



JMTR及び関連施設を活用した研修 (2021年度、2022年度)

Training using JMTR and Related Facilities in FY2021 and FY2022

中野 寛子 藤波 希有子 山浦 高幸 川上 淳
花川 裕規

Hiroko NAKANO, Kyoko FUJINAMI, Takayuki YAMAURA, Jun KAWAKAMI
and Hiroki HANAKAWA

高速炉・新型炉研究開発部門
大洗研究所
環境技術開発センター
材料試験炉部

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

March 2024

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。本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan

E-mail: ird-support@jaea.go.jp

JMTR 及び関連施設を活用した研修(2021 年度、2022 年度)

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

中野 寛子、藤波 希有子⁺¹、山浦 高幸⁺²、川上 淳、花川 裕規

(2023 年 11 月 14 日受理)

材料試験炉部では、発電用原子炉の導入を検討しているアジア諸国をはじめとした海外の原子力人材育成及び将来の照射利用拡大、並びに国内の原子力人材の育成及び確保を目的とし、国内外の若手研究者・技術者を対象に、JMTR (Japan Materials Testing Reactor) 等の研究基盤施設を活用した実践型の実務研修を実施してきた。本研修は、国立研究開発法人科学技術振興機構の日本・アジア青少年サイエンス交流事業「さくらサイエンスプラン」の元、2021 年度は新型コロナウイルスの感染拡大防止の観点から、オンラインでの開催とした。アジア地域の 6 か国から 53 名の若手研究者・技術者が参加し、2021 年 11 月 29 日から 12 月 2 日までの期間で実施した。また、2022 年度は海外から日本国への入国規制が緩和されたことにより、アジア地域の 4 か国から 7 名の若手研究者・技術者が参加し、2023 年 2 月 1 日から 2 月 10 日までの期間でオンサイト研修を実施した。

2021 年度及び 2022 年度の研修における共通したカリキュラムとして、原子力エネルギー、照射試験、原子炉の管理、JMTR の廃止措置計画等に関する講義を行った。2021 年度におけるオンラインでの研修では各国のエネルギー事情に関する情報交換を実施し、2022 年度におけるオンサイト研修ではシミュレータを用いた運転、環境モニタリング等の実習や JMTR 等の施設見学を行った。2021 年度におけるオンラインでの研修は、多数の参加者により専門分野の多様性が生まれ、情報交換の際に活発な議論の一助となった。2022 年度におけるオンサイト研修では、参加人数が限られるものの現地における研修であるため、実習や対面でのコミュニケーションを図ることによる人材交流に向けた良いきっかけになった。状況が許す限り、オンサイト研修を開催することが望ましい。

本報告書は、2021 年度及び 2022 年度に実施した研修についてまとめたものである。

本研修は、国立研究開発法人科学技術振興機構の日本・アジア青少年サイエンス交流事業「さくらサイエンスプラン」(2020 年度、2022 年度)に採択され、日本原子力研究開発機構が実施したものである。

大洗研究所: 〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

+1 安全研究・防災支援部門 原子力緊急時支援・研修センター

+2 原子力施設検査室

Training using JMTR and Related Facilities in FY2021 and FY2022

Hiroko NAKANO, Kyoko FUJINAMI⁺¹, Takayuki YAMAURA⁺²,
Jun KAWAKAMI and Hiroki HANAKAWA

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

(Received November 14, 2023)

A practical training course using the JMTR (Japan Materials Testing Reactor) and other research infrastructures was held from November 29 to December 2 in 2021 for Asian young researchers and engineers. This course was adopted as International Youth Exchange Program in Science (SAKURA SCIENCE Exchange Program) which is the project of the Japan Science and Technology Agency, and this course aims to enlarge the number of high-level nuclear researchers/engineers in Asian countries which are planning to introduce a nuclear power plant, and to promote the use of facilities in future. In this year, from the viewpoint of preventing the spread of COVID-19 infection, it was decided to hold the event online. 53 young researchers and engineers joined the course from 6 countries. In FY2022, training programs with invitations were held due to the easing of restrictions on entry into Japan from overseas. 7 young researchers and engineers from 4 Asian countries participated in the training from February 1 to 10, 2023.

The common curriculum in the training course of FY2021 and FY2022 included lectures on nuclear energy, irradiation testing, safety management, JMTR decommissioning plan, etc. In the online session, conducted in FY2021, information exchange on the energy situation in each country was conducted. On-site training conducted in FY2022, included practical training on operation using simulations, environmental monitoring, etc. and facility tours of the JMTR, etc. Many participants could join the online training course, they created a diversity of expertise and made lively discussions during the information exchange. On-site training, while limited in number of participants, provided a good opportunity for personnel exchange through practical training and face-face communication. It is desirable to hold on-site training as long as circumstances permit.

This report summarizes the training conducted in FY2021 and FY2022.

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

This training program was adopted by the Sakura Science Plan, an international youth science exchange program of the Japan Science and Technology Agency (JST), and was implemented by the Japan Atomic Energy Agency.

+1 Nuclear Emergency Assistance and Training Center, Nuclear Safety Research Center

+2 Nuclear Facility Inspection Office

目次

1. はじめに	1
2. 研修概要	1
2.1 研修の経緯	1
2.2 カリキュラム、プログラム	3
2.2.1 オンライン開催時(2021年度)	3
2.2.2 オンサイト開催時(2022年度)	6
3. 研修内容概要	9
3.1 JAEA の概要	9
3.2 原子力エネルギー	9
3.2.1 世界の発電用原子炉と研究用原子炉	9
3.2.2 高温ガス炉の開発と核熱利用研究	12
3.2.3 高速炉の開発	13
3.3 照射試験	14
3.3.1 原子炉用燃料の中性子照射挙動	14
3.3.2 原子炉用材料の中性子照射挙動	14
3.3.3 JMTR HL(ホットラボ)の照射後試験技術	14
3.3.4 JMTR の照射設備と照射試験技術	15
3.3.5 照射設備の熱解析と熱設計	17
3.3.6 RI 製造	20
3.4 原子炉の管理	20
3.4.1 JMTR の安全管理	20
3.4.2 JMTR の廃止措置計画	21
3.4.3 炉物理の基礎	21
3.5 各国におけるエネルギー政策及び研究に関する議論(2021年度オンライン開催)	21
3.6 環境放射線モニタリング(2022年度オンサイト開催)	22
3.7 JMTR 施設見学(2022年度オンサイト開催)	22
3.8 照射試験炉シミュレータ運転実習(2022年度オンサイト開催)	22
4. 研修方法の評価	23
5. まとめ	24
謝辞	24
参考文献	25
付録	27

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of training course using JMTR	1
2.1 Background of training course using JMTR	1
2.2 Curriculum and Program	3
2.2.1 With Online in FY2021	3
2.2.2 On-site in FY2022	6
3. Contents of training course	9
3.1 Outline of JAEA	9
3.2 Nuclear energy	9
3.2.1 Research reactors and power reactors in the world	9
3.2.2 Development of high temperature gas cooled reactor and R&D of nuclear heat utilization technologies	12
3.2.3 Development of fast reactor	13
3.3 Irradiation test	14
3.3.1 Neutron irradiation behavior of fuels	14
3.3.2 Neutron irradiation behavior of materials	14
3.3.3 Post irradiation examination technologies of JMTR hot laboratory	14
3.3.4 Irradiation facilities and technologies of JMTR	15
3.3.5 Practice of thermal design for irradiation rigs	17
3.3.6 Production of RI	20
3.4 Management of nuclear reactor	20
3.4.1 Safety management of JMTR	20
3.4.2 Decommissioning plan of JMTR	21
3.4.3 Basics of reactor physics	21
3.5 Discussions on energy policies and research and development in each country with online in FY2021	21
3.6 Environmental radiation monitoring in on-site in FY2022	22
3.7 Technical tour of JMTR facilities in on-site in FY2022	22
3.8 Practice of reactor operation using simulator for materials testing reactors in on-site in FY2022	22
4. Evaluation in the method of the training course	23
5. Summary	24
Acknowledgements	24
References	25
Appendix	27

1. はじめに

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下「JAEA」という。)大洗研究所材料試験炉部では、国際的な研究基盤を活用した技術向上及び人材育成を行うためのワールドネットワークの構築を目指し、その一環として、エネルギー需要の急激な増加が見込まれ、原子力発電所の新設や増設が検討されているアジア諸国をはじめとした海外の原子力人材育成及び材料試験炉(以下「JMTR」という。)の照射利用拡大を目的とした海外の若手研究者・技術者を対象とする研修を開始した^{1),2)}。当該研修は、2010年度から国内の若手研究者・技術者を対象に、2011年度からアジア諸国をはじめとした海外の若手研究者・技術者を対象に、JMTR 及びその関連施設を中核とした実践型の実務研修として実施した。その後、2014年度から2016年度にかけては、これらを統合し、国内外の若手研究者・技術者を対象とした研修を実施した^{3),4),5)}。

JMTRは2017年4月に廃止措置施設と位置付けられたものの、2017年度から2019年度は、国立研究開発法人科学技術振興機構の日本・アジア青少年サイエンス交流事業「さくらサイエンスプラン」に申請・採択され、アジア地域の若手研究者・技術者を対象とし、今後の人材交流や共同研究につながる協力関係の構築、人材の往来の活発化を目指して研修を実施した^{6),7),8)}。

2020年度及び2022年度についても、「さくらサイエンスプラン」に採択され、研修を実施した。これらの実習内容等についてまとめるとともに、研修方法の違いが人材交流に与える影響について評価し、本報告書をまとめた。

2. 研修概要

2.1 研修の経緯

2020年度に、本研修が「さくらサイエンスプラン」に採択されたものの、2020年からまん延している新型コロナウイルス感染拡大防止の観点から招へいのともなう実践型の研修が延期となり、2021年度に代替としてオンラインによる研修を開催した。アジア地域の6か国(カザフスタン、タイ、マレーシア、インドネシア、ベトナム、モンゴル)から53名の若手研究者・技術者が参加し、2021年11月29日から12月2日までの期間で研修を実施した。参加者数を表2.1-1に示す。

2022年度では、「さくらサイエンスプラン」に本研修が採択され、新型コロナウイルス感染拡大防止の観点による海外から日本国への入国規制が緩和されたことを受け、感染対策を十分に図りながらアジア地域の若手研究者・技術者を招へいし、実践型の研修を実施した。本研修には、アジア地域の4か国(カザフスタン、タイ、ベトナム、モンゴル)から7名の若手研究者・技術者が参加し、2023年2月1日から2月10日までの期間で研修を実施した。参加者数を表2.1-2に示す。

なお、これまでの本研修の参加者は、原子力発電を含む原子力関連の研究に積極的な姿勢を示す20代から30代前半の若手研究者・技術者が中心であり、2021年度までの11年間で9か国(カザフスタン、タイ、マレーシア、インドネシア、ベトナム、ポーランド、アルゼンチン、モンゴル、日本)から延べ284名が参加した。

表 2.1-1 海外の若手研究者・技術者を対象とした研修における 2021 年度の参加者数

国名	所属	人数
インドネシア	Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)	20
カザフスタン	Al-Farabi Kazakh National University	11
マレーシア	Malaysian Nuclear Agency	3
モンゴル	National University of Mongolia	2
タイ	Chulalongkorn University	4
ベトナム	Vietnam Atomic Energy Institute (VINATOM)	13
合計		53 名

表 2.1-2 海外の若手研究者・技術者を対象とした研修における 2022 年度の参加者数

国名	所属	人数
カザフスタン	Institute of Applied Sciences and Information Technologies	2
モンゴル	Executive Office of the Nuclear Energy Commission	1
タイ	Chulalongkorn University	2
ベトナム	Vietnam Atomic Energy Institute	1
	Research and Development Center for Radiation Technology (VINAGAMMA)	1
合計		7 名

2.2 カリキュラム、プログラム

2.2.1 オンライン開催時(2021年度)

本研修は、新型コロナウイルス感染拡大防止の観点から、招へいのともなう実践型の研修を行うことが困難であったため、代替として各国の参加者の PC と接続するオンラインでの研修とした。したがって、これまで実施してきた実習をメインにした実践型の研修とは異なり、講義を中心とした。さらに、各国のエネルギー事情や研究開発に関するディスカッションを加え、カリキュラムを組み立てた。カリキュラム作成時には以下の点に留意した。表 2.2-1 に 2021 年度の研修カリキュラムを示す。

- (1) 参加者の出身国の多くは研究用原子炉を有しており、新たな発電用原子炉の建設を計画している国もあることから、発電用原子炉の設計や安全性評価の基となる原子炉用燃料及び材料の照射試験に関する講義を計画した。
- (2) 研究用原子炉の特性や運転についての理解を深めるため、JMTR の安全管理に関する講義、JMTR の廃止措置計画に関する講義、核特性に関する講義、熱設計及び核計算に関する講義等を計画した。
- (3) これまでの研修より、小型の研究用原子炉しかない参加国においてもラジオアイソトープ (RI) 製造に関する要望があったため、JMTR における RI 製造に関する講義を計画した。
- (4) パリ協定における 2050 カーボンニュートラルを踏まえ、各国のエネルギー事情を学ぶとともに、各参加者の研究や業務内容についてディスカッションできる機会として、各研修日に参加者によるプレゼンテーションを計画した。また、本プレゼンテーションを通して、参加者と実施者の交流を深めることを目指した。

表 2.2-2 に 2021 年度の研修プログラムを示す。

表 2.2-1 2021 年度の研修カリキュラム

概要	JAEA の概要	講師:花川裕規
原子力エネルギー	世界の発電用原子炉と研究用原子炉	講師:伊藤治彦
	高温ガス炉開発と核熱利用研究	講師:石塚悦男
	高速炉開発	講師:岡垣昌樹
照射試験	原子炉用燃料の中性子照射挙動	講師:中村仁一
	原子炉用材料の中性子照射挙動	講師:根本義之
	JMTR HL の照射後試験技術	講師:川島雅人
	JMTR の照射設備と照射試験技術	講師:伊藤治彦
	照射設備の熱解析と熱設計	講師:松井義典
	RI 製造	講師:棚瀬正和
原子炉の管理	炉物理の基礎	講師:竹本紀之
	JMTR の安全管理	講師:花川裕規
	JMTR の廃止措置計画	講師:井手広史
全体	ディスカッション	司会:伊藤治彦

※講師等の敬称略

表 2.2-2 2021 年度の研修プログラム

月 日	1コマ	2コマ	3コマ	4コマ	5コマ	6コマ	7コマ
11月29日(月)	JAEAの概要	世界の発電炉と研究炉	高温ガス炉開発と核熱利用研究	高速炉開発	JMTR		ディスカッション
11月30日(火)	JMTRの安全管理	JMTRの照射設備と照射試験技術		炉物理の基礎			ディスカッション
12月1日(水)	JMTRの廃止措置計画	照射設備の熱解析と熱設計		JMTR HLの照射後試験技術			ディスカッション
12月2日(木)	原子炉用材料の中性子照射挙動	原子炉用燃料の中性子照射挙動		RI製造			ディスカッション

2.2.2 オンサイト開催時(2022年度)

2022年度開催時には、海外から日本国への入国規制が緩和され、招へいのともなう実践型の研修を行うことが可能となった。このため、以下の点に留意して研修のカリキュラムを策定した。表2.2-3に2022年度の研修カリキュラムを示す。

- (1) 新たな発電用原子炉の建設を計画している国もあることから、発電炉の設計や安全評価の基となる原子炉用燃料及び材料の中性子照射挙動に関する講義を計画した。
- (2) 放射線業務従事者の外部被ばく及び内部被ばくの線量管理について理解を深めるため、測定器や測定方法に関する講義及び関連施設の見学を計画した。また、環境放射線モニタリングに関する業務を体験するため、環境試料を用いた γ 線核種分析実習及び関連施設の見学を計画した。
- (3) 参加者の出身国の多くは、研究炉を有しており、研究用原子炉の特性や運転に関する理解を深めるため、JMTRの安全管理に関する講義、核特性に関する講義、熱計算実習、核計算実習、照射試験炉シミュレータ運転実習等を計画した。特に、各実習には多くの時間を割り当てた。
- (4) これまでに実施した招へいのともなう研修を踏まえ、各参加者の背景を知り、講義での説明における時間配分等を見直すため、研修初日に参加者の業務や出身国についてのコミュニケーションタイムを計画した。

また、招へいのともなう研修のプログラムでは、招へい者の理解がより深まるよう、概要説明や基礎的な内容の講義を行った後、実習や関連施設の見学を行うように研修プログラムを構成した。表2.2-4に2022年度の研修プログラムを示す。

表 2.2-3 2022 年度の研修カリキュラム

概要	講義	JAEA の概要	講師:花川裕規
原子力エネルギー	講義	世界の発電用原子炉と研究用原子炉	講師:伊藤治彦
		高温ガス炉開発と核熱利用研究	講師:石塚悦男
		高速炉開発	講師:岡垣昌樹
		原子炉用燃料の中性子照射挙動	講師:中村仁一
照射試験	講義	原子炉用材料の中性子照射挙動	講師:根本義之
		JMTR HL と照射後試験技術	講師:川島雅人
		JMTR の照射設備と照射試験技術	講師:伊藤治彦
		照射設備の熱解析	講師:佐谷戸夏紀、冬島拓実
	実習	RI 製造	講師:棚瀬正和
		熱設計実習	講師:松井義典、佐谷戸夏紀、 冬島拓実、遠藤泰一、 井上修一、小沼勇一
		施設見学 JMTR、JMTR HL	講師:柴田晃、川島雅人
原子炉の管理	講義	JMTR の安全管理	講師:花川裕規
		炉物理の基礎	講師:竹本紀之
	実習	JMTR の廃止措置計画	講師:井手広史
		照射試験炉シミュレータ運転実習	講師:竹本紀之、木村伸明、 森田寿、高部湧吾、 冬島拓実
環境放射線 モニタリング	講義	環境放射線モニタリング	
	実習	個人線量測定実習	
		環境試料の γ 線核種分析実習	講師:前田英太、濱口拓
	施設見学	環境監視施設 放射線管理施設	

※講師の敬称略

表 2.2-4 2022 年度の研修プログラム

月 日	午前		午後		
2月2日(木)	所長挨拶	オリエンテーション	JAEA の概要	世界の発電用原子炉と研究用原子炉	JMTR の安全管理
2月3日(金)	JMTR (施設見学)		環境放射線モニタリングと環境試料のγ線核種分析実習		
			講義	実習	見学
2月6日(月)	大洗町表敬訪問		原子炉用燃料の中性子照射挙動	原子炉用材料の中性子照射挙動	JMTR の照射設備と照射試験技術
2月7日(火)	高温ガス炉開発と核熱利用研究	高速炉開発	RI 製造	熱設計実習	
2月8日(水)	JMTR HL と照射後試験技術		JMTR HL (施設見学)	JMTR の照射設備と照射試験技術	炉物理の基礎 シミュレータ
2月9日(木)	照射試験炉シミュレータ運転実習				修了式

3. 研修内容概要

3.1 JAEA の概要

JAEA は、旧日本原子力研究所と旧核燃料サイクル開発機構が統合し、2005 年 10 月 1 日に発足した。現在は、国内唯一の原子力に関する総合的研究開発機関として、2011 年 3 月 11 日に発生した福島第一原子力発電所事故(以下「福島第一原発事故」という。)への対処、原子力の安全性向上、原子力基礎基盤研究と人材育成、高速炉の研究開発、核燃料サイクルに係る再処理、燃料製造及び放射性廃棄物の処理処分に関する研究開発等に重点を置き、様々な研究開発に取り組んでいる。特に、福島第一原発事故への対処については、東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所近傍に廃炉国際共同研究センターの中核となる国際共同研究棟を整備し、2017 年 4 月から運用を開始しており、今後は、国内外の大学や研究機関等の人材が交流できるネットワークを形成しつつ、産学官による研究開発と人材育成を一体的に進める体制を構築し、廃止措置を推進することとしている⁹⁾。ここでは、JAEA が保有する拠点及び原子力施設をはじめ、現在取り組んでいる研究開発等の概要について説明した。

3.2 原子力エネルギー

3.2.1 世界の発電用原子炉と研究用原子炉

(1) 世界の研究用原子炉

世界では、これまでに約 840 基の研究用原子炉が建設されてきたが、2021 年 1 月現在、運転中のものは 223 基となっている¹⁰⁾。ここでは、世界の研究用原子炉の現状として、世界における研究用原子炉の数の推移、高経年化、主要な研究用原子炉の概要について説明した。新型コロナウイルスの影響で運転停止を強いられた原子力発電所は無いものの、経済活動の制限にともなう電力需要の低下により、運転停止や出力抑制した国があることを説明した。また、表 3.2-1 に示す建設中及び計画中の研究用原子炉についても概要を説明した^{10) 11)}。

表 3.2-1 建設中及び計画中の研究用原子炉¹⁰⁾¹¹⁾

Research Reactors Planned or under Construction ($\geq 10\text{MW}$)			
UNDER Construction			
Facility Name	Country	Type	Power (MW)
CAREM 25	Argentina	PWR	100
JULES HOROWITZ	France	Tank in Pool	100
RES	France	PWR	100
JRTR	Jordan	Tank in pool	5
PIK	Russian Federation	Tank	100
MBIR	Russian Federation	Fast	100
PLANNED			
Facility Name	Country	Type	Power (MW)
RA-10	Argentina	Pool	30
MYRRHA	Belgium	Fast	85
RMB	Brazil	Pool	30
KJRR	Korea	Pool	15
PALLS	Netherland		30 to 80
Multipurpose RR	Ukraine	Pool	20
HT3R	USA	He Cooled	25
Multipurpose RR	Viet Nam	Pool	15

(2) 世界の原子力エネルギーのシェア

原子力エネルギーのシェアは国によって大きく異なり、フランスで約 72%を原子力が占めていることをはじめ、スロバキアが約 54%、ベルギーが約 52%、ハンガリーが約 51%を占めている等、ヨーロッパは比較的原子力エネルギーのシェアが高い国が多い。一方、日本における 2016 年の原子力エネルギーのシェアは 2.2%となっている¹²⁾。ここでは、参加者の出身国を含めた、世界各国における原子力エネルギーのシェアの状況について説明した。

(3) 世界の発電用原子炉

2021 年 1 月 1 日の時点で、世界では 441 基の発電用原子炉が稼働しており、約 64% (282 基)を PWR、約 18% (78 基)を BWR が占めており、その他は、加圧重水炉 (49 基)、軽水冷却黒鉛減速炉 (15 基)、ガス冷却炉 (14 基)、高速炉 (3 基)となっている¹²⁾。これらの中で、多くの発電用原子炉は高経年化が進んでおり、その対策が課題となっている。ここでは、世界の発電用原子炉の概要について説明した。

日本は、BWR 及び ABWR を 22 基、PWR を 20 基、計 42 基の発電用原子炉を有している。研修を実施していた 2021 年 7 月の時点では、5 基の発電用原子炉が稼働しており、そのほかの多くの発電用原子炉は、福島第一原発事故後に策定された新規制基準 (2013 年 7 月

8日施行)への適合性審査への対応を行っている状況であった¹³⁾。

(4) Generation I to Generation IV

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

(5) 世界における発電用原子炉の過酷事故

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

(6) 福島第一原発事故が世界に与えた影響

福島第一原発事故は、その被害の深刻さから世界のエネルギー政策に大きな影響を与えた。ここでは、プラントや事故の概要、当時の汚染状況等について説明し、また、参加者が今後の原子力エネルギーを考える上で参考となる世界のエネルギー政策の状況について説明した。表 3.2-2 に福島第一原発事故後の世界の原子力政策の動向(2012年)を示す¹⁴⁾。

表 3.2-2 福島第一原発事故後の世界の原子力政策の動向 (2012 年)¹⁴⁾

2012 年 12 月

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

(Table 2¹⁰⁾を基に作成)

3.2.2 高温ガス炉の開発と核熱利用研究

HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor) は、炉心の主な構成材に黒鉛を中心としたセラミック材料を用い、核分裂による熱を取り出すための冷却材にヘリウムガスを用いた原子炉である。耐熱性に優れたセラミック材料を使用することによって原子炉から 1000℃程度の熱を取り出すことができ、この熱は発電をはじめ、化学や工業等の様々な分野で利用可能である。また、炉心を構成する黒鉛材料は熱容量が大きく、異常時においても炉心の温度変化が緩慢であることから、冷却材が喪失するような事故が発生した場合においても、炉心で発生した熱は原子炉の容器表面から放熱されて自然に除去され、燃料が破損することはない。このような固有の安全性を持ち、多様な熱利用が可能なことから、福島第一原発事故以降、高温ガス炉に大きな注目が集まっている⁹⁾。

JAEA では、大洗研究所の HTTR (High Temperature engineering Test Reactor) を活用し、HTGR に関する研究を進めている。ここでは、HTTR の概要や HTGR の研究に関する内容について、以下の講義を行った。

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

また、講義では、HTGR を利用した水素製造及びその利用についても説明した。水素は、電気や熱に加えて将来の 2 次エネルギーにおける中心的役割を担うことが期待されており、JAEA では、図 3.2-1 に示すような IS プロセスという水素製造法の開発を進めている⁹⁾。水の熱分解には 4000℃ 以上の高温熱が必要であるが、IS プロセスでは、ヨウ素と硫黄の化学反応を利用することによって約 900℃ の熱で熱分解することができる。この熱も原子炉 (HTGR) から供給するため、熱の供給源を含む一連の過程において、炭酸ガスを放出せずに水素を製造することが可能である⁹⁾。

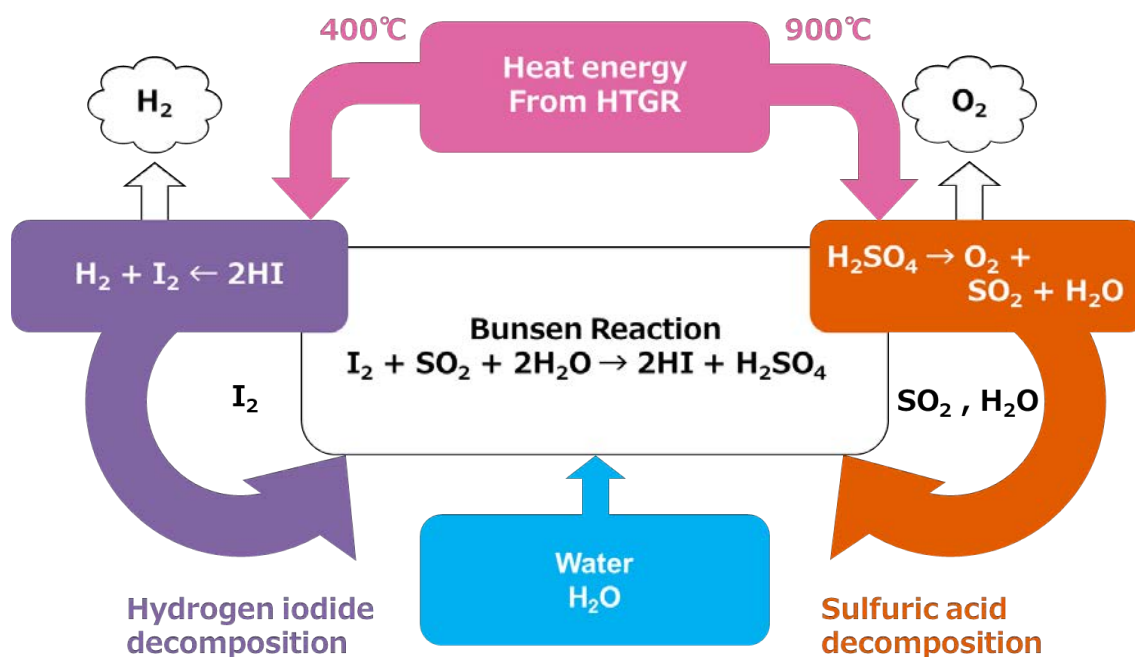


図 3.2-1 IS プロセスの概要¹⁶⁾

3.2.3 高速炉の開発

日本は、資源の有効利用や高レベル放射性廃棄物の減容化等の観点から、核燃料サイクルの推進を基本方針としている¹⁵⁾。高速炉は、MA を核燃料としてリサイクルすることによって放射性廃棄物の量を低減する能力を有しており、核燃料サイクルは、発電とともに新たな燃料を生み出し、ウランの利用効率を飛躍的に高め、エネルギーの輸入依存度の改善にも貢献すると期待されている⁹⁾。ここでは、以下に示す内容について、講義を行った。

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

3.3 照射試験

3.3.1 原子炉用燃料の中性子照射挙動

原子炉燃料の中性子照射挙動の研究においては、原子炉の開発研究が軽水炉から高速炉そして将来の高温ガス炉や核融合炉へと進展するにつれて、研究対象となる燃料や照射条件等も変わってきた。ここでは、JMTRの照射設備及び照射試験技術、並びに照射後試験施設及び照射後試験技術に関する講義の前段として、軽水炉における原子炉用燃料の中性子挙動について以下の講義を行った。

- (1) 通常運転時の燃料の挙動
- (2) 照射試験及び照射後試験
- (3) 事故状況下における燃料の挙動

3.3.2 原子炉用材料の中性子照射挙動

軽水炉の構造材料の供用末期における中性子照射挙動の物理的及び化学的なプロセスは充分に解明されているとは言えない。軽水炉材料は照射下での経年変化研究が重要視されており、特に圧力容器の脆化、炉内構造物の照射損傷及びジルカロイの照射成長とクリープの問題では、経年劣化を絶えず評価し、健全性を保証するとともに寿命を予測するために照射下における材料のマイクロ組織変化過程を解明することが益々重要になっている。ここでは、軽水炉における原子炉材料の中性子照射挙動について研究の現状及び JMTR で培ってきた照射試験について以下の講義を行った。

- (1) 軽水炉の構造材料
- (2) 材料の照射挙動及び機械的挙動
- (3) 腐食と水の放射線分解
- (4) 中性子照射による応力腐食割れへの影響
- (5) JMTR における照射誘起応力腐食割れ試験

3.3.3 JMTR HL (ホットラボ) の照射後試験技術

JMTR HL では、原子炉で照射した試料の各種照射後試験が行われ、その試験結果は、原子力分野における広範囲な燃料・材料の研究開発に役立てられている。試料は、目的に応じたセルに運ばれ、コンクリートセルにて解体、鉛セル及び鉄セルにて材料強度試験等が行われる。そのほか、JMTR HL は顕微鏡専用の鉛セルを有しており、これらのセルにおける全ての操作は、マニプレータ等の遠隔操作装置を用いて遮へい窓越しに行われる¹⁷⁾。ここでは、JMTR HL の施設の概要、照射後試験の内容及び研究に必要な照射後試験技術開発について講義を行った。

3.3.4 JMTR の照射設備と照射試験技術

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

(1) JMTR の概要

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

(2) 照射設備

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

(3) 環境制御と形成

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

計装技術については、照射中の温度、中性子束、燃料の伸びと直径の計測、FP ガス圧力測定、材料の亀裂発生と進展の測定技術等について説明した。図 3.3-1 に JMTR における照射技術の概要を示す¹⁷⁾。

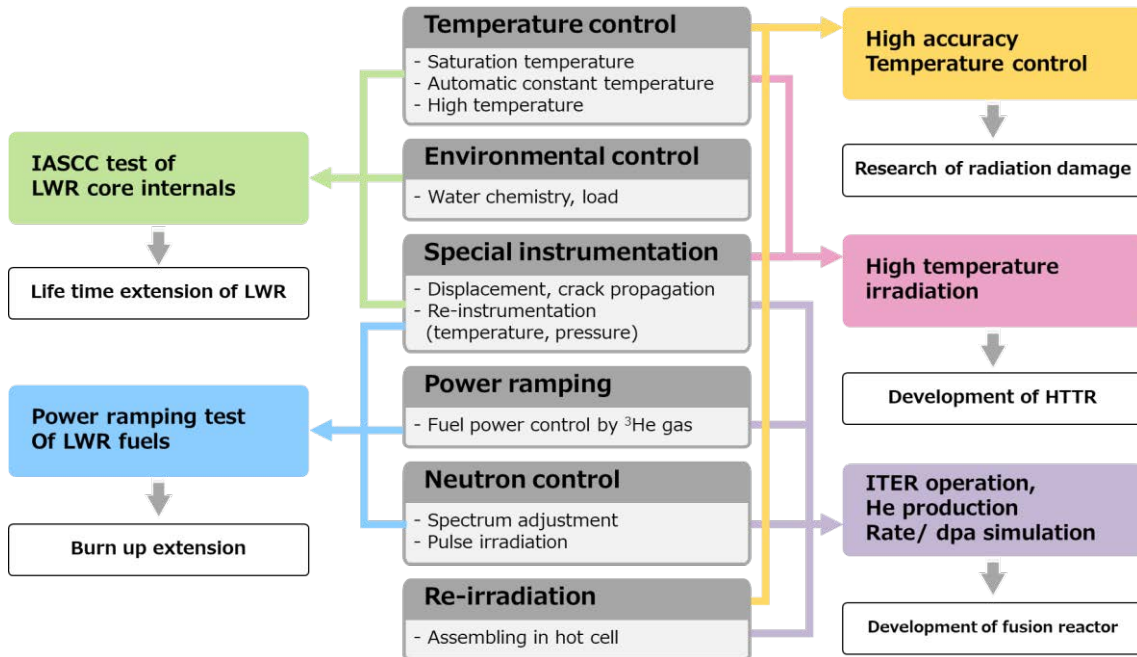


図 3.3-1 JMTR の照射技術

(4) 再計装及び再照射技術

軽水炉材料の照射誘起応力腐食割れに関する研究や、軽水炉燃料の PCMI 破損に関する研究では、発電用原子炉で照射された材料及び燃料の研究用原子炉での再照射や、その場試験(照射中の環境制御及び計測)が不可欠である。ここでは、照射された材料及び燃料を再照射するためにキャプセルに組み込む技術、それらの燃料に中心温度測定用熱電対や FP ガス圧力計、燃料棒伸び測定装置を計装する技術、材料の亀裂発生及び亀裂進展測定装置を計装する技術について説明した。図 3.3-2 に照射済燃料棒への熱電対及び FP ガス圧力計の再計装技術を示す¹⁸⁾。

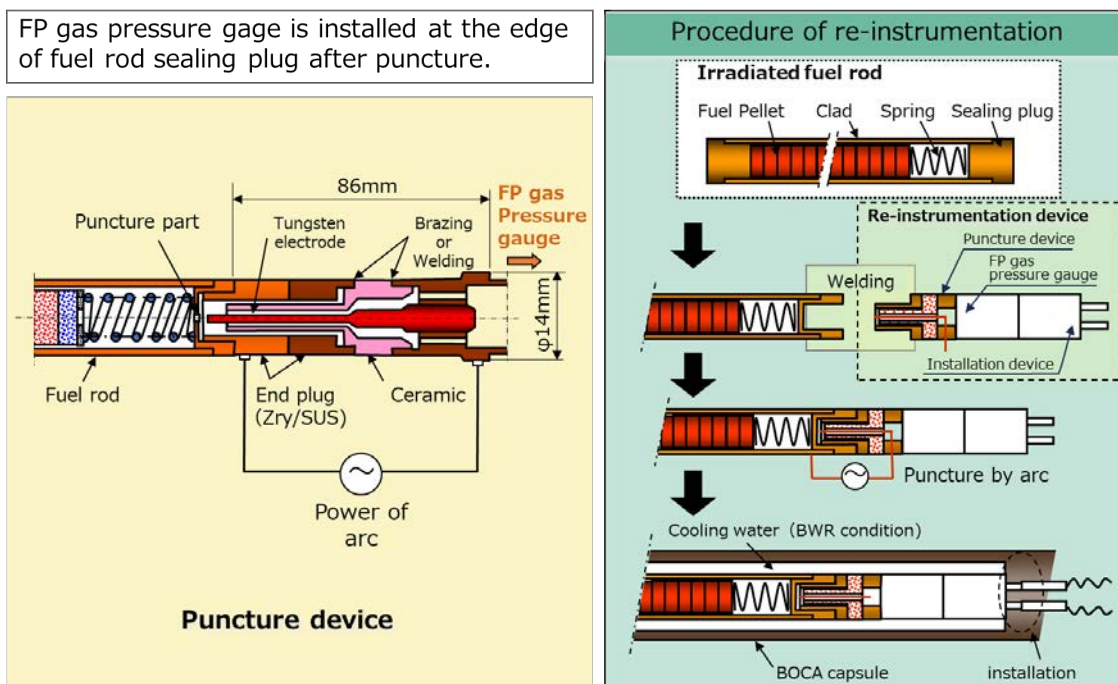


図 3.3-2 照射済燃料棒への熱電対及び FP ガス圧力計の再計装技術

3.3.5 照射設備の熱解析と熱設計

JMTR の照射試験は、試料を装荷したキャプセル等を炉心の反射体要素に設けられた照射孔に挿入して行われる。キャプセル等は、図 3.3-3 に示すように¹⁹⁾、円筒形の容器(外筒)、照射試料、試料ホルダ、スペーサ等で構成され、通常、キャプセル等の内部にはヘリウムガスが封入される。試料が燃料の場合は主に核分裂によって発熱するが、そのほかの構造材はガンマ線によって発熱する。材料や燃料の照射損傷は温度による影響が大きいため、目的に合った温度で照射するためには熱設計が極めて重要となる。ここでは、キャプセル等の熱設計に関する講義を行った。その内容を以下に示す。

(1) キャプセルの熱設計上の特徴

① 熱の流れ

キャプセル等は、容器の外表面を流れる冷却水で冷却される。したがって、燃料や材料で発生する熱は中心から容器表面に向かって流れ、その間の熱抵抗の大きさと熱流束によって温度が上昇する。図 3.3-4 にキャプセル等の熱の流れとそれにもなう温度上昇を示す。なお、燃料の出力急昇試験に使用されるキャプセルの場合は、キャプセル内に高温高圧水が挿入されるため、図 3.3-5 に示すような高圧水の沸騰や凝縮による熱移動が生じる。

② 発熱密度の調整

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

③ 熱抵抗の調整

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

④ 熱膨張の影響

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

⑤ 軸方向の熱流動

炉心内でのガンマ線束及び中性子束は、軸方向に大きな分布をもっており、キャプセルのような長尺のものの場合、発熱密度が小さくなる軸方向の上下への熱流動が発生する。そこで、キャプセルの場合には、軸方向の熱流束を抑えるため、適宜、断熱材を配置することで熱の流れを単純化する。

(2) 熱設計実習

(1)で示したキャプセル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 GENGTC²⁰⁾を用いて熱設計実習を行った。キャプセル構成部材の材質や部材間のギャップ寸法を変更することで照射温度が変わることを計算によって確認するとともに、熱膨張評価の重要性を認識するため、熱膨張係数をゼロにする計算も行った。また、キャプセル内に装荷したシースヒータやガスキャップ層の真空度調整により所定の温度に調整する照射温度制御手法についても実習を行った。

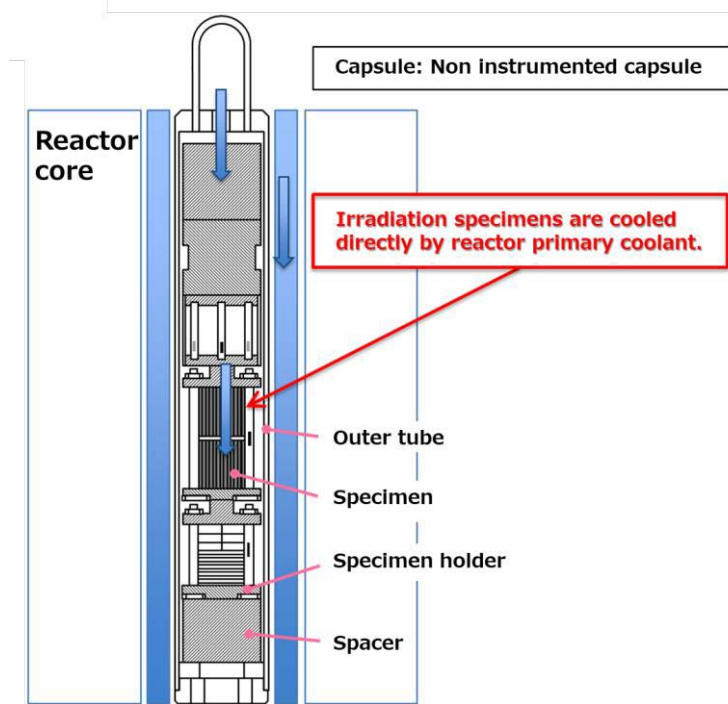


図 3.3-3 キャプセルの概略図例¹⁹⁾

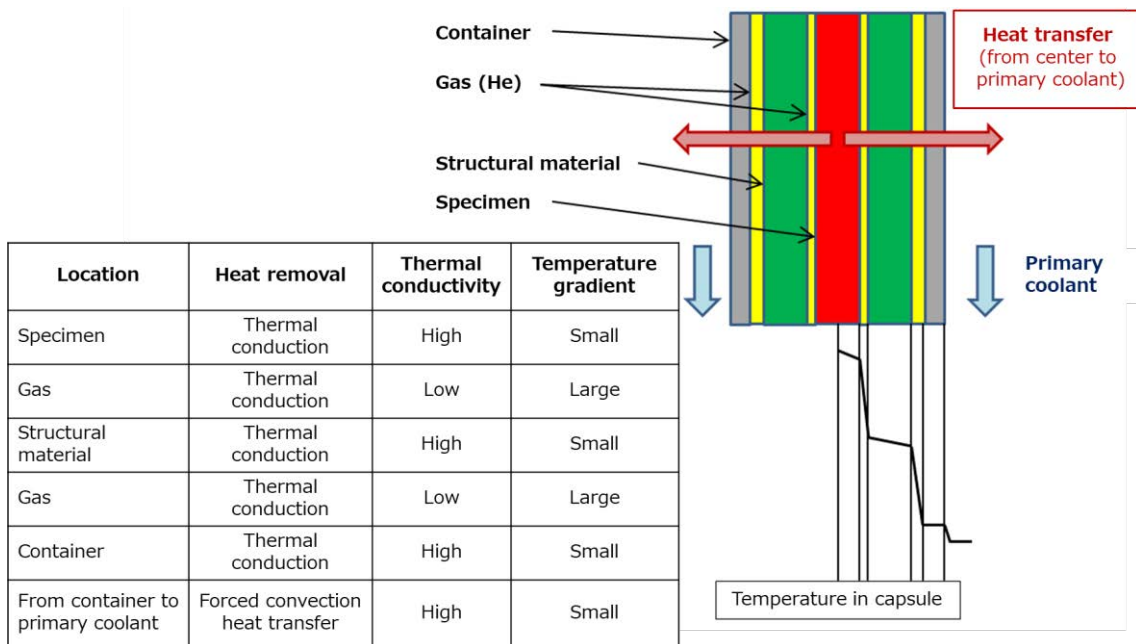


図 3.3-4 キャプセルの熱移動と温度分布

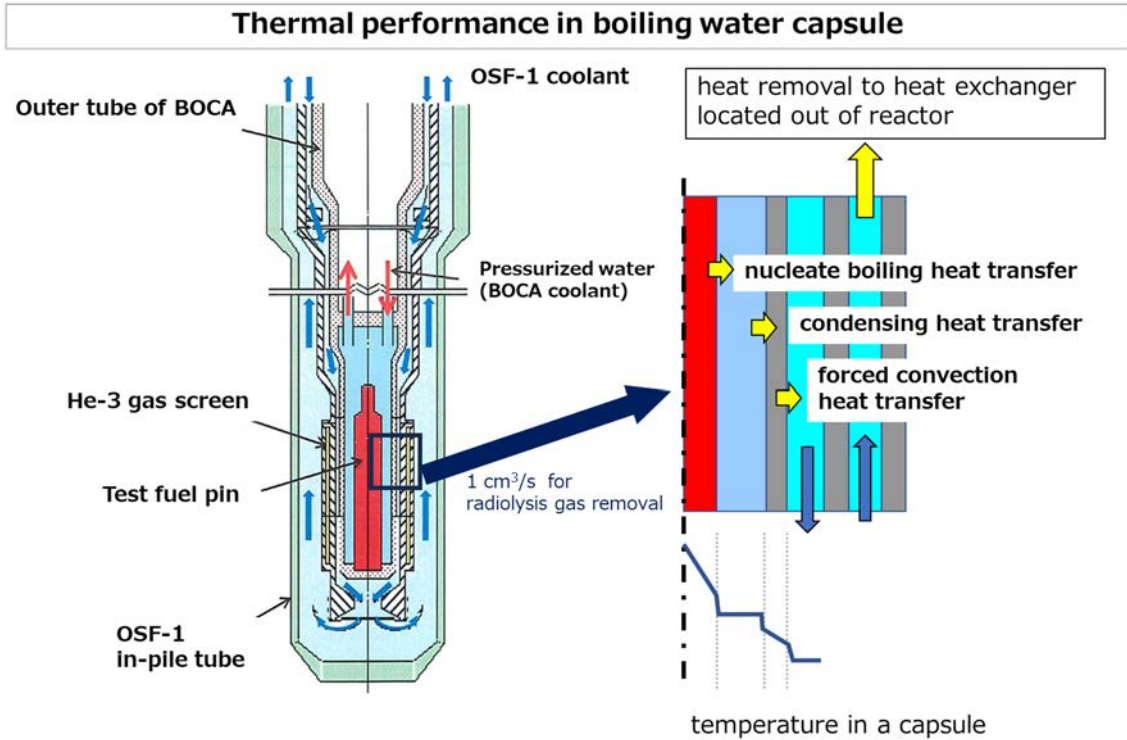


図 3.3-5 沸騰水キャプセルの熱移動

3.3.6 RI 製造

RI は幅広い分野で利用されている。例えば、工業分野では内部損傷を調べるための非破壊検査、医療分野では PET 検査や体内の腫瘍治療、といった利用があり、利用方法も多様である。これらの RI の多くは研究用原子炉及びその周辺施設を利用し製造されている。そこで、研究用原子炉を利用し製造される RI について以下の講義を行った。

- (1) JAEA が製造に係る RI の種類
- (2) RI 製造に利用される施設
- (3) RI 製造の手順（原材料、照射、輸送）
- (4) RI 製造の研究開発

3.4 原子炉の管理

3.4.1 JMTR の安全管理

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

ここでは、研究用原子炉の設計から建設、運転及び廃止措置に関する日本の法体系、JMTR の制御棒の異常な引抜きによる過渡変化や冷却材流出事故等に対する安全性評価について説明

し、研究用原子炉及び JMTR における安全性評価について、以下の講義を行った。

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

3.4.2 JMTR の廃止措置計画

JMTR は、1968 年に初臨界を達成して以来、発電用軽水炉を中心に、新型転換炉、高速炉、高温ガス炉、核融合炉等の燃料・材料の照射試験に広く利用されてきた。しかし、法令で定める耐震基準に適合していないため、2017 年 4 月に施設の廃止が決定され、2019 年 9 月に廃止措置計画認可申請書を提出し、2021 年 3 月に認可された。

ここでは、JMTR の廃止措置の工程を 4 段階に分けて進め、約 20 年で完了する予定である計画について以下の講義を行った。

- (1) 廃止措置対象施設及びその敷地
- (2) 第 1 段階の実施計画（原子炉の機能停止措置、核燃料物質の管理及び譲渡、管理区域外の施設・設備の解体撤去）
- (3) 廃止措置中に発生することが想定される事故に関する被ばく評価、核燃料物質の汚染分布の評価
- (4) 廃止措置に係る技術開発に関する検討

3.4.3 炉物理の基礎

核分裂、中性子の吸収と散乱、核反応による核変換、反応断面積等の概念、中性子増倍率、中性子スペクトル等の炉物理の基礎について講義を行った。また、基本的な原子炉の構成や、原子炉の運転に関する重要な要素である反応度の概念や燃料の燃焼による反応度変化、原子炉の核特性計算手法についても説明した。

3.5 各国におけるエネルギー政策及び研究に関する議論(2021 年度オンライン開催)

2015 年の国連気候変動枠組み条約締約国会議(COP21)で採択され、2016 年に発効した気候変動問題に関する国際的な枠組みであるパリ協定では、2020 年以降の温室効果ガス削減に関する世界的な取り決めが示されている。パリ協定の中で「世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べて 2 度より十分低く保ち、1.5 度以内に抑える努力をする」という世界共通の長期目標が掲げられた。各国では、水力発電を除く再生可能エネルギーについて開発の初期段階にあるため、自然保護の観点を踏まえながら設備を整備する予定であること等が紹介された。また、原子力発電の利用は炭素低減措置に貢献できるという認識から、新たな発電用原子炉の建設が検討されていることも紹介された。

原子力を利用した研究開発についても各国の若手研究者より、国の原子力発電所建設に向けた研究開発及び放射線利用に関する研究開発等に関する発表があり、活発な議論がなされた。

3.6 環境放射線モニタリング(2022年度オンサイト開催)

大洗研究所では、平常時並びに緊急時における放射線管理及び環境放射線モニタリングを行っている。ここでは、施設の放射線管理、施設で使用する放射線測定器の点検・校正、管理区域内で作業している従業員の被ばく線量管理、環境放射線モニタリングに関する講義を行った。

実際に敷地内の土を採取し、それに含まれる放射能に異常がないかγ線核種分析を実施し、評価した。また、ホールボディカウンタを利用し、内部被ばく評価に関する実習を行った。

3.7 JMTR 施設見学(2022年度オンサイト開催)

講義だけでなく、研究開発等が行われている現場へ実際に足を運ぶことは、原子炉の研究開発や安全管理等に関する理解を深めることに大変有効である。そのため、大洗研究所内の研究炉(JMTR、JMTR HL)、放射線管理施設、環境監視施設の施設見学を行った。

3.8 照射試験炉シミュレータ運転実習(2022年度オンサイト開催)

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

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

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

(1) 通常運転

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

(2) 照射設備の運転

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

(3) 異常・事故事象時の安全動作

定常運転状態で地震、商用電源喪失、全交流電源喪失等の異常・事故事象を模擬的に発生させ、制御棒位置、中性子実効倍率、燃料温度、冷却材流量等の経時変化を観察し、各安全動作によって、異常・事故事象時においても原子炉が正常に停止することを確認する。

また、原子炉出力急昇にともな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. 研修方法の評価

例年、アジア地域の 6 か国(カザフスタン、タイ、マレーシア、インドネシア、ベトナム、モンゴル)から日本へ招へいしオンサイト研修を開催していたが、新型コロナウイルス感染症拡大防止策の一環として、2021 年度における研修はオンラインで実施した。一方、2022 年度には海外から日本国への入国規制が緩和されたことによりオンサイト研修を実施した。各研修方法における特徴について、以下の通りであった。

オンライン研修では、アジア地域 6 か国から 53 名の若手研究者・技術者が参加した。これは、どこからでも参加することができるという恩恵によるものである。これにより、参加者の多様性が生まれ、参加国のエネルギー情勢や原子力関連の研究開発に関する活発な議論の一助となった。一方で、オンライン研修では、参加者同士が交流を持つことが困難で、同時に、講師も参加者が内容をどれくらい理解しているのか確認することが困難であった。

オンサイト研修では、大洗研究所内の施設見学及び環境放射線モニタリングの実習を通して、参加者は各施設の大きさや設備・機器の取扱い等を実際に経験することで理解を深めることができた。また、核計算や照射試験炉シミュレータでは講師とのコミュニケーションを図りやすく、炉の運転について理解を促進することができた。さらに、講義・実習以外の時間において参加者同士で交流することが可能であった。一方で、オンサイト研修では、参加者の数が予算及び受入れ施設等の制限により、少人数に限定され、オンライン研修時のように大人数が参加することは困難である。

以上のことからオンライン研修ではオンサイト研修では不可能な大人数への講義等が可能であるが、人材(参加者同士、参加者と講師)の交流が非常に困難であった。オンサイト研修では参加人数は制限されるものの、対面でのコミュニケーションが図れたため、次世代の人材交流に向けての良いきっかけとなると考える。そのため、状況が許す限り、オンサイト研修で行うことが望ましいと考える。

5. まとめ

本研修の参加者は、今後のエネルギー需要の増大が想定されているアジア地域の若手研究者・技術者である。2021年度は、新型コロナウイルス感染症拡大防止対策の一環として、オンラインによる研修となったが、これまでに実施した研修とは異なり、多くの若手研究者・技術者が参加した。これにより、各国の方針として2050年までにカーボンニュートラルを実現することを表明していることを背景に、それぞれのエネルギー事情やカーボンニュートラル実現に向けた取組みの紹介、研究開発の紹介等、活発な議論が繰り広げられた。2022年度は、海外から日本国への入国規制が緩和されオンサイト研修を実施した。原子炉内で想定されるキャプセルの熱計算を行ったのちにシミュレータの運転実習を行うことで、より理解が深まったように思われる。

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

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

謝辞

本報告書の作成に際し、貴重なご意見をいただきました人事部人事課石川進一郎様に深く感謝いたします。また、本研修の計画及び実施にあたり、根岸仁大洗研究所長をはじめ、JAEA OBの伊藤治彦氏及び棚瀬正和博士、JAEA 内から燃料安全研究 Gr.中村仁一博士、照射材料工学研究 Gr.根本義之研究主幹、環境監視線量計測課前田英太主査、同課濱口拓氏、高速炉技術課岡垣昌樹氏、HTTR 技術課石塚悦男博士、計画管理課木村伸明主査、廃止措置推進課井手広史課長、同課松井義典氏、技術課竹本紀之課長、同課佐谷戸夏紀氏、同課冬島拓実氏、同課森田寿氏、同課遠藤泰一氏、原子炉課柴田晃主査、同課井上修一主査、同課小沼勇一氏、ホットラボ課川島雅人氏に講師として、多大なご協力とご尽力をいただいたことにより、質の高い研修を行い、原子力に携わる若手の技術者・研究者の人材を育成することができていることに、深く御礼申し上げます。

また、所属機関・部署の方々、諸手続きに尽力いただいた方々の協力に対する心からの感謝も含め、この場を借りて、深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 今泉 友見, 竹本 紀之, 出雲 寛互, 井手 広史, 松井 義典, 相沢 静男, 堀 直彦, “最先端研究基盤 JMTR 及び関連施設を用いた研修講座の新設”, JAEA-Review 2012-012, (2012), 25p.
- 2) 木村 伸明, 竹本 紀之, 大岡 誠, 石塚 悦男, 中塚 亨, 伊藤 治彦, 石原 正博, “最先端研究基盤としての JMTR 及び関連施設を活用した研修 (2012 年度)”, JAEA-Review 2012-055, (2013), 40p.
- 3) 江口 祥平, 竹本 紀之, 谷本 政隆, 久保 彩子, 石塚 悦男, 中村 仁一, 伊藤 治彦, “JMTR 及び関連施設を活用した実践型オンサイト研修 (2014 年度)”, JAEA-Review 2015-005, (2015), 38p.
- 4) 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, “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)”, JAEA-Review 2016-001, (2016), 31p.
- 5) 江口 祥平, 竹本 紀之, 柴田 裕司, 谷本 政隆, 楠 剛, “JMTR 及び関連施設を活用した実践型オンサイト研修 (2016 年度)”, JAEA-Review 2017-007, (2017), 32p.
- 6) 江口 祥平, 柴田 裕司, 今泉 友見, 永田 寛, 谷本 政隆, 楠 剛, “JMTR 及び関連施設を活用した実践型オンサイト研修 (2017 年度)”, JAEA-Review 2017-032, (2018), 26p.
- 7) 江口 祥平, 中野 寛子, 大塚 紀彰, 西方 香緒里, 永田 寛, 井手 広史, 楠 剛, “JMTR 及び関連施設を活用した実践型オンサイト研修 (2018 年度)”, JAEA-Review 2019-012, (2019), 22p.
- 8) 中野 寛子, 西方 香緒里, 永田 寛, 井手 広史, 花川 裕規, 楠 剛, “JMTR 及び関連施設を活用した実践型オンサイト研修 (2019 年度)”, JAEA-Review 2022-073, (2023), 23p.
- 9) 日本原子力研究開発機構, <https://www.jaea.go.jp/> (参照: 2023 年 10 月 3 日) .
- 10) IAEA, “Research Reactor Database”, Research Reactors, <https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home> (参照: 2023 年 10 月 3 日) .
- 11) 日本原子力産業協会, Press Release, “世界の原子力発電開発の動向 2021 年度版を刊行”, https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2021/05/doukou2021-press_release.pdf (参照: 2023 年 10 月 3 日) .
- 12) Ir. Paul G.T. de Jong, “PALLAS a nuclear reactor fit for the future!”, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1575_CD_web/datasets/presentations/Session%20C/C09_Wijtsma%20Netherlands.pdf (参照: 2023 年 10 月 3 日) .
- 13) IAEA, “Nuclear Power Reactors in the World” 2017 Edition, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS_2-37_web.pdf (参照: 2023 年 10 月 3 日) .
- 14) 経済産業省資源エネルギー庁, “日本の原子力発電所の現状”, https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf (参照: 2023 年 10 月 3 日) .
- 15) 経済産業省資源エネルギー庁, “エネルギー基本計画”, https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf (参照: 2023 年 10 月 3 日) .
- 16) 日本原子力研究開発機構, 高温工学試験研究炉 (HTTR) の概要, <https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/jp/faq/htrr.html> (参照: 2023 年 3 月 6 日) .
- 17) 日本原子力研究開発機構, JMTR パンフレット, “New JMTR”, (2011).
- 18) 日本原子力研究開発機構, “JMTR で利用可能な照射試験技術”, シンポジウム 材料試験炉 JMTR の新たな挑戦, 2007 年 3 月 8 日, (2007) .

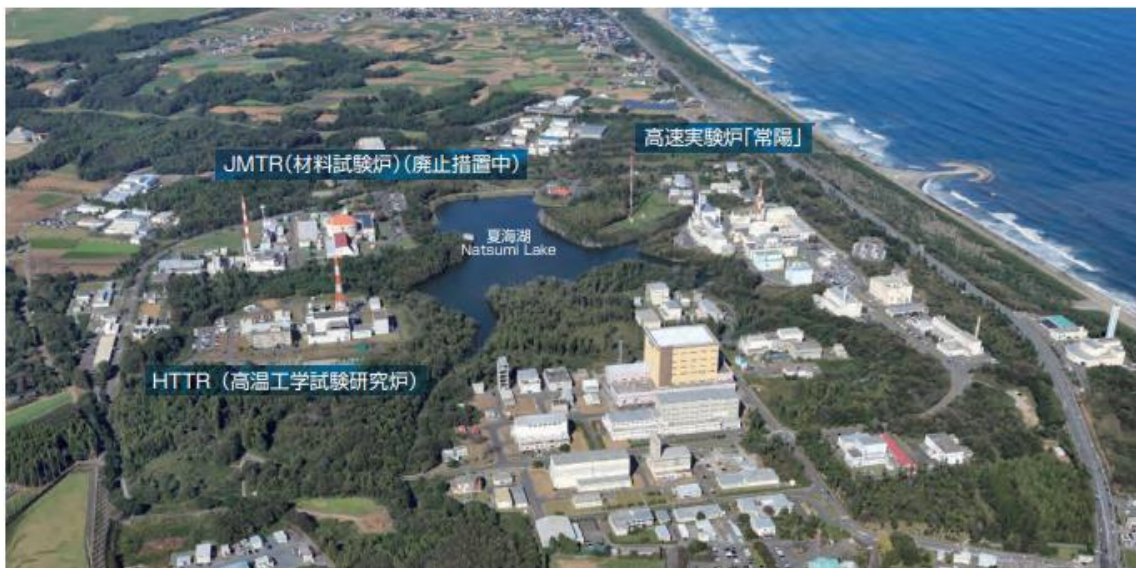
- 19) 中野 純一, 原子力環境におけるオーステナイトステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れに関する研究 (学位論文) , JAEA-Review 2008-064, (2009) , 175p.
- 20) 染谷 博之, 小林 敏樹, 新見 素二, 星屋 泰二, 原山 泰雄, GENGTC-JB:照射用キャプセル内温度評価プログラム, JAERI-M 87-148, (1987) , 25p.
- 21) 日本原子力研究開発機構, 大洗研究所パンフレット, (2021.7) .

付録

1. 大洗研究所の照射試験研究基盤施設

大洗研究所では、付録図 1-1 に示すとおり、「常陽」(高速実験炉、熱出力 140MW)、HTTR (High Temperature engineering Test Reactor、高温工学試験研究炉、熱出力 30MW)という仕様の異なる 2 基の研究用原子炉と、それらの研究用原子炉に関連する照射後試験施設を有しており、国内のみならず国際的にも新型炉研究における中核的な役割を担っている^{A-1)}。また、これらの施設が有する研究実績は、福島技術支援や国内外の人材育成に貢献している。JMTR (Japan Materials Testing Reactor、熱出力 50MW)は 1968 年の運転開始から原子炉材料や燃料の基礎研究、安全研究、発電用原子炉の開発や RI 製造のような様々な原子力研究開発活動に貢献してきたが、2021 年 3 月に廃止措置計画が認可された。

本研修は、これまで蓄積した照射技術の継承及び将来の新しい照射試験炉建設に向けた検討の一環として、主に JMTR 及びその関連施設を活用して実施した。大洗研究所の原子炉施設及び照射後試験施設の概要を以下に示す。

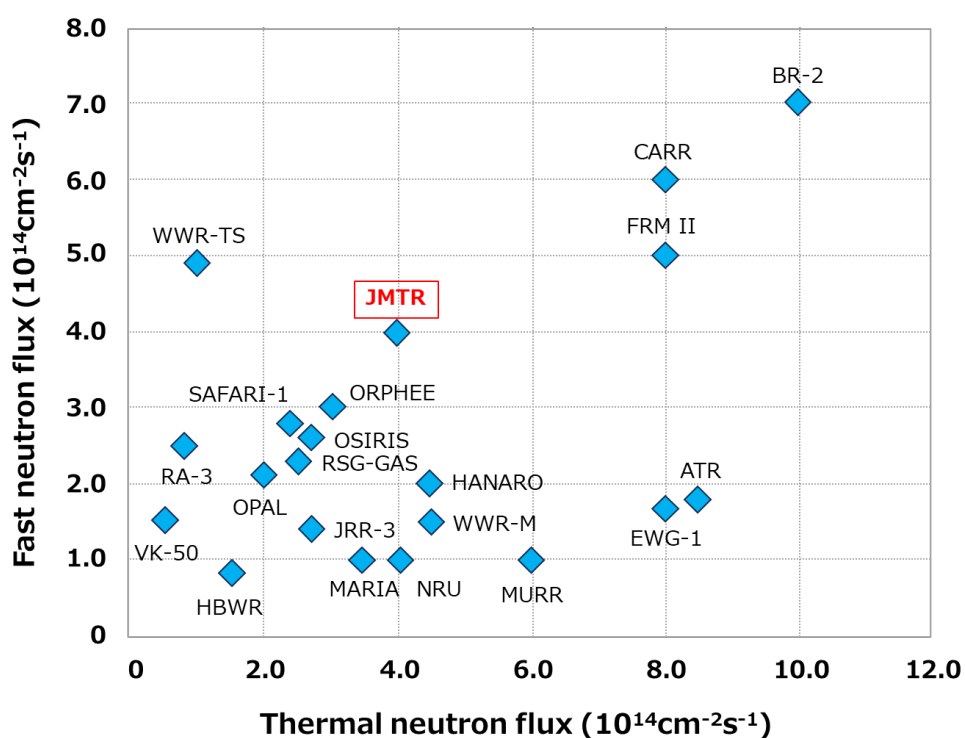


付録図 1-1 JAEA 大洗研究所の有する研究用原子炉

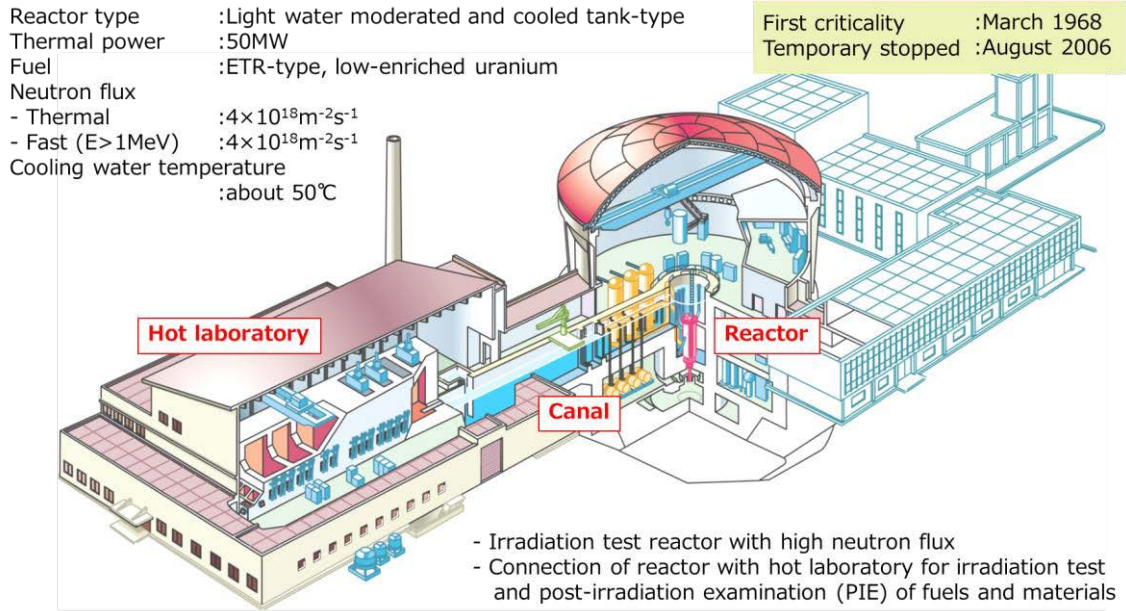
1.1 原子炉施設

(1) JMTR

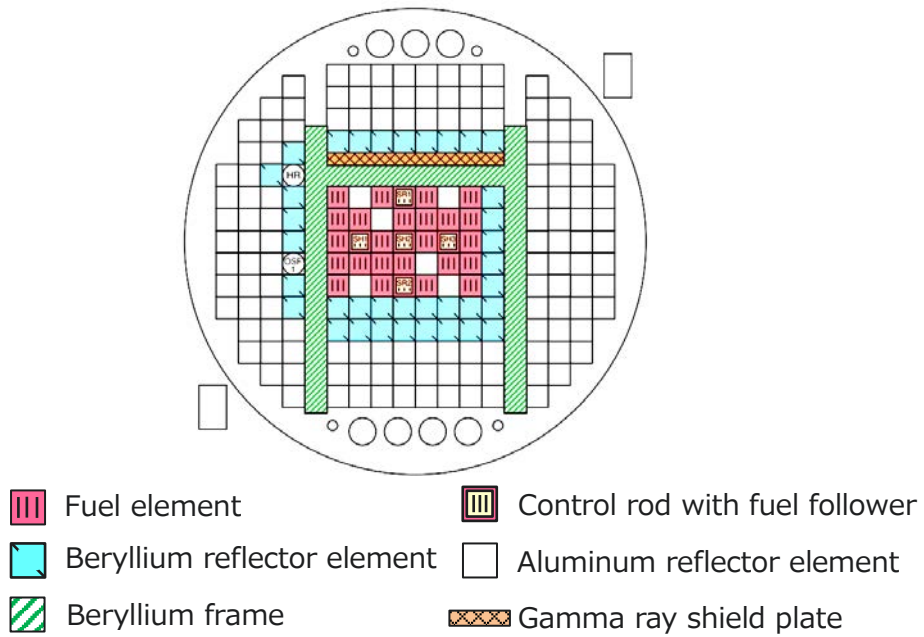
JMTR は、発電用原子炉等で使用する燃料及び材料等に中性子を照射し、それらの耐久性や適性を試験する「原子炉を作るための原子炉」として建設され、1968年3月に初臨界に達した国内最大の軽水減速冷却タンク型の材料試験炉である。付録図 1.1-1 に示すように世界でも有数の高い中性子束を有しており、これまでに165サイクルの運転を行い、軽水炉の燃料及び材料の照射試験等に広く利用されてきた。付録図 1.1-2 に JMTR の概要、付録図 1.1-3 に JMTR の炉心配置例を示す^{A-2)}。なお、JMTR は、2017年4月1日に公表された施設中長期計画において廃止施設に分類されており、今後は、これまでに蓄積してきた照射試験技術の継承を図りつつ、計画的に廃止措置を進めていくこととしている^{A-2)}。



付録図 1.1-1 世界の研究用原子炉の中性子束^{A-3)}(Research Reactor Databaseの数値を基に作成)



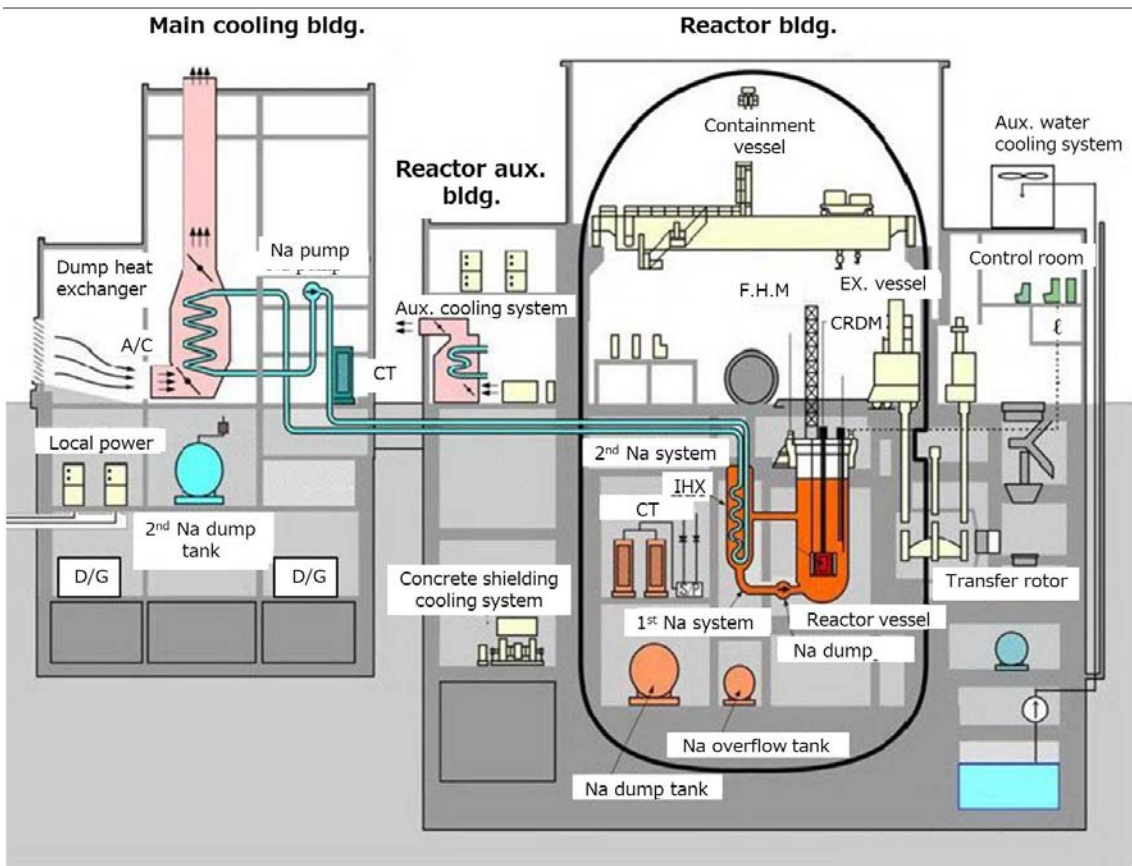
付録図 1.1-2 JMTR の概要 ^{A-2)}



付録図 1.1-3 JMTR の炉心配置例 ^{A-2)}

(2) 「常陽」

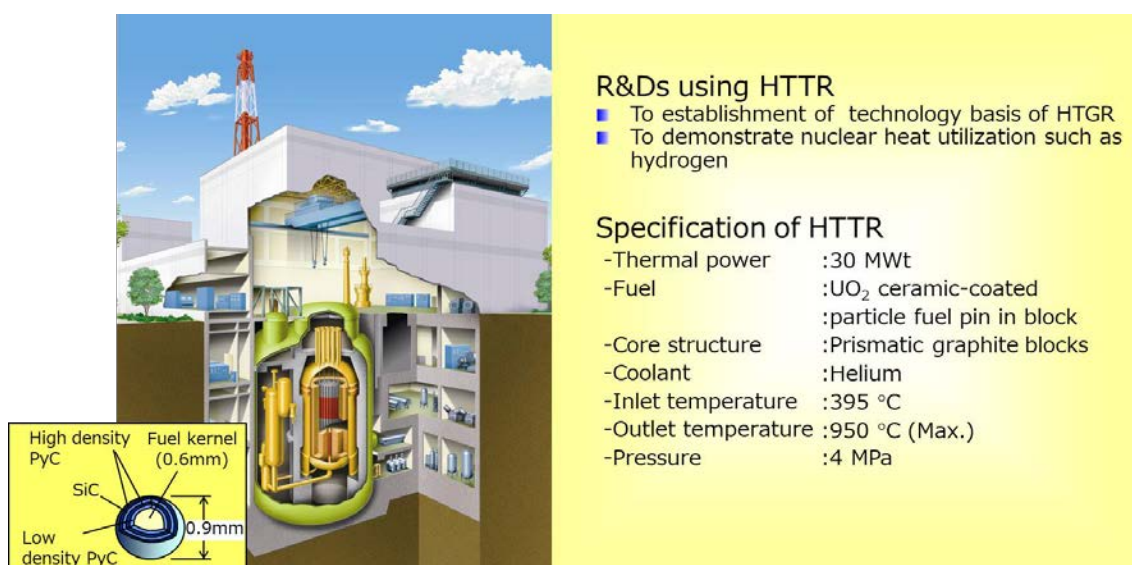
「常陽」は、1977年4月に初臨界に達したウラン・プルトニウム混合酸化物(MOX)燃料を用いたナトリウム冷却型の高速実験炉である。運転試験を通じた技術の高度化、燃料及び材料の照射、高速炉実用化のための新技術の実証を主な役割としており、これまで、増殖炉心(MK-I炉心)、照射炉心(MK-II炉心)、高性能照射炉心(MK-III炉心)と機能を向上させながら運転を行ってきた。今後は、放射性廃棄物の減容及び有害度の低減に係る研究や高速炉の安全研究等を行うこととしている。付録図 1.1-4 に「常陽」の概要を示す^{A-2)}。



付録図 1.1-4 「常陽」の概要^{A-2)}

(3) HTTR

HTTRは、1998年11月に初臨界に達した黒鉛減速ヘリウムガス冷却型の試験研究用原子炉であり、これまで、次世代の高温ガス炉(High Temperature Gas-cooled Reactor、以下「HTGR」という。)に必要な基盤技術開発及び高度化、並びに HTGR から供給される熱を利用した水素製造法の研究開発を行ってきた。今後は、HTTR への水素製造設備をはじめとした熱利用設備の接続を計画しており、HTGR の実用化に向けた研究開発を進めることとしている。付録図 1.1-5 に HTTR の概要を示す^{A-2)}。



付録図 1.1-5 HTTR の概要^{A-2)}

1.2 照射後試験施設

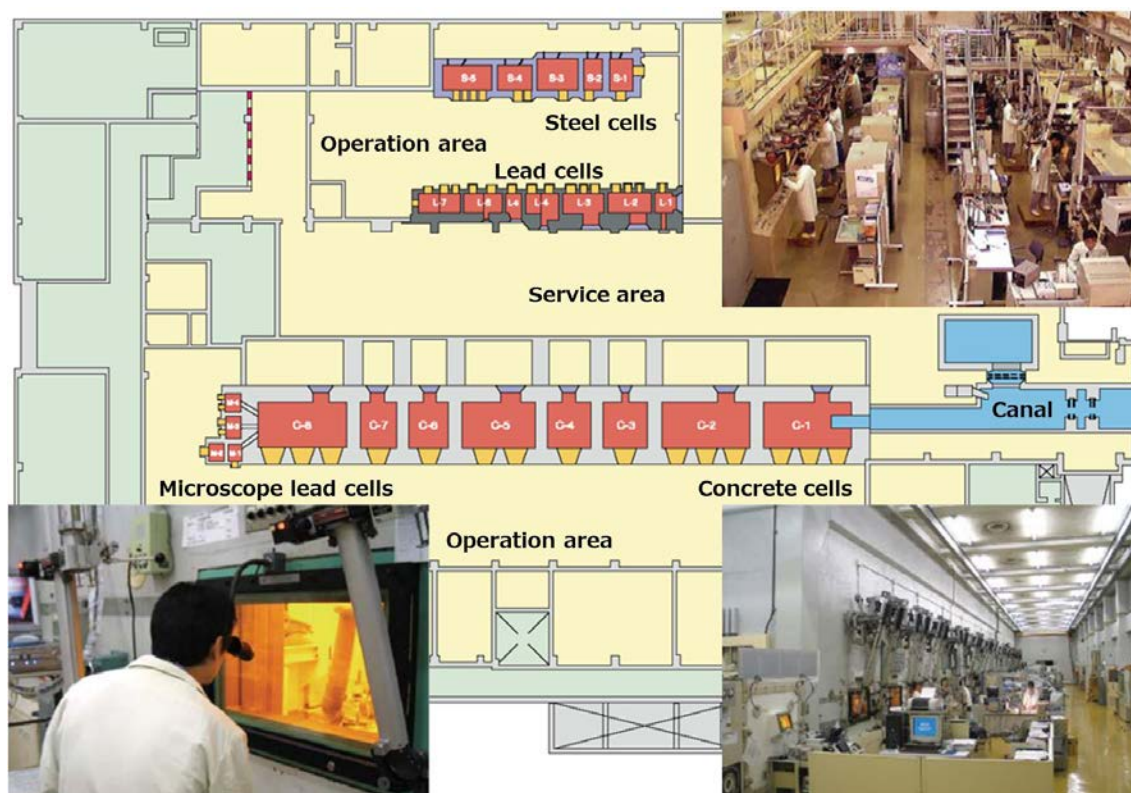
大洗研究所は、JMTR で照射した試料の照射後試験を行う JMTR ホットラボ(以下「JMTR HL」という。)、¹⁾「常陽」で照射した試料の照射後試験を行う FMF (Fuel Monitoring Facility、照射燃料集合体試験施設)、AGF (Alpha-Gamma Facility、照射燃料試験施設)、MMF (Material Monitoring Facility、照射材料試験施設)及び MMF-2(第2照射材料試験施設)を有している^{A-1)}。

JMTR HL は、付録図 1.2-1 に示すように、照射されたキャプセル及びラビット(以下「キャプセル等」という。)の解体や各種試験を行うコンクリートセル 8 基、材料強度試験等を行う鉛セル 7 基及び鉄セル 5 基並びに顕微鏡専用の鉛セル 4 基を有している。また、付録図 1.1-2 に示すように、JMTR HL と原子炉がカナル(水路)によって結ばれていることが特徴であり、水中を通して効率的かつ安全に照射試料を移送することが可能である^{A-2)}。

FMF は、「常陽」に隣接した大型照射後試験施設であり、燃料集合体及び燃料ピンの非破壊試験や破壊試験が行われ、更に詳細な試験については AGF 及び MMF で行う。AGF では、高速炉燃料に対する金相試験や核分裂生成物(Fission Product、以下「FP」という。)放出試験等やマイ

ナーアクチニド(Minor Actinide、以下「MA」という。)核種含有量の分析を行い、MMF 及び MMF-2 では、高速炉用の構造材料や制御材料等に対する材料強度試験や物性試験等を行う^{A-2)}。

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



付録図 1.2-1 JMTR HL のホットセルの概要^{A-2)}

参考文献

- A-1) 日本原子力研究開発機構, 大洗研究所パンフレット, (2021.7) .
- A-2) 日本原子力研究開発機構, <https://www.jaea.go.jp/> (参照 : 2023 年 3 月 6 日) .
- A-3) IAEA, “Research Reactor Database”, Research Reactors,
<https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home> (参照 : 2023 年 10 月 3 日) .

This is a blank page.

