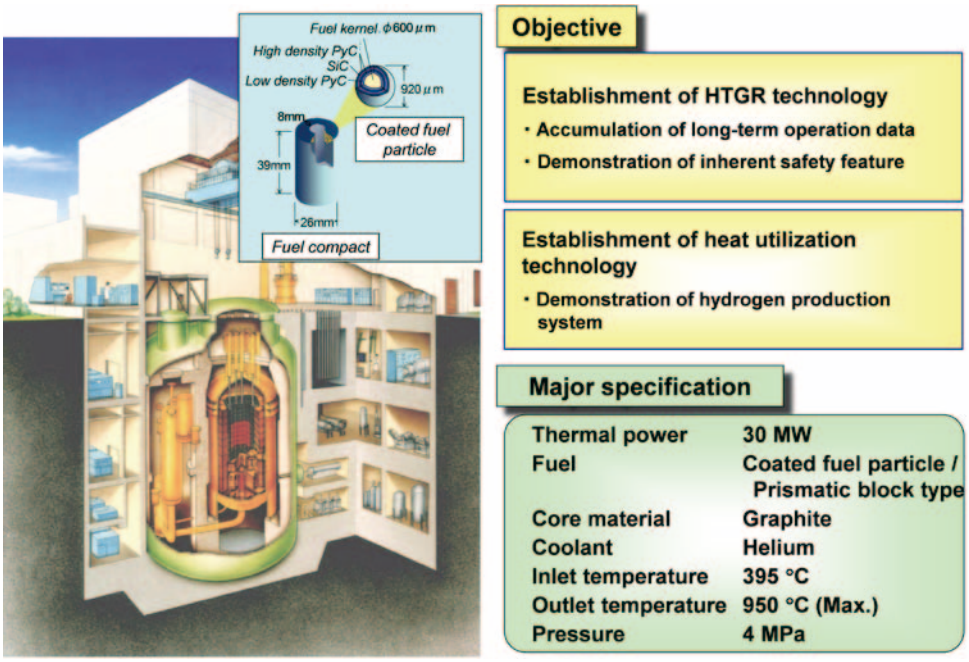


図 5　HTTR の概要 [1)]

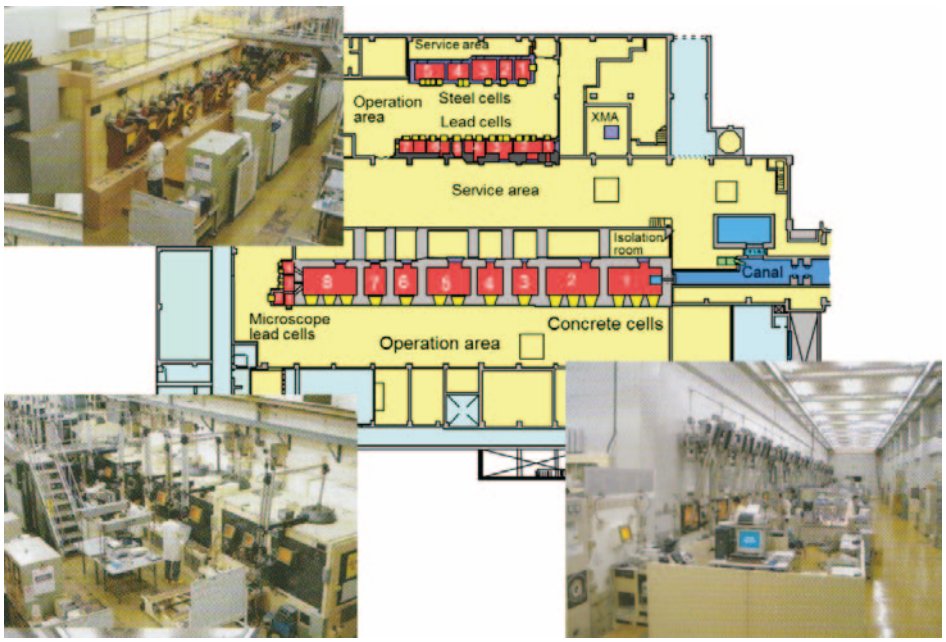


図 6　JMTR HL のホットセルの概要 [3)]

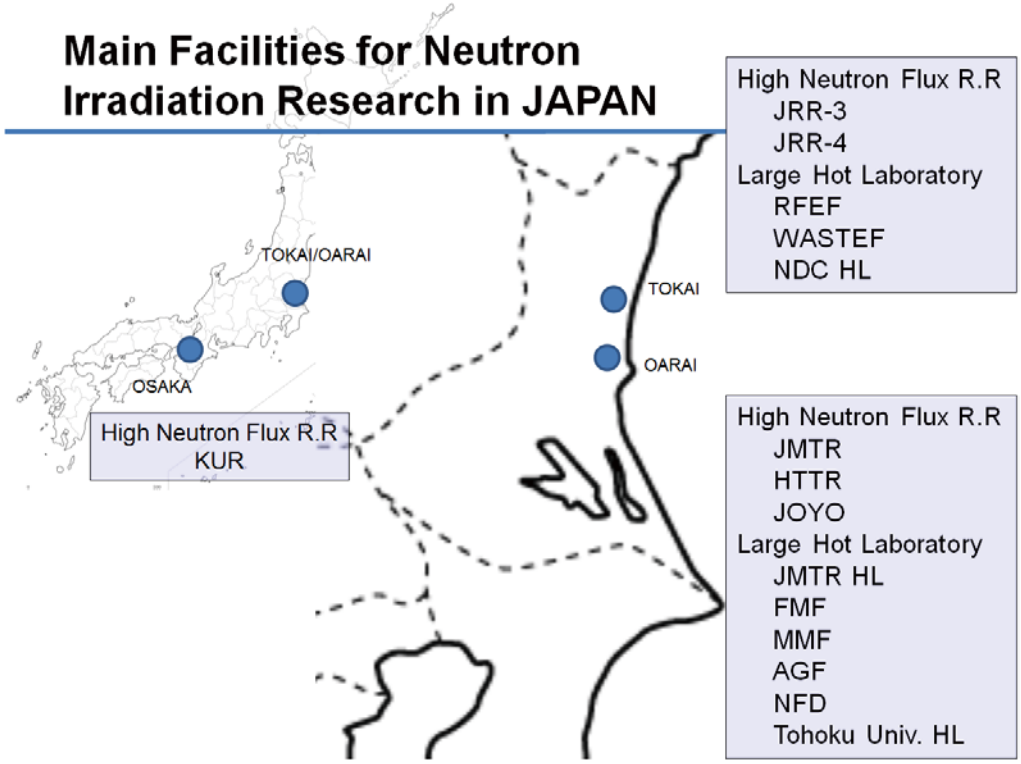


図 7　日本の主要な照射試験研究施設

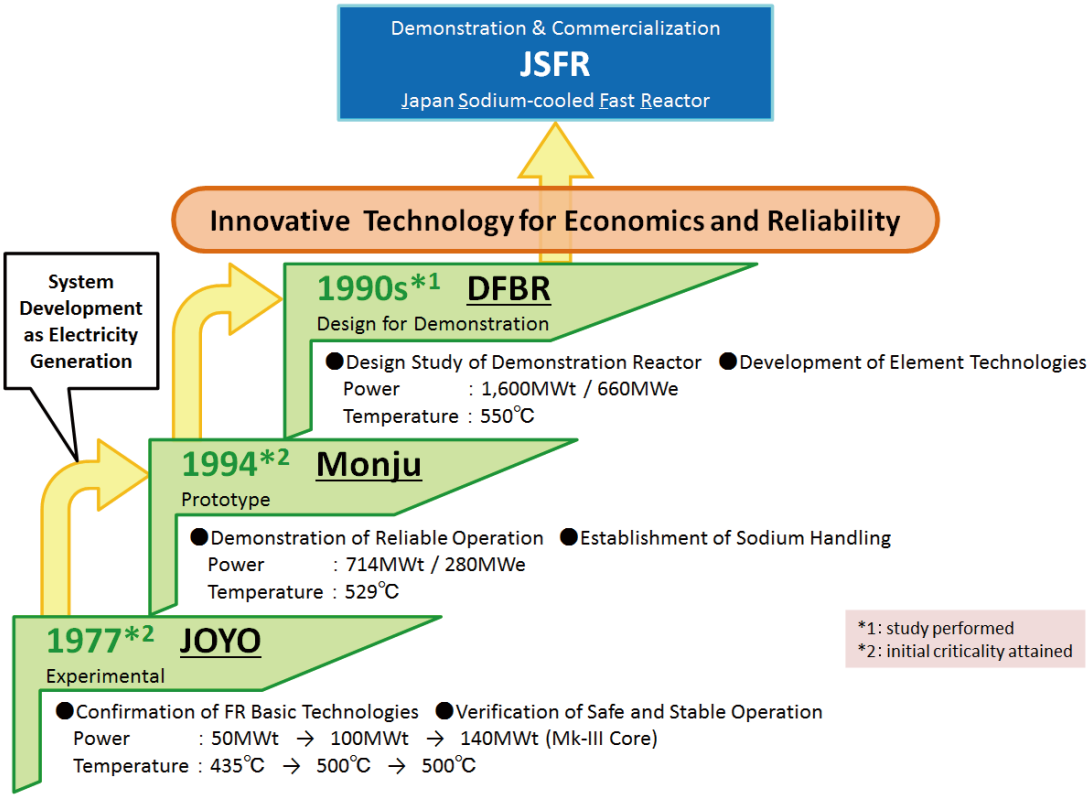


図 8　日本における高速炉開発のアプローチ

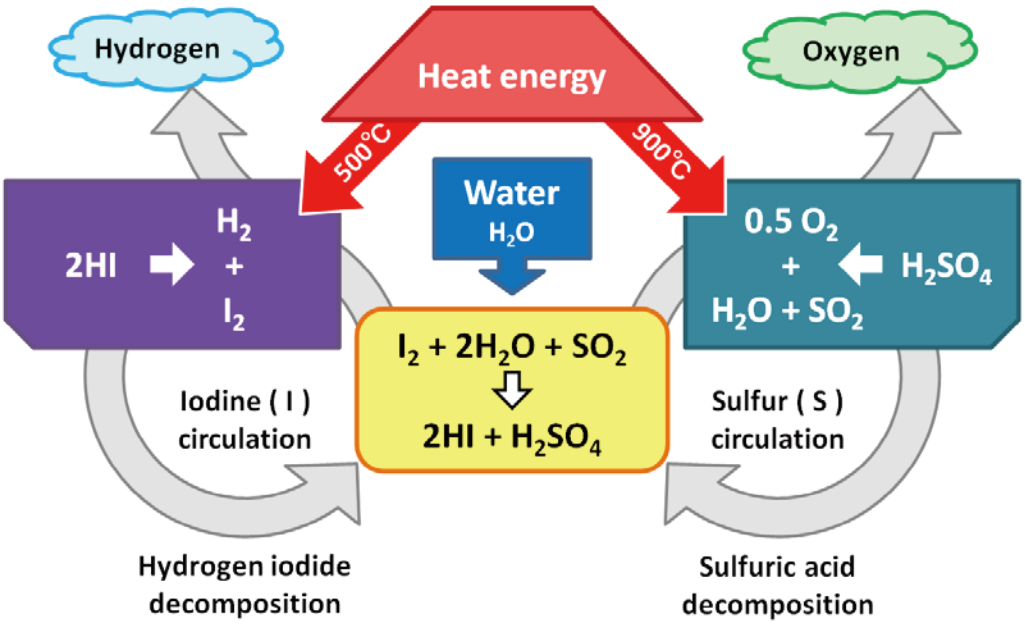


図 9　熱化学法（IS プロセス）による水素製造

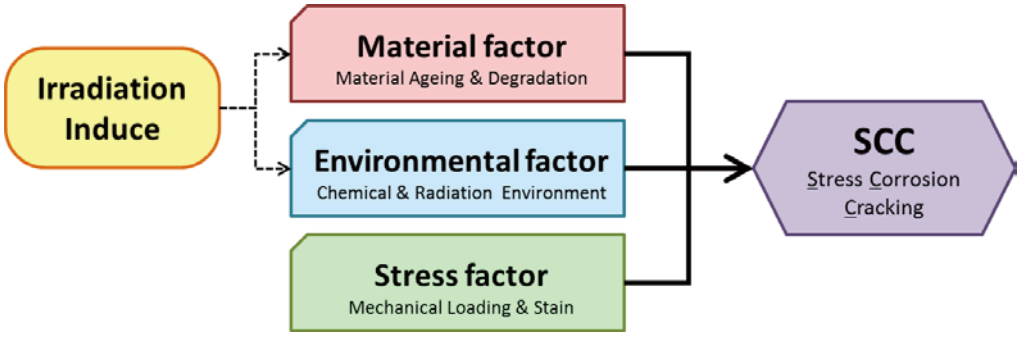


図 10　照射誘起応力腐食割れメカニズム

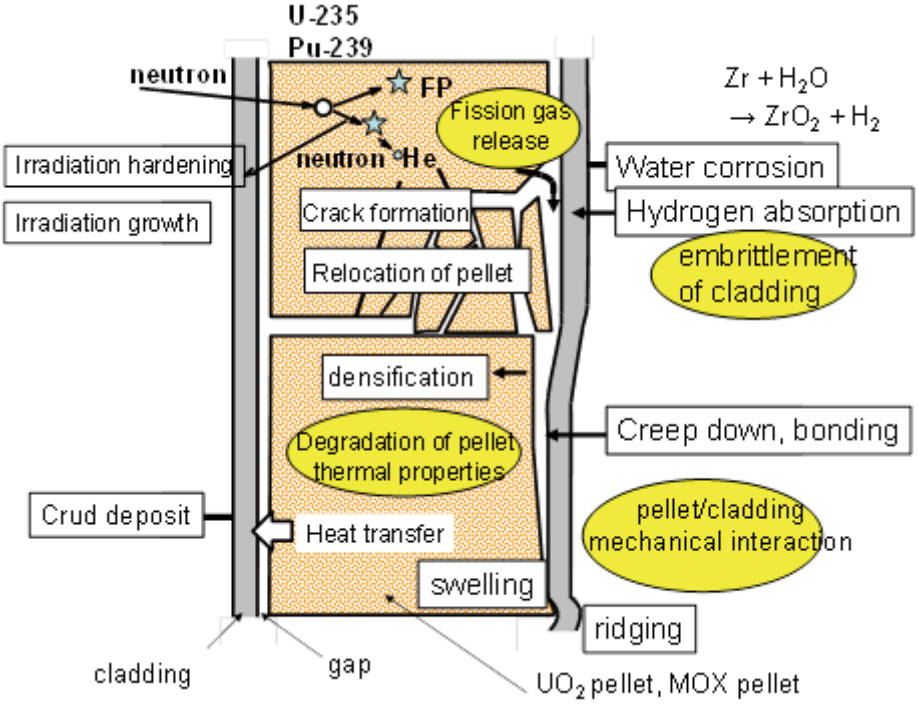


図 11　照射下の燃料棒ふるまい

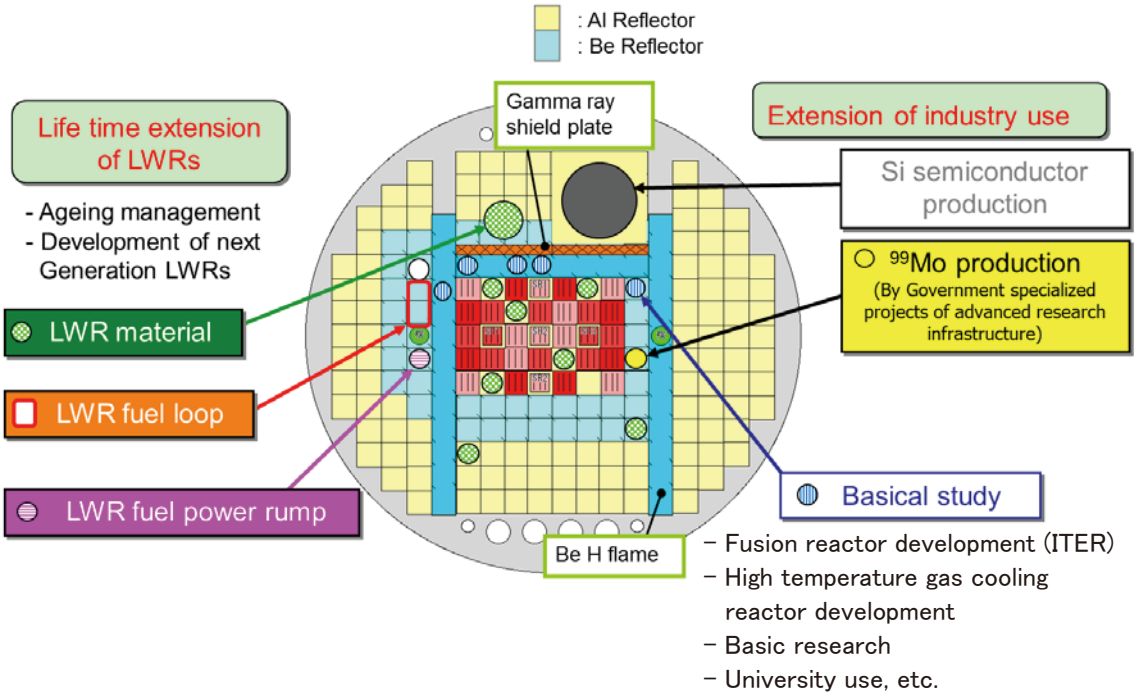


図 12　JMTR 再稼働後の主要な照射設備設置計画案

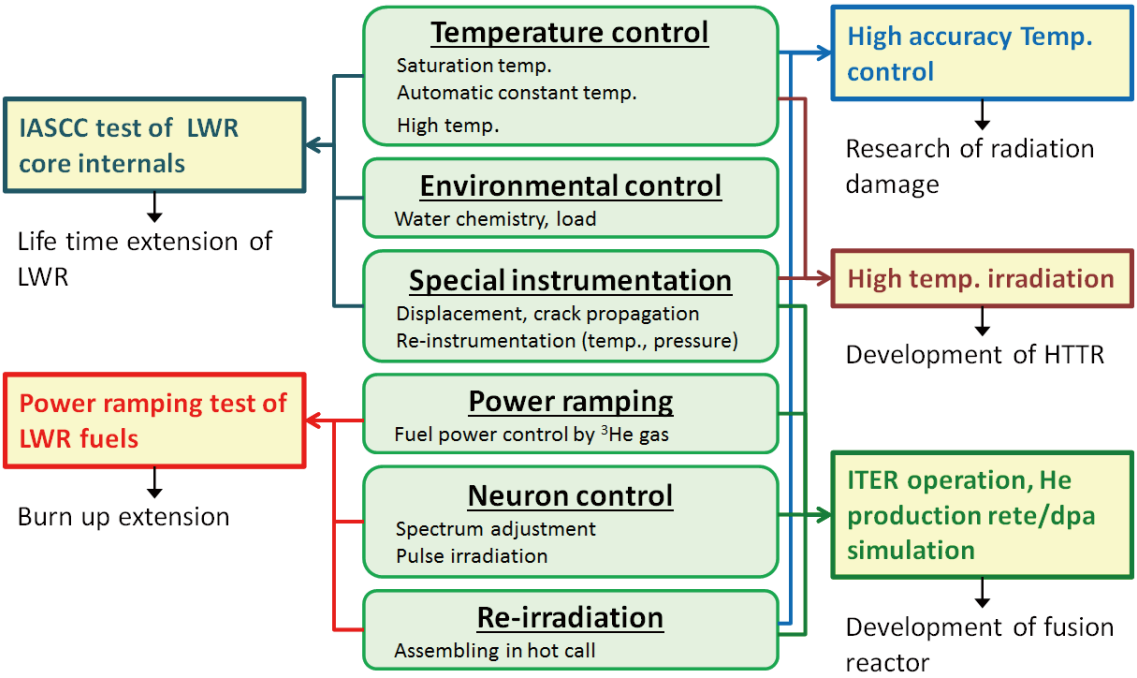


図 13　JMTR の照射技術

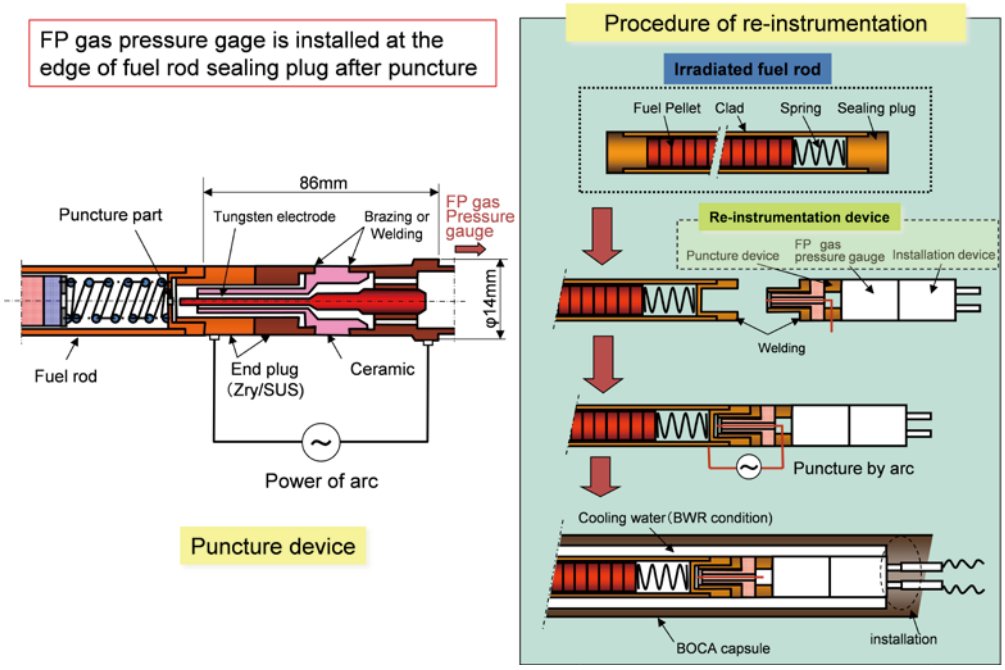


図 14　照射済燃料への熱電対、FP ガス圧力計の再計装技術

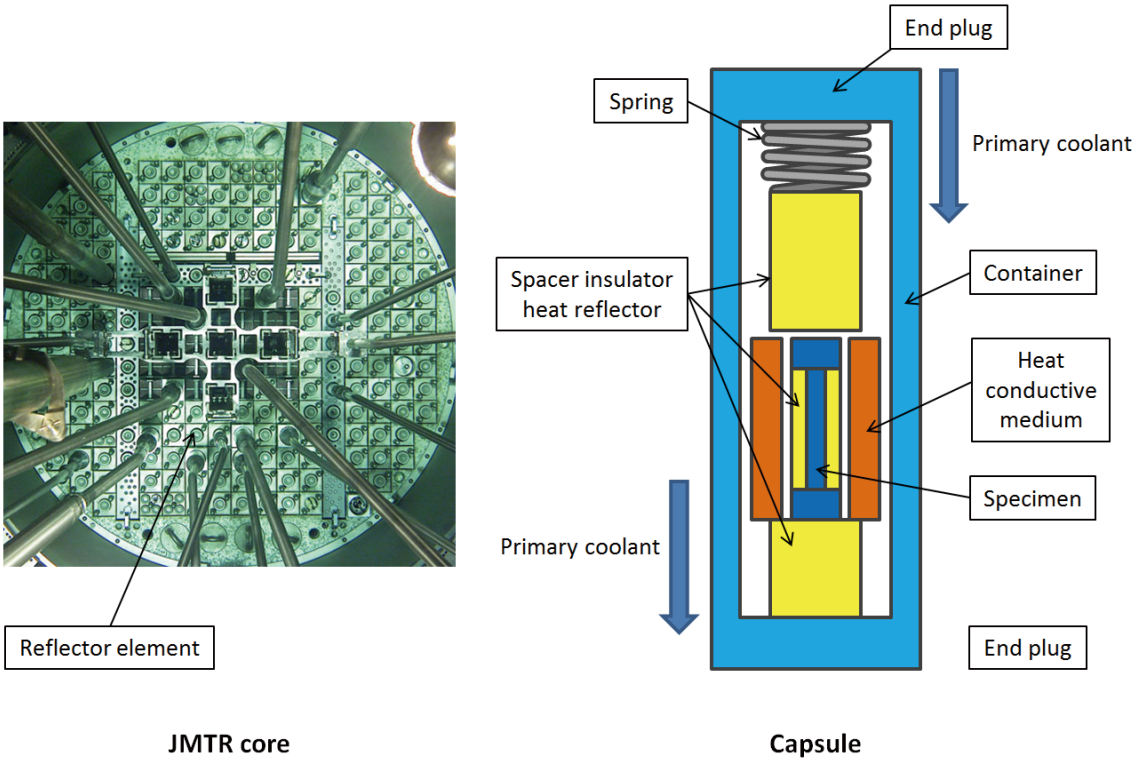
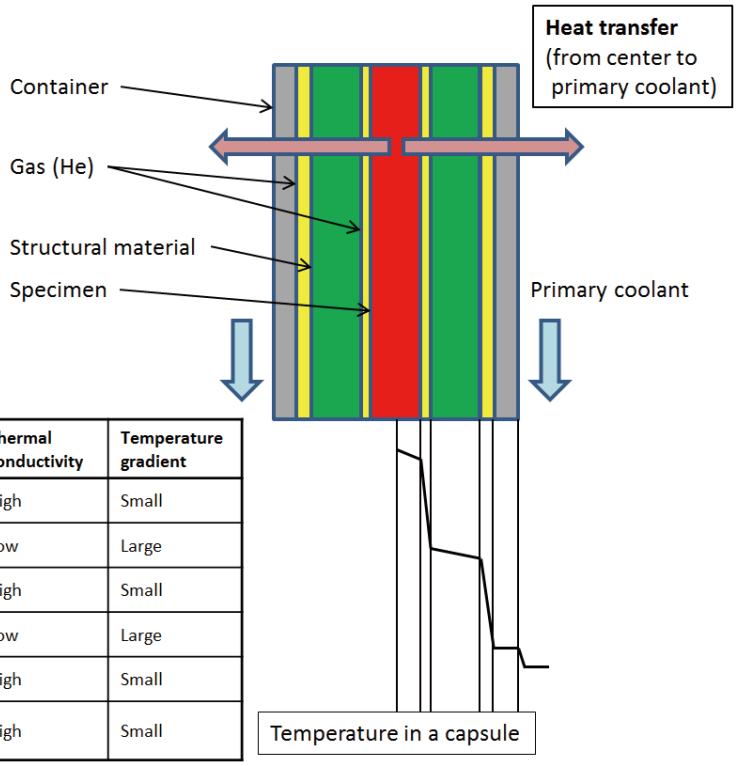


図 15 キャプセルの概要



Location	Heat removal	Thermal conductivity	Temperature gradient
Specimen	Thermal conduction	High	Small
Gas	Thermal conduction	Low	Large
Structural material	Thermal conduction	High	Small
Gas	Thermal conduction	Low	Large
Container	Thermal conduction	High	Small
From container to primary coolant	Forced convection heat transfer	High	Small

図 16 キャプセルの熱移動と温度分布

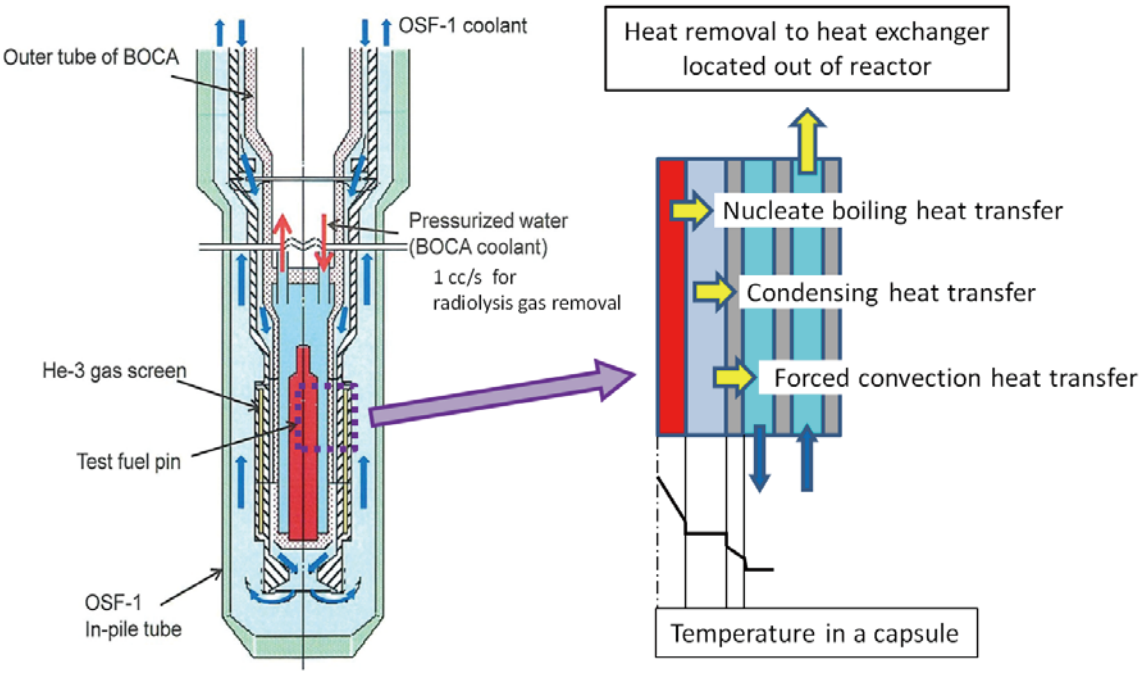


図 17　沸騰水キャプセルの熱移動

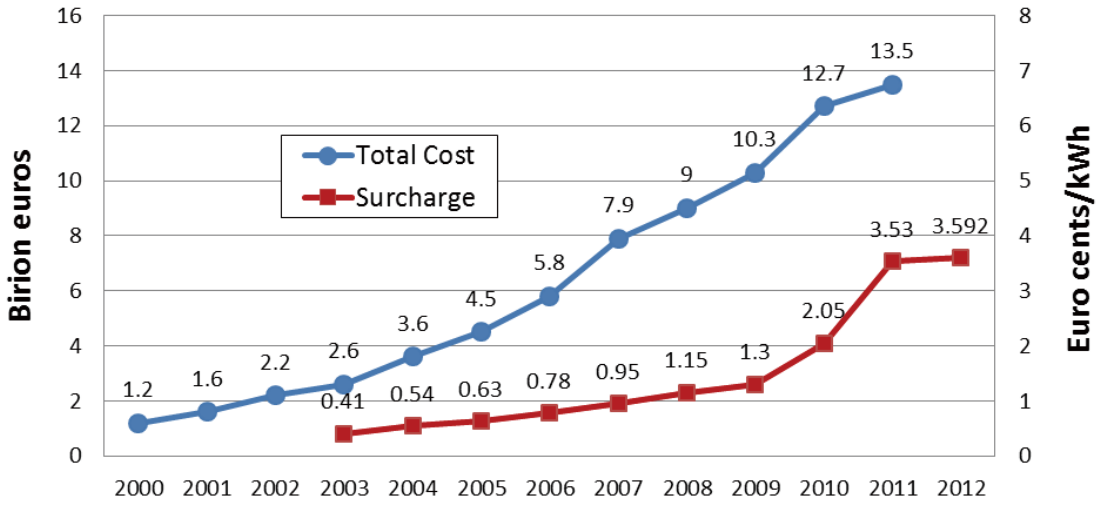


図 18　ドイツの固定買い取り制度に関する賦課金と電力料金

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	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
速さ，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		A s
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	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウェーバ	Wb	V s	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
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]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	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	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	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
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	$m^{-3}\ s\ A$
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 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
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=10^5Pa
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
バーン	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単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	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}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	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 ≙ $(10^3/4\pi)$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		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
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）