

最先端研究基盤 JMTR 及び関連施設を活用した研修 (2013 年度)

2013 Training using JMTR and Related Facilities as Advanced Research Infrastructures

竹本 紀之 木村 伸明 花川 裕規 柴田 晃松井 義典 中村 仁一 石塚 悦男 中塚 亨伊藤 治彦

Noriyuki TAKEMOTO, Nobuaki KIMURA, Hiroki HANAKAWA, Akira SHIBATA Yoshinori MATSUI, Jinichi NAKAMURA, Etsuo ISHITSUKA, Toru NAKATSUKA and Haruhiko ITO

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

February 2014

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構



本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(http://www.jaea.go.jp) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 = 319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 = 2 番地 = 4 電話 = 029-282-6387, Fax = 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,

Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2014

最先端研究基盤 JMTR 及び関連施設を活用した研修 (2013 年度)

日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター 照射試験炉センター

竹本 紀之、木村 伸明、花川 裕規、柴田 晃、 松井 義典、中村 仁一、石塚 悦男、中塚 亨⁺、伊藤 治彦

(2013年12月9日受理)

日本原子力研究開発機構では、将来の原子力人材を確保するための裾野拡大及びその育成を行う観点から、最先端研究基盤 JMTR 及び関連施設を用いた実践的な体験型研修を平成 22 年度から実施している。平成 25 年度は、海外若手研究者・技術者を対象とした「海外若手研究者・技術者のための JMTR オンサイト研修」を 7 月 8 日から 7 月 26 日に実施し、国内の若手研究者・技術者を対象とした「最先端研究基盤 JMTR 及び関連施設を用いた研修講座」を 7 月 29 日から 8 月 9 日に実施した。研修にはそれぞれ 18 名の計 36 名が参加し、基礎講義や体験実習を通して JMTR の運転管理、安全管理、照射試験等の原子力基盤研究・技術について学んだ。本報告は、平成 25 年度に実施したこれらの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

⁺ 原子力水素・熱利用研究センター

2013 Training using JMTR and Related Facilities as Advanced Research Infrastructures

Noriyuki TAKEMOTO, Nobuaki KIMURA, Hiroki HANAKAWA, Akira SHIBATA, Yoshinori MATSUI, Jinichi NAKAMURA, Etsuo ISHITSUKA, Toru NAKATSUKA⁺ and Haruhiko ITO

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

(Received December 9, 2013)

Practical training courses using the JMTR and related facilities as advanced research infrastructures have been carried out in Japan Atomic Energy Agency since FY2010 from a viewpoint of securing and training nuclear human resources. In FY2013, "Training course for foreign young researchers and engineers" was carried out from July 8th to July 26th, and "Training course using JMTR and related facilities as advanced research infrastructures" for domestic young researchers and engineers was carried out from July 29th to August 9th. Eighteen young researchers and engineers were joined in each training course, and 36 trainees in total studied basic nuclear research and technology about the reactor operating management, safety management, irradiation test, etc. in the JMTR through the lecture and training. The results of these courses are reported in this paper.

Keywords: Practical Training, JMTR, Nuclear Human Resource, Reactor Operating Management, Safety Management, Irradiation Test

⁺ Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center

目 次

1.	はじめに	1
2.	大洗研究開発センターの最先端研究基盤施設	1
	2.1 大洗研究開発センターの基盤施設	1
	2.2 原子炉施設	
	2.3 照射後試験施設	3
3.	研修内容	3
	3.1 研修項目	3
	3.2 基礎講義	3
	3.3 体験型実習	8
	3.4 施設見学	10
4.	海外若手研究者・技術者のためのオンサイト研修	10
	4.1 概要	10
	4.2 参加者	11
	4.3 総合討論	11
	4.4 実施結果	14
5.	最先端研究基盤 JMTR 及び関連施設を用いた研修講座 ······	15
	5.1 概要	
	5.2 参加者	15
	5.3 総合討論	15
	5.4 実施結果	16
6.	まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
謝	辞	18
参	考文献	18

Contents

1. Introduction ·····	1
2. Advanced research infrastructures in Oarai Research and Development Center	1
2.1 Research infrastructures in Oarai Research and Development Center	1
2.2 Reactor facilities · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	2
2.3 Post irradiation examination facilities	3
3. Contents of training	3
3.1 Training items	3
3.2 Basic lectures ····	3
3.3 On-the-job trainings	8
3.4 Facility tour	10
4. Training course for foreign young researchers and engineers	10
4.1 Outline · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	10
4.2 Trainees ····	11
4.3 Discussion on this training	11
4.4 Results	14
5. Training course using JMTR and related facilities as advanced research infrastructures	15
5.1 Outline ····	15
5.2 Trainees ····	15
5.3 Discussion on this training	15
5.4 Results	16
6. Summary ·····	17
Acknowledgements	18
References	18

1. はじめに

アジア、東欧、南アメリカ等の諸国では、化石エネルギーに代わり得る安定したエネルギー源として原子力発電を推進する政策がとられているものの原子力発電を支える技術、人材等が不足している。一方、国内では東京電力福島第一原子力発電所事故以降、若手の原子力離れにより、今後の原子力エネルギー基盤及び研究開発を支える人材の不足が危惧されている。

このような中、日本原子力研究開発機構(Japan Atomic Energy Agency、以下、「JAEA」という。) 照射試験炉センターでは、原子力の基盤維持と発展及び原子力産業の世界展開を支援することを目的とし、原子力人材の確保の裾野拡大及び育成を行うため、平成 22 年度から最先端研究基盤 JMTR とその関連施設を中核とし、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・技術に関する実践的な体験型研修を実施している。

平成 25 年度は、海外の若手研究者、技術者を対象にした「海外若手研究者・技術者のための JMTR オンサイト研修」及び国内の若手研究者・技術者を対象にした「最先端研究基盤 JMTR 及び関連施設を用いた研修講座」を平成 25 年 7 月 7 日から 8 月 9 日まで実施した。

本報告は、これらの研修の内容と結果についてまとめたものである。

2. 大洗研究開発センターの最先端研究基盤施設

2.1 大洗研究開発センターの基盤施設

図1に JAEA 大洗研究開発センターの航空写真を示す 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 基の研究用原子炉を有している。また、JMTR ホットラボ(以下、「JMTR HL」という。)、FMF、MMF、AGF という照射後試験施設を有し、日本における照射試験センター的役割を担っている。

JMTR は、発電用原子炉などで使用する燃料や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 HL は JMTR を利用した照射試験等のための照射後試験施設である。「常陽」は高速増殖炉の実験炉であるが、高速増殖炉開発のための照射試験にも供される。FMF、MMF、AGF は高速増殖炉開発のための照射後試験施設である。HTTR は高温ガス炉(High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR)開発のための研究用原子炉であり、原子炉の特性試験の他、高温ガス炉用燃料、材料の照射試験にも供される。また、水素製造などの核熱利用研究は特に重要なミッションになっている。さらに、大洗研究開発センター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、敷地に隣接して日本核燃料開発株式会社があり、どちらも照射後試験施設を有している。

本研修は、これら原子力施設を活用した実践的な体験型研修として計画し、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次節に示す。

2.2 原子炉施設

(1) JMTR

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 2²⁾に示すように世界でもトップクラスの中性子束を有する。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、照射済燃料・材料に再計装し、JMTR で再照射する照射試験等を容易にしている。

また、JAEAでは、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)、JMTRを原子力人材の育成においても重要な施設と位置づけるとともに、最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た「世界最先端研究用原子炉群の高度利用による国際的研究開発拠点の整備一原子力研究開発テクノパークの創成一」の一環として、平成22年度からJMTRに最先端照射設備等の整備を進めている。本整備の中で、照射試験炉の運転、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3)を整備し、平成24年5月に完成している。

(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)及び中性子束の増加に伴い原子炉出力が 140MWt に増加した現在の MK-III 炉心での運転を行ってきた 4)。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・材料の照射試験、新技術の実機プラントでの実証等を実施している。

図 4 に「常陽」のプラント断面図を示す 5)。プラントは原子炉建家、原子炉附属建家、主冷却機建家で構成され、原子炉建家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 次主冷却系ナトリウムから 2 次主冷却系ナトリウムに伝えられ、最終的に主冷却機建家に設置された 4 台の主冷却器により大気に放散される。

「常陽」ではフルスコープ原子炉シミュレータを運用しており(図 5)、運転員の訓練はもとより学生 実習にも活用されている。実習では原子炉の起動から臨界、制御棒校正試験、フィードバック反応 度測定試験等を通じて、原子炉物理理論及び原子炉固有の安全性(自己制御性)を理解するとと もに、原子炉の運転を体験することができる。

(3) HTTR

HTTR は平成 10 年 11 月に臨界に達した高温ガス炉の研究用原子炉である。高温ガス炉用燃料・材料を主体とした照射試験が可能である。また、冷却材である高温の He ガス(出口温度 950°C)を活用した水素製造技術開発が行われている。図 6 に HTTR の概要を示す $^{1)}$ 。

2.3 照射後試験施設

JMTR HL は主に JMTR で照射された燃料・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 に示すように JMTR とカナルで接続されており、照射済燃料・材料の再計装及び再照射試験等で大きな成果を挙げている。表 1 に JMTR HL の各セルにおける最大取扱放射能、図7 にホットセルの配置を示す。

大洗研究開発センターは、JMTR HLの他に3つの照射後試験施設(FMF、MMF、AGF)を有している。いずれも高速増殖炉(FBR)の開発に特化した照射後試験施設として、FMF は FBR の実用燃料の確証試験、MMF は FBR 材料の照射後試験、AGF は FBR 燃料ペレットを主体とした照射後試験に活用されている。

3. 研修内容

3.1 研修項目

将来の原子力技術者確保のための裾野拡大及び育成の観点から、JMTR とその関連施設である JMTR HL、照射試験炉シミュレータを中核として、大洗研究開発センターの原子力施設を活用した実践的な体験型研修を行う。その研修対象は、広く学生から技術者まで年齢、専門分野ともさまざまな国内外の理工系の若手研究者・技術者としている。

研修では、照射試験に係る一連の実務(照射試験のための照射設備の設計、照射後試験、中性子照射量評価等)や、JMTR をはじめとした原子力施設の運転管理、放射線管理、危機管理に係る実務を効果的に体験できるように、「基礎講義」、「体験型実習」及び「施設見学」を基本構成として、これらを有機的に組み合わせるものとし、表 2 に示す研修項目を決定した。各研修項目の内容は、次項より示す。

なお、研修ごとに参加者の原子力に関する予備知識、研修に対するニーズ、研修期間等が異なるため、研修ごとに研修項目の編成を行い、個別にカリキュラムを策定した。

3.2 基礎講義

3.2.1 JAEA 及び大洗研究開発センターの概要

JAEA は、全国に 11 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、 軽水炉の安全研究、基盤研究、新型炉開発、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・処分技術開発から加速器等を用いた量子科学研究まで行っている。さらに福島第 一原子力発電所事故以降、当該事故の原因調査研究、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を行っている。ここでは、研修を行う大洗研究開発センターを中心に JAEA における11 の拠点の概要、JAEA におけるミッションの成果及び今後の計画について講義を行う。

3.2.2 世界の発電炉

原子力エネルギー開発のバックグラウンドとして世界の原子力発電所の概要、種類、数及び電力シェアの推移並びに新型炉の開発状況について講義を行う。主な講義内容を以下に示す。

- ① 原子力発電所の建設ピークは1970年代であり、高経年化が世界の課題となっている。
- ② 世界の原子力発電における電力シェアは約13.4% である。
- ③ 原子力発電の種類は、大半が軽水冷却型である。
- ④ 原子炉の安全性向上と高性能化が図られている(Generation I から Generation IV)。

3.2.3 世界の照射試験炉

照射試験炉については、世界で活用されている大型の研究用原子炉(材料試験炉)の概要及び今後の動向について講義を行う。主な講義内容を以下に示す。

- ① 研究用原子炉とは 研究用原子炉の目的と特性
- ② 研究用原子炉の利用成果等
 - ・ 約60年間、研究用原子炉は核科学や技術の開発に貢献。
 - ・ 材料試験炉は、軽水炉燃料/材料の照射試験で原子力エネルギー開発に貢献。
 - 中性子ビーム炉は、主として核科学研究に貢献。
 - ・ 材料試験炉、ビーム炉とも RI 製造、シリコン半導体製造等に貢献。
- ③ 世界の研究用原子炉の現状²⁾ これまでに世界で 743 の研究用原子炉が建設されており、その建設ピークは 1960 年代である。現在は 246 の研究用原子炉が稼働しているが、高経年化が課題となっている。
- ④ 世界の主要な研究用原子炉の概要
 - ATR (USA), BR-2 (Belgium), OSIRIS (France), HBWR (Norway), SM-3 (Russia), RA-3 (Argentina), HFIR (USA), MURR (USA), HFR (Netherlands), FRM-II (Germany), ILL-HFR (France), HANARO (Republic of Korea), OPAL (Australia), LVR-15 (Czech Republic), MARIA (Poland), BRR (Hungary), WWR-K (Kazakhstan), CARR (China)
- ⑤ JAEA の研究用原子炉の概要 JRR-3、JRR-4、NSRR、JMTR
- ⑥ 新たな研究用原子炉の建設計画

高経年化等のため近い将来停止する研究用原子炉の代替炉、新たに原子力発電を導入する国々の基盤としての新研究用原子炉の建設計画等について紹介する。これらの新たな研究用原子炉を表 3^{2),7),8),9)}に示す。

3.2.4 汎用小型試験研究炉の概念検討

照射試験炉センターで検討を進めている原子力技術者の育成、科学技術の向上、RI 製造等の 照射利用を行うための高性能、低コストの照射試験炉の概念検討 ^{10),11)}の状況について紹介する。 なお、検討中の本研究炉は原子力発電の導入計画がある国々への提供も視野に入れたものであ る。本研究炉の設計仕様を表 4 に示す。

3.2.5 高温ガス炉

JAEA では、高温ガス炉開発のために HTTR を建設し、高温ガス炉に関する固有の安全性等の特性試験、高温運転下における燃料、材料の確証試験等を実施している。また、それと並行して実用炉の設計研究及び高温ガスを利用した水素製造技術の開発を行っている。主な講義内容を以下に示す。

- ① 高温ガス炉開発の歴史と現状
- ② HTTR の運転経験と今後の試験計画
- ③ 高温ガス炉の核設計、安全設計
- ④ 高温ガス炉の燃料設計
- ⑤ 高温ガス炉の黒鉛構造物、金属材料
- ⑥ 水素製造/水素利用

3.2.6 東京電力福島第一原子力発電所事故

福島第一原子力発電所事故は、世界の原子力エネルギー政策に影響を及ぼす極めて大きな事故である。そのため、この事故を正しく理解することは重要であり、事故から学ぶべきことも非常に多い。このような観点から、以下に示す内容の講義を行う。

- ① 福島第一原子力発電所事故とその後
 - ・ 事故の経緯等概要
 - ・ 世界の原子炉における重大事故
 - ・ 東京電力、政府、国会、民間等におけるこれまでの事故調査結果
 - 廃止措置までの道のり
 - ・ 福島第一原子力発電所事故に係る JAEA の活動
- ② エネルギー政策と原子力発電
 - ・ 原子力発電所再稼働への動き(新規制基準の制定と既存原子炉の安全審査)
 - ・ 事故前後の世界のエネルギー政策(エネルギーミックス)
 - ・ 再生可能エネルギー施策(固定買取制度)

3.2.7 原子炉物理の基礎

本研修では原子力を専門分野としていない者も広く研修対象としているため、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、原子力に関する基礎講座として、以下に示す原子炉

物理の基礎に関する講義を行う。

- ① 中性子による核反応と反応断面積
- ② 原子炉の基本構成
- ③ 核分裂プロセスと核分裂エネルギー
- ④ 原子炉の臨界、中性子東分布及び中性子スペクトル
- ⑤ 原子炉の動特性及び反応度

3.2.8 放射線管理

物質による α 線、 β 線、 γ 線の遮へい効果、線源からの距離と空間線量率の関係等、放射線防護に係る基礎知識について講義を行う。次に、原子力施設における管理区域の設定、管理区域における作業環境管理、管理区域の入退出管理、個人被ばく管理等、放射線管理の基本について講義を行う。

講義のあとは、サーベイメータの取扱い、線量率測定方法の習熟及び自然放射線レベルの把握を目的として屋外の環境放射線測定実習を行うとともに、大洗研究開発センターの環境放射線測定を行っているモニタングポストのデータを集中管理している放射線モニタリング施設や緊急時に現地対策本部が設置される緊急時対策室の見学を実施する。

3.2.9 JMTR の運転管理

照射試験炉シミュレータ運転実習に先立ち、研究用原子炉における法規制、JMTR の施設概要、安全動作機能、運転サイクルごとに作成する運転計画書の記載事項、運転前の特性試験、運転手順、安全管理等について原子炉の安全管理に重点をおいて講義を行う。

3.2.10 照射試験概要

(1) 照射試験の目的

燃料や材料が中性子に照射されると不純物生成、原子のはじき出し、イオン化、エネルギー放出等により機械的特性等が変化する。その変化特性には、単純な照射損傷だけではなく、機械的応力や化学的環境を含めた相乗効果があることが研究の進展で明らかになってきている。原子炉の設計や安全運転には、これら特性変化の把握と損傷メカニズムの解明が不可欠であり、そのために行う照射試験に関し、以下に示す内容の講義を行う。

- ① 照射試験の目的及び手法、照射試験のための放射線源(原子炉、加速器)
- ② 原子炉内での燃料・材料のふるまい
- ③ 不純物生成、原子のはじき出し、イオン化、エネルギー放出による機械的特性変化等の 照射効果
- ④ 発電用原子炉に関するプロジェクト研究(軽水炉の高経年化対策、軽水炉燃料の高燃焼度 化等)

(2) 照射試験装置と照射試験技術

照射試験を行うためには、研究目的に適した照射試験装置や照射試験技術(照射環境の制御技術、照射中の試験情報を得るための計装技術等)が欠かせないものである。例えば、国の重要なプロジェクト研究である軽水炉の高経年化対策に係る照射誘起応力腐食割れ(IASCC)研究、軽水炉燃料の高燃焼度化に係る燃料ペレット被覆管機械的相互作用研究等においては、照射による燃料や材料の特性は、単純な照射損傷でなく機械的応力や化学的環境を含めた相乗効果に依存するとされ、照射環境が重要な因子となっている。したがって、このような照射環境を模擬した照射試験を実施するために種々の照射試験装置と照射試験技術を開発してきている。これらは世界の照射試験炉が有するほぼ共通な技術であるが、JMTRではその特性に併せた独自のものがある。

そこで、照射試験というものをより深く理解するために、JMTR の照射試験装置と照射試験技術に関し、以下に示す講義を行う。

① 概要

- · JMTR の概要及び中性子東レベル
- ・ 研究用原子炉を利用した研究
- ・ 中性子源(原子炉)とホットラボのコラボレーション

② 照射試験装置

- ・ キャプセル照射装置
- ・ 水力ラビット照射装置
- ・ループ照射装置

③ 制御技術

- ・ 原子炉出力変更時における温度一定照射技術
- · 荷重制御技術
- ・ 熱中性子パルス照射技術
- ・ 中性子スペクトル制御技術

④ 計装技術

- · 照射温度測定
- · 中性子東測定
- ・ 照射中の伸び量測定
- ・ 照射中のガス圧力測定
- ・ 照射中の試験片き裂発生・進展量測定

(3) 照射後試験装置と照射後試験技術

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ことを目的に建設されたものであり、JMTR とはカナルで接続している。照射済燃料及び材料はこのカナルを経由してホットラボに移送する。また、高放射能を有する照射済燃料・材料を JMTR HL で装荷した長尺の

キャプセルをJMTR に移送して再照射を行う。ここでは、以下に示すJMTR HLの照射後試験装置及び照射後試験技術について講義する。

① JMTR HL の概要

JMTR HL は8基のコンクリートセル、4基の顕微鏡鉛セル、7基の鉛セル及び5基の鉄セルで構成されている。ここでは、各セルの設計仕様とそれぞれのセルに配置されている照射後試験装置について説明する。

②照射後試験技術

- ・ 照射済試料の IASCC 試験をホットラボで行うための試験装置
- · IASCC 試験をホットラボで行うときの試験片のき裂発生と進展を測定する技術
- ・ 酸化膜厚さ測定技術
- ・ 核融合材料研究に不可欠な微小試験片による機械特性試験法であるスモールパンチ試験技術
- ・ 燃料棒の被覆管とペレット間ギャップ測定技術
- ③ 99mTc 抽出技術開発

放射性医薬品として利用される 99m Tc の原料である 99 Mo の国産化を目指した 99 Mo 製造技術開発の一環として、JMTR で放射化法により 98 Mo から 99 Mo を生成し、JMTR HL で 99 Mo から 99m Tc を抽出するための技術開発を行っている。

ここでは、JMTR HLで抽出の確証試験を行っている 99 Mo/ 99m Tc 分離・抽出・濃縮試験装置について説明する。

- ④ 照射用キャプセルの再組立と再計装技術
 - ・ 原子炉構造材料の IASCC 試験を行うためのキャプセルへの照射済材料試験片装荷技術
 - ・ 高燃焼度燃料の中心温度測定用熱電対及びFPガス圧力計の再計装技術

3.2.11 原子炉の利用

研究用原子炉は、照射試験の他、医療、工業及び核科学に活用されている。ここでは、以下に示す研究用原子炉や加速器を用いた中性子等の利用について講義する。

- ① 放射線の概要と利用
- ② RI の製造とその利用(医療、工業、農業への利用)
- ③ 中性子線源としての利用(核科学への活用、がん治療(BNCT))
- ④ その他の利用(シリコン半導体製造、放射化分析等)

3.3 体験型実習

3.3.1 核計算実習

JMTR における照射場評価に使用しているモンテカルロ法による計算コード MCNP (Monte Carlo N-Particle Transport Code) ¹²⁾について説明し、この計算コードを用いて球、立方体、円柱といった簡単な体系の原子炉の臨界計算を行うことにより、原子炉の臨界についての理解を深めると

ともに計算コードの使用方法の習熟を図る。次に、JMTR の水力ラビット照射装置を題材として設計計算を行う。計算は、構造、材質、照射試料位置等をパラメータとして行い、その結果を参加者で討議することにより、以下のような原子炉内での中性子のふるまいに関する理解を深める。

- ① 媒質中で中性子は散乱により減速したり吸収により消滅したりするため、照射試料の材質や形状により試料中の中性子束が変化する。
- ② 炉心内で中性子束は分布をもっているため、試料の装荷位置によって試料中の中性子束が 変化する。
- ③ 照射試料を取り巻く構造材の材質により試料中の中性子スペクトル(中性子エネルギー分布)が調整できる。

3.3.2 熱設計実習

原子炉内では、全ての構造材がガンマ線等の放射線を吸収して発熱する。大型の照射試験炉では、この発熱密度が極めて高い。また、中性子照射による材料損傷に及ぼす温度の影響は非常に大きい。そのため、照射試験において照射リグの熱設計は重要事項となっている。

照射試料は円筒形状の容器内に熱媒体等の構造材とともに装荷される。試料や構造材で発生した熱は、容器表面の冷却水に向かって流れて除熱されるため、容器表面の温度は、容器表面の熱流束と熱伝達率によって決まる。照射リグ内の照射温度は、容器表面温度から容器内構造材の熱流束及び構造材とガスギャップ層のガス材を通過する熱伝導率の関係で決まる。

本実習では、JMTR の照射リグであるキャプセル及びラビットを題材とし、JMTR における熱設計に使用している一次元熱計算コード GENGTC¹³⁾を用いて、これらの照射試験中の温度について構造材材質、ガスギャップ層のガス圧等をパラメータとした計算を行うとともに、その結果について参加者で討議する。これにより、原子炉内での放射線による発熱特性、照射リグの冷却特性、構造材、ガス材の伝熱特性についての理解を深めるとともに、熱設計の基礎についての習得を図る。

3.3.3 照射後試験実習

照射後試験装置と照射後試験技術に関する講義を行った後、JMTR HLの操作室でコンクリートセルにおけるマニプレータを用いた試験片の取扱い操作、鉄セルにおける未照射材の引張試験及び引張試験後の試験片の SEM (Scanning Electron Microscope) 観察の実習を行う。

3.3.4 中性子照射量評価実習

フルエンスモニタによる放射化法を用いた原子炉における中性子照射量評価の概要について 講義を行い、Ge 半導体検出器を用いてフルエンスモニタのガンマスペクトルを測定するとともに、 測定結果に基づき照射試験における照射試料の中性子照射量を評価する実習を行う。

3.3.5 照射試験炉シミュレータ運転実習

JMTR の見学の後、原子炉の通常運転時及び事故時の原子炉の挙動や原子炉内での中性子のふるまいについての理解を深めるため、JMTR をベースに開発した照射試験炉シミュレータを用いた運転実習を行う。実習における訓練項目を以下に示す。

- ① 原子炉の運転原子炉の起動、出力上昇、定常運転、停止等の運転操作体験
- ② 異常事象、事故事象 地震、商用電源喪失、全交流電源喪失をはじめとした異常、事故事象が発生した場合の原 子炉の挙動の確認及び対応操作の体験
- ③ 照射設備の運転 照射環境制御装置(BWR 用)、水カラビット照射装置の運転操作体験

3.3.6 環境放射線測定実習

サーベイメータの取扱い、線量率測定方法の習熟及び自然放射能レベルの把握を目的として、 屋外の環境放射能測定実習を行う。なお、本年度は、福島第一原子力発電所事故で放出された 放射性物質の残存放射能を確認する目的で雨樋近傍の放射線測定も実施する。

3.4 施設見学

見学対象の原子力施設を以下に示す。

(1) JAEA 大洗研究開発センター

JMTR、「常陽」、「常陽」シミュレータ、HTTR、水素製造試験装置、環境監視盤、 緊急時対策室

- (2) JAEA 東海研究開発センター原子力科学研究所 JRR-3、RI 製造施設、J-PARC
- (3) 日本原子力発電株式会社(東海事業所)
- (4) 株式会社千代田テクノル大洗研究所(ガラスバッチ測定被ばく評価施設)

4. 海外若手研究者・技術者のためのオンサイト研修

4.1 概要

海外若手研究者・技術者のためのオンサイト研修(以下、「海外若手研修」という。)¹⁴⁾は、原子力発電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に貢献することを目的として、平成 23 年度から実施している研修である。

平成 25 年度の研修では、参加者がいずれも今後のエネルギーとして原子力に重きをおき、発電用原子炉の基盤技術開発を推進する必要があり、そのための技術者の育成が急務となっている

国からの参加であった。そこで、高中性子束を有する JMTR を用いた照射試験技術、JMTR の運転管理及び安全管理に重点をおいてカリキュラムを策定した。研修のカリキュラムを表 5 に、研修に使用した資料の概要を表 6-1~表 6-13 に示す。なお、今年度は、大洗研究開発センターの原子力施設が立地する茨城県大洗町にご協力いただき、「原子力施設と地域との共生」と題し、大洗町で取り組まれている内容について講義いただくこととなった。

カリキュラムにしたがって7月8日から7月26日に研修を実施し、計18名が参加した。

4.2 参加者

海外若手研修は平成23年度に開始し、平成23年度はカザフスタンとタイの2カ国から計10名、平成24年度はインドネシア、カザフスタン、タイ、ポーランド及びマレーシアの5カ国から計16名、そして平成25年度は、アルゼンチン、インドネシア、カザフスタン、タイ、ベトナム、ポーランド及びマレーシアの7カ国から計18名が参加した。これらは、いずれも今後の産業発展のために新たな原子力発電導入を目指している国々であった。参加者は21才から31才までの大学生、若手社会人技術者等であり、今後の各国の産業を支えるべき人材である。平成23年度から平成25年度までの参加者を表7-1~表7-3に示す。

4.3 総合討論

4.3.1 テーマと実施要領

平成25年度の研修には、表7-3に示したようにアルゼンチン(1名)、インドネシア(2名)、カザフスタン(4名)、タイ(3名)、ベトナム(3名)、ポーランド(2名)、マレーシア(3名)の計18名が参加した。研究用原子炉、特に材料の実証試験を行うための高中性子東原子炉(材料試験炉)は発電用原子炉の基盤を支える重要なツールであること、参加した各国では今後のエネルギー源として原子力発電が重要な役割を担うと考えられていることを踏まえ、参加者各国の原子力に係る状況を知り、それを共通認識として今後の原子力開発を考えることを目的として、研修の最後に総合討論を行った。

総合討論では、これまでの知見に本研修で得た知見を加えて国別に以下のテーマについてグループ討論を行い、議論をまとめて発表することとした。

テーマ 1) ; 各国の研究用原子炉の現状と将来計画(発表 15 分、討論 10 分)

テーマ 2) ; 各国のエネルギー戦略(発表 10分、討論 10分)

4.3.2 討論結果

(1) テーマ 1); 各国の研究用原子炉の現状と将来計画

参加者から報告された各国の研究用原子炉の現状と将来計画について以下に示す。各国の研究用原子炉の初臨界は、最も新しいマレーシアのRTPの1982年の他は、1950年代後半から1970年代前半であり、世界の多くの研究用原子炉と同様、高経年化の時期にある。また、アルゼンチンのRA-3(10MW)、インドネシアのRSG-GAS(30MW)、ポーランドのMARIA(30MA)以外の研究

用原子炉は、出力が小さいため発電用原子炉の材料試験には適さず、基礎研究、RI 製造、教育訓練が主要目的となっている。これら各国の研究用原子炉の現状について表 8 にまとめた。

一方、研究用原子炉の将来計画としては、アルゼンチンが RA-10 プロジェクト(30MW)、タイが 10MW の研究用原子炉、ベトナムが 10~20MW の研究用原子炉(2017年~2020年建設)を検討している。したがって、発電用原子炉の基盤研究にあたって、照射試験炉に関する国際協力はこれまで以上に重要となっている。

(2) テーマ 2) ; 各国のエネルギー戦略

参加者から報告された各国のエネルギー戦略の概要を以下に示す。

① マレーシア

- エネルギーのリスク低減(多様化)
 - 1981 年頃は、石油、水力、天然ガス及び石炭がエネルギー源であったが、2000 年から新エネルギーが加わった。
- ・ 新エネルギー政策(2011-2015)
 - 発電容量の増進と多様化(原子力エネルギーは長期のオプション)
 - 送電、配電ネットワークの強化
 - 電力供給産業の再編
 - 顧客へのサービス向上
- 原子力エネルギー
 - 2021 年に容量 2GW の原子力発電を目標として検討している。

② ベトナム

- エネルギーミックス
 - 2010年と2020年のエネルギーミックスを表9に示す。
 - 水力、石炭が主流であるのは 2020 年まで大きく変わらないが、2020 年には原子力エネルギー2.9%を想定している。
- ・ エネルギー政策
 - エネルギー保障
 - エネルギー源の効果的利用と国産エネルギー推進
 - 環境保全
- 新エネルギーと再生エネルギー
 - 風力一離島(エネルギーネットワークから離れた場所に設置)
 - 太陽一離島(エネルギーネットワークから離れた場所に設置)
 - バイオマス

③ アルゼンチン

- 国の状況
 - 天然資源が豊富

- エネルギーの需要はコンスタントに増えている。
- 石油とガスは主要エネルギー源として残る。
- 政府は、原子力エネルギーがエネルギーミックスのベースになると評価。
- 原子力
 - 現状; EMBALSE(640MW、CANDU)、ATUCHAI(357MW、PHWR)の 2 基の原子 力発電が稼働中。
 - 将来; 稼働中の原子炉の高経年化対策が課題であり、炉型は未定であるが新型炉の 建設も検討中。

④ インドネシア

- ・ 現状と2025年までのエネルギーミックス計画を表10に示す。
- ・ 化石エネルギーが主流で地熱、原子力、新エネルギー、バイオ等の多様化の道を探っているが、2025年まで化石エネルギーが主流であることは大きく変わらない。
- · 原子力
 - 原子力は、化石燃料消費削減のためのオプションとして2016年頃の導入を検討。
- ⑤ カザフスタン

カザフスタンはウラン資源が豊富であり、2012年における世界のウラン供給の37%を占める。 しかし、ウラン転換、濃縮、燃料加工工場がなく原子力発電所をもたないため、

- ・ 原子力工業(ウラン供給量の増強、転換・濃縮、燃料ペレット、燃料要素製作)
- ・ 原子力エネルギー開発
- 基盤技術開発と原子力科学
- · 環境科学
- の分野の開発を推進するとしている。

今後のエネルギー需要の増大に応えるため以下の原子力エネルギー導入を検討している。

- ・ 第1ステージ ; generation III, III+ (PWR, BWR)
- ・ 第2ステージ ; generation IV (FBR、HTGR)
- ⑥ ポーランド

1982 年から 1990 年までに 4 基の原子力発電所建設が計画されたが、チェルノブイリ原子力発電所事故の影響と石炭が豊富であることから計画は頓挫。

今後はエネルギー需要増加、グリーンハウスガス削減(1990 年レベルの 20%)、2030 年までに2 又は3 基の原子炉の建設(EPR,AP1000 又は異なる型式の PWR)を計画。そのうち1基は、2023 年までに建設を完了する計画。表 11 に 2030 年度におけるポーランドのエネルギーミックスを示す。エネルギーの主体は石炭であるが、将来は17%の原子力エネルギーを想定。

⑦ タイ

- ・ エネルギー政策
 - 十分で安定な電気エネルギーの供給
 - エネルギー工業への補助

- エネルギーコストの低減
- 再生エネルギーへのサポート
- 新エネルギーの導入
- エネルギーミックス

表 12 に 2012 年のエネルギーミックスを示す。タイにおけるエネルギーの主体は天然ガスと石炭であり、それに次いで水力となっている。

- · 将来計画
 - 石炭火力発電所1基(600MW)の建設
 - コジェネレーション(ガスタービンと蒸気タービン)
 - 原子力発電所の導入(2026年~2027年に1,000MWのプラントを2基) 原子力発電所の導入に向け、福島第一原子力発電所事故からの教訓を含め 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について検討する。

4.4 実施結果

研修の様子を図 8 に示す。研修後に研修期間、提供したテキスト、実習を含む講義の内容、施設見学などの満足度についてアンケートを行った。アンケート結果は表 13 に示すとおり、全て「非常に良い」又は「良い」との回答であった。これは、過去の研修結果を踏まえて改善してきた成果であると考えられる。

参加者は、学生、研究者、技術者であり、個々の専門分野もまちまちであったが、研修態度は極めて真摯であり、講義に関する質疑も積極的であった。これは、参加者がそれぞれ自国の産業発展に原子力エネルギー開発が重要であるとの強い認識を持っているとともに、関心の高い福島第一原子力発電所事故をカリキュラムに加えたこと、先進的な照射試験研究と関連技術の講義や実務体験型実習を分かりやすく工夫して実施したことによるものと考えられる。

研修の最後には「各国の研究用原子炉の現状と将来計画」及び「各国のエネルギー戦略」をテーマに発表及び討論を行った。研究用原子炉の利用に関しては小型の研究用原子炉しか所有しない国においてもRI製造や放射化分析等の基礎研究に加えて、発電用原子炉の基盤となる材料の照射損傷基礎研究の必要性を求める者が多かった。アルゼンチン、ポーランド及びインドネシアを除いて材料の実証試験に対応できるような研究用原子炉を有していないことから、照射試験炉利用に関して日本を含めた国際協力が必要であることが再認識できた。

エネルギー戦略については、福島第一原子力発電所事故の経験を経てもなお、安定エネルギー源としての原子力の必要性を主張している点で各国共通であったが、福島第一原子力発電所事故の影響は少なからずあり、日本における当該事故の原因究明と廃止措置に関する世界への情報公開の重要性を改めて認識することとなった。この観点からも原子力エネルギーを必要としている国々の人材育成に貢献するための本研修の重要性はますます高まっていると考えられる。

5. 最先端研究基盤 JMTR 及び関連研究施設を用いた研修講座

5.1 概要

照射試験炉センターでは、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観点から、国内の若手研究者・技術者を対象とした「最先端研究基盤 JMTR 及び関連研究施設を用いた研修講座(以下、「国内若手研修」という。)」を新設した ¹⁵⁾。本研修講座は、文部科学省の平成 22 年度「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、平成 22 年 11 月 15 日に採択されたものであり、平成 22 年度から平成 24 年度にかけて本事業の一環として研修を実施している ¹⁶⁾。なお、本研修は参加した学生の大学や高等専門学校の大半でインターンシップ研修として認定され、申請により単位化が可能になっている。

平成25年度は、その成果及び経緯を基に、福島第一原子力発電所事故後に特に課題となっている今後の原子力技術者の不足を鑑みて、国内の原子力人材の確保の裾野拡大及び育成を目的として研修を行うこととした。カリキュラムの策定にあたっては、福島第一原子力発電所事故を踏まえ、放射性物質及び原子炉の安全管理に重点をおいた。また、高等専門学校生、大学生及び若手社会人といった広範な参加者を受け入れることとしたため、基礎講座と体験型実習に重点をおいた。策定した研修のカリキュラムを表 14 に示す。研修に使用した資料の内容は、基本的に海外若手研修のものと同様である。海外若手研修にはない研修項目の内容について表 15-1~表 15-2 に示す。カリキュラムにしたがって7月29日から8月9日に研修を行い、計18名の国内若手研究者・技術者が参加した。

5.2 参加者

本研修を開始した平成 22 年度は、大学生が 10 名参加した。次年度からは、大学生の他に高等専門学校生及び社会人が参加し、平成 23 年度は 35 名、平成 24 年度は 35 名、そして平成 25 年度は 18 名が参加した。平成 25 年度の参加者の年齢は、18 才から 29 才で、専門領域は、電気電子、機械、建設及び原子力システム等と広範であった。平成 22 年度から 25 年度までの参加者を表 16-1~表 16-4 に示す。

5.3 総合討論

(1) テーマと実施要領

福島第一原子力発電所事故以降の原子力発電に関する国内の状況を鑑みて、研修の最後に ①日本のエネルギー戦略、②原子炉の安全と再稼働をテーマとして総合討論を実施した。それぞれの進め方は以下のとおりとした。

① 日本のエネルギー戦略

日本の今後のエネルギー源がどうあるべきかについて、1) 安価、安全、安定、地球環境保

護、2) エネルギーの安全保障、3) エネルギー消費の合理化(消費量の削減)、4) エネルギーの高効率化をサブテーマとして、グループ討論を行い、結果をまとめて代表者が発表し、発表内容について全員で討論する方式で実施した。なお、1グループ3名の6グループとし、発表と討論を併せて1グループあたりの時間を10分とした。

② 原子炉の安全と再稼働

人類はこれまで原子力に関していくつかの過酷事故を経験してきた。日本においても 1999 年の JCO の臨界事故、2011 年の福島第一原子力発電所事故を経験した。福島第一原子力発電所事故以後においても世界の多くの国では原子力発電の継続と新導入を目指している国が少なくない。日本では福島第一原子力発電所事故の経験を踏まえ、原子炉に関する新規制基準を制定し、本基準に沿って審査を行った上での再稼働を目指している。

以上のことを踏まえ、本研修の最後に原子炉の安全と再稼働に向けた動向に関して参加者 が個々に意見を発表しあい、討論を行った(意見発表;3分、討論;1分)。

(2) 討論結果

① 日本のエネルギー戦略

日本のエネルギー戦略についてグループごとに検討し、発表した内容をサブテーマごとに表 17-1~表 17-5 に示す。本サブテーマはあらかじめ参加者に与えたものと異なるが、ここでは、発表結果から分類してまとめた。討論では、福島第一原子力発電所事故を経験したものの原子力の安全性について、6グループともその後の厳しい新規制基準の制定と安全審査の着手という状況から肯定的な意見であった。むしろ原子力に関しては事故以前から課題であった廃棄物の処理・処分問題に大きな課題があるとの主張が多かった。また、地球環境の保全や安価で安定したエネルギー源の確保に関して、再生可能エネルギーや化石燃料には、経済性やエネルギー規模の観点から課題があると考えている点も共通意見として示された。

② 原子炉の安全と再稼働

再稼働に関しては、参加者全員が新規制基準の制定とこれに基づく安全審査を経て安全が確認された原子炉について容認するという意見であった。その背景として、原子力発電を地球温暖化対策に有効な現実的エネルギー源と捉える一方、再生エネルギー源について現時点では経済性と安定性に課題があると考えている点が挙げられた。一方、エネルギー消費を抑える社会づくりとエネルギー効率を上げる技術開発の重要性や今後の原子力技術者不足への懸念等についての意見もあった。

5.4 実施結果

研修の様子を図 9 に示す。研修後に研修の難易度、理解度、研修期間、施設見学などについてアンケートを行った。アンケート結果は表 18 に示すとおり、研修内容については「良く理解できた」 又は「まあまあ理解できた」という回答が約 80%に達したことから、本研修を通じて、原子力施設の安全管理、照射試験炉の運転及び原子炉内での中性子のふるまいについての理解が深まったこ とが確認できた。参加者のうち、原子力関係の学生と技術者は全体の 40%弱であったことを考慮すると、昨年度までの経験により、JMTR、JMTR HL、照射試験炉シミュレータ等を活用した実務実習を重視し、講義は原則としてそのための基礎知識習得に特化するなど、カリキュラムを改善した成果と考えられる。一方、一部の参加者から「基礎学力が不足していた」、「基礎的な講義を増やしてほしい」という意見もあったことから、さらに研修内容に工夫が必要と考える。

「日本のエネルギー戦略」と「原子炉の安全と再稼働」をテーマに総合討論を実施した結果、参加者からは、福島第一原子力発電所事故の経験を踏まえて、原子力、化石燃料や再生可能エネルギーについて冷静な判断のもとに意見が述べられた。また、今後の原子力技術者不足についても心配しており、将来は原子力関係に進みたいと考えている者もいた。

また、本研修では大学・高専生から社会人まで全国から幅広く参加し、参加者同士の協力による実習等を通じて短期間ながら深く交流し、研修後も交流が続いていることから、原子力分野に限らず、技術及び情報のつながりを形成できる非常に有効な機会を提供することもできた。

以上から、原子力人材確保のための裾野拡大及び育成を目的とした本研修を継続することの重要性を再認識した。

6. まとめ

照射試験炉センターでは、昨年度に引き続き、JMTR 及び関連施設を用いた実践的な体験型研修を実施した。海外若手研修に関しては平成25年7月8日から7月26日にかけて実施し、7カ国から計18名が参加した。また、国内若手研修に関しては平成25年7月29日から8月9日にかけて実施し、国内の高等専門学校生、大学生、若手社会人の計18名が参加した。

海外若手研修では、アンケート結果から研修に対する満足度が非常に高いことが確認できた。 総合討論においては、各国の参加者から東京電力福島第一原子力発電所事故を経てもエネルギー安定供給の観点から原子力が必要であること、そのための原子力人材の育成が急務であることなどの意見があった。

国内若手研修では、アンケート結果から原子力施設の安全管理、照射試験炉の運転及び原子 炉内での中性子のふるまいなどについての理解が十分に深まったことが確認できた。また、参加 者の中には、将来原子力関係に進みたいと考えている者もいた。

以上の結果を踏まえ、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、引き続き本研修を実施していく計画である。

謝辞

本報告書の作成に際し、内容について貴重なご意見を頂きました藤本望高温工学試験研究炉部研究主席及び前田茂貴高速実験炉部高速炉技術課研究副主幹に深く感謝するとともに、本研修の計画及び実施にご尽力いただいた鈴木惣十大洗研究開発センター所長、荒木政則照射試験炉センター長、大岡誠計画調整課長及び谷本政隆計画調整課長代理に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 独立行政法人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.
- 2) IAEA, Research Reactors, http://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx, (2013).
- 3) N. Takemoto, N. Sugaya, K. Ohtsuka et al., Simulator for Materials Testing Reactors, JAEA-Technology 2013-013, (2013).
- 4) 前田 幸基他, 高速実験炉「常陽」MK-Ⅲ性能試験総合報告書, JNC-TN9410 2003-011 (2004).
- 5) 大川内 靖他, 高速実験炉「常陽」の原子炉シミュレータを用いた高速炉物理実験, JAEA-Technology 2009-047, (2009).
- 6) International Energy Agency, Electricity Information 2010, (2010).
- H. Blaumann, A. Vertullo, F. Sánchez, F. Brollo, J. Longhino, RA-10: A New Argentinian Multipurpose Research Reactor, International Conference on Research Reactors: Safe Management and Effective Utilization, (2011).
- 8) P. Baeten, MYRRHA Project status update, ESNII Conference, Advanced fission research in Horizon 2020, (2012).
- 9) Kevin Charlton, The PALLAS Research and Isotope Reactor Project Status, Meeting on the Security of Medical Radioisotopes in EU Member States, (2010).
- 10) 今泉 友見, 宮内 優, 伊藤 正泰他, 汎用小型試験研究炉の概念検討 —平成22年度活動報告—, JAEA-Technology 2011-031, (2012).
- 11) 綿引 俊介, 花川 裕規, 今泉 友見他, 汎用小型試験研究炉の概念検討 —平成23年度活動報告—, JAEA-Technology 2013-021, (2013).
- 12) J.F.BRIESMEISTER, (Ed.), MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Cord, Version 4B, LA-12625-M, (1997).
- 13) 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).

- 14) Training Program for Students and Young Engineers in JMTR, N. Takemoto, H. Izumo, N. Hori, E. Ishitsuka, M. Suzuki, Proceedings of the 4th International Symposium on Material Testing Reactors, JAEA-Conf 2011-003, pp. 265-269, (2012).
- 15) 今泉 友見, 竹本 紀之, 出雲 寛互他, 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).
- 16) 木村 伸明, 竹本 紀之, 大岡 誠他, 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).

表1 JMTR HL の最大取扱放射能

	遮へい体		最大取扱放射能	
	材料	厚さ	取八双拟双羽形	
コンクリートセル				
No.1, 2 セル	重コンクリート	1.1 m	33 PBq (1MeV)	
No.3 セル	重コンクリート	1.0 m	3.7 PBq (1MeV)	
No.4, 5 セル	重コンクリート	1.0 m	1.1 PBq (1MeV)	
No.6~8 セル	重コンクリート	1.0 m	85 TBq (1MeV)	
顕微鏡用鉛セル	硬質鉛	17.8 cm	3.7 TBq (1MeV)	
材料試験用鉛セル				
No.1 セル	硬質鉛	20 cm	1.3 TBq (Co-60 相当)	
No.2~7 セル	硬質鉛	15 cm	37 GBq (Co-60 相当)	
材料試験用鉄セル				
No.1, 3, 4, 5 セル	炭素鋼	35 cm	666 GBq (Co-60 相当)	
No.2 セル	炭素鋼	40 cm	5.9 TBq (Co-60 相当)	

表 2 研修項目

区分	研修項目	区分	研修項目
	JAEA、大洗研究開発センター		JMTR
	世界の発電炉		「常陽」、「常陽」原子炉シミュレータ
	世界の照射試験炉		HTTR、水素製造試験装置
	汎用小型試験研究炉概念検討		環境監視盤
++- +++	高温ガス炉	施設	緊急時対策室
基礎講義	東京電力福島第一原子力発電所事故	見学	JRR-3
四件才交	原子炉物理の基礎		J-PARC
	放射線管理		RI 製造施設
	JMTR の運転管理		ガラスバッチ測定被ばく評価施設
	照射試験概要		日本原子力発電株式会社
	原子炉の利用		
	核計算実習		
	熱設計実習		
体験型	照射後試験実習		
実習	中性子照射量評価実習		
	照射試験炉シミュレータ運転実習		
	環境放射線測定実習		

表 3 計画されている新たな研究用原子炉^{2),7),8),9)}

国	原子炉名	出力 [MW]		子束 cm ⁻² s ⁻¹] 高速	型式
		建設中			
アルゼンチン	CAREM25	100	_	_	PWR
フランス	JULES HOROWITZ	100	5.5	10	Tank in Pool
,,,,,,	RES	100	_	_	PWR
		計画中			
アルゼンチン	RA-10	30	_		Pool
ブラジル	RMB	30	2	2	Pool
韓国	KJRR	20	3	_	Pool
オランダ	PALLAS	30~80	_		<u> </u>
ベルギー	MYRRHA	50~100	_		加速器ドライブ
ウクライナ	Multipurpose RR	20	_	2	Pool

表 4 汎用小型試験研究炉の設計仕様 10),11)

項目	設計仕様
炉型	プール型
熱出力	10 MW
冷却材	軽水
減速材	軽水
高速中性子束	約 $1 \times 10^{18} \text{ n/(m}^2 \cdot \text{s)}$ (E > 1 MeV)
燃料	板状燃料、棒状燃料
制御棒	ハフニウム
反射材	ベリリウム、アルミニウム
冷却材流量、方向	約 1,200 m³/h、 下降流
冷却材温度	入口温度約 42℃ 出口温度約 50℃
稼働率	約 70%
主な用途	医療用 RI·工業用 RI 製造 教育訓練

JAEA-Review 2013-058

表 5 平成 25 年度海外若手研修カリキュラム

月日		午 前	午後			
7月7日	日	来日				
7月8日	月	入所手続き、オリエンテーション	JAEA、大洗研究開発総合討論のセンター説明		説明	
7月9日	火	世界の発電炉、世界の照射試験炉		汎用小炉の概念	型試験研究 念検討	環境監視盤の 見学
7月10日	水	原子炉の利用	ЈМТ	Rの見学	:	JMTR の 運転管理
7月11日	木	原子炉物理の基礎	東京	電力福島	高第一原子力 ²	発電所事故
7月12日	金	照射試験概要		町の 組み	照射試験概	要
7月16日	火	核計算実習	常陽	の見学	核計算実習	
7月17日	水	核計算実習				
7月18日	木	熱設計実習				
7月19日	金	熱設計実習	被ば<線量評価施設の 見学			
7月22日	月	日本原子力発電(株)の見学	JRR-3、RI 製造施設、J-PARC の見学			
7月23日	火	照射試験炉シミュレータ運転実習(A 班)				
照射後試験実習(B班) HTTR、水素製造施見学(B班)		製造施設の				
照射試験炉シミュレータ模擬運転実習(B班) 7月24日 水		()				
/月 24 日 八		照射後試験実習(A 班)		HTTR、水素 見学(A 班)	製造施設の	
7月25日	木	高温ガス炉総合討論				
7月26日	金	総合計論	修了式、退所手続き			
7月27日	土	帰 国			•	

表 6-1 海外若手研修資料の概要 その1

【研修項目;JAEA、大洗研究開発センター】

資料名	内容
Present Status of the Japan Atomic Energy Agency	Situation Surrounding JAEA Trends of JAEA Major Project JAEA Efforts Related to the Accident at TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station
Center of Irradiation Test (Oarai and Tokai Area)	The Field of Neutron Irradiation Test Standard Process of Neutron Irradiation Research Main Facilities for Neutron Irradiation Research in Japan Neutron Irradiation Research Facilities in Tokai & Oarai Area Tokai & Oarai Area Main Facilities for Irradiation Test Research Research Reactors(RRs) in Tokai Area Hot Laboratories (HLs) in Tokai Area RRs & HLs in Oarai Area 6. Cooperation of RRs & HLs in Oarai Area

表 6-2 海外若手研修資料の概要 その 2

【研修項目;世界の発電炉】

資料名	内容
Power Reactors in the World (Nuclear Electricity Production)	Nuclear Power Reactor in the World Electricity Shear Reactor Age Reactor Shutdown and Construction Reactor Type Generation to Generation HTGR

表 6-3 海外若手研修資料の概要 その 3

【研修項目;世界の照射試験炉】

資料名	内容
Research Reactors in the World	1. What is Research Reactor 2. Utilization of Research Reactor 3. Current Status of RRs in the World 4. Short Tours to RRs 5. Short Tours to JAEA RRs 6. New Construction of RRs in the World 7. Summary

表 6-4 海外若手研修資料の概要 その 4

【研修項目;汎用小型試験研究炉概念検討】

資料名	内容
Conceptual Design Study of Multipurpose Compact Research Reactor	Main role of Multipurpose Compact Research Reactor Facility can be Respond to Various Requests Design Study Items and Analysis Major Specification Irradiation Facilities Cooling System and Safety System Hot Laboratory

表 6-5 海外若手研修資料の概要 その 5

【研修項目;高温ガス炉】

資料名	内容
History and Current Status of HTGR Development	Evolution of HTGR Designs Including Licensing and Operational Experience Overview of Current HTGR Design Concepts NGNP Project
HTTR Test Plan	 HTTR Facility Objectives Scope of Work Test Approach Phenomena Examined Main Measurement Data Closing Remarks
HTGR Nuclear Design	 Introduction Outline of a Small-sized HTGR (HTR50S) Design Requirement Nuclear Design Results Summary and Future Work
Prismatic HTGR Core Thermal Design, Safety Design & Evaluation	 HTGR System, Reactor & Core Core Thermal Design Safety Design Safety Evaluation
HTGR Fuel	1. Basics of HTGR Fuel 2. Fuel in HTTR 3. Recent Trends of R&D of HTGR 4. Summary
HTGR Material	1. Outline 2. Graphite Material 3. Metallic Material
Nuclear Powered Hydrogen Productions and Heat Applications	Conversion of Nuclear Energy into Hydrogen Methods of Nuclear Powered Hydrogen Production Application Harnessing HTGRs' Energy

表 6-6 海外若手研修資料の概要 その 6

【研修項目;東京電力福島第一原子力発電所事故】

資料名	内容				
Fukushima Dai-ichi Accident - Overview and Lessons Learned -	 What is the Severe Accident? Plant Summary Accident Summary (Cause and Progression) What Was the Countermeasure Taken Before? Why Was It Not Enough and What Is the Fundamental Cause? What is the Core and Dirty Water? Prospect for the Plant Decommission Massive Release of Radioactive Materials Decontamination of Affected Area Lessons Learned and Restart Plan of NPP 				

表 6-7 海外若手研修資料の概要 その 7

【研修項目;原子炉物理の基礎】

資料名	内容			
Reactor Physics	Nuclear Reaction Interaction by Neutron, Cross Section of Neutron Reaction Composition of Nuclear Reactor, Fission Process Four-factor formula, Six-factor Formula Neutron diffusion, Buckling Reactor kinetics, etc.			

表 6-8 海外若手研修資料の概要 その 8

【研修項目;JMTR の運転管理】

資料名	内容			
Outline of JMTR	Engineering Data and etc.			
Operation Management of JMTR	1. System of Law for Research Reactor 2. Safety Regulation of Research Reactor 3. Operation Procedure 4. Checking Safety Action and Facilities 5. Core Handling 6. Reactor Core Arrangement 7. Excess Reactivity Measurement 8. Control Rods Reactivity Measurement 9. Operation Procedure			

表 6-9 海外若手研修資料の概要 その 9

【研修項目;照射試験概要】

資料名	内容			
Essential to Irradiation Test by Testing Reactor - Behavior of Material and Fuel under Irradiation-	 Applications of Research Reactor Material and Fuel Performance in Reactor Radiation Effects and Damage Project Research on Power Reactor Summary of Irradiation Technology 			
JMTR Irradiation Facilities and Technologies	Basic Ability Level of JMTR in the World Application of Research Reactor Outline of JMTR Combination of the Reactor and Hot Laboratory Irradiation Facilities Some Control by Capsules Instrumentation Summary of Control and Instrumentation			
PIE Technology of JMTR HL 1. Hot Laboratory for PIE & Re-irradiation 2. Design and Main Device of JMTR HL 3. PIE Technology 4. In-situ Test 5. Mo/Te Production 6. Re-fabrication & Re-instrumentation				
Essential to Irradiation Test by Testing Reactor - Behavior of Material and Fuel under Irradiation-	Applications of Research Reactor Material and Fuel Performance in Reactor Radiation Effects and Damage Project Research on Power Reactor Summary of Irradiation Technology			

表 6-10 海外若手研修資料の概要 その 10

【研修項目;原子炉の利用】

資料名	内容				
Industrial/medical Application of MTR/RR in Japan	Economic Scale of Radiation Application Industrial/medical Application Outline of Radioisotope (RI) Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) Production of Si Semiconductor				
Principle of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)	Outline of JRR-4, Status of Reactor Based BNCT, Development of Accelerator based BNCT facility, etc.				
Statistics on the Distribution of Radioisotopes in Japan					

表 6-11 海外若手研修資料の概要 その 11

【研修項目;核計算実習】

資料名	内容			
Training of Neutronic Calculation	Calculation Code Introduction of Monte Carlo Method Criticality Calculation about Simple Geometry Neutronic Calculation for Irradiation Test			

表 6-12 海外若手研修資料の概要 その 12

【研修項目;熱設計実習】

資料名	内容
Training of Thermal Calculation	Irradiation Facilities Calculation Model GENGTC Code Practice

表 6-13 海外若手研修資料の概要 その 13

【研修項目;照射試験炉シミュレータ運転実習】

資料名	内容				
Simulator for Materials Testing Reactors	1. Hardware Overview 2. Core Calculation Model 3. Cooling System Calculation Model 4. Simulator /Software 5. Reactor Instrumentation and Control System 6. Typical Safety Action 7. Simulated Operation Using Simulator 8. Function of Instructor Control Panel 9. Typical Malfunction 10. Operation Procedure				

表 7-1 平成 23 年度海外若手研修参加者

国名	所属	性別	年齢
	アルファラビカザフスタン国立大学物理学部	女	21
	アルファラビカザフスタン国立大学物理学部	男	21
カザフスタン	アルファラビカザフスタン国立大学物理学部	男	19
	アルファラビカザフスタン国立大学物理学部	男	22
	アルファラビカザフスタン国立大学物理学部	男	21
	タイ原子力技術研究所原子炉管理部	女	34
	タイ原子力技術研究所宝石照射センター	女	26
タイ	タイ電力公社熱電力建設部	男	27
	タイ電力公社原子力部	女	28
	チュラロンコン大学原子炉工学部	女	27
	合計	10:	名

表 7-2 平成 24 年度海外若手研修参加者

国名	所属	性別	年齢
	アルファラビカザフスタン国立大学物理学部	女	20
	アルファラビカザフスタン国立大学物理学部	男	21
カザフスタン	アルファラビカザフスタン国立大学物理学部	男	22
	アルファラビカザフスタン国立大学物理学部	男	21
	アルファラビカザフスタン国立大学物理学部	男	20
	タイ電力公社原子力部	男	28
タイ	チュラロンコン大学工学部	女	27
	カセサート大学RI応用学科	男	25
	マレーシア原子力庁工業技術部	男	26
マレーシア	マレーシア原子力庁原子力部	男	29
	UNITEN大学機械工学科	女	29
	インドネシア原子力庁	男	29
インドネシア	インドネシア原子力庁	男	25
	インドネシア原子力庁	女	28
ポーランド	ポーランド国立原子力研究センター原子力部	男	25
	ポーランド国立原子力研究センター研究炉技術部	男	29
	合計	16:	名

表 7-3 25 年度海外研修参加者

国名	所属	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物理学部	男	20
	アルファラビカザフスタン国立大学物理学部	女	20
<i>NY 7.</i> 792	アルファラビカザフスタン国立大学物理学部	男	20
	アルファラビカザフスタン国立大学物理学部	男	21
	タイ電力公社原子力部	男	27
タイ	チュラロンコン大学工学部原子力科	男	24
	カセサート大学理学部RI応用科	男	24
	マレーシア原子力庁技術部	男	29
マレーシア	マレーシア原子力庁企画国際部	男	29
	マレーシア原子力庁技術支援部	男	30
カルウンフ	インドネシア原子力庁RI及びRI薬品センター	男	25
インドネシア	インドネシア原子力庁研究炉センター	男	29
18 5 19	ポーランド国立原子力研究センター研究炉運転部	男	31
ポーランド	ポーランド国立原子力研究センター研究炉運転部	男	29
	ベトナム原子力研究所核研究所 RI研究・製造センター	女	25
ベトナム	ベトナム原子力研究所非破壊評価センター	男	24
	ベトナム原子力研究所放射能・希少元素研究所	男	24
アルゼンチン	アルゼンチン原子力委員会熱水力部	男	25
	合計	18:	名

表 8 参加者各国の研究用原子炉の現状

国名	原子炉名	出力	初臨界	利用目的
	RA-0	1W	1965	教育訓練、基礎研究
	RA-1	40kW	1958	基礎研究、放射化分析、材料試験
アルゼンチン	RA-3	10MW	1968	RI 製造、放射化分析、材料照射試験、Si 半導体製造
	RA-4	1W	1972	教育訓練、基礎研究
	RA-6	500kW	1982	教育訓練、基礎研究、中性子ラジオ グラフィ、放射化分析、BNCT、Si 半 導体製造
	RSG	30MW	1987	RI 製造、材料照射等
インドネシア	TRIGA2000	259KW	1964	RI製造、教育訓練、中性子ラジオグ ラフィ
	Kartini Reactor	250kW	1979	
カザフスタン	WWR-K	6MW	1967	核物理、中性子ラジオグラフィ、放 射化分析、RI 製造、材料試験、Si 半導体製造
	IMG.1M	72MW(パルス炉)		燃料·材料照射
マレーシア	RTP	1MW	1982	教育訓練、RI製造、非破壊検査
ポーランド	MARIA	30MW	1974	RI製造、中性子ビーム利用研究、Si 半導体製造、放射化分析、中性子 ラジオグラフィ、燃料・材料照射
タイ	TRR-1/M1	2MW	1977	放射化分析、RI 製造、中性子ラジ オグラフィ、教育訓練
	未定	2000MW パルス		
ベトナム	DNRR	500KW	1963	教育訓練、RI製造、放射化分析、Si 半導体製造、ビーム利用研究

表 9 ベトナムのエネルギーミックス

種類	2010年	2020年
新エネルギー、再生エネルギー	3	4
原子力	0	2.9
水力	36.2	31.5
石炭	23.6	19.2
石油	5.6	3.5
輸入	0	8.4

表 10 インドネシアのエネルギーミックス

	種類	2005年	2010年	2015年	2020年	2025 年
石油		54.8	44.9	37.0	26.7	19.6
石炭		16.8	17.2	22.4	32.8	33.8
天然ガス		2.3	29.7	24.4	21.0	25.6
メタン(石炭起	冠源)	0.0	0.0	1.5	3.3	3.9
水力		3.6	3.4	3.6	2.7	2.0
地熱		2.5	1.9	4.0	5.1	5.2
原子力		0.0	0.0	0.0	1.2	1.7
新エネルギー	- 、 再生エネルギー	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5
バイオ		0.0	2.7	5.7	4.5	5.1
石炭の液化		0.0	0.0	1.1	2.1	2.5
合計	Million Barrel Oil	956.5	1226.1	1562.1	2266.9	3252.2
エネルギー	2005 年対比	1.0	1.3	1.6	2.4	3.4

表 11 ポーランドのエネルギーミックス

種類	2030年の割合(%)
褐炭	33
石炭	21
ガス	10
石油	1
原子力	17
バイオマス	4
バイオガス	2
水力	1
風力	10

表 12 タイのエネルギーミックス

種類	現状の割合(%)
天然ガス	66.5
石炭	18.5
水力	10.7
再生エネルギー	3.0
石油	1.2
その他	0.1

表 13 海外若手研修のアンケート結果

評価[%]	非常に良い	良い	普通	悪い	非常に悪い
研修期間	50	39	6	6	0
興味又は価値	65	24	12	0	0
テキスト	67	33	0	0	0
講義の内容	39	50	11	0	0
施設見学	83	17	0	0	0
主な意見	知識が得られ、仕事に有益であった。 原子力に関する新しい知見が得られた。 高度な技術に関する新しい知見が得られた。 革新的な原子力技術を学べた。 原子炉に関する基礎知識がなく理解が困難であった。 カリキュラムは良かったが、現在の仕事への応用が限定的であった施設見学が良かった。 3 種類の原子炉の違いを学べたことが良かった。 ラマダン期間は避けて欲しい。 研修期間としては1ヶ月が欲しい。				あった。

表 14 平成 25 年度国内若手研修カリキュラム

月日	1	9:10-10:30	10:40-12:00	13:10-14:30	14:40-	-16:00	16:10-17:30
7/29	月	入所手続き、 オリエンテーション	JAEA、大洗研究 開発センター	世界の発電炉 世界の照射試験炉		東京電力 発電所事	□福島第一原子力 □故
7/30	火	施設見学 (常陽・常陽シミュレータ	·)	高温ガス炉			施設見学(HTTR ·水素製造施設)
7/31	水	放射線管理 (環境放射線測定実習、環境監視盤・緊急時対策室の見学含む) 照射記			照射試験	概要	
8/1	木	原子炉物理の基礎	* E	施設見学 (JMTR)			JMTRの 運転管理
8/2	金	熱設計実習					
8/5	月	核計算実習					
8/6	火	照射試験炉シミュレータ模擬運転実習(A班)					
8/6	火	中性子照射量 評価概要(B班)	原子炉の利用 (B班)	照射後試験実習(B班)		
8/7	水	照射試験炉シミュレータ模擬運転実習(B班)					
8//	八	中性子照射量 原子炉の利用 照射後試験実習(A班) 評価概要(A班)					
8/8	木	中性子照射量 評価実習(A班)	エネルギー政策 (A班)	/杜-□□=基 /字	₩ Δ = 1 = Λ	_	
0/0	小	エネルギー政策 (B班)	中性子照射量 評価実習(B班)	特別講演	総合討論		
8/9	金	総合討論	修了式、 退所手続き				

表 15-1 国内若手研修資料の概要 その 1

【研修項目;放射線管理】

1. 放射線の概要 (1)放射線の特徴と身のまわりの放射線について (2)放射線による健康影響について 放射線取扱概要 2. 放射線管理 (1)測定装置の種類 (2)放射線の防護方法	資料名	内容
3. 福島第一原子力発電所事故の影響	放射線取扱概要	(1)放射線の特徴と身のまわりの放射線について(2)放射線による健康影響について2. 放射線管理(1)測定装置の種類(2)放射線の防護方法

表 15-2 国内若手研修資料の概要 その 2

【研修項目;中性子照射量評価実習】

資料名	内容
中性子照射量評価概要	オンライン測定(SPND) 積分型測定(放射化法(F/M)) ガンマスペクトル測定 測定結果からの中性子照射量評価方法

表 16-1 平成 22 年度国内若手研修参加者

	所属	学部等	学年	人数
	長岡技術科学大学	電気電子情報工学課程	学部3年	7
大学	長岡技術科学大学大学院	電気電子情報工学専攻	修士1年	1
人子	茨城大学	工学部知能システム工学科	学部2年	1
	東海大学	工学部エネルギー工学科	学部4年	1
			合計	10

表 16-2 平成 23 年度国内若手研修参加者

	所属	学部等	学年	人数
	長岡技術科学大学	機械創造工学課程	学部4年	1
	茨城大学大学院	理工学研究科知能システム工学専攻	修士1年	1
	東海大学	工学部エネルギー工学科	学部4年	2
	東海大学大学院	工学研究科応用理学専攻	修士1年	1
大学	東海大学大学院	工学研究科応用理学専攻	修士2年	1
	東北大学大学院	工学研究科量子エネルギー工学専攻	修士1年	8
	室蘭工業大学	工学部機械航空創造系学科	学部3年	1
	室蘭工業大学院	工学研究科機械創造工学系専攻	修士1年	2
	東京都市大学大学院	工学研究科共同原子力専攻	修士1年	2
高東	八戸高専	機械・電気システム工学専攻	専攻1年	3
向号	八戸高専	電気・機械システム工学専攻	専攻1年	1
	イビデン株式会社	セラミック開発部	_	1
	東海カーボン株式会社	開発戦略本部開発企画部	_	1
	株式会社アート科学	研究開発部	_	1
	東洋炭素株式会社	開発部	_	1
V **	新日本テクノカーボン	生産技術本部技術管理部	_	1
企業	株式会社千代田テクノル	原子力事業本部	_	1
	株式会社千代田テクノル	大洗研究所	_	1
	日本アドバンスドテクノロジー(株)	加速器部	_	1
	伊藤忠テクノソリューションズ(株)	科学システム開発部	_	1
	原子燃料工業株式会社	技術開発部	_	3
			合計	35

表 16-3 平成 24 年度国内若手研修参加者

	所属	学部等	学年	人数
	長岡技術科学大学大学院	原子力システム安全工学専攻	修士1年	7
	茨城大学大学院	理工学研究科機械工学専攻	修士1年	3
	東海大学	工学部 原子力工学科	学部3年	1
_L, 224	東北大学	機械知能・航空学科量子エネルギー専攻	学部4年	1
大学	室蘭工業大学	工学部機械航空創造系学科	学部4年	1
	室蘭工業大学院	工学研究科機械創造工学系専攻	修士1年	3
	東京都市大学	工学部原子力安全工学科	学部3年	1
	福井大学	工学部機械工学科	学部4年	1
	福島高専	機械工学科	学科4年	2
	八戸高専	建設環境工学科	学科5年	2
	八戸高専	建設環境工学専攻	専攻1年	1
	八戸高専	専攻科物質専攻	専攻1年	1
高専	八戸高専	電気・機械システム工学専攻	専攻1年	1
	旭川高専	機械システム工学科	学科4年	1
	旭川高専	物質化学工学科	学科4年	1
	鹿児島高専	機械・電気システム工学専攻	専攻1年	1
	長岡高専	機械工学科	学科4年	1
	東洋炭素株式会社	黒鉛・炭素材料挙動評価特別グループ	_	1
V **	伊藤忠テクノソリューションズ(株)	科学システム開発部	_	1
企業	日本核燃料株式会社	研究部	_	2
	原子燃料工業株式会社	技術開発部	_	2
			合計	35

表 16-4 平成 25 年度国内若手研修参加者

	所属	学部等	学年	人数
	長岡技術科学大学大学院	原子力システム安全工学専攻	修士1年	4
大学	東海大学	工学部 原子力工学科	学部3年	1
八子	東京都市大学	工学部原子力安全工学科	学部4年	1
	福井大学	工学部機械工学科	学部4年	2
	福島高専	建設環境工学科	学科4年	1
高専	旭川高専	制御情報工学科	学科4年	1
同守	旭川高専	電気情報工学科	学科4年	1
	奈良高専	電子制御工学科	学科5年	5
企業	(株)千代田テクノル	大洗研究所	-	1
正業	伊藤忠テクノソリューションズ(株)	科学システム開発部	_	1
			合計	18

表 17-1 総合討論発表内容その1

(サブテーマ;安価、安全、安定、地球環境保護)

グループ	主張内容
1	原子力は安価、安定 原子炉は自然循環による除熱能力を考えると安全 原子力について廃棄物による環境への影響はしょうがない。
2	安価、安定供給で原子力。ただし、再処理や自国での処分が必要。
3	エネルギーの多様化(火力発電、原子力発電、水力発電など幅広く利用)
5	原子力は発電効率がほかの再生可能エネルギーによる発電方法よりも高い。 原子力は安定してエネルギーを供給でき、発電コストも安い。 原子力は CO ₂ の排出が非常に少ない。
6	安価なエネルギー源は原子力と火力、安全なエネルギー源は自然エネルギー、安定な エネルギー源は原子力が圧倒的 地球環境保護という観点では自然エネルギーと原子力

表 17-2 総合討論発表内容その 2

(サブテーマ;エネルギーミックス)

グループ	主張内容		
1	1 夏、冬の需要量の増減を水力で調整		
3	k力、原子力、再生可能エネルギーの活用		
4	原子力 60%、火力 30%、水力・再生可能エネルギー10%ぐらいの比率が妥当		
5	日本は土地が少ないため再生可能エネルギーで発電するための土地の確保が難しい。		

表 17-3 総合討論発表内容その 3

(サブテーマ;エネルギー安全保障)

グループ	主張内容			
1	原料の産出国と友好な関係を築く。			
2	自国の技術力を海外に提供することで、燃料輸出国との関係を築く。			
4	原子力発電だけでなく火力などの他のエネルギー源を使うことで、リスクを分散させて、エネルギーの安定供給を図る。 発電量で比べると原子力発電用燃料の輸送は、火力発電で利用する天然ガスや石油の輸送に比べて安価である。 原子力発電用燃料は一回輸送すれば長く利用できるため世界情勢に左右されづらい。			
6	エネルギー自給率が悪く、外国に多くを頼らざるを得ない化石燃料から脱却し、 自然エネルギーの拡大と原子力の有効活用を図る。			

表 17-4 総合討論発表内容その 4

(サブテーマ;エネルギー消費の合理化・効率化)

グループ	主張内容			
1	エネルギー消費を増やさない社会の構築			
2	直段を高くする、消費ピークに合わせて電源調整、節電 高効率発電所を新設(LNG)、コジェネレーション 新しい世代の原子炉を実用化			
3	省エネルギー製品の開発			
4	石油や、天然ガスを発電に利用するのではなく、そのままストーブや自動車などに利用する方がエネルギー損失が小さい。			
4	エネルギーの利用を発電だけでなく、他の需要に対して供給することで発電時のエネル ギー損失を低減し、エネルギーを有効的に利用することが望ましい。			
6	スマートグリッド、省エネ家電等への補助、コジェネレーション、発電タービンの入口温度 上昇			

表 17-5 総合討論発表内容その 5

(サブテーマ;原子力について)

グループ	主張内容			
1	廃棄物の処理・処分に課題がある。			
2	再処理や自国での廃棄物処分が必要			
3	全面の強化(基準)が必要、海外への技術の売り込みが有効、使用済燃料処理・処分 果題			
4	原子力は、火力に対して燃料が安価で、安定した電力供給、CO2の排出量削減が可能。 水力発電については、今の日本ではダムが建造できる土地が少ない上、建造できたとしても環境破壊の問題がある。 太陽光発電は太陽光パネルの製造に大量の半導体が必要。また、広大な土地が必要で、土地の大きさに対する発電量が少ないため、現在の技術では費用対効果が小さいため推奨できない。			
5	メリット:技術を海外に輸出することができる。 デメリット:事故を起こした時の重篤度が高い、放射性廃棄物の処理方法が確立されていない。廃炉に長期間かかる。技術を継承する若者が少ない。 原子力発電を再開するためには、「民主・自主・公開」の徹底、原子力に関わる組織の体質改善、放射性廃棄物の処理方法確立が必要。また、一般市民に正しい知識を身につけてもらう必要がある。			
6	安価、安定、地球環境の保護の観点ではよいが、安全性に大きな問題を抱えている。			

表 18 国内若手研修アンケート結果

評価項目	評価結果[%]				
研修の難易度	簡単だった	適切だった	やや難しかった	難しかった	
	6	61	11	22	
研修の理解度	良く 理解できた	まあまあ 理解できた	あまり 理解できなかった	ほとんど 理解できなかった	
	45	33	11	11	
講師の説明及び	分かり易かった	まあまあ 分かり易かった	やや 分かりにくかった	分かりにくかった	
研修資料	50	44	6	0	
実施期間	短かった	適当だった	長かった		
	17	83	0		
施設見学	見学が 少なかった	適当 だった	見学が 多かった		
	0	100	0		
カリキュラム	良かった	適当だった	悪かった		
	56	33	11		

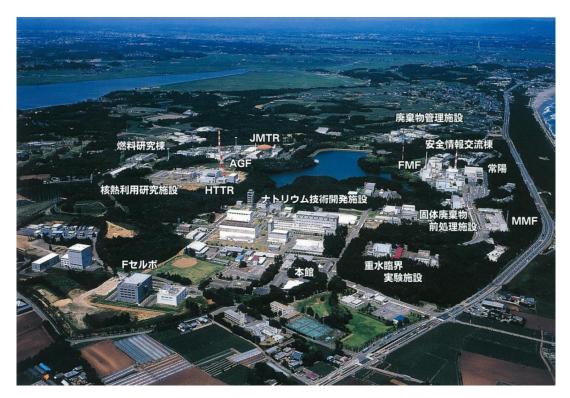


図1 JAEA 大洗研究開発センター¹⁾

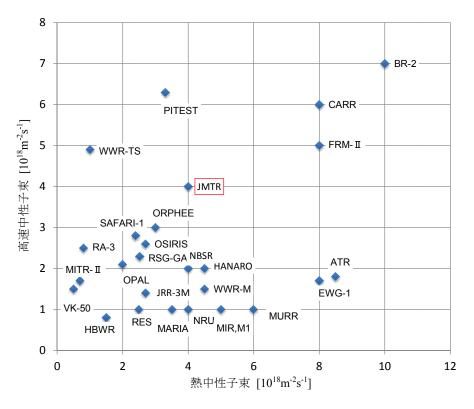


図2 世界の主要な照射試験炉の中性子東2)

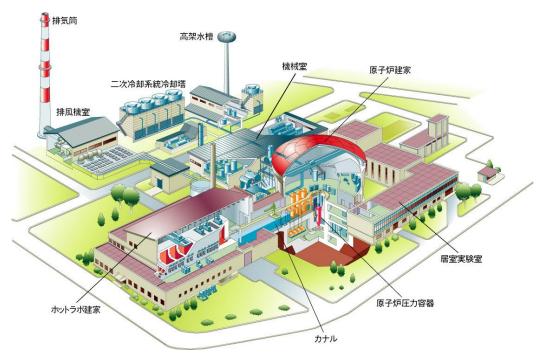


図3 JMTR の鳥瞰図

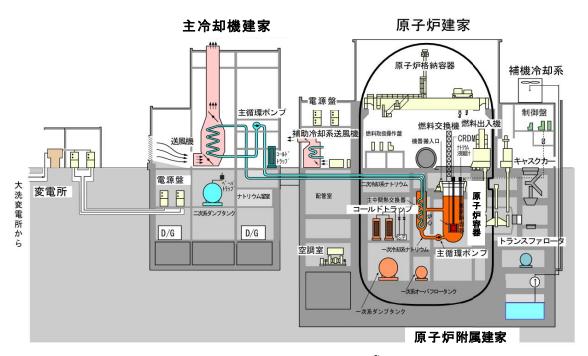


図4「常陽」プラント断面図5)

ガラス手前: インストラクタールーム



図5「常陽」の原子炉シミュレータ







図 6 HTTR の概要 1)

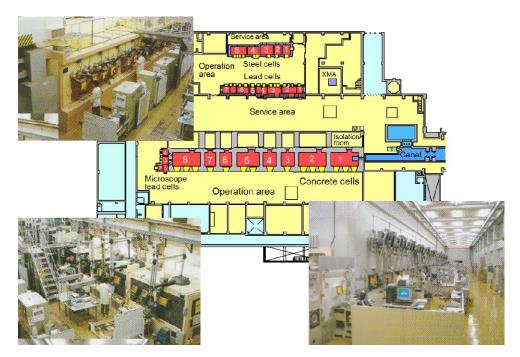


図 7 JMTR HL のホットセル配置



図8 照射後試験実習の様子



図 9 照射試験炉シミュレータ運転実習の様子

国際単位系(SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本i	単位
本半里	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 基本単位	
和立里	名称	記号
面	積 平方メートル	m^2
体	積 立法メートル	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	m³/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	度キログラム毎立法メートル	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
- (albatine concentration) ともよばれる。 (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

衣 3.	直有の名称と記す	アじ衣さ			
			SI 組立単位		
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による	
		記り	表し方	表し方	
	ラジアン ^(b)	rad	1 (p)	m/m	
	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	
	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	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$	
	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	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹	
磁 束 密 度	テスラ	Т	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹	
	ヘンリー	Н	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²	
	セルシウス度 ^(e)	$^{\circ}$ C		K	
· ·	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
	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,	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²	
カーマ	-	ау	o/Kg	III S	
線量当量, 周辺線量当量, 方向	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²	
性線量当量,個人線量当量	シーベルト、。	NG	J/Kg		
	カタール	kat		s ⁻¹ mol	
(a)CI協商部は田左の夕新し知見も挟へ知力単位し知り合われても佐田できて 1 か1 協商部も仕1 を単位はもはの					

- 酸素活性|カタール kat | s¹mol (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。
 (e) 池外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) へルソは周頻現象についてのみ、ペクレルは放射性接種の統計的過程についてのみ使用される。(d) 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なは同である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はと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 単位の由に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

表 4 . 単位 0)中に固有の名称と記号を含		立の例
	S	I 組立単位	
組立量	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		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
	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
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⁻¹sA
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
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						
ľ	乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	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	₹ <i>リ</i>	m	
	10^{15}	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ	
	10^{12}	テラ	Т	10-9	ナーノ	n	
	10^{9}	ギガ	G	10-12	ピコ	р	
	10^{6}	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f	
	10^{3}	丰 口	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	у	

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60s		
時	h	1h =60 min=3600 s		
目	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	1t=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

名称				記号	SI 単位で表される数値	
電	子力	ベル	ト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダ	ル	卜	ン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統一原子質量単位		u	1u=1 Da			
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m	

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位 記号 SI 単位で表される数値 名称 1 bar=0.1MPa=100kPa=10⁵Pa bar 水銀柱ミリメートル nmHg 1mmHg=133.322Pa オングストローム $1 \text{ Å=0.1nm=100pm=10}^{-10} \text{m}$ Å 海 里 1 M=1852m Μ $1 b=100 \text{fm}^2=(10^{-12} \text{cm})2=10^{-28} \text{m}^2$ バ b kn 1 kn=(1852/3600)m/s ネ Np SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。 11 В 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 ォ ト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	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 ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10³/4π)A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≦ 」は対応関係を示すものである。

表10 SIに届さないその他の単位の例

衣10. SIに属さないての他の単位の例						
名称 記号				記号	SI 単位で表される数値	
牛	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
ν	ン	卜	ゲ	ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
ν				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		ン		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	x		ル	3		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系	カラ:	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
卜				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	口		IJ	ı	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー),4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク		U	ン		1 u =1um=10 ⁻⁶ m