



JAEA-Review

2021-064

DOI:10.11484/jaea-review-2021-064

「新たな照射試験炉の建設に向けたワークショップ」  
報告集

2020年12月22日～23日、東京都 千代田区

Proceedings of the Workshop for Constructing New Materials Testing Reactor  
December 22-23, 2020, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan

材料試験炉部

Department of JMTR

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

Waste Management and Decommissioning Technology Development Center

Oarai Research and Development Institute

Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development

March 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)は、  
下記まで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ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課  
〒 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.  
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.  
Availability and use of the results of this report, please contact  
Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub,  
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, 2022

「新たな照射試験炉の建設に向けたワークショップ」報告集  
2020年12月22日～23日、東京都 千代田区

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

(2021年11月17日受理)

JMTR 後継としての新たな照射試験炉の建設に向けた検討を進めることを目的とした「JMTR 後継炉検討委員会」において、公開の場で広く照射試験への理解を促すとともに、利用ニーズの意見聴取等を目的としたワークショップの開催が提案された。また、ワークショップについては、新たな照射試験炉の在り方等に関する意見交換の場として定期的を開催すること、議論の場を国内に限定せずに開催することも検討するよう提案された。これらの提案を受け、新たな照射試験炉の建設に向けたワークショップを開催した。

本ワークショップでは、新たな照射試験炉に対する利用ニーズの明確化を目的とし、軽水炉安全性向上、新型炉・次世代炉開発等の原子力研究開発、材料基礎研究等の科学技術・学術研究、RI 製造等の産業利用等に関して、産業界、学術界におけるステークホルダーによる講演とともに、新たな照射試験炉に求められる利用ニーズ、国内における今後の照射機能の在り方、施設運営・供用の在り方等について、パネルディスカッションによる自由な議論が行われた。

本報告集は、これらの発表資料等を取りまとめたものである。

**Proceedings of the Workshop for Constructing  
New Materials Testing Reactor  
December 22-23, 2020, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan**

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 17, 2021)

In the “The study committee on Post-JMTR” which aims at discussing for the construction of a new materials testing reactor as Post JMTR, it was proposed to hold a workshop to promote the public understanding and to hear the opinions of utilization needs. In addition, it was proposed that the workshop be held regularly as a place for exchanging opinions about ideal way of the new materials testing reactor, and that discussing be held with no limit to Japan. In response to these proposals, the workshop was held to discuss the construction of the new materials testing reactor.

This workshop was held with the aim of clarifying the utilization needs of the new materials testing reactor. In the workshop, it was given lecture on safety improvement of light-water reactors, nuclear research and development of new and next-generation reactors, scientific and academic research of basic research on materials, and industrial applications for RI production by stakeholders in industry and academia. In addition, panel discussions were held to freely discuss the utilization needs required for the new materials testing reactor, the ideal situation of irradiation functions in Japan, and the operation and use of facilities.

This proceeding is a compilation of these presentations and others.

Keywords: JMTR, New Materials Testing Reactor, Workshop, Utilization Needs, Irradiation Function

---

(Ed.) The secretariat of the study committee on Post-JMTR

## 目 次

はじめに-----	1
<b>1. 第1部：原子力研究開発における利用ニーズ-----</b>	<b>3</b>
<b>1-1 社会のニーズに応える：継続的安全性向上の基盤として-----</b>	<b>5</b>
◎ 関村 直人（東京大学 副学長 大学院 工学系研究科 教授）	
<b>1-2 新たな照射試験炉への期待 *未来社会に大きく貢献*-----</b>	<b>25</b>
◎ 駒野 康男（元日本原子力学会会長）	
<b>1-3 核燃料の物質科学と新たな照射炉への期待-----</b>	<b>35</b>
○ 黒崎 健（京都大学 複合原子力科学研究所 教授）	
<b>1-4 炉物理・臨界安全の観点から-----</b>	<b>45</b>
○ 中島 健（京都大学 複合原子力科学研究所 副所長・教授）	
<b>1-5 発電炉向け研究開発における照射炉試験のニーズ-----</b>	<b>53</b>
○ 近藤 貴夫（日立 GE ニュークリア・エナジー グループリーダー主任技術者）	
<b>1-6 東芝エネルギーシステムズにおける高温ガス炉の開発と照射試験に対する期待-----</b>	<b>63</b>
○ 坪井 靖（東芝エネルギーシステムズ 参事）	
<b>2. 第2部：産業利用における利用ニーズ-----</b>	<b>73</b>
<b>2-1 国内における放射性同位元素の医療利用と取り巻く課題-----</b>	<b>75</b>
◎ 中村 伸貴（日本アイソトープ協会 医薬品部長）	
<b>2-2 医用放射性同位元素の国産化へ向けた取り組み-----</b>	<b>89</b>
◎ 諸岡 健雄（日本医用アイソトープ開発準備機構 業務執行理事）	
<b>2-3 RI 製造の現状と展望-----</b>	<b>95</b>
◎ 河村 弘（千代田テクノル 特別参与）	
<b>3. 第3部：科学技術・学術研究における利用ニーズ-----</b>	<b>103</b>
<b>3-1 学術研究における照射炉利用研究ニーズ—東北大金研の共同利用研究を中心に—-----</b>	<b>105</b>
◎ 永井 康介（東北大学 金属材料研究所 センター長・教授）	
<b>3-2 国際共同研究における海外炉を用いた材料照射研究の課題から考える国内炉の必要性-----</b>	<b>113</b>
○ 檜木 達也（京都大学 エネルギー理工学研究所 准教授）	
<b>3-3 国内における照射材料研究の現況と方向性-----</b>	<b>127</b>
○ 橋本 直幸（北海道大学 大学院工学研究院 教授）	
<b>3-4 核融合炉材料分野に想定される利用ニーズ-----</b>	<b>139</b>
○ 笠田 竜太（東北大学 金属材料研究所 教授）	
<b>3-5 国内外のイオン加速器等によるシミュレーション照射の動向と照射炉実現までの相互補完について-----</b>	<b>149</b>
○ 柴山 環樹（北海道大学 大学院工学研究院 教授）	

<b>4. 第4部：新たな照射試験炉の検討</b> -----	169
<b>4-1 国内外の状況を踏まえた新たな照射試験炉の在り方</b> -----	171
◎ 寺井 隆幸（東京大学 名誉教授）	
<b>4-2 JMTR 後継となる新たな照射試験炉の建設に向けた検討状況</b> -----	183
◎ 神永 雅紀（日本原子力研究開発機構 大洗研究所 副所長）	
◎：会場参加   ○：リモート参加	
<b>5. 第5部：パネルディスカッション</b> -----	195
<b>5-1 パネルディスカッションのテーマ</b> -----	197
<b>5-2 パネルディスカッションでの討議内容</b> -----	198

## Contents

<b>Introduction</b> -----	1
<b>1. Part 1 : Utilization Needs in Nuclear Research and Development</b> -----	3
<b>1-1 Meeting the Needs of Society : As a Basis for Continuous Safety Improvement</b> -----	5
◎ Naoto SEKIMURA (Vice President of the University of Tokyo, Professor of Graduate School of Engineering)	
<b>1-2 Expectations for a New Materials Testing Reactor *Contribution Greatly to the Future Society*</b> -----	25
◎ Yasuo KOMANO (Former President, Atomic Energy Society of Japan)	
<b>1-3 Materials Science of Nuclear Fuel and Expectations for New Materials Testing Reactor</b> -----	35
○ Ken KUROSAKI (Professor, Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science of Kyoto University)	
<b>1-4 From the Viewpoint of Reactor Physics and Criticality Safety</b> -----	45
○ Ken NAKAJIMA (Deputy Director, Professor, Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science of Kyoto University)	
<b>1-5 User Needs for Irradiation Tests in R&amp;D for Power Reactor</b> -----	53
○ Takao KONDO (Lead Technician, Group Leader, Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.)	
<b>1-6 Development of High Temperature Gas-cooled Reactor and Expectations for Irradiation Tests at Toshiba Energy Systems</b> -----	63
○ Yasushi TSUBOI (Councilor, Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation)	
<b>2. Part 2 : Utilization Needs in Industrial Needs</b> -----	73
<b>2-1 Medical Use of Radioisotopes in Japan and Issue Surrounding Them</b> -----	75
◎ Nobutaka NAKAMURA (General Manager, Pharmaceutical Division, Japan Radioisotope Association)	
<b>2-2 Efforts toward the Domestic Production of Medical Radioisotopes</b> -----	89
◎ Takeo MOROOKA (Executive Director, Japan Foundation of Medical Isotope Development, General Incorporated)	
<b>2-3 Current Status and Prospects of RI Production</b> -----	95
◎ Hiroshi KAWAMURA (Special Participation, Chiyoda Technol Corporation)	
<b>3. Part 3 : Utilization Needs in Science, Technology, and Academic Research</b> -----	103
<b>3-1 Research Needs for the Use of Material Testing Reactors in Academia – Focusing on Cooperative Research in Institute for Materials Research, Tohoku University –</b> -----	105
◎ Yasuyoshi NAGAI (Center Director, Professor, Institute for Materials Research, Tohoku University)	

3-2	Necessity of Domestic Reactors Based on the Issue of Material Irradiation Research Using Foreign Reactors in International Cooperative Research-----	113
	○ Tatsuya HINOKI (Associate Professor, Institute of Advanced Energy, Kyoto University)	
3-3	Current Status and Direction of Research on Irradiation Materials in Japan)-----	127
	○ Naoyuki HASHIMOTO (Professor, Faculty of Engineering, Hokkaido University)	
3-4	Anticipated User Needs in the Field of Fusion Reactor Materials-----	139
	○ Ryuta KASADA (Professor, Institute for Materials Research, Tohoku University)	
3-5	Trends of Simulation Irradiation with Ion Accelerators and Other Devices in Japan and Abroad, and Complementation to Realization of Irradiation Reactors -----	149
	○ Tamaki SHIBAYAMA (Professor, Faculty of Engineering, Hokkaido University)	
4.	<b>Part 4 : Consideration of a New Materials Testing Reactor</b> -----	169
4-1	A Way of New Materials Testing Reactor Based on the Domestic and International Situation -	171
	◎ Takayuki TERAJ (Emeritus Professor, The University of Tokyo)	
4-2	Feasibility Study for Constructing New Materials Testing Reactor following JMTR -----	183
	◎ Masanori KAMINAGA (Deputy Director General, Oarai Research and Development Institute, Japan Atomic Energy Agency)	
	◎ : attend ○ : attend online	
5.	<b>Part 5 : Panel Discussion</b> -----	195
5-1	Theme of Panel Discussion-----	197
5-2	Contents of Panel Discussion -----	198

## はじめに

JMTRの廃止決定により、我が国は第5次エネルギー基本計画に示されている軽水炉の安全性、信頼性・効率性向上のための技術開発や新型炉開発に必要な照射場を失い、国内において実用的なデータの取得ができなくなっており、運転技術や研究開発を行う原子力人材を育成することも困難となっている。工業用・医療用 RI 製造についても海外に依存するしかないが、生産国での利用が優先であり、国内への安定供給が困難な状況である。また、海外においても HBWR (Halden Boiling Water Reactor) を始め多くの高出力照射試験炉が高経年化により相次いで廃止されてきており、現在稼働している多くの照射試験炉も、今後 10 年後には廃止の可能性が高くなっている。このような中、海外では、フランスの JHR (Jules Horowitz Reactor)、アルゼンチンの RA-10 等の高出力照射試験炉の建設が進められている。一方、国内では平成 28 年末に決定された「もんじゅ」の廃止措置移行に伴い、「もんじゅ」サイトに新たに試験研究炉を設置することが決定し、概念設計が開始された。当該試験研究炉については、中性子ビーム利用を主目的とした中出力炉が最も適切であるとの方向性が示されている。したがって、これまでの研究開発で培った技術を維持・高度化するための基礎基盤技術の確立も行いつつ、我が国における上述の社会的要請に応えるためには、「もんじゅ」サイトの試験研究炉に加えて、軽水炉等の燃料・材料の照射試験、RI 製造等にも対応できる高出力照射試験炉の建設に向けた検討も必要不可欠である。

日本原子力研究開発機構では、平成 29 年 4 月の JMTR の廃止決定及び平成 30 年 4 月の原子力研究開発基盤作業部会の提言を受け、理事長の下に JMTR 後継炉検討委員会を設置し、JMTR 後継となる新たな照射試験炉（以下「新照射試験炉」という。）の建設に向けた検討を開始した。検討に当たっては、新照射試験炉に求められる利用ニーズ、国内における照射機能・施設運営・供用の在り方等について、産学官の参加のもとで議論し、明確化することを目的として「新たな照射試験炉の建設に向けたワークショップ」を開催した。

「新たな照射試験炉の建設に向けたワークショップ」は 2020 年 12 月 22 日（火）から 23 日（水）の 2 日間にわたり、日本原子力研究開発機構 大洗研究所材料試験炉部の主催にて開催された。新型コロナウイルス感染症の感染・拡大防止の観点から、ウェビナー形式 (Webex を使用) を併用し、会場とリモート接続のハイブリット方式にて実施された。様々なステークホルダーによる 16 件の個別講演、4 つの題目についてのパネルディスカッションが行われ、参加者は合計 131 名となった。

本報告集では、これらの発表資料等を取りまとめた。

# 新たな照射試験炉ワークショップ

## ～照射試験炉の建設に向けて～

2020年12月22日(火)・23日(水)  
FUKURACIA 丸の内オアゾ

### 講演プログラム

12月22日(火)

10:20 【オープニング】

伊藤 洋一 (日本原子力研究開発機構 副理事長)

10:30 【第1部：原子力研究開発における利用ニーズ】

関村 直人 (東京大学 副学長 大学院 工学系研究科 教授)

駒野 康男 (元日本原子力学会会長)

中島 健 (京都大学 複合原子力科学研究所 副所長・教授)

黒崎 健 (京都大学 複合原子力科学研究所 教授)

近藤 貴夫 (日立GEニュークリア・エナジー グループリーダー主任技師)

坪井 靖 (東芝エネルギーシステムズ 参考)

15:00 【第2部：産業利用における利用ニーズ】

中村 伸貴 (日本アイソトープ協会 医薬品部長)

諸岡 健雄 (日本医用アイソトープ開発準備機構 業務執行理事)

河村 弘 (千代田テクノル 特別参加)

12月23日(水)

10:30 【第3部：科学技術・学術研究における利用ニーズ】

永井 康介 (東北大学 金属材料研究所 センター長・教授)

檜木 達也 (京都大学 エネルギー理工学研究所 准教授)

橋本 直幸 (北海道大学 大学院 工学研究院 教授)

笠田 竜太 (東北大学 金属材料研究所 教授)

柴山 環樹 (北海道大学 工学研究院 教授)

14:00 【第4部：新たな照射試験炉の建設に向けた検討】

寺井 隆幸 (東京大学 名誉教授)

神永 雅紀 (日本原子力研究開発機構 大洗研究所 副所長)

15:30 【第5部：パネルディスカッション】

寺井 隆幸 (東京大学 名誉教授)

関村 直人 (東京大学 副学長 大学院 工学系研究科 教授)

永井 康介 (東北大学 金属材料研究所 センター長・教授)

小澤 隆 (日本電機工業会 原子力部長)

中熊 哲弘 (電気事業連合会 原子力部長)

高橋 明男 (日本原子力産業協会 特任フェロー)

中村 伸貴 (日本アイソトープ協会 医薬品部長)

河村 弘 (千代田テクノル 特別参加)

17:00 【クロージング】

青砥 紀身 (日本原子力研究開発機構 理事)

日本原子力研究開発機構では、材料試験炉JMTRの廃止措置決定を踏まえて、安全研究や材料照射研究等を担う新たな照射試験炉の建設に向けた検討を進めています。

ワークショップでは、新たな照射試験炉に対する利用ニーズの明確化を目的とし、軽水炉安全性向上、新型炉・次世代炉開発等の原子力研究開発、材料基礎研究等の科学技術・学術研究、RI製造等の産業利用等に関して、産業界、学術界におけるステークホルダーによる講演とパネルディスカッションによる自由な議論を行います。



材料試験炉JMTR  
(廃止措置計画認可申請中)



### FUKURACIA 丸の内オアゾ

〒100-0005 東京都千代田区丸の内1-6-5

・12月22日(火)：会議室C (15階)

・12月23日(水)：ホールA (16階)

両日ともリモート接続による参加が可能です。  
詳細は、以下の連絡先にお問い合わせください。  
電話：029-267-1919 (内線 3460)

## 1. 第 1 部

原子力研究開発における利用ニーズ

This is a blank page.

## 1-1 社会のニーズに応える： 継続的安全性向上の基盤として

東京大学 関村 直人

### 1. はじめに：社会からの明示的ではない要請に応えていくための「場」

本年8月より原子力規制委員会において継続的な安全性向上に関する検討チームが発足し、12月までに6回の議論を重ねている。科学技術に関する規制の考え方、審査の基準と検査制度の役割に閉じることなく継続的な安全性向上を図るための規制制度や規制機関の在り方や、原子力分野における事業者のインセンティブ構造や文化に関わる全体論に加えて、リスク情報と内在する不確実性及びパフォーマンススペースの活用、多様なステークホルダーとの議論から技術が社会に役立つとの発想のみならず社会が技術をいかに使いこなすのかも議題となっている。

ここでは、このような継続的な安全性向上に関する検討を基盤として、福島第一原子力発電所事故を契機に各国や国際的な連携が進められている ATF（事故耐性燃料）の開発や SMR 等革新炉の安全と安全規制のための新たな枠組みを事例として議論を行いたい。

### 2. 事故耐性燃料の開発に要請されるイノベーションの「場」

OECD/NEA 前次長の Daniel Iacane 氏によれば、TRL (Technology Readiness Level: 技術成熟度) の検討は主観に基づくものであって、その中に内在するリスクを低減していくことが求められる。多様な視点で国際的な議論を育み、例えば早い段階から規制者の視点で新たな技術に対する質的な課題を取り上げ、必要なデータの獲得と知識化を進めることが、イノベーションにつながる。OECD のハルデンプロジェクトが継続されない状況下において、多様な専門間の知識共有、社会との相互のコミュニケーションを備えた場として、照射試験炉の在り方を検討していくことが望まれよう。また、効果的かつ効率的な開発戦略を TRL の考え方も参照して、ロードマップとその継続的なローリングとして提示することが重要である。

### 3. おわりに：多様な「場」のネットワーク

日本学術会議は第 25 期の布陣が検討されてきている。第三部総合工学委員会の下での原子力安全に関する分科会では、これまでの検討を基盤として、一層の情報発信を行う予定である。

東京大学では日本原子力研究開発機構 (JAEA) 包括連携協定の下で、これまでの専門職大学院や大型設備共同利用の枠組みにとどまらない連携を模索してきた。今年4月に発足した国立研究開発法人連携講座は、規制委員会の支援も受けながら、JAEA と大学の連携のみならず、産業界、国際機関、研究者ネットワークによるチーム造りの母体となることが期待されている。

### キーワード：

社会と技術の関係、TRL、ATF、SMR 等革新炉、継続的イノベーション、Risk-informed Approach

新たな照射炉検討ワークショップ

2020年12月22日

## 社会のニーズに応える： 継続的安全性向上の基盤として

東京大学 関村 直人

東京大学 副学長、大学院工学系研究科原子力国際専攻 教授

日本学会会議連携会員

総合工学委員会委員・原子力安全に関する分科会委員長

原子力規制委員会・原子炉安全専門審査会会長

日本原子力学会・標準委員会委員長、原子力安全部会部会長

## 内容

- はじめに
  - 原子力規制委員会、日本学会会議等での議論に基づいて
- 多様な専門性を束ねる場として
  - 軽水炉技術開発のための照射試験検討会
  - 技術戦略マップとそのローリング過程
  - 軽水炉安全技術・人材ロードマップ
- 継続的な安全性向上と継続的なイノベーションの場として
- 多様でグローバルなネットワークをつなぐ場として
- まとめ

## 米国 原子力エネルギー革新・近代化法(2019年1月)

NEIMA: Nuclear Energy Innovation and Modernization Act

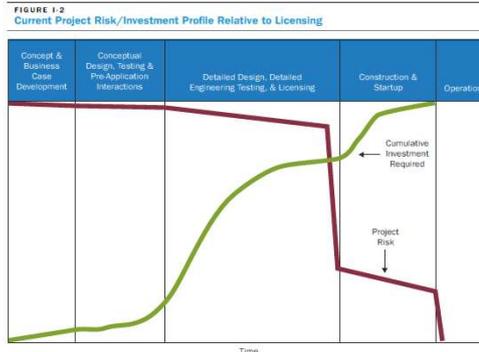
- NEIMAの概要
  - 先進的な原子炉の開発に向けて、産業界や投資家にインセンティブが働くような規制枠組みを作るよう、米国NRCに指示した特殊な法律
- 背景
  - 新しい概念の炉の規制・許認可プロセスには柔軟性が必要
- NRCへの指示: 先進的な原子炉の許認可プロセス
  - 2年以内に段階的許認可(staged licensing)を採用し、リスク情報を活用(risk-informed approach)したパフォーマンス・ベース(performance-based)の許認可評価技術とガイドに向けた戦略を開発
  - 2027年12月までに、新型炉のライセンス申請に関し、炉型に依存しない規制枠組みのためのルール作りを完了

原子力規制委員会「継続的安全性向上検討チーム」第2回会合(2020.9.10)  
資料2-2「規制アプローチに関する国際動向」(原子力規制庁 平野 雅司氏)

3

## (先進)原子炉許認可プロセスにおける リスクと投資の時間プロファイル

- 現行の(軽水炉システムを念頭においた)2段階プロセス
  - 建設許可
  - 運転ライセンス
- 先進原子炉システムのリスク
  - 技術的なリスク
  - マーケットからのリスク
  - 規制プロセスのリスク



Nuclear Innovation Alliance, Ashley E. Finan,  
“Enabling Nuclear Innovation: Strategies for Advanced Reactor Licensing” (April, 2016)

4

## (先進)原子炉許認可プロセスにおける リスクと投資の時間プロファイル

- 段階的許認可が採用された場合

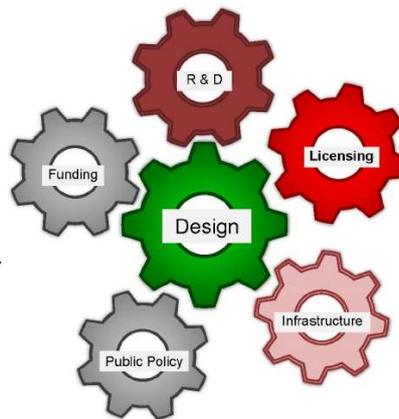


Nuclear Innovation Alliance, Ashley E. Finan,  
“Enabling Nuclear Innovation : Strategies for Advanced Reactor Licensing” (April, 2016)

5

## 研究開発、設計技術、許認可等を 相互に関係づけたロードマップ

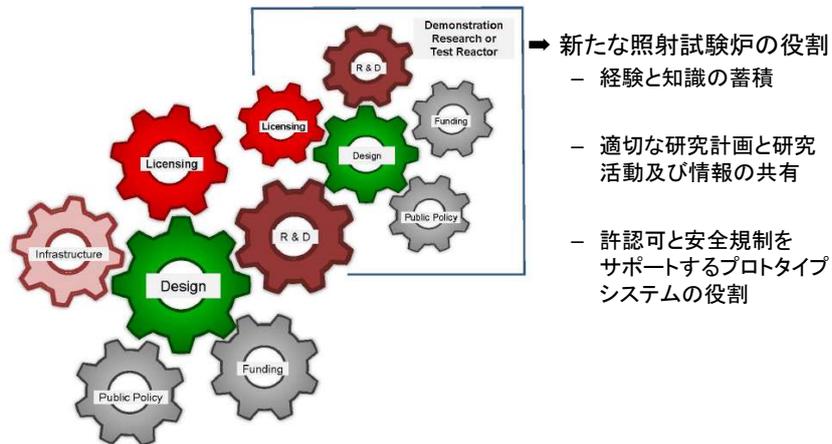
- 経験と知識の蓄積
- 適切な研究計画と研究活動及び情報の共有
- 許認可と安全規制をサポートするプロトタイプシステムの役割



US NRC, “A Regulatory Review Roadmap For Non-Light Water Reactors “ (2017)

6

## 試験炉も組み込んだ研究開発、設計技術、 許認可等を関係づけたロードマップ



US NRC, "A Regulatory Review Roadmap For Non-Light Water Reactors " (2017)

7

## ニーズの前に:ステークホルダのインセンティブ

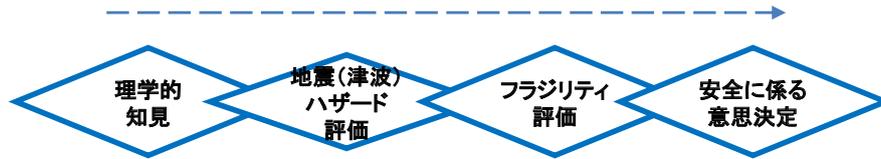
- 産業界や投資家のインセンティブ(米国)
  - ①リスク情報の活用
  - ②パフォーマンス・ベースド
  - ③原子力システムの型式に依存しない規制システム
- 我が国の課題
  - 地震、津波、火山などの自然現象は不確実性が大きく、定量的なリスクの評価に不確実性が大きい
    - 上記の3つは、米国と同様にインセンティブとして働くかは疑問
  - 社会・国民、自治体を含む各ステークホルダと規制・産業界の間のギャップ(の拡大)
  - 多様なステークホルダや専門家の間(のインセンティブ)を俯瞰的につなぎ、いわゆるニーズを形成するマネジメントシステムの欠如

8

## 自然現象と相互作用する複雑システムの 安全に係るリスク評価

糸井 達哉(現 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻)による

### ✓ 評価の方法論



### ✓ 不確実性の取扱い

### ✓ 情報の流れと受渡しの主体

日本学術会議公開シンポジウム「原子力発電所の自然災害への対応－福島事故の津波対策を例として－」  
における関村の講演資料(2017年8月1日)を改訂

9

## 自然現象のリスク評価において 取り扱うべき不確実性の種類

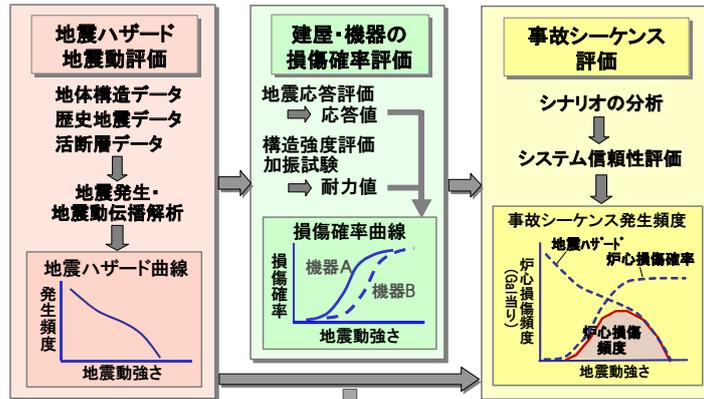
- 偶然的ばらつき
  - 自然現象が有するランダムな性質によるばらつき
  - ハザード曲線の評価の中で考慮されるばらつき
- 認識論的不確実性
  - 不完全な知識による不確実性
  - ロジックツリーの分岐として考慮される
  - 多数のハザード曲線の幅として考慮されるばらつき

10

## 確率論的リスク評価の評価フロー:地震PRAの例

日本原子力学会 地震PRA標準(2015年)

(震災の知見を反映、標準化できない課題は研究動向を解説、地震起因事象の機器・構造物のフジリティ規定を改定済み。新知見反映で現在、改定中。)



レベル2PRA(格納容器損傷頻度・FP挙動評価) → レベル3PRA(個人死亡リスク)  
 (シリアクシデント関連の新知見を反映し2016年標準改訂改定済。 (米国新知見を反映し、2018年標準改定) 現在、地震L2PRAへ拡張改定中)

## 社会の多様なニーズと原子力が直面する課題



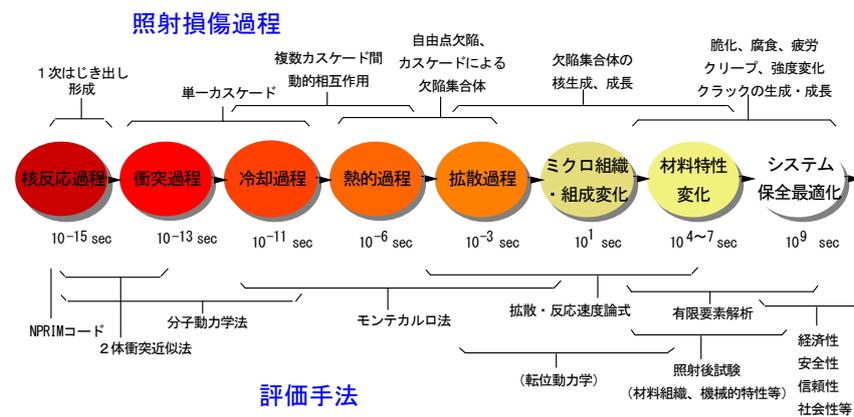
日本原子力学会原子力安全部会企画セッション「SMR等革新炉の安全と安全規制について:今後の取組」  
 舟木健太郎氏(資源エネルギー庁)講演資料より(2020年9月18日)

## 社会の「ニーズ」に応える 継続的な安全性向上・継続的なイノベーション

- 日本学術会議公開シンポジウム「新知見の扱いとその活用」(2020年9月10日)  
主催: 日本学術会議(第24期)総合工学委員会原子力安全に関する分科会
- 学術の動向(2020年12月刊行)  
「原子力利用の安全性に関する新知見の評価をめぐって」
  - 福田 収一先生  
(慶応義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科)  
「知識の時代から知恵の時代へ」
  - 佐倉 統先生  
(東京大学 情報学環・学際情報学府)  
「科学技術を社会の中で考える」
    - ✓ 第三の道が必要ではないか
      - 技術が社会を変える(専門家主義)
      - 社会が技術を変える(大衆至上主義)

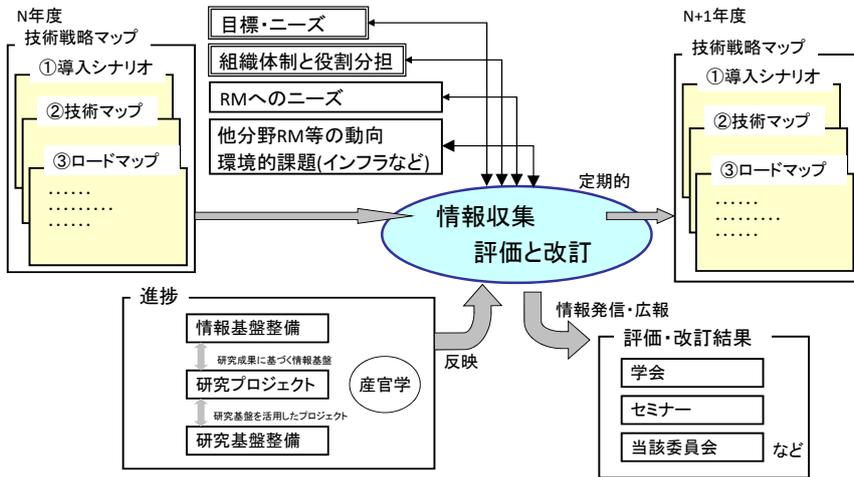


## 研究者のインセンティブ例 放射線照射損傷の物理過程と評価手法



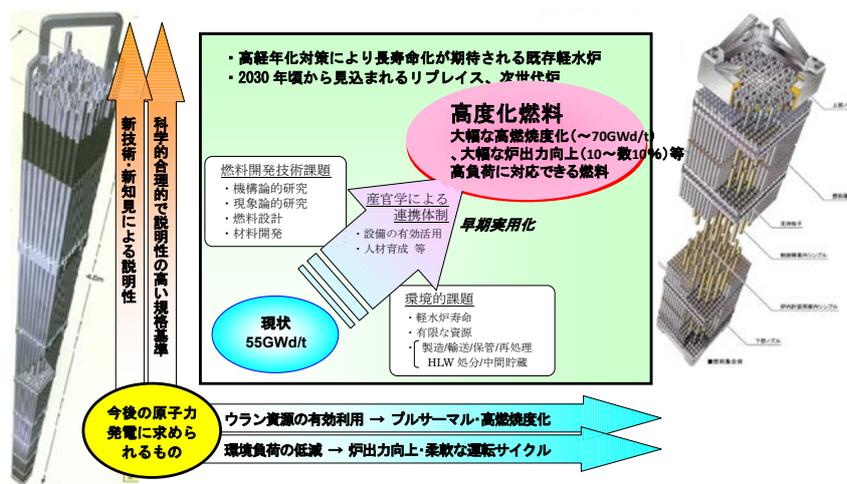
関村 直人、「原子力と先端技術 [ 1 ]」(原子力システム懇話会刊、1994年)を改訂

## 技術戦略マップの構築と コミュニケーション、ローリング



15

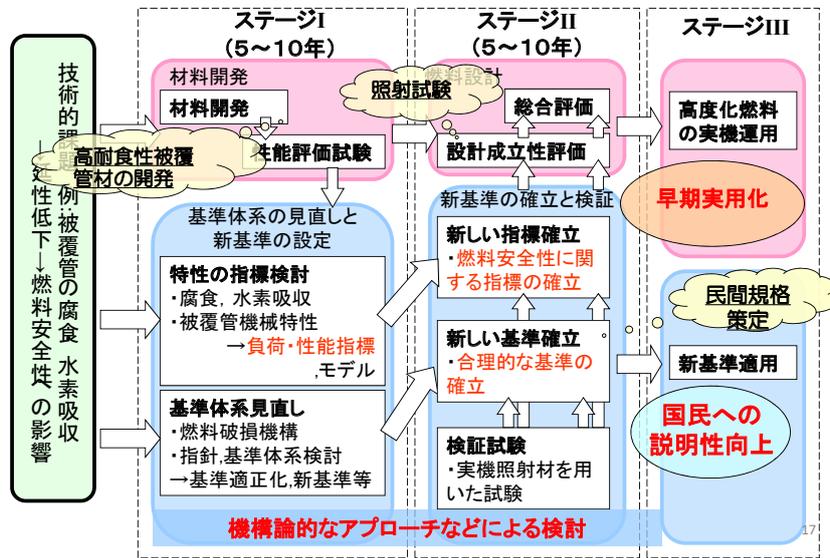
## 燃料高度化技術戦略マップの目標設定 (2006年時点)



日本原子力学会「2006年秋の大会」2006/9/27-29, 於:札幌, 北海道大学

16

## 燃料高度化技術戦略マップの概要 -照射試験の「ニーズ」を考える背景-



## 燃料分野における照射試験の重要度マトリックス

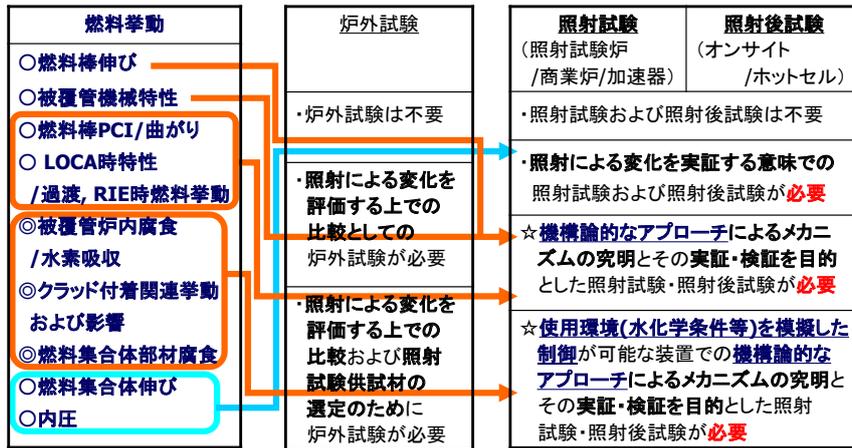
### 理解すべき燃料の各種挙動とその重要度

機構論	現象論	A. 実証・検証のためのデータ取得が望まれる	B. データ取得の必要性が低い
	A. メカニズムの究明が望まれる  ○: 燃料高度化における対応の重要性大 ◎: 水化学変更の影響を踏まえた高度化対応の重要性大	○被覆管機械特性 ・ペレットFPガス、リム挙動 ○燃料棒PCI/曲がり ○LOCA時特性/過渡、RIE時燃料挙動 ◎被覆管炉内腐食/水素吸収 ◎クラッド付着関連挙動および影響 ◎燃料集合体部材腐食	○燃料棒伸び ・ペレットクリープ
B. メカニズムの究明がほぼ成されている	・ペレット物性変化	・ペレット焼きしまり/固体スエリング	
C. 現知見の適用範囲内メカニズム究明の必要性が低い	・被覆管炉内クリープ/疲労/物性変化 ・燃料棒内PCボンディング ○燃料集合体伸び	—	
要素メカニズムの複合	○内圧	—	

「軽水炉技術開発のための照射試験に関する検討会」報告書(2006.4)より

## 燃料挙動と炉外試験、照射試験、照射後試験

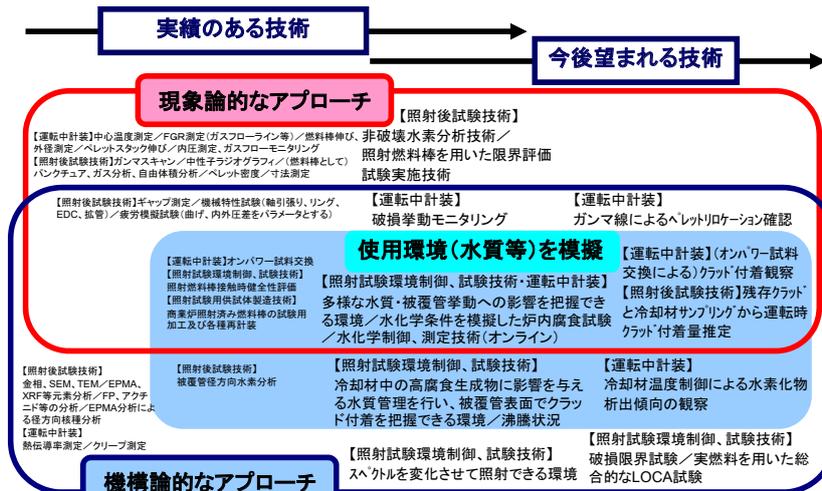
### 各種試験で得られる成果と高度化燃料開発での試験の必要性



「軽水炉技術開発のための照射試験に関する検討会」報告書(2006.4)より

19

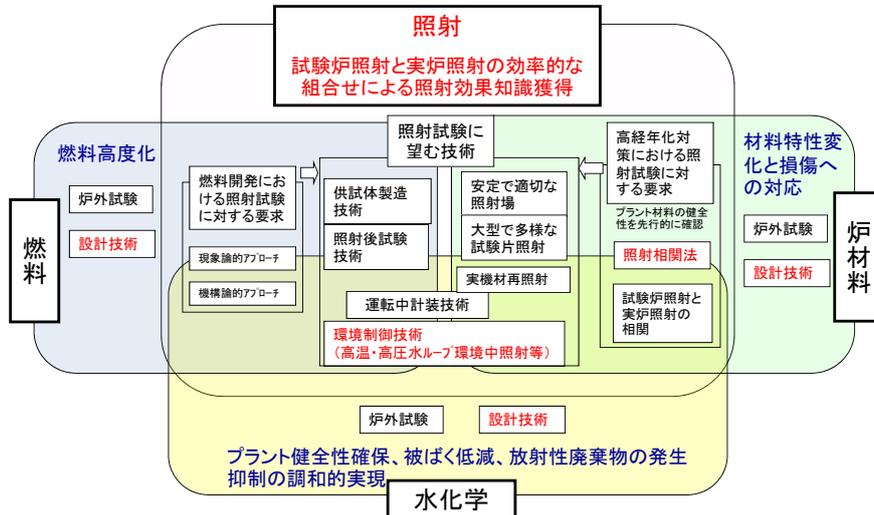
## 期待される照射試験技術と照射試験施設



「軽水炉技術開発のための照射試験に関する検討会」報告書(2006.4)より

20

### 3主要分野から見た技術情報の相関と知識獲得のための照射試験技術への要求



「軽水炉技術開発のための照射試験に関する検討会」報告書(2006.4)より <sup>21</sup>

(参考資料)

### 照射試験技術の要素と照射試験施設

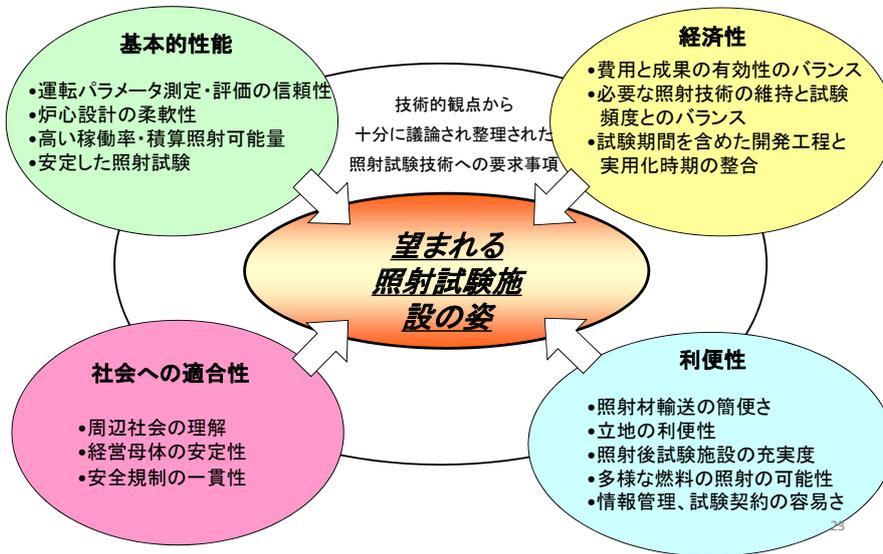
#### 照射試験技術ニーズの4つの要素

- ① **運転中計装**
  - ・オンパワーでの燃料の各種挙動の測定
  - ・試料交換による準オンライン測定・観察
- ② **照射試験環境制御、試験技術**
  - ・水化学条件を含む、試験として模擬すべき照射環境を実現するループ
- ③ **照射試験用供試体製造技術**
  - ・商業炉照射後燃料の追加照射用再加工等
- ④ **照射後試験技術**
  - ・実燃料を用いた総合的なLOCA試験

「軽水炉技術開発のための照射試験に関する検討会」報告書(2006.4)より <sup>22</sup>

(参考資料)

### 総合的な観点からの照射試験施設



(参考資料)

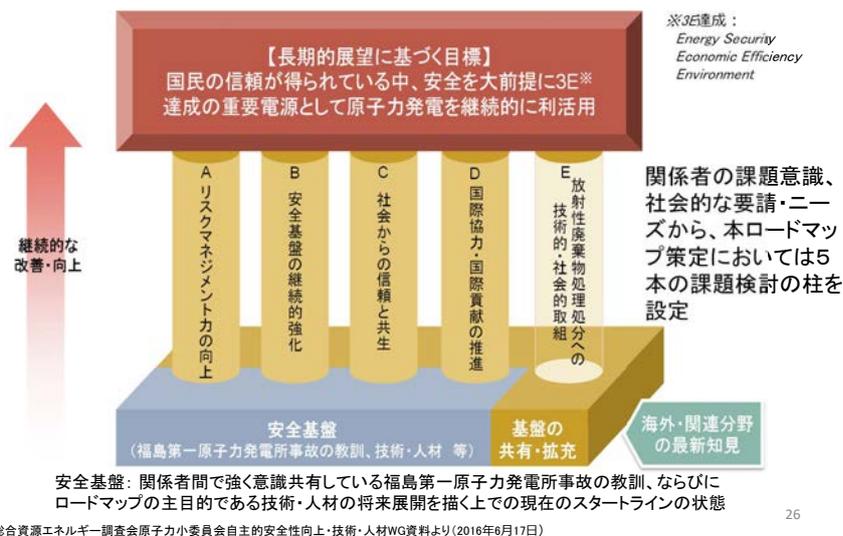
### 軽水炉燃料・炉材料・水化学の各分野及び境界領域に係わる技術課題

		照射環境	非照射環境
燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高燃焼時ペレット挙動</li> <li>• 燃料棒照射挙動</li> <li>• 高温照射特性</li> <li>• 事故時挙動</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 被覆管腐食・水素吸収機構解明</li> <li>• AOA機構解明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 燃料製造技術</li> <li>• 燃料挙動モニタリング技術</li> </ul>
水化学	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 腐食環境評価(ラジオリス等)</li> <li>• 放射能移行・蓄積挙動</li> <li>• 照射下分析・モニタリング技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 被ばく低減(放射能の燃料/水・構造材間の移行)</li> <li>• 水質環境改善(最適pH, 水素注入等)</li> <li>• 照射相関データの整備(環境影響含む総合的評価)</li> <li>• 共通情報基盤整備</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 燃料へのクラッド付着機構解明</li> <li>• 照射模擬試験による被覆管腐食機構解明</li> </ul>
材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 材料照射特性→照射相関</li> <li>• 照射材補修溶接</li> <li>• 圧力容器監視試験片再生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 環境改善技術開発</li> <li>• 材料腐食損傷機構解明(IASCC等)</li> <li>• プラントヘルスモニタリング</li> <li>• 新材料開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• スケール付着挙動</li> <li>• 腐食生成物移行挙動</li> <li>• 照射模擬試験による材料腐食機構解明</li> <li>• SCC・環境疲労挙動</li> </ul>

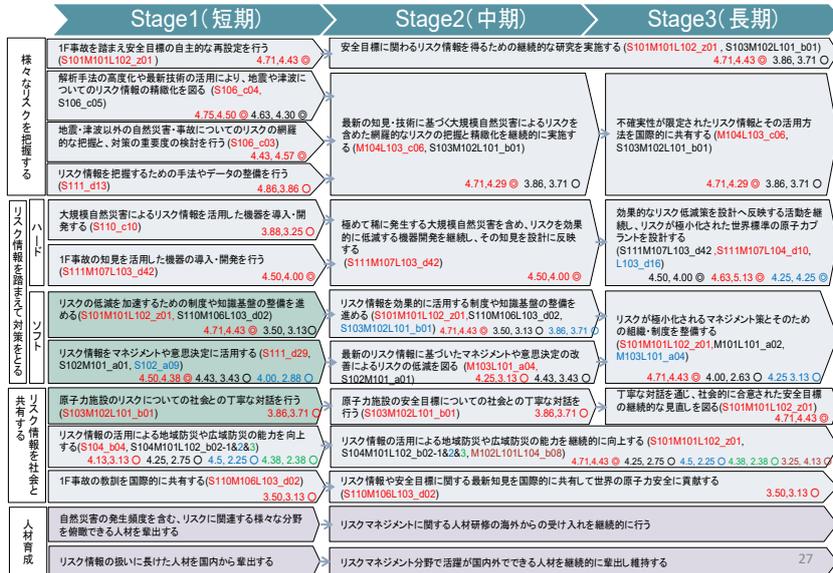
(参考資料)  
軽水炉関連照射試験に係わる開発課題と必要な試験技術

		試験炉照射	実炉照射	照射後試験	
材料の照射影響評価と対応試験技術	開発課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料ペレット挙動評価</li> <li>燃料過渡挙動評価</li> <li>材料照射効果</li> <li>新材料照射影響評価</li> <li>補修溶接技術開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>照射相関DB構築 (試験炉照射と実炉照射対応)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料モニタリング</li> <li>構造材照射影響 (照射脆化含)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料ペレット物性</li> <li>被覆管機械特性</li> <li>照射材特性</li> </ul>
	試験技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子束/スペクトル制御</li> <li>照射温度制御</li> <li>大型試験片取扱い技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験炉/実炉組合せ照射技術</li> <li>シミュレーション技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料破損モニタリング</li> <li>圧力容器監視技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>遠隔操作技術</li> <li>材料分析</li> <li>照射燃料/材料再装荷</li> </ul>
水化学に関連する課題と対応試験技術	開発課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料被覆管腐食/水素吸収機構解明</li> <li>照射下SCC機構解明</li> <li>環境緩和技術</li> <li>腐食生成物挙動</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>環境効果含む照射相関概念構築 (試験炉照射と実炉照射対応)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>プラントヘルスマニタリング</li> <li>水質最適化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>照射材SCC評価</li> <li>材料表面/破面特性</li> </ul>
	試験技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子束/スペクトル制御</li> <li>照射温度制御</li> <li>大型試験片取扱い技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験炉/実炉組合せ照射技術</li> <li>シミュレーション技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料破損モニタリング</li> <li>圧力容器監視技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>照射材SCC試験技術</li> <li>表面/破面マイクロ分析技術</li> </ul>
		水質環境その場モニタリング		燃料クラッド等モニタリング技術	25

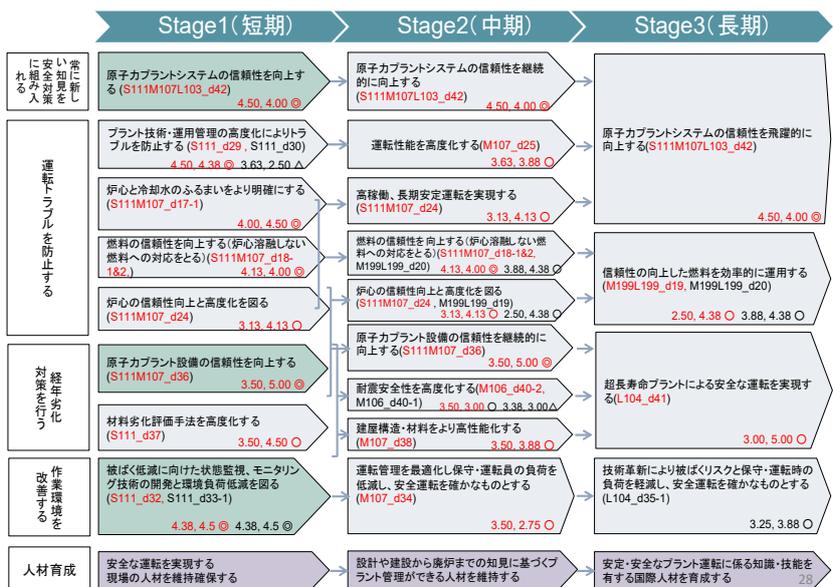
日本原子力学会による  
軽水炉安全技術・人材ロードマップ課題検討の柱



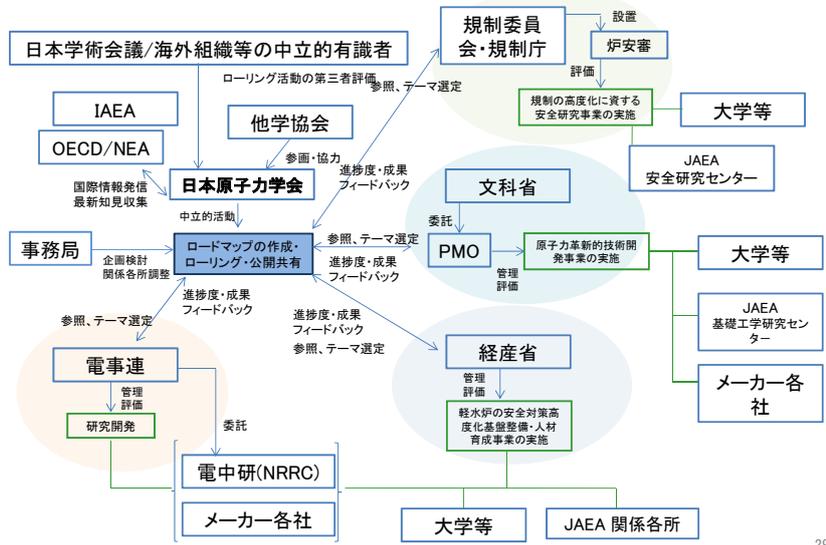
## 「既設の軽水炉等のリスク情報の利活用の高度化」 ロードマップ①



## 「既設の軽水炉等の事故発生リスクの低減」 ロードマップ②



## 軽水炉安全技術・人材ロードマップ (2015年6月, 2017年3月改訂)



総合資源エネルギー調査会原子力小委員会自主的安全性向上・技術・人材WG資料より(2015年6月17日)

29

## 継続的なイノベーションの創出への枠組みは？

- 安全性・経済性・機動性に優れた炉の追求に向けて、技術開発に対する支援を強化。  
(NEXIPイニシアチブ: Nuclear Energy × Innovation Promotion)

### 革新的な原子力技術開発

<p>■ 高速炉</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・戦略ロードマップ (H30.12) に基づき、多様な高速炉技術の競争を促進。</li> </ul> <p style="text-align: center;">高速炉</p>	<p>■ 革新炉</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・社会課題に対応する革新的な原子力技術開発を支援。</li> </ul> <p style="text-align: center;">小型軽水炉      高温ガス炉</p>
---	--

### 研究機関の連携・民間活用の促進

- 日本原子力研究開発機構 (JAEA) を通じ、民間の取組を活性化
- ・データ、知財等の知見の共有・提供
- ・試験研究施設の供用 等

常備：高速実験炉

国際協力・企業連携

<p><b>フランス</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ナトリウム冷却高速炉の開発</li> <li>・その他の多様な概念の検討</li> <li>・シミュレーションや実験等のR&amp;D</li> </ul>	<p><b>米国</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・GAINイニシアチブにより、革新的な原子力技術の開発を促進</li> <li>・この支援を受けて、小型軽水炉が2026年に商業運転を見込む。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・国内技術維持のため、新たに高速炉の多目的試験研究炉 (VTR) を建設予定。</li> </ul>
--	---	---

日本原子力学会原子力安全部企画セッション「SMR等革新炉の安全と安全規制について：今後の取組」舟木健太郎氏(資源エネルギー庁)講演資料より(2020年9月18日)

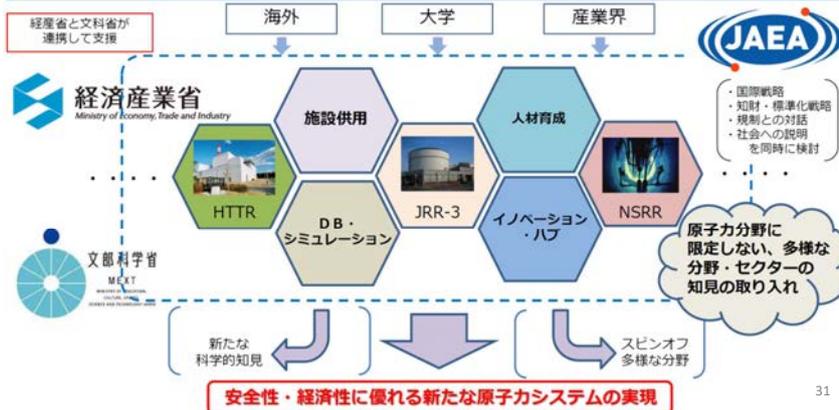
30

(参考資料)

## 日本原子力研究開発機構に期待される役割は？

※文部科学省原子力科学技術委員会資料より

- JAEAが持つ**研究基盤の供用を通じ**、「日本で唯一の原子力に関する総合的研究開発機関」として、原子力イノベーションを下支え。
- 他分野・他セクターとの対話・知見の取り入れの促進などにより、**産業界・大学・海外を繋ぐハブ**へ。



31

(参考資料)

## 日本原子力研究開発機構に期待される役割は？

- 研究設備・施設などハード面に加え、試験・評価手法、安全設計の検討など**ソフト面でJAEAが保有する知見・経験が民間主導の革新炉開発を進める上で有益**。
- 非軽水炉型のみならず、**軽水炉型の小型炉開発においても、次世代炉開発等に向けたデータ取得・評価手法、安全設計・評価の方法論の検討に係る経験が貴重な参考となり得る**。

### 新型炉・革新炉開発に関する知見・専門性 [JAEA新型炉開発部門]

- ✓ 革新炉の技術開発、技術基盤の整備
- ✓ 新燃料・材料の試験・評価手法
- ✓ 安全設計方針 (SDC)、安全設計ガイドライン (SDG) 策定・国際提案

### 軽水炉基礎・基盤に関する知見・専門性 [JAEA原子力基礎工学研究センター]

- ✓ シミュレーション・コードなど解析ツール開発
- ✓ データベース整備
- ✓ 分析・計測技術の開発
- ✓ 新燃料・新材料の研究開発 等

### 1F事故対応・廃炉からの知見・専門性 [JAEA福島部門]

- ✓ 事故進展シナリオ分析・評価
- ✓ SA関連基盤研究

### 安全研究基盤の整備に関する知見・専門性 [JAEA安全研究センター]

- ✓ 安全研究基盤
- ✓ 試験・評価手法、試験施設

### 計量管理・保証措置等に関する知見・専門性 [JAEA核不拡散・核セキュリティ・センター]

- ✓ Safeguards by Design
- ✓ Security by Design

日本原子力学会原子力安全部企画セッション「SMR等革新炉の安全と安全規制について：今後の取組」 32  
舟木健太郎氏(資源エネルギー庁)講演資料より(2020年9月18日)

## 研究開発への国の支援

軽水炉の安全性向上技術開発	革新炉開発
<p>■ 原子力の安全性向上に資する技術開発事業</p> <p>【対象例】 事故発生リスク低減・被害拡大防止など安全性向上、燃料・材料や新製造技術・工法の開発、デジタル活用等</p> <p>【令和元年度事業】 上限5千万円/件を補助（補助率：2/3、予算6億円）。公募の結果、14件を採択</p>	<p>■ 社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業</p> <p>【対象例】 安全性・経済性の向上、エネルギーの多目的利用、廃棄物対策に資する革新的な原子力技術開発等</p> <p>【令和元年度事業】 上限5千万円/件を補助（補助率：3/4、予算6.5億円）公募の結果、14件を採択</p>

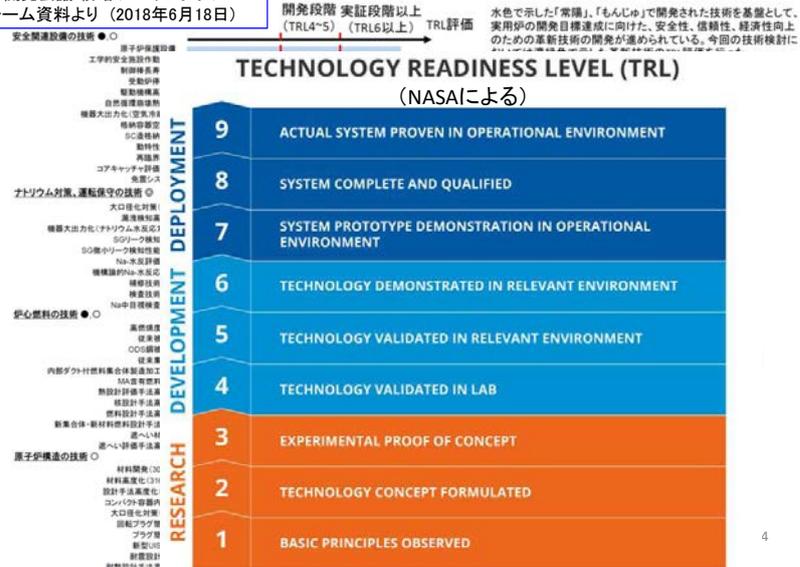


- 民間企業の創意工夫を活かした技術開発提案を支援。
  - 令和元年度より、以下の観点から将来的な事業成立性を有するかどうかに関する調査・研究（**フィジビリティスタディ**）を開始。令和2年度以降、支援の重点化を図る観点から適宜絞り込みを行い、技術の熟度やスケジュール等に応じて、技術開発計画の具体化・実施を支援。
    - ① 技術成熟度
    - ② 市場性
    - ③ 開発体制
    - ④ 規制対応 等
- （備考）海外機関の参画可能（日本法人や日本企業を幹事としたコンソーシアムによる申請が前提）

日本原子力学会原子力安全部企画セッション「SMR等革新炉の安全と安全規制について：今後の取組」 33  
舟木健太郎氏（資源エネルギー庁）講演資料より（2020年9月18日）

## 技術成熟度と照射試験（炉）

高速炉開発会議 戦略ワーキンググループ  
統括チーム資料より（2018年6月18日）



## 技術成熟度概念の整理と照射試験炉への適用

倉田正輝氏(日本原子力研究開発機構廃炉国際共同研究センター)  
日本原子力学会 核燃料部会 軽水炉燃料等の安全高度化ロードマップ検討WG資料(2015.6)

ロードマップのローリング:分野横断した認識共有、外部への説明性、透明性確保

1. 技術成熟度評価(TRL)
2. 開発戦略・方針(マイルストーン)
3. 技術課題マップ(達成目標、実用化に至る大きな制約の有無)

TRL	開発段階
	9 商用炉利用
性能実証	8 新たな許認可・規格基準に基づく新型燃料の全炉心装備、燃料品質の確認
	7 新型燃料の製品化、実ベンダーによる最終設計の確立 商用燃料として製造技術確立、新型燃料集合体の先行照射(LUA)
	6 新型燃料集合体の性能実証、安全評価基準の確立 新たな許認可・規格基準に基づく、プロトタイプ燃料集合体(LTA)の設計と照射試験 新型燃料製造プラントの設計
原理実証	5 プロトタイプ燃料棒の性能実証 LTR照射試験(燃料装備、商用炉照射) ← 米国の2022年目標 新型燃料製造プロセス性能の証明
	4 新型燃料(プロトタイプ)の概念設計、燃料設計パラメータの確立 プロトタイプ燃料の照射試験(燃料装備なし、照射炉) 燃料製造要素技術の証明
	3 燃料概念の実証、サンプル照射試験 工学技術の開発目標の設定 ← フランスが重視する開発段階(実用化に対しpotential killerが存在するか?)
概念実証	2 新たな燃料概念の具体化、達成可能範囲の評価 技術オプションの評価
	1 新たな燃料概念の提案 開発課題の抽出 米国レポートに準じ、報告者がとりまとめたもの TRL評価においては、これを技術分野ごとにプレ ークダウンし、要素技術ごとにエビデンスを示して、 技術の現状評価を行う。(例:分離変換技術のTRL評価)

事故耐性燃料開発  
への適用  
阿部(東大)のグループ

35

## まとめと今後の活動への提言

- 安全規制の基本概念のアップデートが国(内)外で進行中
  - 不確実性の取り扱い
- 社会の見えざる要請に応える
  - 問題設定と解決への姿勢、双方向のコミュニケーション
  - 社会が技術を使いこなす
- 既存システムに対する継続的な安全性向上に加え、新たな(革新炉システムへの)継続的なイノベーションをけん引する
- 多様な専門分野間、ステークホルダ間を横断する技術戦略マップ、ロードマップの活用
  - ローリング、技術成熟度
- 日本学術会議の活用
  - 学術界としての専門分野の深さと広がり
  - 学術の大型計画マスタープランと国としてのロードマップ推進
- 国際的なネットワークを結びつけ、幅広い議論の場
  - 以前の拡大ハルデン会議

36

This is a blank page.

## 1-2 新たな照射試験炉への期待 \*未来社会に大きく貢献\*

元 日本原子力学会会長／元 MHI NSE 駒野 康男

### 1. はじめに

本日は、個々の専門的な話は、別の人にお任せし、下記の経歴／経験より、新たな照射試験炉への期待について、総合的なお話を致したい。

- 1) PWR 炉心設計／燃料開発（Gd 入り燃料、MOX 燃料、高燃焼度燃料等）の経験
- 2) 日本原子力学会理事／会長や学会の「研究炉等の役割検討・提言分科会」活動からの経験
- 3) 産業界／経営者としての経験

### 2. 新たな照射試験炉への期待

#### 1) PWR での経験からの期待

PWR では、比較的 low コストで実機 PWR 条件に近い状況で照射可能なハルデン炉での照射／出力急昇試験が多かったが、そのハルデン炉も 2018 年 6 月に廃炉となった。今後、新たな照射試験炉には、以下を期待する。①実証するプラント条件が作りやすい、②フラックスが高く加速照射が可能で、稼働率が高い、③比較的安価で利用可能、④この他、照射後試験／照射済燃料組立可能な場所に近いということも重要となるが、その点、茨城県立地は有利である。

#### 2) 日本原子力学会理事／会長経験や「研究炉等の役割検討・提言分科会」活動からの期待

東電 1F 事故後、研究炉もすべて止まり、人材育成／研究面で大きな支障があった。また、多くの研究炉が老朽化のため廃止措置になる中、新たな照射試験炉の役割は、原子力人材育成及び基礎研究面において極めて重要である。また、医療用短半減期 RI の安定供給のための国内生産や国内産業のための活用や、途上国への国際貢献に寄与すべきである。そのため、エネルギー政策や科学技術政策において明確にし、国の公共財と位置付けるべきである。

研究炉等の新規規制基準対応の合理化（グレーディッドアプローチの適用も含めて継続的な見直し）と施設維持に係る措置軽減（研究炉に適切な ROP）を実施すべきであるが、学会の場もうまく活用願いたい。

#### 3) 産業界／経営経験からの期待

新たな照射試験炉は、長期安定運営を図る必要があるが、そのためには以下が必要と考える。

- ①経営的には、国の確実な補助とともに、国際協力資金、産業界／医療界からの確実な入金戦略が必要、②地元の人誇れる施設：最先端医療や最先端産業都市の位置づけ等、③国際協力：人材育成やアジア・アフリカに同型炉が輸出できるような魅力あるもの、④数少ない大型 PJ であり、この炉の設計／建設を通じた人材育成（優秀な PM 育成）

### 3. 結言

世界的にも研究炉が減少する中、新たな照射試験炉は、将来の人材育成、基礎研究、医療用 RI 国内製造や各種産業利用に欠かせない存在となるべきである。また、国際協力への寄与を果たし、他施設と共に最先端医療／最先端産業都市を構築し、地元の誇りとなる施設になることを期待したい。

#### キーワード：

原子力人材育成、国際貢献、地域共生、グレーディッドアプローチ

## 新たな照射試験炉への期待 \* 未来社会に大きく貢献 \*

元 日本原子力学会会長  
元 MHI NSエンジニアリング(株)  
駒野 康男

## 講演者略歴



駒野 康男 (こまの やすお)

1979年 大阪大学大学院 原子力工学専攻 修了

1979年 三菱原子力工業株式会社(MAPI)入社  
1995年 三菱重工(MAPIとの合併) 炉心技術部 部長代理  
2004年 同 炉心技術部長  
2008年 同 原子炉安全技術部長  
2009年 同 原子力技術センター長  
2011年 同 副事業本部長  
2013年 MHI原子力エンジニアリング(株) 代表取締役社長  
2015年 MHI NSエンジニアリング(株)代表取締役副社長  
2017年～2020年6月 同フェロー

---

2014年6月～2019年6月 日本原子学会・理事  
2016年6月～2018年6月 日本原子力学会・副会長  
2018年6月～2019年6月 日本原子力学会・会長  
2020年～ 日本原子力学会・フェロー

## 本ワークショップでの講演の位置づけ

本日は、個々の専門的な話は、別の人にお任せし、下記の経歴／経験より、新たな照射試験炉への期待について、総合的なお話を致したい。

- 1) PWR炉心設計／燃料開発(Gd入り燃料、MOX燃料、高燃焼度燃料等)やプラント開発の経験
- 2) 原子力学会委員会／理事／会長の経験
- 3) 産業界／経営者としての経験

3

## PWRでの経験からの期待

### (燃料開発面)

**PWRは、ハルデン炉(2018年6月廃止措置決定)での照射／出力急昇試験の活用が多い。**MDA被覆管のカプセル照射(被覆管のみの材料照射)では、JMTRを活用。

←ハルデン炉は、比較的lowコストで実機PWR条件に近い状況で照射／出力急昇試験が可能

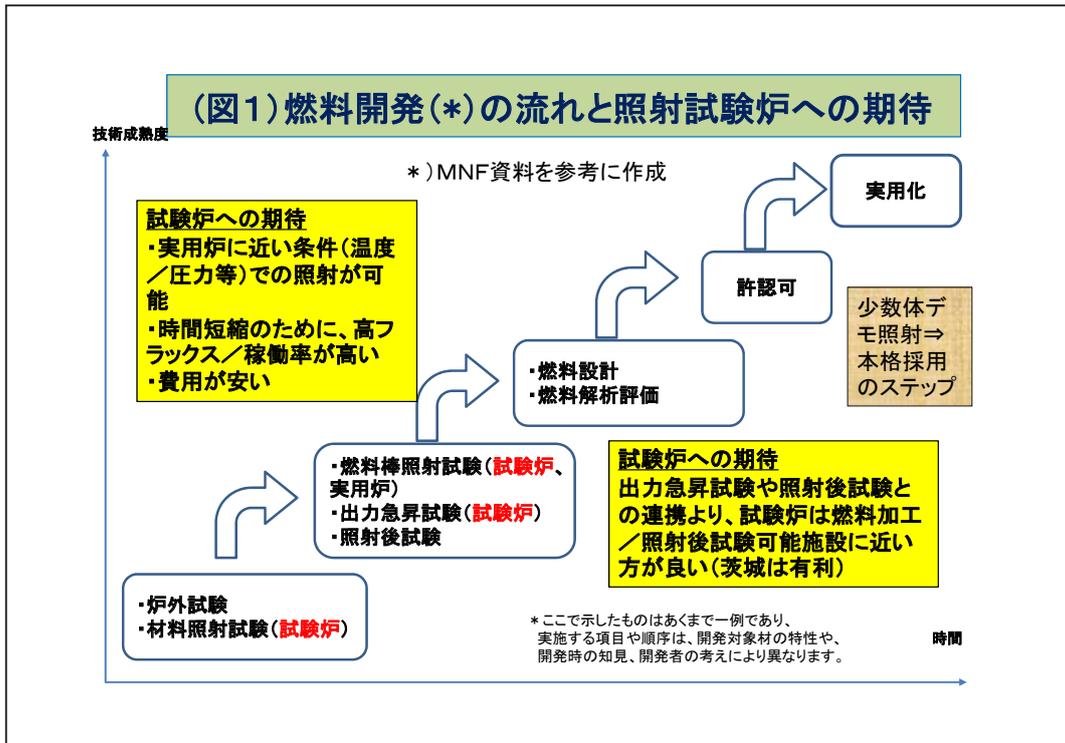
- \* JMTRは、出力急昇試験はBWR条件。ハルデン炉はPWR条件で可能。
- \* 各国の加盟金(OECD/NEA)及びノルウェー政府補助により割安
- \* ハルデンで燃料ペレットの製造もできたので、被覆管のみの輸送で試験可能
- \* セコンディ派遣で、人材育成面での海外経験可能

↓

### (新たな照射試験炉への期待)

- ◆ 候補炉心のプラント条件及びフラックスが高い照射が可能。高稼働率。
- ◆ 安価であること←国の安定資金確保(研究基盤・人材育成及び途上国支援目的)、産業／医療利用等からの収益確保
- ◆ 照射後試験／照射済燃料組立可能な場所に近い…茨城は有利

4



## PWRでの経験からの期待

(プラント開発面)

- ◆軽水炉プラントの高度化
  - ・プラントの高経年化対策(40年⇒60年～80年)⇒照射脆化予測、破壊靱性評価等
  - ・稼働率向上/使用済燃料低減のための長期サイクル運転/高燃焼度化⇒高耐食・低水素吸収被覆管、FFRD(\*)メカニズム解明と対策、5%超濃縮度燃料
  - ・安全性向上(SA対策/緩和)⇒事故耐性燃料
- ◆次世代炉・イノベーション(図2)の実証での活用
- ◆再生エネとの共存
  - ⇒早い負荷変化対応時の燃料健全性実証

\*) FFRD: Fuel Fragmentation, Relocation and Dispersal

(図2) これからの原子力プラントに期待されること



\*三菱重工資料より引用

原子力学会活動経験からの期待

日本原子力学会の「研究炉等の役割検討・提言分科会」の活動(2016年～)及び日本原子力学会理事/会長経験からの期待

- ・東電1F事故後、研究炉がすべて止まり、人材育成/研究面等で大きな支障を経験(図2)
- ・世界的にも多くの研究炉が老朽化⇒廃止措置が進む方向
- ・政府方針の2050年にカーボンニュートラルを目指すには、原子力は極めて重要

↓

(新たな照射試験炉への期待)

- ◆原子力人材育成
- ◆医療用短半減期RI(Tc-99m:半減期6時間等)や半導体等の国内生産  
←調達リスクより、国内自給の重要性(新型コロナ対応でも痛感)
- ◆国際貢献に寄与  
・原子力導入計画のある途上国の人材育成(来なくなるような魅力のある施設)
- ◆原子力の理解活動⇒社会受容性の向上の貢献  
(例:医療、産業開発への寄与をPR,SDGsへの寄与)

↓

我が国のエネルギー政策や科学技術政策における位置づけを明確にし、国の公共財と位置付けるべきである。



## (参考) 研究炉等の役割への提言

日本原子力学会「原子力アゴラ: 研究炉等の役割検討・提言分科会」

### ◆原子力人材育成に対する研究炉等の重要性

我が国において、今後も行われる原子力利用を担うべき人材の継続的な育成に不可欠な研究炉等の役割を、エネルギー政策や科学技術政策において明確にし、国の公共財と位置付けるべきである。

### ◆研究炉等の新規制基準対応

研究炉等への新規制基準の合理性については検討の余地があり、いわゆるグレイディッドアプローチの適用も含めて継続的な見直しが必要である。

### ◆研究炉等使用済燃料に対する措置

長期的に研究炉を活用するには、使用済み燃料に対する措置を、特に米国への使用済燃料返還の期限である2029年以降の措置を検討しておくべきである。

### ◆研究炉等の安全確保と施設維持に係る措置

研究炉を運営する各機関には、施設の安全確保とともに、施設維持に必要な運転員・技術者の力量と士気の維持・確保を図る

11

## (参考) 研究炉の規制への要望(1/2)

日本原子力学会「原子力アゴラ: 研究炉等の役割検討・提言分科会」

### 【研究炉の規制の考え方】

- 研究炉の規制では、グレイディッドアプローチとともに、その目的を達成することが大切。

例) 研究炉では、燃料の破損に関する安全性の実験も許されるべき。それは、燃料破損を問題にするのではなく、その実験により得られる知見に意味があるからで、総体として便益がリスクを上回っている。

- 研究炉の規制のあり方は、正当性、研究炉の目的、利用の価値、そのリスクの程度、安全の目的への影響度、そういった視点を総合的に見るべきであり、研究炉に商用炉なみの規制をかぶせるというのは、得られるであろう安全の知見を無にするものである。

8

## (参考) 研究炉の規制への要望(2/2)

日本原子力学会「原子力カアゴラ：研究炉等の役割検討・提言分科会」

- 研究炉は、商業炉とは目的や出力規模等が大きく異なることから、異なる規制アプローチ(グレーデッドアプローチ等)が必要である。
  - ・ 研究炉は再稼働し始めているが、これまでの規制対応の状況から改善点等はないか？
  - ・ 海外動向等と我が国のグレーデッドアプローチの方向性
  - ・ 将来の研究炉新設等をも視野に含む規制の在り方
  - ・ 研究炉のROPの在り方
- ぜひ、前頁の考え方に示したような大きな視点で、合理的な規制の検討に取り組んでいただきたい。
- 規制庁と研究炉共同体(学会WG活用等)で上記解決に向けた対話が必要

9

## 産業界／経営経験からの期待

長期安定運営が必要であり、それには以下が必要

1) 経営的には、国の確実な補助とともに、国際協力資金、産業界／医療界からの確実な入金戦略が必要

- ・ 国際協力
- ・ 産業界／医療等への放射線利用←4兆円市場(図4)にどれだけ食い込むか
- ・ 商業炉の発展やイノベーションへの寄与
  - － 高燃焼度、高寿命化(経済性向上)
  - － 新型炉／新型燃料(事故耐性燃料等)開発への寄与

2) 地元の人が誇れる施設：(例)他施設とともに最先端医療や最先端産業都市  
⇒ 社会受容性に寄与

3) 国際協力

- ・ アジア・アフリカに同型炉が輸出できるような魅力あるもの

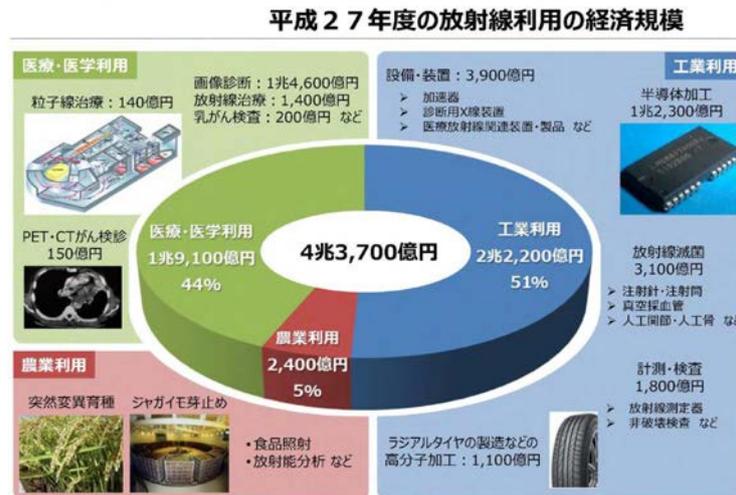
4) 人材育成

- この炉の設計／建設を通じた人材育成(優秀なPM育成)・・・数少ない大型PJ

5) 許認可やメンテナンスでの負担軽減

14

(図4) 日本の放射線利用の経済規模(内閣府HP)



15

## 結言

◆世界的にも研究炉が減少する中、新たな照射試験炉は将来の人材育成、基礎研究、医療用RIの国内製造や各種産業利用に欠かせない存在となるべき。

◆長期安定運営のための提言

- ・国は、我が国のエネルギー政策や科学技術政策において重要なものとし、国の公共財として位置づけ、しっかりとした予算付けを実施すべきである。
- ・運営側は、国の確実な補助とともに、国際協力資金、産業／医療界からの確実な入金戦略が必要
- ・地元の誇りや、自慢になる施設を目指す(医療や最先端産業にも大きく貢献、SDGsに貢献等)
- ・途上国の人々が、来たくなる魅力ある施設

16

## 結言

- ◆ 研究炉の新設に対しては、安全性を確保しつつも、過剰な規制による負担増大(人的・費用面)とならないようにすべき
  - ・研究炉の規制の在り方(グレーデッドアプローチや研究炉にあったROP等)を、規制庁と研究炉共同体(学会WG活用等)とで解決に向けた対話が必要
- ◆ この炉の設計／建設を通じた人材育成(優秀なPM育成)

## 1-3 核燃料の物質科学と新たな照射炉への期待

京都大学 複合原子力科学研究所 黒崎 健

### 1. はじめに

核燃料とは、文字通り、原子力発電所における燃料を担う物質である。様々な化学形態のウランやプルトニウムが、核燃料になりうる。軽水炉における核燃料は、二酸化ウランを小指の先ほどの大きさのペレット状に焼き固めたものである。二酸化ウラン燃料ペレットは、全長が約 4 m にもなる細長い中空のジルコニウム合金製の被覆管に挿入された形で用いられる。広い意味で、燃料ペレットと被覆管の組み合わせを核燃料と呼ぶこともある。本発表では、核燃料としてのウラン化合物の物質科学について概説するとともに、新たな照射炉に期待することを述べる。

### 2. 核燃料の物質科学

核燃料にとって熱伝導率は最重要物性値である。そのため、様々なウラン化合物の熱伝導率を正確に評価することが、核燃料の物質科学における主要な研究テーマとなる。ここで、熱伝導率評価に際して、核燃料に特有の三つの課題がある。核燃料物質であるウランの取り扱いの困難さ、高温域での情報が必要となること、照射によって大きな変化が生じること、の三つである。一つ目については、2000 年くらいから計算科学を上手に取り入れることでの研究の効率化が図られている。二つ目については、地道な実験研究の積み重ねと少しずつの発展に依存している。三つ目については、照射済燃料を模擬した物質や計算機シミュレーションによる評価等がなされているが、本質的な解決のためには、核燃料の照射試験と照射後試験が必要となる。そして、これを実施するためには、使い勝手の良い照射炉とホットラボが必要となる。

### 3. 新たな照射炉への期待

熱伝導率という観点からいうと、照射中の燃料の温度（中心、外面）を逐一測定できることは重要である。これは一つの例で、要は、様々なニーズに対して柔軟に対応できる設計になっていることが望ましい。ホットラボにおいては、照射済燃料の分析や特性評価のための最新の装置群が、ホットセル内での取り扱いに適した仕様となって、揃っていることが望ましい。なにより、照射炉とホットラボが距離的のみならず機能的にもスムーズに連結されていることが望ましい。

### 4. おわりに

核燃料の基礎研究や新しい核燃料や新しい原子炉材料の開発に際して、国内に使い勝手の良い照射炉とホットラボを持つことは必須である。新たな照射炉の実現に期待している。

#### キーワード：

核燃料、物質科学、熱伝導率、二酸化ウラン、燃料ペレット、照射挙動、照射炉

# 核燃料の物質科学と新たな照射炉への期待

黒崎 健

京都大学 複合原子力科学研究所

新たな照射試験炉の建設に向けたワークショップ

2020年12月22日、23日(オンライン開催)

## 発表者略歴

大阪大学工学部原子力工学科卒業(H7.3)  
 大阪大学大学院工学研究科原子力工学専攻博士前期課程修了(H9.3)、同博士後期課程退学(H10.7)  
 博士(工学)(大阪大学)(H15.11)

大阪大学助手(大学院工学研究科)(H10.8)、同助教(H19.4)、同准教授(H21.4)  
 京都大学教授(複合原子力科学研究所)(H31.4) 現在に至る。

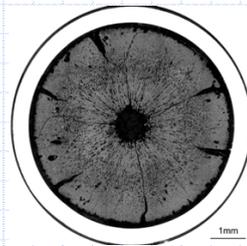
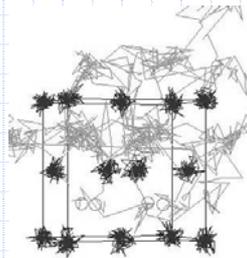
学部四回生から現在に至るまで、核燃料・原子炉材料の物質科学に関する研究に従事

(注)本資料は、高速炉開発会議戦略ワーキンググループ(第12回)での説明資料「核燃料の種類と性質ならびに研究開発」をもとに作成した。

## 0. はじめに

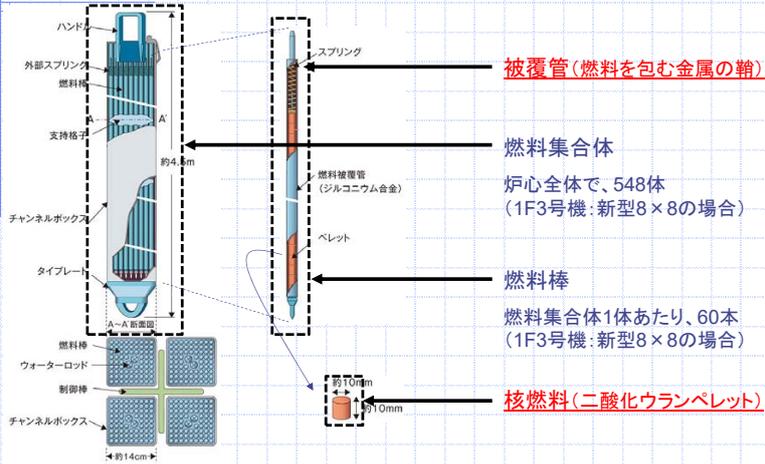
### 本日の発表内容

1. 核燃料の物質科学
  - 1.1. 核燃料の種類と性質
  - 1.2. 核燃料と熱伝導率(研究動向)
    - 1.2.1. 計算科学の導入
    - 1.2.2. 高温データ取得
    - 1.2.3. 照射挙動評価
2. 新たな照射炉への期待
  - 2.1. 照射試験の位置づけと重要性
  - 2.2. 照射炉とホットラボ
    - 2.2.1. 照射試験と熱伝導率
    - 2.2.2. ホットラボ展望
3. まとめ



# 1. 核燃料の物質科学

## 1.1. 核燃料の種類と性質 #1



BWRの燃料集合体、燃料被覆管、燃料ペレット [1]

[1] 一般財団法人 日本原子力文化財団  
「原子力・エネルギー」図面集。

# 1. 核燃料の物質科学

## 1.1. 核燃料の種類と性質 #2

核燃料の代表的な化学形態

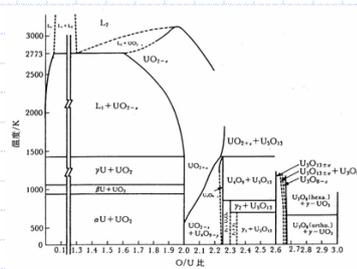
酸化物 :  $(U, Pu)O_2$  (MOX: mixed oxide)

金属 : U-Pu-Zr合金 (例: U-13%Pu-10%Zr)

窒化物 :  $(U, Pu)N$

炭化物 :  $(U, Pu)C, (U, Pu)_2C_3$

フッ化物 : U, Th, Puのフッ化物を、LiF-BeF<sub>2</sub>に混合したもの



1	2											3					
H	He											He					
3	4	5	6	7	8	9	10							18			
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne							Ne			
11	12	13	14	15	16	17	18							18			
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar							Ar			
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

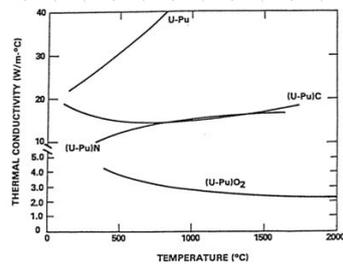
# 1. 核燃料の物質科学

## 1.1. 核燃料の種類と性質 #3

核燃料の性質(化学形態が異なると性質(物性値)も異なる)

	酸化物	金属	窒化物	炭化物
融点(°C)	2750	1100	2750	2490(UC) 1603(PuC)
熱伝導率(W/cm K)	0.03	0.26	0.18	0.22(UC)
重金属密度(g/cm <sup>3</sup> )	9.5	14.3	13.5	13.6
線膨張係数(×10 <sup>-5</sup> /K)	1.5~2.5	20	0.6~0.9	1.1~1.2

※ 代表的組成(Pu富化度~20%前後)の概略値



酸化物、金属、窒化物、炭化物燃料の熱伝導率の温度依存性(各性質には温度依存性がある)

# 1. 核燃料の物質科学

## 1.1. 核燃料の種類と性質 #4

### ✓ 要求される性質

- 熱的性能：融点が高いこと、**熱伝導率が高いこと**
- 核的性能：重金属(U, Pu)密度が高いこと、適切な軽元素(O, N, C)を用いること
- 照射挙動：組織の安定性が高いこと
- 化学的反応性：ボンド材、被覆材、冷却材との共存性が高いこと

### ✓ 核燃料サイクルの視点

- 燃料製造が容易であること(安全性を含む)
- 再処理プロセスとの整合性が高いこと
- 経済性が良いこと
  - 製造プロセスが複雑でないこと、高コストの原材料を要しないこと
  - 高燃焼度化が可能であること(サイクルコストの観点)
- 廃棄物発生量が小さいこと、廃棄物を減容できること
  - 燃料製造や再処理時に処理が困難な廃棄物を生じないこと、発生量が少ないこと
  - MAの効率的な燃焼が可能であること(高レベル廃棄物の処分・毒性低減の観点)

# 1. 核燃料の物質科学

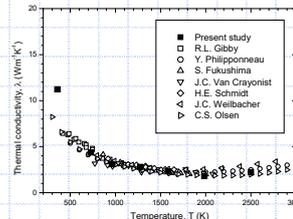
## 1.2. 核燃料と熱伝導率(研究動向)

### 1.2.1. 計算科学の導入

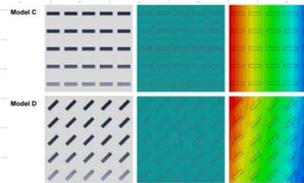
ウランやプルトニウムの取り扱い制限

→ 計算科学の効果的な活用

- ✓ 第一原理計算: 電子状態
- ✓ 化学平衡計算: 相状態 [1]
- ✓ 分子動力学法: 熱伝導率 [2]
- ✓ 有限要素解析: 熱伝導率 [3]



MDで評価したUO<sub>2</sub>の熱伝導率 [2]



気孔形状が熱伝導率に及ぼす影響 [3]

[1] K. Kurosaki et al., *Prog. Nucl. Sci. Technol.* 2, 5 (2011).  
 [2] K. Kurosaki et al., *J. Nucl. Mater.* 294, 160 (2001).  
 [3] K. Kurosaki, State-of-the-Art Report on Multi-Scale Modelling of Nuclear Fuels, Chapter 23, OECD/NEA, Published in 2014.

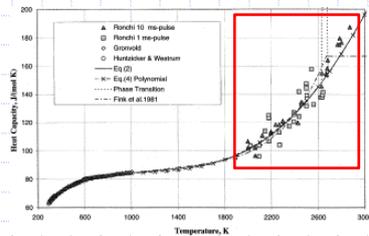
# 1. 核燃料の物質科学

## 1.2. 核燃料と熱伝導率(研究動向)

### 1.3.2. 高温データ取得

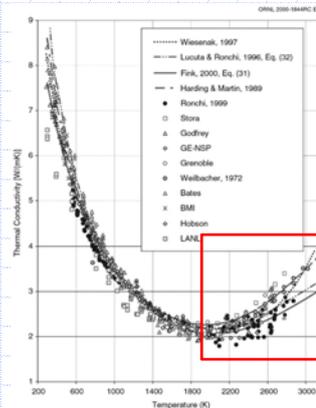
高温域データの重要性大 ⇔ データのバラツキ大

→ 測定の困難さ、精度の高いデータ取得が望まれる



UO<sub>2</sub>の比熱の温度依存性 [1]

[1] J. K. Fink, *J. Nucl. Mater.* 279, 1 (2000).  
 [2] J. J. Carbajo et al., *J. Nucl. Mater.* 299, 181 (2001).



UO<sub>2</sub>の熱伝導率の温度依存性 [2]

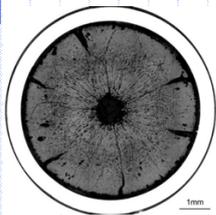
# 1. 核燃料の物質科学

## 1.2. 核燃料と熱伝導率(研究動向)

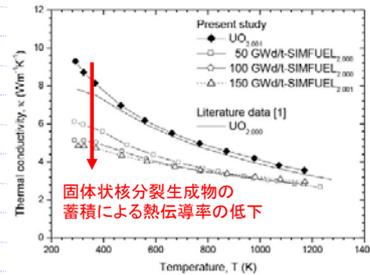
### 1.3.3. 照射挙動評価

照射による燃料の変化

- 組成変化(主な原因:核分裂生成物の蓄積) [1]
- 組織変化(主な原因:組成変化、照射欠陥の生成、温度勾配による物質移動) [2]



常陽で照射したMOX燃料ペレットの断面組織 [2]

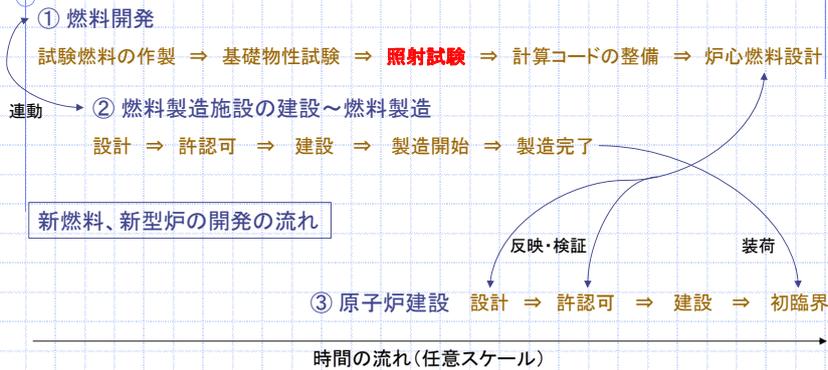


SIMFUELの熱伝導率の温度依存性 [1]

[1] S. Yamanaka, K. Kurosaki et al., Recent Advances in Actinide Science, RSC, pp. 346-348 (2005).  
 [2] K. Kurosaki et al., Prog. Nucl. Sci. Technol. 2, 5 (2011).

# 2. 新たな照射炉への期待

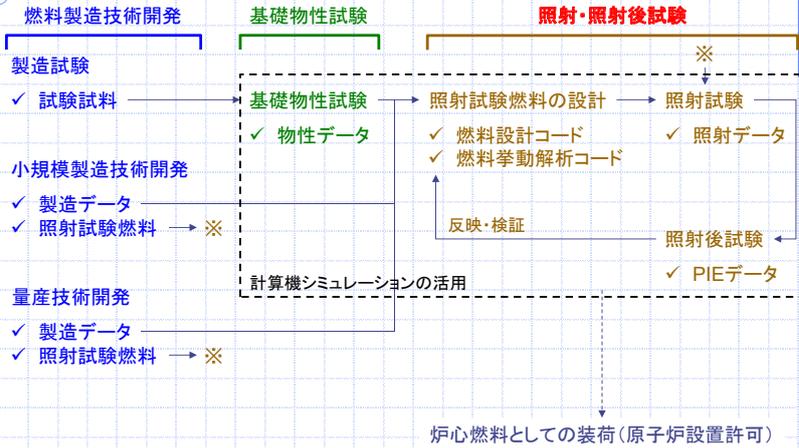
## 2.1. 照射試験の位置づけと重要性 #1



- ✓ それぞれの項目でそれぞれの流れがあり、得られる成果物は互いに関連する。
- ✓ 燃料開発とそれに連動する燃料製造は、原子炉建設より先行して行われなければならない。(そしてここで成功しなければ次にすすめない。)

## 2. 新たな照射炉への期待

### 2.1. 照射試験の位置づけと重要性 #2



## 2. 新たな照射炉への期待

### 2.2. 照射試験とホットラボ

#### 2.2.1. 照射試験と熱伝導率 #1

照射による燃料の変化

- 組成変化(主な原因:核分裂生成物の蓄積) [1]
- 組織変化(主な原因:組成変化、温度勾配による物質移動) [2]

課題

照射による熱伝導率の変化をどう評価するか?

- ① 照射試験中に燃料の熱伝導率を直接計測する [3-6]
- ② 照射済燃料の熱伝導率を計測する(@ホットラボ) [7,8]

[1] S. Yamanaka, K. Kurosaki et al., Recent Advances in Actinide Science, RSC, pp. 346-348 (2005).  
 [2] K. Kurosaki et al., Prog. Nucl. Sci. Technol. 2, 5 (2011).  
 [3] W. Wiesenack and T. Tverberg, Nucl. Eng. Des. 207, 189 (2001).  
 [4] H. Fujii et al., J. Nucl. Sci. Technol. 43, 998 (2006).  
 [5] J. Nakamura et al., J. Nucl. Sci. Technol. 46, 944 (2009).  
 [6] N. Nakae et al., J. Nucl. Mater. 440, 515 (2013).  
 [7] K. Minato et al., J. Nucl. Mater. 288, 57 (2001).  
 [8] D. Staicu, Comprehensive Nuclear Materials, 2, 149 (2020).



## 2. 新たな照射炉への期待

### 2.2. 照射試験とホットラボ

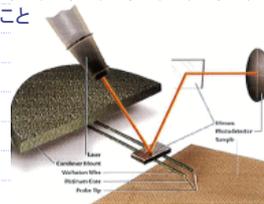
#### 2.2.2. ホットラボ展望

ホットラボの設計と管理の基礎 [1]

シンプルイズベスト、目的・規模に応じたものであること、安全性が高いこと、操作・管理がしやすいこと、事前の調査・計画・概念設計が重要・・・

以上を前提に、敢えて期待すること

- ① 照射炉と機能的にも距離的にも高い連動性を持っていること
- ② ホットセル遠隔操作において最先端技術が導入されていること  
例: VR(仮想現実)、AR(拡張現実)の導入等
- ③ 周辺分野の最先端技術を取り入れたものであること  
例: ごく少量のサンプルについての各種分析等  
(ナノインデンテーション、マイクロTA・・・)



[1]「ホットラボ」研究専門委員会, 日本原子力学会誌, 17, 107 (1975).

マイクロTA (TA Instruments社HPより引用)

## 3. まとめ

### 核燃料の物質科学と新たな照射炉への期待

我が国の核燃料開発に期待すること(大学からの視点)

1. 工学規模での着実な技術開発推進
  - ⇒ 燃料製造技術開発、基礎物性試験、照射・照射後試験ができる施設
2. 基礎研究を通じての研究力強化
  - ⇒ 単なる伝統芸能からの脱却
  - ⇒ 新しい分野・最先端技術の積極的な取り込み
3. 持続と発展
  - ⇒ 技能・技術・知見の確実な伝承と優秀な人材の確保・育成
  - ⇒ 大学における原子力教育(例: 核燃料を実際に扱った研究指導)

核燃料開発、特に、工学規模での技術開発においては、照射・照射後試験は必須であり、そのためには使い勝手の良い照射炉とホットラボの充実が求められる。また、そこで活躍する優秀な人材も必要となる。この分野で我が国が世界をリードしていくためには、時勢を見極めつつ、適切な対応をとることが重要となる。

This is a blank page.

## 1-4 炉物理・臨界安全の観点から

京都大学 中島 健

### 1. はじめに

新たな照射炉への期待として、炉物理及び臨界安全の観点から、核燃料の燃焼による組成変化データ及びMA等の核変換データの取得を挙げる。

### 2. 燃焼組成変化データ及び核変換データの取得

核燃料の燃焼による組成変化の評価精度は、原子炉の核特性や核燃料の貯蔵・輸送時の臨界安全評価にも影響を与えることから、精度向上に向けた種々の取り組みが行われている。現行の軽水炉燃料については、実機の使用済燃料の照射後試験(PIE)により、比較的多くのデータが取得されており、OECD/NEAのデータベースSFCOMPOとしてまとめられている。

我が国における原子力エネルギー利用の見通しは不透明ではあるが、今後のより安全で経済的な原子力システムの開発においては、そこで求められる新たな燃料や照射条件に対応した燃焼燃料の組成変化データを取得することが必要となる。そのためには、開発を予定している炉の中性子スペクトルを再現できるような幅広い中性子スペクトルを構築できる照射場を有することが望ましい。また、照射履歴をしっかりと得るためには、照射時の中性子スペクトル及び中性子束(フルエンス)を測定・管理することが必要となる。さらに、照射施設に加えて、照射の準備及びPIEを実施するためのホットラボ棟の付帯設備の整備並びにそれらを実施する技術者・研究者の育成(あるいは維持)が必須となる。なお、新しい照射炉の詳細は未定であるが、可能ならば照射炉自身の燃料についても、燃焼による組成変化データを取得することは、試験研究炉の燃焼計算の妥当性検証に役立つものと考えられる。この場合、PIEのみならず、使用中燃料のガンマスペクトル測定も貴重なデータとなる。

上記に加えて、高レベル廃棄物の低減を目指した核変換システムの開発においては、マイナーアクチニド(MA)などの核変換挙動を把握する必要があるため、そのためにMA含有サンプルの照射試験も望まれる。ただし、基本的には高速炉スペクトルでの照射が必要なため、新たな照射炉でどのような照射場が構築できるかにより、実施の可能性が決まる。

### 3. まとめ

新たな照射炉への期待として、炉物理及び臨界安全の観点から、核燃料の燃焼による組成変化データの取得及びMA等の核変換データの取得の必要性と実施における概略を述べた。

#### キーワード：

燃焼組成変化、核変換、炉物理、臨界安全

原子力研究開発における利用ニーズ

## 炉物理・臨界安全の観点から

京都大学複合原子力科学研究所

中島 健

1

## 炉物理・臨界安全と照射炉の接点

- 炉物理・臨界安全の分野からの試験研究炉の利用としては、炉物理実験（反応度の測定等）や炉物理教育に適している、臨界実験装置が主となっている。

### 臨界実験装置の特徴

- 極低出力：炉心（燃料）へのアクセスが容易  
（KUCAは最大熱出力100W、通常は1W以下で運転）
- 炉心変更が容易：種々の体系を模擬可能
- 運転中の温度変化・燃焼変化がない：反応度測定に向いている。
- 常温・常圧であり、起動・停止が容易。

京都大学臨界集合体実験装置（KUCA）



軽水減速炉心



学生実験（運転実習）

写真は京都大学複合原子力科学研究所の臨界集合体実験装置のホームページより引用

<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/CAD/experiment-photo.html>

2

## 炉物理実験（教育）の実施

- 照射炉（高出力炉）を用いた炉物理実験（教育）の可能性

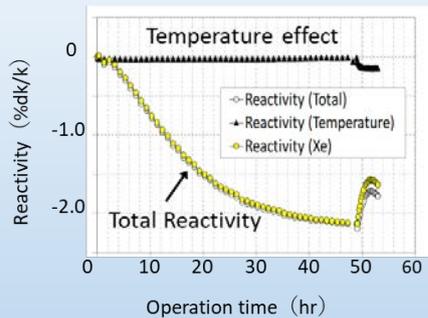
No.	実験項目	KUCA	照射炉
①	臨界近接	燃料装荷による臨界近接	制御棒による臨界近接
②	制御棒校正	ペリオド法及び補償法による制御棒校正	同左
③	中性子束分布測定	金線照射による中性子束分布測定（熱・高速）	中性子検出器駆動による中性子束分布測定（熱・高速）
④	温度係数測定	ヒータ加熱による減速材温度係数測定	核加熱による（炉心）温度係数測定
⑤	キセノン効果測定	---（実施できない）	出力低下（上昇）による反応度変化測定

照射炉で考慮すべきこと：燃焼度分布の影響（①～⑤）、温度分布の影響（④）、検出器設置の可能性（③）

3

## 炉物理実験（教育）の実施

KURを用いたキセノン効果/温度効果の測定例



KURを出力1MWで48時間運転した後、5MWに変更したときの反応度変化

KUR：京都大学研究用原子炉  
最大熱出力：5MW

- 照射炉（高出力炉）でも（制約はあるが）炉物理実験は可能
- 低出力炉では実施できない実験が可能



ただし、このような実験を行うと、他の照射利用はできない。

ちなみに、新照射炉の設計・建設・運転そのものが人材育成ともいえる。

4

## 炉物理・臨界安全と照射炉の接点

- 炉物理・臨界安全の分野からの試験研究炉の利用としては、炉物理実験（反応度の測定等）や炉物理教育に適している、臨界実験装置が主となっている。
- 一方、照射炉においては、臨界実験装置では実施できない、燃料の燃焼による組成変化データを取得することができる。（照射炉でも原理的には、炉物理実験・教育を実施できないことはないが、成果に対して労力が過大となる。）
- 燃料の燃焼による組成変化データは、原子炉の炉心管理において必要となるほか、使用済燃料（照射燃料）の貯蔵・輸送時の安全評価においても必要である。
- なお、将来のニーズという観点から、現在検討中あるいはこれから提案される次世代の原子炉で使用される核燃料が対象と考える

5

## 燃料の組成変化データの利用

- 使用済燃料の輸送・貯蔵時に、燃焼による組成変化に伴う反応度の減少分を考慮することにより、取り扱う燃料量を増やすことが可能となる（臨界安全評価における燃焼度クレジットの導入）。
- 燃焼度クレジットを導入するためには、核燃料の燃焼履歴に基づく組成変化を適切に評価するとともに、その組成を有する燃料の反応度変化を適切に評価することが必要となる。
- 燃焼度クレジットの評価手法の検証のために、燃料の核種組成変化に関する国際ベンチマークテストが実施されたり、燃焼燃料を模擬した燃料体の反応度効果の測定実験が行われたりしている。

6

## 燃料の組成変化データの利用（続き）

- 燃料の組成変化データの整備としては、実炉（発電炉）の使用済燃料の核種組成データを詳細な燃焼履歴とともにデータベース化したSFCOMPO 2.0の整備も行われている。（旧原研が1993年に開発を開始、2002年からOECD/NEAに移管）
- SFCOMPO2.0には、BWR（12基）、PWR（16基）のほか、CANDU、AGR、VVERなどの炉のデータが収録されている。
- 高レベル放射性廃棄物の有害度低減のために、マイナーアクチニド（MA）核種などの核変換処理が提案されているが、この核変換も燃料の燃焼による組成変化といえる。

SFCOMPO 2.0の紹介サイト

[https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_21515/sfcompo-2-0-spent-fuel-isotopic-composition](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_21515/sfcompo-2-0-spent-fuel-isotopic-composition)

7

## 照射炉への要求

- 燃料の照射による組成変化データは、照射燃料の分析（PIE）により得られるが、これと併せて、どのような燃料がどのような履歴で照射されたか、というデータが必須となる。
- 照射炉としては、実機のような複雑な照射履歴を再現することは困難。むしろ、シンプルな照射履歴とすることにより、照射履歴の評価における不確実性を排除できるようにする。
- 照射場の中性子スペクトル、照射量（中性子フルエンス、燃焼度）（温度・圧力等も？）を精密に設定・調整、監視できることが望ましい。  
→ 高速炉に関しては、常陽で対応可能か？

8

## 照射炉への要求（続き）

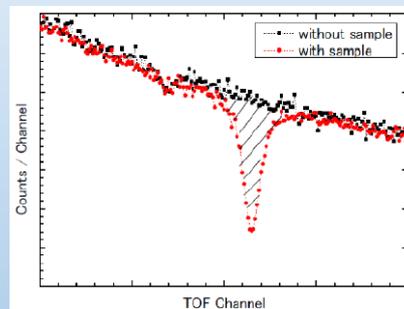
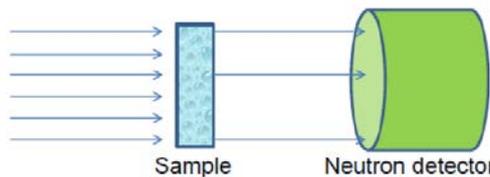
- 照射サンプルとしては、次世代炉用の燃料を対象とすると、現時点では想定されていない材料も含む種々な燃料を取り扱える必要がある。
- また、照射燃料の組成分析（非破壊分析、破壊分析）を行うための設備が必要。MAを含む多様な核種が対象となる。（設備に加え、分析スタッフも）
- 照射炉の仕様が未定ではあるが、照射炉で使用する燃料そのものの燃焼による組成変化及びその反応度変化も試験研究炉の燃焼データとして、有用と考える。このための燃料取り扱い設備及び分析設備も必要。
- なお、照射燃料の非破壊分析としては、通常のガンマ線スペクトル分析に加え、中性子共鳴透過分析法（NRTA）が適用できると、重核の同位体組成を得ることができる。このためには、小型のパルス中性子源が必要となる。

9

## 照射炉への要求（続き2）

- 照射燃料の非破壊分析としては、通常のガンマ線スペクトル分析に加え、中性子共鳴透過分析法（NRTA）等が適用できると、重核等の共鳴を有する核種の同位体組成（及び分布）を得ることができる。このためには、小型のパルス中性子源が必要となる。

### Neutron Resonance Transmission Analysis (NRTA) 共鳴吸収による透過中性子の変化量から定量する方法



- 共鳴エネルギーは核種固有の値 → 核種の同定
- 共鳴吸収量は原子数厚さに依存 → 核種の定量
- 2次元画像検出器使用可 → イメージングが容易

NRTAの参考サイト

[http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/neutron/optics/workshop/20131203/11\\_kur\\_hori.pdf](http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/neutron/optics/workshop/20131203/11_kur_hori.pdf)

10

## 照射炉への要求（続き2）

- 照射燃料の非破壊分析としては、通常のガンマ線スペクトル分析に加え、中性子共鳴透過分析法（NRTA）等が適用できると、重核等の共鳴を有する核種の同位体組成（及び分布）を得ることができる。このためには、小型のパルス中性子源が必要となる。
- さらに照射した燃料サンプルを、臨界実験装置に装荷して、その反応度を測定することができれば、燃料組成変化全体としての影響を把握することができるようになる（積分実験）。照射サンプルは強い放射能を有することから、遮蔽が必要となり、その場合、反応度変化は微小になると考えられる。そのため、（パイルオシレーション法など）高精度での反応度測定が必要となる。

11

## まとめ

- 照射炉への期待としては、核燃料の燃焼による組成変化データの取得が挙げられる。
- 組成変化データは、臨界安全管理における燃焼度クレジットの導入、MAの核変換処理等に有用。
- 適切な照射場の設定、正確な照射履歴データの取得が必要。
- 照射サンプルの精度良い分析（非破壊、破壊）が必要。
- 可能なら、非破壊分析としてNRTAの適用、臨界実験による反応度の測定も実施。

12

This is a blank page.

## 1-5 発電炉向け研究開発における照射炉試験のニーズ

日立 GE ニュークリア・エナジー（株） 近藤 貴夫

### 1. はじめに

原子力発電所の安全性・信頼性・効率性を向上する研究開発において、中性子照射の材料への影響を確認するためには、試験研究炉を用いた照射試験が必要である。本ニーズを以下にまとめる。

### 2. 照射炉試験の必要性

試験研究炉を用いた照射試験は、1) 材料のマクロ特性データの取得、2) 中性子照射量、試験片温度、水質等の試験条件を制御した体系的なデータの取得、3) 将来起こり得る事象を把握するための加速照射試験、等のために必要である。一方、中性子照射の影響を確認するその他の方法として、廃炉材料の活用、イオンや電子線を利用した照射試験等があるが、上記 1)2)3)を同時に満たすことは不可能である。

### 3. 燃料材及び原子炉構造材に係る照射炉試験のニーズ

照射炉試験を必要とする開発テーマの例を以下に示す（震災以降中断されているものも含む）。（燃料材）

- ・ 過渡・事故時を模擬した試験による燃料健全性確認（出力急昇、出力サイクル、過渡、LOCA）
- ・ 耐食性・水素吸収抑制などに優れた高燃焼度燃料向け Zr 系新材料
- ・ 事故耐性燃料（Coated Zr 材、FeCrAl 材、FeCrAl-ODS 材、SiC 材等）
- ・ 高度化 BWR 燃料（Spectral Shift Rod 等）
- ・ 高度化 MOX 燃料（高富化度ペレット等）
- ・ 次世代軽水炉向け燃料材（RBWR 向け高燃焼度被覆管及び高富化度ペレット等）

（原子炉構造材）

- ・ 高経年化評価技術の開発（RPV 照射脆化評価技術、炉内構造物 IASCC 評価技術等）
- ・ 溶接補修技術の開発
- ・ 耐照射劣化対策（対 IASCC）材料の開発

### 4. まとめ

原子力発電所の安全性・信頼性・効率性を向上する研究開発において照射炉試験は不可欠である。試験研究炉、及びその効率的な運用の仕組みを整備することにより、これら研究開発が飛躍的に進展すると考える。

#### キーワード：

照射試験，燃料材開発，原子炉構造材開発

HITACHI



新たな照射炉検討ワークショップ

---

## 発電炉向け研究開発における照射炉試験のニーズ

2020年12月22日

日立GEニュークリア・エナジー株式会社  
原子力計画部 原子炉計画グループ  
近藤 貴夫

All Rights Reserved. Copyright © 2020, Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.

HITACHI



## 目次

---

1. 照射炉試験の必要性
2. 燃料材に係る照射炉試験ニーズ
  - 2.1 一般的ニーズ
  - 2.2 開発項目例
3. 原子炉構造材に係る照射炉試験ニーズ
  - 3.1 一般的ニーズ
  - 3.2 開発案件例
4. まとめ

All Rights Reserved. Copyright © 2020, Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.

1

## 1. 照射炉試験の必要性



- 試験研究炉を用いた照射試験特有のメリット：
  - (1) 中性子照射された材料のマクロ特性データを取得できること
  - (2) 中性子照射量、試験片温度、水質等の試験条件を制御した体系的なデータを取得できること
  - (3) 将来起こり得る事象を把握するための加速照射試験が可能なこと
  - (4) 照射中のデータ計測ができること
- その他の照射試験方法：
  - イオンや電子線を利用した照射試験：
    - 照射損傷領域が試験片表面に限られるため、材料のマクロ特性（機械特性やIASCC特性）の評価は困難
  - 廃炉材料の活用：
    - 体系的なデータ取得、加速試験、及び照射中のデータ計測が困難
- 上記(1)(2)(3)(4)を満たす試験研究炉による照射試験が必要

## 2.1 燃料材に係る照射炉試験ニーズ：一般的ニーズ



- 材料開発段階：
  - 照射環境下での材料特性データ(腐食など)、材料物性の照射影響データの取得  
⇒データの用途・必要性：材料選定、燃料設計(燃料ふるまい解析コードの開発)
- 燃料設計段階：
  - 試験燃料の照射時計装データ(燃料温度など)、照射後試験データの取得  
⇒データの用途・必要性：燃料ふるまい解析コードの妥当性確認(設計／許認可に必要)
- 燃料実用化前段階：
  - 過渡・事故模擬試験(出力急昇試験、反応度投入事故試験など)による限界データの取得  
⇒データの用途・必要性：許認可(安全性評価)に必要
  - 試験炉での長期間の健全照射実績の取得  
⇒データの用途・必要性：商用炉での実用化(先行照射を含む)の有力な判断材料

## 2.2 燃料材に係る照射炉試験ニーズ:開発項目例(1) HITACHI

### 事故耐性燃料(FeCrAl-ODS)

FeCrAl-ODSは、自己再生型のアルミナ被膜形成により、酸化反応熱と酸化に伴う水素発生を大幅に低減する特徴を活かし、Zr合金に比べ事故時安全性を向上。また、酸化物の微細分散により高強度化することで、経済性・効率性を損なわず事故時(高温時)の変形、破損(破裂)を抑制。

具体的な適用性検証のため、材料照射試験による機械特性変化や炉水との共存性、模擬燃料棒照射試験による燃料共存性(PCI/SCC等)や燃料挙動解析コードのモデル検証が必要。将来的には出力急昇試験等の規制・基準化のための炉内試験も必要。

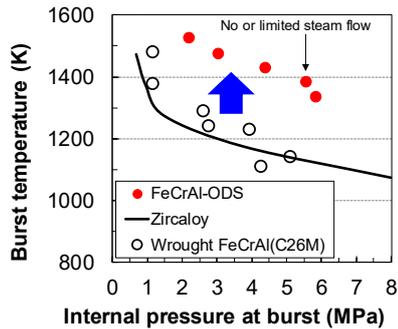


図 事故時(高温時)の破損抑制の例(LOCAバースト試験)  
[Top Fuel 2019]

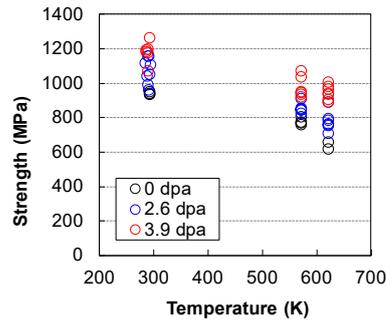
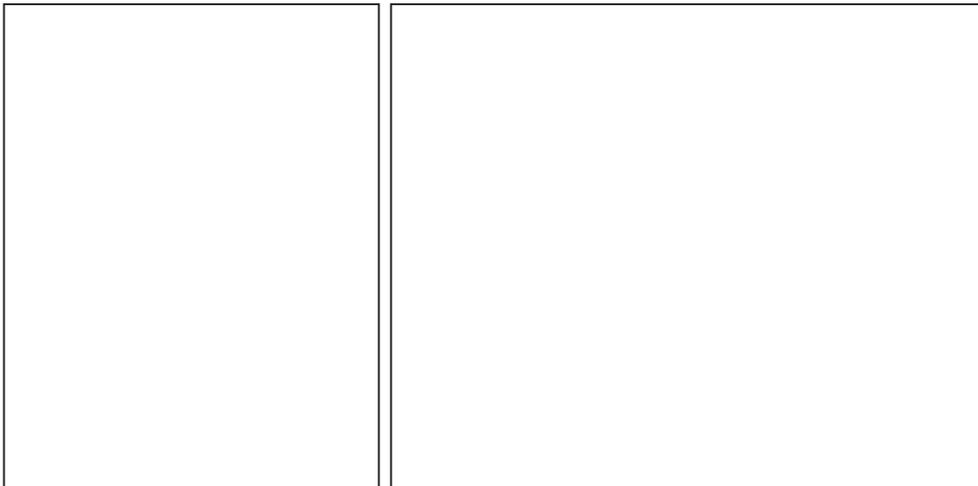


図 照射による機械特性変化の例  
(ORNL HFIR照射材の引張試験)[Top Fuel 2019]

## 2.2 燃料材に係る照射炉試験ニーズ:開発項目例(2) HITACHI

### 事故耐性燃料(SiC)

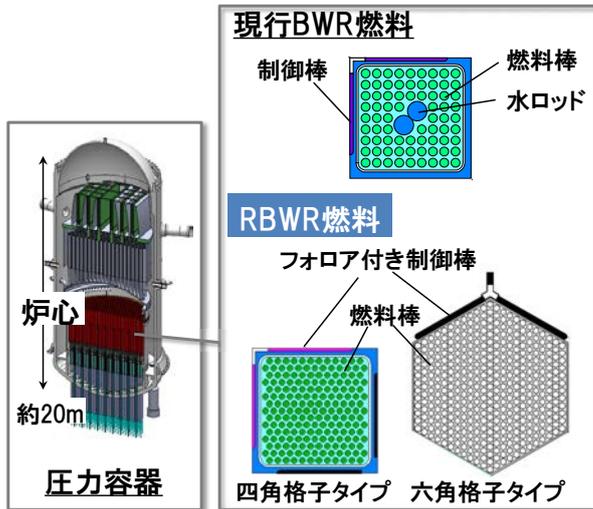
高耐熱のSiC/SiC複合材料を基材とした被覆管。事故時での水素発生量の大幅低減、アクシデントマネジメント(AM)裕度の拡大が期待される。一方、金属とは異なる物性のため、実用化に向け要素開発技術成立性の確認や規格・基準化において照射炉試験ニーズあり。



## 2.2 燃料材に係る照射炉試験ニーズ:開発項目例(3) HITACHI

### 軽水冷却高速炉 (RBWR: Resource-renewable Boiling Water Reactor)

稠密燃料と炉水沸騰(BWRの特長)により水対燃料比を減少させ低減速化し、高速中性子スペクトルを実現。炉心以外は現行BWR技術を適用。



#### メリット

- 四角格子:
  - 使用済MOX燃料低減
  - 核分裂性Pu温存・MA生成抑制
- 六角格子:
  - 長期エネルギー供給(転換比1.0)
  - 有害度低減(TRU燃焼)

#### 必要な照射試験

- 高Pu含有/高Am含有ペレット、及び高燃焼度用被覆管の開発・検証のため、燃料棒照射試験が必要。

All Rights Reserved. Copyright © 2020, Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.

6

## 2.2 燃料材に係る照射炉試験ニーズ:開発項目例(4) HITACHI

### 改良ペレット

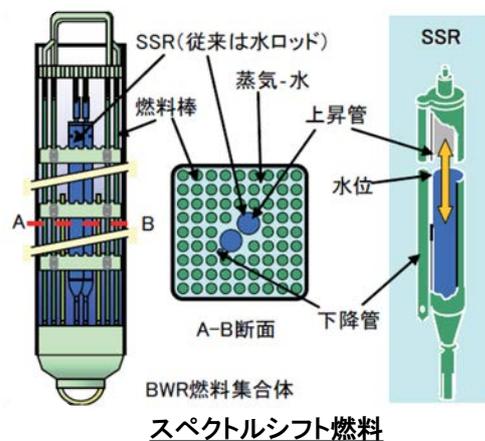
- ペレット-被覆管相互作用による燃料破損を抑制するアルミナシリケート添加ペレット

### 高燃焼度燃料材料の信頼性向上

- 現行BWRの取出燃焼度45GWd/tから70GWd/tへの高燃焼度化を目標とし、課題となる水素脆化等を抑える超高燃焼度燃料用被覆材を開発する。

### スペクトルシフト燃料(Spectral Shift Rod)

- 改良型水ロッドSSRを用いることで、BWRの特徴である流量制御によるスペクトルシフト効果を拡大し、燃料サイクル費を低減、使用済燃料発生量を低減する。
- 気液界面での加速腐食、SSR内滞留水の不純物濃縮による加速腐食の可能性があり、照射試験での健全性確認が必要。



All Rights Reserved. Copyright © 2020, Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.

7

### 3.1 原子炉構造材に係る照射炉試験ニーズ：一般的ニーズ HITACHI

1) 廃炉材調査との組合せによる経年変化事象評価精度の高度化



[1] 健全性評価手法の検証（適切な保守性等の確認）を含む

相互補完による実機に即した評価精度の高度化

2) 耐照射劣化対策材料・技術の開発

新材料や新たな劣化対策技術の実炉適用にあたっては、事前に、試験研究炉による候補材または候補技術の効果やその持続性、また対策技術においては実機適用時における安全性の確認が必要

3) 新型炉に適用される材料の耐照射特性の評価・確認

### 3.2 原子炉構造材に係る照射炉試験ニーズ：開発項目例 (1) HITACHI

1. 原子炉圧力容器（RPV）

1) 監視試験片の不足に対応した技術

- ・ 60年運転を想定するとRPVの監視試験片が不足するため、使用済み試験片の再生や小型試験片による脆化評価技術を検証中。また、試験片追加装荷の場合におけるLFの影響把握も必要。
- ・ 照射脆化の要因である、溶質原子クラスターの生成や母相における照射欠陥の蓄積は、中性子束や照射温度に依存するため、脆化予測式の妥当性を検証するためには、試験研究炉による、制御された、幅広い照射条件による体系的な試験データの取得が必要。

2) 照射脆化評価技術

- ・ 将来の長期運転の実現に向けて、長期運転時の照射脆化を評価するための予測式への拡張、および予測式を検証するため、試験研究炉による、高照射領域の体系的な試験データベースの構築が必要。

### 3.2 原子炉構造材に係る照射炉試験ニーズ:開発項目例 (2)HITACHI



#### 2. 炉内構造物

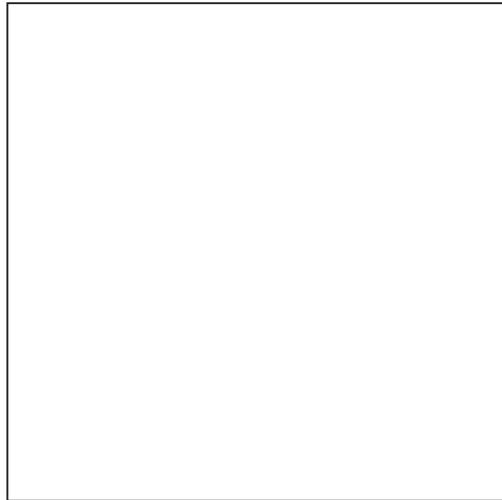
##### 1) 照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 評価モデルの開発と検証

- ・高経年化プラントの増加とともにIASCCの顕在化が進行。重要な経年変化事象のため、将来を予測する技術の開発が必要。
- ・現在までに取得された試験データに基づき、IASCC進展速度を評価するモデル開発が進行中(右図)。進展速度は、K値のほかに照射量にも依存するため、モデル計算結果は、1パラメータで取得されたデータ[注]より、より幅広い条件による検証が望ましい。



試験研究炉による制御された条件による体系的なデータベースの構築が必要

[注] たとえば、進展速度の一定照射量におけるK値依存性データ、またはK値一定での照射量依存性データ等



### 3.2 原子炉構造材に係る照射炉試験ニーズ:開発項目例 (3)HITACHI



##### 2) 照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 速度線図

- ・従来のIASCC 研究では、中性子照射を受けた材料を対象に、炉外の試験装置を用いて、実機炉水模擬環境試験する方法が主流。
- ・炉内では、材料因子への加速効果のほか、炉水の放射分解による環境因子への加速効果が加わるが、これらの要因が同時に作用する条件でのIASCC挙動に関する知見は十分でない。

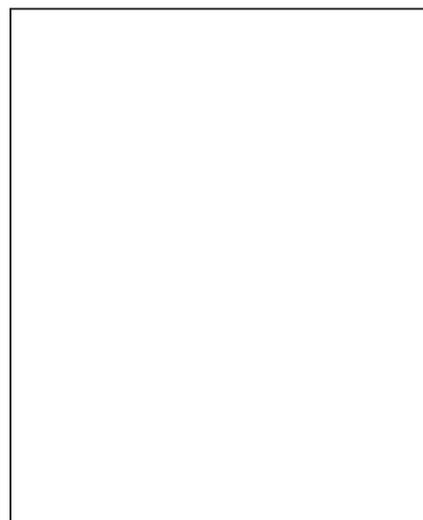


IASCC 進展線図の信頼性向上等のため、現状の主流である照射後試験データを補完する知見として取得することが望ましい。

測定例：右図 炉内試験 (In-pile) の進展速度は、炉外試験 (Out-of-pile) の進展速度より大きい傾向

検討例：水素および貴金属等が注入された環境でのIASCC挙動を、炉内で In-situ測定し、注入量の最適化等に有効なデータを取得

- 1) BWR試験ループの炉内設置
- 2) 中性子照射された試験片を試験ループ内の所定の位置に、適正に固定できる試験片装荷技術
- 3) 試験ループに装荷した試験片への制御された荷重の負荷機構



### 3.2 原子炉構造材に係る照射炉試験ニーズ:開発項目例 (4)HITACHI

#### 3) 破壊靱性値の評価線図

- ・ 照射ステンレス鋼の破壊靱性値が維持規格に記載されている  
(図 黒点線)
- ・ 照射ステンレス鋼の破壊靱性試験結果によれば、ステンレス鋼は、照射後も延性を維持



上記を考慮した、NRC曲線を参考とした維持規格線図の見直し例 (図 赤一点鎖線)



合理的で信頼性が高い線図とするため、試験研究炉を活用し、1) 大型試験片の装荷、2) 制御された条件 (大型試験片の試験片温度の制御等) により、有効な破壊靱性データを拡充していくことが必要。

### 3.2 原子炉構造材に係る照射炉試験ニーズ:開発項目例 (5)HITACHI

#### 4) 補修溶接技術

- ・ ステンレス鋼照射材の溶接時に、溶接熱によって生成するHeバブルが割れ (He割れ) を誘発
- ↓
- ・ He量と溶接入熱をパラメータとする溶接補修しきい条件を検討 (右図)



##### a) 溶接補修しきい条件の高精度化

- ・ シミュレーション解析と限られたデータでしきい条件を規定
- ↓
- ・ データ拡充によるしきい条件の高精度化



##### b) 補修溶接部の長期健全性確認

- ・ 生成したHeを吸収して微小バブルが成長することによる割れリスク発現の可能性
- ・ 照射応力緩和による割れリスクの低減
- ↓
- ・ 溶接施工した照射済試験片を試験炉に装荷して追加照射

### 3.2 原子炉構造材に係る照射炉試験ニーズ:開発項目例 (6)HITACHI

#### 5) 耐照射劣化対策材料の開発:耐IASCC材の開発

- ・ IASCC感受性は、照射誘起偏析による粒界Cr濃度の低下や、転位ループ等の照射欠陥の生成、成長による硬化によって、SCCポテンシャルが増大することにより発現。耐IASCC性を向上させるためには、照射誘起偏析や照射硬化を抑制できる材料の開発が必要。

##### 第一ステップ:材料の基本特性評価

- ・ 非照射材による機械特性、耐SCC性および溶接特性等の確認
- ・ イオン照射試験等による照射誘起偏析特性および照射硬化特性の確認

##### 第二ステップ:試験研究炉による炉内適用性の確認

- ・ 第一ステップで、期待通りの特性が確認された材料は、所定の照射量による中性子照射試験を実施
- ・ 照射後の機械特性(強度、破壊靱性等)、耐IASCC特性 (IASCC感受性が発現するしきい照射量、IASCC進展特性等)、微細組織および偏析特性等を確認

#### 6) 新型炉に適用される材料の耐照射特性の評価・確認

## 4. まとめ

- 原子力発電所の安全性・信頼性・効率性を向上する研究開発において照射炉試験は不可欠。
- 特に、燃料材及び原子炉構造材の研究開発において、多様な照射炉試験のニーズがある。
- 試験研究炉、及びその効率的な運用の仕組みを整備することにより、これら研究開発が飛躍的に進展すると考える。



## 1-6 東芝エネルギーシステムズにおける高温ガス炉の開発と 照射試験に対する期待

東芝エネルギーシステムズ 坪井 靖

### 1. はじめに

優れた安全性と多目的利用に応える次世代炉として高温ガス炉がある。750℃以上の熱供給が可能であり、発電だけでなく水素製造や製鉄等の産業プラント熱供給等に適用可能である。以下に東芝グループの高温ガス炉における取組を紹介し、今後の開発における照射炉への期待を示す。

### 2. 東芝エネルギーシステムズの高温ガス炉への取り組み

HTTR（高温工学試験研究炉）では、中間熱交換器（IHX）等の高温機器、反応度制御設備や原子炉出力制御機器等を納入した。また NFI より燃料を供給した。それらの設計、製造技術を確認し、性能を確認した。また高温ガス炉を用いた水素製造技術について IS 法（ヨウ素(I)と硫黄(S)による熱化学法）や高温水蒸気電解法等を自社開発し、JAEA 殿の IS 法水素製造にも参画した。また米国の NGNP 計画に参画し General Atomic 社と協力して原子炉容器や IHX 設計や水素製造プラント設計を行った。現在は、JAEA 殿との小型高温ガス炉の設計等を実施するとともに、実用炉として、HTTR より高燃焼度で熔融塩蓄熱システムと組み合わせることで再生可能エネルギーの出力変動にも対応できる調整機能を有したベースロード電源として期待される発電プラントについても富士電機と共同で設計検討を実施している。

### 3. 照射試験に対する期待

実用炉では燃料の高燃焼度化（100～160GWd/t）及びスリープレス燃料による高性能化を目指しており、燃料の健全性確認及び照射特性の把握には照射試験と、照射後試験による各種物性の把握（熱伝導度、照射寸法変化、FP 拡散係数）等の取得が必要である。また炉心の寿命は HTTR より延びることから、黒鉛の照射下での健全性確認の為のデータの取得が必要である。これについては JMTR 等の照射炉での照射及び照射試験が必須であり、今後の施設の整備が期待される。

### 4. まとめ

優れた安全性と多目的利用に応える次世代炉高温ガス炉については、実用化における燃料の高燃焼度化等の対応の為、照射データの拡充・整備が求められている。この為の JMTR の照射試験への寄与は大きいものと考えられ、施設の整備が期待される。

#### キーワード：

高温ガス炉、TRISO 燃料、高燃焼度

**TOSHIBA**

PSNN-2020-0660  
A1-2020-000316R0

**東芝エネルギーシステムズにおける高温  
ガス炉の開発と照射試験に対する期待**

東芝エネルギーシステムズ（株）  
2020年 12月 22日

© 2020 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

**Contents**

01 はじめに

02 東芝エネルギーシステムズの高温ガス炉への取りくみ

03 照射試験に対する期待

04 まとめ

© 2020 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation 2

## 1. はじめに

優れた安全性と多目的利用に応える次世代炉として高温ガス炉がある。  
 750℃以上の熱供給が可能であり、発電だけでなく水素製造や製鉄等の産業プラント熱供給等に適用可能である。  
 以下に東芝グループの高温ガス炉における取組を紹介し、今後の開発における照射炉への期待を示す。

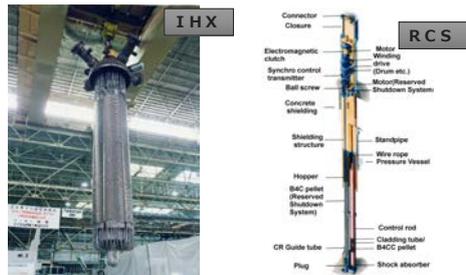
### 東芝グループの高温ガス炉における取組を紹介

## 2. 高温ガス炉への取組(国内)

### ■ HTTRでの実績

高温ガス炉特有の高温機器等を納入

- 中間熱交換器(IHX)
- 反応度制御設備(RCS)
- 燃料 (NFI 所掌)
- 原子炉出力制御設備
- プラント計算機 他



#### IHX主要目

容量	10 MWt
寸法	Φ2m×11m
最高使用温度	950℃
伝熱管材質	ハステロイXR

#### RCS主要目

基数	16対 (制御棒本数 32)
寸法	約8 m
最高使用温度	900℃
制御棒材質	Alloy 800H

高温機器の設計・製造技術を確立し、HTTRで性能を確認

## 2. 高温ガス炉への取組(海外)

### ■ 米国NGNP計画に参画

(2004~2008)

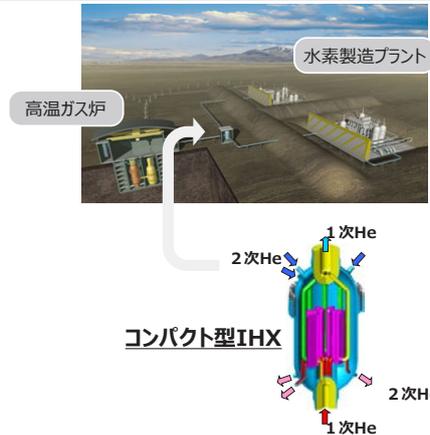
#### ・General Atomic 社との協力

- 原子炉容器設計
- コンパクト型IHX設計
- 水素製造プラント設計

(高温水蒸気電解法)

#### ・Westinghouse 社との協力

- 設計レビュー
  - 原子炉プラント設計
  - 熱利用系設計



蓄積した技術をベースに、海外プロジェクトにも積極的に参画

## 2. 高温ガス炉への取組(研究開発)

### ■ 水素製造法の自社開発を推進

- IS法開発
  - プロセス設計、機器設計
  - 耐食材料開発 (SiC、ガラスライニング)
  - 高効率を目指した化学反応プロセス開発
- 高温水蒸気電解法
  - 国の資金でプロセス設計、セル開発を推進

### ■ JAEA殿のIS水素製造開発に参画

- 水素製造プラント設計 (IS法)
  - 大型セラミック熱交換器の製作実証。
- SiC硫酸分解器の試作
  - 大型セラミック熱交換器の製作実証。



IS法ループ (1L/hr)



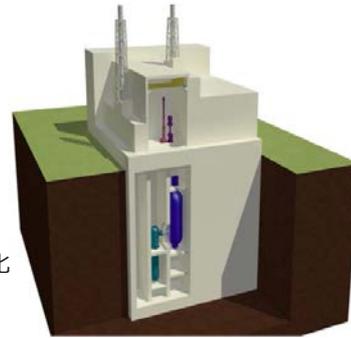
硫酸流路

SiC硫酸分解器

東芝グループの高温ガス炉における取組を紹介と今後の開発における照射炉への期待

## 2.高温ガス炉への取組（実用炉の開発）

炉型	高温ガス炉（ブロック型）
冷却材	ヘリウム（ガス）
熱出力/電気出力	4ユニット構成（2,400MWt/約960MWe） [ 1ユニット（600MWt/約240MWe） ]
一次系温度/圧力	750℃(原子炉出口)/7MPa
燃料	セラミック製被覆燃料粒子
運転サイクル	約1.5年
プラント設計寿命	約60年



富士電機と共同で開発中

### 経済競争力向上に向けた取り組み

- マルチユニット：4ユニット（原子炉）／プラント構成による設備共通化
- 大型蒸気タービン発電機 1基／プラント構成
- 高燃焼度燃料（HTTRの約5倍）
- 高出力密度炉心（HTTRの約2倍）→ スリープレス燃料）

### 早期実用化を目指した仕様

## プラント概要

### ・HTTRからの主要な変更点

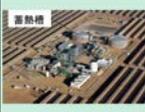
主要目	商用炉	HTTR
原子炉熱出力	600MW	30MW
冷却材	ヘリウムガス	
原子炉入口温度	325℃	395℃
原子炉出口温度	750℃	850(950)℃
冷却材圧力	7MPa	4MPa
炉心構造材	黒鉛	
炉心有効高さ	8.4m	2.9m
出力密度	5.8MW/m <sup>3</sup>	2.5MW/m <sup>3</sup>
燃料	二酸化ウラン・被覆粒子/黒鉛分散型	
燃料体形式	ピン・イン・ブロック型	
原子炉圧力容器	Mn-Mo鋼	2・1/4Cr-1Mo鋼
原子炉圧力容器内径	7.6m	5.5m
発電方式	蒸気タービン	—
閉じ込め機能	コンファインメント	鋼製格納容器
炉容器冷却設備	空冷自然循環	強制水冷

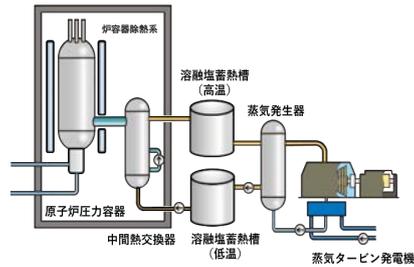
## 2.高温ガス炉への取組（実用炉の開発）

溶融塩蓄熱システムとの組み合わせ

再生可能エネルギーとの共存等を考慮し、負荷追従への対応可能な原子炉システム

溶融塩蓄熱システムは太陽熱発電等で適用例  
（実証段階）

プロジェクト名	Andasol1~3(スペイン)	PS10 / PS20(スペイン)	GEMASOLER(スペイン)
発電容量	50MW	11MW / 20MW	19.9MW
年間発電量	約180GWh	約24GWh / 年	110GWh / 年
蓄熱システム	あり(蓄熱タンク2槽)	あり(蓄熱タンク1槽)	あり(蓄熱タンク2槽)
蓄熱媒体	混合溶融塩 (硝酸Na+硝酸K)	飽和蒸気	溶融塩 (290°C/565°C)
プラント外観			



富士電機と共同で開発中

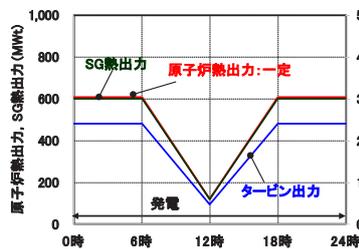
出典：NEDO再生可能エネルギー技術白書(第2版)

再生可能エネルギーの出力変動にも対応できる調整機能を有す

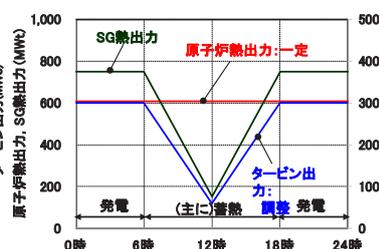
## 運用方法(暫定)

- ◆ 原子炉熱出力一定：稼働率を下げずに発電調整可能
- ◆ 蓄熱システムで電気出力調整(蓄熱容量とタービン仕様最適化)
- ◆ 負荷要求に応じ、蓄熱と発電の切替
- ◆ 最大出力時の夜間を定格、蓄熱主体の昼間は20%出力(最低)  
(タービン最低出力20%より設定)

- ◆ 再生可能エネルギーとの共存
- ◆ フレキシブルな発電(経済性向上)



<蓄熱機能がない場合の運用例>



<蓄熱機能付きの場合の運用例>

## 2.高温ガス炉への取組（実用炉の開発）

開発スケジュール

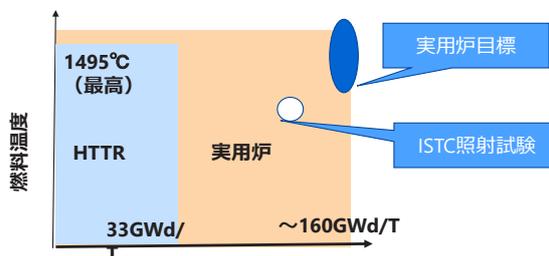
西暦	'21	'26	'31	'35
設計、建設	概念設計	基本設計、安全評価等	詳細設計、安全評価	
許認可			安全審査、設置許可	

2028年度頃 安全審査等

© 2020 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation 11

## 3.照射に対する期待

- 高温ガス炉燃料試料の高燃焼度（ $\sim 160\text{GWd/T}$ 、燃料温度  $1500^\circ\text{C}$ ）の照射健全性の検証  
 現状：国際科学センター（ISTC）でカザフスタン核物理研究所で照射試験（ $100\text{GWd/T}$ 、 $1050\pm 100^\circ\text{C}$ ）が実施された。



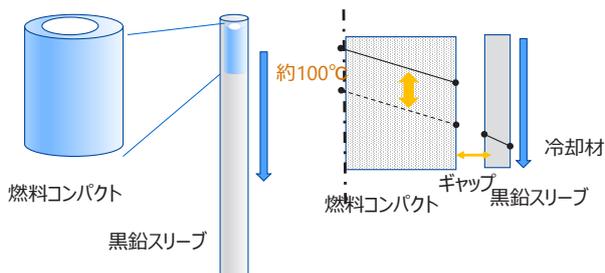
高燃焼度対応の照射データの取得

© 2020 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation 12

### 3.照射に対する期待

- スリーブレス燃料  
高線出力密度化のためのスリーブレス燃料の開発

黒鉛スリーブをなすことで除熱性能を高めた燃料の照射特性の把握



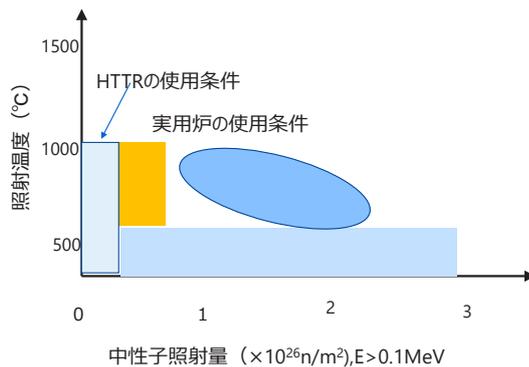
- 左図はスリーブあり燃料の場合
- 黒鉛スリーブをなくすことでギャップ部の温度差をなくすことができる。
- これにより除熱性能向上が期待できる。

#### 高線出力化のスリーブレス燃料の照射データの取得

### 3.照射に対する期待

- 高実用炉高温ガス炉条件での黒鉛特性  
 $1000^{\circ}\text{C} \sim 3 \times 10^{26}\text{n/m}^2$

黒鉛構造物の供用期間中の健全性確認



#### 高燃焼度対応の照射データの取得

## 4.まとめ

優れた安全性と多目的利用に応える次世代炉高温ガス炉については、実用化における燃料の高燃焼度化等の対応の為、照射データの拡充・整備が求められている。この為のJMTRによる照射試験への寄与は大きいものと考えられ、施設の整備が期待される。

**JMTRの照射試験への寄与は大きい**

© 2020 Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation 15

**人と、地球の、明日のために。**

**Committed to People,  
Committed to the Future.**

This is a blank page.

## 2. 第2部

産業利用における利用ニーズ

This is a blank page.

## 2-1 国内における放射性同位元素の医療利用と取り巻く課題

(公社) 日本アイソトープ協会 医薬品部 中村 伸貴

### 1. はじめに

国民の健康維持に不可欠な核医学診療には放射性同位元素を含んだ放射性医薬品が必要である。放射性医薬品は含まれる放射性同位元素からの放射線を利用して診断や治療に用いられるが、そのほとんどに半減期（放射能が半分になる期間）が数時間から数日の放射性同位元素が利用されている。そのため医薬品としての有効期限も一般の医薬品と比べてかなり短く、長期間在庫することができないので、この原料である放射性同位元素を適宜確保し、それらを使ってほぼ毎日医薬品を製造して病院に届けることが必要となっている。この放射性医薬品の中でも最も多く利用されている放射性同位元素は Tc-99m であるが、半減期は約 6 時間と短く、医薬品の製造にあたってはこの親核種である Mo-99（以下モリブデン）から抽出して利用されている。

### 2. モリブデン原料の供給状況

現在モリブデン原料のほとんどは原子炉で製造され、国内で利用されるモリブデン原料の 100%が海外の原子炉での製造に依存している。いくつかある海外のモリブデン原料製造原子炉のほとんどは稼働後 50 年以上経過しており、近年は度々トラブルが発生している。また原子炉で製造されたモリブデンは医薬品の原料とするために精製を行う必要があり、その精製工程においてもトラブルが発生するなど、様々に困難な状況に直面している。加えて我が国ではモリブデン原料確保の生命線となっている航空便においても、災害や今我々が直面している新型コロナウイルス感染症の影響により、運航停止や減便などでモリブデン原料の安定的な確保に大きな課題となっている。

### 3. モリブデン原料の国産化にむけた対応の急務

OECD/NEA の報告書によると 2024 年ごろから世界におけるモリブデンの製造量が急速に減少することが予測されている。我が国におけるモリブデンの必要量は今後大きく変わらないと予想され、モリブデン原料の安定的な確保は喫緊に対応すべき課題となっている。過去においては JMTR を利用したモリブデンの国産化が検討されたが、廃炉決定に伴い棚上げとなっている。当面海外からの調達に依存せざるを得ないが、近々再稼働が期待される国内の研究用原子炉によるモリブデンの国産化実現に向けた取り組みを進め、少し先の将来においては新たな照射炉にてモリブデン必要量の多くが国産で賄われ、安定的な確保の確立と放射性医薬品の持続的な供給を可能することによって、国民の健康に貢献できることが今の我々に課された責務である。

#### キーワード：

放射性医薬品、モリブデン、国産化

「新たな照射試験炉の建設に向けたワークショップ」  
2020年12月22日（火）

## 国内における放射性同位元素の医療利用 と取り巻く課題

公益社団法人日本アイソトープ協会  
医薬品部  
中村 伸貴

協力:  日本放射性医薬品協会

スライド番号: 2,4,5~13

## 核医学(Nuclear Medicine)

放射性同位元素(**Radioisotope;RI**)やその標識化合物の生体内や試験管内の挙動を追跡し、診断や治療を行う医学分野

核医学に利用される**放射性医薬品**は、放射性同位元素を含んだ医薬品であり、**RI治療用**、**体内診断用**及び**体外診断用**の3種類に分類される。

### 体内(*in vivo*)診断

- ・ RIで標識した医薬品を注射、吸入、内用し、各種臓器の機能や動態の計測を行う

### 体外(*in vitro*)診断

- ・ 体外診断薬:測定機器とセットで使用する
- ・ 血液や尿などからホルモンなどの微量物質を測定する

### RI治療(放射線内用療法)

- ・ 悪性リンパ腫、前立腺癌、甲状腺ガンなどのがん治療

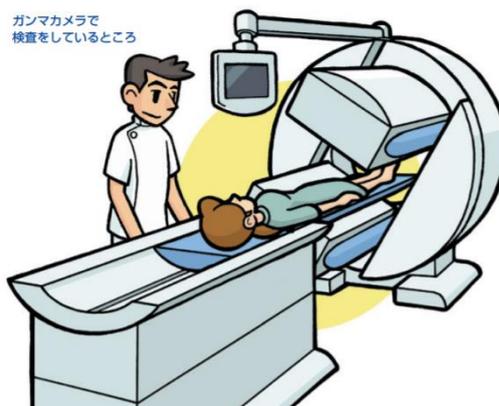
2

## 核医学診断とは

放射線を放出するアイソトープ(RI)を含んだ薬剤を使って、体内の状態を調べる検査。

ガンマ線という放射線を放出する少量の薬剤「放射性医薬品」を静脈から注射し、検査用のベッドの上で横になっている間に、ガンマカメラで撮影し、体の中の様子を画像にする。

検査にかかる時間は20～30分程度。



核医学検査Q & A-なぜ核医学検査を受けるの?-より抜粋  
[http://www.jsnm.org/press/kakuigakukensa\\_qa/](http://www.jsnm.org/press/kakuigakukensa_qa/)

3

JRIA Japan Radioisotope Association

## 放射性医薬品の種類

**脳血流・脳シナプ**  
 $^{131}\text{I}/^{123}\text{I}$ -カプセル/ $^{99\text{m}}\text{Tc}/^{201}\text{Tl}$   
 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -ECD / HMPAO  
 $^{123}\text{I}$ -IMP/トハミントランスポーター

**甲状腺シナプ**  
 $^{131}\text{I}$ -カプセル

**骨シナプ**  
 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP/HMDP  
 $^{90\text{Y}}$  ゼヴァリン /  $^{223}\text{Ra}$  ゴーフィゴ

**肝臓、脾臓、胆道シナプ**  
 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -アシアロ / ヘパティメージ  
 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -フチン酸 / ススコロイド

**腫瘍シナプ**  
 FDG PET /  $^{67}\text{Ga}/^{201}\text{Tl}$  /  $^{111}\text{In}$ ペンテトレオチド

**腎シナプ**  
 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA /  $^{81\text{m}}\text{Kr}$   
 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI/TF  
 $^{201}\text{Tl}$   
 $^{123}\text{I}$ -MIBG/BMIPP  
 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAG3 / DMSA  
 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DTPA

**副腎シナプ**  
 $^{131}\text{I}$ -アドステロール

**治療用放射性医薬品**  $^{131}\text{I}$ -カプセル  
 $^{90\text{Y}}$  ゼヴァリン /  $^{223}\text{Ra}$  ゴーフィゴ

4

JRIA Japan Radioisotope Association

## 放射性医薬品の種類

◆核医学検査薬（放射性医薬品を用いた診断）  
 【インビボ（体内診断用）約60品目】 【インビトロ（体外診断用）約40品目】

◆治療用放射性医薬品

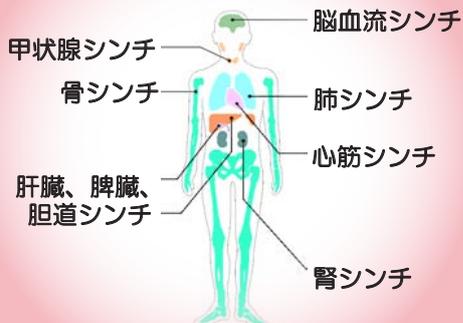
- ①I-131 甲状腺疾患治療薬（ヨウ化ナトリウム）
- ②Y-90 放射標識抗体療法薬（ゼヴァリン）
- ③Ra-223 骨転移のある去勢抵抗性前立腺癌治療薬（ゴーフィゴ）

① 富士フィルム富山化学社HPより借用  
 ② 富士フィルム富山化学社HPより借用  
 ③ バイエル薬品社HPより借用

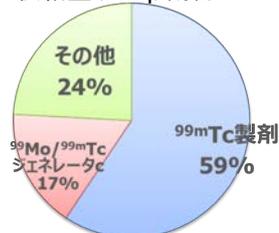
5

## 核医学における<sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tcの利用

### <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc を用いた核医学検査



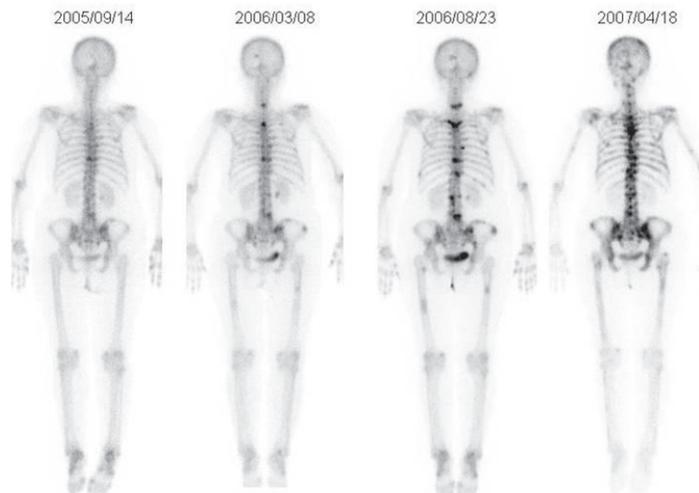
### 放射性医薬品の供給量 (MBq) 割合



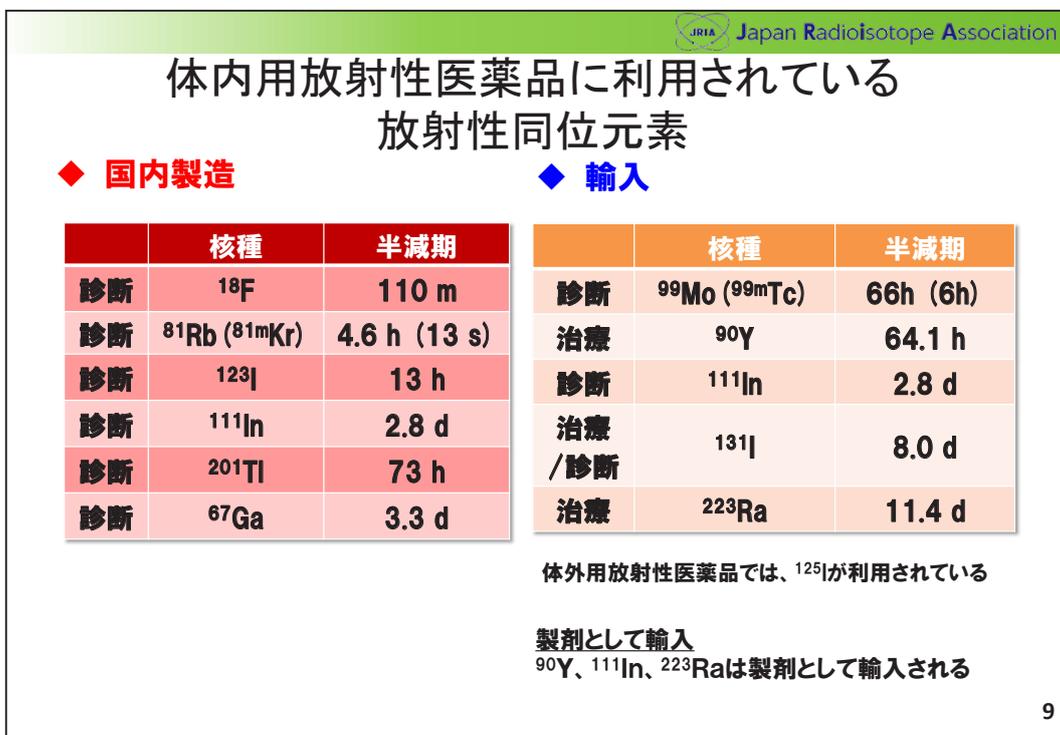
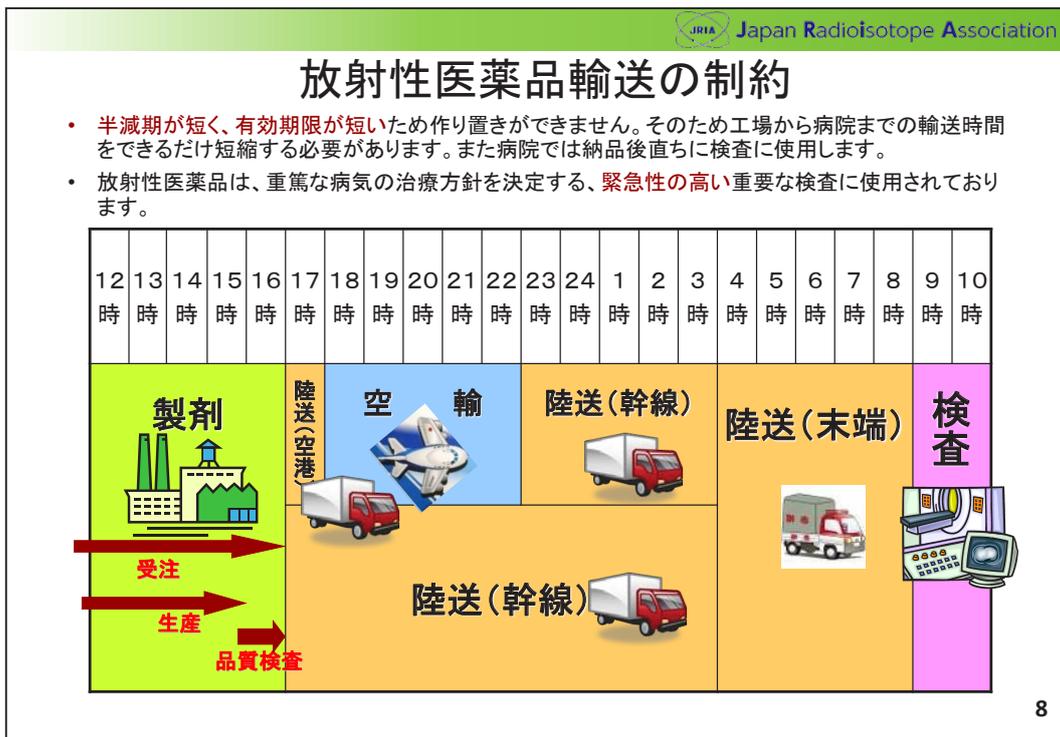
〔日本アイソトープ協会「アイソトープ等流通統計2020」より抜粋〕

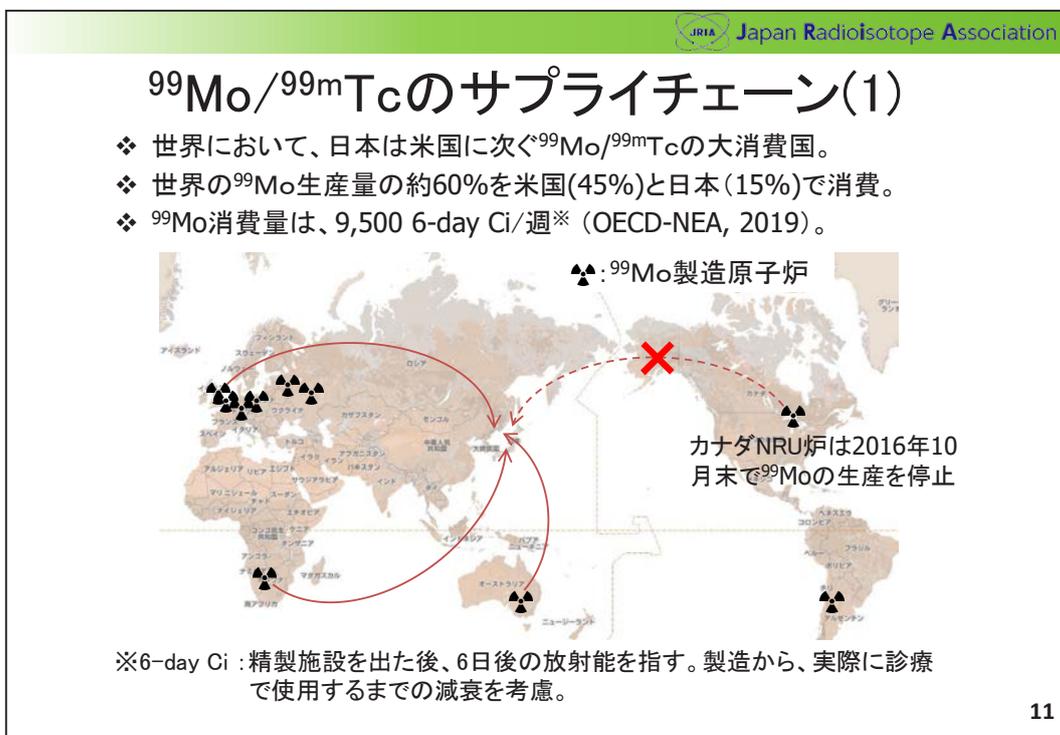
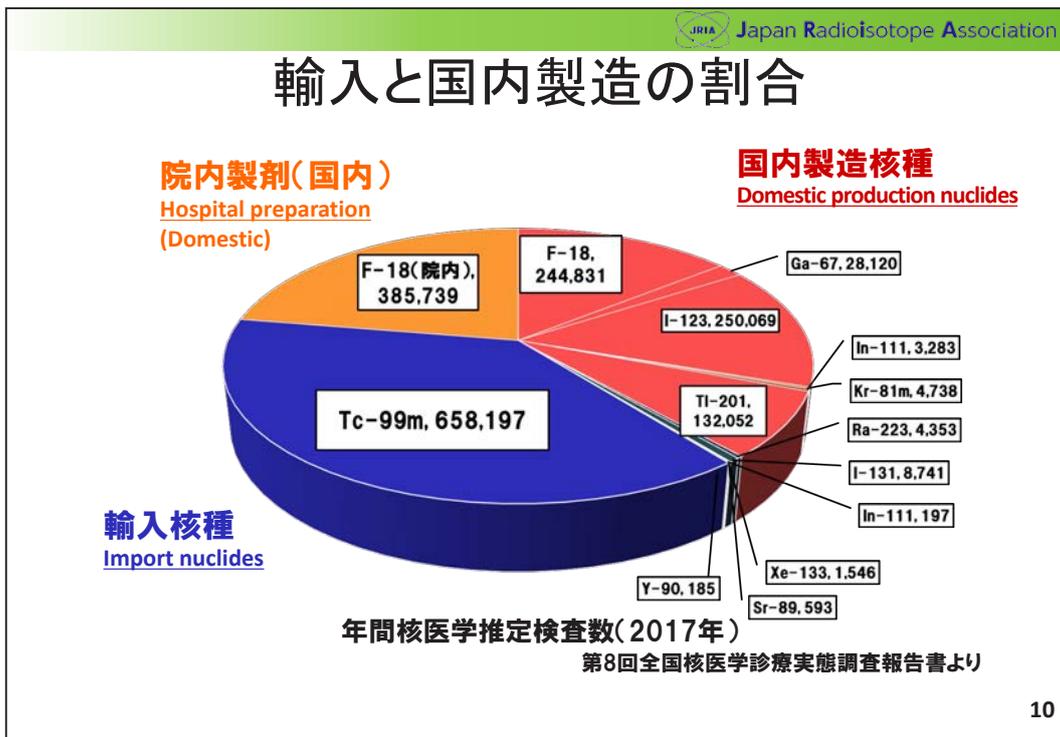
- ❖ **日本における核医学検査の大半は、<sup>99m</sup>Tc製剤。**
- ❖ <sup>99m</sup>Tcの原料である<sup>99</sup>Moは、**100%海外から輸入。**
- ❖ 日本で流通している放射性医薬品の76%が、<sup>99m</sup>Tc製剤と<sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tcジェネレータで占められている。

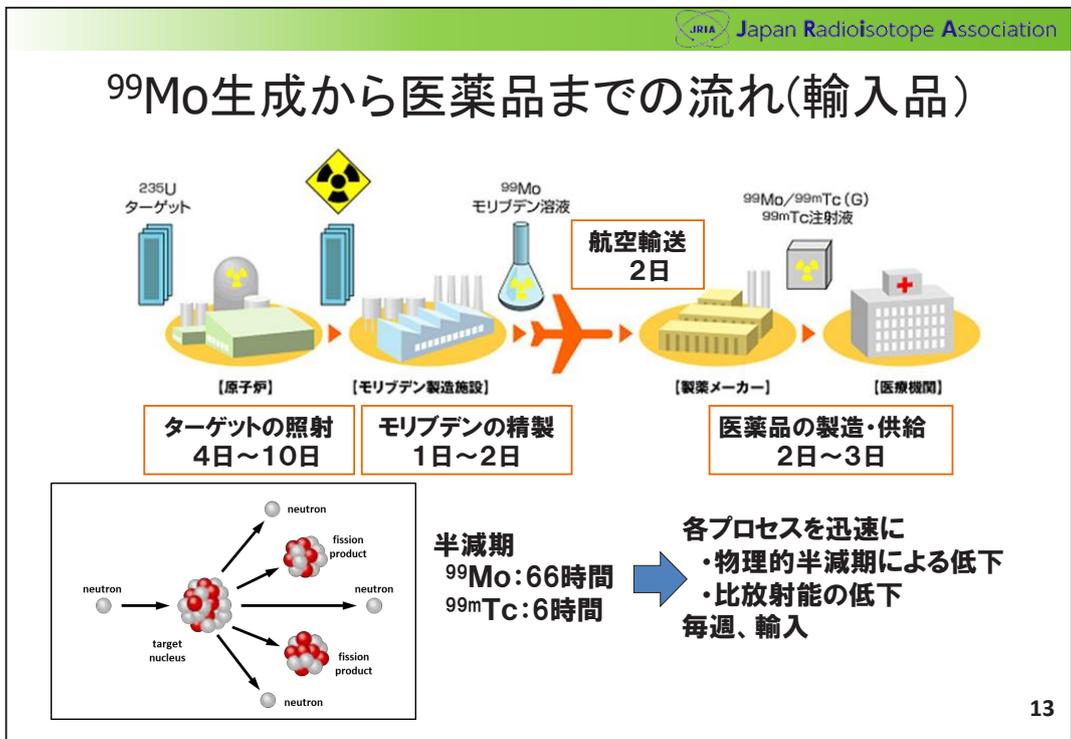
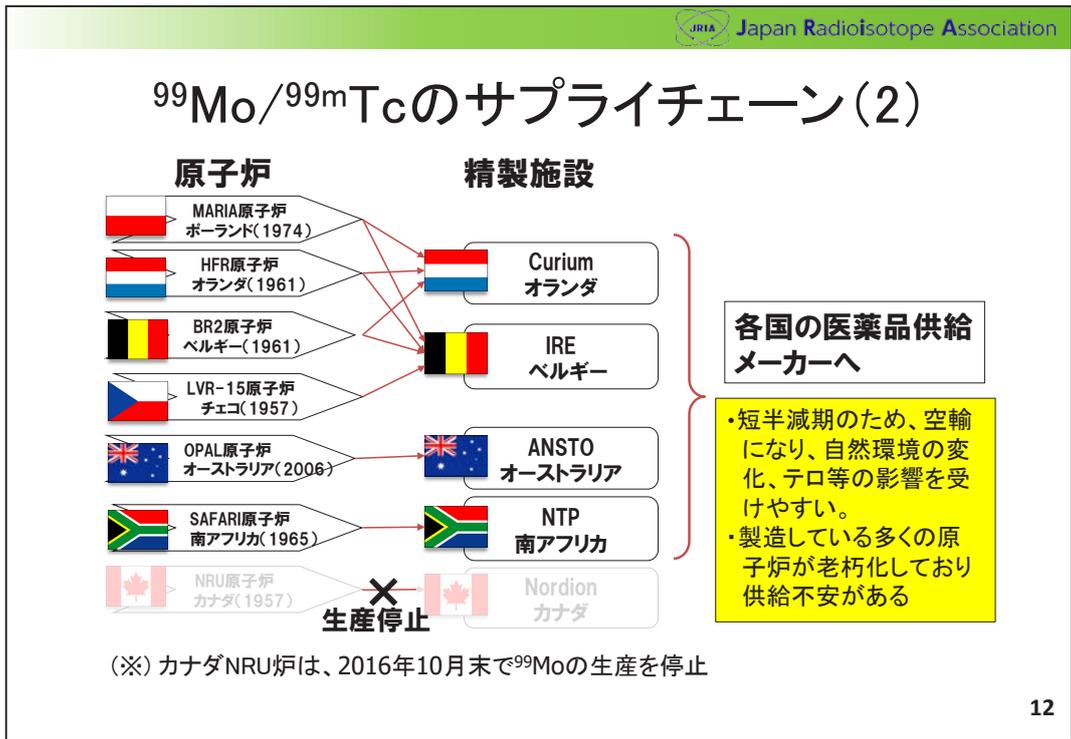
## 代表的使用例：骨転移の画像（乳癌）



骨シンチグラフィによって、がん(写真の黒い点)が骨に転移していないかだけでなく、がんが経時的に全身に転移していく様子がわかる。







## $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 供給の問題点(1)

### ①原子炉の老朽化に伴う予期せぬ運転停止

多くの原子炉は稼働から50年以上経過

→定期メンテナンスによる停止の他、トラブルによる緊急停止の増加

→供給不足の発生

近年起こった原子炉等の計画外停止の例

時期	原子炉	停止期間
2009-2010年	NRU炉(カナダ)	14ヶ月間
2010年	HFR炉(オランダ)	6ヶ月間
2012-2013年	HFR炉(オランダ)	8ヶ月間
2013-2014年	SAFARI炉(南アフリカ)	2ヶ月
2015年	HFR炉(オランダ)	1サイクル
2018年	OPAL炉(オーストラリア)	断続的に停止
	HFR炉(オランダ)	1週間
	SAFARI炉(南アフリカ)	1週間程度(2回)

14

## $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 供給の問題点(2)

### ②精製過程が不可欠

- $^{99}\text{Mo}$ 製造後、精製過程が必要
- 2019年6月:オーストラリアにて精製施設内の汚染事故による供給停止

### ③輸送に関する問題

- 日本は $^{99}\text{Mo}$ 生産炉や精製施設から距離があるため、輸送リスクがある
- 2010年4月:アイスランドの火山噴火により欧州からの航空輸送が停止



現在COVID19により、 $^{99}\text{Mo}$ の海外からの航空輸送に影響あり

アイスランド火山噴火時の欧州航空網への影響  
赤:領空封鎖、橙:部分封鎖-2010年4月18日時点

ウィキペディアより

15

## 供給不足時に国内でとられた対応策

### 緊急対応

- ・ 製薬メーカーにて、入手できた限られた<sup>99</sup>Mo原料から製造できる薬剤を慎重に選定し、供給
- ・ 他の核種を利用した代替検査への一時的な移行

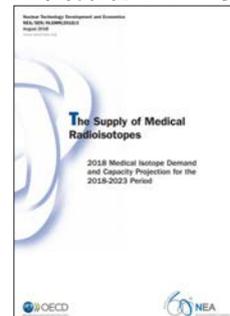
### 供給不足リスク低減策

- ・ 原料調達先の分散化
- ・ 複数の輸送経路を開拓

16

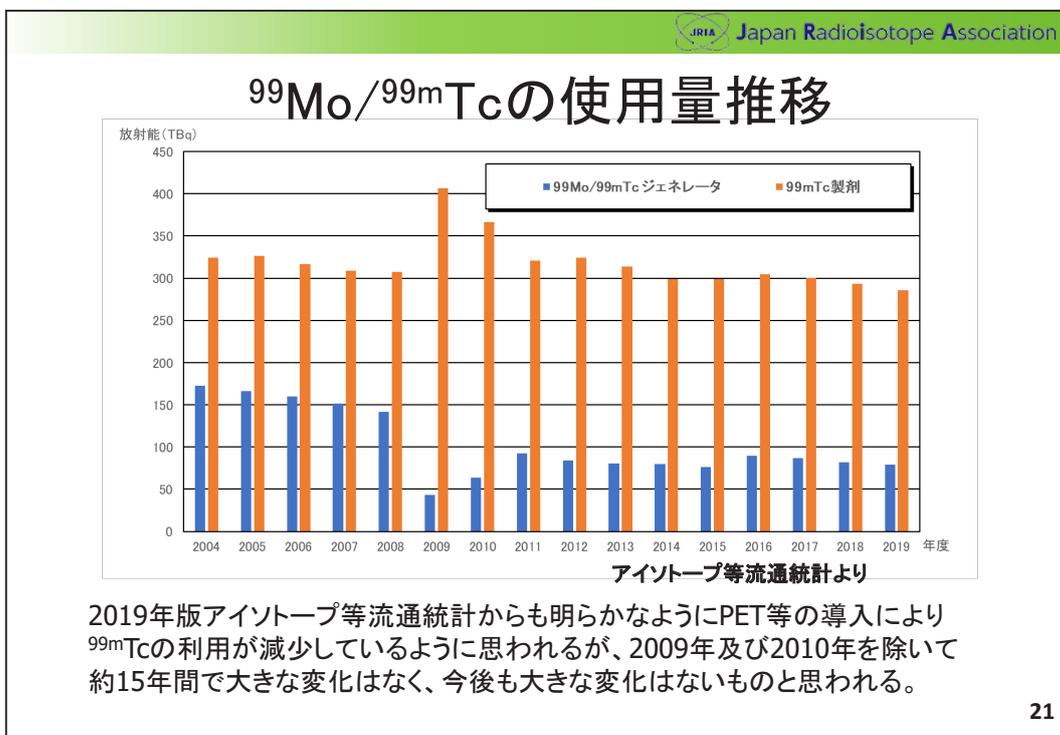
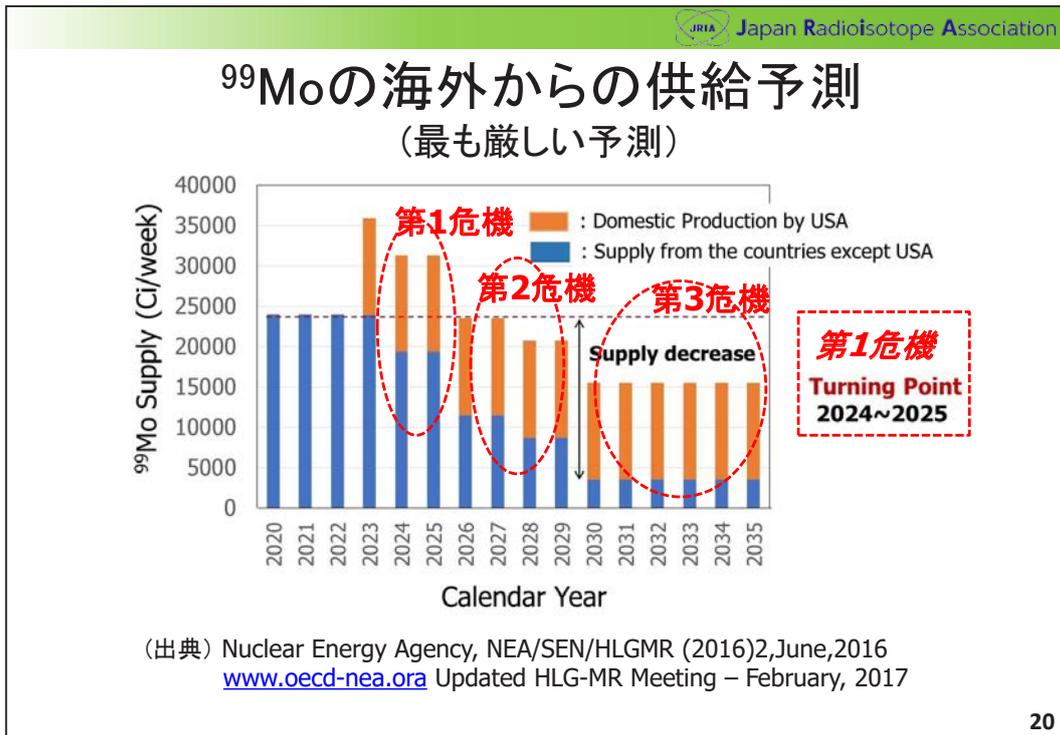
## 国際動向

- ・ 2009-2010に発生した<sup>99</sup>Mo の供給不安を受けて、2009年に経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)にて **High Level Group - Medical Radioisotopes (HLG-MR)** 発足
- ・ 需給状況の予測や供給の安定化に向けた政策提言などの活動を実施  
<https://www.oecd-nea.org/med-radio/security/>
- ・ 年2回の定期会合には各国の規制当局や原子炉の関係者などが参加  
日本からはJRIAと関連製薬会社が参加
- ・ 2009年から2018年まで活動が続けられ、一旦はその任務を終了
- ・ しかしその重要性が認識され、OECD/NEAのNDC(原子力開発・核燃料サイクルに関する技術的経済的検討委員会)に承継



17





## $^{99}\text{Mo}$ 安定確保のための対応状況

- 現在、公開されている原子炉の停止計画が変更されないと、海外からの供給量は、**2024年頃から減少**し始める。
- それを見越して、世界の $^{99}\text{Mo}$ 全供給量の約50%を消費している**米国は国産化計画を進めている**。
- 一方、世界の $^{99}\text{Mo}$ 全供給量の約15%を消費しており、全く生産していない**日本は、内閣府主催の官民合同検討会で1年かけて2011年に $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ の安定供給のためのアクションプランを作成したが、その後の具体的な進捗はない**。

22

## 現状と課題

- $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は核医学検査で広く利用されているが、その原料である $^{99}\text{Mo}$ の生産を担う原子炉の老朽化や輸送過程で起こる問題により、供給不足がたびたび問題となってきた。
- 現在、国際機関等が需給状況をチェックし、生産をコントロールしているが、その中でもしばしば供給不足が発生している。
- 国内でも調達先を増やしたり輸送経路を多様化することにより、供給不安のリスクを低減しているが、 $^{99}\text{Mo}$ 原料を引き続き100%海外に依存しなければならない状況は変わっておらず、根本的な解決には至っていない。

### 今後の期待

現在100%輸入に頼っている $^{99}\text{Mo}$ の国産化の速やかな実現が必要である。 $^{99}\text{Mo}$ 原料の国内需要量の全てではなくとも、国内の原子炉である一定量を製造しカバーできれば、製品が全く供給できないという事態は回避できる。

23

## 我々の取り組み

現在、日本アイソトープ協会ではJAFMID  
や千代田テクノルらと連携して<sup>99</sup>Moの国  
産化に向けた取り組みを進めております。

講演をお聞きの方々にもこの先ご協力い  
ただくこともあるかと存じますので、その時  
はどうぞよろしく願いたいします。

24



ご清聴ありがとうございました

25

## 2-2 医用放射性同位元素の国産化へ向けた取り組み

一般社団法人日本医用アイソトープ開発準備機構（JAFMID） 諸岡 健雄

### 1. 背景

わが国において、がんは死亡原因の第1位であり、がんによる死亡者数は37万人を超え（2018年）、今や3人に1人ががんにより亡くなっている。また、がん患者数は増加の一途をたどり、国民の2人に1人が生涯に一度はがんに罹患する時代となった。その一方で、日本では放射性医薬品の開発が遅れており、海外で実施可能なRI内用療法が国内で受けられないという課題があるとされている。新しい放射性医薬品の国内での開発を妨げる要因のひとつとして、原料の多くを国外からの輸入に頼っており安定供給が難しいことが挙げられている。JAFMIDは、わが国のがん患者が安心して効果的な診療を受けられる環境を支えるため、放射線医薬品の原料の供給を目指すための技術的、行政的、政治的及び事業的な議論のプラットフォームを提供することを目指している。

### 2. 取り組みの方向性

Mo-99の効率的かつ安定的な供給を図るべく検討を行っている。例えば、発電炉1基を用い、既存の炉内計装管内にモリブデンターゲットを挿入し照射することで、国内Mo-99需要の50%以上の供給が可能となるものと考えられている。

医用利用上の有用性が注目され、Ac-225の需要は近年世界的に高まっている一方で、国内への供給量は極めて限られている。現在、高速炉を用いてRa-226を照射してAc-225を得る方法、及び、Th-230を軽水炉で照射して得られるTh-229をAc-225ジェネレーターとして用いる方法（「アクチニウム225の生成方法」特願2020-171194）の両面から技術的な検討を行っている。

### 3. 検討の枠組み等

事業化の推進体として、日本医用アイソトープ株式会社（NucMed）を設立。（2020年1月）日本アイソトープ協会及び千代田テクノルが中心となり、JAFMID及び日本放射性医薬品協会が参加し、「モリブデン等の安定確保に向けた検討委員会」としてロードマップの検討を開始。（2020年4月）

東京都市大学、日本原子力研究開発機構、三菱重工業株式会社、金沢大学及びNucMedの共同研究「国内の原子力インフラを活用した医用RIの自給技術確立に向けた研究開発」を文部科学省国家課題対応型研究開発事業「原子力システム研究開発事業（ボトルネック課題解決型）」として開始（2020年度）

#### キーワード：

医用放射性同位元素、Mo-99、Ac-225

新たな照射試験炉の建設に向けたWS  
第2部 2020年12月22日

# 医用放射性同位元素の 国産化に向けた取り組み

JAFMID  
諸岡健雄

1

## 医用アイソトープ製剤の国産化に向けた事業推進

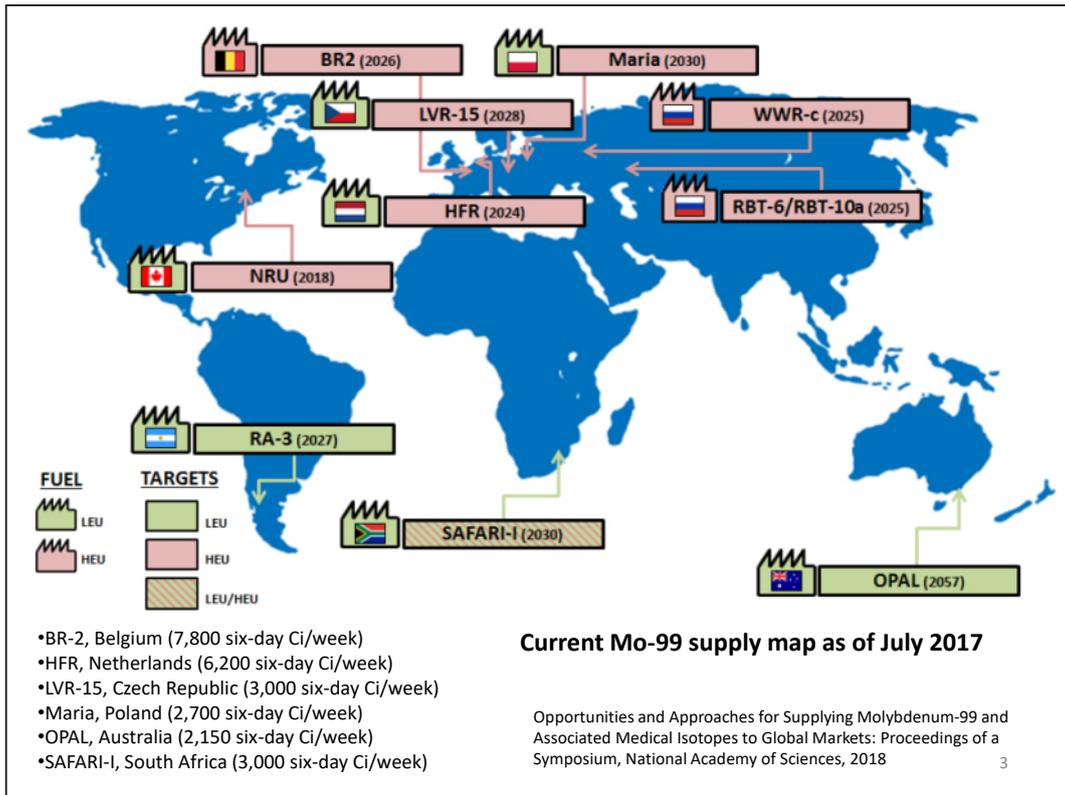
核医学診断で利用件数が最も多いテクネチウム製剤(放射性医薬品)<sup>1)</sup>の原料である放射性同位元素モリブデン-99 (Mo-99)については、我が国はその100%を輸入に依存しており、生産国の原子炉の故障等により、世界的な Mo-99 の供給不足が生じるという問題が度々発生している。<sup>2)</sup>

この問題の解決のため、既存の商用炉及び研究炉、また今後建設が見込まれる研究炉等を活用し、天然モリブデン (Mo-98) に中性子を照射することにより Mo-99 を生成し、テクネチウム製剤の国産化を強力に推進するためのオールジャパンでの体制づくりを図る。さらに、同様の事業推進の枠組みを、他の医用アイソトープの開発にも応用していくことを長期的な目標とする。

1) テクネチウム製剤は、がんの骨転移の検査及び甲状腺の機能検査等に広く用いられている。

2) モリブデン-99/テクネチウム-99m の安定供給のための官民検討会「我が国のテクネチウム製剤の安定供給」に向けてのアクションプラン(平成23年7月7日)より引用。 <http://www.cao.go.jp/oaep/mo-supply/houkokusho.pdf>  
「Mo-99 製造の事業化に向けた検討会」(仮称)について(平成23年7月26日) <http://www.cao.go.jp/oaep/mo-supply/jigyoyuka.pdf>

2



一般社団法人 日本医用アイソトープ開発準備機構

JAFMID

設立目的及び事業概要

当法人は、医用アイソトープの開発にかかる技術的及び制度的課題の抽出及び解決を行い、もって我が国の医療の進歩、国民の健康増進及び医療産業の発展に寄与することを目的とし、次の事業を行う。

- 1 テクネチウム製剤の商業規模での製造に必要な技術的課題及び原子炉を用いた製造を前提とした制度的課題の抽出及び解決
- 2 その他の医用アイソトープの商業規模での製造に必要な課題の抽出及び解決
- 3 医用アイソトープの商業規模での製造に関する情報の提供及びその企画・運営
- 4 その他、当法人の目的を達成するために必要な事業

設立登記日

平成30年10月1日

登記住所

東京都文京区本駒込二丁目28番45号 公益社団法人日本アイソトープ協会内

理事

- 山下 孝 理事長  
 (前 公益社団法人 日本アイソトープ協会 専務理事)
- 畑澤 順 理事  
 (公益社団法人 日本アイソトープ協会 専務理事)
- 諸岡健雄 業務執行理事  
 (日本医用アイソトープ技術開発株式会社 代表取締役社長)



<https://www.jafmid.or.jp/>

## Mo99/Tc99m

- Clinical applications
- Market overview/outlook
- Requirements in commercialization

5

## Ac225

- Clinical applications
- Market overview/outlook
- Requirements in commercialization

6

## Other medical isotopes

- Clinical applications
- Requirements in commercialization

This is a blank page.

## 2-3 RI 製造の現状と展望

(株) 千代田テクノル 河村 弘

### 1) はじめに

RI 製造は、国民の安全・安心を担保する上で非常に重要な事業であり、試験研究炉の設置目的の一つでもある。特殊法人の整理合理化により、日本原子力研究所が行ってきた放射性同位元素の製造頒布事業が弊社に技術移転されて 20 年が経過した。本発表では、これまでの経験・知見を基に RI 製造の現状と展望について概説する。

### 2) 現状と展望

(1)α 核種：飛程が短い α 線を放出するので、強力に細胞内の DNA を破壊し、正常組織に対する放射線影響も最小限に抑えられるため、現在よりも腫瘍だけを集中的に攻撃する効果的な治療が期待される。2016 年から、α 核種 ( $^{223}\text{Ra}$ ) を用いた治療が国内でも開始され、需要は増大傾向にあり、今後は、特に  $^{225}\text{Ac}$  の需要が高まるものと思われる。

(2)β 核種： $^{90}\text{Y}$  や  $^{89}\text{Sr}$  のような β 線のみを放出する核種と、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{177}\text{Lu}$  や  $^{186}\text{Re}$  のような β 線と γ 線を同時に放出する核種がある。後者は治療だけでなく、診断にも利用可能である。今後、β 線エネルギーの異なる β 核種の開発が推進される。

(3)  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ ：同核種は、がん、アルツハイマ病、心臓病等の診断に必要な不可欠な核種であり、100%輸入である。研究用原子炉が廃止されていくと、最悪、右図のように 2024 年頃から供給が滞りはじめる。今後、 $^{99}\text{Mo}$  の安定確保に関するアクションプランを産学官共同で策定することが急務である。



### 3) まとめ

◇海外の情勢を見ても、RI 製造のための研究用原子炉利用が、今後 10~20 年で需要が無くなることはないと思われる。

◇産業界が利用するか否かは、原子炉の稼働率と利用料金にかかっている。

◇RI の国内炉生産は、輸送費低減や輸送手続き簡略化による製造コストの削減、輸送リスクの低減等により、RI 安定供給の実現に大きく寄与するものである。

◇医療用 RI の国内利用予想としては、主としてがん治療用の α 核種や各種診断用の  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  が、また工業用 RI の国内利用予想としては、主として非破壊検査用  $^{192}\text{Ir}$  の製造が最も留意すべきものになると思われる。なお、10 年経てば、RI 製造で用いられている世界の研究用原子炉の数は老朽化等により激減するので、国外のニーズ調査（世界の需要を担う研究用原子炉）も併せて行う必要があると思う。

◇特に、 $^{99}\text{Mo}$  の安定確保のための照射利用に関しては、2024 年頃からの供給減少に備え、JMTR 後継炉利用を含めたアクションプランを産学官共同で速やかに策定し、国の必須医薬品として達成目標の共有化を図る必要がある。

◇RI の安定供給による国民の安全・安心確保の視点から、トラブルによる国内炉停止を念頭においた「2 基の国内炉運転体制の構築(例、JMTR 後継炉ともんじゅサイト新設研究炉の利用)」が実現すれば、RI 製造利用の幅はさらに広がると思われる。

### キーワード：

RI 製造、 $^{225}\text{Ac}$ 、 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{192}\text{Ir}$ 、国の必須医薬品、新アクションプラン作成



# RI製造の現状と展望

令和2年12月22日

(株)千代田テクノル

河村 弘



## 目次

1. はじめに
2. RI製造の現状と展望
3. まとめ

1. はじめに

## 原子力の平和利用

原子力エネルギー利用  
(原子力発電)

<エネルギーセキュリティ>

- ◆ エネルギーの安定供給
- ◆ 原子力発電技術の高度化
- ◆ 原子力発電に係る安全・安心

放射線利用

<生活セキュリティ>

- ◆ **医療・工業・農業用RIの安定供給**
- ◆ 放射線診断/治療技術の高度化
- ◆ 医療に係る安全・安心

1

## 各種分野における放射線利用

分野	用途	具体的利用先	放射線源	
			RI	加速器
医療用	放射線治療	がん治療、輸血用血液リンパ球破壊、等	◎	○
	放射線診断	がん骨転移診断( <sup>99m</sup> Tc)、甲状腺がん診断( <sup>131</sup> I)、等	◎	
	滅菌	医療用具	○	○
農業用	食品照射	ジャガイモ発芽止め	○	○
	害虫防除	害虫の不妊化	○	○
	放射線育種	突然変異による品種改良、等	○	○
工業用	半導体加工	微細加工エリソグラフィ		○
	タイヤ工業	ゴムの粘性制御、等		○
	高分子加工	耐熱性ポリエチレン製造、電池用角膜製造、等	○	○
	非破壊検査	設備・機器の探傷( <sup>192</sup> Ir等)、手荷物検査、等	◎	○
	排煙処理	SOx・NOx分解、等		○
	煙探知器	火災報知器 ( <sup>241</sup> Am)	○	
	製紙工場	含水チップ計量装置 ( <sup>137</sup> Cs)、等	○	

2



## 放射性同位元素の製造頒布事業の歩み

### 日本原子力研究所における放射性同位元素の製造頒布事業の合理化

4. 移転に際し考慮すべき事項等

1997年2月の「特殊法人の整理合理化」に関する閣議決定

(2) 原研は、本事業の移転先に対し、円滑な事業移転を図るため、技術移転、**RI製造に係わる原子炉の利用等の面で十分な協力をを行う**こととする。

種類	品目	放射能	備考
医療用 RI線源	<sup>192</sup> Ir ヘアピン・シングル ルピン 他9種類	740MBq~ 296GBq	密封
	<sup>198</sup> Au グレイン 1種類	185MBq	
	<sup>158</sup> Gd ペレット 2種類	1.85GBq、 3.7GBq	
工業用 RI線源	<sup>60</sup> Co ニードル 4種類	37MBq~ 740MBq	非密封
	<sup>192</sup> Ir ペレット	370GBq	
	<sup>169</sup> Yb ペレット	37GBq~ 370GBq	密封

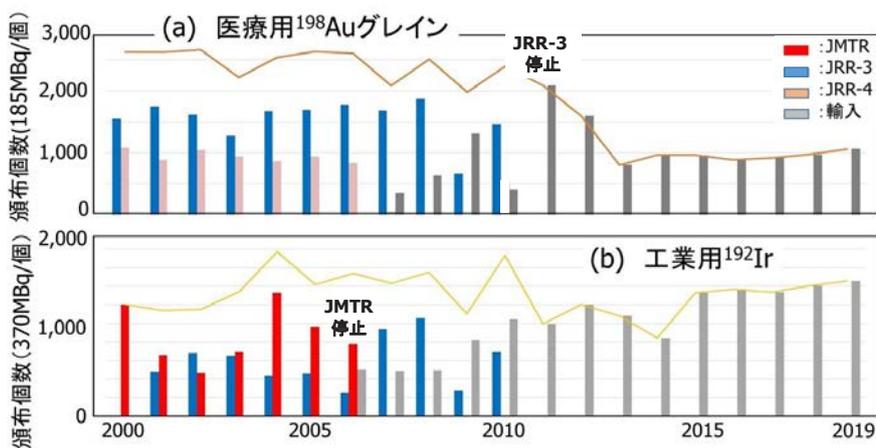


日本原子力研究所高橋副理事長と弊社細田社長  
(2000年当時)

3



## 主要放射性同位元素の頒布量経時変化



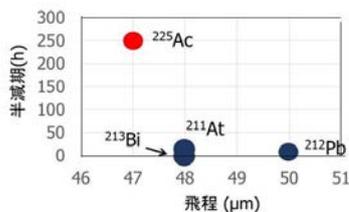
4

2. RI製造の現状と展望



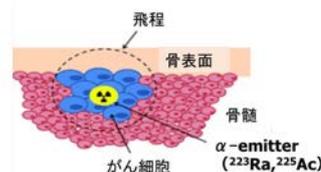
(1) α核種製造

- ◆ β線よりも飛程が短いα線が利用できるようなれば、強力に細胞内のDNAを破壊し、正常組織に対する放射線影響も最小限に抑えられるため、現在よりも腫瘍だけを集中的に攻撃する効果的な治療が期待される。
- ◆ 2016年からα核種 (<sup>223</sup>Ra)を用いた治療が国内でも開始され、α核種のニーズがうなぎのぼりの増大傾向にある。



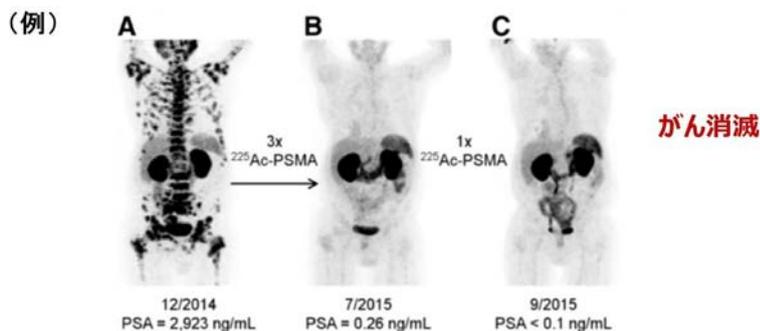
β線の飛程: 2~10mm, α線の飛程: <0.1mm

核種	半減期	製造方法
<sup>223</sup> Ra	ラジウム	11.4d 原子炉
<sup>211</sup> At	アスタチン	7.21h 原子炉 サイクロトロン
<sup>212</sup> Bi	ビスマス	60.6d 原子炉
<sup>225</sup> Ac	アクチニウム	10.0d 原子炉
<sup>213</sup> Bi	ビスマス	45.6m 原子炉
<sup>149</sup> Tb	テルビウム	4.15h 原子炉 シンクロトロン



5

α核種 (<sup>225</sup>Ac)によるがん治療効果例



Kratochwil et al., J Nucl Med. 2016, 57, 1941-1944.  
<sup>225</sup>Ac-PSMA-617 for PSMA-Targeted α-Radiation Therapy of Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer.

6



## 世界における<sup>225</sup>Acの製造場所と製造方法

製造場所は3か所のみ

	EU	USA	Russia
製造場所	Institute for Transuranium Elements (ITU)	Oak Ridge National Laboratory (ORNL)	Institute of Physics and Power Engineering (IPPE)
年間製造量	13 GBq	27 GBq	26 GBq

(注)年間発生する約100万人のがん患者の内、前立腺がんの全身転移している患者数が約1000~2000人とすると、この方々に10MBq/人/回使用する場合は約10GBq~20GBq必要となる。



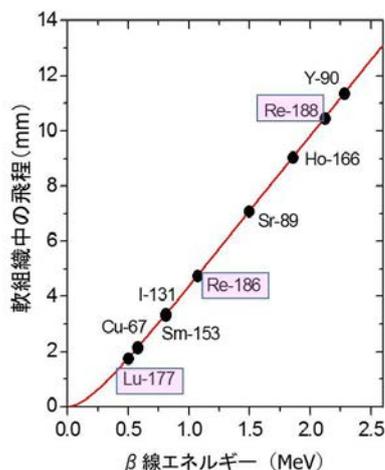
7



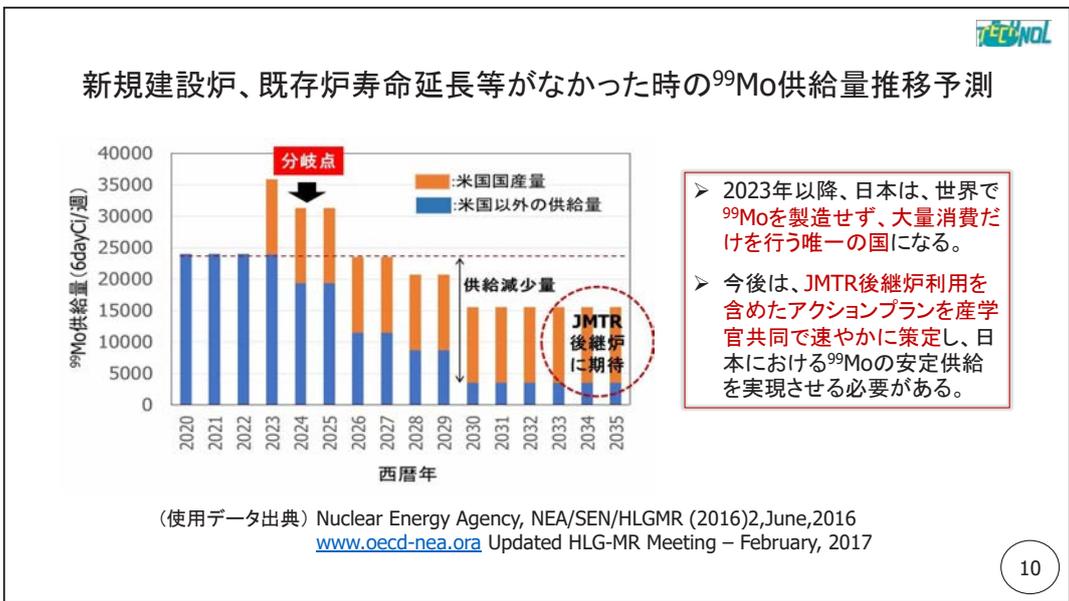
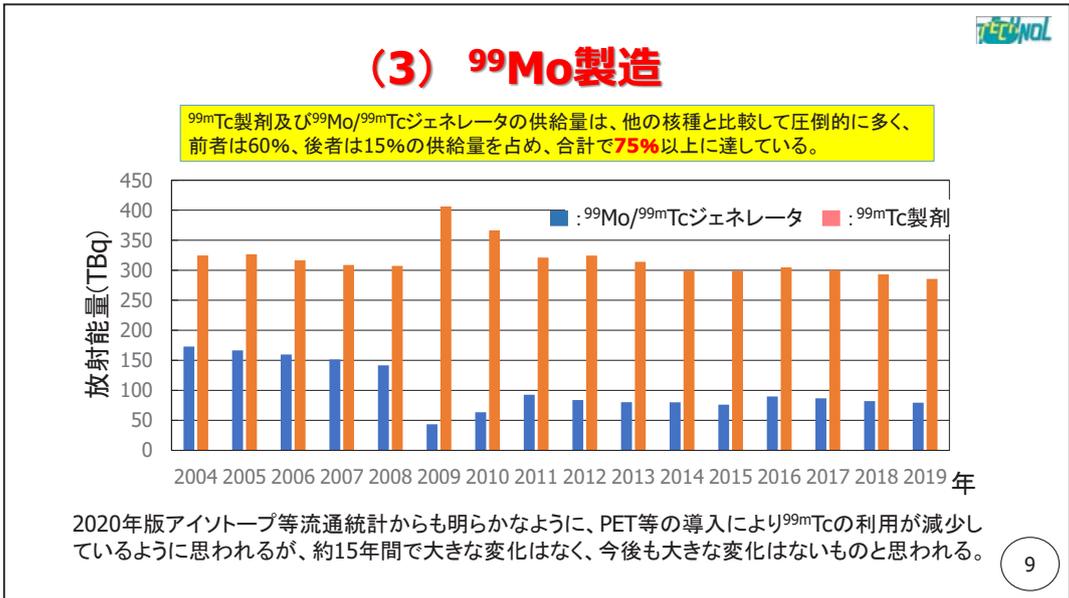
## (2) β核種製造

核種	半減期 (日)	β線の最大エネルギー	主なγ線エネルギー
Sr-89	50.5	1.49 MeV	-
Y-90	2.7	2.28 MeV	-
I-131	8.0	0.61 MeV	364 keV
Cu-67	2.6	0.58 MeV	185 keV
Sm-153	1.9	0.81 MeV	103 keV
Ho-166	1.1	1.85 MeV	81 keV
Lu-177	6.7	0.50 MeV	208 keV
Re-186	3.8	1.07 MeV	137 keV
Re-188	0.7	2.12 MeV	155 keV

■ : 放射性医薬品として認可されている内用療法用RI  
 ■ : 加速器で発生した中性子による製造核種



8





## 研究用原子炉で期待されるRI線源

要望されている核種	半減期	主な用途	標的核種	
従来のRI製品	<sup>192</sup> Ir	73.8 d	非破壊検査	<sup>191</sup> Ir
	<sup>60</sup> Co(小線源)	5.27 y	計測機器 等	<sup>59</sup> Co
	<sup>60</sup> Co(大線源)		滅菌	
	<sup>169</sup> Yb	32.0 d	非破壊検査	<sup>168</sup> Yb
	<sup>198</sup> Au	2.69 d	舌癌治療	<sup>197</sup> Au
新たなRI製品	<sup>125</sup> I	59.4 d	前立腺がん治療	<sup>124</sup> Xe
	<sup>89</sup> Sr	50.6 d	癌痛軽減医薬品	<sup>88</sup> Sr
	<sup>75</sup> Se	120 d	非破壊検査	<sup>74</sup> Se
国産化開発中の主なRI製品	<sup>99</sup> Mo/ <sup>99m</sup> Tc	66.0 h/6.0 h	がん診断 等	<sup>98</sup> Mo
	<sup>188</sup> W/ <sup>188</sup> Re	69.8 d/17 h	がん治療	<sup>186</sup> W
	<sup>186</sup> Re	3.7 d		<sup>185</sup> Re
	<sup>177</sup> Lu	6.6 d		<sup>176</sup> Yb

11

### 3. まとめ



- ◆ 海外の情勢を見ても、**RI製造のための研究用原子炉利用**が、今後 10~20年で無くなることはないと思われる。
- ◆ **産業界が利用するか否か**は、原子炉の稼働率と利用料金にかかっている。
- ◆ **「RIの国内炉生産」**は、輸送費低減や輸送手続き簡略化による”製造コストの削減”、“輸送リスクの低減”等の観点から、RI安定供給の実現に大きく寄与するものである。
- ◆ **現時点の国内利用予想としては**、医療用RIとしては、主としてがん治療用のα核種や診断用の<sup>99</sup>Moが、工業用RIとしては、主として非破壊検査用<sup>192</sup>Irの製造が最も重要になると思われる。なお、10年経てば、RI製造で用いられている世界の研究用原子炉の数は老朽化等により激減するので、国外からの利用調査も行う必要があるかもしれない。
- ◆ 特に、**<sup>99</sup>Moの安定確保のための照射利用**に関しては、**2024年頃からの供給減少に備え**、JMTR後継炉利用を含めたアクションプランを産学官共同で速やかに策定し、国の必須医薬品として達成目標の共有化を図る必要がある。
- ◆ **RI製造の安定供給による国民の安全・安心確保の視点**から、トラブルによる国内炉停止を念頭においた「2基の国内炉運転体制の構築(例えば、JMTR後継炉ともんじゅサイトの研究炉利用)」が実現すれば、RI利用の幅はさらに広がると思われる。
- ◆ **RI製造利用**に関しては、「原子炉の核的機能だけでなく、照射設備やホットラボの機能も考慮した設計検討」や「ニーズに合った供用施設の運営管理」が必要不可欠である。

12

### 3. 第3部

科学技術・学術研究における利用ニーズ

This is a blank page.

### 3-1 学術研究における照射炉利用研究ニーズ

—東北大金研の共同利用研究を中心に—

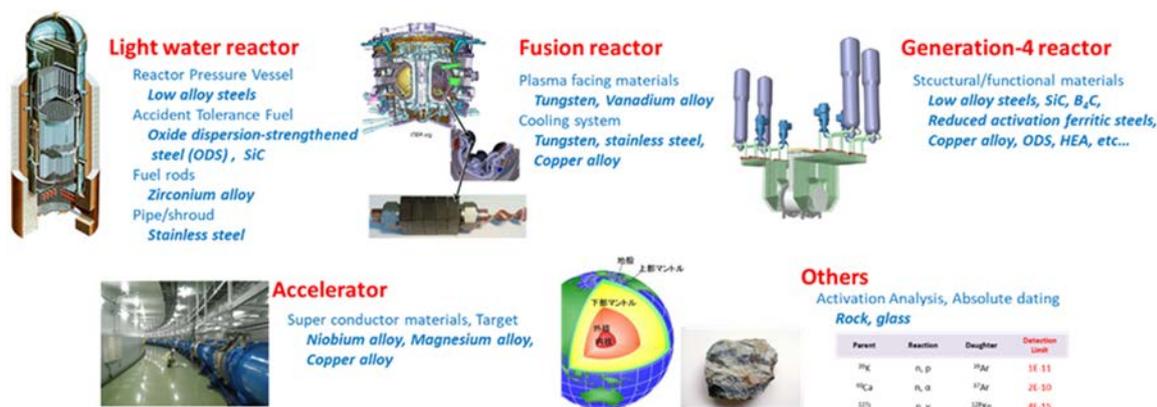
東北大学金属材料研究所 永井 康介

#### 1. はじめに

東北大金研 附属量子エネルギー材料科学国際研究センター（大洗センター）は、1969年に設置された前身の附属材料試験炉利用施設時代より、JMTRを中心とした照射炉を利用した学術研究の全国共同利用施設として、JAEAとの密接な協力関係を基に、キャプセル開発から照射後試料の最先端の分析まで、様々な学術研究に貢献してきた。また、2008年のJMTRの停止以降は、共同利用者の照射ニーズに応えるため、海外の研究機関と学術協定を結び、海外炉による代替照射を行ってきた。本講演では、大洗センターにおけるこれらの取り組みを紹介し、共同利用・共同研究における照射炉利用研究ニーズと、国内照射炉の必要性について述べる。

#### 2. 東北大金研の全国共同利用における照射炉利用材料研究

図1に最近の主な照射材料研究を示す。50年間で研究のトレンドには様々な変化が見られたが、軽水炉、Gen-IV、核融合炉材料、放射化分析など幅広い研究が行われている。また、近年は照射温度や環境を精密に制御した照射が強く求められている。



#### 3. 学術研究における国内照射炉の必要性

上記の共同利用研究の試料をとりまとめて海外炉に照射依頼をするだけでなく、例えばベルギー-SCK・CENのBR-2に教員が長期滞在し、新しい照射キャプセルの共同開発を行っている。先端の材料照射研究にはこのような取り組みが欠かせないが、国内炉と比べて多大な労力、時間、費用がかかる。また、照射領域の確保においても我が国の研究者の希望通りになるわけではない。研究の質・量共に国内炉が欠かせないことは明らかである。

#### キーワード:

照射後実験施設、代替海外炉利用、キャプセル共同開発

2020年12月22・23日  
「新たな照射炉の建設に向けたワークショップ」

# 学術研究における照射炉 利用研究ニーズ —東北大金研の共同利用研究を中心に—

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  
永井康介

1

## 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（旧 材料試験炉利用施設、通称 大洗センター）

- 1969年に**オールジャパンの全国共同利用施設として設立**、東北大金研が運営を任される
- JMTR、JOYOの照射利用や、放射性廃棄物を念頭に置いたアクチノイド研究
- 材料照射研究における当センターのミッション
  - JMTRなどの**照射**（照射希望を取りまとめ、照射キャプセル製作、照射経費の負担）
  - **照射後実験**設備の提供とそれを用いた先端材料科学の推進、共同利用者へのサポート
- 10年ほど前、JMTR、JOYOともに停止状態に。以降、**海外炉（ベルギーBR-2炉、米国HFIR）と学術協定**を結び、代替照射を行う。

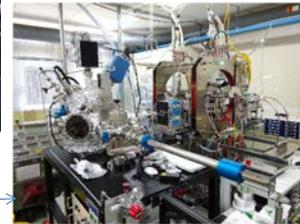


2

## 大洗センターの特徴

ホットラボ棟での主要核種使用量  
(保有全38核種、許可291核種)

最先端の分析装置群とそれを使いこなす教員・スタッフ



収差補正TEM  
3次元アトムプローブ  
小型高密度プラズマ照射(C-DPS)つき昇温脱離装置(IG-TDS)

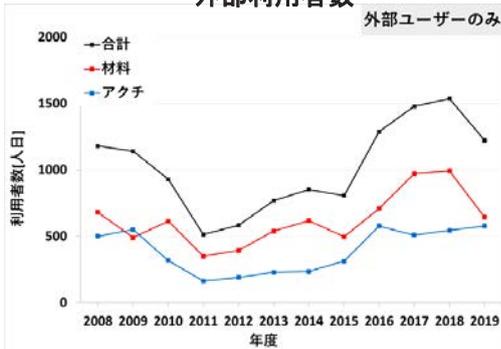
- 装置群のほとんどは、外部資金により導入・開発、他の研究期間との共同研究により開発した装置をセンターの管理区域に導入
- フランスや米国で大洗センターをモデルにした施設の設定

## 共同利用研究状況

共同利用採択件数



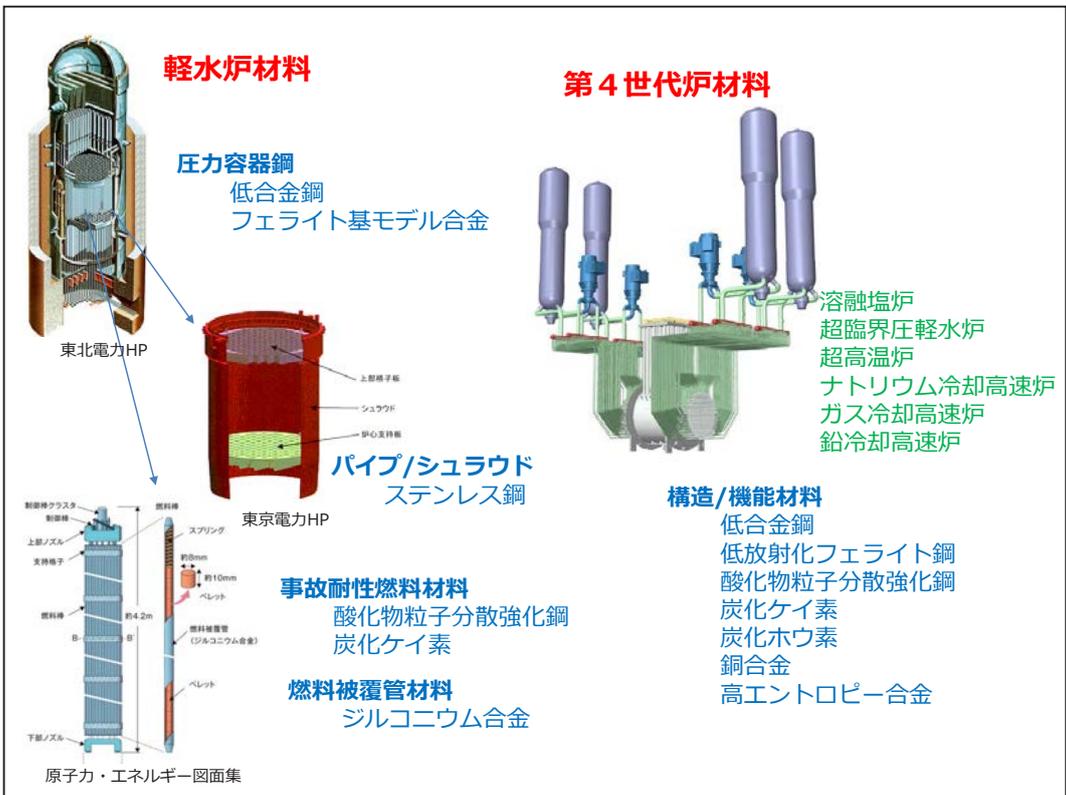
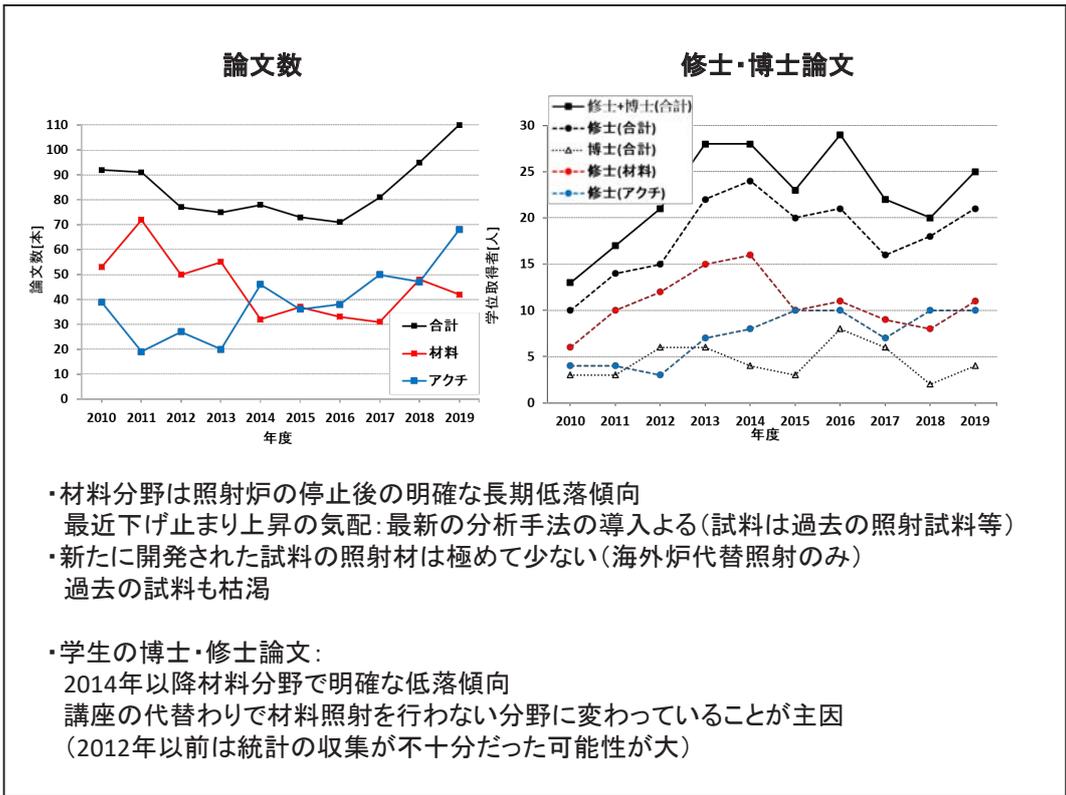
外部利用者数



応募分野



- JMTR停止後も**多くの申請を維持** → 強い研究ニーズが継続している
- **17大学、7国研、海外8大学・研究所の利用(2019年実績、材料のみ)**
- 震災後の落ち込みと復活
- 論文成果: 1課題あたり約1本/年



### 核融合炉材料

トロイダル磁場 (TF) コイル (超伝導)  
中心ソレノイド (CS) コイル (超伝導)  
クライオスタット  
高周波加熱装置  
計測装置  
遠隔保守装置  
真空容器  
中性粒子入射加熱装置  
トリチウム除去設備  
量研機構HP

約30メートル  
核融合出力 50万キロワット

ダイバータ

**プラズマ対向材料**  
タングステン合金  
バナジウム合金  
フェライト鋼

**計測装置**  
ニオブ合金

### 放射化年代測定

地殻  
上部マントル  
下部マントル  
外核  
内核

太平洋海底の年代測定  
岩石

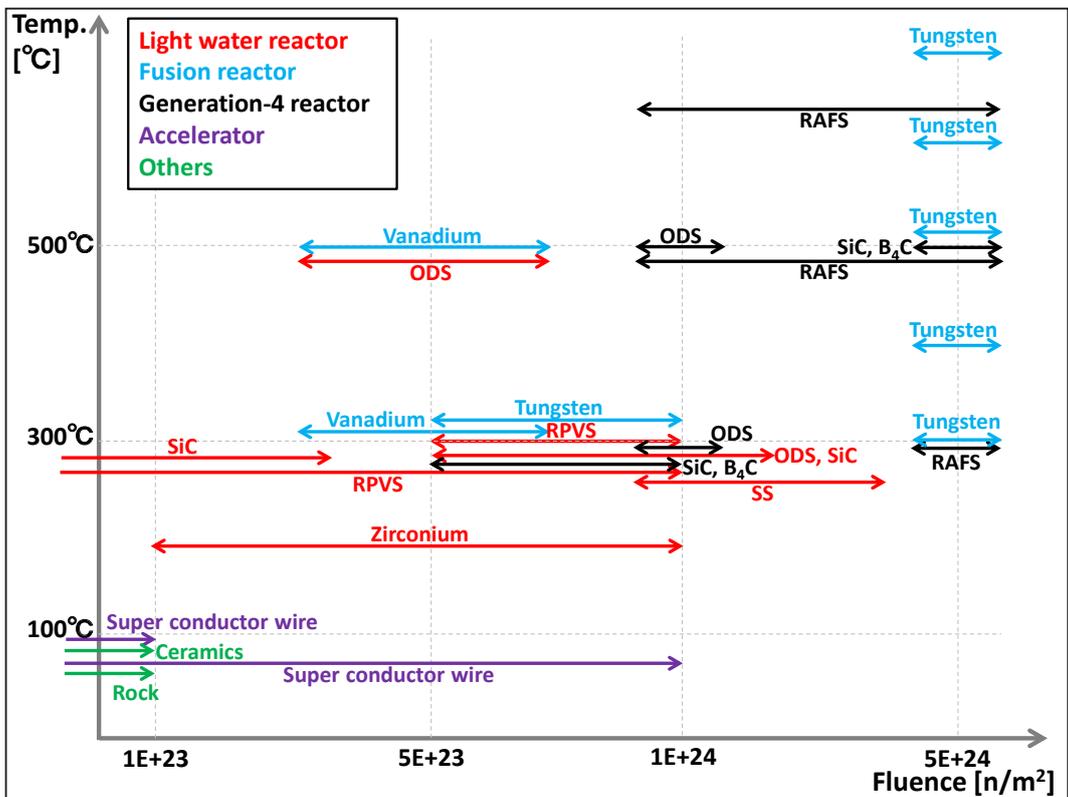
### アルファセラピー

腫瘍治療薬開発  
治療薬 $^{223}\text{RaCl}_2$ の開発

### 加速器

**超伝導材料**  
ニオブ合金  
銅合金、YBCO

**ターゲット材料**  
マグネシウム合金



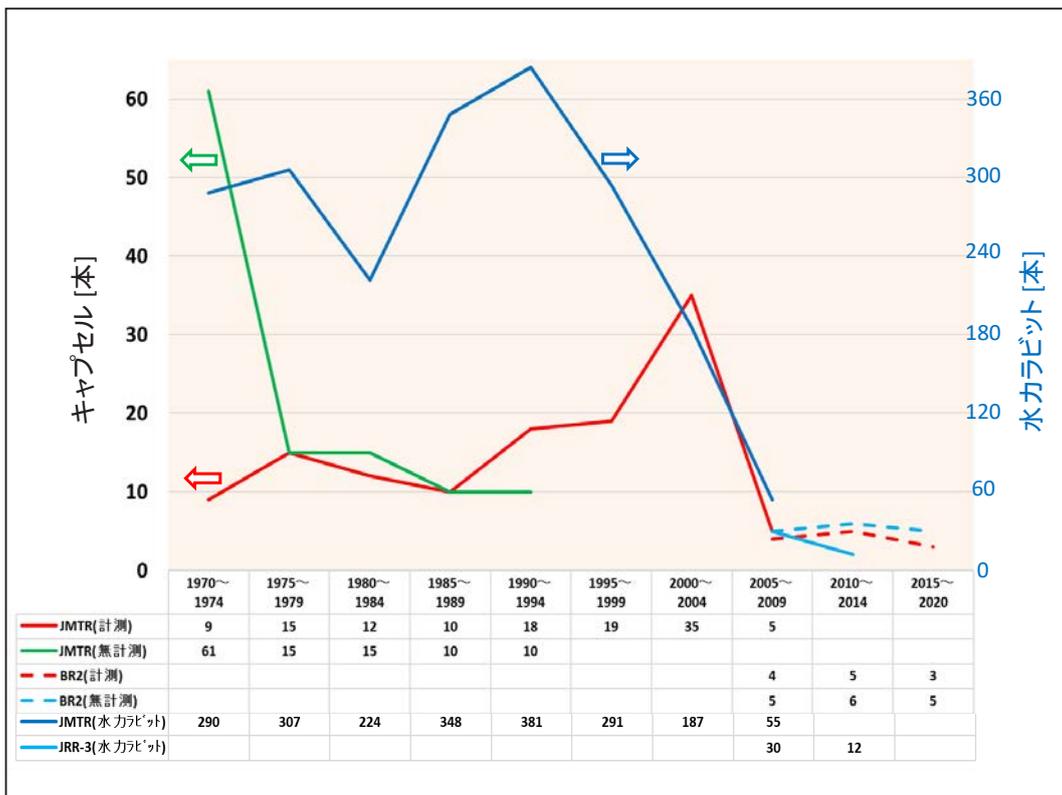
試料数量の調整 (例：2015年度)

利用者からの希望

Specimen ID	Experimenter	Material	Composition	Specimen size [mm]	Amount
1		F82H	Fe-8Cr-2W	1.52 x 4.9 6x 25.4	30
2		G01	C	5phi x 20.3t	10
3		BSR	SiC	2 x 6 x 50	8
4		Tensile	SiC	1.5 x 4 x 40	20
5		Bending	SiC	1 x 1 x 24	30
6		V alloys	V-4Cr-4Ti	3phi x 0.25t	200
7		V alloys	V-4Cr-4Ti	1.5 x 1.5 x 20	50
8		Fe alloys	Fe-1.4Mn	3phi x 0.1t	300
9		Fe alloys	Fe-1.4Mn	16 x 4 x 0.25	150
10		W	W	16 x 4 x 0.1	40
11		W	W	6phi x 0.5t	10
12		W-Re	W-5Re	6phi x 0.5t	30
13		W	W	3phi x 0.2t	6
14		W-Re	W-5Re	3phi x 0.2t	6
15		C	C	3 x 4 x 30	5
16		C	C	3 x 4 x 30	5
17		C	C	5 x 5 x 1.7t	8
18		Fe	Fe	3phi x 0.3t	10
19		Fe-1Cu	Fe-1Cu(wt.%)	3phi x 0.3t	10
20		Fe-3Cu	Fe-3Cu(wt.%)	3phi x 0.3t	10
21		Fe-5Cu	Fe-5Cu(wt.%)	3phi x 0.3t	10
22		Fe-8Cu	Fe-8Cu(wt.%)	3phi x 0.3t	10
23		Fe-10Cu	Fe-10Cu(wt.%)	3phi x 0.3t	10
24		9Cr-ODS	Fe-9Cr-2W	16 x 4 x 0.25t	20
25		12Cr-ODS	Fe-12Cr-2W	16 x 4 x 0.25t	20
26		15Cr-ODS	Fe-15Cr-2W	16 x 4 x 0.25t	20
27		F82H	Fe-8Cr-2W	16 x 4 x 0.25t	20
28		SUS430	Fe-16Cr	16 x 4 x 0.25t	20
29		Fe	Fe	16 x 4 x 0.25t	20
30		A533B	Fe-1.6Mn-0.8Ni-0.5Mo-0.1Cu-0.2Si-0.15C(wt.%)	16 x 4 x 0.5t	185
31		A533B	Fe-1.6Mn-0.8Ni-0.5Mo-0.1Cu-0.2Si-0.15C(wt.%)	16 x 4 x 0.5t	48
32		V alloys	V-4Cr-4Ti-0.1Y	3phi x 0.25t	20
33		V alloys	V-4Cr-4Ti-0.1Y	16 x 4 x 0.25t	20
34		B4C-AI203	B4C-7.7Al203(wt.%)	2 x 4 x 25	14
35		B4C-AI203	B4C-7.7Al203(wt.%)	6phi x 1.0t	8

調整後

Specimen ID	Experimenter	Material	Composition	Specimen size [mm]	Amount
1		F82H	Fe-8Cr-2W	1.52 x 4.9 6x 25.4	12
2		G01	C	5phi x 20.3t	3
3		BSR	SiC	2 x 6 x 50	3
4		Tensile	SiC	1.5 x 4 x 40	20
5		Bending	SiC	1 x 1 x 24	30
6		V alloys	V-4Cr-4Ti	3phi x 0.25t	22
7		V alloys	V-4Cr-4Ti	1.5 x 1.5 x 20	26
8		Fe alloys	Fe-1.4Mn	3phi x 0.1t	108
9		Fe alloys	Fe-1.4Mn	16 x 4 x 0.25	75
10		W	W	16 x 4 x 0.1	0
11		W	W	6phi x 0.5t	10
12		W-Re	W-5Re	6phi x 0.5t	10
13		W	W	3phi x 0.2t	6
14		W-Re	W-5Re	3phi x 0.2t	6
15		C	C	3 x 4 x 30	2
16		C	C	3 x 4 x 30	2
17		C	C	5 x 5 x 1.7t	3
18		Fe	Fe	3phi x 0.3t	10
19		Fe-1Cu	Fe-1Cu(wt.%)	3phi x 0.3t	10
20		Fe-3Cu	Fe-3Cu(wt.%)	3phi x 0.3t	10
21		Fe-5Cu	Fe-5Cu(wt.%)	3phi x 0.3t	0
22		Fe-8Cu	Fe-8Cu(wt.%)	3phi x 0.3t	0
23		Fe-10Cu	Fe-10Cu(wt.%)	3phi x 0.3t	0
24		9Cr-ODS	Fe-9Cr-2W	16 x 4 x 0.25t	5
25		12Cr-ODS	Fe-12Cr-2W	16 x 4 x 0.25t	5
26		15Cr-ODS	Fe-15Cr-2W	16 x 4 x 0.25t	5
27		F82H	Fe-8Cr-2W	16 x 4 x 0.25t	5
28		SUS430	Fe-16Cr	16 x 4 x 0.25t	5
29		Fe	Fe	16 x 4 x 0.25t	0
30		A533B	Fe-1.6Mn-0.8Ni-0.5Mo-0.1Cu-0.2Si-0.15C(wt.%)	16 x 4 x 0.5t	110
31		A533B	Fe-1.6Mn-0.8Ni-0.5Mo-0.1Cu-0.2Si-0.15C(wt.%)	16 x 4 x 0.5t	26
32		V alloys	V-4Cr-4Ti-0.1Y	3phi x 0.25t	20
33		V alloys	V-4Cr-4Ti-0.1Y	16 x 4 x 0.25t	20
34		B4C-AI203	B4C-7.7Al203(wt.%)	2 x 4 x 25	8
35		B4C-AI203	B4C-7.7Al203(wt.%)	6phi x 1.0t	4



## 材料照射学術研究の危機的状況

- JMTRの停止後、代替照射では賄いきれない研究が多数。申請しても十分に照射できていない現実 → **照射希望の1/4以下**
- 過去の照射試料、軽水炉の実機の試料の活用や、大洗センターにおける世界最先端の分析装置群を活用した研究に重点を置くことにより、何とかアクティビティを維持しているが、長期的には極めて困難。  
(注) 材料照射研究は、研究立案から試料作成、照射、輸送、放射能クーリング、照射後実験、成果発表まで、最低5年はかかる。
- JMTRは照射材料研究のシンボル。これが長年運転停止→廃炉となったことが、大学の研究部門・講座の消滅に大きく影響している。人材育成に大きなダメージ。
- 中性子照射をあきらめてイオン照射などで代替する研究が増えているが、やはり、中性子照射とは異なる。中性子照射なしで完結出来ない。

→ JMTR後継炉が出来るまで、国には海外炉による代替照射の支援をお願いしたい(文科省の作業部会の中間とりまとめに、短期的な支援が必要であることが明記されている)。

11

## 海外炉だけでは、世界を先導する 先端研究開発は不可能

照射キャプセル製作は試料の形状や温度制御など様々な条件にあわせてオーダーメイド製作。海外炉では希望しても出来ない照射も多い。

- 海外炉では温度や環境の制御などで不十分な点も多い。
- 日本で製作したキャプセルをBR-2で照射(極めて例外的!)  
→ 地元企業の高い技術力
- BR-2へ金研の教員が長期滞在して、キャプセルの共同開発(JMTRの多段多分割照射と同様の照射が可能に)。ただし、多大な手間と時間。

照射キャプセルの例(低温高フラックス照射用キャプセル)  
試料の形状、希望フラックス、希望温度などに合わせて専用キャプセルを設計・製作する。



コストの増大(輸送コスト、時間、手間)

世界的な研究炉の老朽化による稼働中の照射スペースの取り合い

12

## JMTR後継炉はJMTRと全く同じ炉形 (炉心構造)でよいのでは？

- 炉型は同じでも、耐震設計で強固な建物、キュービクル(ループ等の照射設備を設置する遮蔽した部屋)も広く使いやすくするなど、現在の照射ニーズに合わせて、先端の照射試験がしやすい構造にする。
- 中性子フラックス分布などJMTRで充分。これまでの照射装置の設計や照射データがそのまま生かせるのも大きなメリット。
- 200体以上ある未照射の燃料要素がそのまま利用可能(JMTRの1サイクル30日として、約20サイクル分(=6サイクル/年として約3年分)の燃料になる)。燃料費の節約だけでなく、無駄な転用・処分・リサイクル費等も必要なし。
- 現JMTR内の照射設備の一部を使って照射設備の運転訓練(人材育成に大きなメリット)及び整備ができる(中性子照射以外の多くの整備を現有設備を活用して行うことが出来る)。
- とにかく一刻も早く建設しないと人材がいなくなる。大幅な工期の短縮が必要。同じ炉形にすれば、炉心設計を全て省略できる、規制庁の安全審査は、すでにJMTRのときのものでそのまま生かせるなど、工期短縮が可能。

## 3-2 国際共同研究における海外炉を用いた材料照射研究の課題から

### 考える国内炉の必要性

京都大学 エネルギー理工学研究所 檜木 達也

#### 1. はじめに

材料は中性子照射により、寸法変化、物理特性、強度特性等に大きな影響を受ける。それに伴う腐食などの耐環境特性も大きく影響を受ける。先進炉や核融合炉等の特に照射量が大きい環境では、中性子照射の影響を考慮しない設計は成立しない。先進材料の開発には中性子照射試験は不可欠である。これまでに JMTR、JOYO が使用できなくなっても、米国における HFIR、MITR、ベルギーにおける BR2 による中性子照射試験を行ってきた。本講演では海外炉の利用を通して見える国内炉の必要性に関して述べる。

#### 2. 海外炉における中性子照射研究と課題

日米科学技術協力事業核融合分野においては、継続的に米国の HFIR を利用した共同研究を行っている。HFIR は広い温度範囲での照射が可能であり、鉄鋼材料で求められるような 300°C 程度や、セラミックスやタングステンで求められる 1000°C を超えるような温度においても照射が可能である。MITR や BR2 による照射は、米国や EU のプロジェクトへの材料提供という形で進め、軽水炉条件での照射を行っている。米国や EU のプロジェクトへの材料提供の場合、結果は得られるものの、計画への関与は限られ、日本に試料を送付しない限り、直接照射後試験に関わることは出来ない。日米科学技術協力事業では、共同で計画の立案を行っており照射条件等も共同で決定できる。照射後試験は基本的に米国での実施となるが、研究者が直接実施することができる。しかしながら、照射試験技術や照射後試験技術は米国に蓄積されることになる。照射後試験を直接行える場合もコストや距離を考えると非常に限られてしまう。

#### 3. おわりに

HFIR や BR2 においては、明らかに照射試験、照射後試験技術の向上が見られ、多くの若い世代の関与が見られ、照射研究の進展がみられる。日本は、この 10 年の間においても明らかに照射研究に関与する人材は減少し、日本のプレゼンスは低下している。実際に照射材料を取り扱ったことのある人材も減少しており、海外炉のみの中性子照射では、机上での材料挙動を理解することは可能かもしれないが、照射試験や照射後試験に直接関与し、実際の材料を理解する人材の育成は限られてしまう。軽水炉から先進炉、核融合炉に対応する幅広い温度域や環境で中性子照射を行うための国内の試験炉の導入を基軸とした照射研究に関する人材育成が必要である。

#### キーワード：

海外炉、材料の照射効果、国際共同研究、人材育成

# 国際共同研究における海外炉を用いた 材料照射研究の課題から考える 国内炉の必要性

京都大学 エネルギー理工学研究所  
檜木 達也

KYOTO UNIVERSITY

京都大学



## 講演内容

- 材料への中性子照射効果の例
- 海外炉を用いた中性子照射
- 国内炉と海外炉を使った研究の比較
- まとめ

KYOTO UNIVERSITY

京都大学

# 材料への中性子照射効果の例

KYOTO UNIVERSITY

京都大学

## Neutron Irradiation Effect on Low Crystalline and High Crystalline SiC Fiber Reinforced SiC Composites

25 × 4 × 2 mm  
C/Si=1.59

**Low Crystalline**  
Tyranno™ TE

25 × 4 × 2 mm  
C/Si=1.05

**High Crystalline**  
Hi-Nicalon™ type-S

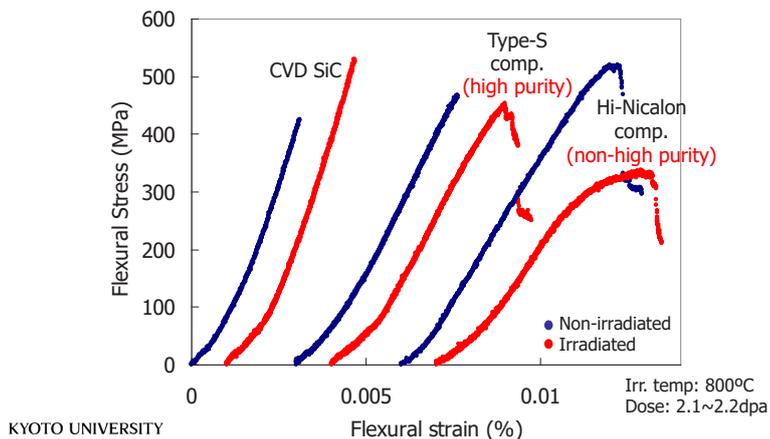
Excellent Stabilities in;  
Dimension,  
Strength

JMTR Irradiation: at (573K +) 773 K, - 1 dpa-SiC

KYOTO UNIVERSITY

京都大学

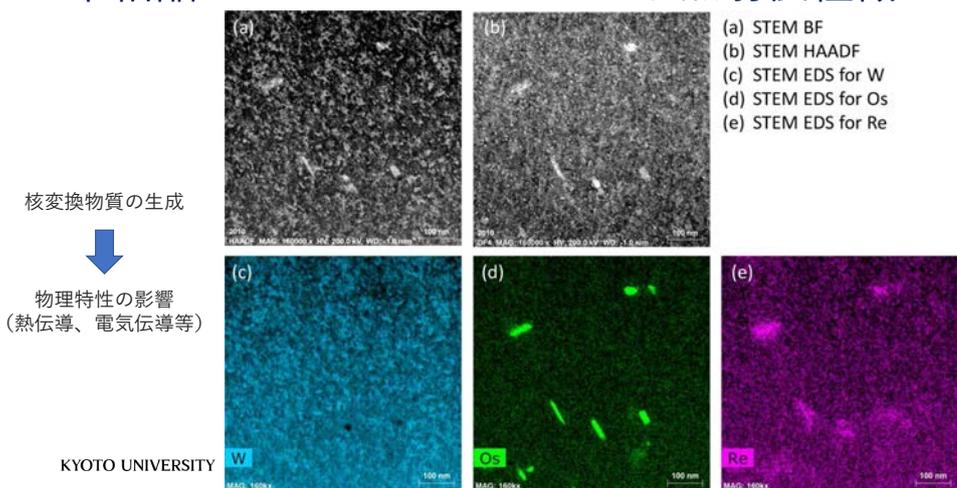
### 非照射と中性子照射後のCVD SiCとSiC複合材料の応力-ひずみ曲線



KYOTO UNIVERSITY

京都大学

### 単結晶タングステンのラビット照射後組織



KYOTO UNIVERSITY

京都大学

# 海外炉を用いた中性子照射

KYOTO UNIVERSITY

京都大学

8

日米科学技術協力事業 PHENIX計画の成果  
タスク2 材料挙動の理解 -特徴と照射効果-

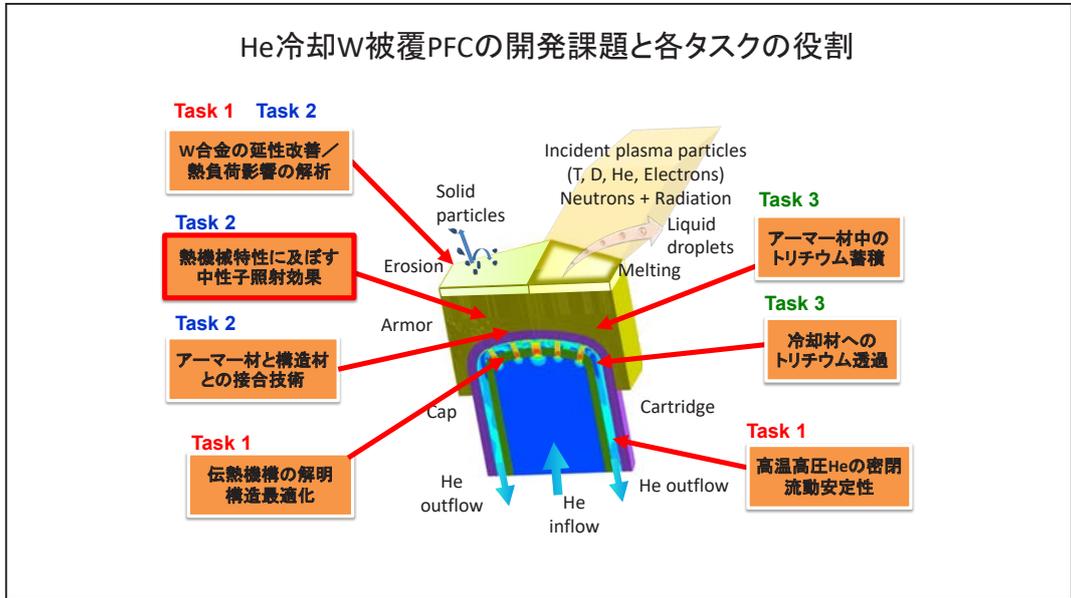
## 中性子照射タングステンの熱・機械的特性

\* 檜木 達也<sup>1</sup>, 長谷川 晃<sup>2</sup>, Y. Katoh<sup>3</sup>, L. Garrison<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>京都大学, <sup>2</sup>東北大学, <sup>3</sup>ORNL

PHENIX タスク2 メンバー

野上修平、福田誠、宮澤健、笠田竜太、近藤創介(東北大)、長坂琢也(NIFS)、藪内聖皓(京大)、秋吉優史(大阪府大)、Wilna Geringer, Charles Kessel, Xunxiang Hu, Takaaki Koyanagi, Phil Ferguson, Xiang Chen (ORNL)





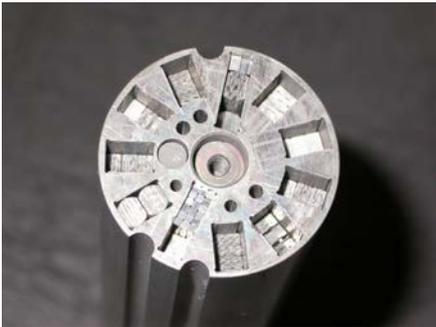
## RB\*照射の特徴

**RB\*カプセルの特徴**

- 照射スペース: 400 x 38 mm径程度
- 試験片の自由度が高い
- 比較的高コスト
- 照射する単位が大きいため多くの照射条件を振ることが不可能

**タングステン照射**

- 熱中性子遮蔽が必要！(特に高線量)
- 1mmの遮蔽をしても、全体としての体積は十分に確保できる
- 比較的大きい試験片(10mm径)も可能



高線量での核融合環境を模擬したタングステンの中性子照射効果を明らかにする



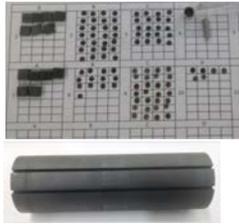
## RB\*照射の概要

**RB\*カプセルの特徴**

- 照射スペース: **400 x 38 mm**程度
- 試験片の自由度が高い
- 比較的高コスト
- 照射する単位が大きいため多くの照射条件を振ることが不可能

**タングステン照射**

- 熱中性子遮蔽が必要！(特に高線量)
- 1mmの遮蔽をしても、全体としての体積は十分に確保できる
- 比較的大きい試験片(10mm径)も可能






核融合環境を模擬したタングステンの中性子照射効果を明らかにする

## RB19J中性子照射の概要

Location: RB\*

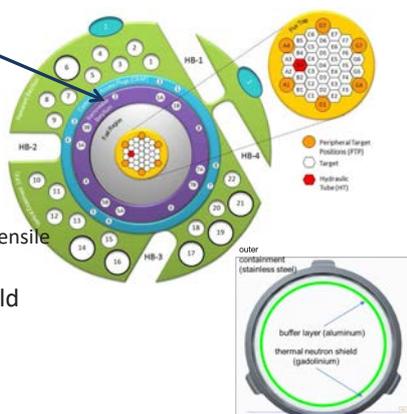
Dose:  
0.2~0.7 dpa, 4 cycles

Temperature regions

- 250-300°C (QST) – 142 specimens
- 500°C, 406 specimens
- 800°C, 389 specimens
- 1100°C, 359 specimens

Specimens types include TD discs, tensile bars, toughness, torsion, bend bars

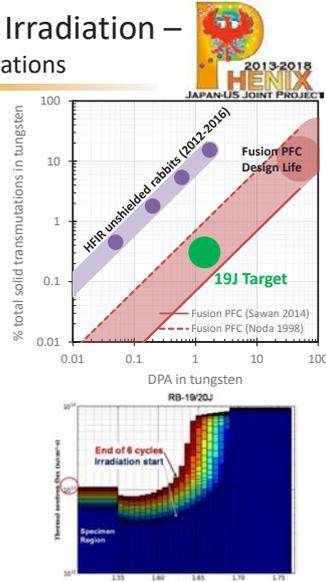
Gadolinium thermal neutron shield

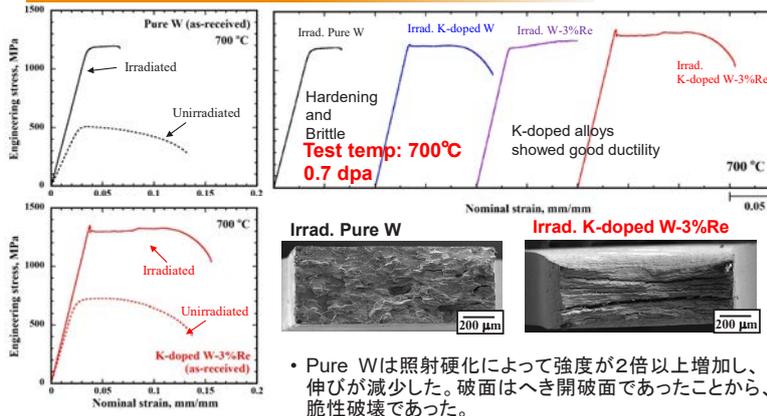
12

## HFIR RB-19J Fusion Materials Irradiation – Fast fluence vs. transmutation considerations

- Desired thermal flux suppression ratio for 19J is by 1.5 to 2 orders of magnitude
  - To achieve a fusion-relevant transmutation-to-dpa ratio
  - To enable sensible comparison with unshielded irradiations
- Neutronics calculation roughly estimates  $\sim < 0.1$  thermal flux suppression ratio
  - Significant uncertainty due to complex internal moderation was noted by J. McDuffee
  - Gradual effect of Gd burn-out is expected
- Maximum allowable % transmutations is a debatable question
  - $\sim 0.1\%$  is probably desirable (Sawan calculation is considered more accurate and relevant)
  - Likely consensus is  $> \sim 1\%$  will severely spoils value of experiment
- Transmutation rate profile is an additional important factor
  - Rapid increase is definitely unacceptable
  - Uncertainty in transmutation rate history degrades value of experiment significantly



## 800°C/0.7dpa照射材の700°C引張試験



- Pure Wは照射硬化によって強度が2倍以上増加し、伸びが減少した。破面はへき開破面であったことから脆性破壊であった。
- K-doped W-3%Reは照射硬化によって強度が2倍程度増加したが、伸びはほとんど変化がなかった。破面にはデンプルを有したことから延性破壊であった。500°C照射材と同様に層間剥離が発生していた。

## プラズマ対向材料/構造材料界面の 反応ダイナミクスと照射効果

京都大学 檜木達也

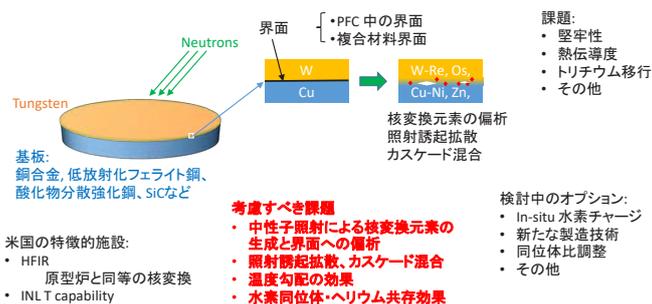
FRONTIER Task 1関係者:

橋本直幸(北大)、谷川博康(QST)、長谷川晃、野上修平、  
宮澤健、笠田竜太、近藤創介(東北大)、長坂琢也、時谷  
政行(NIFS)、藪内聖皓(京大)、秋吉優史(大阪府大)

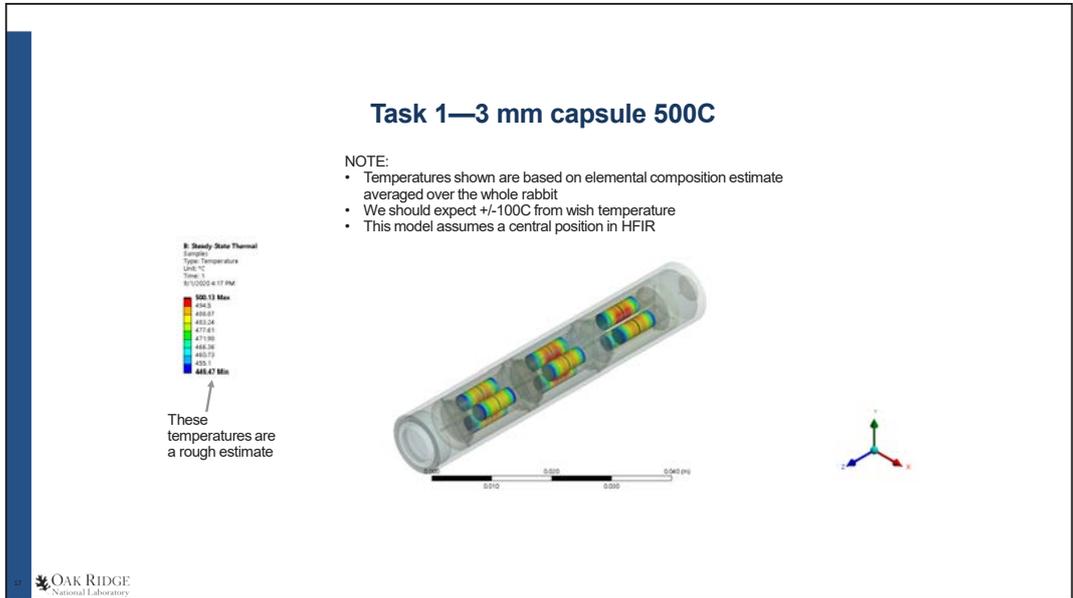
Lauren Garrison, Wilna Geringer, Charles Kessel, Xunxiang  
Hu, Takaaki Koyanagi, Phil Ferguson, Yutai Katoh (ORNL)

15

### タスク 1 - 研究の背景と目的プラズマ対向材料/構造材料界面の照射効果の概念



16



## 日米科学技術協力事業を通じたHFIR照射

- 軽水炉温度域から1000°Cを超える先進炉や核融合炉の温度での照射が可能
- 日米でコストを折半
- 共同の計画立案で照射条件も共同で決定
- 得られた結果は共有
- 照射後試験は研究者が直接可能だが、基本的には米国で実施
- 照射後試料を部分的に日本へ送付
- 照射試験技術、照射後試験技術は米国に蓄積

KYOTO UNIVERSITY



## H2020 IL TROVATORE

(Innovative Cladding Materials for Advanced Accident-Tolerant Energy Systems) –  
A Brief Overview

**Dr. Konstantina Lambrinou**  
SCK•CEN, Belgium







© 2017 SCK•CEN


ATF Clad Irradiation @BR2

- Material down-selection based on a *set of critical screening tests*:
  - Resistance to aqueous corrosion (330° C, 30 days, water)
  - Resistance to high-temperature steam oxidation (1200° C, 1 h, steam)
  - Hermeticity of sealed tubes
  - Acceptable radiation tolerance (no decomposition or severe swelling)
- Targeted irradiation conditions: 330° C, max 7 dpa, PWR-like water
- MISTRAL-N rig – loaded in central cavity (Ø 34 mm) of 5-plate (Vn) FE

**MISTRAL rig design**

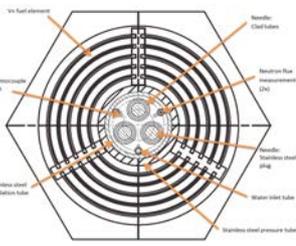


Length: 480 mm

- Rig design: 3 needles
- Tubes of variable diameter/length
- Max outer tube Ø: 10.5 mm
- 0.5 dpa/cycle of 21 days (Fe)

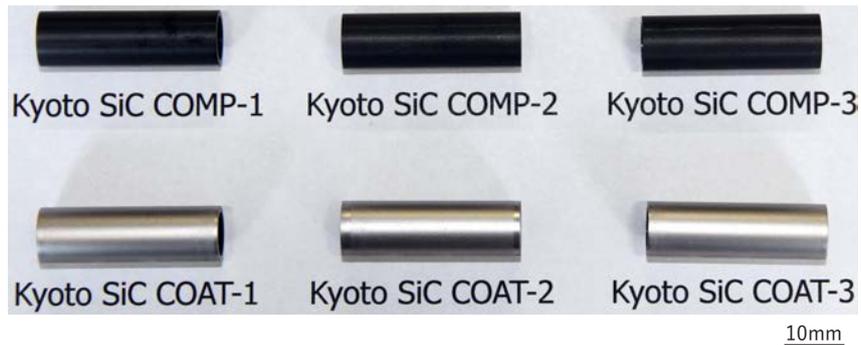


**MISTRAL-N rig design**



**WP7**
20

## IL TROVATOREで中性子照射を行う京大で開発したSiC複合材料の管材



KYOTO UNIVERSITY

京都大学

## EUのプロジェクトでのBR2照射

- 軽水炉温度域での照射
- EUのコストで照射
- 助言は可能だが計画立案も照射条件もEUで決定
- 得られた結果は共有
- 照射後試験は研究者が直接できず、基本的にはEUで実施
- 照射後試料を部分的に日本へ送付を希望
- 照射試験技術、照射後試験技術はEUに蓄積

KYOTO UNIVERSITY

京都大学

## 国内炉と海外炉を使った研究の比較

	国内炉	海外炉
提案	自由に提案	共同研究が必要
照射条件	自由に提案	共同研究先と相談
照射試験技術	国内で開発	炉を持つ機関で開発 炉を持つ機関に技術提供
照射後試験	国内実施	主に炉を持つ機関で実施
照射後試験技術	国内実施	主に炉を持つ機関で開発 炉を持つ機関に技術提供
材料の照射データ	国内保有	共同研究先と共有
人材育成	照射試験、照射後試験、実際の材料を理解する人材の育成	机上で材料挙動を理解する人材の育成

KYOTO UNIVERSITY

京都大学

## 海外炉利用のまとめと国内炉の必要性

- 海外の共同研究先が興味を持つ材料であれば、海外炉を用いた中性子照射は可能で比較的多くの試料を照射できる。
- 研究計画や照射条件の立案はコスト負担などに依存し制約は大きい。
- 照射、冷却に長期間を要する研究はできない。
- 照射後試験は、基本的に相手先での実施となり関与に制約がある。
- 照射技術、照射後試験技術は過去10年間でも大きく進展しているが、海外に蓄積されている。
- 照射試験、照射後試験、実際の材料を理解する人材が著しく減少している。
- 軽水炉から先進炉、核融合炉までの温度域を照射可能でより多くの人材が利用できるJMTRのような研究炉が早急に必要である。

KYOTO UNIVERSITY

京都大学

This is a blank page.

### 3-3 国内における照射材料研究の現況と方向性

北海道大学工学研究院 橋本 直幸

#### 1. 緒言

耐照射特性に優れた材料の開発が最重要課題の一つであるとの認識を共有し、これまで模擬照射試験結果から類推した材料照射データの評価・整備が進められてきたが、実際の核融合炉環境が存在しない現状では、核融合条件の照射損傷及び照射脆化に関する情報を模擬照射試験結果から類推せざるを得ない。本講演では、種々の核融合炉用材料のうち、第一壁・ブランケット構造材料及びダイバータ材料に焦点を絞り、国内の大学等で進めている低放射化フェライト鋼、タングステン、及び SiC/SiC 複合材料の研究開発の現状と展望をまとめた。

#### 2. 低放射化フェライト鋼の研究開発（北大，東北大，東大，京大，九大，他）

低放射化フェライト鋼とは、Mod9Cr 耐熱鋼をベースに、核変換で短寿命の放射性核種となる元素に置き換えたフェライト鋼で、特に F82H (Fe-8Cr-2W-0.2 V-0.04 Ta-0.1 C) 鋼を中心に製造実績や耐照射性に関するデータベースの拡充が進んでいる。物理特性は本質的に Fe のそれに準じ、熱伝導率は銅合金の 1/10 程度しかないため、定常熱負荷が厳しい部位（ダイバータ等）では肉厚 1mm 以下の円管しか成立せず、耐蝕性が極めて大きな問題となる。

#### 3. タングステン材料の研究開発（北大，東北大，京大，静岡大，富山大，近大，他）

金属元素中最高の融点を有するタングステン(W)は高密度で重く加工性が乏しいため、圧力境界の構造体以外で高熱伝導性が望まれる部位に利用する。粉末焼結と熱間圧延で製造された W は工業用厚板材と同レベルの性能を有するが、さらなる健全性の担保には再結晶温度、DBTT 及び高温強度の上昇が必要である。

#### 4. SiC/SiC 複合材料の研究開発（北大，室工大，京大，他）

SiC/SiC 複合材料は、セラミックス繊維で複合材内部を強化することで軽量性、高硬度及び高温安定性などの性能と擬延性を有する。この材料の利点は、低誘導放射能・低崩壊熱特性による放射性廃棄物の低減である。また、核融合のみならず軽水炉の事故耐性燃料、航空機のロケットエンジン部材など、幅広い産業での実用化も視野に入り、核融合炉材料研究で蓄積する多くの共通基盤技術の波及効果が期待される。

#### 5. 大学における照射材料研究開発

大学における炉材料照射研究には、常時利用可能な核分裂中性子照射場は勿論、機械的特性試験からナノスケールの微細組織解析が一貫して行うことが可能な、東北大金研附属量子エネルギー材料科学国際研究センターのような共同利用施設が必要不可欠である。

#### キーワード：

低放射化、フェライト/マルテンサイト鋼、タングステン合金、SiC/SiC 複合材料

2020年12月22・23日  
「新たな照射炉の建設に向けたワークショップ」



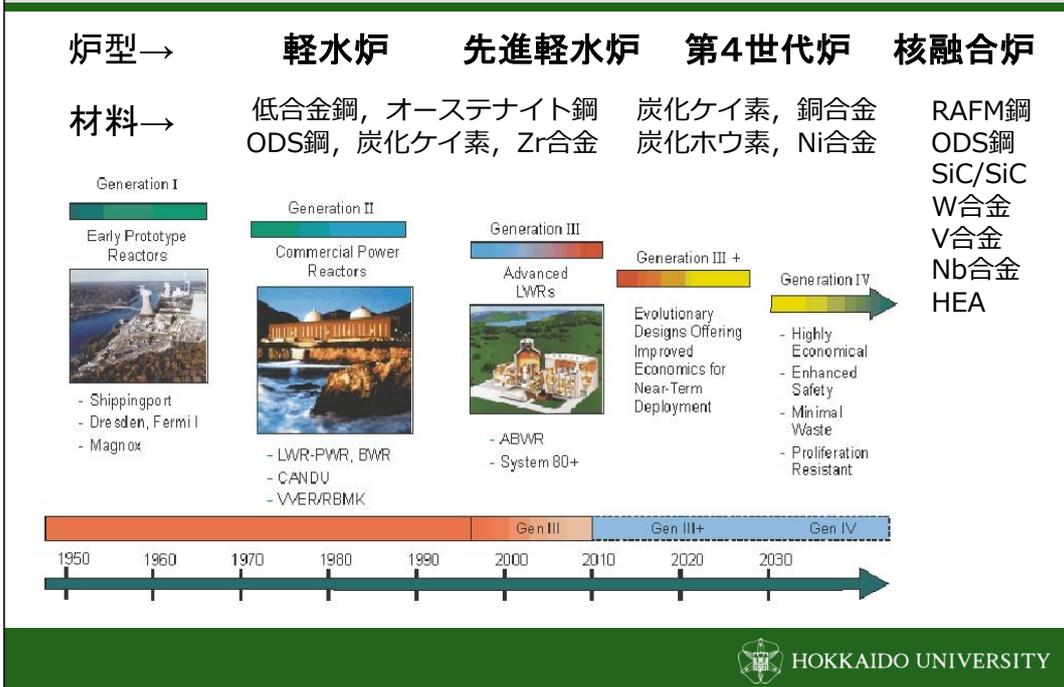
## 国内における照射材料研究の 現況と方向性

北海道大学大学院工学研究院  
橋本 直幸

資料提供: QST, 北大, 東北大, 京大

### 原子炉及び炉構造材料開発の変遷

1



## 既存合金あるいは将来の構造材料候補 (2000年時点)

2

### オーステナイトステンレス鋼

- 熱的クリープに温度限界が存在
- 耐スエリング性が低い  
(合金元素の添加や熱処理が必要)

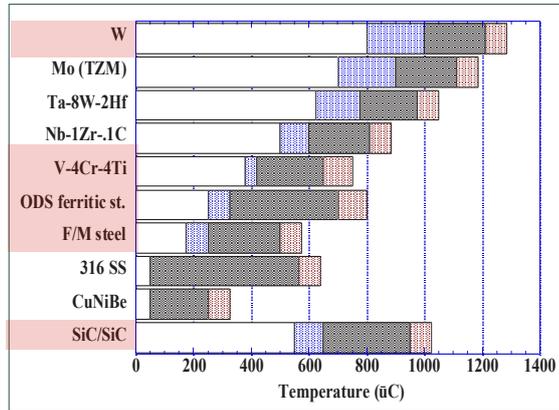
### フェライト・マルテンサイト鋼

- 高損傷量で耐スエリング性が高い
- 低温における照射硬化
- 熱的クリープに温度限界が存在

### 高融点合金

- 耐スエリング性が高い
- 加工・溶接性に難点
- 低温における照射硬化
- 耐酸化性が低い

### 利用可能と考えられる稼働温度領域



S.J. Zinkle and N.M. Ghoniem (2000)



HOKKAIDO UNIVERSITY

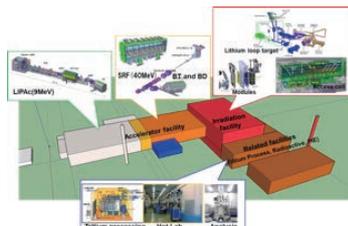
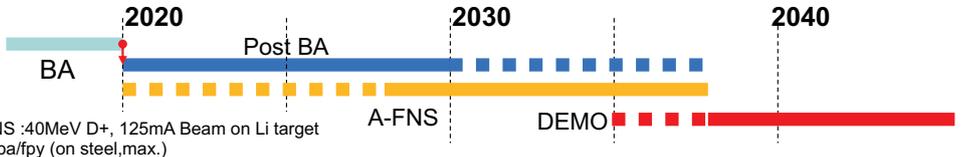
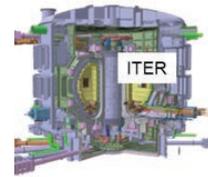
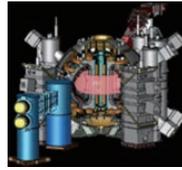
## 核融合DEMO炉建設へのスケジュール

3

IFMIF/EVIDA LIPAc 9MeV D+, 125mA

Satellite Tokamak JT60-SA

Fusion Power =0.5GW ~1dpa / full life



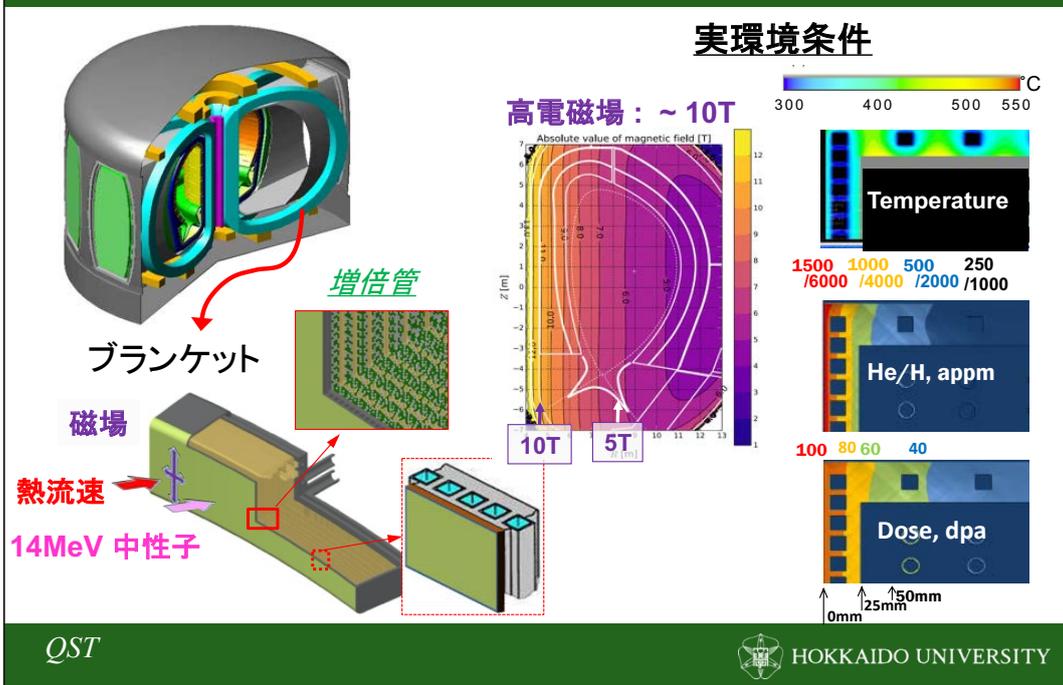
QST



HOKKAIDO UNIVERSITY

低放射化フェライト鋼の研究開発(北大, 東北大, 東大, 京大, 九大, 他)

4

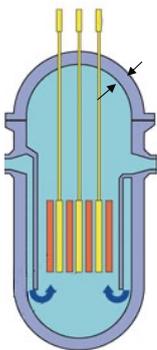


低放射化フェライト鋼 ~ 原子炉圧力容器と核融合炉ブランケット

5

原子炉圧力容器

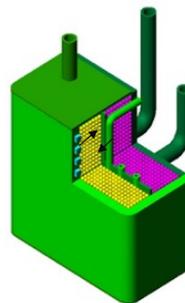
t170~250mm



- 壁厚が厚い
- 溶接部位が少ない
- 均一照射
- 低照射量
- 低エネルギー中性子照射
- ON/OFFあるいは過圧による熱負荷

核融合炉ブランケット

t15~25mm



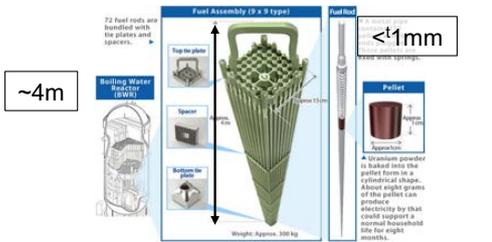
- 壁厚が薄い
- 溶接部位が多い
- 照射条件の勾配が大きい
- 高照射量
- 高エネルギー中性子照射
- LOCAによる過圧
- 短時間での現象: t < 30ms

QST

HOKKAIDO UNIVERSITY

低放射化フェライト鋼 ~ 原子炉燃料被覆管と核融合炉ブランケット 6

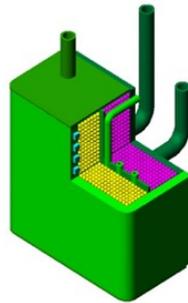
原子炉燃料被覆管



- 燃料クラッドが薄管で溶接部がない
- 照射が厚さ方向に均一
- ON/OFFによる熱負荷
- 燃料変形による変形
- 燃料生成物による圧力
- 長時間スケール

核融合炉ブランケット

t15~25mm



- 壁厚が薄い
- 溶接部位が多い
- 照射条件の勾配が大きい
- 高照射量
- 高エネルギー中性子照射
- LOCAによる過圧
- 短時間での現象: t < 30ms

QST



HOKKAIDO UNIVERSITY

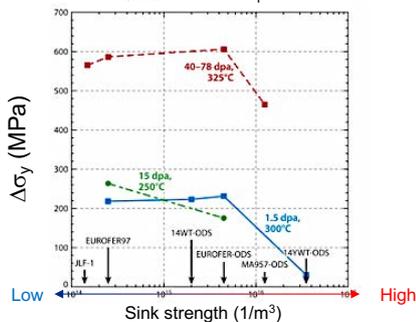
低放射化フェライト鋼 ~ DEMO炉ブランケット材料開発 7

理想的な材料特性

- 特性変化が最小
- 構造体の14 MeV中性子照射下安定性

高シंक強度材料の開発

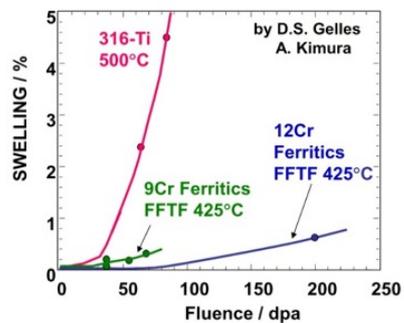
- 酸化物分散強化鋼
- ナノフェライト合金
- 複合材料(SiC<sub>f</sub>/SiC)



候補材料

時効マルテンサイト鋼(F82H)  
Mod9Cr (Fe 9Cr-1Mo V, Nb)

- ✓ 低放射化
- ✓ 良好な耐スウェリング性
- ✓ 製造および溶接に対する技術的成熟



QST

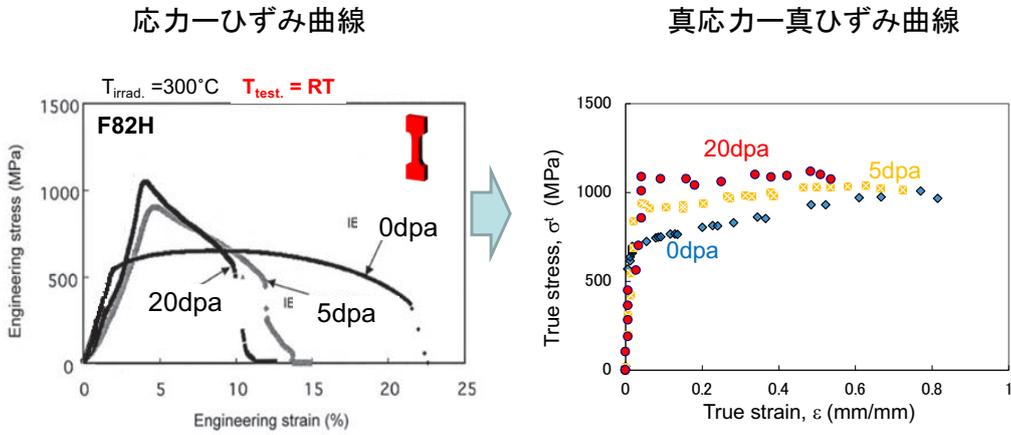
S.J. Zinkle, Annu. Rev. Mater. Res. 44 (2014) 241-267



HOKKAIDO UNIVERSITY

低放射化フェライト鋼 ~ 照射効果 (延性低下)

8

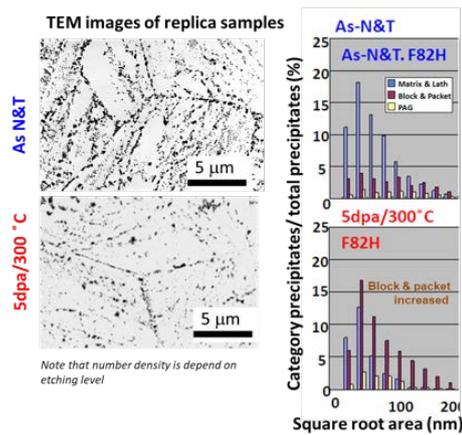


QST

HOKKAIDO UNIVERSITY

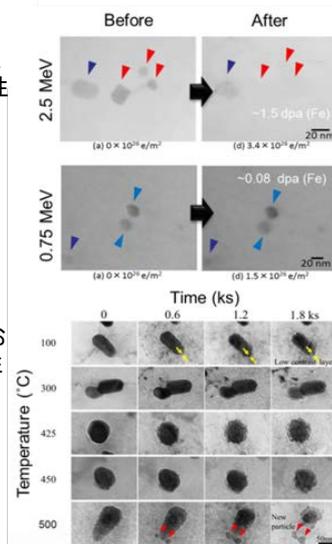
低放射化フェライト鋼 ~ 析出物の照射下安定性評価

9



電子線照射下におけるMX安定性

電子線照射下におけるM<sub>23</sub>C<sub>6</sub>安定性



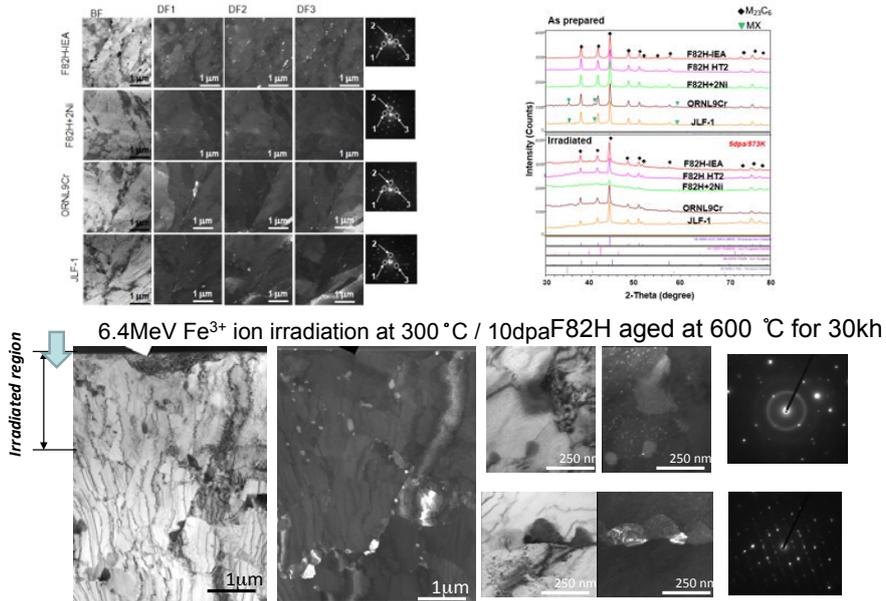
H. Tanigawa et al., J. Nucl. Mater. 367-370 (2007) 42-47

QST

HOKKAIDO UNIVERSITY

低放射化フェライト鋼 ~ 照射による $M_{23}C_6$ ,  $Fe_3W$ の非晶質化

10



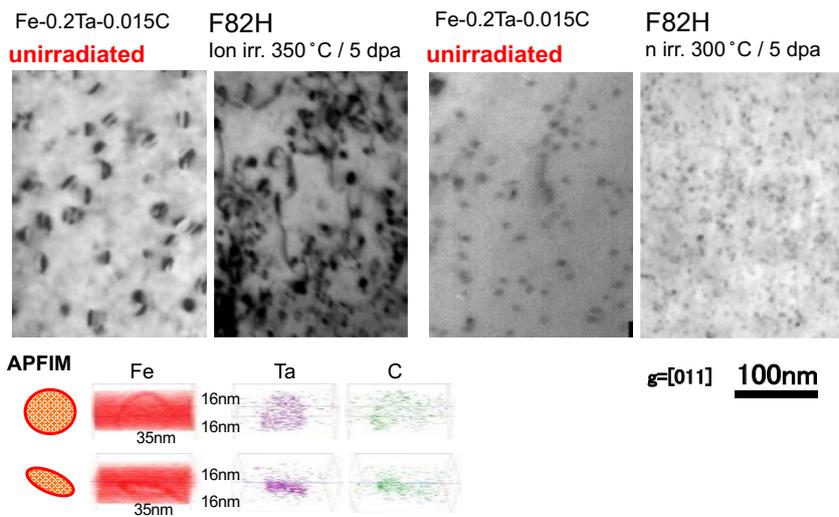
6.4MeV  $Fe^{3+}$  ion irradiation at 300 °C / 10dpa F82H aged at 600 °C for 30kh

QST

HOKKAIDO UNIVERSITY

低放射化フェライト鋼 ~ 照射誘起転位ループの観察

11



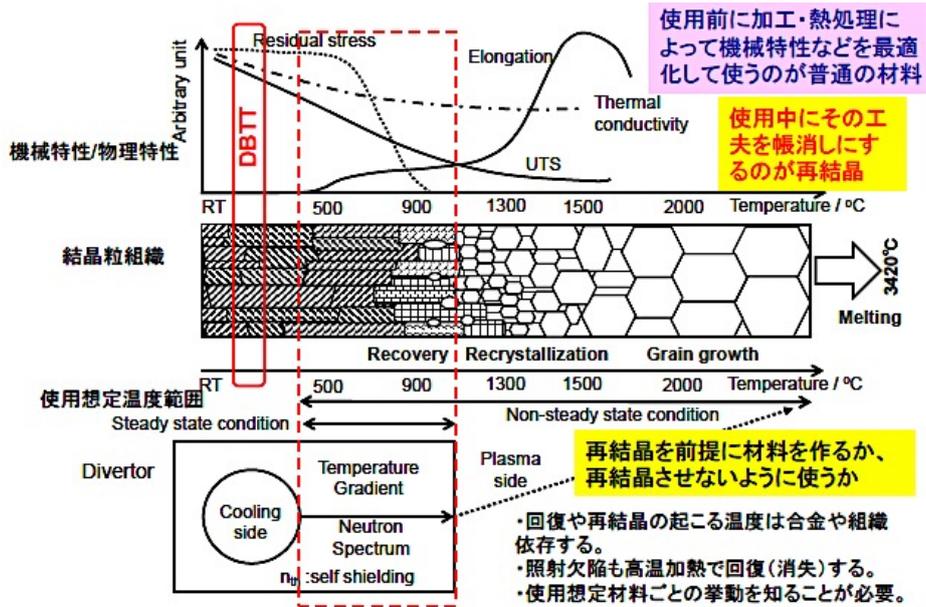
QST

HOKKAIDO UNIVERSITY

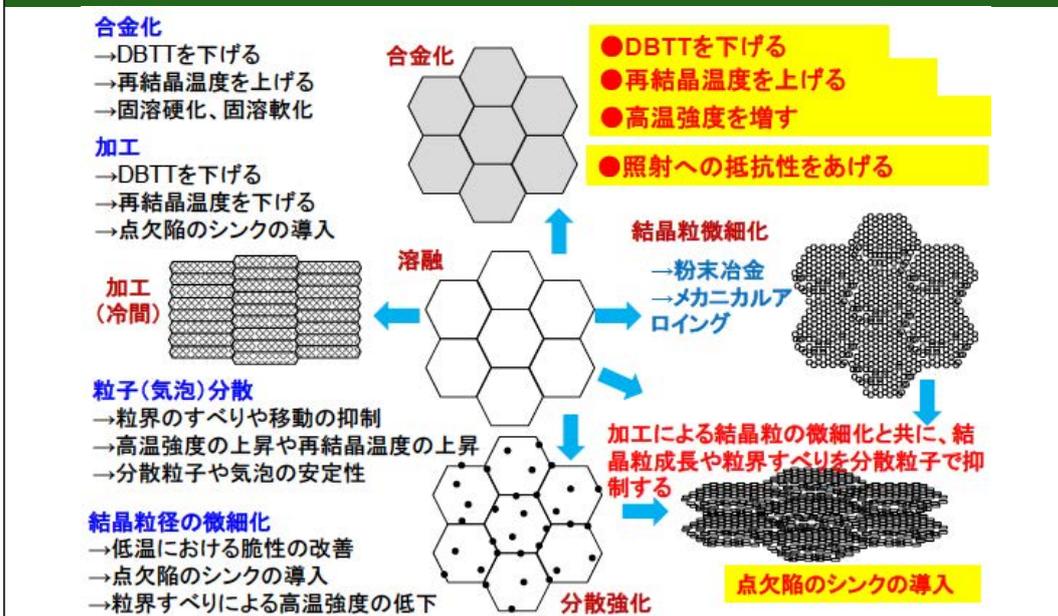
**W材料の研究開発(北大、東北大、京大、静岡大、富山大、近大、他)** 12

- 高融点 3420°C
  - ・溶融製造:アーク溶解や電子ビーム溶解 ⇒ 高コスト(溶融エネルギーコスト)  
As-Castでは粗粒のため室温以上でも粒界割れ
  - ・非溶融での製造: 粉末冶金⇒粉末焼結、高温加工  
⇒高密度化⇒結晶粒微細化  
気相法(CVD)⇒高コスト、柱状晶、薄膜向き
- 高融点(3420°C)の割に再結晶温度が低い: 1100~1200°C(加工度などに依存)  
モリブデン(融点 2623°C、再結晶温度: ~1000°C以上)  
ステンレス(融点:~1500°C)、再結晶温度(1000°C近辺)
- 粒界の結合強度が弱く(?), 粒界破壊しやすい。  
特に数百°C以下で、粗粒ではわずかなひずみで粒界破壊を起こす。 低温脆化  
延性脆性遷移温度(DBTT)が室温以上(200~500°C)
- 高い密度: 19.25g/cm<sup>3</sup> 鉄の約2.5倍
- 侵入型不純物元素(C、N、O)の機械特性への影響が大きい。  
N,Oは特に粒界脆化?

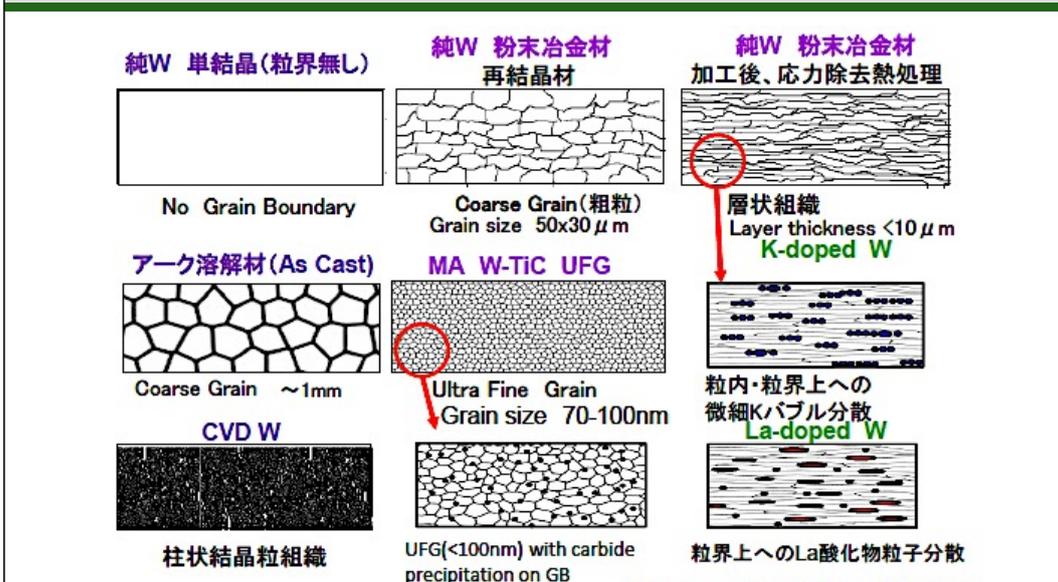
**タングステン ~ ダイバータ環境と特性変化** 13



タングステン ~ 微細組織制御による機械的特性の改善 1



タングステン ~ 微細組織制御による機械的特性の改善 2



**タングステン ~ 核融合炉環境下における課題** 16

- 1)高照射領域までの組織変化の解明  
(はじき出し損傷と核変換の影響)
- 2)組織制御でどこまで脆化を抑制できるか？
- 3)核変換による硬化/脆化の促進はどの程度か？
- 4)核変換による熱伝導特性の劣化はどの程度か？
- 5)原子炉照射でどこまでこれらの情報が得られるのか？  
PHENIX計画以後の照射データ取得
- 6)耐照射性材料の開発は？  
組織制御、合金化、複合化 どれが有効か？

Tohoku University

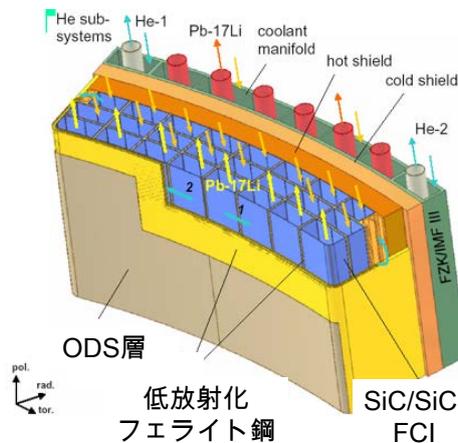


**SiC/SiC複合材料の研究開発(北大, 室工大, 京大, 他)** 17

構造材料として工業的に信頼性の高い鉄鋼材料を用いながらも、その内側に高温で使用可能なSiCのインサート材を入れることにより、鉄鋼材料の使用可能温度を超えるような温度域での液体金属を用いることができる。

**必要な材料特性**

- 低電気伝導度
- 低熱伝導度
- 低トリチウム透過性
- 緻密性
- 高温液体金属に対する耐腐食性
- 耐照射特性
- 加工技術や接合技術



Kyoto University



SiC/SiC ~ プラズマ対向材への適用 18

- 耐熱性
- 耐摩耗性
- 低放射化
- 低熱膨張率
- 高熱伝導率
- 化学的安定性

⇒ 核融合炉構造材料の有力な候補  
ダイバータへの適用...

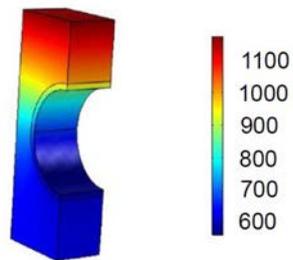
高熱負荷による表面損耗が著しいため、  
スパッタ損耗の小さい高Z材による被覆が必要

**タングステン**

- ✓ 熱膨張係数がSiCと極めて近い
- ✓ 高融点金属(優れた耐高熱負荷)
- ✓ スパッタリング損耗が小さい

➤ プラズマ対向材としてのSiC/SiC複合材への被覆材

Temperature (degC)



Y. Huang et al. FED (2017)

	CTE (@RT, 10 <sup>-6</sup> /°C)	融点 (°C)
SiC	4.7	2797
W	4.6	3440
Mo	5.4	2610

SiC/SiC ~ 核融合炉への応用 19

Flow channel insert

- 現状：既存技術で対応可能（実証のR&Dは必要）
- 開発課題：基本特性制御、液体金属との共存性、接合
- 確認課題：熱伝導、電気伝導
- 2030年までの技術的見通し：十分可能

ダイバータ

- 現状：タングステンとの接合は比較的容易
- 開発課題：製造技術、熱伝導、接合、コストダウン
- 確認課題：タングステン被覆材の特性、高熱負荷時の特性
- 2030年までの技術的見通し：可能

ブランケット構造材料

- 現状：ラボスケール材の特性は十分
- 開発課題：製造技術、接合、コストダウン
- 確認課題：実用大型材の基本特性
- 2030年までの技術的見通し：困難だが可能

**SiC/SiC ~ 研究開発の現状と課題**

20

**材料の基本特性**

- 低放射化特性、耐照射特性は非常に優れている。
- 高温強度特性も非常に良い。(基本的に高温の方が強度が高い)
- 熱伝導、電気伝導は照射や高温などの環境に影響を受ける。

**デザイン**

- 評価規格、データベースの充実が必要であるが、軽水炉の事故耐性燃料への適用するために大きく進展している。
- 設計規格、材料規格が必要であるが、軽水炉の事故耐性燃料への適用するために大きく進展している。

**実用形状物製作性**

- サイズ効果は比較的小さい。
- 航空機エンジンで実用化が始まっており、製作技術は適用できる。
- 必要サイズのお釜が必要。

**コストダウン**

- 炭素繊維のコストダウンの歴史の踏襲を目指す。
- 核融合だけではどうにもならない。他の原子力システム、民生利用を進める必要があるが、航空機エンジンでの実用化は始まっており、コストダウンも始まっている。
- 低コストプロセスの開発と歩留まりの向上が必要。

*Kyoto University*

HOKKAIDO UNIVERSITY

### 3-4 核融合炉材料分野に想定される利用ニーズ

東北大学金属材料研究所 笠田 竜太

#### 1. 核融合原型炉開発ロードマップおよびアクションプラン

わが国の核融合炉開発は現在 ITER 計画を主軸とする第 3 段階にあるが、その後を見据えたロードマップについては、「原型炉研究開発ロードマップについて（一次まとめ）」として、2018 年 7 月 24 日に文部科学省科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 核融合科学技術委員会にてまとめられた[1]。これは、2017 年 12 月に同委員会において策定されたアクションプラン[2]に基づいている。アクションプランは、核融合炉実現に向けて必要な核融合原型炉設計活動を中心として多岐にわたる要素技術開発項目から、社会受容性向上のための方策まで広く必要事項を網羅している。この中の項目として、「核融合炉材料と規格・基準」が挙げられており、原子炉照射の必要性が示されている。

#### 2. 照射炉への期待

核融合炉の第一壁材料は、重水素と三重水素の核融合炉反応によって生じる 14MeV という高エネルギーの中性子によって、核分裂炉構造材料をはるかに超える照射損傷を被ることになる。これまでに、ブランケット構造材料として開発が進められている低放射化フェライト鋼の照射データベースは、初期の低損傷領域については JMTR を用いて進められたが、重照射領域については米国の FFTF や HFIR が中心的に用いられてきた。一方で、アクションプランにも示されているように、溶接部や被覆部のデータベースは殆どなく、新たな照射ニーズが存在している。また、原型炉計画後半に想定されている先進ブランケットに用いられることが期待される先進材料（酸化物分散強化鋼、バナジウム合金、セラミックス材料等）についても照射データの拡充が必要である。更に、ダイバータと呼ばれる高熱流束機器に用いられるタングステン合金や銅合金の照射データも必要となっている。構造材料だけではなく、ブランケットにおける燃料増殖材となるリチウム材料や中性子増倍材であるベリリウム合金のような核的材料、プラズマ計測制御に必要な機能材料の照射データも必要となる。

以上のように、核融合炉材料開発にとっても照射炉の重要性は公的に示されており、わが国独自のニュークリアエネルギー技術とするためには、わが国独自の照射炉が必須であると言える。当日は、照射炉に要求するスペックについて議論を深めたい。

#### 参考資料

[1] [https://www.mext.go.jp/component/b\\_menu/shingi/toushin/\\_icsFiles/afieldfile/2018/11/08/1408259\\_1.pdf](https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2018/11/08/1408259_1.pdf)

[2] [https://www.mext.go.jp/component/b\\_menu/shingi/toushin/\\_icsFiles/afieldfile/2019/01/24/1412802\\_1.pdf](https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2019/01/24/1412802_1.pdf)

#### キーワード：

核融合炉、核融合炉材料

新たな照射試験炉の建設に向けたワークショップ  
丸の内オアゾ & WEB  
10月23日(水)10:30-



【第3部】科学技術・学術研究における照射ニーズ

# 核融合炉材料分野に 想定される利用ニーズ

笠田 竜太<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東北大学金属材料研究所



## JMTRと照射材料研究と私



●所属

1996	1998	2001	2011	2017	
山口研 (学部)	松井研 (修士)	木村研 (博士)	木村研 (助手・助教)	小西研 (准教授)	笠田研 (教授)
東北大金研		京大エネ理工研			東北大金研

●照射場の利用

●照射材料研究

- ★低放射化フェライト鋼の照射硬化・脆化機構の解明 (JMTR、ATR、HFIR)
- ★酸化物分散強化鋼の耐照射性発現機構の解明 (JOYO、HFIR、DuET)
- ★RPV鋼モデルFe-Mn二元合金における照射硬化促進現象の発見 (JMTR、DuET)
- ★ナノインデンテーション解析法の開発 (DuET)
- ★ODS-Cuの耐照射性 (BR-2、DuET)
- ★USTT (BR-2、DuET)

核融合炉用、先進原子力システム用の耐照射性材料の開発と、これらの強度特性に及ぼす照射影響に関する研究や評価技術開発を進めている

## 背景と私の主張



### ●背景：核融合原型炉ロードマップとアクションプラン

- 核融合炉材料開発にとっての中性子照射場の必要性
  - ・特に、未だ学術ベースの先進材料の照射研究にとって

### ●主張：繋ぎとしての海外炉利用の重要性

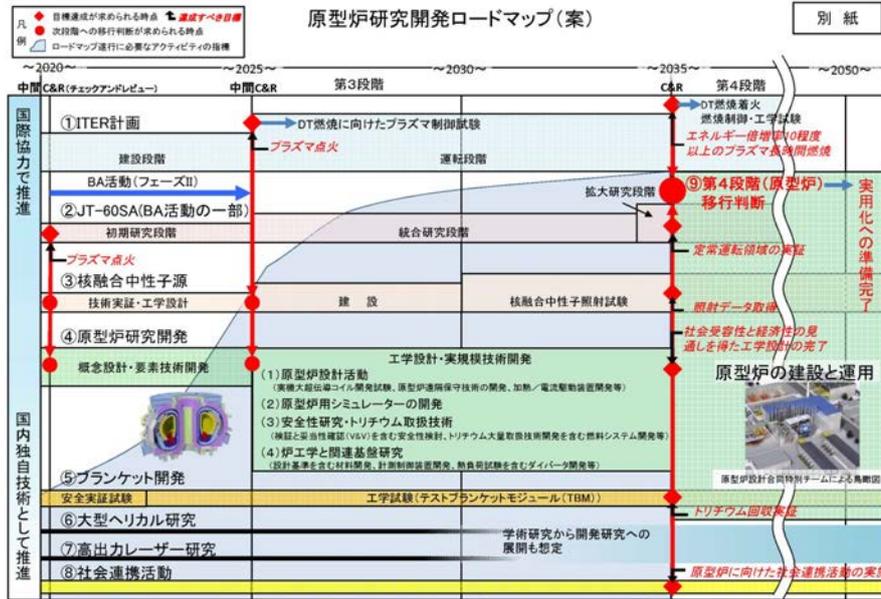
- ただし、国内に材料試験炉の計画がシッカリとあることが、海外炉利用時においても重要
- 照射後試験技術の高度化も重要

## 背景



核融合原型炉ロードマップとアクションプランより抽出した  
核融合炉材料開発課題

# 2018年7月 文部科学省 核融合科学技術委員会 わが国の核融合炉開発ロードマップ



# 2017年12月 文部科学省 核融合科学技術委員会 アクションプラン構成表

第1回中間C&R、第2回中間C&R、2035頃の移行判断に合わせて期間を設定



凡例	概念設計の基本設計	概念設計	工学設計
	2015	2020頃	2025頃
合同特別チームの活動フェーズ	研究計画1	研究計画2	研究計画3
黒: 開始事項 赤: 完了事項	2015	2020頃	2025頃
# 課題名	研究計画1	研究計画2	研究計画3
小課題名1	アクションを、開始、実施機関記号、アクション名、終了年の順に記載: (15)特/Q/N:アクション1(25) 黒: 開始事項 赤: 完了事項	----->(15)特/Q/N:アクション (25)	..... →(*) (*)は2037年以後も継続の意味
小課題名2	同区分期間に開始と終了の場合の記載例: (15)Q/N/特:アクション2 →(19)	注: 完了時期の(19)とは、2020年に予定される第1回中間C&Rの前までを意味する。	.....
責任をもって実施することが期待される機関・組織の記号	直接の実施でなく全体調整等を行う機関は、TFや特のように、緑字で、位置は実施期待機関		
国: 政府 特: 原型炉設計合同特別チーム Q: 量子科学技術研究開発機構(核融合) N: 核融合科学研究所 大: 大学 産: 産業界 F: 核融合エネルギーフォーラム	C1~C5: 大学研究所・センター等(右記) 学: 学協会 I: ITER機構(ITER-DAを含む) 物: 物質・材料研究機構 QW: 量子科学技術研究開発機構(関西研) TF: 原型炉開発総合戦略タスクフォース HO: 社会連携活動ヘッドクォーター		大学研究所・センター等 C1: 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心 C2: 京都大学エネルギー理工学研究所 C3: 筑波大学プラズマ研究センター C4: 九州大学応用力学研究所 C5: 富山大学水素同位体科学研究センター

センターなどはNIFSとの双方向研究のあるもの

## 原型炉における「先進ブランケット」と「先進材料」の位置付け



### ●原型炉1基ブランケット2段階アプローチを想定(合同コアチーム報告書)

- 初期:ITER-TBMの主要を基軸とする水冷却固体増殖ブランケット
- 後期:原型炉にテストブランケットモジュール(先進ブランケット)を設置して経済性を見通しを得る。

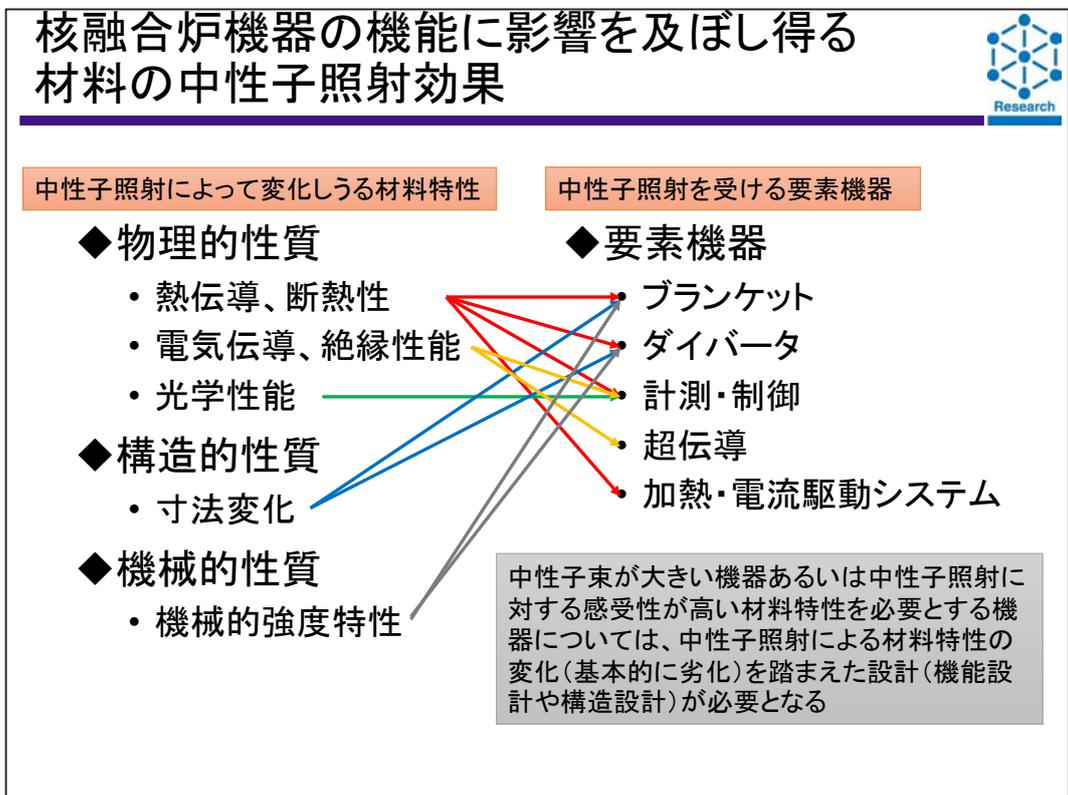
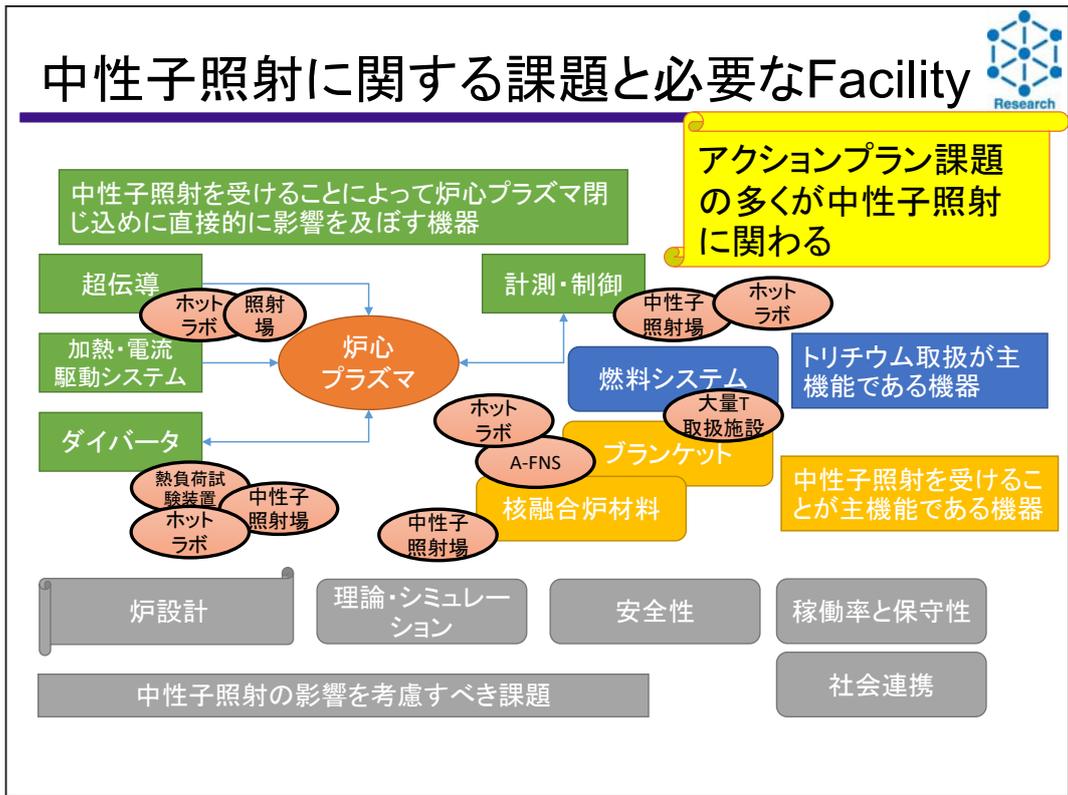
### ●アクションプランにおける位置付け

- 第2回C&R(2025年頃):原型炉TBMのための先進ブランケット概念検討と素案提示、小型試験体製作、機能・特性試験。
- 移行判断(2035年頃):先進ブランケットに関する基礎・標準データの拡充、小型モックアップによる総合機能実証、実環境相当の統合循環ループ試験

## アクションプランにおける中性子照射関連課題



#	課題名	小課題名	項目
0.	炉設計	物理・工学・材料DB	(16)Q/大/F/特:工学・材料DB(26)
1.	超伝導コイル	高強度構造材料・耐放射線絶縁材料	(15)Q/特:耐放射線絶縁材検討(19) (20)Q/産/特:耐放射線絶縁材試作・試験(33)
2.	ブランケット	固体増殖・水冷却ブランケット	(30)Q/大:核融合中性子源照射試験→(35)
3.	ダイバータ	先進ブランケット ダイバータ開発目標の整合性確認と炉設計への適用 材料・機器開発	(16)Q/N/大/特:中性子照射材料・機器の熱負荷試験装置の開発とコールド試験(26) (27)Q/N/大/特:中性子照射材料・機器の熱負荷特性データ取得(35) (15)Q/N/大:ダイバータ機器構成材料の中性子照射影響(35) (16)特/Q/大/産:ダイバータ機器の保安や補修技術の評価と開発(26)
4.	加熱・電流駆動システム	高信頼性	(20)Q/N/大:ECH, NBI耐放射線材料の開発(35)
5.	理論・シミュレーション	核融合炉材料SMC	(15)Q/N/大/特:材料シミュレーション要素コードの開発・利用(26) (19)Q/N/大/特:材料統合解析コードの開発・利用・検証(35) (27)Q/N/大/特:材料統合解析コードの適用機器の拡大及び原型炉システム統合SMCとの連携(35)
6.	炉心プラズマ	プラズマ壁相互作用研究	(17)大/C3/C4:W材ダイバータ長時間特性での課題の明確化(26)
7.	燃料システム	T安全取扱技術・機器開発	(15)Q/C5/大:Tと材料の相互作用など基礎データ取得(19)
8.	核融合炉材料と規格・基準	低放射化フェライト鋼 先進ブランケット材料 増殖機能材料 ダイバータ材料 計測・制御機器材料 その他 核融合中性子源	(15)Q:原子炉による80dpa照射データの取得(19) (15)Q:接合被覆部・環境影響に関する照射データ取得(31) (15)Q/N/大:He影響の理解の進展、核融合中性子照射影響の解明、照射劣化モデルの構築(35) (30)Q:核融合中性子源照射試験(35) (15)Q/N/大:先進材料のデータベースの充実(35) (23)Q:原子炉照射影響評価(30) (30)Q:核融合中性子源照射試験(35) (15)N/大:原子炉照射影響評価(26) (18)Q/N/大:耐照射性材料開発と評価(35) (15)Q/特:照射劣化データベースの整理(19) (20)Q/N/大:耐照射性材料の評価(35) (15)Q/N/大:核融合材料ハンドブックの策定(19) (15)Q:核融合中性子源の設計・建設(30) (30)Q/大:核融合中性子源照射試験(35)
9.	安全性	工学安全課題の整理 工学安全課題の整理 安全性解析・評価	(15)特/Q/L/N/大/産:機器故障のシナリオ確立(26)
10.	稼働率と保守	バックエンド検討 保守技術開発・蓄積	(18)特/大/産:バックエンドシナリオ検討(19) (20)Q/大/産:放射性廃棄物の処分・再利用基準の検討(22)
11.	計測・制御	計測開発	(16)Q/N/大/TF:照射試験も含む計測開発体制の構築→(19) (20)Q/N/大/産/特:計測器のプラズマ試験、照射試験、寿命評価(35)
12.	社会連携		
13.	ヘリカル方式	炉工学・炉設計	(15)N/大:長寿命液体ブランケットの成立性(25) (15)N/大:低放射化構造材料開発研究(25) (15)N/大:高熱流プラズマ対向機器・材料開発研究(25)
14.	レーザー方式		



## 照射データの蓄積が必要な核融合炉材料と現状利用している中性子照射炉



### 1. ブランケット

#### ① ブランケット構造材料:

- 低放射化フェライト鋼: ITER-TBM、原型炉ブランケット構造材としてQSTが中心となり開発。BAを通して全日本的に展開中。
- 酸化物分散強化(ODS)鋼: ATF、高速炉など原子力分野での開発が進展。 **BR-2、HFIR、JOYO**
- バナジウム合金: NIFS中心に開発が進展。 **BR-2、JOYO**

**HFIR**

#### ② ブランケット機能構造材料

- SiC複合材料: PbLiブランケット用機能構造材料として検討。航空分野での開発進展が著しい。
- トリチウム透過被膜: 大学、NIFS等。

**HFIR**

#### ③ 固体増殖・増倍材

- 増殖材: リチウム複合酸化物の開発がQST中心に進展。
- 増倍材: 耐照射性、耐環境性に優れたベリライドの開発がQST中心に進展。

### 2. ダイバータ

#### ① タングステン: ITER用モノブロックダイバータ用。東北大を中心に開発が進展。

**HFIR、JOYO**

#### ② 銅合金: ITER用モノブロックダイバータ用CuCrZr合金。NIFS、京大、東北大、北大でODS-Cu材料開発。

### 3. 計測・制御

#### ① ITERでの設計、放射線照射による劣化データベースを参照しつつ原型炉で使用可能な計測機器の選択が必要。ITERを超える照射環境において用いる場合には、R&Dが必須。

**BR-2、HFIR**

### 4. 超伝導

#### ① 耐放射線絶縁材: 要求されるガンマ線や中性子線の設計線量を満足し、かつ設計耐電圧を満足する絶縁材料を試作し、性能評価を行う必要がある。

### 5. 加熱・電流駆動システム

#### ① ECH耐放射線材料の開発: ミラーレスのRF入射ランチャーの開発が必要だが未着手。

#### ② NBI耐放射線材料の開発: 使用する材料の耐放射線性の評価、及び必要な材料開発を実施する必要があるが未着手。



## 主張



繋ぎとしての海外炉利用と照射後試験技術の高度化

## 核融合炉材料研究に必要な 中性子照射場と照射後試験技術



- 核融合中性子源計画(A-FNS、IFMIF)
- 原子炉照射場
  - Post JMTRの速やかな設計と建設
  - JOYOの早期活用
  - 繋ぎとしての海外炉利用(HFIR、BR-2等)支援の充実
- 照射後試験技術
  - 中性子照射場から取り出した試験片への照射後試験を可能とするホットラボの充実
  - 照射後試験技術の高度化の継続(人材育成も含めて)

## 東北大学金属材料研究所<仙台地区>における 照射材料研究の再構築



## 照射後試験技術の高度化： 超微小試験技術による力学特性評価の例



溶質原子

照射欠陥/  
ナノクラスター

(atomic) nm

炭化物

ベイナイト組織

μm

溶接部

mm

圧力容器

m

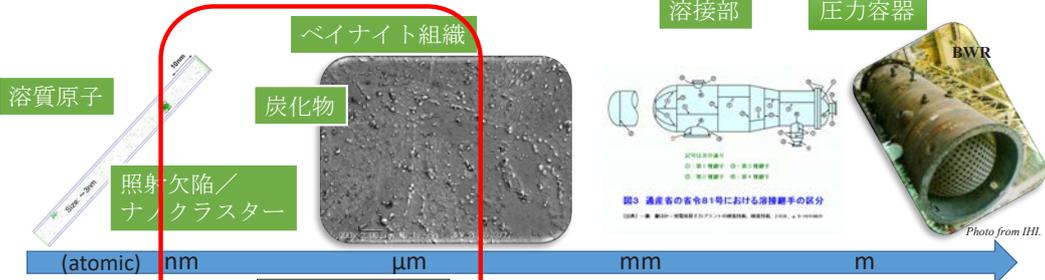
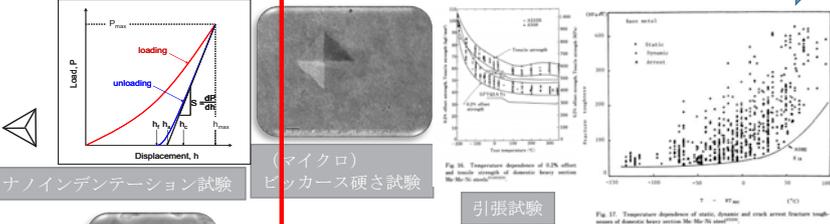


Photo from IHI

超微小試験技術で得られるRPV鋼の局所力学特性から、マクロ強度特性を予測



引張試験      衝撃試験      破壊靱性試験

マクロ強度試験で得られる力学特性にはバラつきが存在する→RPV鋼の照射脆化ではバラつきが安全性を支配

15

## まとめ



- 核融合原型炉の実現に向けたロードマップとアクションプラン(文科省核融合科学技術委員会)に基づき、核融合炉材料開発と、必要な中性子照射場の位置付けについて概説した。
- 当面の中性子照射場の欠如状態に対応して、海外炉利用は極めて重要であり、積極的な支援が必要であることを指摘した。
- 照射後試験技術の高度化も重要であり、その一例として超微小試験技術開発の概要について説明した。

This is a blank page.

### 3-5 国内外のイオン加速器等によるシミュレーション照射の動向と 照射炉実現までの相互補完について

北海道大学大学院工学研究院 エネマテ 柴山 環樹

#### 1. はじめに

イオン加速器を利用した材料照射研究は、「重イオン照射は中性子照射に比べて、高い中性子照射量に相当する照射損傷を模擬するには、極めて短時間の照射でよい。」[1] や「しかし、中性子照射とイオン照射との相関性および等価性については、実験と理論の両面からつめる必要があり、今後ますます研究が進むものと考えられる。」[1]の考えの下、半世紀近く研究が継続されている。現在でも、高速炉や核融合炉材料の新しい材料の合金設計や微量添加元素のスクリーニングにイオン加速器は必要不可欠な装置である。高エネルギーの電子照射が、空孔と格子間原子の対形成のみであるのに対してイオン照射は、中性子と同様なカスケード損傷を生じることがメリットで電子励起効果も、軽水冷却の発電用原子炉の燃材料の挙動解析には重要なためシミュレーション照射研究に使用されている。本講演では、国内外のイオン加速器等によるシミュレーション照射の動向について概説し、試験炉実現までの相互補完について議論する。

#### 2. 最近の国内外のイオン加速器等によるシミュレーション照射の動向

国内のイオン加速器を用いた材料照射研究の創成期には、当時の原研と金材技研の共同でプロトンを用いたクリープ試験装置の開発等も行われたが、現在、材料照射研究で共用されている大学の装置は、HV 社のタンデム加速器（九大応力研）とシングルエンドのイオン加速器を連結して(n,  $\alpha$ )反応を模擬し、炉型によって異なる He 生成率を模擬したデュアル照射が可能な装置（東大東海 HIT、京大エネ研 DuET）がある。原子力機構のタンデム加速器、QST 高崎の TIARA 施設や若狭湾 W-MAST では、最近の ADS 材料から幅広い分野の材料照射研究が行われ、東北大でも震災後新設され増強されている。照射後の微細組織は最新の収差補正 STEM/EELS や 3D アトムプローブによる評価、機械的特性は、FIB で作製したミニチュア引張試験やカンチレバーの曲げ試験、ナノピラーの圧縮試験に加えナノインデントを用いた評価など、創成期には困難なことがほぼ実現しつつある。しかしながら、イオン照射は、損傷分布が試料内部に分布を持つことから、エネルギーディグレーダーを用いた均一化や積極的に利用して深さ分布の評価をする研究も進められている。海外には、国内のようなデュアル照射施設が無かったが、フランスサックレー研究所にトリプルビーム施設（JANNuS）が稼動し、英国や米国では、既設の加速器に 200kV のイオン加速器を連結した in-situ TEM を整備している。北大では、2 台のイオン加速器にレーザーを連結した複合量子ビーム超高压電子顕微鏡が稼動中である。Ionization-induced annealing やレーザー駆動パルス電子源による高速 TEM による点欠陥形成・成長の素過程の可視化など新しいサイエンスの扉も開き、試験炉実現までの相互補完環境は整っていると言える。

#### 参考資料

[1] 長崎隆吉, 日本原子力学会誌, 15(7) (1973)pp.458-468.

#### キーワード:

イオン加速器、シミュレーション照射、He 生成率、カスケード、電子励起



## 国内外のイオン加速器等によるシミュレーション照射の動向と照射炉実現までの相互補完について

新たな照射試験炉の建設に向けたワークショップ  
2020/12/22-23

柴山環樹、渡辺精一  
北海道大学 大学院 工学研究院 附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センター  
Tamaki Shibayama and Seiichi Watanabe  
Center for Advanced Research of Energy Materials,  
Quantum-Beam HVEM laboratory,  
Faculty of Engineering, Hokkaido University

### 本日の内容

1

1. 国内のイオン加速器のネットワーク
2. 超高圧電子顕微鏡(HVEM+イオン加速器、レーザー)の研究
3. 国外の動向
4. JMTRと同等で新規制基準に適合し、DXな(材料)照射炉の早期実現を期待します！



HOKKAIDO UNIVERSITY

## 材料照射研究に利用されている大学(等)のイオン加速器 2

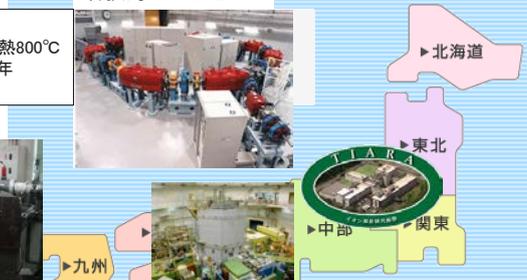


北大 MQB-HVEM  
300kV、400kV  
フリーマン、スパッタイオン源  
冷却、ヒーター加熱  
非管理区域

若狭湾 W-MAST  
p、C、10MeV Ni、(V)  
冷却無し、ヒーター加熱800°C  
メタリオンは、2日/年  
管理区域

九大応力研  
1MeV  
デュオプラズマ、  
セシウムスパッタイオン源  
冷却、ヒーター加熱  
管理区域

九州  
kV~MeV  
デュオプラズマ、  
セシウムスパッタイオン源  
冷却、ヒーター加熱  
管理区域



東北大 ペレットロン/サイクロトロン

東北大 ダイナミトロン

東大東海 HIT

KUR

京大エネ研 DuET






p、He、MeV  
冷却、ヒーター加熱  
管理区域

KV~MeV、多価イオン  
デュオプラズマ、  
セシウムスパッタイオン源  
冷却、**電子ビーム加熱**  
管理区域

地図は、<https://www.nanonet.go.jp/yp/index.html>



HOKKAIDO UNIVERSITY

## 材料照射研究に利用されているイオン加速器 3

1. 東大HIT、京大DuETで実績があるセルフイオン(Fe:SUS、Si:SiC/SiC)、(創成期のNiイオンから)
  - ・安定性の高い電子ビーム加熱による試料加熱、
  - ・マルチマイクロ(小口径)ファラデーカップによる大面積の電流値の精密測定 of 標準化、
  - ・自動計測・記録、インターネットを通じた遠隔観察、遠隔測定(DXIに向けた取り組み)
 ⇒高度化(質の良い成果・データを大量に創出)、デジタルトランスフォーメーション(DX)
2. 大学の共用について、来年度でナノプラは、時限に達して発展的解消の予定
  - ⇒新しいリサーチインフラの取り組みに合流して、**既存設備の整備及び高度化**
  - ⇒**材料照射イオン加速器リサーチインフラコンソーシアム(仮称)、各大学の共用窓口と連携**
3. NIFSとQSTの協業に習って、TIARA、若狭湾などの国研等の装置も大学と部分的に協業
4. 上記コンソーシアムによるサマースクール
  - ⇒学部生、大学院生の教育と将来の人材育成、**技術職員の研修、技術伝承、交流**



現時点では、シミュレーション照射として機能し、共用されている。  
老朽化している装置も有り、

東大東海HITの試料ホルダー 2020/02/25



HOKKAIDO UNIVERSITY

## 北海道大学「その場顕微学」の創始者 中谷宇吉郎<sup>4</sup>

独自に開発した実験器具とうさぎの毛を使い光学顕微鏡一式を低温実験室の中に入れて、実験室で世界で初めて人工雪を誕生させた。その後、様々な条件で人工雪を誕生、成長させて、現在も利用されている状態図 (Nakaya's diagram) を作製した。

中谷 宇吉郎  
北海道帝国大学理学部教授  
(1930~1962)

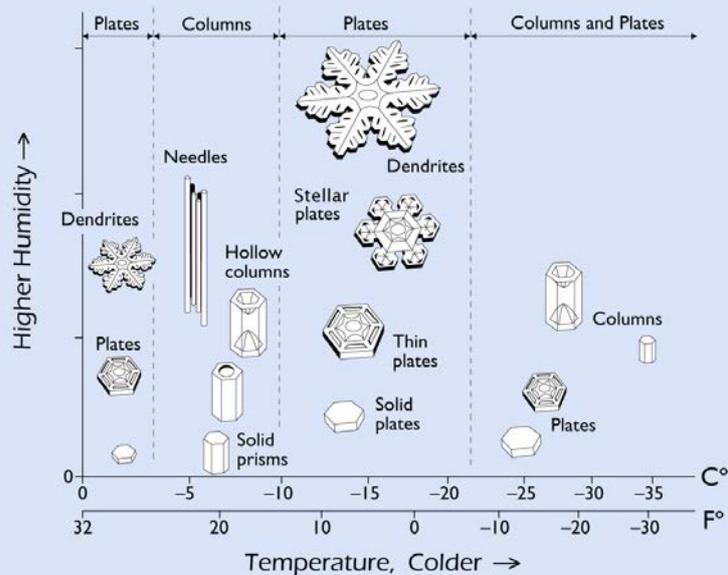
実験装置のレプリカは  
中谷宇吉郎 雪の科学館に所蔵  
されています。  
(加賀市、石川県)

- ・新しい研究を創める時は、実験装置を創る。
- ・実験装置が無ければ、実験が出来ない。(JMTR停止後10年)
- ・海外の照射炉を借りる(サブスクリプション)⇒EBR-II、HFIR、FFTF/MOTA、ループ設置は過去に事例有(米国ATR)
- ・代替照射実験(イオン加速器、超高压電子顕微鏡など)
- ・照射炉が国内にあることのメリットと日米原子力協定



HOKKAIDO UNIVERSITY

## Nakaya's (Crystal morphology) Diagram <sup>5</sup>



<http://www.snowcrystals.com/morphology/morphology.html>



HOKKAIDO UNIVERSITY



**材料照射研究に利用されている大学(等)の超高压電子顕微鏡 7**

阪大 H-3000、物質・生命科学超高压電子顕微鏡 (JEM-1000EES)

阪大 H-3000、物質・生命科学超高压電子顕微鏡 (JEM-1000EES)

九大 Ωフィルター、レーザー附属超高压電子顕微鏡 (JEM-1300NEF)

▶北海道  
北大 複合量子ビーム超高压電子顕微鏡 (MQB-HVEM)

▶九州  
▶中国  
▶近畿  
▶四国  
東大、生理研、九大

▶東北  
名大 反応科学超高压電子顕微鏡 (JEM-1000K SR)

地図は、<https://www.nanonet.go.jp/yp/index.html>

HOKKAIDO UNIVERSITY

海外のHVEMを利用した照射以外の国際協力研究について 8

生理研(生体切片など)、大学など(金属など)



KBSI Morning star HVEM



KBSI Bio HVEM

フランスサックレー、ドイツMPI、中国有色金属研究院



HOKKAIDO UNIVERSITY

## Our research strategy in Electron Microscopy®

An initiative nano dynamic study of matters by  
**MQB-HVEM [Multi-quantum beam HVEM]**

**Development of Multi-quantum-beam HVEM:**  
*Capable of multi-beam irradiation of electron, ions and lasers.*  
 Inter-atomic bond excitation might be induced by an appropriate laser energy.  
 Ultra-short (>130fs) pulsed laser might induce a diabatic process.  
 Interference with quantum waves of electron, ions and lasers would be considered..

*Innovative matter science of nano dynamics at far-from-equilibrium:*

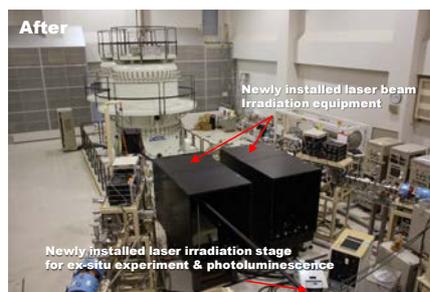
- \*Nonequilibrium matter science and development of new functional materials
- \*New quantum beam physics and matter study by interference beam effects

## 複合量子ビーム超高圧電子顕微鏡 10 Multi-Quantum Beam HVEM (ARM-1300)

マルチビーム超高圧電子顕微鏡(2台のイオン加速器)から複合量子ビーム超高圧電子顕微鏡への改修



1999年、COEなど(文部省)



2015年、補正予算による改修(文科省)

設計から竣工まで4年、当初計画から20年ぐらいで、修理、改修等が必要になる。



## 超高圧電子顕微鏡が、現在置かれている研究基盤について 11

1. 国が法律により整備する最先端大型研究基盤⇒京(富岳)、SPring-8、J-PARC
2. 核融合プラズマ実験装置、高輝度レーザー、(超高圧電子顕微鏡)  
学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ロードマップの策定  
ー ロードマップ2020 ー  
パブリックコメント(2020年9月8日～16日)

3. 各大学で整備する比較的大型の設備(イオン加速器)⇒近年BNCT加速器が主  
最先端の収差補正走査透過型電子顕微鏡、各種分析機器など⇒ナノプラ

4. 各大学の学部、学科、研究室で整備する機器⇒新たな共用システム



- ・コアファシリティ
- ・リサーチインフラ

HOKKAIDO UNIVERSITY

学術の大型研究計画に関する マスタープラン

12

第24期(マスタープラン2020)

- ・MLF 第2ターゲットステーション: 中性子・ミュオン科学の新たな展開
- ・中性子施設ネットワーク
- ・放射光は複数の領域で提言

第23期(マスタープラン2017)

- ・超顕微科学研究拠点
- ・J-Parc(重点課題)

第22期(マスタープラン2014)

- ・超高压電子顕微鏡先端融合研究拠点

☆我が国ならではの特色ある学術研究の推進  
 -超高压電子顕微鏡による世界最高水準の応用研究の展開と学術知見の獲得-  
 (事業期間 平22~平27年度)

世話大学 阪大

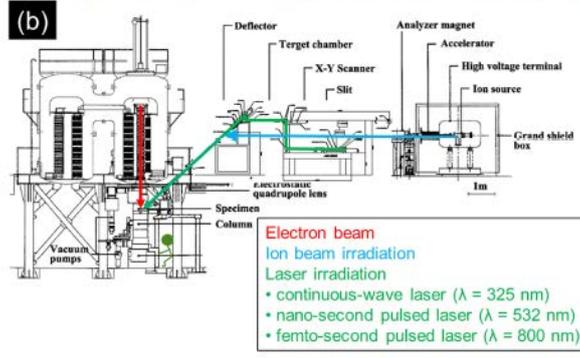
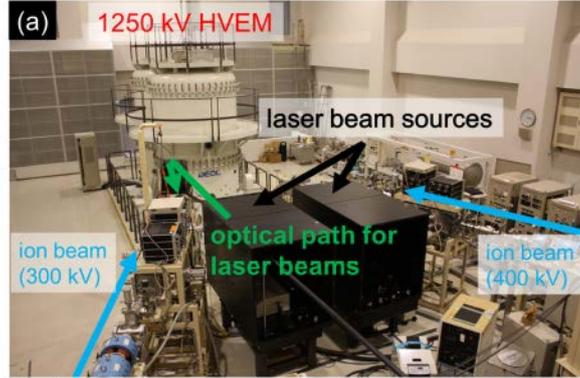
北大

九大 名大

Bird view of Multi Quantum Beam HVEM

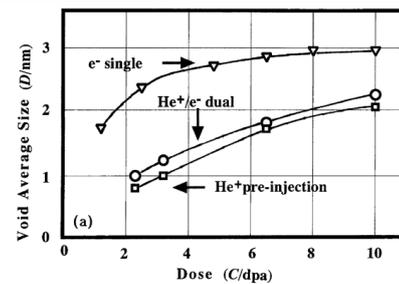
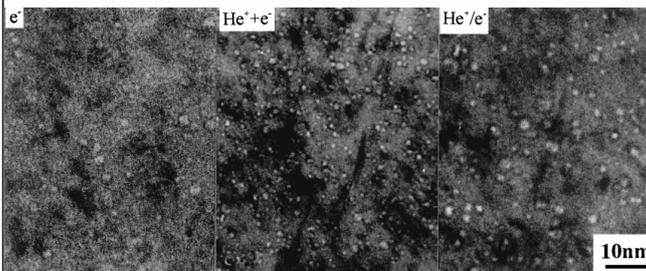
13



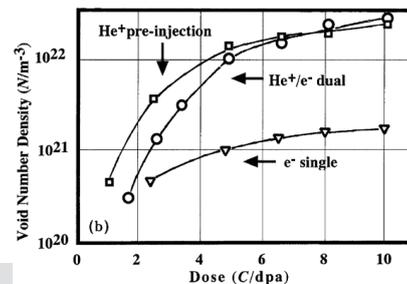


HOKKAIDO UNIVERSITY

**In-situ observation of voids formation in Fe–Cr–Mn (W, V) alloy irradiated by (a) single Electron ( $e^-$ ) irradiation, (b) Electron irradiation after helium injection ( $He^+ + e^-$ ), (c) Helium/electron dual beam irradiation ( $He^+/e^-$ ).**



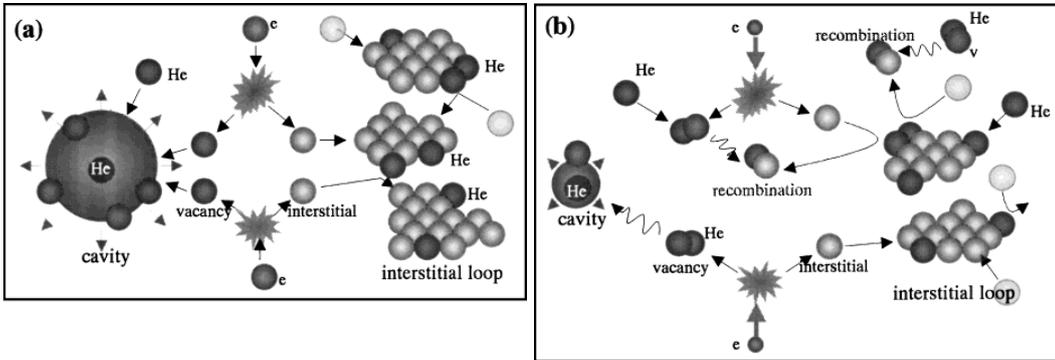
(1) Helium enhanced void nucleation, and in the condition of helium existence the sink strength of voids is decreased in order of electron beam irradiation after helium injection, electrons/ $He^+$ -ions dual-beam irradiation and single electron beam irradiation.  
 (2) The void swelling of Fe–Cr–Mn (W,V) alloy is enhanced by helium existence.



HOKKAIDO UNIVERSITY

Discussions

16



Schematic drawing of secondary defects formation and interactions, (a) electron irradiation after He injection, (b) electrons/He<sup>+</sup>-ion dual-beam irradiation.



HOKKAIDO UNIVERSITY

レーザーが加わると何が更に出来る様になるのか？

17

**Before**

**After**

**(a)** Electron irradiation results for SUS316L at 0.2dpa, 0.4dpa, and 0.7dpa. Scale bar: 100nm.

**(b)** Electron/He simultaneous irradiation results for SUS316L at 0.3dpa, 0.4dpa, 0.5dpa, 0.6dpa, and 0.7dpa. Scale bar: 100nm.

**(b)** HVEM setup diagram showing a 532 nm laser, Pd including SiO<sub>2</sub> glass window, SiO<sub>2</sub> glass window, Specimen, and Specimen chamber. Temperature range: 573 K to 773 K.

**(c)** Au/SiC holder with PIPS-hole (3 mm).

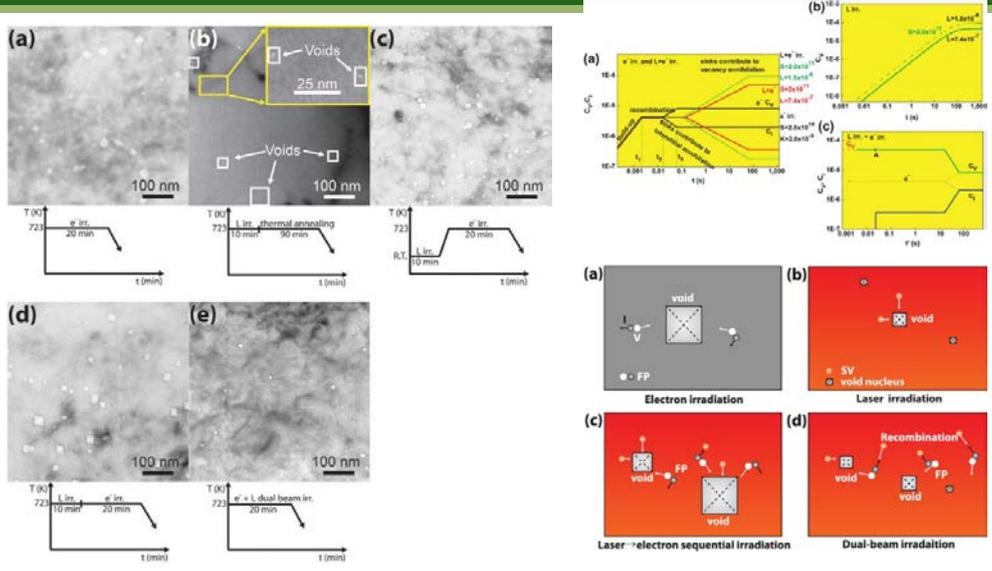
**(d)** Irradiation spot on the specimen.

**(a)-(o)** Micrographs showing defect evolution under different irradiation conditions: e irr., L+e irr., and L+He irr. Laser output: 10mJ/cm<sup>2</sup>·pulse.

SUS316Lの照射効果 (a) 電子照射、(b) 電子/He同時照射  
 ・Heが核になるため欠陥の微細化、ポイドの数密度増加とサイズ現象  
 Y. Hidaka, et. al, JNM, (1994)

SUS316Lの照射効果 (a) 電子照射、(b) 電子/He同時照射  
 ・Heが核になるため欠陥の微細化、ポイドの数密度増加とサイズ現象  
 S. Yang, et. al., JNM, (2017)

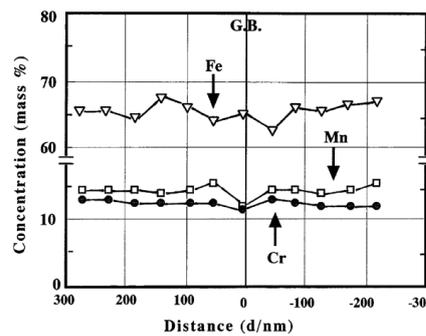
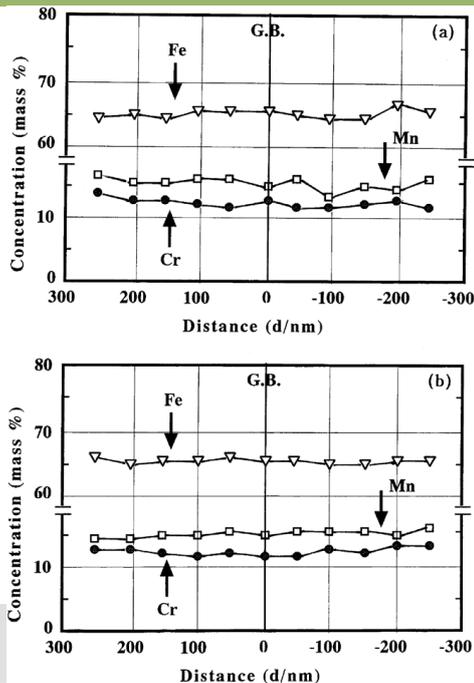
## Injection of supersaturated vacancies by nanosecond-pulsed laser irradiation 18



SV quenched by nanosecond-pulsed laser irradiation (5~7ns, 2Hz, 24mJ/cm<sup>2</sup>·pulse)  
 Electron flux: 2 × 10<sup>3</sup>dpa/sec

**HOKKAIDO UNIVERSITY**  
 Zhanbing Yang, Seiichi Watanabe & Takahiko Kato, The Irradiation Effect of a Simultaneous Laser and Electron Dual-beam on Void Formation  
*Scientific Reports* 3: 1701 (2013). DOI: 10.1038/srep01701

## Irradiation induced segregation 19



The segregation of solute elements such as Cr, Mn near the grain boundaries was partially decreased after electron irradiation in right upper figure. On the other hand, the segregation suppressed by existence of helium in pre He injected (a) and spontaneous He irradiation (b).

**HOKKAIDO UNIVERSITY**

## ミニチュアせん断試験片 (Double Notch Shear) の作製方法 20

Homogeneous distribute the shear stress

**Specimen preparation sequence by FIB**

Shibayama, T., Matsuo, G., Hamada, K., Watanabe, S., and Kishimoto, H.  
In-situ Observation of Fracture Behavior on Nano Structure in NITE SiC/SiC Composite by HVEM  
IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 18 162013(2011)

Figure 21. Micrograph of O<sub>2</sub>-Nicalon™/B<sub>4</sub>C/SiC/CFBC double-notched specimen after heat illustrating the propagation of interlaminar crack between notches (Lara-Curzio & Jenkins, Cocoa Beach 99).

**CXXXX-00 Standard Test Method for the Shear Strength of Ceramic Joints**  
**C1425-99 Standard Test Method for Interlaminar Shear Strength of 1-D and 2-D Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics at Elevated Temperature**  
**C1292-95 Standard Test Method for Shear Strength of Continuous Fiber-Reinforced Ceramics at Ambient Temperatures**

HOKKAIDO UNIVERSITY

## 自作ホルダーによる破壊挙動その場観察と荷重変位曲線<sup>21</sup>

① Before testing

② Just contacting

③ Prior to crack initiation

④ Crack initiation

⑤ Crack propagation

⑥ Crack opening

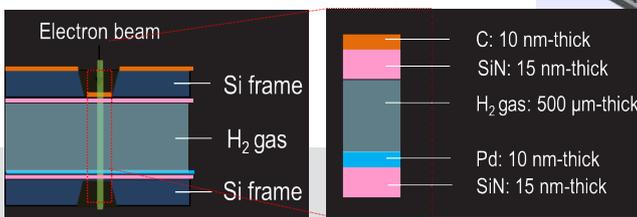
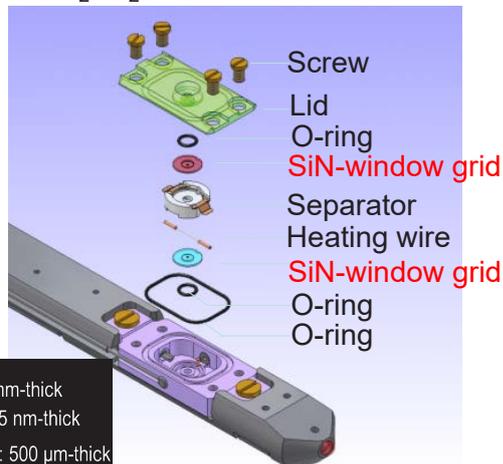
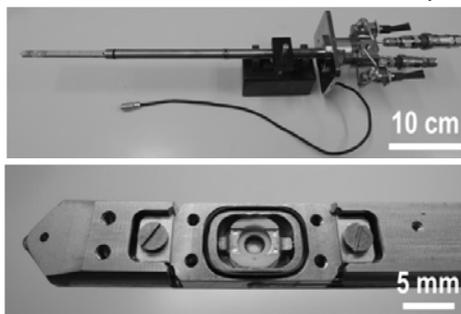
⑦ Fractured (Debonded)

Maximum shear strength:  $2.8 \times 10^3 \text{MPa}$   
 (Compression strength of nuclear grade pyrolysis carbon: 80MPa)

HOKKAIDO UNIVERSITY

## Window-type environmental cell holder 22

- Pressure:  $5.0 \times 10^{-2} - 1.0 \times 10^5$  Pa
- Temperature : R.T. - 350 °C
- Gaseous species:  $H_2, O_2, Ar, Air$



## Application to Hydrogen-Metal Reaction 23 (High gas pressure)

ACS Appl. Mater. Interfaces, 2016, 8(23), pp14548-14551.

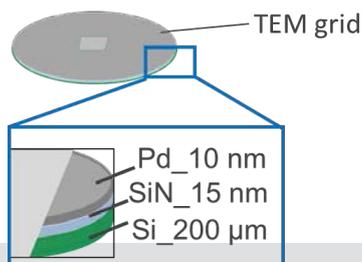
ACS **APPLIED MATERIALS** & INTERFACES

Research Article  
www.acsami.org

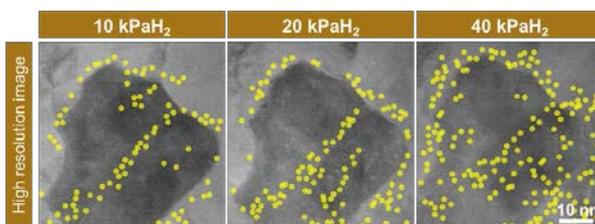
### Hydrogen Absorption of Palladium Thin Films Observed by in Situ Transmission Electron Microscopy with an Environmental Cell

Tengfei Zhang,<sup>\*,†</sup> Yuki Nakagawa,<sup>†</sup> Takenobu Wakasugi,<sup>†</sup> Shigehito Isobe,<sup>\*,†</sup> Yongming Wang,<sup>‡</sup> Naoyuki Hashimoto,<sup>†</sup> and Somei Ohnuki<sup>†</sup>

Sample: Pd thin film  
(Thickness: ~10 nm)



Dislocation generation during the reaction



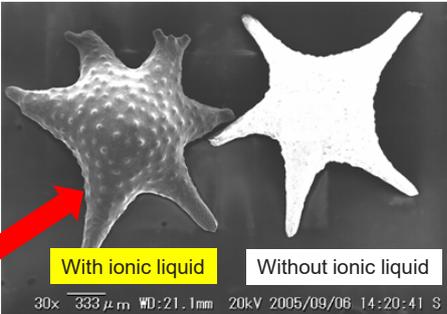
● Dislocation core



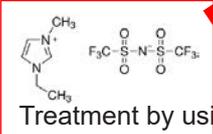
## Liquid EM R&D: Ionic liquid 10

Stardust (Hoshi no suna) at sea shore in Okinawa, Japan  
It is a kind of coral shell in southern sea.

- Vacuum pressure <math><10^{-5}</math> [Pa]  
→ Potential usage in TEM
- Electron conductivity  
→ Less charge-up properties
- Maintain liquid state even if in vacuum.  
→ Application to bio and soft materials



30x 333 μm WD: 21.1mm 20kV 2005/09/06 14:20:41 S

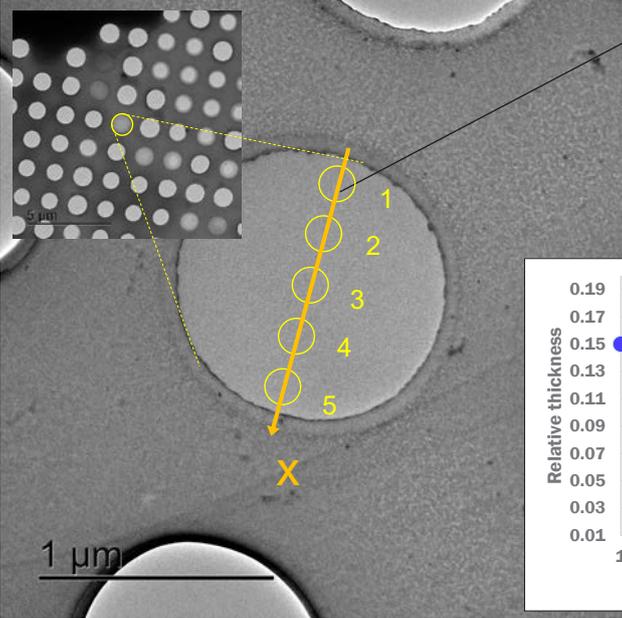


Treatment by using EMI – TFSI ionic liquid

Kuwabata *et al.*, Chemistry Letters **Vol.35**, No.6, 600 (2006).

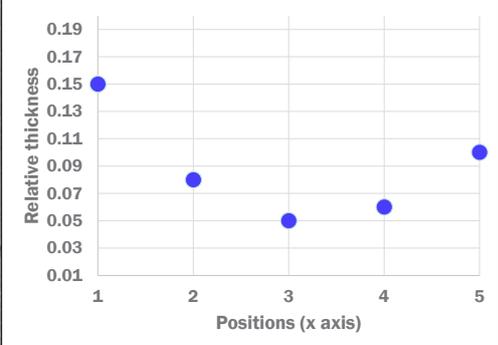
 HOKKAIDO UNIVERSITY

## Thickness measurement of ionic liquid by STEM/EELS 25



Ionic liquid inside hole supported by surface tension..

Carbon thickness is nearly 20 - 25 nm.

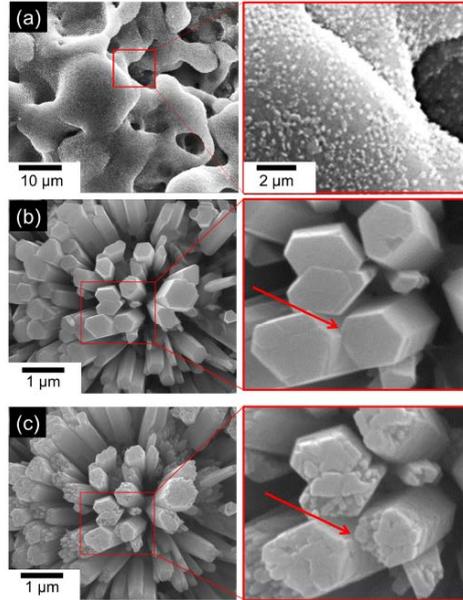


Positions (x axis)	Relative thickness
1	0.15
2	0.08
3	0.05
4	0.06
5	0.10

 HOKKAIDO UNIVERSITY

## Seeding, growth, and photocorrosion of ZnO nanocrystals<sup>26</sup>

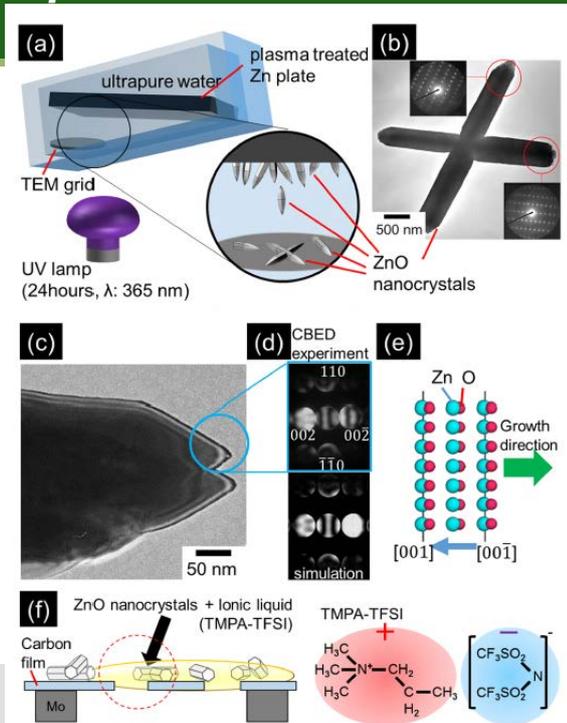
J. Ishioka, et. al., AIP Advances 7, 035220 (2017); doi: 10.1063/1.4979726



HOKKAIDO UNIVERSITY

## Experimental procedure

27



UNIVERSITY

### In-situ observation of phot corrosion by using ionic liquids and Micro-ED-HVEM 28

**(a)** 0 min  
 $d_{002} = 0.26 \text{ nm}$   
 [001] growth direction  
 5 nm ZnO / Ionic liquid

**(b)** e<sup>-</sup>: 30 min  
 5 nm

**(c)** Laser: 30 min  
 5 nm

**(d)** Laser: 90 min  
 5 nm

**(e)** before irradiation after irradiation  
 10 nm

HOKKAIDO UNIVERSITY

### Experimental procedure 29

**液体封入セルの断面概要図**

60°  
 e<sup>-</sup> beam  
 Si SiN  
 Torr Seal  
 H<sub>2</sub>O  
 200 μm  
 200 nm

**Custom built cell**

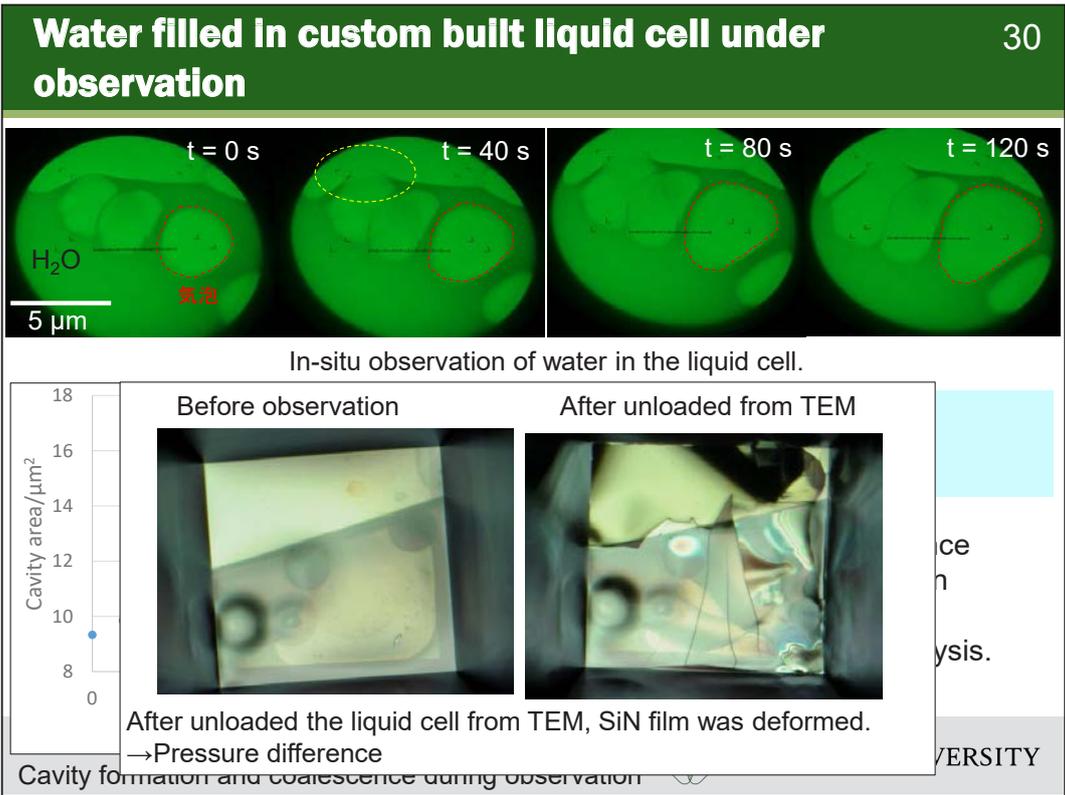
1 mm  
 Torr Seal  
 Si SiN  
 100 μm

**Newton ring**

```

    graph TD
      A[Recipe  
Epoxy resin  
Torr Seal(Agilent Technologies)  
Curing 3days(@25°C)] --> B[RP testing  
(EDWARDS, RV-3)  
2.0 × 10-1 Pa]
      B --> C[TMP testing  
(Pfeiffer Vacuum, TSU261)  
3.0 × 10-4 Pa]
      C --> D[200 kV C-TEM  
(JEOL, JEM-2010)  
2.8 × 10-5 Pa]
    
```

HOKKAIDO UNIVERSITY



## 海外の材料照射研究用のイオン加速器の現状、最近の動向 31

### 汎用TEM+イオン加速器→レーザーパルス電子源(高速現象の可視化)

1. New Microscope and Ion Accelerators for Materials Investigations (MIAMI-2) Huddersfield  
 G. Greaves \*, A.H. Mir, R.W. Harrison, M.A. Tunes, S.E. Donnelly, J.A. Hinks  
 Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 931 (2019) pp. 37–43.

2. Concurrent in situ ion irradiation transmission electron microscope  
 K. Hattar, D.C. Bufford, D.L. Buller  
 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 338 (2014) pp. 56–65.

東大東海の装置と同じ200kVのTEM

シミュレーション照射でも照射場による依存性を考慮する必要がある。 32

3. Some remarks on in-situ studies using TEM-heavy-ion accelerator link from the stand point of extracting radiation damage caused by fast neutrons  
 Shiori Ishino , Naoto Sekimura, Kenta Murakami, Hiroaki Abe  
 Journal of Nuclear Materials 471 (2016) pp. 167-174.

170

S. Ishino et al. / Journal of Nuclear Materials 471 (2016) 167–174

**Table 1**

Fusion and fission neutrons, self ions with equivalent energies of PKAs for fusion and fission reactors and 1 MeV electrons for HVEM (For HVEM, see Ref. [14]).

Particle	14 MeV fusion neutrons	1 MeV fission neutrons	400 keV self ions	40 keV self ions	1 MeV electron for HVEM
Critical parts or components in the energy device	First wall and blanket structure <sup>a</sup>	FBR Mid fuel pin <sup>b</sup>	Max.PKA energy for critical component	Average PKA energy for critical component	PKA energy - displacement energy
Temperature	Dependent on cooling condition	Dependent on cooling condition	Need data for RT-1300 K	Need data for RT-900 K	Cryogenic and high temperature goniometer available (12-1300 K)
Max flux, (Achievable minimum flux) <sup>c</sup>	1 MW/m <sup>2</sup> eq.	$5 \times 10^{19}$ n/m <sup>2</sup> /s	(Achievable minimum flux- $10^{-6}$ dpa/s) <sup>d</sup>	(Achievable minimum flux- $10^{-6}$ dpa/s) <sup>d</sup>	High dose rate $\sim 3 \times 10^{-3}$ dpa/s
Max fluence	Present goal - DEMO	250GWd/T <sub>M</sub>	High dose possible	High dose possible	Relatively high dose $\sim 300$ dpa/d
Nature of damage	Large cascade	~250dpa Cascade	Large cascade	Cascade	Frenkel pair

Ref. M. Kiritani, J. Nucl. Mater. 216 (1994)220-264.

<sup>a</sup> Assume ferritic-martensitic steels or ODS ferritic-martensitic steels.

<sup>b</sup> Assume CW austenitic stainless steels or ODS ferritic-martensitic steels.

<sup>c</sup> In parenthesis, minimum fluxes are given allowing to observe the effects of single impinging ion.



HOKKAIDO UNIVERSITY

日本のHIT、DuETをベースにフランスで稼働中の装置 33

The screenshot shows the JANNUS website interface. At the top, there are logos for Université Paris-Saclay, CEA, CNRS, and JANNUS. A navigation menu on the left includes links for Home page, News, Introduction, Directions to the platform, Equipments, Research topics and publications, Contact, and Request Beam time. The main content area features the title "JANNUS - Joint Accelerators for Nano-science and Nuclear Simulation" dated 1 February. Below the title, it states that the JANNUS multi-ion beam irradiation platform was established in 2005 around two facilities: JANNUS-Orsay and JANNUS-Saclay. A large JANNUS logo is on the right. At the bottom, there are logos for SNS and JCLab, and a footer with "RSS 2.0 | Site Map | credits | Webmaster | Private area".



HOKKAIDO UNIVERSITY



イオン加速器(超高压電子顕微鏡を含む)は、弾き出しを主とするイオン種とHeイオンを用いることでHe生成率を調整できるので、材料照射炉のスペクトル調整照射や核融合中性子源のシミュレーション照射は可能である。

様々な実験技術の進展により、真空以外でも照射が可能になりつつあるが、**state of the art**の段階で、**JMTR**(新たな材料照射炉)の代替として機能することは難しい。

海外では、材料照射炉があるので、イオン加速器、電子顕微鏡は新たなサイエンスの未踏領域に進んでいます。国内では、大学+国研で材料照射の共用ネットワークを形成していますが、新設に対して更新が遅れており老朽化しつつあります。

デジタルトランスフォーメーションの時代を迎え、マテリアルDXもキックオフする社会状況です。新材料照射炉が是非とも必要です。



#### 4. 第4部

#### 新たな照射試験炉の検討

This is a blank page.

## 4-1 国内外の状況を踏まえた新たな照射試験炉の在り方

東京大学名誉教授 寺井 隆幸 原子力機構「JMTR 後継炉検討委員会」事務局\*

### 1. はじめに

平成 30 年 7 月に閣議決定された第 5 次エネルギー基本計画において、原子力は「安全性・信頼性・効率性の一層の向上」、「再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力関連技術のイノベーションを促進」、「人材・技術・産業基盤の強化に直ちに着手し、安全性・経済性・機動性に優れた炉の追求、バックエンド問題の解決に向けた技術開発を進めていく」とされた。

一方、原子力機構では、平成 29 年 4 月に施設中長期計画を公表し、高経年化した原子力施設を廃止することが決定された。特に、我が国で照射機能を有する材料試験炉(JMTR)も廃止施設と決定されたが、文科省原子力科学技術委員会原子力研究開発基盤作業部会の「中間まとめ」において、我が国が持つべき原子力研究開発機能が示され、短期・中期・長期的な視点で対応をとることとなったため、原研機構内に JMTR 後継炉検討委員会を設置し、長期的視点である JMTR 後継炉について、利用ニーズ、国内外の試験研究炉等の調査を行い、新たな照射試験炉の在り方についての検討を行った。

### 2. JMTR 廃止決定の影響と国内外の調査結果

JMTR 廃止は、安全性研究、人材育成、産業利用に大きく影響する。エネルギー基本計画に示されている軽水炉の安全性、信頼性・効率性向上のための技術開発や新型炉開発においてはその照射場がなくなり、実用的なデータの取得が出来なくなった。また、運転技術や研究開発を行う人材を育成することも困難となっている。さらには、工業用・医療用 RI 製造も海外に依存するしかない状況である。海外においても、高出力照射試験炉が高経年化により相次いで廃止されるとともに、現在稼働している多くの照射試験炉が今後 10 年で運転年数 60 年を経過し、廃止の可能性が高くなっている。現在、世界で建設されている照射試験炉は JHR(フランス)と RA-10(アルゼンチン)の 2 基であるが、規制強化等の問題で建設工期が大幅に遅れている。このような背景から、海外炉に多額の資金投資を行うことも難しい状況と考えられる。日本においても、もんじゅサイトの試験研究炉の建設のための概念設計が開始されたが、熱出力は数～10MW の中性子ビーム利用を主目的としている。しかしながら、この試験研究炉を活用して、これまでの研究開発で培った技術を維持・高度化するための基礎基盤技術の確立も行いつつ、社会的要請を実現するためには、新たな照射試験炉の検討も必要不可欠であるといえる。

### 3. 新たな照射試験炉の必要性和実現に向けた検討課題

JMTR 後継としての新たな照射試験炉は、高出力の試験研究炉であるため、多額の建設費が必要となる。このため、社会的要請を踏まえた利用ニーズをさらに調査し、海外で建設されている照射試験炉やもんじゅサイトの試験研究炉との関係を踏まえた位置づけを明確にすることが重要である。また、これまで JMTR で蓄積した照射技術を継承・維持しつつ、より高度な照射技術を開発することが要求されることから、他の炉とは異なった特徴を有する照射試験炉であることを明示することにより、国内外との連携を強化し、中核的な研究施設とするような運営方針の構築を検討する必要もある。特に運用にあたっては、国内外の研究者・技術者等の意見を踏まえつつ、その運営形態や利用料金・稼働率向上などの課題を解決することが望まれる。

**キーワード：**試験研究炉、照射試験炉、利用ニーズ

※：神永 雅紀、楠 剛、土谷 邦彦、那珂 通裕、山浦 高幸

新たな照射試験炉の建設に向けたワークショップ  
令和2年12月22日～23日 FUKURACIA 丸の内オアゾ(リモート接続によるハイブリッド開催)

# 国内外の状況を踏まえた 新たな照射試験炉の在り方

令和2年12月23日

東京大学名誉教授 寺井 隆幸

原子力機構JMTR後継炉検討委員会事務局※  
(※：神永雅紀、楠 剛、土谷邦彦、那珂通裕、山浦高幸)

## 目 次

1. 社会的要請
2. 社会的要請により取り組むべき技術開発
3. 試験研究炉の利用ニーズ
4. 照射試験炉の廃止の影響
5. 照射試験炉に係る検討
6. 新たな照射試験炉の必要性
7. 新たな照射試験炉の実現に向けて
8. まとめ

## 1. 社会的要請 (1)

### 第5次エネルギー基本計画 (2018年 (平成30年) 7月)

脱炭素化エネルギーシステムに関するあらゆる選択肢について、人材・技術・産業基盤を強化し、官民が結束して課題解決に挑戦していく（エネルギー政策の基本的視点（3E+S））。

【原子力政策の方向性】

- 安全性・信頼性・効率性の一層の向上。
- 再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力関連技術のイノベーションを促進。
- 人材・技術・産業基盤の強化に直ちに着手し、安全性・経済性・機動性に優れた炉の追求、バックエンド問題の解決に向けた技術開発。



原子力分野の技術・人材の維持・発展という観点に鑑み

- 世界の原子力安全の向上や原子力の平和利用、核不拡散及び核セキュリティ分野において積極的に貢献。
- 地球温暖化対策に貢献していくことは我が国の責務。

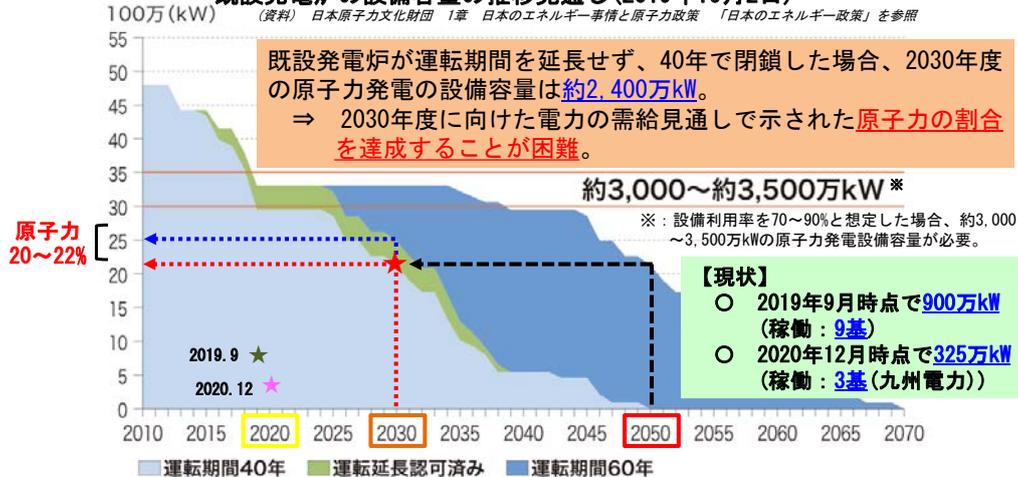
1

## 1. 社会的要請 (2)

2030年度の電源構成は、LNG火力27%程度、石炭火力26%程度、再生可能エネルギー22~24%程度、原子力20~22%程度、石油火力3%程度。

既設発電炉の設備容量の推移見通し (2019年10月2日)

(資料) 日本原子力文化財団 1章 日本のエネルギー事情と原子力政策 「日本のエネルギー政策」を参照



原子力の割合を達成するためには、安全性、信頼性を確認していくことが重要。

2

## 2. 社会的要請により取り組むべき技術開発

### 取り組むべき技術開発

- 軽水炉技術の向上を始めとして、国内外の原子力利用を取り巻く環境変化に対応した技術課題の解決。
- 多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力関連技術のイノベーションの促進。
- 過酷事故対策を含めた軽水炉の一層の安全性・信頼性・効率性向上に資する技術開発。
- 固有の安全性を有する高温ガス炉など、安全性の高度化に貢献する技術開発。
- 原子力利用の安全性・信頼性・効率性を抜本的に高める新技術等の開発。
- **人材育成や研究開発等に必要な試験研究炉の整備を含め、産学官の垣根を越えた人材・技術・産業基盤の強化。**
- 小型モジュール炉や熔融塩炉を含む革新的な原子炉開発のような長期的な開発。



(資料) 「エネルギー基本計画」、平成30年7月  
「研究と産業に不可欠な中性子の供給と研究用原子炉の在り方」平成30年8月16日 日本学術会議 総合工学委員会

3

## 3. 試験研究炉の利用ニーズ

試験研究炉の出力に対する主な利用ニーズの調査結果を参照し、利用ニーズを再整理・比較した。

炉 型		中出力炉			高出力炉
		京大炉	もんじゅサイト 試験研究炉	JRR-3	新たな 照射試験炉
原子炉		京大炉	もんじゅサイト 試験研究炉	JRR-3	新たな 照射試験炉
熱出力		5MW	数MW～10MW	20MW	50MW (TBD)
運転年数※1		58年	概念設計中※2	30年	概念検討中
主な 利用 ニーズ	燃料・材料照射研究				◎
	中性子ビーム利用研究	○	◎	◎	
	産業利用(主にRI製造)		○	○	◎
	人材育成(教育・実習)	○	○	○	
	人材育成(研究開発)	◎	◎	◎	◎

※1：2020年(令和2年)までの年数、※2：中性子ビーム利用が主目的

(資料) 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 原子力研究開発・基盤・人材作業部会(第3回) 令和2年5月20日を参考に作成

4

#### 4. 照射試験炉の廃止への影響(1)

社会的要請に反して、多くの研究炉は今後10年で運転年数が60年を経過し、廃止措置に移行していくことが予想される。

高出力炉(NRU(2016年)、JMTR(2017年)及びハルデン炉(2018年)の廃止による影響

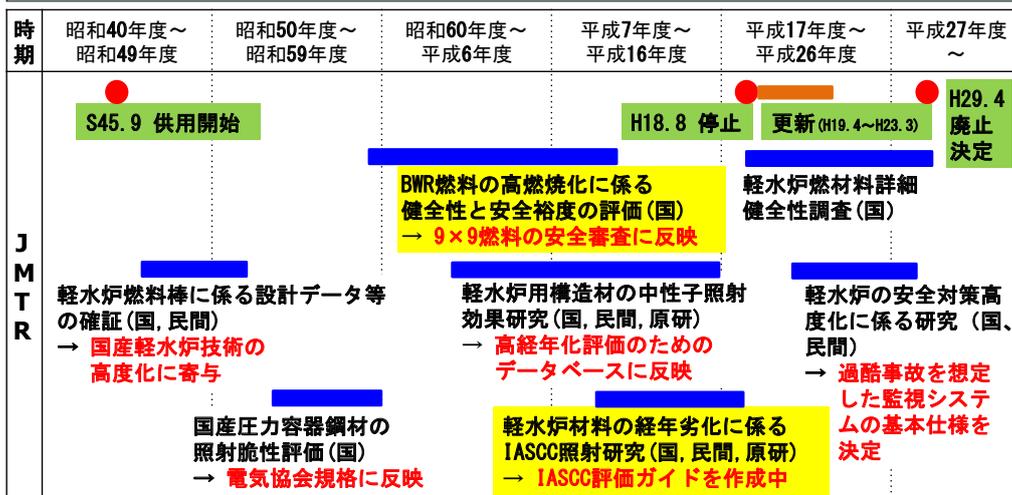
影響分野	失われつつある機能（利用ニーズ）
発電炉規制に係る安全研究	安全・安定運転のための <b>病院的システム</b> ※ (※：診断、原因究明、予測など)
原子炉用燃料・材料、計測器等の中性子照射研究	原子力の平和利用を持続可能にするための <b>基礎・基盤研究</b> や <b>俯瞰的原子力人材育成</b>
産業用及び医療用のRI製造	産業インフラを支える非破壊検査、がん診断・治療等のような <b>安定的生活基盤</b>

社会的要請である軽水炉の安全性・信頼性・効率性向上のための技術開発、革新的な原子炉開発、RI安定供給のための照射場が我が国になくなった。

5

#### 4. 照射試験炉の廃止への影響(2) -軽水炉安全性研究-

**【JMTRの設置目的】** 動力炉国産技術の確立と国産動力炉などの発展に寄与するため、原子炉用材料及び燃料の各種照射試験、RIの生産ならびに教育訓練を行う。



軽水炉が稼働する限り、安全研究は不可欠。そのための各種計測技術開発も必要。

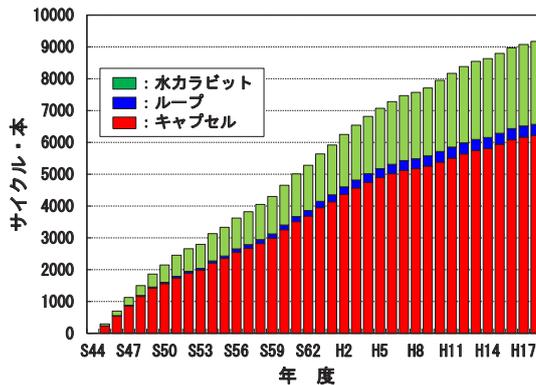
(資料) 第7回原子力機構報告会(2012年11月)安全に係る研究開発 -大洗研究開発センターでの取り組み-を参考に一部修正

6

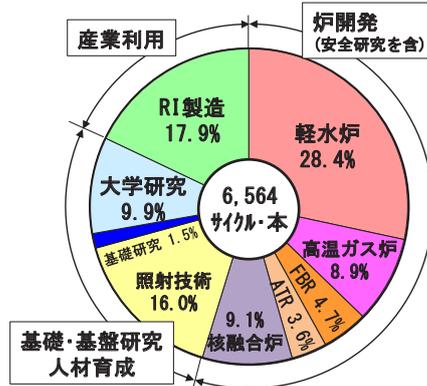
#### 4. 照射試験炉の廃止への影響(3) –基礎基盤研究・人材育成①–

JMTRの廃止により、原子炉内で生じている種々の現象を学ぶ場が失われ、大学や企業の若手研究者・技術者の育成が停滞している。

JMTR運転時における累積照射本数 (9,165サイクル・本)



利用目的別割合 (キャプセル及びループ)



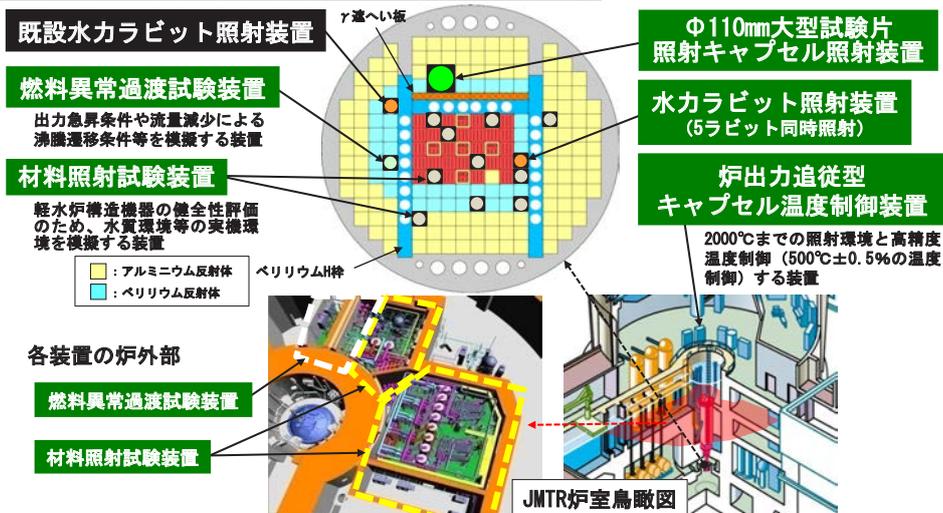
幅広い分野を俯瞰できる総合力と主体的に学ぶ姿勢に培われた専門能力を併せ持つ展開力のある人材を育成できる教育プログラムの構築が必要。

(資料) 日本原子力研究開発機構「JMTRの歩み ～40年間を振り返って、さらに今後の照射試験の展開～」を参照

#### 4. 照射試験炉の廃止への影響(4) –基礎基盤研究・人材育成②–

【JMTR再稼働準備時期の活動】 試験条件の設定や照射設備の設計・製作を進めることにより、大学や企業の研究者・技術者にも技術継承、人材育成が可能。

JMTR炉心断面(再稼働の検討炉心、 ■ : 新設した試験装置)

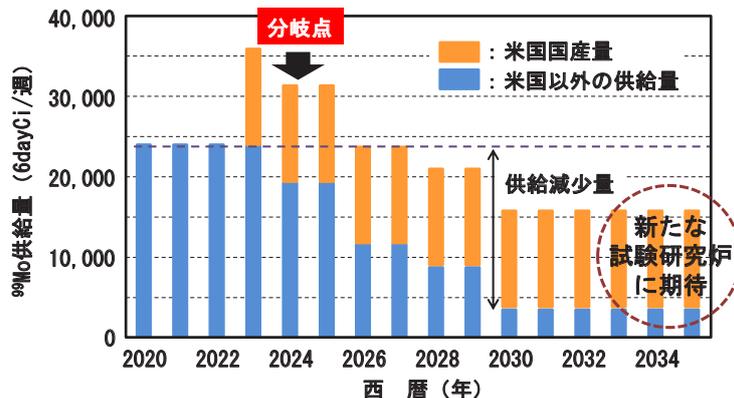


(資料) 「照射試験炉JMTRが拓く科学技術の未来」, 研究・技術計画学会 関西支部講演会 (平成23年6月16日)などを参考に整理

#### 4. 照射試験炉の廃止への影響(5) –産業利用(RI製造)–

ライフイノベーション分野にも波及し、国内RI流通量の約75%を占める<sup>99</sup>Moを初め、種々のRI供給に悪循環を引き起こしている。

2023年以降、日本は、世界で<sup>99</sup>Moを製造せず、大量消費だけを行う唯一の国になる。



多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力関連技術のイノベーションとして、医療用RIの自国の安定供給にも貢献が必要。

(資料) Nuclear Energy Agency, NEA/SEN/HLGMR (2016)2, June, 2016, [www.oecd-nea.org](http://www.oecd-nea.org) Updated HLG-MR Meeting - February, 2017

#### 5. 照射試験炉に係る検討(1) –照射試験炉の調査–

世界における照射試験炉の調査を行い、現状を把握。

炉名	熱出力 (MW)	高速中性子束※1 / 熱中性子束 (n/m <sup>2</sup> /s)	照射設備(ヶ所)		備考	
			垂直照射孔※2	ループ		
運転中	HANARO	30	2.1 × 10 <sup>18</sup> / 4.4 × 10 <sup>18</sup>	32	1	ビームラインあり
	HFR	45	5.1 × 10 <sup>18</sup> / 2.7 × 10 <sup>18</sup>	31	2	ビームラインあり
	CARR	60	6.0 × 10 <sup>18</sup> / 8.0 × 10 <sup>18</sup>	22	1	ビームラインあり
	HFIR	85	1.0 × 10 <sup>19</sup> / 2.5 × 10 <sup>19</sup>	79	0	ビームラインあり
	BR-2	100	6.0 × 10 <sup>18</sup> / 1.0 × 10 <sup>19</sup>	79	不明	
	MIR-M1	100	1.0 × 10 <sup>18</sup> / 5.0 × 10 <sup>18</sup>	13	11	
	SM-3	100	2.0 × 10 <sup>19</sup> / 5.0 × 10 <sup>19</sup>	81	2	
	HFETR	125	1.7 × 10 <sup>19</sup> / 6.2 × 10 <sup>18</sup>	9	1	
	ATR	250	1.8 × 10 <sup>18</sup> / 8.5 × 10 <sup>18</sup>	77	6	
建設中	RA-10	30	3.5 × 10 <sup>18</sup> / 2.1 × 10 <sup>18</sup>	26	1	ビームラインあり
	JHR	100	5.5 × 10 <sup>18</sup> / 3.5 × 10 <sup>18</sup>	36	5	ループ: 最大10
廃止	HBWR	20	0.8 × 10 <sup>18</sup> / 1.5 × 10 <sup>18</sup>	300	11	
	JMTR	50	4.0 × 10 <sup>18</sup> / 4.0 × 10 <sup>18</sup>	200	5※3	
	NRU	135	4.0 × 10 <sup>18</sup> / 1.0 × 10 <sup>18</sup>	12	4	ビームラインあり

※1: 高速エネルギー1MeVと0.1MeVの把握はできない、※2: 照射孔の最大数であり、可能本数、形状は考慮されていない、※3: 許可上の最大ループ数。

(資料) IAEA RRDB(Research Reactor Database)に基づき作成。

## 5. 照射試験炉に係る検討(2) -建設状況の調査-

高出力炉の建設が進んでいるのは、照射試験炉1基、汎用研究炉1基のみ。

項目	JHR(フランス)	RA-10 <sup>※1</sup> (アルゼンチン)
炉心配置図		
主な用途	燃料・材料照射、RI製造	燃料・材料照射、RI製造、NTD製造
出力	100MW	30MW
中性子束 (n/m <sup>2</sup> /s)	熱 : 3.5 × 10 <sup>18</sup> 高速 : 5.5 × 10 <sup>18</sup> (E>1MeV)	熱 : 2.1 × 10 <sup>18</sup> 高速 : 3.5 × 10 <sup>18</sup> (E>0.1MeV)
実験(照射)孔	最大20ヶ所同時照射	約26ヶ所同時照射
ループ数	5基(将来は、10基)	1基(PWR専用)
運転日数	10cycle/年以上、25-30日/cycle	年間サイクル数：不明、26日/cycle
稼働予定時期	2023 <sup>※2</sup>	2021.6 <sup>※2</sup>

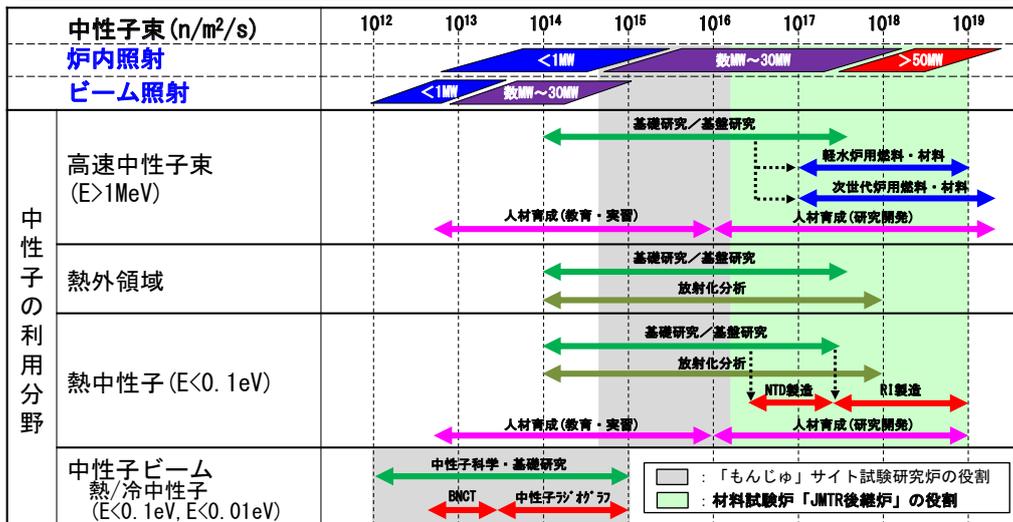
※1：Multipurpose Research Reactor (汎用研究炉)、※2：東日本大震災以降、海外でも原子力に係る規制が強化され、工期が遅延。

(資料) JHR:SAFIR 2018 Interim Seminar, 23-March 2017、RA-10: International Conference on Research Reactors(IAEA, 2011)などを参考に整理

11

## 6. 新たな照射試験炉の必要性(1) -炉性能(中性子束)-

材料試験炉1基(JHR)のみでは、我が国の危機的状況を打開することは不可能。

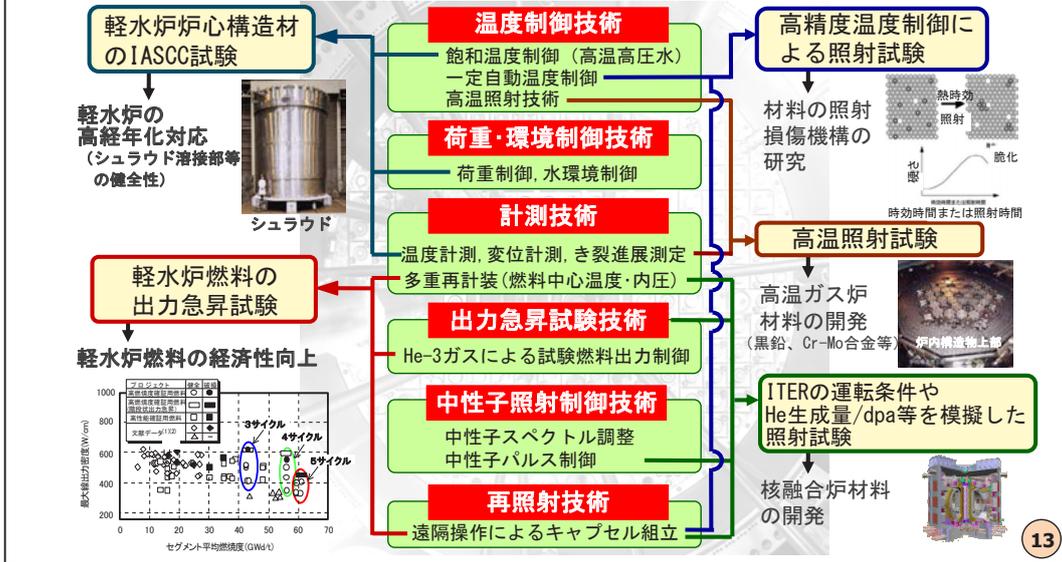


もんじゅサイトの試験研究炉は中性子ビームを主目的とした中出力炉。照射利用を主目的とした新たな照射試験炉の整備体制を早急に構築することが必要。

12

## 6. 新たな照射試験炉の必要性 (2) - 照射技術① -

JMTRで蓄積してきた照射技術を継承し、限られた資源を効果的かつ効率的に活用して、軽水炉のみならず、革新的な原子炉の研究開発を推進。



## 6. 新たな照射試験炉の必要性 (3) - 照射技術② -

照射環境を模擬できる照射設備 (ループ設備) を導入することにより、軽水炉や革新的な原子炉の安全性をより抜本的に高める新技術の創生に繋がる。

	国内ニーズ	JHR	JMTR(参考)	RA-10
ループ設備	軽水炉燃料の異常過渡時限界出力評価及び破損メカニズム解明	可 (-※1)	可 (BWR)	不明
	高温高圧水環境下における軽水炉用構造材材料へ中性子照射試験	可 (PWR & BWR※2)	可 (BWR)	可 (PWR)
	水環境下・中性子スペクトルを制御した原子炉用構造材料の中性子照射試験	可 (PWR & BWR※2)	可 (PWR & BWR)	不明
	チャンネルの腐食、クリープ、曲がり、照射成長、寸法安定性試験	可	可	可
	燃料棒 (燃料ペレット+被覆管) の状態での照射試験	可 (PWR & BWR※2)	可 (BWR)	可 (PWR)
	軽水炉燃料のふるまい、破損しきい値、健全性確認	可	否※3	不明

※1: 照射条件が不明、※2: 欧州はPWRが主流。BWRの多くは操業停止(スウェーデンなど)が決定。 ※3: LOCA試験の検討のみ。

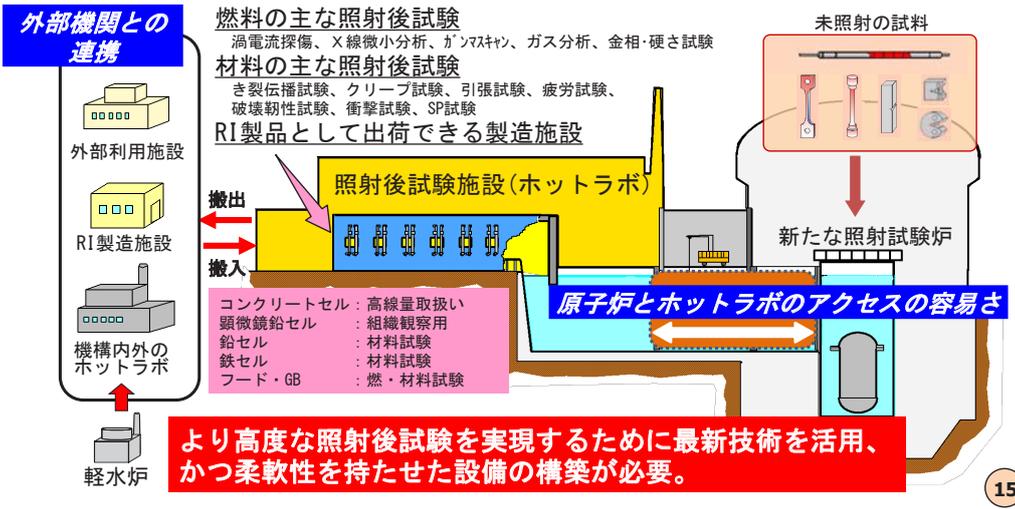
軽水炉から革新的な原子炉への移行も考慮して、ループ設備を含め、各種照射試験への柔軟性を有する機能の特徴とする新たな照射試験炉が必要。

14

## 6. 新たな照射試験炉の必要性(4) - 照射後試験技術 -

照射試験炉の炉設計・建設のみならず、ホットラボ施設の充実が必要不可欠。

JMTRとホットラボ施設はカナルで接続されていたため、照射済試料のアクセスが容易  
(JMTRホットラボ施設の強み → 迅速な照射後試験が可能、照射後試験装置の充実)

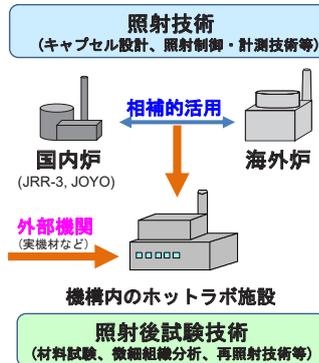


## 6. 新たな照射試験炉の必要性(5) - 新たな照射試験炉までの対応 -

社会的要請のための照射条件は満足しないが、照射研究の基盤維持が必要。

- ・ 国際協力も活用した海外炉、再稼働する試験研究炉等の既存施設を利活用。
- ・ 照射関連基盤技術の衰退、人材等の消失の防止。  
⇒ 新たな照射試験炉の稼働とともに、信頼性の高いデータの取得。

- 多様な研究ニーズに対応するためには、国際協力等による **海外炉の利用**、軽水炉条件を満足しないが国内の **JRR-3及び常陽を相補的に利用**。
- 照射キャプセルの設計及び製作、照射制御・計測技術等の経験を有する **高年齢化している技術者・研究者からの技術習得**。
- 照射研究には照射後試験も不可欠であり、**試験設備の維持、集約化・効率化**とともに、今後ニーズが拡大する実機から採取された照射済試料の再照射試験等に対応するための **ホットラボ施設の機能拡張**。



照射研究の基盤維持、技術継承と人材育成のための国際共同プログラムの構築

16

## 7. 新たな照射試験炉の実現に向けて(1)－運営の基本的考え方－

JMTRが再稼働を目指した時の基本的考え方を発展させ、新たな照射試験炉を効率的・効果的に運用する体制を再構築することが必要不可欠。

### 魅力的な照射試験の提案

- ・ 新技術の開発
- ・ 近隣の照射後試験施設群の活用

技術的価値の高い  
照射データの提供

### 国際的拠点化の達成

- ・ 国際会議等を通じた照射試験の世界標準化に向けた活動
- ・ OECD/NEA等の国際機関や研究者との国際共同研究の提案

国際的に活用される  
研究基盤の構築

### ユーザーフレンドリーな運営

- ・ 技術支援体制の充実等
- ・ 透明性を持った運営
- ・ 利用性向上の実現 等

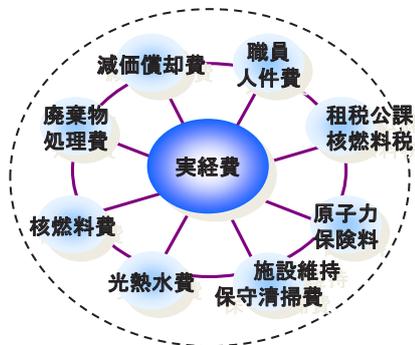
多くの利用者にとって  
使いやすい環境を実現

17

## 7. 新たな照射試験炉の実現に向けて(2)－今後の検討項目－

### (1) 利用料金

- JMTR運転経費の合理化。
- 世界の照射試験炉と比べて魅力ある照射費用の実現。
- 利用収入を増加し、国庫負担の低減。

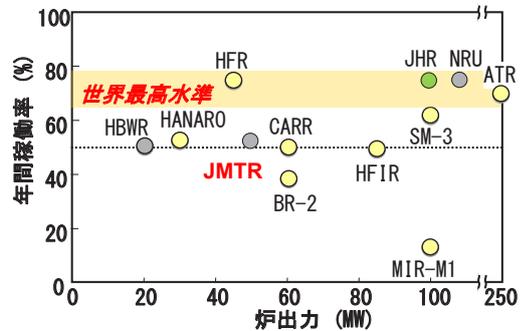


照射試験炉の運用あつたての主な経費内訳

### (2) 稼働率の向上

世界レベルの稼働率（～70%以上）を実現することが必要。

- 原子炉停止中作業の最適化
- 原子炉停止及び定期検査期間中の作業の効率化
- 燃料費のコスト低減化



主な照射試験炉の稼働率

18

## 8. まとめ

文科省 原子力科学技術委員会 原子力研究開発基盤作業部会の「**中間まとめ**」

- 短・中期的視点：国内の試験研究炉の早期運転再開と**海外施設の利活用**
- 長期的視点：JMTR後継炉としての安全研究や材料照射研究を担う新たな**照射炉の建設に向けた検討**を進めることが必要。

原子力機構内に「**JMTR後継炉検討委員会**」を立ち上げ、概略仕様の検討を実施。



- 我が国における社会的要請である軽水炉の安全性・信頼性・効率性向上のための技術開発、革新的な原子炉開発及び原子力関連技術(RI製造、技術者・研究者の育成)のイノベーションの促進のための照射機能が失われる危機的状況。
- もんじゅサイトの試験研究炉は中性子ビームを主目的とした中出力炉であることから、新たな照射試験炉を早期に運用し、我が国の危機的状況を打開するための有用な成果を挙げるが必要不可欠。

19

## 【参考】試験研究炉に係るこれまでの検討経緯

**1998年以降、研究用原子炉のあり方については、日本学術会議や原子力委員会等で議題として取り上げられ、提言等として発信。**

**日本原子力産業会議(現日本原子力産業協会)**

- 1998年(平成10年) 「研究炉に関する検討懇談会」が発足。研究炉に関わる諸問題を検討し、研究炉の在り方について見直し、将来に向けた展望を国および産業界に提案する作業が開始。

- 2000年(平成12年) 研究炉のあり方検討報告書

**日本学術会議**

- 2008年(平成20年) 我が国における放射性同位元素の安定供給体制について(提言)
- 2013年(平成25年) 研究用原子炉のあり方について(提言)
- 2018年(平成30年) 研究と産業に不可欠な中性子の供給と研究用原子炉の在り方(提言)

**原子力委員会**

- 2016年(平成28年) 我が国における研究炉等の役割について(中間報告)

**文部科学省**

- 2018年(平成30年) 原子力科学技術委員会 原子力研究開発基盤作業部会 中間まとめ  
その他、本課題については、学協会の中でも報告書等にまとめられている。

**最低でも異なった2つの機能を有する試験研究炉が必要。  
ビーム利用 ⇒ もんじゅサイトの試験研究炉の整備が着手  
照射利用 ⇒ 新たな照射試験炉の整備を早急に検討**

## 4-2 JMTR 後継となる新たな照射試験炉の建設に向けた検討状況

原子力機構 神永 雅紀、竹本 紀之、綿引 俊介

### 1. はじめに

原子力機構大洗研究所に設置されている材料試験炉 JMTR は、昭和 43 年に初臨界を達成して以来、発電用軽水炉燃料、材料照射試験、RI 製造等に利用され、我が国の原子力研究開発に多くの貢献を行ってきた照射試験炉であった。平成 18 年に一旦停止し、再稼働に向けて平成 19 年度から 4 年間をかけて改修を行ったが、平成 23 年 3 月 11 日の震災により再稼働できず、その後、平成 25 年 12 月に施行された新規制基準に対応するためには、平成 28 年時点で、さらに約 7 年と約 400 億円が必要であること、再稼働後の高経年化対応継続等を考慮する必要があることから照射試験を高稼働率で実施できないこと等が判明した。このような状況を踏まえ、原子力機構は平成 29 年 4 月公表の「施設中長期計画」において、JMTR を廃止検討施設として位置付けた。

一方、平成 30 年 4 月に策定された原子力科学技術委員会原子力研究開発基盤作業部会の間接まとめにおいて、我が国の照射試験炉利用に関する長期的な展望から、「原子力機構は、照射機能の重要性や海外施設利用に係る課題を認識しつつ、関係機関の利用ニーズを踏まえ、共働して JMTR 後継としての安全研究や材料照射研究を担う新たな照射炉の建設に向けた検討を進める。」との方針が示された。このような背景から、原子力機構は、「JMTR 後継炉検討委員会」（以下「後継炉検討委員会」という。）を理事長の下に設置し、JMTR の後継となる新たな照射試験炉（以下「新照射試験炉」という。）の建設に向けた検討等について討議を進めてきた（これまでに平成 31 年 3 月 26 日、令和元年 7 月 1 日及び令和 2 年 9 月 3 日の計 3 回開催）。

### 2. JMTR 後継となる新たな照射試験炉の概略仕様の検討状況

原子力機構では、後継炉検討委員会の下で文献調査や後継炉検討委員会委員、研究者、事業者等へのヒヤリング・アンケート等による社会的要請・利用ニーズの調査を行い、新照射試験炉に要求される中性子束、温度条件、照射雰囲気、同時照射孔数等の照射性能について検討し、「新照射試験炉が担うべき照射性能」として整理した。また、新照射試験炉の概略仕様を検討するうえで、(1) 新照射試験炉が担うべき照射性能の他、(2) 照射利用の早期開始、(3) 利用性、(4) 将来のニーズの変遷への対応についても考慮する必要があることがわかった。これらを踏まえて新照射試験炉の概略仕様について検討した結果について報告する（図 1 参照）。

### 3. 今後の予定

新照射試験炉の概略仕様の検討結果については、「新たな照射試験炉の建設に向けたワークショップ」の結果を踏まえて必要に応じて見直し、令和 2 年度中に文部科学省に報告書を提出予定である。

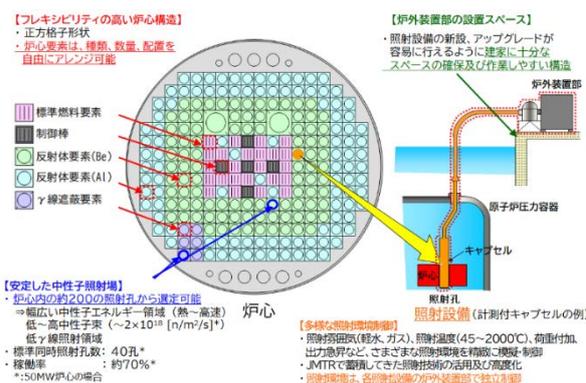


図 1 新たな照射試験炉の概略検討

### キーワード：

JMTR、照射試験炉、概略仕様

新たな照射試験炉の建設に向けたワークショップ  
令和2年12月22日～23日 FUKURACIA 丸の内オアゾ(リモート接続との併用によるハイブリッド開催)

# JMTR後継となる新たな照射試験炉の 建設に向けた検討状況

令和2年12月23日

国立研究開発法人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

神永 雅紀、竹本 紀之、綿引 俊介

## 目次

1. はじめに
  - 1.1 JMTRの概要
  - 1.2 JMTRの廃止決定及び新たな照射試験炉の検討開始
2. 新たな照射試験炉に必要な機能の検討
  - 2.1 概略仕様の検討において考慮すべき事項
  - 2.2 新照射試験炉が担うべき照射性能
3. 概略仕様の検討
  - 3.1 概略仕様の検討フロー
  - 3.2 炉型の選定
  - 3.3 炉心検討
  - 3.4 概略仕様
  - 3.5 概略仕様の評価
4. まとめ

## 1.1 JMTRの概要

JMTR(Japan Materials Testing Reactor, 材料試験炉)は、「原子炉を作るための原子炉」といわれ、世界の試験炉・研究炉の中で有数の高い中性子を発生することができ、原子炉の燃料、材料の耐久性、健全性の試験や基礎研究、RI(ラジオアイソトープ)の製造等に用いられてきた。

建設開始 : 1965.3(S40)  
 初臨界 : 1968.3(S43)  
 供用開始 : 1970.9(S45)  
 運転停止 : 2006.8(H18)  
 廃止措置計画申請 : 2019.9(R1)

165サイクルの供用運転

熱出力 : 50 MW  
 高速中性子束 : (最大)  $4 \times 10^{18}$  n/m<sup>2</sup>·s  
 熱中性子束 : (最大)  $4 \times 10^{18}$  n/m<sup>2</sup>·s  
 照射領域 : 約60の照射孔で同時照射可能

**原子炉建家**

**カナル(水路)**

**ホットラボ**

コンクリートセル	: 8
顕微鏡鉛セル	: 4
新セル	: 7
鉄セル	: 5

**原子炉と照射設備**

- 世界的にも高い中性子束を有する照射試験炉
- 多種多様な試験のため炉心に大型の照射孔
- 柔軟な炉心構成により、さまざまな照射装置を炉心に設置可能
- 原子炉建家と燃料及び材料の照射後試験を実施するためのホットラボがカナル(水路)により接続

2

## 1.2 JMTRの廃止決定及び新たな照射試験炉の検討開始

### ○ JMTRの廃止決定

- ・ JMTRは、平成25年12月に施行された新規規制基準対応において、平成28年時点で、**耐震補強等にさらに約7年と約400億円が必要**であること、再稼働後の高経年化対応継続により**照射試験を高稼働率で実施できないこと**等が判明。これをうけ、**原子力機構は「施設中長期計画(H29.4)」において、JMTRを廃止検討施設として位置付けた。**  
 (令和元年9月に廃止措置計画認可申請を実施し、審査中)

### ○ 原子力科学技術委員会原子力研究開発基盤作業部会の中間まとめにおける提言(H30.4)

「原子力機構は、照射機能の重要性や海外施設利用に係る課題を認識しつつ、関係機関の利用ニーズを踏まえ、共通してJMTR後継としての**安全研究や材料照射研究を担う新たな照射炉の建設に向けた検討を進めることが必要。**」

### JMTRの後継となる新たな照射試験炉の検討開始

- ・ 原子力機構は、理事長の下に機構内外の有識者で構成する「JMTR後継炉検討委員会」を設置し、**JMTRの後継となる新たな照射試験炉(以下「新照射試験炉」という。)**の建設に向けた検討等を開始。  
 (これまでに平成31年3月26日、令和元年7月1日及び令和2年9月3日の計3回開催)

#### 【検討事項】

- ・ 利用ニーズの再整理(将来の利用ニーズ動向を含む)
- ・ 海外施設利用に関する検討(中性子照射に関する技術動向の調査含む)
- ・ **新照射試験炉の概略仕様の検討**
- ・ 報告書の作成

3

- 185 -

## 目次

1. はじめに
  - 1.1 JMTRの概要
  - 1.2 JMTRの廃止決定及び新たな照射試験炉の検討開始
2. 新たな照射試験炉に必要な機能の検討
  - 2.1 概略仕様の検討において考慮すべき事項
  - 2.2 新照射試験炉が担うべき照射性能
3. 概略仕様の検討
  - 3.1 概略仕様の検討フロー
  - 3.2 炉型の選定
  - 3.3 炉心検討
  - 3.4 概略仕様
  - 3.5 概略仕様の評価
4. まとめ

## 2.1 概略仕様の検討において考慮すべき事項

国・学会会議の提言、国内外研究炉の動向等の調査及び JMTR後継炉検討委員会委員等へのヒアリング・アンケート調査を行い、概略仕様の検討において考慮すべき事項を抽出

### 社会的要請・利用ニーズ

#### 原子力研究開発に係る安全性向上に関する利用

- 軽水炉の高度化(燃料、材料)に係る継続的な取組み
- 新型炉・次世代炉(SMR等)導入後における継続的な取組み

#### 科学技術・学術の向上に関する利用

- 軽水炉用材料照射損傷に関する基礎研究
- 新型炉・次世代炉開発(SMR等)に関する基礎研究
- 放射化分析、年代測定

#### 産業利用

- 医療用RIの製造  
Mo-99、Ir-192、Au-198、Ra-223等
- 工業用RIの製造  
Ir-192、Co-60等

#### 人材育成

- 原子力に係る人材確保
- 照射試験に係る技術の維持・向上

### 新照射試験炉の概略仕様の検討において考慮すべき事項

#### ○新照射試験炉が担うべき照射性能

- ・炉心検討  
中性子束、中性子スペクトル、照射孔、照射温度、照射雰囲気
- ・照射試験装置  
高度な試験(BWR,PWR模擬、燃料ループ等)、運転中計測(燃料棒伸び、温度、均一温度制御等)

#### ○照射利用の早期開始

- ・長期的ニーズ(5~20年)及び超長期的ニーズ(20年~)を対象

#### ○利用性

- ・ホットラボ、加工工場等の併設、利用料金の最適化

#### ○将来のニーズの変遷への対応

- ・将来に想定される様々な照射試験に対応

4

## 2.2 新照射試験炉が担うべき照射性能(1/2)

### ○炉心検討に係るループ装置、対象試験体、冷却材環境、中性子束、照射孔数

No.	分野	ループ装置	対象試験体	冷却材環境	中性子束(n/m <sup>2</sup> /s) (照射量(n/m <sup>2</sup> ))	照射孔数
1	軽水炉の高度化・安全研究	燃料棒出力急昇試験装置	軽水炉燃料(既存のUO <sub>2</sub> -Zr基被覆管の他、事故耐性燃料含む)	BWR, PWR	$\Phi_{th}$ : $\sim 2 \times 10^{18}$ (到達可能最高線出力: 600W/cm以上)	1
2	軽水炉の高度化・安全研究	IASCC試験装置	SUS、炭素鋼、Ni合金(X750等)	BWR, PWR	$\Phi_f$ : $\sim 2 \times 10^{18}$ (照射量: $\sim 5 \times 10^{26}n/m^2$ )	5
3	軽水炉の高度化・安全研究	軽水炉水化学試験装置	炉心構造材(SUS等)	BWR, PWR	$\Phi_f$ : $\sim 1 \times 10^{18}$ (照射量: $\sim 1 \times 10^{26}n/m^2$ )	1
4	軽水炉の高度化・安全研究	燃料被覆管(Zry, SiC)	燃料被覆管(Zry, SiC)	BWR, PWR	$\Phi_f$ : $\sim 1 \times 10^{18}$ (照射量: $\sim 1 \times 10^{26}n/m^2$ )	1
5	軽水炉の高度化・安全研究	燃料棒照射試験装置	軽水炉燃料(バンドル形状)(UO <sub>2</sub> , U化合物)	BWR, PWR	$\Phi_{th}$ : $\sim 2 \times 10^{17}$	4
6	軽水炉の高度化・安全研究	燃料棒照射試験装置	軽水炉燃料(バンドル形状)(MOX)	HP-ABWR, HP-APWR, RBWR	$\Phi_{th}$ : $\sim 2 \times 10^{17}$	4
7	軽水炉の高度化・安全研究	LOCA模擬試験装置	軽水炉燃料(既存のUO <sub>2</sub> -Zr基被覆管の他、事故耐性燃料含む)	BWR, PWR	$\Phi_{th}$ : $\sim 2 \times 10^{18}$	1
8	新型炉・次世代炉開発	小型炉燃料/材料照射試験装置	燃料棒 燃料被覆管 構造材	-	$\Phi_f$ : $\sim 2 \times 10^{18}$ (照射量: $\sim 1 \times 10^{26}n/m^2$ )	1

計 18

BWR(HP-ABWR)環境(軽水):約290℃、約7MPa  
PWR(HP-APWR)環境(軽水):約320℃、約15MPa

5

## 2.2 新照射試験炉が担うべき照射性能(2/2)

### ○炉心検討に係るキャプセル、対象試験体、冷却材環境、中性子束、照射孔数

No.	分野	キャプセル	対象試験体	冷却材環境	中性子束(n/m <sup>2</sup> /s) (照射量(n/m <sup>2</sup> ))	照射孔数
1	軽水炉の高度化・安全研究	高温高圧水環境下における軽水炉用構造材の中性子照射試験	SUS316L SUS304, SUS316	不活性ガス雰囲気, 290℃~320℃	$\Phi_f$ : $\sim 2 \times 10^{18}$ (照射量: $\sim 3 \times 10^{25}n/m^2$ )	5
2	軽水炉の高度化・安全研究	原子炉圧力容器鋼の照射脆化研究	低合金鋼	不活性ガス雰囲気, 290℃(均一照射)	$\Phi_f$ : $\sim 1 \times 10^{17}$ (照射量: $\sim 1 \times 10^{24}n/m^2$ )	4
3	軽水炉の高度化・安全研究	軽水炉燃料の照射試験	軽水炉燃料(既存UO <sub>2</sub> -Zr基被覆管, MOXの他、事故耐性燃料含む)	不活性ガス雰囲気, 290℃~320℃	$\Phi_{th}$ : $\sim 2 \times 10^{17}$	2
4	軽水炉の高度化・安全研究	中性子検出器の試験	-	-	$\Phi_f$ : $10^{13} \sim 10^{16}$	1
5	材料照射損傷等に関する基礎研究	ADS用材料の中性子照射研究	フェライト鋼	Pb-Bi雰囲気, RT~600℃	$\Phi_f$ : $\sim 2 \times 10^{18}$ (照射量: $\sim 1 \times 10^{27}n/m^2$ )	1
6	材料照射損傷等に関する基礎研究	照射損傷機構解明	炭素鋼, SUS, シルカロイ等	不活性ガス雰囲気, 真空 雰囲気, 水雰囲気, 300℃で精密温度制御	$\Phi_f$ : $\sim 1 \times 10^{18}$ (照射量: $\sim 5 \times 10^{24}n/m^2$ )	2
7	新型炉・次世代炉開発	核融合炉内構造物の材料照射	高Crフェライト・マルテンサイト鋼(F82H)	不活性ガス雰囲気, 真空 雰囲気, 250~550℃	$\Phi_f$ : $\sim 1 \times 10^{18}$ (照射量: $\sim 1 \times 10^{26}n/m^2$ )	1
8	産業利用	RI製造	医療用:Ir-192, Au-198, Ra-223等 工業用:Ir-192, Co-60等	-	$\Phi_{th}$ : $\sim 2 \times 10^{18}$	3
9*	材料照射損傷等に関する基礎研究	放射化分析、年代測定	岩石、純金属等	不活性ガス雰囲気, 真空 雰囲気, 100~300℃で 精密温度制御	$\Phi_f$ : $\sim 1 \times 10^{18}$ (照射量: $\sim 1 \times 10^{24}n/m^2$ )	1
10*	産業利用	RI製造	Mo-99等	-	$\Phi_{th}$ : $\sim 2 \times 10^{18}$	2

\*:水カラビット照射装置

計 22

6

## 目次

1. はじめに
  - 1.1 JMTRの概要
  - 1.2 JMTRの廃止決定及び新たな照射試験炉の検討開始
2. 新たな照射試験炉に必要な機能の検討
  - 2.1 概略仕様の検討において考慮すべき事項
  - 2.2 新照射試験炉が担うべき照射性能
3. 概略仕様の検討
  - 3.1 概略仕様の検討フロー
  - 3.2 炉型の選定
  - 3.3 炉心検討
  - 3.4 概略仕様
  - 3.5 概略仕様の評価
4. まとめ

### 3.1 概略仕様の検討フロー



**【検討項目】**

- (1) 新照射試験炉及びホットラボの主要仕様
- (2) 建家の構成及び各施設・設備の基本概念
- (3) 利用性の向上
- (4) 設計方針

**【評価項目】**

- (1) 照射性能(新照射試験炉が担うべき照射性能)
- (2) 照射利用の早期開始
- (3) 利用性
- (4) 将来のニーズの変遷への対応

### 3.2 炉型の選定

	中性子束 $\phi$ (n/m <sup>2</sup> /s)		照射環境		照射領域	
	高速 $\phi_f$ (最大)	熱 $\phi_{th}$ (最大)	温度条件	照射雰囲気	同時照射孔数	
新照射試験炉が担うべき 主な照射性能	2×10 <sup>18</sup>	2×10 <sup>18</sup>	RT~ 600°C	軽水、不活性ガス、 Pb-Bi	40	
高速炉	「常陽」 <sup>[1],[2]</sup> [100MW*1]	2.9×10 <sup>19</sup>	—	456°C*3~	不活性ガス	5
高温ガス炉	HTTR <sup>[3]</sup> [30MW]	2.0×10 <sup>17</sup>	7.0×10 <sup>17</sup>	850°C*3~	不活性ガス	23
沸騰水型炉	HBWR <sup>[4],[5]</sup> [20MW]	0.8×10 <sup>18</sup>	1.5×10 <sup>18</sup>	240°C*3~	軽水、不活性ガス	30
水冷却型炉	JMTR <sup>[5]</sup> [50MW]	2.4×10 <sup>18</sup> *2	4.4×10 <sup>18</sup> *2	45°C*3~	軽水、不活性ガス	60(最大108)

\*1: 設置変更許可申請書(2018年10月26日補正)について審査中  
 \*2: JMTR(改良LEU炉心)の照射位置における炉心計算による評価値[Max.] \*3: 冷却材温度  
 [1] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 大洗研究所(南地区)高温実験炉原子炉施設(「常陽」)の原子炉設置変更許可申請の概要(2018年10月26日補正内容を含む), 2018年11月12日.  
 [2] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 大洗研究所(南地区)高温実験炉原子炉施設(「常陽」)第32条(炉心等)に係る説明書(その2:第32条第4項), 2019年3月18日.  
 [3] 日本原子力研究開発機構 照陽炉の代替機について, 原子力科学技術委員会 原子力研究開発基盤整備作業部会(第2回), 2017年5月29日.  
 [4] 花井 裕規/ハルゲン社における共同商標登録の取扱い調査 JAEA-Review 2012-018.  
 [5] H. Eriksson et al. Evaluation of the Swedish participation in the Halden Reactor Project, 2016:29.

○水冷却型炉が「新照射試験炉が担うべき照射性能」への適応性が最も高い。

○さらに、水冷却型炉のうちJMTRは、**利用性、将来のニーズの変遷への対応性、照射利用の早期開始**の観点においても有用な特徴\*を有しているため、**JMTR炉心をベースに新照射試験炉の検討を実施**

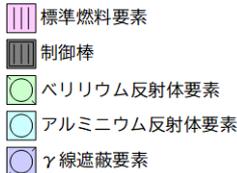
\*: 多種多様な照射装置の運用実績、38年間の豊富な原子炉の運転実績、炉心構成の変更が容易かつ幅広い照射領域による高い汎用性、国産炉としての設計実績、燃料の調達実績等

### 3.3 炉心検討 -ベース炉心-

○ JMTR炉心を基に新照射試験炉のベース炉心を検討

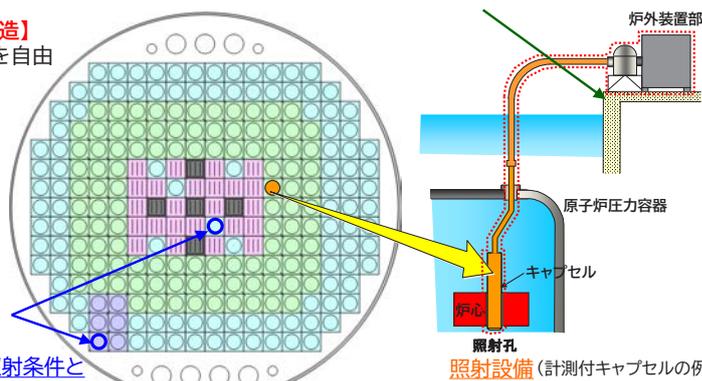
**【フレキシビリティの高い炉心構造】**

- 炉心要素の種類、数量、配置を自由にアレンジし、炉心を構成



**【安定かつ最適な照射場の提供】**

- 世界レベルの稼働率の確保
- 約200の照射孔から最適な照射条件となる照射孔を選択して照射試験を実施
- 低γ線照射領域
- 数十の同時照射



**【炉外装置部の設置スペースの確保】**

**【多様な照射環境制御】**

- 照射環境は各照射設備の炉外装置部で独立制御
- JMTRで蓄積してきた照射技術の活用・高度化

○ 炉心要素、炉心構成、運転出力が変更しやすい炉心構造 ⇒ **中性子照射場の最適化**  
 ○ 照射設備(炉外装置含む)が新設、アップデートしやすい建家構造 ⇒ **新たな照射環境の模擬や照射環境制御の高度化**

➡ ○ ベース炉心を基に、**50MW炉心、100MW炉心、50MWコンパクト炉心**の3ケースについて炉心検討を実施  
 ○ これまでのJMTRの運転保守で得た知見、課題等を調査し、改善提案等を概略仕様へ反映

### 3.4 概略仕様 -新照射試験炉の主要仕様(1/2)-

	50MW炉心	100MW炉心	50MWコンパクト炉心
炉心	発電炉等の燃料・材料の照射試験、RI製造、人材育成		
使用の目的	軽水減速冷却タンク型*1		
炉型	軽水減速冷却タンク型*1		
熱出力 [MW]	50	100	50
高速中性子束 (照射位置) [ $m^{-2}\cdot s^{-1}$ ]	$\sim 2 \times 10^{18}$	$\sim 4 \times 10^{18}$	$\sim 4 \times 10^{18}$
熱中性子束 (照射位置) [ $m^{-2}\cdot s^{-1}$ ]	$\sim 2 \times 10^{18}$	$\sim 4 \times 10^{18}$	$\sim 2 \times 10^{18}$
燃料要素	板状燃料		
$^{235}U$ 濃縮度 [%] / 燃料芯材	約20% / $U_3Si_2$ -Al分散型合金*2		約20% / 未定*3
出力密度 [ $MW/m^3$ ]	425	850	790
冷却材(一次系)	軽水		
入口温度 [°C] / 出口温度 [°C] / 流量 [ $m^3/h$ ]	最高49 / 約56 / 約6000	最高49 / 約58 / 約9400	—
圧力 [MPa] / 流路方向 / 流速 [m/s]	約1.5 / 下降流 / 約10	約3.5 / 下降流 / 約17	—
減速材 / 反射材 / 制御材	軽水 / ベリリウム / ハフニウム		
反射体要素等	ベリリウム反射体要素 / アルミニウム反射体要素 / ガンマ線遮蔽要素		
炉心直径 [mm] / 実効高さ [mm]	1560 / 750		1560 / 650
燃料要素本数(フクロフ含む) / 制御棒本数	29本 / 5本		18本 / 6本
燃料交換バッチ / $^{235}U$ 量 [kg]	3バッチ / 11以下		2バッチ / —
炉心形状 / 格子寸法	格子型 / 77.2mm角		格子型 / 77.2mm角
同時照射孔数	40以上		30以上
照射設備	キャプセル照射装置(C*)、水カラビット照射装置(HR*)、ループ照射装置(出力急昇試験装置、IASCC試験装置、軽水炉水化学試験装置、燃料体(バンドル燃料)照射試験装置、燃料棒LOCA試験装置、小型炉燃料棒照射試験装置)(L*)		
運転日数 [日/Cy]	28	14	31
稼働率 (%)	約70	約60	約70
その他(共通)	キャプセル等の有効寸法 : $\phi 32, \phi 40, \phi 60, \phi 65, \phi 110$ 照射温度 : 約45°Cから約2000°Cの幅広い照射温度で制御可能 照射雰囲気 : 軽水、不活性ガス(Pb-Biについては要検討) 炉心の照射領域 : 200程度の照射孔から選択可能、低 $\gamma$ 線照射領域の設定		

\*1 : 熱的検討の結果、スイングプール型は不可

\*2 : U-Mo燃料への置き換えも視野

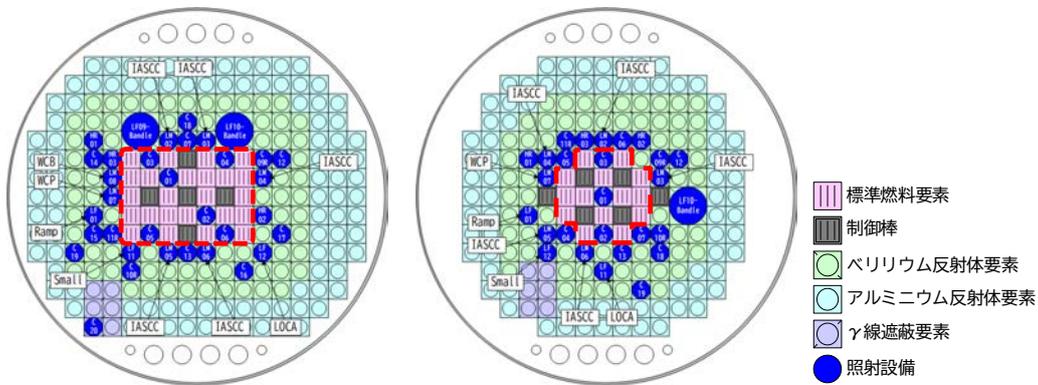
\*3 : 新燃料の開発が必須(核的検討では、U-Mo燃料導入を視野に燃料中の $^{235}U$ 等の密度を2倍に設定し、かつ、短尺化)

10

### 3.4 概略仕様 -新照射試験炉の主要仕様(2/2)-

#### ○ 新照射試験炉で行える主な照射試験等

主な照射試験	無言計測照射試験、高精度温度制御照射試験、高温照射試験、IASCC試験、軽水炉実機環境模擬照射試験、軽水炉燃料出力急昇試験、再照射試験、LOCA試験、RI製造(短半減期RI含む)
主な計測制御技術	精密温度制御技術、運転中計装技術、荷重・環境制御技術(水化学)、出力急昇試験技術、実機照射材再照射技術、LOCA試験技術



50MW炉心及び100MW炉心の炉心配置(同じ炉心配置)

50MWコンパクト炉心の炉心配置(燃料装荷本数減少によるコンパクト化)

燃料領域

11

### 3.4 概略仕様 -ホットラボの主要仕様-

#### ○ ホットラボの主要仕様 新照射試験炉で照射した試料に係る全ての照射後試験を行えるように設計

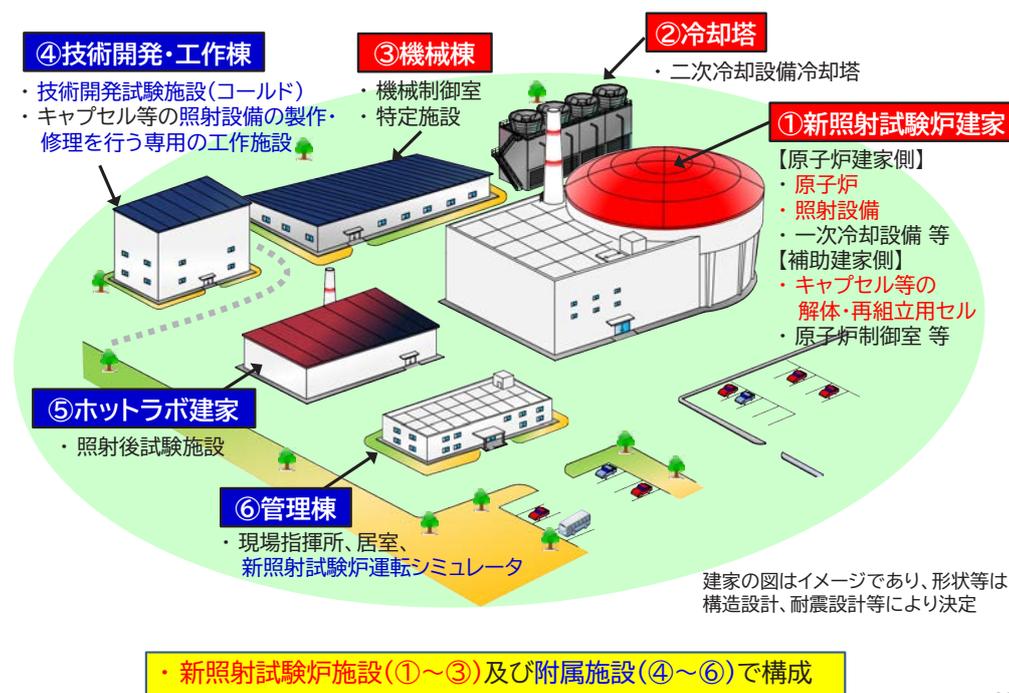
セル	$\beta$ $\gamma$ コンクリートセル 6基、 $\beta$ $\gamma$ コンクリートセル付属鉄(鉛)セル 3基 $\alpha$ $\gamma$ コンクリートセル 2基、 $\alpha$ $\gamma$ コンクリートセル付属鉄(鉛)セル 3基(インナーボックス仕様) 材料試験用鉄セル 5基、RI用鉄セル 4基
照射後試験装置	キャプセル搬出入装置、キャプセル解体装置、キャプセル組立装置(溶接装置)、外観検査装置、放電加工装置、寸法測定装置、 $\gamma$ スキャンニング装置、X線撮影装置(CT-X線)、渦流探傷測定装置、陽電子消滅試験装置、パンクチャー(ガス補修装置)、重量密度測定装置、精密切断機、研磨機、樹脂注入装置、金属顕微鏡、EPMA(XMA)、微小硬度計、X線回折装置、引張試験機、衝撃試験機、疲労試験機、破壊靱性試験装置、IASCC試験装置、クリープ試験機、SEM/EBSD、イオンミリング、イオンスパッタ、超音波探傷試験装置、熱処理試験装置、透過型電子顕微鏡(TEM)、SEM/FIB、XPS、FE-SEM、FPガス分析装置、ナノインデント、 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 分離濃縮、抽出装置
その他	照射済試料を速やかに移送するため、新照射試験炉と接続又は隣接

#### ○ ホットラボで行える主な照射後試験

$\alpha$ $\gamma$ セル系	外観検査、寸法測定、パンクチャー試験、重量密度測定、試料切断、金相試料作成、微小硬度測定、 $\alpha$ 対心SEM/EPMA、金属顕微鏡(組織観察)
$\beta$ $\gamma$ セル系	試料搬入・搬出・貯蔵、外観検査、試料加工・解体、再照射キャプセル組立、放電加工、非破壊検査(X線、 $\gamma$ スキャン、渦流探傷、寸法測定)、パンクチャー試験、重量密度測定、IASCC試験、試料切断、金相試料作成、SEM/EPMA、金属顕微鏡(組織観察)、微小硬度測定、X線回折
材料試験用鉄セル系	試料搬入・搬出、試料貯蔵、引張試験、疲労試験、衝撃試験、破壊靱性試験、IASCC試験、クリープ試験、破面観察(SEM、EBSD)、試料調整(イオンミリング、イオンスパッタ)、超音波探傷試験、陽電子消滅試験、熱処理試験、超微小硬度測定
$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製造用鉄セル系	試料搬入・搬出、試料貯蔵、インナーキャプセル解体、 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 分離濃縮、抽出
微細組織解析室	TEM、TEM試料作成(SEM/FIB)、破面観察(FE-SEM、EBSD)、XPS、FPガス分析

12

### 3.4 概略仕様 -建家の構成-



13

### 3.4 概略仕様 -各施設・設備の基本概念-

施設・設備名		区域設定	耐震クラス	主な構成機器
新照射試験炉 建家	原子炉建家	管理区域	Sクラス 含む	炉心、原子炉圧力容器、炉プール、カナル、一次冷却設備機器、プール循環設備機器、制御棒駆動機構、バックアップスクラム装置、照射設備制御盤、キュービクル、放射線管理設備、排水貯留タンク、保管廃棄施設、物品保管室、天井走行クレーン等
	補助建家	管理区域		カナル、使用済燃料貯蔵施設、ラック台車、プール循環設備機器、新燃料貯蔵施設、保管廃棄施設、分析室、照射準備室、廃液タンク、排気筒、排気設備機器、コンクリートセル、セル操作室、サービスエリア、天井走行クレーン、汚染検査室等
		非管理区域 (保全区域)		原子炉制御室、照射制御室、機器盤、非常用発電機等
機械棟	非管理区域 (保全区域)	Cクラス	機械制御室、特定施設(給気設備、二次冷却設備ポンプ室、冷凍機、ボイラー、純水製造設備、圧空設備、ユーティリティ冷却設備、電気設備等)	
冷却塔	非管理区域 (保全区域)	Cクラス	二次冷却設備用冷却塔	
ホットラボ建家	管理区域	Bクラス	$\beta$ $\gamma$ コンクリートセル・付属鉄(鉛)セル、 $\alpha$ $\gamma$ コンクリートセル・付属鉄(鉛)セル、材料試験用鉄セル、RI用鉄セル、インセルクレーン、微細組織解析室、セル操作室、サービスエリア、フロッグマンシステム、天井走行クレーン、汚染検査室、除染室、照射後試験装置、気体廃棄設備、排水貯留タンク、保管廃棄施設、放射線管理設備、制御室等	
	非管理区域 (保全区域)		機械制御室、電気設備、非常用電源設備、空気圧縮設備、給気設備、フロッグマンエア供給設備、排水ポンプ設備等	
管理棟	一般区域	一般施設	現場指揮所、居室、新照射試験炉運転シミュレータ	
技術開発・工作棟	一般区域	一般施設	技術開発試験施設、工作施設	

14

### 3.4 概略仕様 -利用性の向上に係る検討(1/2)-

#### ○ ユーザーフレンドリーな運営の検討

JMTR運転時の施設運営における課題やハルデン炉等の運営などを踏まえ、新照射試験炉の設置後における施設運営について検討

#### 国際的拠点として国際協力体制を構築

- ・ 照射試験炉に関する国際会議の開催
- ・ 海外照射試験炉との国際協力

情報共有、共通の課題に対する議論・協力、海外からの利用、海外炉との相互補完利用の推進

#### 新照射試験炉に係る運営委員会の設置

- ・ 新照射試験炉の運営、照射利用について討議
- ・ 国内産学官が参画

透明性の確保、ユーザー視点の運営に寄与

#### 新照射試験炉の運用・管理体制の整備

##### 新照射試験炉センター

##### 照射利用専門部署

- ・ 照射利用の窓口対応
- ・ 照射利用計画の管理
- ・ 照射利用の促進\*
- ・ 海外炉との相互補完利用対応

##### 新照射試験炉管理部署

- ・ 計画管理
- ・ 照射設備等の設計、製作
- ・ 原子炉施設等の運転保守
- ・ 照射試験及び照射後試験に係る技術開発

照射利用のコーディネーターを育成・強化し、照射利用に対応

\*: 外部組織との連携も考慮

15

### 3.4 概略仕様 -利用性の向上に係る検討(2/2)-

○ 新照射試験炉を中核とした研究開発拠点構想(照射利用しやすい環境の整備)



利用ニーズに迅速かつ的確に対応できるインフラ・体制の構築

### 3.4 概略仕様 -新照射試験炉の設計方針-

運転面	<ul style="list-style-type: none"> <li>安全動作項目・基準の整理、高信頼性制御方式の適用、機器の多重化・多様化(不要な炉停止の防止)</li> <li>原子炉制御室及び照射制御室を非管理区域に設置(事故対応)</li> <li>機械制御室に原子炉制御室のバックアップ機能付加(事故対応)</li> <li>運転シミュレータの設置(運転技術の維持・向上、国内外人材育成にも活用)</li> <li>冷却系を2ループ構成とし、50MW運転時のバックアップを確保(安定運転)</li> <li>フレキシビリティの高い構造(ニーズ変遷対応)</li> <li>高密度(U-Mo)燃料の適用検討、燃料の高燃焼度化が図れる炉心設計(燃料消費本数低減、稼働率向上)</li> <li>安全かつ合理的な使用済燃料の処理・処分方法</li> </ul>
保守面	<ul style="list-style-type: none"> <li>保守点検・部品交換しやすい施設・設備構造、機器数・部品数の低減、照射設備等のユニット化(保守性)</li> <li>十分な作業スペースの確保、機器盤類は非管理区域に設置し効率管理(保守性)</li> <li>オンラインメンテナンスの拡充、定期事業者検査項目の整理(炉停止期間低減による高稼働率運転)</li> <li>管理区域対象設備を新照射試験炉建家内に集約設置(保守性)</li> <li>冷却塔は、高経年化を考慮し、鋼製又は鉄筋コンクリート製仕様(保守性・安全性)</li> <li>安価な汎用品の適用(調達性・コスト)及び廃止措置を考慮した設計(廃棄物量低減)</li> </ul>
利用面	<ul style="list-style-type: none"> <li>合理的な運転パターン、運転保守体制、低出力運転(高稼働率運転)</li> <li>多数のループ照射設備の設置・リプレースが可能な十分なスペース及び作業しやすい構造(ニーズ変遷対応)</li> <li>臨界実験装置又はシミュレーション環境の整備(新たな炉心構成や照射設備の導入時の評価)</li> <li>新照射試験炉建家にキャプセル等の解体・再組立セルを設置(小型キャスクによる試料の効率移送)</li> <li>照射技術開発用のコールド試験施設を併設(照射設備等の高度化・開発)</li> <li>照射設備の製作・修理等を行う専用の工作施設を併設(利用ニーズに緻密かつ迅速に対応)</li> <li>最適な照射単価の設定方針(建設コストの削減) シリサイト燃料等の確実なProven技術の活用、機器の構成要素数の低減(制御棒駆動機構等)、グレードアップアプローチの適用(50MW炉心)、安価な汎用品の適用、設置場所に存在する施設の有効活用、照射設備の利用者準備等(ランニングコストの低減) 運転・保守コストの低減(運転面及び保守面に記載のとおり)</li> <li>(大容量の照射領域の確保) JMTRと同程度の最大同時照射孔数を確保</li> <li>ホットラボとの接続又は隣室による連携(速やかな試料移送及び再照射試験)</li> </ul>

各施設・設備の詳細設計においては、試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則等の最新の安全基準に適合するとともに本設計方針を考慮し、安全性、信頼性、保守性及び利用性に優れた設計とする。

### 3.5 概略仕様の評価

			50MW炉心	100MW炉心	50MWコンパクト炉心
照射性能	中性子束φ [n/m <sup>2</sup> /s]	高速φ <sub>f</sub> (最大)	○ (2×10 <sup>18</sup> )	○ (4×10 <sup>18</sup> *1)	○ (4×10 <sup>18</sup> *1)
		熱φ <sub>th</sub> (最大)	○ (2×10 <sup>18</sup> )	○ (4×10 <sup>18</sup> )	○ (2×10 <sup>18</sup> )
	温度条件 [°C]		○ (約45~約2000*2)		
	照射雰囲気		○ (軽水、不活性ガス*2)(Pb-Bi要検討)		
	同時照射孔数 [孔]		○ (40以上)	○ (40以上)	△ (30以上)*3
	稼働率 [%]		○ (約70)	△ (約60)	○ (約70)
照射利用の早期開始			○ (早い)	△ (やや遅い*4)	△ (遅い*5)
利用性	ユーザーフレンドリーな運営		○ (国際的拠点化、運営委員会、照射利用専門部署の設置)		
	建設コスト		○ (低)	△ (高*4)	△ (高*5)
	ランニングコスト		○ (低)	△ (高)	○ (低)
	照射利用の環境整備		○ (ホットラボ及び工作施設の併設、研究開発拠点の整備)		
将来のニーズの変遷への対応	炉心のフレキシビリティ		○ (炉心構成の変更が容易)		
	広い照射領域		○ (照射条件に応じて200程度の照射孔から選択可能)		
	照射設備等の新設・アップグレードへの対応		○ (炉室内の十分な設置スペース・作業しやすい構造、技術開発環境施設の併設)		

- \*1: 核加熱率が約2倍になり試料温度が上がりやすくなるため、温度条件によっては試料寸法等の制限が生じる。
- \*2: JMTRの照射実績より
- \*3: 超長期的ニーズ(20年~)に必要な同時照射孔数は確保
- \*4: 「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の「水冷却型研究炉の高出力炉(10MW以上、50MW以下)」を超えるため現状は適用規則がない。安全審査(グレーデッドアプローチ等)の面でもより厳しい要求となる。
- \*5: 新燃料(高密度燃料)の開発(設計、照射試験等)、製作、許認可対応が必要(長期的ニーズ(5~20年)には間に合わない。)

18

### 4. まとめ

- **新照射試験炉の建設に向け、新照射試験炉に求められる社会的要請及び利用ニーズを再整理し、概略仕様の検討において考慮すべき事項として、(1) 新照射試験炉が担うべき照射性能、(2) 照射利用の早期開始、(3) 利用性及び(4) 将来のニーズの変遷への対応の4項目を抽出した。**
- **新照射試験炉の概略仕様について検討し、ホットラボを含む新照射試験炉に係る主要仕様、建家の構成及び各施設・設備の基本概念、利用性の向上並びに設計方針の観点で整理した。その結果、水冷却型炉であるJMTRをベースとした新照射試験炉を設置するとともに、利用者にとって照射利用しやすい環境を整備し、ユーザーフレンドリーな運営を行うことによって、上記4項目に対応できる見通しを得た。その際、最適な炉心は50MW炉心と考えられる。**  
 なお、将来のニーズの変遷への対応の観点からは、将来的に50MW炉心と照射性能の向上が図れる50MWコンパクト炉心など、複数の炉心の許可を取得することにより、照射試験の内容や件数に応じて最適な炉心構成及び運転出力を選択して運転できるようにすることも有効と考える。

#### 【今後の予定】

新照射試験炉の概略仕様の検討結果については、「新たな照射試験炉の建設に向けたワークショップ」の結果を踏まえて必要に応じて見直し、令和2年度中に文部科学省に報告書を提出予定である。

19

## 5. 第5部

### パネルディスカッション

This is a blank page.

## 5-1 パネルディスカッションのテーマ

### パネルディスカッションのテーマ

- ① **新たな照射試験炉に求められる利用ニーズ・持つべき機能について（原子力人材育成を含む）**
  - ・原子力研究開発における利用ニーズ等の整理
  - ・産業利用における利用ニーズ等の整理
  - ・科学技術・学術研究における利用ニーズ等の整理
  - ・原子力人材育成の重要性と新たな照射試験炉の活用方法
  - ・これらの利用ニーズ、社会的要請を踏まえた新たな照射試験炉が持つべき機能
- ② **国内における照射機能の在り方・国内外の他施設との連携について**
  - ・国内が持つべき照射機能と現状のギャップ
  - ・国外施設の利用の課題（エネルギーセキュリティ、輸送・費用、人材・技術の蓄積等）
  - ・相互補完等、国外施設に対して新たな照射試験炉が果たすべき役割
  - ・新たな照射試験炉を設置すべき時期とそれまでの対応（国外施設利用支援等）
- ③ **施設運営・供用の在り方について**
  - ・新たな照射試験炉の建設にかかる費用・期間
  - ・新たな照射試験炉の運転に係る費用・施設供用の在り方
- ④ **今後のワークショップ開催について**
  - ・ワークショップの果たすべき役割
  - ・次回開催時期・テーマ

### ファシリテータ

寺井 隆幸（東京大学 名誉教授）

### パネリスト

関村 直人（東京大学 副学長 大学院 工学系研究科 教授）

永井 康介（東北大学 金属材料研究所 センター長・教授）

小澤 隆（日本電機工業会 原子力部長）

中熊 哲弘（電気事業連合会 原子力部長）

高橋 明男（日本原子力産業協会 特任フェロー）

中村 伸貴（日本アイソトープ協会 医薬品部長）

河村 弘（千代田テクノル 特別参与）

### コーディネータ

中谷 絵理（経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 原子力政策課 課長補佐）

松浦 重和（文部科学省 研究開発局 原子力課長）

青砥 紀身（日本原子力研究開発機構 理事）

三浦 幸俊（日本原子力研究開発機構 理事）

## 5-2 パネルディスカッションでの討議内容

### ① 新たな照射試験炉に求められる利用ニーズ・持つべき機能について（原子力人材育成を含む）

#### ➤ 原子力研究開発における利用ニーズ等の整理

- ・ ニーズについては、誰がどういった形で持っているかを議論することが 1F 事故後 10 年を迎えるにあたり重要である。原子力利用に係る安全性が重要であり、国民及び環境への貢献が必要である。社会が持っているニーズをくみ上げる仕組みをこの場が持っていることが重要である。  
ニーズに具現化できるステークホルダーの広がりについても議論することが重要で様々なステークホルダーの意見をくみ上げる仕組みを構築することが必要である。
- ・ 2050 年の脱炭素化社会へ向け、まずは既設炉の再稼働に最善を尽くし、再稼働した原子炉については最大限使い尽くすことが必要である。その先に新型炉の建設等に向けた取り組みがある。照射試験炉のニーズについては、長きに亘って使用することを考慮すると事故耐性燃料（ATF）の開発、高富化度 Mo 燃料の開発、原子炉構造材の照射脆化機構解明がある。
- ・ 産業界として新たな照射試験炉については早急に建設することが求められる。尤度（使い勝手）、経済効果、技術保有、安全保障の観点から国内に照射試験炉を有することがメリットである。こういった全体を考慮したうえで国の政策の優先順位を上げて取り組んでいくことが必要である。
- ・ 照射試験炉を持つことが、材料の不確かさを減らすことになり、それが発電コスト及び電気料金の低減並びに産業の活性に繋がりステークホルダーが広がっていくと考える。また、メーカー等においても新しい照射試験炉を建設するということは人材育成の観点からもメリットがある。
- ・ 照射試験炉の建設には巨額な資金が必要である。また、使用済燃料の取扱いの問題もある。こうした、国民の関心、不安を考慮し、透明性の高い議論が必要である。
- ・ 仕組みをどの様にしていくか議論していく必要がある。また、サポーターを増やすということも重要であり、関村教授からもご意見があったように日本学術会議の活用についても検討していく必要がある。
- ・ NEXIP の推進、ATF の開発による安全性の向上、高富化度 MOX 燃料の開発等安全性向上に係る技術開発を進めている。この技術開発においては、照射試験は必要であり、新型炉の導入については今後の原子力政策を明確にしたうえで次期エネルギー基本計画に向けて議論していきたい。
- ・ 次期エネルギー基本計画は重要なポイントとなる。将来に向けて議論するため、文部科学省と経済産業省がタッグを組んで次期炉開発等も含めサポートいただいているが、アメリカ、イギリスは国からのサポート体制がもっと進んでいる。前向きに予算措置等検討いただきたい。

### ➤ 産業利用における利用ニーズ等の整理

- ・ RIに係る新たなニーズとして、非破壊検査、新薬開発、アイソトープ電池、ベータ線CT等がある。従来の利用と新たなRIの開発が求められている。NTDについては数兆円の10%という市場があり、省エネデバイス観点から必要となってくる。RI製造は国民の安全のセキュリティと材料のセキュリティを担うことになる。これらのニーズを実現するため照射試験炉への要望として、短時間照射設備の整備、炉心有効長の長尺化、製造均一化の観点から照射孔の安定確保、ホットラボ設備、24時間体制の支援等がある。
- ・ 直近としてはMoの国産化は急務である。2024年頃に訪れる第1危機をどう乗り切るかという大きな課題がある。現行のサプライヤーともどうするかまだ決まっていない。今後はAc-225にも注目が集まっている。医療用としては365日の供給が求められることから照射試験炉については稼働率、緊急対応の在り方（海外では再起動までの時間が日本に比べ短い）等を含めた安定運転、他炉との連携について検討していくことが必要である。
- ・ 実際に薬品あるいは治療診断用RIとなると厚生労働省が所管となることから省庁の連携が必要である。
- ・ 当時の官民検討会は内閣府がまとめていたが、今後横断的な取りまとめについて検討していただきたい。

### ➤ 科学技術・学術研究における利用ニーズ等の整理

- ・ Irradiation3.0に向けて世の中が求めるものに向けて最短で進んでいくことができるかということが課題である。モデリング、周辺技術（イオン照射含む）含め如何に効率よく材料照射に係る知見を社会に貢献できるかということが重要である。仮に7年で新たな照射試験炉が供用を開始したとして成果が出るまでに3年かかる。時間的なスケールを示したうえで現在現役の者が責任をもって取り組んでいく必要がある。科学技術は、国が政策として決めたことを実施すること、学術は、大学中心のボトムアップととらえられている。本検討については、教育、研究、ビジネスの垣根を越えて検討してほしい。
- ・ 学術は極めて多様であり、進展しようとしている。これを科学的な技術に発展していくか、さらにそれを実用化させ、技術として成熟していくかといった構造を考えることが重要である。多様性を包含できる場を作ることが必要である。
- ・ 科学技術と学術に大きな垣根があるとは考えていない。もんじゅサイトを活用した新たな試験炉の設計を主体的に進めるのは原子力機構であるが、ニーズ調査に関してはコンソーシアムを構築して産学官一体で実施していくことで国民に透明性を示していく必要があると思っている。また、人材育成に関して、KUCA、KUR等は若い研究者（大学院生等）の教育訓練の場として非常に重要である。さらにJMTRの後継となる新たな照射試験炉においてはよりプロ仕様、技術継承の場として重要になると考える。安全保障の観点から見ると国内に照射試験炉がなく海外依存になると足元を見られることになる。
- ・ 原子力に係るイノベーション、JMTRの後継となる新たな照射試験炉等の魅力あるプロジェクトが若者を惹きつけ、原子力業界全体の育成に繋がると考える。

### ➤ まとめ

- ・ ユーザーフレンドリーな運営方式をさらに拡大させた検討をしてほしい。利用性の向上だけでなく、安全性、経済性を追求し、多様な研究開発を包含できるシステムとし

てほしい。顧客の開拓という意味でも照射環境においてケーブルの劣化について考えた場合、事故、SAに係る研究開発（電力供給機能、信号伝送機能及び制御機能）を幅広く実施する必要がある。このように顧客の拡大が必要である。柔軟性のある照射を作るということがどのような照射場にするかという概念に繋がる。

- ・ 新たな照射試験炉が社会にどのように繋がるのかが重要である。電気料金に繋がる、健康に繋がる等への貢献を前面に出し、国民の理解を得る必要がある。
- ・ ユーザーフレンドリーという観点からハルデン炉は利用者の要望をくみ取りアイデア等を提案する仕組みができていた。研究一色ではなくビジネスとしてニーズを受け入れ、これにより稼働率及び経済性向上等に繋げていた。
- ・ ユーザーへのアプローチをどのようにするかが重要である。

## ② 国内における照射機能の在り方・国内外の他施設との連携について

- ・ 短期的、長期的視点で考えるべきで、短期的には海外施設を含めたサポートを実施していくことは必須である。海外施設利用については、先方に興味がないと長期的な照射ができない。国の長期的なバックアップが必要不可欠である。短期的な視点としては海外施設との連携が必要だが、長期的な視点として新たな照射試験炉に繋がるような枠組みを構築してほしい。
- ・ 原子力システム研究開発事業、NEXIP を連携して進めているところである。また、大学、産業界が一体となって次世代の技術を育てていく必要がある。海外との連携についても具体的な仕組みに発展していくよう進めていく。
- ・ 既存の枠組みだけでなく、どうしたらお互い効率よくできるのかといったところから議論する必要があるのではないかと考える。
- ・ どういった形であればある程度の期間をもって海外施設で照射利用、支援ができるのかを検討いただきたい。
- ・ RI の安定供給は1つの炉では困難である。もんじゅサイトを活用した新たな試験炉と新たな照射試験炉はしっかりと連携し運転することが必要である。JMTR 等が持っている技術をきちんと承継していくことが重要であるとともにキャプセルの設計技術の継承（検証できる場がない）も重要である。また、国民の意見をくみ取らなければならぬという観点から文科省、経産省、厚労省が連携し、当時の官民合同会議（内閣府）をもう一度立ち上げ検討していく必要がある。さらには国内のホットラボ施設の連携として、民間も含めホットラボの技術者が議論できる場を作って海外施設との連携の場、人材育成の場としてほしい。
- ・ JHR と議論した際、将来のリスクを低減していくために原子力規制に携わる者も早期の段階から参画し検討する必要があるという認識で一致した。安全規制という立場からは固く規制するという使命はあるが、試験研究を阻害する意図はない。そういったことも含め国際的な場を国内に作っていくことが国民の信頼にも繋がる。照射試験炉がレジリエントな施設であることが重要である。
- ・ 海外では FIDES の仕組みが進められている。照射場の観点から国際的な信頼関係をどのように築いていくかということが課題である。海外との連携プロジェクトの喪失も含め国プロでできることはしっかりと本省でやっていく必要がある。今回の議論を踏まえ、文部科学省も含め政府内でも議論していきたい。

③ 施設運営・供用の在り方について

- ・ 国際的拠点の取り組みとして、欧米やアジアの中核試験炉として、国際的に活用される研究基盤を構築する必要がある。また、ターンアラウンドタイムの短縮も重要である。
- ・ 安全尤度を持った設計、再起動までの時間の短縮等のメリハリのある議論が必要である。
- ・ 今後長きにわたり原子力発電を利用するにあたり、新たな照射試験炉が国内に整備されることは大変意義のあることである。整備するにあたっては、使い勝手の良いものとする、また、技術開発だけではなく人材育成も含めて様々な観点でプラットフォームになるよう議論していく必要がある。

④ 今後のワークショップ開催について

- ・ 海外を含めたりリモート WS も見据え、今回のような大規模でなくても 1.5 時間程度の WS でも良いのではないか。
- ・ 海外の方々の意見もくみ取れるようなリモート WS、また、今回のような大規模なものではなく 2 時間程度の WS を定期的に開催できるように検討いただきたい。
- ・ WS が果たすべき役割として世界各国の研究用原子炉運転管理者と利用者が参加する国際的 WS (1 回/年程度) を持ち回りで実施すればよいのではないか。
- ・ 継続的なイノベーションを生み出していく場として今後様々なステークホルダーが議論していければよいと考える。

This is a blank page.



