

提言

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（2018年）8月16日

日本学術会議

総合工学委員会 原子力安全に関する分科会

この提言は、日本学術会議総合工学委員会原子力安全に関する分科会研究用原子炉の在り方検討小委員会での審議結果を踏まえ、総合工学委員会原子力安全に関する分科会において取りまとめ、公表するものである。

日本学術会議 総合工学委員会 原子力安全に関する分科会

委員長	矢川 元基	(連携会員)	公益財団法人原子力安全研究協会会長・東京大学 名誉教授
副委員長	柘植 綾夫	(連携会員)	日本工学会元会長・顧問
幹事	越塚 誠一	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
幹事	野口 和彦	(連携会員)	横浜国立大学リスク共生社会創造センター、 センター長、大学院環境情報研究院教授
	大倉 典子	(第三部会員)	芝浦工業大学学長補佐・工学部教授
	上坂 充	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	佐倉 統	(連携会員)	東京大学大学院情報学環教授
	柴田 徳思	(連携会員)	株式会社千代田テクノ大洗研究所長・東京大学 名誉教授、高エネルギー加速研究機構名誉教授、 総合研究大学院大学名誉教授
	関村 直人	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	竹田 敏一	(連携会員)	福井大学附属国際原子力工学研究所特任教授
	松岡 猛	(連携会員)	宇都宮大学非常勤講師
	向殿 政男	(連携会員)	明治大学顧問・名誉教授
	森口 祐一	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	山地 憲治	(連携会員)	公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) 理事・研究所長

日本学術会議 総合工学委員会 原子力安全に関する分科会 研究用原子炉の在り方検討小委員会

委員長	上坂 充	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
副委員長	永井 康介		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センター長・教授
幹事	川端 祐司		京都大学複合原子力科学研究所所長、教授
幹事	村山 洋二		日本原子力研究開発機構研究炉加速器管理部長
	大倉 典子	(第三部会員)	芝浦工業大学学長補佐・工学部教授
	柴田 徳思	(連携会員)	株式会社千代田テクノ大洗研究所長・東京大学 名誉教授、高エネルギー加速研究機構名誉教授、 総合研究大学院大学名誉教授

関村 直人	(連携会員)	東京大学工学系研究科教授
竹田 敏一	(連携会員)	福井大学附属国際原子力工学研究所特任教授
中嶋 英雄	(連携会員)	公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター所長、 大阪大学名誉教授
矢川 元基	(連携会員)	公益財団法人原子力安全研究協会会長・東京大学 名誉教授
内田 俊介		日本原子力研究開発機構 安全研究センター 研究嘱託
宇埜 正美 海老原 充		福井大学附属国際原子力工学研究所副所長・教授 首都大学東京大学院理工学研究科特任教授、首都 大学東京名誉教授
大沼 正人 楠 剛		北海道大学工学研究院量子理工学部門教授 日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター材料 試験炉部長
小原 徹		東京工業大学科学技術創成研究院先導原子力研究所 教授
柴山 充弘 橋本 憲吾 林 眞琴		東京大学物性研究所教授 近畿大学原子炉研究所教授 一般財団法人総合科学研究機構中性子科学センター サイエンスコーディネーター
村田 勲 山本 章夫		大阪大学大学院工学研究科教授 名古屋大学工学研究科総合エネルギー工学専攻教授

本提言の作成に当たり、以下の方にご協力いただいた。

古坂 道弘	北海道大学工学研究院量子理工学部門特任教授
-------	-----------------------

本提言の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務	糸川 泰一	参事官(審議第二担当)
	高橋 和也	参事官(審議第二担当)付参事官補佐
	柳原 情子	参事官(審議第二担当)付審議専門職

要 旨

1 作成の背景

学术界や産業界では、研究開発に様々な分析手法が用いられている。その中で中性子及び放射光を用いる分析は、他の手法では得られない貴重な情報を与えてくれるが、大型施設が必要であるため、共同利用施設として設置され利用されている。中性子が磁性に感度を持つこと、原子番号の小さい原子核にも感度が高いことから、中性子による分析は、放射光による分析とは相補的な関係にある。また、中性子で各種物質・材料を照射して、放射性同位元素 (RI^{+1}) の製造や材料に対する中性子照射の影響を研究できる。このような特徴を持ったため、試験研究用原子炉 (以下「研究炉」という。²⁾ やその関連施設の多くは、学术研究分野のみならず、医療分野や産業利用分野、発電用原子炉に使用する燃材料の照射試験等による原子力発電の安全研究等に広く用いられてきた。

研究炉の重要性は将来にわたって高いにもかかわらず、共同利用者の多い日本原子力研究開発機構(JAEA⁺) の研究炉 JRR-3⁺や京都大学複合原子力科学研究所の研究炉 KUR⁺は、高経年化が進んでおり、新設計画もないのが現状である。また、平成 25 年 9 月と平成 29 年 3 月には JAEA の研究炉 JRR-4⁺と JMTR⁺の廃炉がそれぞれ決定した。このように、研究炉のあり方について早急に検討しなければならない状況である。

2 現状及び問題点

研究炉の利用は大きく分けると (1) 中性子照射による放射線損傷、放射性同位元素 (RI) の製造、放射化分析などの中性子照射を目的とする利用と (2) 中性子散乱、中性子によるイメージング、中性子捕捉療法 (BNCT⁺) など中性子ビームの利用に分けられ、JMTR は (1) の利用に、JRR-3 や KUR は (2) の利用を中心に用いられてきた。中性子照射を効率的に行う原子炉 (以下「照射炉」という。) としては多くの試料を長期にわたり照射するための照射場を有し、広いエネルギー領域の中性子を発生する原子炉が、また中性子ビームを利用する原子炉 (以下「ビーム炉」という。) としては中性子発生領域が小さく、輝度の大きな原子炉が適している。従って、照射炉とビーム炉を持つことが不可欠である。

原子力エネルギーの利用では以下の課題があげられる。1) 我が国のエネルギー基本計画では、原子力は「エネルギー需給構造の安定性を支える基盤となる重要なベース電源」と位置付けられている。このような状況の中で、原子力の安全の確保は、国民の最も強い要望である。中性子照射環境における機器・構造物の健全性を確保することは最も重要な要素の一つであるが、JMTR が廃炉となり、安全研究が国内ではできない状況にあること。2) 今後、発電用原子炉の廃炉、使用済燃料の処理処分、高レベル放射性廃棄物の最終処分など長期にわたる事業が必要であり、それに携わる人材の育成が課題である。

1 ⁺印のある用語については<参考資料 6>用語集を参照のこと。

2 ここでは、試験研究用原子炉のうち、JRR-3 や KUR のように熱中性子炉で、共同利用に供される炉を検討の対象とした。

中性子照射により生成される RI は放射性医薬品として診断や治療に用いられている。最も多く用いられている診断薬は、半減期 66 時間の Mo-99 の娘核種⁺Tc-99m で標識された薬剤であるが、Mo-99 は 100%輸入に頼っている。平成 23 年 Mo-99 の国産化に関する官民検討会が設置され、JMTR を用いた Mo-99 製造技術の開発の検討が始まった。しかし、JMTR の廃炉の方針でこの国産化計画は頓挫した。

一方、ビーム炉の利用については、共同利用者の最も多い JRR-3 で、新規制基準への適合対応が続けられているが、事故後 7 年を超える現在、いまだに停止中である。このために、実験装置の整備作業が進まず、最先端の実験を続けることが困難な状況にある。これらの課題を改善するためには、照射炉の早期の建設とビーム炉 JRR-3 の高度化が必要である。JAEA の研究炉の運営能力については、「もんじゅ廃炉⁺」問題で懸念される可能性があるので「5 章 研究炉の運営」で詳述した。

新規制基準への適合の審査に長時間を要している一因は、個々の研究炉の安全に係る特徴を考慮した審査、いわゆるグレーデッドアプローチ⁺への対応が必ずしも十分になされていないためと考えられ、研究炉に対するグレーデッドアプローチの検討は重要である。また、将来の研究炉の利用では、産業利用および原子力発電所の安全性に関する研究開発の比重が増えると予想される。したがって、研究炉の建設や運営に対する費用について、関係省庁で適切な負担の在り方を検討する必要がある。

3 提言の内容

(1) 我が国の科学技術を支える量子ビームである放射光及び中性子を提供する施設の充実が重要である。特に、JMTR の廃炉による我が国における照射炉の消滅および JRR-3 や KUR などのビーム炉の高経年化は大きな懸念材料であり、早急な改善が必要である。

(2) 現状で最も重要なことは、照射炉の建設を早急に進めることである。出力は JMTR と同程度 (40~50MWth) とし、照射した試料を扱う実験施設を備える必要がある。研究炉の建設には長期間かかることから、この間のユーザーへの支援を行う必要がある。

(3) 中性子ビームの利用を促進するために、JRR-3 の早期の再稼働を進め、冷中性子源の増強と中性子導管のスーパーミラー⁺化等の高度化を図ることが必要である。また、長期的な観点から時間を要する JRR-3 の次期炉の検討を早急に進めるべきである。

(4) 研究炉の利用では産業利用および原子力発電所の安全性の研究開発の占める割合が大きくなると予想される。研究炉の建設や運営に対する費用について、関係省庁で適切な負担の在り方を検討する必要がある。また、将来の原子力発電所の廃炉や使用済燃料の処理処分等長期にわたる事業を支えるための人材育成が必要であり、研究炉は人材育成に大きく貢献できる。

目 次

1	はじめに.....	1
2	研究炉の現状.....	3
3	照射炉について.....	7
	（1） 照射炉の必要性.....	7
	（2） 照射炉に必要な機能と要件.....	8
4	ビーム炉について.....	12
	（1） ビーム炉の必要性.....	12
	（2） ビーム炉に必要な機能と要件.....	12
	（3） JRR-3 の高度化	13
5	研究炉の運営.....	15
	（1） 運営組織.....	15
	（2） 共同利用体制.....	16
	（3） 人材育成.....	18
6	まとめ.....	19
7	提言の内容.....	20
	<参考文献>.....	21
	<参考資料1>審議経過.....	22
	<参考資料2>研究炉の安全性の特徴.....	23
	<参考資料3>照射炉の利用ニーズ.....	24
	<参考資料4>JRR-3 と J-PARC における利用体制について	28
	<参考資料5>研究炉の燃料問題.....	30
	<参考資料6>用語集.....	32

1 はじめに

研究炉の在り方に関して日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会は平成 25 年に提言を发出した[1]。ここでは研究炉の役割と必要性、国内外の現状、課題と対策が議論されていて、研究炉の建設には長期間かかることから後継について早急に適切な将来計画、またその運用体制を含めたグランドデザインを描くことを早急に進める必要があるとされている。本提言では、研究炉に対する近年の急速な状況の変化に対応するために具体的な提言をまとめた。

学术界や産業界では、研究開発に様々な分析機器が用いられている。分析に用いる機器の中で放射光および中性子を用いる分析には大型施設が必要で、各大学や各企業が単独で持つことは現実にはできない。このため共同利用施設として設置され利用されている。中性子は、磁性に感度を持つこと及び原子番号の小さい核種にも感度が高いことから放射光と相補的な分析手段である。このために欧米では放射光を利用する大型施設³と中性子を利用する原子炉及び加速器を用いた中性子施設⁴が設置されている。我が国では放射光施設として Spring-8⁺等、原子炉施設の照射炉として JMTR、ビーム炉として JRR-3 等、加速器中性子源として J-PARC⁺が設置されてきた。この中で、JMTR の廃止、JRR-3 と KUR の高経年化に対応する必要がある。

(1) 研究炉の安全上の特徴

研究炉は、発電炉に比べて低出力であり（大型の研究炉でも電気出力 110 万 kW の発電炉の 1%程度）、崩壊熱や炉内に蓄積される放射エネルギーもけた違いに小さい。また、多量の冷却材を保有するプール内に設置されるため、全電源喪失の場合でも自然対流で冷却され、燃料の損傷には至りにくい [1]。

東京電力福島第一原子力発電所事故を受けて、新規規制基準が設けられ、特に、地震・津波や竜巻等の自然現象等に対する規制が強化された。研究炉は炉型や出力が多種多様であり、異常時の状況は炉毎に異なるので、これに適切に対処するためには、個々の炉の安全上の特徴及びリスクの大きさを考慮したグレーデッドアプローチの適用が有効である。＜参考資料 2＞に、JRR-3 の安全上の特徴を記す。

(2) 照射炉の役割

我が国のエネルギー政策ではベストミックスという観点から、2030 年時点の原子力エネルギーの利用を 20～22%[2]として、原子力発電所の再稼働が進められている。この原子力エネルギー利用は、原子力発電所の安全が大前提となっている。複雑な工学システムである原子炉において、安全に寄与する要素のうち中性子の照射環境下での機器・構造物の健全性を確保することは最も重要な要素の一つである。具体的には压力容器やその内部の構造材料の中性子照射による劣化の理解と対策、燃料破損のメカニズムと対策、事故耐性燃料被覆管などの過酷事故対策、水化学管理技術など多岐にわたり、照射炉なくしては対策が立てられない。さらに、照射炉は核融合炉やより安全な先進炉の材料開発にも不可欠

³ 第 3 世代の放射光施設として欧州は ESRF⁺、米国は APS⁺

⁴ 原子炉中性子源として欧州は HFR⁺、米国は HFIR⁺、加速器中性子源として欧州は ISIS⁺、米国は SNS⁺。

である。産業利用では、放射性同位元素 (RI)、半導体用のシリコンウェハー、He-3 の製造など多大な利用ニーズがある [3] (参考資料 3 参照)。

(3) ビーム炉の役割

原子炉で生成される中性子を用いた分析手段は、中性子が磁性に感度を持つこと、原子番号の小さい核種にも感度が高いことから放射光と相補的な分析手段である。放射光や X 線の散乱は電子との相互作用で散乱し、およそ原子番号に比例するが、中性子の散乱はそのような規則性はなく、原子核との散乱で特に水素との散乱が大きく、原子番号の大きな元素で構成された材料中に水素が入っているような場合、X 線や放射光では非常に観測しにくい、中性子では観測しやすいことが大きな特徴である。生物内の組織の中に存在する水素は組織の機能に深く関わっていて、この水素を観測することにより機能に関する情報が得られることから、創薬やたんぱく質などの機能の解明にも用いられている。また中性子は磁性粒子であり、磁性原子との相互作用で散乱が起き、物質の磁気構造を容易に決定できる、などが特徴である。このように中性子ビームの利用は、他の手段では得られない情報が得られるので、物性物理や材料科学で欠かせない測定手段となっていて、新機能材料の開発、酵素やたんぱく質の機能の解明、創薬などの分野、BNCT による医療分野で研究開発に不可欠な手段となっている。

中性子を発生させる施設としては、原子炉及び加速器施設があり、規模の大きな原子炉としては原子力研究開発機構 (JAEA) の JRR-3 および JMTR が、加速器施設としては大強度陽子加速器施設 (J-PARC⁺) が設置されている。現在は JRR-3 が稼働していないために J-PARC が唯一の先端的大型中性子源となっている。

学術研究や産業利用で今後も中性子が大きな役割を果たす可能性は高く、JRR-3 の再稼働が強く望まれると同時にその高度化は学術研究や産業利用にとって喫緊の課題といつてよい。

(4) 研究炉の運営組織体制について

我が国の熱出力 1MW 以上の研究炉は JAEA と京都大学複合原子力科学研究所が運営している。しかし、原子炉に対する安全規制やセキュリティが厳しくなり、大学で研究炉を維持管理することは困難となっている。そのため、研究炉の運営組織としては JAEA が最有力な候補である。

先端的大型施設である J-PARC は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK⁺) と JAEA の両者の共同運営で成果を上げている。また、JRR-3 の利用に係る運営面では東京大学原子力専攻及び東京大学物性研究所と JAEA が協力することで、大きな成果を挙げてきた。これらの状況は大型施設で大きな成果を挙げるには利用者の意見を大型施設の運営に反映させることが重要であることを意味し、大型施設の建設の場合は設計段階から利用者の意見を取り入れる組織体制が必要であることを示している。これまで我が国の照射炉である材料試験炉 (JMTR) は JAEA と東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センターが協力して研究成果を出してきた。照射炉の建設・運営にあたり JAEA と量子エネルギー材料科学国際研究センターがこれまで以上に緊密な連携を取って進めることが望まれる。

(5) 研究炉の建設及び運営上の経費の考え方

今後、中性子を用いた分析は産業利用の中で重要性が認識され、需要が増加すると考えられる。また、原子力発電の分野では発電炉の新設は困難が大きく施設の使用期間を延長する要望が増えることが予想される。このため安全性の研究開発のため照射炉の利用は増加することが予想される。このような状況に対応するためには関係省庁で適切な費用負担について検討する必要がある。

(6) 人材育成の必要性

研究炉を利用した人材育成は、各種の研究者の育成だけでなく、発電炉を運転する技術者の育成においても重要である。将来、原子力発電所の廃炉、使用済燃料の処理処分では長期にわたる事業が展開される。このための人材育成が必要であり、研究炉は人材育成に重要な役割を果たすことができる。このような観点からも、早期の照射炉の建設と JRR-3 の高度化は必要である。

(7) 研究炉の燃料問題

研究炉の燃料問題は、＜参考資料 5＞に示した。燃料について、今後の開発状況を勘案しつつ、ウラン・シリサイド燃料[†]及びウラン・モリブデン燃料[†]の双方を候補として検討する必要がある。使用済燃料について直接処分も含めた使用済燃料の最終処理処分について早々に見直す必要がある。

2 研究炉の現状

研究炉は大きく分けて、表 1 に示すように、熱出力に応じて、数 W クラスの臨界集合体実験装置、数 MW～20MW クラスのビーム炉及び数十 MW クラスの照射炉に大別される。臨界集合体実験装置は、炉物理実験が主要目的となるが、冷却システムを不要とし、システムがシンプルであることから、学生や発電所に関連する社会人などの研修・人材育成に最適である。照射炉は、発電炉の安全研究や核融合炉・先進炉などの開発を主要目的として燃料・材料照射損傷に関する様々な研究に活用されるだけでなく、放射化分析などの基礎科学に加えて、医療用 Mo-99 を含む放射性核種の製造やシリコンドーピング[†]への活用などの産業利用が世界的にも広がりを見せている。一方、ビーム炉は、中性子科学、中性子実験技術応用による産業イノベーション、BNCT による医療への活用、放射化分析等で先進的研究のツールとして活用されている。

表 1 研究炉の種類

種類	主要目的	炉心内中性子束 (n/cm ² /s)	年間の燃料消費	期待される成果
数 W クラスの臨界実験装置	臨界安全、炉物理実験	10 ⁵ ～10 ⁷ 程度	0	発電炉を含む炉物理特性研究、学生等を含めた研修
数 MW～20MW クラスのビーム炉	中性子科学、中性子ラジオグラフ、RI 製造等	10 ¹³ ～10 ¹⁴ 程度	数体～20 体程度	中性子科学、中性子ラジオグラフによる産業イノベーション、BNCT による医療への活用
数十 MW クラスの照射炉	燃材料の環境制御した照射試験、種々のパラメータ試験による照射損傷基礎研究、RI 製造	5×10 ¹⁴ 程度	60 体以上	発電炉の開発、安全、RI 製造

(出典) 原子力安全に関する分科会で作成

図1に示すように、照射炉の場合、炉心を比較的大きくすることにより、垂直実験孔の数を多く、その径も大きく設計することができる。均一で多量の照射や、複合環境下での燃料・材料のその場試験等（照射リグ[†]内に試験片への荷重制御や試験片の環境制御並びにそれらの計装等）の高度な研究が可能となり、材料の照射損傷メカニズム研究等では中性子束、エネルギー等をパラメータとする先進的な照射試験が可能となる。一方、ビーム炉の場合、一般的に中性子源となる炉心部は軽水減速、軽水冷却で、その外郭に重水タンクを配置し、重水タンク内で減速された中性子をビームとして外部に取り出す設計になっている。重水領域での中性子ビームの性能確保（中性子束、エネルギー）のために、炉心部はコンパクトに設計される。このため、燃料・材料照射やRI製造などに必要な垂直実験孔の数は少なく、径も小さくなる。また、重水領域では、中性子エネルギー分布に外乱を与えないために、垂直実験孔に挿入される燃・材料照射試験片、特に高速中性子源となる燃料の種類と量が制限される。以上のことから、先進的照射試験研究およびMo-99などのRI製造に適した照射炉と中性子ビーム性能を第一義に設計され、利用されるビーム炉をそれぞれ有することが不可欠となる。

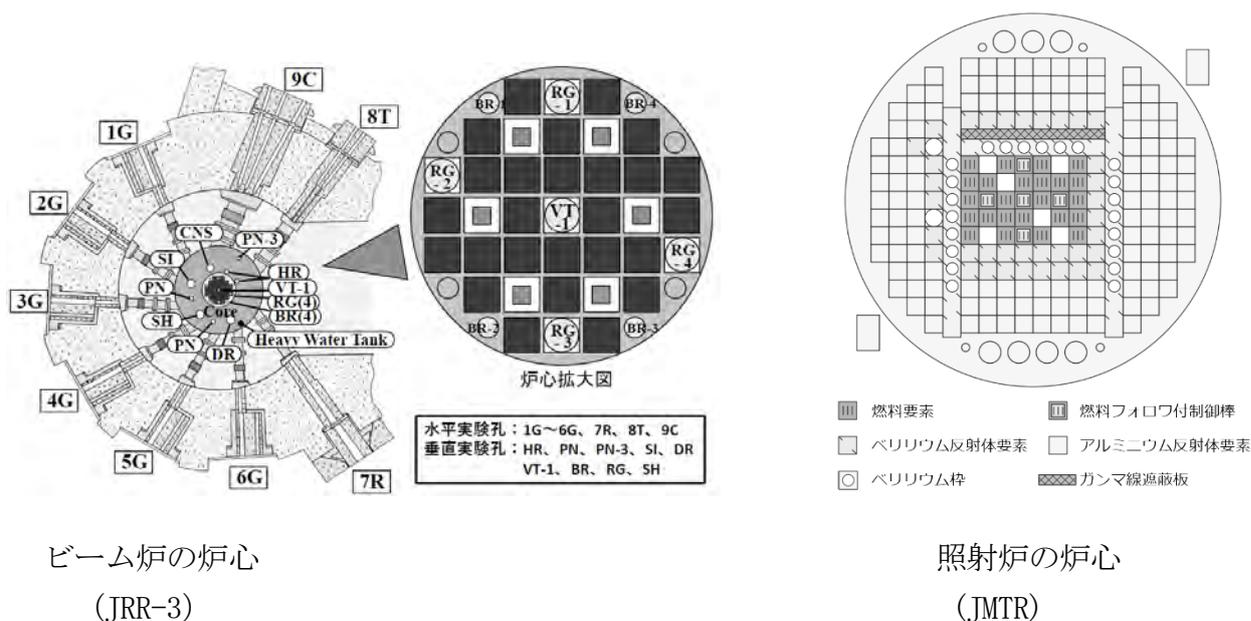


図1 ビーム炉と照射炉の炉心

(出典) 日本原子力研究開発機構パンフレット New JMTR

日本ではこれまで28基の研究炉が建設されたが、その多くは高経年化又はその役割を終えたため廃止措置に移行し、現在運転継続予定の研究炉は表2に示す9基である。この内、原子炉安全研究炉 (NSRR[†]) は反応度事故を模擬した燃料の安全研究、定常臨界実験装置 (STACY[†]) は硝酸ウラン溶液燃料の臨界安全研究、高温工学研究炉 (HTTR[†]) は高温ガス炉開発、高速実験炉 (JOYO[†]) は高速炉開発に特化した研究炉である。他は臨界実験装置相当が3基、ビーム炉が2基 (JRR-3、KUR) で、照射炉は平成29年3月のJMTRの廃炉決定により、我が国から姿を消した (ビーム炉の2基は、それぞれ垂直実験孔を有し、燃料・

材料の照射試験を利用目的のひとつに掲げているが、前述のように、少数でシンプルな照射試験に限られ、本格的な照射試験炉の代替えとなるものではない。

表 2 運転継続予定の日本の研究炉

研究炉	管理者	形式	出力	中性子束 (n/cm ² /s)	冷却/減速	ビーム ポート	利用目的	運転 年数
UTR KINKI	近畿大学	教育訓練用小型炉	1W	熱 1.0×10 ⁷ 高速 1.0×10 ⁶	/軽水	無	教育訓練、中性子ラジオグラフ、放射化分析	56
JRR-3	JAEA	プール	20MW	熱 2.7×10 ¹⁴ 高速 1.4×10 ¹⁴	軽水/軽水	有	中性子散乱実験、Si ドーピング、RI 製造、中性子ラジオグラフ、年代測定、材料照射試験	27
TOSHIBA NCA	東芝	臨界実験装置	0.2kW	熱 1.0×10 ⁹ 高速 3.0×10 ⁹	軽水/軽水	無	燃・材料照射試験（基礎実験）	54
KUR	京都大学	タンク	5MW	熱 6.0×10 ¹³ 高速 6.5×10 ¹³	軽水/軽水	有	中性子ラジオグラフ、中性子散乱実験、放射化分析、BNCT、教育訓練、材料照射試験、	53
HTTR	JAEA	高温ガス炉	30MW	熱 7.5×10 ¹³ 高速 2.0×10 ¹³	He	無	高温ガス冷却炉開発	19
STACY	JAEA	均質炉	0.2kW				窒化ウラン溶解燃料臨界安全研究	22
KUCA	京都大学	臨界実験装置	0.1kW	熱 1.0×10 ⁹ 高速 1.0×10 ⁹	軽水、空気/ポリエチレン、空気	無	炉物理 教育訓練	43
NSRR	JAEA	トリガ（反応度事故模擬用パルス炉）	300kW	熱 1.9×10 ¹² 高速 4.0×10 ¹⁵	軽水/軽水	無	燃・材料安全研究	42
JOYO	JAEA	Na 冷却高速炉	140MW	高速 4.0×10 ¹⁵	Na	無	高速増殖炉開発、教育訓練	40

(出典) IAEA RRDB (Research Reactor Database) に基づき原子力安全に関する分科会で作成

一方、中性子ビームの利用に関して、共同利用者の最も多い JRR-3 は、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえて策定された新規制基準への適合対応が続けられているが、事故後 7 年を超える現在、いまだに停止中である。このために、実験装置の整備作業が進んでおらず、最先端の実験を続けることが困難な状況である。また、KUR は、約 3 年の審査期間を経て平成 29 年 8 月に再稼働がなされた。このように新規制基準への適合の審査に長時間を要している一因は、個々の研究炉の安全に係る特徴を考慮した審査、いわゆる

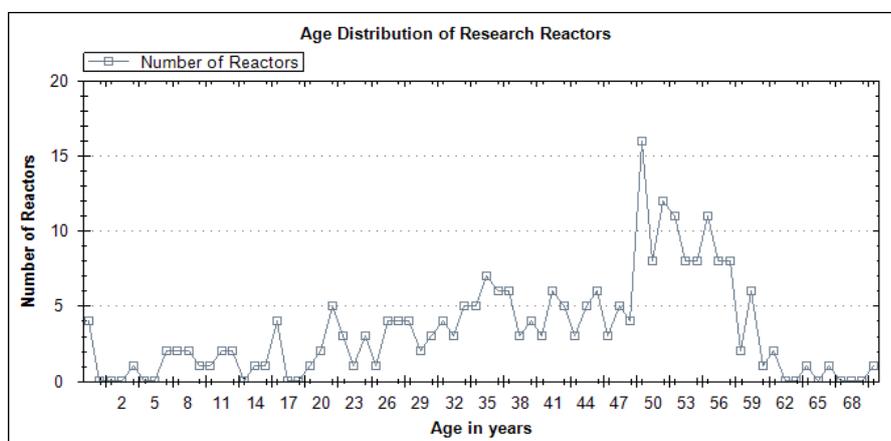


図 2 世界の研究炉運転年数

(出典) IAEA RRDB (Research Reactor Database)

グレーデッドアプローチへの対応が必ずしも十分になされていないためと考えられる。原子力発電所と研究炉の熱出力は100倍ほど異なることからリスクの大きさも大きく異なる。研究炉の建設や運転管理において、リスクの大きさを考慮するグレーデッドアプローチの対応は重要であり、研究炉関係者は早急に検討する必要がある。

世界の研究炉も、図2に示すように初臨界から45年以上経過したものが多く、高経年化が課題になっていることから、多くの研究炉は廃止されるとともに、新たな建設が計画されている。表3に研究炉の廃止、運転継続、及び新たな建設計画の状況、表4、5に新たに建設中、計画中の研究炉を示す。

表3 世界の研究炉の状況

Status	Number of All Countries
Operational	222
Temporary shutdown	19
Extended shutdown	10
Permanent shutdown	79
Under decommissioning	48
Decommissioned	375

(出典) IAEA RRDB (Research Reactor Database)

表4 新たに計画中の研究炉

Country	Facility Name	Type	Thermal Power (kW)	Last Update
Argentina	RA-10	POOL	30000	2014. 4. 7
Belgium	MYRRHA	FAST	85000	2014. 1. 8
Brazil	RMB	POOL	30000	2014. 4. 7
China	TFHR Thorium Pebble Bed	EXPERIMENTAL	2000	2013. 10. 7
China	TMSR-LF1	EXPERIMENTAL	2000	2018. 1. 2
China	TMSR-SF1	EXPERIMENTAL	10000	2018. 1. 2
Korea, Republic of	KJRR	POOL	15000	2014. 4. 7
Netherlands	PALLAS		0	2010. 12. 28
Thailand	SUT MNSR	MNSR	45	2017. 8. 1
Ukraine	Multipurpose RR	POOL	20000	2013. 4. 24
United States of America	HT3R	HE COOLED	25000	2013. 6. 7
Viet Nam	Multipurpose Research Reactor	POOL, IRT	15000	2014. 3. 20

(出典) IAEA RRDB (Research Reactor Database)

表5 新たに建設中の研究炉

Country	Facility Name	Type	Thermal Power (kW)	Last Update
Argentina	CAREM 25	PWR PROPULSION	100000	2013. 9. 5
France	REACTOR JULES HOROWITZ	TANK IN POOL	100000	2017. 5. 29
Russian Federation	IRV-2M	POOL	4000	2017. 6. 29
Russian Federation	PIK	TANK	100000	2017. 6. 2
Russian Federation	MBIR	FAST, POWER	150000	2017. 6. 6
Saudi Arabia	LPRR	POOL	30	2016. 12. 16
Ukraine	KIPT Experimental Neutron Source	SUBCRIT	0.19	2017. 08. 04

(出典) IAEA RRDB (Research Reactor Database)

3 照射炉について

(1) 照射炉の必要性

東京電力福島第一原子力発電所事故以降、原子力エネルギーに対する幅広い議論が行われてきた。一方、国のエネルギー基本計画では、原子力は「エネルギー需給構造の安定性を支える基盤となる重要なベース電源」と位置づけられ、すでに再稼働を果たした原発が存在する。このような状況の中、原子力の安全の確保は、その賛否にかかわらず国民の最も強い要望であり、安全性を判断するために、科学的立場に基づいた知見を与えることは学术界の責任である。さらに、海外に目を向けると、特に原子力の経験が浅いアジア各国では今後原発の新設・増設が計画されている。また、中国や韓国の原子力発電所の過酷事故は我が国へ直接の影響の可能性がある。過酷事故を経験した我が国だからこそ、これらの国々の原子力の安全に科学的立場から貢献する責任があるといえる。

複雑な工学システムである原子炉において、安全に寄与する要素は様々であるが、中性子による照射環境という、他の工学システムではない環境下の機器・構造物の健全性確保は最も重要な要素の一つである。具体的には、圧力容器や炉心構造材料の中性子照射による劣化の理解と対策（照射損傷の基礎学理研究を含む）、燃料の破損メカニズムの解明と対策、事故耐性燃料被覆管（耐水素脆化、水素発生抑制等）などの過酷事故対策、水化学管理技術（材料腐食抑制）に係る炉内構造材料の照射誘起応力腐食割れ（IASCC⁺）など、多岐にわたる。

原子力発電所の事故では、工学的安全設備で対応し重大事故の発生、拡大、炉心溶融を防止し、原子炉を正常に停止させる。これは深層防護⁺という第3層までの対応である。第4層では、炉心溶融に至っても、事故の影響を緩和し、放射性物質の放出を最小化する対策を講ずることにより対応する。第4層では、従来の工学的安全設備に頼るだけでなく、事故の状態を早期に把握し、その影響を最小化するために、事前に準備し、日常的に訓練したアクシデントマネジメントに則り、最終的には人の操作でプラントを守り、放射性物質の環境への放出を抑制する対応を取るものである。深層防護第4層への対応を徹底するためには、今後生じる可能性のある設計変更、設備変更に対応して、炉心溶融事象発生時の放射性核分裂生成物の挙動の把握が必須であり、アクシデントマネジメントに的確に取り入れて、徹底すると共に、技術移転を図ることが必須となる。これまで炉心溶融事象発生時の核分裂生成物の挙動は、フランス カダラッシュ研究所のPhébus研究炉（熱出力38MW）での燃料棒24本を含む大型実験で、中性子によって駆動され、燃料体をメルトダウンさせて、燃料体から放出する核分裂生成物が圧力容器を透過してどの程度格納容器内に漏洩するかという大型実験プロジェクトを実施し、貴重な実験データを提供してきたが[4][5]、2010年に全プロジェクトを終了した。既に終了したPhébus研究炉でのプロジェクトのレベルを超え、燃料集合体崩壊状態のオンライン測定機能を有する実験設備を開発し、我国がリーダーシップを取っての国際プロジェクトを推進する必要がある。

また、照射炉は、上記の既存軽水炉の安全性に対する寄与だけでなく、核融合炉やより安全な先進炉の材料開発にも不可欠である。さらに、使用済核燃料の地層処分を検討

する際の地層の安定性等を評価する場合においても、重要な役目を果たすことが期待されている。

産業利用としては、十分な中性子束強度で、多くの照射孔を利用して医療用 Mo-99 などの RI を製造する能力が期待されている。また、パワーデバイス向けのシリコン半導体の製造では、12 インチ程度の大型の照射孔において均一な照射を行うことにより、最高グレードのシリコンウェハの供給も期待される[3]（参考資料3参照）。近年では、空港等への He-3 を使った中性子検出器の大量配備等により需要が急増している He-3 の供給が期待される[3]（参考資料3参照）。このように照射炉は、我が国の幅広い科学技術や産業にも貢献でき（図3参照）、その利用価値は極めて高い。照射技術は研究・利用目的ごとのオーダーメイド的要素が高いため、最先端の研究・技術保持、そしてそれらの人材育成には、照射炉を国内に保有することが欠かせない。また、照射した試料の多くは強く放射化するため、海外炉を利用する場合、ホットラボ[†]の使用や試料の保管などに多額の経費を支払う必要がある。このためビーム利用の場合とは異なり、国の大型プロジェクトを除いて、個別の研究者が利用料を支払って海外炉利用することは、現実的に困難である。なお、東北大学金属材料研究所では JMTR 停止以降、全国共同利用のための代替照射として海外炉（主としてベルギーBR-2 炉）を利用しているが、経費などの理由により JMTR 稼働時の 1/4 程度以下しか照射できていないのが現状である。

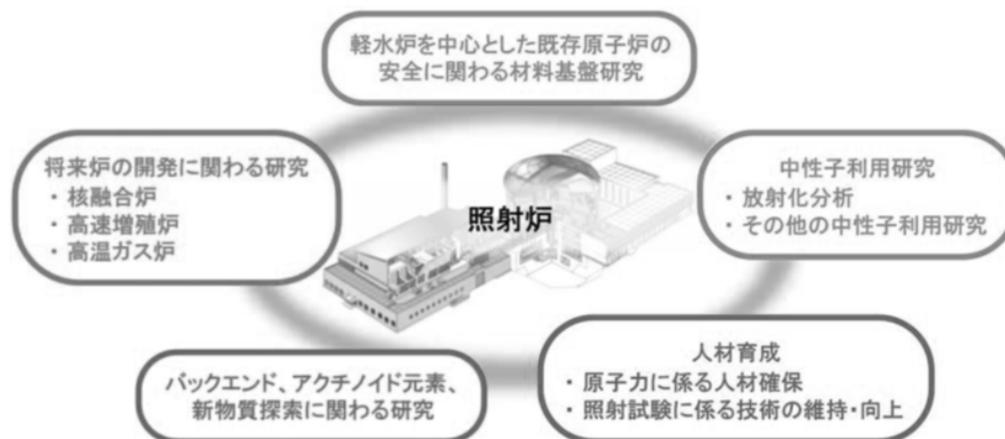


図3：照射炉の必要性（参考文献[3]より）

以上の照射炉の研究ニーズや、国内に照射炉を保有する必要性に関しては、JMTR 運営・利用委員会 照射炉利用ニーズ調査専門部会、「照射炉の照射利用ニーズに関する調査報告書」（平成 28 年 12 月）[3]や、日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会提言「研究用原子炉の在り方について」（平成 25 年 10 月）[1]に詳述されているが、上記の内容は、これら報告の内容とも符合している。

(2) 照射炉に必要な機能と要件

照射炉には、上述のように、現行軽水炉の安全性向上・高度化、水化学による構造材

の腐食抑制技術、過酷事故対策、次世代炉開発等に関する材料・燃料照射試験及び照射損傷メカニズム解明などの基礎研究に加えて、放射化分析、Mo-99を含むRI製造などが求められる。これらの照射を実施するための照射炉には次のような機能、要件が必須である。

① 中性子束、スペクトル、制御柔軟性

図4に世界の主要な研究炉の中性子束を示す。JMTRは熱中性子、速中性子共 1×10^{14} n/cm²/s であり、同程度の中性子束が必要である。材料の加速照射の観点からさらに高中性子束が望まれる場合があるが、ガンマ線による発熱が高くなり、適切な照射温度制御ができなくなることを考慮して設計する必要がある。

また、中性子エネルギースペクトルに関しては、軽水炉分野での照射利用では、軽水炉にできるだけ近いスペクトルが望ましい。一方で、放射化分析やRI製造、核融合炉や先進炉材料の開発など、多様な照射試験に対応する必要がある。さらに、照射試験の内容は今後大きく変遷する可能性もある。このため、炉心の燃料、制御棒、垂直実験孔の配置並びに垂直実験孔の大きさを自由に変えることによって、炉心および周辺部の中性子スペクトルを柔軟かつ精度良く制御できることが重要な要件である。

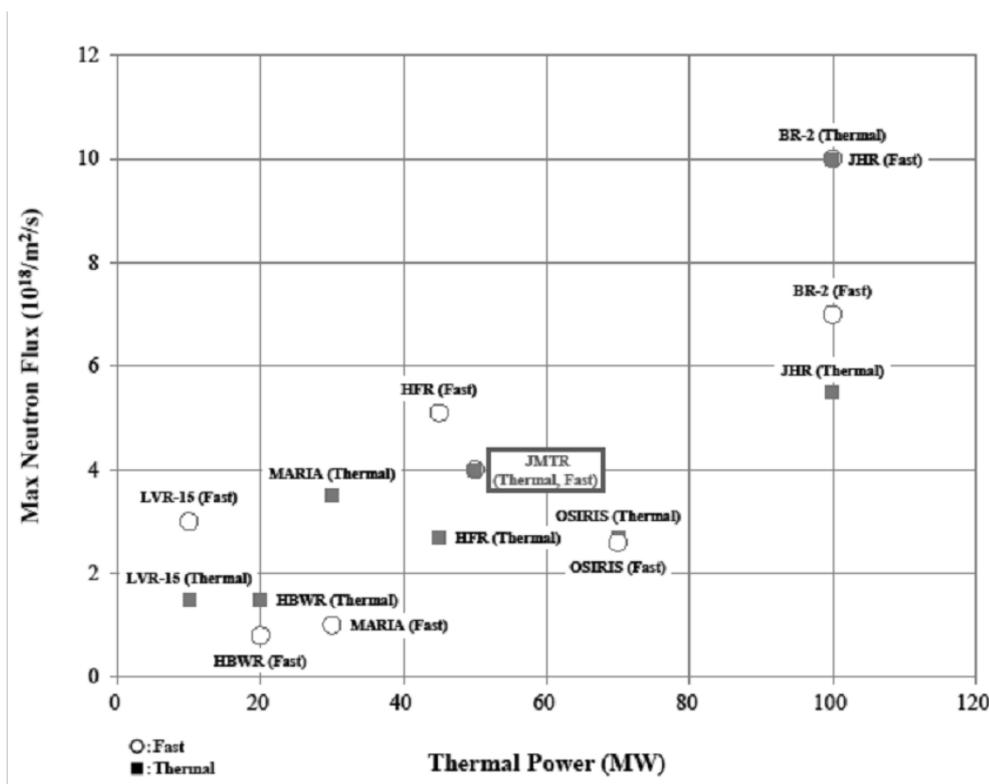


図4：世界の主要な照射炉の中性子束

(出典) IAEA RRDB に基づき当分科会で作成

② 照射場の大きさ、均一性

様々な形状、大きさ、複合環境下でのその場測定など多種多様な照射を行うために、十分な照射場の大きさが必要である。JMTRの場合、内径42mm~67mmの有効に使用できる垂直実験孔が60であるが、同程度の照射場の大きさは必要である。また、様々な

照射試料の高精度な比較が必要な材料基礎研究や、大型試験片を用いる研究は、破壊靱性試験⁺を予定しているため、また、シリコンドーピングなどにおいて均質な照射場が必要である。均一な照射場は、温度の均一性にとっても重要である。

③ 温度制御

精度の高い温度制御技術は極めて重要であり、少なくとも、JMTR でも実績のある $300\pm 2^{\circ}\text{C}$ 程度の温度制御技術は軽水炉の安全性の研究には必須である。この温度域での制御を容易にするために、冷却材温度は 50°C 程度にすべきである。また、先進炉の開発のためには、より高温での照射時温度制御 ($500\pm 10^{\circ}\text{C}\sim 1200\pm 50^{\circ}\text{C}$) も可能にする必要がある。大型試験片の精度良い温度制御のためには、試験片内のガンマ線による発熱を抑えることが有効であり、ガンマ線強度の低減化技術が求められる。なお、温度制御のためには、通常キャプセル内の試料に温度計測用の熱電対が装荷され、電気ヒータなどで試料の温度を制御する。この場合、熱電対やヒータの導線などを炉外装置まで導くために、キャプセルが長くなり通常のキャスクに装荷することができない。そのためにキャプセルを切断して短尺化するための隣接プールが必要となる。

④ 稼働率

軽水炉高経年化研究や先進炉材料の研究などにおいて、有為な期間で十分な照射量を確保するためには、原子炉の高稼働率が必須であり、海外の照射炉並に年間 250 日程度の安定した運転を目指す必要がある。また、高稼働率は RI 製造などの産業利用にとっても重要である。

⑤ ループ試験設備

一次冷却系の水化学に関する照射試験研究や炉内構造物の照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 試験では、水ループ、ガスループ等のループ試験設備の設置が求められる。沸騰水型原子炉 (BWR)、加圧水型原子炉 (PWR) の水化学環境を模擬できる高温高压水ループとともに、照射場近傍からのサンプリング機能や水環境及び材料特性のその場測定技術が必要である。また、照射の水環境を炉外装置で制御するため、放射化した腐食生成物が炉外に放出される。このため、十分な放射線遮蔽能力があるループキュービクル⁺が必要となる。ループキュービクルは、軽水炉燃料出力急昇試験における出力変動中の燃料被覆管のペレット-被覆管相互作用 (PCI) 破損を検出するために放出される核分裂生成物 (FP) を炉外で測定する場合にも必要である。

⑥ 再照射のための炉プール

軽水炉高経年化研究における炉心構造材の IASCC 研究や高燃焼度燃料の照射試験研究では、他の照射場 (JMTR の簡易キャプセル、加速器、発電炉等) でベース照射した材料を IASCC その場試験キャプセルで再照射する。このように高放射線試験体を装荷した長尺のキャプセルを原子炉炉心に挿入するためには、放射線遮蔽に十分な深さのある炉プールが必要である。

⑦ ホットラボや照射後実験施設と原子炉の連携

再照射は上記の IASCC 研究や高燃焼度燃料の照射試験研究のみならず、圧力容器の照射脆化研究などでもニーズがある。そのためには、照射済み試験片の加工技術や照

射キャプセルへの再装荷・組立技術等も必要であり、これらを行うホットラボとの連携は欠かせない。このような IASCC 試験では、他の照射場で照射した材料に亀裂発生、進展測定リグや荷重負荷治具を装荷して長尺キャプセルに装荷する。このような、先進的照射試験を行うには、原子炉とホットラボがカナルで直結していることが不可欠である（図5参照）。また、最先端の材料分析能力を有する照射後実験施設との連携は欠かせない。このため、そのような照射後実験施設および研究者集団に隣接して炉が設置されることが不可欠である。

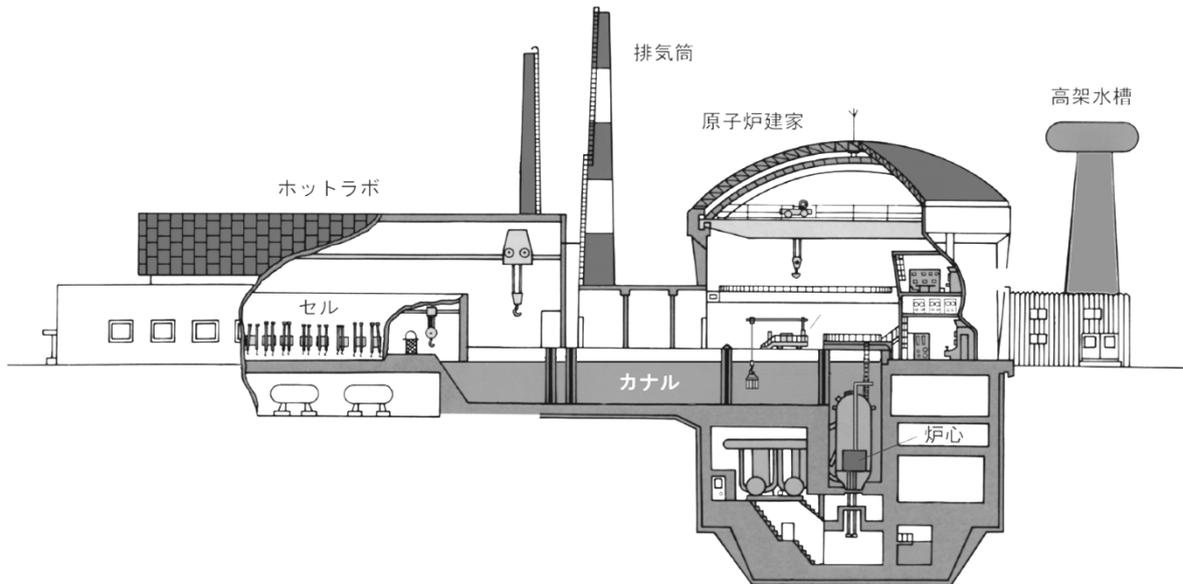


図5：照射炉とホットラボ

（出典）日本原子力研究開発機構パンフレット New JMTR

⑧ 使用済燃料貯蔵施設

照射炉は大量の使用済燃料が発生する（JMTR の場合年間 63 体）。これらの燃料は一定期間冷却した後に米国に送っている。しかし、新たな照射炉建設後に米国が日本の使用済燃料を受け入れる保証はない。このことから、新たな照射試験炉で発生する使用済燃料を貯蔵する貯蔵施設を建設する必要がある。

⑨ 核燃料

現在世界の研究炉の多くは、低濃縮ウラン・シリサイド燃料を使用しているが、炉心性能を高めるためにウラン装荷量が大きくなるウラン・モリブデン燃料への移行を検討している。新たに建設する照射炉については、シリサイド燃料炉心と平行してモリブデン燃料炉心の検討を行うことが望まれる（詳細は＜参考資料5＞）。なお、可燃性毒物[†]は、燃料の経済性向上とともに、燃料の燃焼による原子炉反応度変化を抑え、運転中の中性子束分布変化を小さくすることができること、また照射場の安定性の観点からも有効である。

⑩ 研究炉を設置する場合の近隣住民の理解

重要な要件として、研究炉の設置に対する近隣住民の理解が挙げられる。研究炉の

周辺に各種の実験施設が必要であることは既に記載した通りである。このような環境を備えた場所として、JAEA の原子力科学研究所及び大洗研究所、京都大学複合原子力科学研究所がある。これらの地域では、研究炉に対する地域住民の理解が得られているので、有力な設置場所といえる。

4 ビーム炉について

(1) ビーム炉の必要性

東京電力福島第一発電所事故後、新たな規制基準が定められ、研究炉で利用者数の最も多かった JRR-3 は、新規制基準対応に時間がかかり、事故から 7 年を過ぎた今も運転再開がなされていない。日本学術会議基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会では、研究炉の長期停止による研究開発への影響をアンケート調査により調べた[6]。その結果によると事故以前の JRR-3 の利用者数は実数でおよそ 1400 名と多くの研究者が利用していて、中性子回折や中性子散乱、中性子イメージング、即発ガンマ線分析などの中性子ビーム利用が約 7 割を占めている。このことから中性子ビームを用いた分析法の有用性が示されている。

中性子ビームの利用は、パルス中性子源としての J-PARC と定常中性子源としての JRR-3 が主要な中性子源として利用されてきていて、産業利用でも大きなニーズが生じている。定常中性子源の特徴である大強度で安定したビームを得られることから、結晶構造解析、分光、中性子イメージング、即発ガンマ線分析など、産業界で利用し易い分析法であるため、今後一層の利用が期待され、中性子ビームを用いた分析法が我が国の科学技術力を支え、延いては経済を支える大きな役割を果たすと予想できる。

JRR-3 は 7 年以上稼働していないために、実験設備の改良や高度化が遅れていて、これを改善することは喫緊の課題である。JRR-3 の高度化は中性子学会からも要望されているが[7]、実現しておらず早急に改善することが求められる。

(2) ビーム炉に必要な機能と要件

定常中性子源から発生する中性子ビームを用いた学術利用の有用性は上述のとおりであるが、目的や実験手法に応じその利用形態は多種多様に富んでいる。これらの需要に応じた中性子ビームを持続して供給するためには、次のような機能、要件が必須である。

① 目的に応じた中性子束及びスペクトルの利用

(1) 実験装置ごとに要求される中性子束及びスペクトルは異なるため、多様なビームを取り出す仕組みが必要、(2) 熱中性子束、冷中性子束ともに実験装置に供給される中性子束密度については $10^9 \text{n/cm}^2/\text{s}$ のオーダーが必要。

② 高稼働率の確保

(1) 需要を満たすためには、ビーム強度を増強する以外に高稼働率を確保し、利用時間を十分に確保することが必須、(2) 効率的な実験を行うためには、汎用性の高い機器の使用と共に、維持管理及び交換の容易な機器を開発し、定期検査の期間を短縮することが必須、(3) 冷中性子源装置 (CNS) 等の利用設備の異常が原子炉の運転

に影響を与えない仕組みとし、原子炉がスクラム[†]するリスクを最小限にする、(4) スクラムした後の再稼働までの時間を短縮する仕組みを取り入れる。

③ 利用者の利便性の確保

(1) 実験エリアは、将来のニーズも踏まえて高い汎用性と高利用率を確保するため、ビームホールを複数方向に建設し多くの実験装置を整備できる配置とする、(2) セキュリティの観点から、核物質防護エリアと実験エリアを区別し、利用者の出入りの容易さを確保する。

現状の JRR-3 はこれらの機能と要件をすべて備えているわけではなく、次期炉の検討の際に必要なものである。当面は JRR-3 の高度化で対応するわけであるが、高度化の際にこれらの必要な機能と要件の中で取り入れられるものは取り入れることが望まれる。

(3) JRR-3 の高度化

① 原子炉ならびに冷中性子源の高度化

現在の JRR-3 は熱出力 20MW の研究炉で、研究炉の規模としては、米国 NIST[†] の NBSR[†]、オーストラリア ANSTO[†] の OPAL[†]、ドイツミュンヘン工科大学の FRM-II[†] 原子炉と同じである。しかし、原子炉設計ならびに中性子ビームを取り出す部分の設計が建設当初のままであり、十分な中性子束が取り出せない状況にある。特に冷中性子源の効率は低い。それに引き換え、他の原子炉は最新の炉設計であることに加え、冷中性子源の効率の最大化が図られている。そのため、冷中性子ビーム強度においては約 1 桁の違いがある。これを是正すべく、2000 年代において、JAEA は冷中性子源で約 2 倍、中性子導管のスーパーミラー化[†]で約 5 倍の利得が得られる中性子ビーム 10 倍計画を立案した。しかし、その計画段階において、予算が削減され、さらには東日本大震災に見舞われたため、未だ達成していない。JRR-3 を世界有数の研究炉とするためには、まず、中性子束を取り出すための原子炉の最適化が必要であり、冷中性子源倍増計画を早急に進める必要がある。

② 中性子導管のスーパーミラー化

震災による JRR-3 長期停止の間を利用して、C1, C3 ライン (図 6 参照) において中性子導管のスーパーミラー化 (3Q) が行われた。この作業はほぼ終了しているが、まだ、C2 は手つかずの状態であり、さらに強度増強に重要な炉室内の中性子導管のミラーも 20 年前の通常ミラーのままである。また、T1, T2 は 2002 (平成 14) 年にスーパーミラー化 (2Q) されたが、今ではさらに性能の良いスーパーミラー (3Q) が実用化されている。早急に、これらを更新し、利用できる中性子ビーム束をさらに向上させる必要がある。特に炉室内の中性子導管のミラー化に関しては線量が下がっており更新の好機である。

③ 原子炉室およびビームホールに設置した装置の高度化

J-PARC MLF[†] のパルス中性子源に比較して、JRR-3 の定常炉中性子源は、中性子束が大きいため、長波長中性子を用いた小角散乱によるナノオーダーの構造解析や磁気構造解析、さらには 3 軸分光器によるハードマターの励起等の研究に適した線源といえる。また、定常炉中性子源は偏極中性子を用いた緻密な研究にも適している。1990 年

代においては、JRR-3 で多くの先導的な研究が行われたが、2000 年代に入ると、韓国 HANARO⁺ (熱出力 30MW) の本格的稼働や、2005 年のオーストラリア ANSTO の OPAL 原子炉 (熱出力 20MW) の稼働と、これら施設に最新型の散乱実験装置が建設されたことにより、JRR-3 に設置された装置群は性能の面においても劣勢に立たされている。現在、

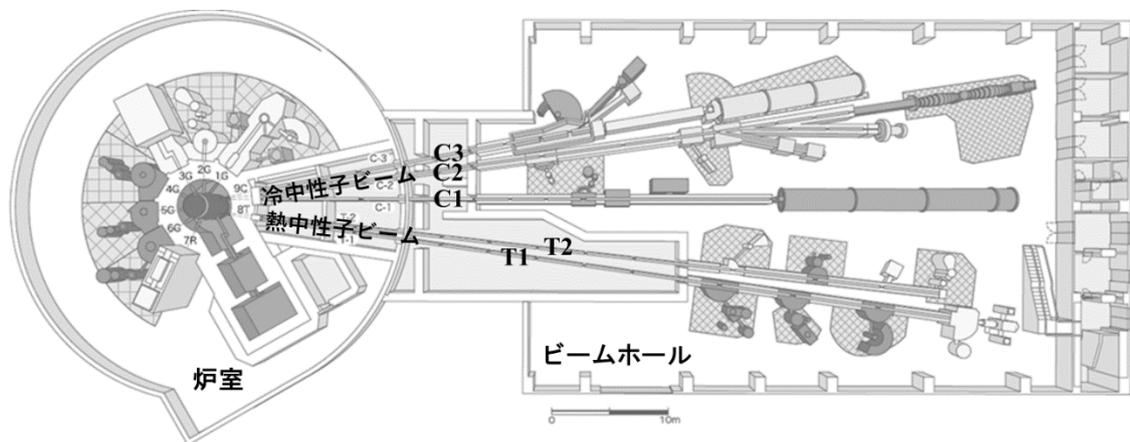


図6 JRR-3 の平面図

(出典) 日本原子力研究所「研究用原子炉 現状と役割」

装置群の高度化を進めているが、原子炉が長期停止中であることもあり、十分な進展は見られていない。装置群の高度化としては、

『3軸分光器群の偏極化』: 偏極中性子ビームを利用した研究ができるようなオプション (入射側およびアナライザー側に偏極子オプションの導入)、またこれに関連して分光器の非磁性化が必要。

『進化型3軸分光器の建設』: 現在、ある角度、あるエネルギーでの中性子強度を点データとして測定し、その角度スキャンおよびエネルギースキャンを行うことでデータを得ていたが、マルチアナライザと位置敏感型検出器を備えた進化型3軸分光器に置き換えることで、測定効率を劇的に向上させる。

『大強度 (材料・磁性) 回折装置』: 定常炉冷中性子源から得られる長波長中性子を用いることで、低角度領域で大強度回折実験が可能になり、特に磁気構造解析に威力を発揮する。諸外国の定常炉中性子源では、パルス中性子源ではなかなか難しいこのような長波長大強度中性子回折装置の計画が進んでいる。今後の J-PARC-MLF との相補性を考えた場合に有効な装置である。

『小角散乱装置』: 中性子ビーム施設には必ず小角散乱装置が1台もしくは複数配置され、ソフトマターをはじめとするさまざまな分野での研究に供されている。また、小角散乱装置は産業界からの利用要望も高い。現在、JRR-3にはSANS-U (大学所有) とSANS-J-II (JAEA 所有) の2台の小角散乱装置があるが、震災直前の状況を例にとっても、数多いユーザーの要望に十分に対応できていないとはいえない。特に産業界からの利用には殆ど対応できていなかった。さらに、高圧セル、高温セル、引張試験機、レオメーター⁺、散乱・熱分析同時測定、偏極測定など、といった装置に付属するアクセサリを充実さ

せることで、中性子散乱による高度な物質構造解析、新物質・材料の開発、製品検査、等に大きく貢献することが期待される。

5 研究炉の運営

(1) 運営組織

① JAEA における共同利用施設の運営

我が国の熱出力 1MW 以上の研究炉は JAEA と京都大学複合原子力科学研究所が運営している。京都大学複合原子力科学研究所は原子炉に対する安全規制やセキュリティが厳しくなり、大学で研究炉を維持管理していくことが困難となるなか、燃料問題の困難さもあって、加速器を中性子源とした将来計画を検討している。この現状からすると研究炉の運営組織としては JAEA が最有力な候補である。一方、JAEA は高速増殖原型炉；もんじゅ（以下「もんじゅ」という。）の運営を行っていたが、もんじゅを巡っては平成 27 年 11 月に原子力規制委員会が半年を目途に、安全に運転できる新たな事業者を示すよう文部科学大臣に異例の勧告を出した[8]。文部科学省は勧告に対する回答期限を過ぎても新たな事業者を示せず、結局廃炉となっている。このような状況から、国民が JAEA の安全管理能力に不安を覚える懸念がある。ただし、液体金属ナトリウム冷却の高速増殖炉の原型炉であるもんじゅと主に軽水冷却の JRR-3 に代表される研究炉とはリスク要因が異なる。また、JRR-3 等に対する原子力規制委員会による新規制基準適合確認審査において、JAEA は研究炉の安全管理能力を有していることが示されている。

②中性子散乱施設の運営

JAEA が現在運営している大型施設の現状を見てみると以下のことが見て取れる。大強度陽子加速器施設 J-PARC は KEK と JAEA の両者の共同運営で成果を挙げている。また、加速器施設の建設とその後の運営で、JAEA と KEK の多くの研究者が育成されている。JRR-3 の利用に係る運営面でも、東京大学原子力専攻、東京大学物性研究所と JAEA が協力することで大きな成果を挙げてきた。これらの状況は大型施設で大きな成果を挙げるには利用者の意見を大型施設の運営に反映させることが重要であることを意味し、大型施設の建設の場合は設計段階から利用者の意見を取り入れる組織体制が必要であることを示している。

照射炉の建設及びその後の運営に大学組織の関与が重要であるとするならば、これまで JMTR は JAEA と東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センターが協力して研究成果を出してきた。照射炉を建設・運営にあたり JAEA と量子エネルギー材料科学国際研究センターがこれまで以上に緊密な連携を取って進めることが望まれる。量子エネルギー材料科学国際研究センターは中性子照射に関する学術利用に関しては、関連の研究者コミュニティとの連携を通じて広く研究分野をカバーすることができる一方で、今後の照射炉に強く求められる産業利用の促進のためには、産業界もより主体的に建設・運営に関わることが求められる。具体的にどのような方式で産学官連携を実現するかについては、今後、十分検討することが望まれる。

ビーム炉の次期炉を検討する場合、海外での研究炉の建設や運営で以下のことが参考

になる。

欧米で成功している中性子散乱施設は、例外なく中性子散乱研究者であるその施設の研究・経営陣が主体となって、研究の大きな方向性を考えながら研究炉、あるいは加速器、その中性子源などの仕様を決め、建設に関わり、運営している。中性子源・ガイドホールなどの将来計画、そこに設置すべき実験装置を決定し、予算要求するのもその研究・経営陣である。当然ながらその過程で中性子散乱コミュニティーの意見を取りまとめ、国際的アドバイスを受けながら計画を練り上げていく。

研究炉の炉心設計はそこに設置する冷中性子源、熱中性子源、高温中性子源、中性子飛行管、ガイド管などと密接に関わっていて、さらにそれらは最終的に設置する装置群の選択、最適化設計とも関り、その施設の将来の拡張計画に大きな影響を与える。どれ一つ取ってもその施設が目指す研究計画の将来像と無関係では有りえない。

このような意味で研究炉の設計を行うチームと中性子散乱研究に責任をもつチームとは相当に密接な関係を築かなければ総体として研究成果をあげられる施設を計画・設計・建設・運営することは難しい。一方、現状ではこれらの高度な判断を要求される技術的知識・経験を持った研究者の数は日本には著しく少ない。コミュニティーとしてそのような研究者を育てることの可能な研究組織を早急に立ち上げる必要がある。また、大学、研究所、民間、また海外との活発な人事交流が不可欠である。若い人材が供給され、内部の研究者が外部の大学・研究所などへ移動することでより活力のある研究コミュニティーができることになる。

さらにこのような運営をするためにはその研究・経営陣に予算及び人事に関する十分な権限が不可欠である。それ無しでは多額の予算を必要とする施設の建設、運営に関し責任を取れる組織がなくなり、研究・経営の判断はできてもそれを実行することができない組織となってしまう。

(2) 共同利用体制

① JRR-3 の施設供用制度

JRR-3 を用いた利用は、表6のように研究開発と研究開発以外に大別され、のうち研究開発は、JAEA の供用実験装置を用いる一般枠（原子力機構の「施設供用制度」と主に大学が所有する装置を用いる優先枠（東京大学原子力専攻共同利用管理本部（東京大学物性研究所を含む）の「大学共同利用制度」）に分類される。一般枠については、JAEA が定期募集（11月、5月）又は随時受付として課題を受付けている。優先枠及び研究開発以外の利用は定期的な課題公募はなく、随時受付により実施している。そのうち、大学が行う共同利用は、東京大学原子力専攻共同利用管理本部が窓口としてJAEA と契約を取り交わし実施している。

JAEA の施設利用については <http://tenkai.jaea.go.jp/facility/index.html> を参照されたい。

JRR-3 では、利用者の受付窓口、技術的相談、入構手続き、保安教育、実験支援などの対応を研究連携成果展開部、物質科学研究センター、研究炉加速器管理部が相互に

協力できる体制として一元的な窓口である JRR-3 ユーザーズオフィスを構築し、運営している。

表 6 JAEA の施設供用の利用区分

研究開発	一般 枠	成果公開	一般課題（定期募集、随時受付（緊急時のみ））
			競争的資金利用課題（定期募集、随時受付）
		成果非公開	一般課題（定期募集、随時受付）
			産業利用促進課題（定期募集、随時受付）
優先枠（大学の共同利用等）			
研究開発以外（RI 製造・シリコン半導体製造等）			

大学共同利用（全国共同利用）の利用区分

- ・一般課題 年一回公募
- ・IRT (Instrument and Research Team) 課題（装置担当者グループ課題）

各装置につき 1 課題

（出典）原子力安全に関する分科会で作成

② JRR-3 施設利用における課題と対応

日本学術会議で報告された提言「研究用原子炉のあり方について」[1]において、JAEA の「施設供用制度」と東京大学原子力専攻共同利用管理本部（東京大学物性研究所を含む）の「大学共同利用制度」が共存し、大学利用者から見た場合の 2 元的な利用窓口の複雑さや課題採択審査などで課題の重複の可能性などの非効率性に関するコメントがあった。このうち、利用窓口の問題については、JRR-3 ユーザーズオフィスと東京大学原子力専攻共同利用管理本部が同一建家内に配置され、相互の窓口間での情報交換が行い易くなったため、運転再開後の利用においては以前よりも改善されるものと思われる。また、中性子ビーム利用における課題採択においては、JAEA と東京大学物性研究所が共通の課題採択システムを用いることで、課題採択審査における課題の重複は避けられるようにしている。しかし、組織毎ではなく JRR-3 施設全体としての研究成果を最大限となるよう必要な見直しは適宜実施していくべきである。

③ JRR-3 施設全体としての研究成果最大限化に向けた取り組み

JRR-3 の再稼働、原子炉設備保全や高経年化対策等を確実に実施し、年間 7 サイクル（26 日/サイクル）の安定運転を実施することを前提として、ホームページによるきめ細かい情報の提供、東京大学物性研究所等との利用受付窓口の連携強化、ユーザーフレンドリーな課題申請システムの採用などユーザーズオフィスの機能の拡充を行うとともに、コーディネータ、実験支援者の配置等により供用体制の充実を図る。研究環境の充実の取り組みとしては、JRR-3 の高度化を図る。また、利用者のすそ野拡大の取り組みとして、J-PARC やつくば学園都市など国内トップクラスの大学、研究機関と近接するという地の利を生かして、JRR-3 を中心とした利用者の裾野の拡大と異

分野・異種融合を促進し、新しい成果及び価値の共創の場を創出する。社会的にインパクトの高い成果創出にむけて JRR-3 に関与する研究者、研究機関の有するシーズと産業界のニーズとのマッチングを図る、などが望まれる。

④ 共同利用施設における利用体制に関する視点

我が国の共同利用施設（大学に附置される研究施設のうち、共同利用・共同研究拠点として文部科学大臣の認定を受けたもの）の全てに当てはまることではあるが、近年の継続的な運営費の削減により、どこも厳しい運営を強いられている現状がある。

利用者の旅費や実験に関わる消耗品等の経費は、文部科学省等の共同利用拠点に関連する外部資金を、施設側の努力で獲得することによって、その一部が賄われている。しかしながら、この状況は、施設側の業務の増大と、それに伴う研究開発時間の減少を引き起こし、「世界でその施設でしかできない先端の研究設備を利用者に提供する」という、本来、施設側の一番大切なミッションが滞り、世界的な競争力の低下につながるという悪循環を引き起こしている。

この悪循環を断ち切るには、必要な運営費が適切に配分されることが最も大切であるが、施設側も利用者から適切な利用料を徴収できる仕組みが必要である。国には、利用料の原資となるよう利用者が獲得できる補助金等の研究資金の設置が望まれる

（米国では、研究炉やその付帯施設の利用に関してそのような仕組みが既に存在している）。これは、現在、施設側が獲得している共同利用拠点に関わる経費を、利用者が獲得することに対応する。これによって、利用者側の研究成果に対する責任とインセンティブが増大するとともに、施設側は自らの施設が利用者には選ばれるよう最高の利用環境を整えることに注力することになり、利用者にとっても大きなメリットとなるはずである。（J-PARC の MLF は中性子ビームを用いる実験施設であり、その共同利用の体制については<参考資料 3>を参照されたい。）

（3） 人材育成

研究炉を利用した人材育成は、各種の研究者の育成だけでなく、発電炉を運転する技術者の育成においても重要である。近年、新規に発電炉導入を計画しているアジア諸国においては、原子力技術者の育成が急務となっており、これに対応するため、産学官連携の原子力人材育成ネットワークが構築された。研究炉を利用した人材育成としては、文部科学省の平成 22 年度「国際原子力人材育成イニシアティブ」に係る公募事業として、国内の若手技術者、大学生・高専生等を対象に、JMTR を活用した総合的な研修講座が実施されていた。また、京都大学複合原子力科学研究所においても、学部学生・大学院生を対象とした実験教育が行われており、特に KUCA を用いた原子炉物理実験は全国大学の大学院生を対象として昭和 50 年から行われて大きな貢献をしてきた[1]。さらに、JMTR では、アジア諸国の原子力技術向上や人材育成を行うためのワールドネットワークの構築の一環として、平成 22 年度より海外若手研究者・技術者を招へいし、基礎的な実務研修を行っていた。

JMTR の廃炉の決定はこのような人材育成プログラムの廃止となり、これまで原子力分

野の人材育成に大きく貢献してきた京都大学複合原子力科学研究所の KUCA もいずれ廃炉となる時期が来る。つまり、現状で原子力分野の人材育成について明確な計画を検討する必要がある。

原子力委員会は平成 24 年に「原子力人材の確保・育成に関する取組の推進について」で以下のような見解を出している[9]。原子力発電所を保有する電気事業者にあっては、従事する人々が東電福島第一原子力発電所事故の教訓を血肉化することが必須であるが、同時に、原子力発電所の運転チームに安全技術者を配置するシフト安全技術者制度、運転員の資質の高い要求に対応するために学士の資格もしくはそれと同等の学術の素養を運転員に求める制度などを導入し、人材育成機能の在り方を見直し、一層充実させることを早急に検討すべきである、と提言している。

原子力発電所の運営母体組織である電力会社に就職する学生の 80%以上の理工系学生は大学あるいは大学院で原子力学を学んでいない電気、機械、建築、土木などの非原子力を専攻してきた学生である。これらの学生が入社後、短期間、原発従事者向けの座学中心の研修を受けているが、上述した原子力に関わる総合的な基礎学力を十分に習得しているとは言い難い。原発の通常のオペレーションとは異なる不測の事態に遭遇した時、あるいは事故時に現場にて緊急の判断を求められることを想定しなければならない。そのためには原子力に関する基礎学力および豊富な経験が要求される。それが短期間の研修で満たされるとは考え難い。つまり、各電力会社は大多数の非原子力専攻出身からの就職者に、原子炉の操作実習も含めた原子力教育を充実化させなければならない。そのための研究用・教育用原子炉の設置と社会人向けの原子力教育プログラムの制定、習得の認定制度の設置が早急に求められる。

さらに我が国において、将来、東京電力福島第一原子力発電所事故を起こした炉の廃炉、使用済燃料の処理・処分、通常の原子力発電所の廃炉など長期にわたる事業が必要とされる中で人材育成は重要で、研究炉が果たす役割は大きい。

6 まとめ

我が国における研究炉の在り方を検討した結果、以下のようにまとめられる。

(1) 研究炉の安全性に関して、研究炉は、発電炉と比較して低出力であり、崩壊熱や炉内に蓄積された放射エネルギーもけた違いに小さく環境への影響も小さいなどの特徴がある。また、炉型が多様であることから、異常時の状況もさまざまであり、リスクの大きさも異なる。新規基準では自然災害等への対応が強化されているが、グレーデッドアプローチを適切に適用するなど、合理的な安全規制が必要である。

(2) 多くの研究者の研究の場を与えてきた JRR-3、KUR、JMTR の中で JMTR の廃炉は原子力発電所の安全に係る研究の場を無くした。韓国や中国での原子力発電所の大きな事故が我が国へ大きな影響を及ぼす地理的条件からも、過酷事故を経験した我が国が安全研究を進めるために JMTR に代わる照射炉の建設は最重要課題である。

また、新たな研究炉ができるまでには長期間かかることから、照射炉のユーザーに対する支援が必要である。支援の内容としては、JRR-3 の照射設備の改善、海外研究炉の使用

などを検討することが望まれる。なお、海外研究炉の利用に関しては、8頁にあるように、「東北大学金属材料研究所では JMTR 停止以降、全国共同利用のための代替照射として海外炉を利用しているが、経費などの理由により JMTR 稼働時の 1/4 程度以下しか照射できていないのが現状である。」とされている。これをカバーするような支援が必要である。

(3) 研究炉の中で最も多くの研究者に研究の場を与えてきた JRR-3 が長期にわたり稼働できない状況が続き、世界の先端的研究から大きく後れを取る状況の中で、JRR-3 の高度化は重要な課題である。また、JRR-3 も高経年化が進みつつある。新たな研究炉の建設までには長期間かかることから、次期炉の検討を早急に進めるべきである。

(4) 大型共同利用施設では、建設の段階から運営の段階で利用者の意見を運営に反映させることが重要で、新たに建設する照射炉でこのような取り組みを取り入れることを実現すべきである。

(5) 将来、研究炉は産業利用や原子力発電所の安全性や廃炉に係る利用が増加すると考えられる。これに対応するために関係省庁は研究炉の建設や運営に必要な費用の適切な負担について検討する必要がある。

(6) 将来、東京電力福島第一原子力発電所事故を起こした炉の廃炉、使用済燃料の処理・処分、通常の原子力発電所の廃炉など長期にわたる事業が必要とされる中で人材育成は重要で、研究炉が果たす役割は大きい。

7 提言の内容

(1) 我が国の科学技術を支える量子ビームである放射光及び中性子を提供する施設の充実は重要である。特に、JMTR の廃炉による我が国における照射炉の消滅および JRR-3 や KUR などのビーム炉の高経年化は大きな懸念材料であり、早急な改善が必要である。

(2) 現状で最も重要なことは、照射炉の建設を早急に進めることである。出力は JMTR と同程度 (40~50MWth) とし、照射した試料を扱う実験施設を備える必要がある。研究炉の建設には長期間かかることから、この間のユーザーへの支援を行う必要がある。

(3) 中性子ビームの利用を促進するために、JRR-3 の早期の再稼働を進め、冷中性子源の増強と中性子導管のスーパーミラー⁺化等の高度化を図ることが必要である。また、長期的な観点から時間を要する JRR-3 の次期炉の検討を早急に進めるべきである。

(4) 研究炉の利用では産業利用および原子力発電所の安全性の研究開発の占める割合が大きくなると予想される。研究炉の建設や運営に対する費用について、関係省庁で適切な負担の在り方を検討する必要がある。また、将来の原子力発電所の廃炉や使用済燃料の処理処分等長期にわたる事業を支えるための人材育成が必要であり、研究炉は人材育成に大きく貢献できる

<参考文献>

- [1] 日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会、提言「研究用原子炉の在り方について」、2013年10月16日
- [2] 長期エネルギー需給見通し、平成27年7月、経済産業省
- [3] 照射炉の照射利用ニーズに関する調査報告書、JMTR 運営・利用委員会 照射炉利用ニーズ調査専門部会、2015年12月
- [4] Clément, B., Hanniet-Girault, N., Repetto, G., Jacquemain, D., Jones, V.M., Kissane, P., von der Hardt, P., “LWR severe accident simulation: synthesis of the results and interpretation of the first Phébus FP experiment FPT0”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 226 (1), Nov. 2003, pp. 5-82
- [5] 日本原子力学会「水化学」部会：「核分裂生成物挙動」研究専門委員会準備会編：Phébus FP プロジェクトにおける核分裂生成物挙動のまとめ - 福島プラント廃炉計画およびシビアアクシデント解析への適用、日本原子力学会、2017年5月
- [6] 日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会、記録「研究炉の長期停止に伴う影響調査」2017年8月28日
- [7] 次世代研究用原子炉検討特別委員会報告書、日本中性子科学会次世代研究用原子炉検討特別委員会、2012年12月
- [8] 原子力規制委員会 原規規発第 1511131 号、2015年11月13日
- [9] 原子力委員会、「原子力人材の確保・育成に関する取組の推進について（見解）」、2012年11月27日

＜参考資料 1＞審議経過

平成 29 年

10 月 27 日 研究用原子炉の在り方検討準備会（第 1 回）
委員長、副委員長、幹事の選出
研究用原子炉のあり方について自由討議

11 月 24 日 研究用原子炉の在り方検討準備会（第 2 回）
研究用原子炉のあり方について自由討議

平成 30 年

1 月 17 日 研究用原子炉の在り方検討準備会（第 3 回）
提言「研究用原子炉の在り方について（案）」について審議

3 月 1 日 研究用原子炉の在り方検討拡大準備会（第 1 回）
提言「我が国の研究用原子炉のあり方について（案）」について審議

平成 30 年

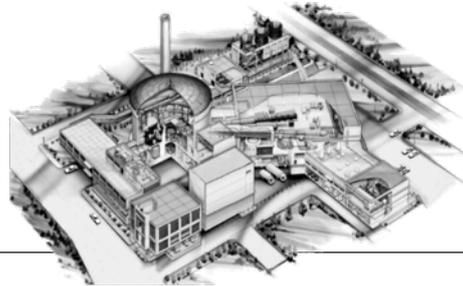
3 月 23 日～27 日 総合工学委員会 原子力安全に関する分科会（第 2 回・メール審議）
にて提言「研究用原子炉の在り方について」承認

6 月 28 日 日本学術会議幹事会（第 265 回）
提言「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」に
ついて審議、承認

<参考資料2> 研究炉の安全性の特徴

1. 研究炉の安全上の特徴 (JRR-3 の例)

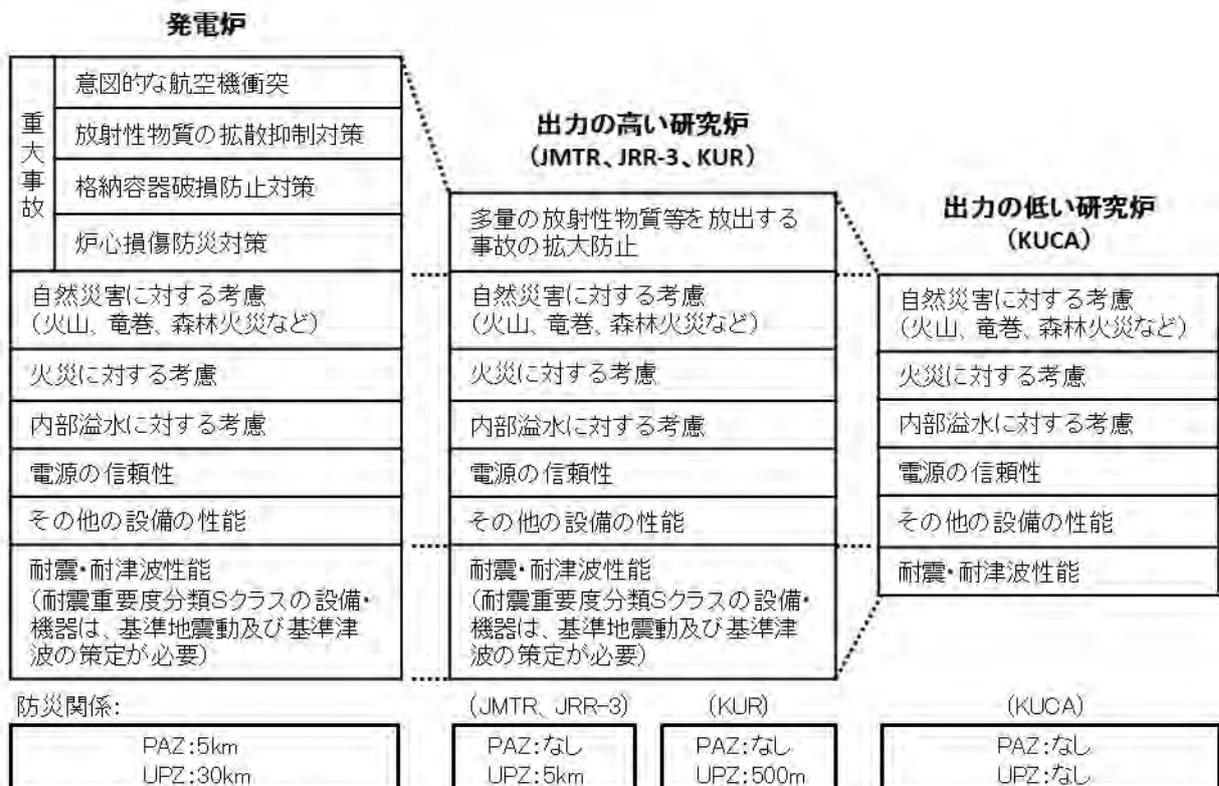
研究炉は、発電炉に比べて低出力であり、崩壊熱や炉内に蓄積される放射能量もけた違いに小さい。また、多量の冷却材を保有するプール内に設置されるため、全電源喪失の場合でも自然対流で冷却され、燃料の損傷には至りにくい。



JRR-3に関する安全上の特徴は以下のとおりである。

- 冷却材は常温、常圧。
- 安全保護系は”1 out of 2”ロジック、フェールセーフを採用。(⇒高い信頼性)
- 原子炉の異常時には、安全保護回路が作動し、制御棒は自動的に挿入される。この後は、特段の操作は不要。(⇒電源は不要)
- 運転中に全電源を喪失した場合にも、炉心からの崩壊熱は自然循環により除去できる実力を有している。(全電源を喪失したとしても炉心が損傷することはない。)
- 使用済燃料は自然循環により冷却される。
- 施設内の放射線量が低いため、事故時等に現場での対応が必要な場合にも、アクセス性が良い。
- 実験等の利用者に対して、異常時には、避難等の指示を行う。

2. 発電炉と研究炉の新規制基準の比較



PAZ:急速な事故の進展を想定し、予防的に避難等を実施する区域
UPZ:急速に進展する事故の可能性等を踏まえ、避難や屋内退避等を準備する区域

<参考資料3> 照射炉の利用ニーズ

「照射炉の照射利用ニーズに関する調査報告書、平成28年12月、JMTR 運営・利用委員会 照射炉利用ニーズ調査専門部会」より

総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会及び原子力学会の特別委員会のもと、平成27年6月に「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」が取りまとめられ、我が国の軽水炉の安全性向上を効率的に実現する技術開発及び人材育成の将来に向けた道筋が示された。

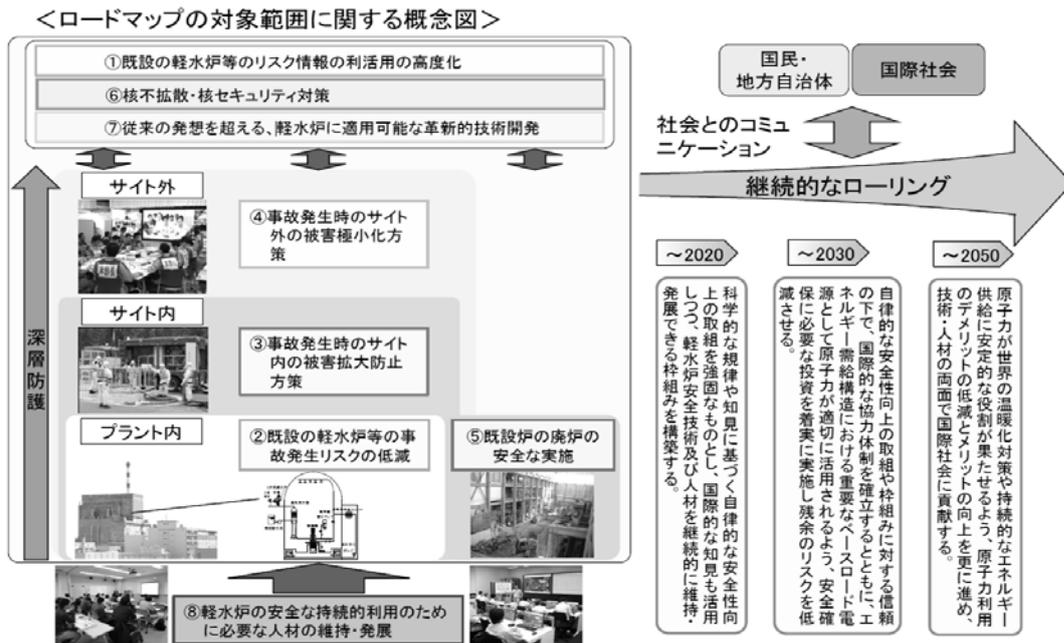


図1 軽水炉安全技術・人材ロードマップの必要性と役割

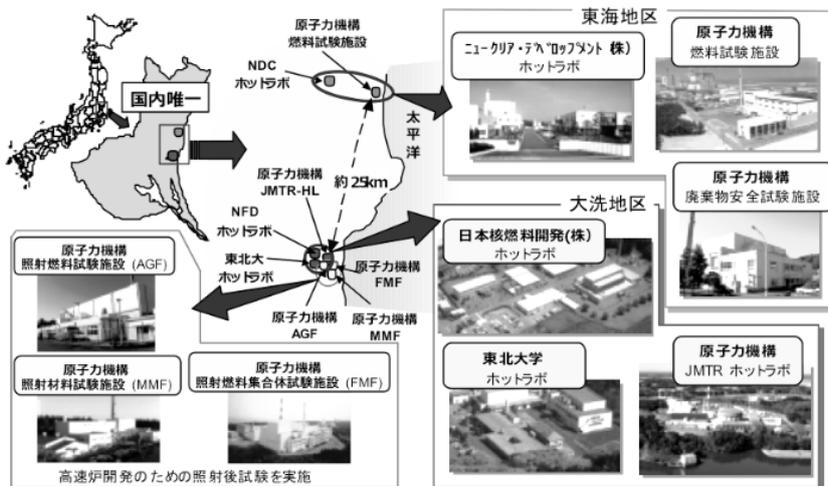


図2 大洗地区・東海地区に設置されている照射後試験施設群

原子力機構大洗研究開発センター近郊には、原子力機構のNSRR、常陽等の燃料・材料試験が可能な原子炉、各種の照射後試験施設、東北大学をはじめ、民間の照射後試験施設が隣接しており、この様な施設群が比較的狭い範囲で密集している地域は、世界でもほとんど例がない。

医療用に限らず、全ての RI の内、中性子との核反応を利用して製造する RI について、「国内で開発した RI」、「利用度の高い RI」、「研究のために国産化が必要な RI」及び「国内安定供給のために国産化が急務とされている RI」の観点から調査を行った。これらの具体例を表 1 から表 4 に示す。

表 1 国内で開発した RI

核種	半減期	生産方法	用途・特記事項
^{192}Ir	73.83d	$^{191}\text{Ir}(n, \gamma) ^{192}\text{Ir}$	工業用(非破壊検査)、 $\phi 2.0 \times 2.0\text{mm}$ Ir ペレット、370GBq(10Ci)/個(使用時)
^{60}Co	5.269y	$^{59}\text{Co}(n, \gamma) ^{60}\text{Co}$	工業用(計測機器)、 $\phi 0.46 \times 10\text{mm}$ 及び $\phi 0.91 \times 15\text{mm}$ Co ニードル、37MBq(1mCi)、185MBq(5mCi)、370MBq(10mCi)、740MBq(20mCi)
^{169}Yb	32.0d	$^{168}\text{Yb}(n, \gamma) ^{169}\text{Yb}$	工業用(非破壊検査)、 $\phi 1.0 \times 2.0\text{mm}$ Y_2O_3 ペレット、370GBq(10Ci)/個(使用時)
^{198}Au	2.6937d	$^{197}\text{Au}(n, \gamma) ^{198}\text{Au}$	医療用(舌癌治療)、 $\phi 0.8 \times 2.5\text{mm}$ Au グレイン、185MBq(5mCi)/個

表 2 利用度の高い RI

核種	半減期	生産方法	用途・特記事項
^{60}Co	5.269y	$^{59}\text{Co}(n, \gamma) ^{60}\text{Co}$	工業用(滅菌用線源)、スラグ $\phi 6 \times 25\text{mm}$ またはディスク $\phi 7 \times 1.1\text{mm}$ (密封カプセル寸法: $\phi 11.1 \times 451.5\text{mm}$)、296~480TBq(8,000~13,000Ci)/本
^{192}Ir	73.83d	$^{191}\text{Ir}(n, \gamma) ^{192}\text{Ir}$	工業用(非破壊検査)、 $\phi 1 \times 0.5\text{tmm}$ ウエハー $\times 2$ 枚、370~1,110Gq(10~30Ci)/個 医療用(小線源治療)370GBq[10Ci]/1 個
^{125}I	59.4d	$^{124}\text{Xe}(n, \gamma) ^{125}\text{Xe}$ $\beta \rightarrow ^{125}\text{I}$	医療用(前立腺がん治療)、 ^{124}Xe ガスループ又は密封照射、15MBq/個
^{89}Sr	50.53d	$^{88}\text{Sr}(n, \gamma) ^{89}\text{Sr}$	医療用(疼痛緩和薬)、酸化ストロンチウム(SrO)を照射、強 β : 1.495MeV(100%)

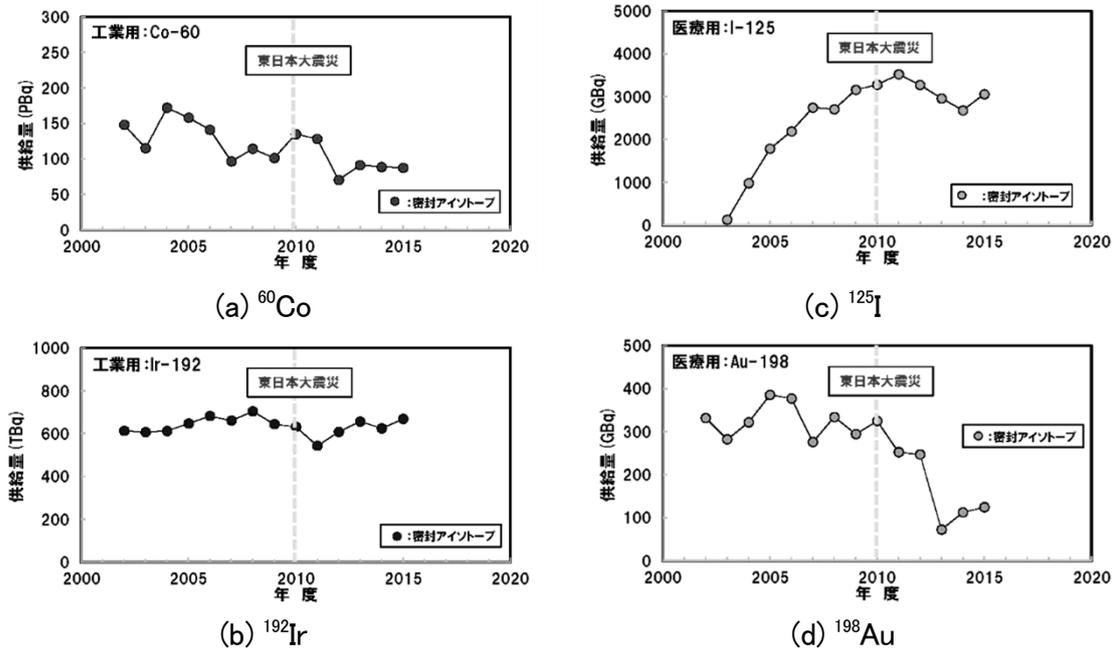
表 3 研究のために国産化が必要な RI

核種	半減期	生産方法	用途・特記事項
$^{188}\text{W}-^{188}\text{Re}$	69.4d/17h	$^{186}\text{W}(n, \gamma) ^{187}\text{W}$ $^{187}\text{W}(n, \gamma) ^{188}\text{W}$ $\beta \rightarrow ^{188}\text{Re}$	医療用(核医学診断・がん治療薬)、 ^{188}Re ジェネレータ、MAB 標識がん治療薬、強 β : 0.965MeV(25.6%), 2.12MeV(71.0%)、 WO_3 粉末を照射
^{186}Re	3.72d	$^{185}\text{Re}(n, \gamma) ^{186}\text{Re}$	医療用(核医学診断・がん治療薬)、MAB 標識がん治療薬 強 β : 0.939MeV(92.2%)、Re 金属粉末を照射
^{177}Lu	6.73d	$^{176}\text{Yb}(n, \gamma) ^{177}\text{Yb}$ $\beta \rightarrow ^{177}\text{Lu}$	医療用(がん治療薬)、MAB 標識がん治療薬 強 β : 0.497MeV(78.6%)、 Yb_2O_3 粉末を照射

表 4 国内安定供給のために国産化が急務とされている RI 製品

核種	半減期	生産方法	用途・特記事項
$^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$	66h/6h	$^{98}\text{Mo}(n, \gamma) ^{99}\text{Mo}$	医療用(核医学診断薬)、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータ原料、 MoO_3 ペレットを照射、 ^{99}Mo : 37TBq(1000Ci)/週、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$: ~11TBq(300Ci)/日

代表的な RI の供給量の推移を図3に示す。国内で開発した RI は、海外からの代替品の入手が困難であり、国内製造が不可欠なものとして開発されたものである。例えば、医療用の小線源として開発された Au-198 については、安定供給が困難な状況が続いている。



※: JRR-3 は平成 22 年 11 月まで稼働

図3 代表的な RI の供給量の推移

安定供給のために国産化が急務とされている RI としては Mo-99 があげられ、少なくとも国内需要量の一部でも国産化で確保しておくことが重要である。Mo-99/Tc-99m ジェネレータ医薬品の供給量と Tc-99m 注射剤の供給量を図4に示す。Mo-99/Tc-99m は、核医学診断薬として重要な核種である。

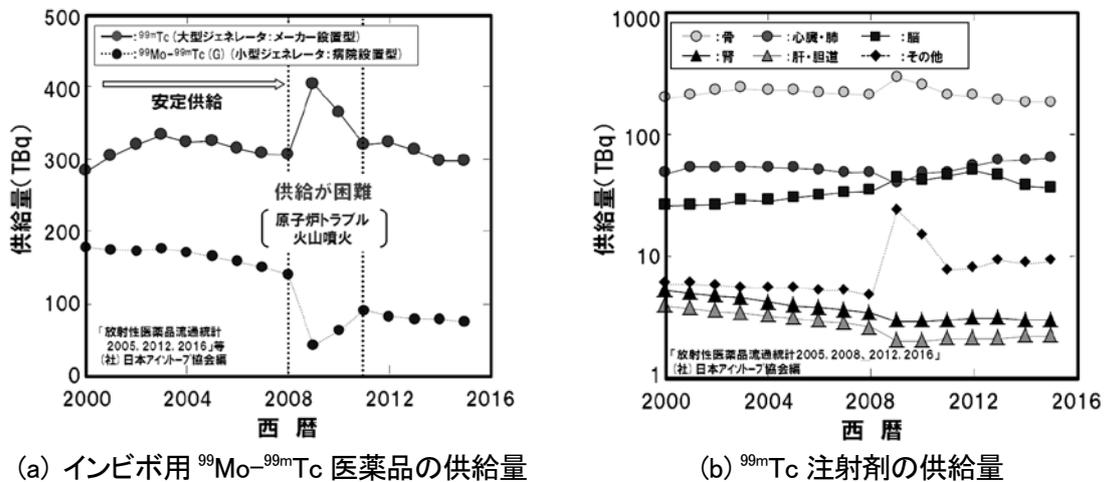


図4 インビボ用 ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 医薬品の供給量と $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 注射剤の供給量

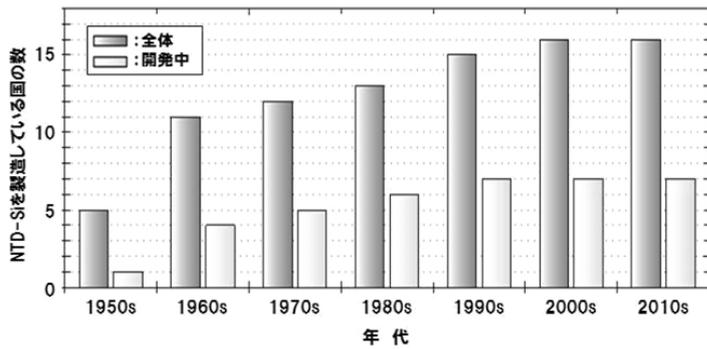
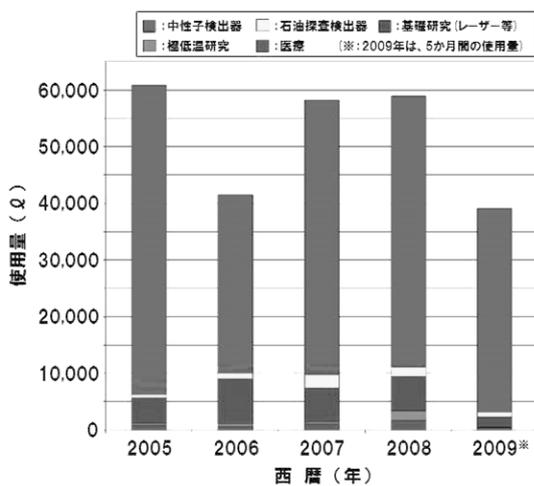


図5 NTD法によりSi半導体を製造している国の数

シリコンの照射は、1950年代から開始され、2010年代には16ヶ国の試験研究炉で製造されている。製造開発をしている国も7ヶ国あり、製造施設は増加傾向にあるが、日本のJRR-4やフランスのOSIRIS等の試験研究炉は廃炉となっており、製造施設を確保することも今後の課題となっている。



(a) ³Heの使用内訳 (2005~2009年)



(b) 中性子検出器の配備例

He-3は、中性子検出器、石油探査用検出器、基礎研究、極低温研究、医療分野等で利用されている。平成13年の同時多発テロ事件以降、米政府が各空港等にHe-3を使った中性子検出器を大量に配備し始めたこと、米国内に大量の³Heを必要とする新たな中性子散乱実験施設の建設が計画されたこと等から、平成20年を境に受給バランスが大きく崩れ、He-3不足と価格高騰という深刻な問題が起きた。

図6 ³Heの使用内訳とテロ対策用中性子検出器の配備例

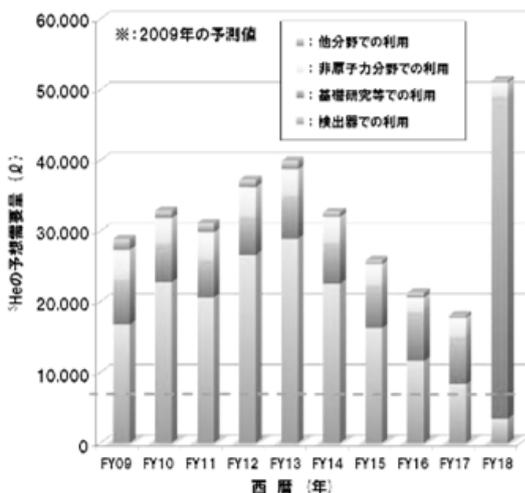


図7 ³Heの予想需要量

平成21年に予想されたHe-3の予想需要量(10年間)を図7示す。中性子検出器の配備はほぼ完了し、その需要は減少傾向にあるものの、各国で新たな中性子散乱実験施設が整備され、基礎研究等で大量のHe-3が必要と予想されている。このため、前述のとおり、He-3は不足状態が続き、現在も入手が困難な状況である。

<参考資料4> JRR-3 と J-PARC における利用体制について

1. JRR-3 と J-PARC における課題審査体制の比較

JRR-3 と J-PARC の中性子ビーム利用課題の審査体制とマシンタイム割り当て決定体制との比較を図1に示す。利用者から見ると、J-PARC の受付窓口が J-PARC ユーザーズオフィスに一元化されているのに対し、JRR-3 の受付窓口が大学共同利用窓口と JRR-3 ユーザーズオフィスに分かれている。

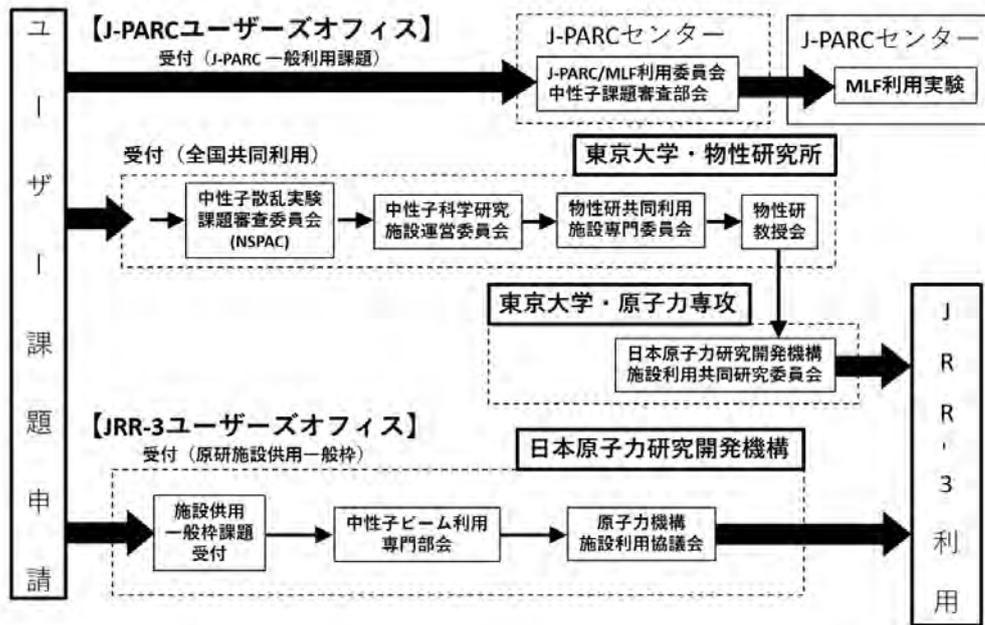


図1 JRR-3 と J-PARC における課題審査体制の比較 (ビーム利用)

(東京大学物性研究所附属中性子科学研究施設運営委員会の配布資料に基づき作成)

2. J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) における体制

J-PARC/MLF の利用は表1のように一般利用、プロジェクト・装置利用、第三者占有利用の区分に大別されている。一般利用区分は、国内外を問わず幅広い利用者に開放することを目的に一般公募される区分である。プロジェクト・装置利用区分は、J-PARC 装置及び共用装置で、JAEA、KEK 及び登録機関が主導的に利用、あるいは大学等と共同で利用する区分である。また、第三者占有利用区分については、茨城県が専用装置として中性子実験装置を設置し、産業利用を目的とした実験課題の公募を行っている。

J-PARC の施設利用に係る利用者支援については、J-PARC ユーザーズオフィスを一元的な窓口とする体制を構築している。

J-PARC の施設利用については <https://j-parc.jp/> を参照されたい。

表 1 J-PARC/MLF における利用区分

利用区分	課題の名称	対象装置	受付種類	利用種別
一般利用	一般課題（短期）	全装置	定期募集（2回／年）	成果公開型／ 成果非公開型
	一般課題（長期）	中性子装置	定期募集（1回／年）	成果公開型
	P型課題	ミュオン装置	定期募集（2回／年）	成果公開型
	新利用者支援課題	共用装置	定期募集（2回／年）	成果公開型
	緊急課題	全装置	随時	成果公開型／ 成果非公開型
プロジェクト・装置利用	プロジェクト課題	全装置	定期募集（1回／年）	成果公開型
	装置グループ課題	全装置	定期募集（1回／ 年）	成果公開型
	開発課題	共用装置	定期募集（1回／年）	成果公開型
第三者占有利用	産業利用課題	iBIX,iMATERIA	随時	成果公開型／ 成果占有型
	茨城県プロジェクト課題	iBIX,iMATERIA	2回／年, 1回／年	成果公開型

＜参考資料 5＞研究炉の燃料問題

今後、研究炉を計画する場合には、新燃料及び使用済燃料に関して、次の問題について配慮する必要がある。

新燃料について

現在、研究炉に使用されている燃料は、主として濃縮度 20%未満の低濃縮ウラン・シリサイド燃料である。一方、海外ではウラン・シリサイド燃料に比べてウラン密度が高く、かつ再処理性に優れたウラン・モリブデン燃料の開発が進められている。まだ実用には至ってはいないが、将来的にはウラン・モリブデン燃料が研究炉の主たる燃料となることが予想される。

したがって、使用済燃料の処理処分の課題と合わせて、今後の開発状況を勘案しつつ、ウラン・シリサイド燃料及びウラン・モリブデン燃料の双方を候補として検討する必要がある。

使用済燃料について

現在、我が国で発生した研究炉の使用済燃料は、基本的に米国へ返還することで日米合意がなされている。しかし、その返還受け入れ期限は 2029 年 5 月であり、その後については現在のところ未定である。従って、それ以降の研究炉運転については、発生する使用済燃料の取り扱いを新たに決める必要があり、以下の 3 つの方法が可能性として考えられる。

① 米国返還期限延長

国内研究炉の使用済みの低濃縮ウラン燃料の返還は、米国の核不拡散政策の下、米国エネルギー省 (DOE) が発表した外国研究炉使用済燃料受入プログラム (Foreign Research Reactor Nuclear Spent Fuel Acceptance Program) に基づく契約によるものである。これは、基本的に高濃縮ウラン燃料を低濃縮ウラン燃料に変更した研究炉からの使用済燃料が対象であり、米国による高濃縮ウラン燃料の返還促進のためのプログラムである。従って、高濃縮ウラン燃料返還後に低濃縮ウラン燃料を対象として本プログラムが延長されることは期待できない。

② 国内外での再処理

米国への返還期限が延長されても、将来的には使用済燃料の米国引き取りは終了するものと思われる。従って、米国返還以外の使用済燃料の処理処分体制を早々に構築することが必要である。

国内での再処理を考えた場合、発生する研究炉の使用済燃料の量が少ないため、技術的には可能であっても再処理の経費負担は割高になることから商業ベースに乗る可能性は低いと考えられる。また、国外に再処理を依頼する場合、再処理後に返還される高レベル廃棄物の保管が伴う点に注意が必要である。

③ 発生した状態のまま長期保管

原子力発電所と比較して、研究炉から発生する使用済燃料の量は格段に少ないため再処理を行わずに長期にわたって保管管理を行うことも現実的な解決策となり得る。さらに、研究炉単独ではなく、原発の使用済燃料と統合して管理できる場合、より現実的な

案となり得るだろう。しかしながら、長期保管は使用済燃料の抜本的な解決策ではないことを鑑みると、現行の政策にある使用済燃料の再処理を前提としたものではなく、直接処分も含めた使用済燃料の最終処理処分について早々に見直す必要がある。

<参考資料6>用語集

ANSTO	Australian Nuclear Science and Technology Organization、オーストラリアの国立研究所
APS	Advanced Photon Source、米国の放射光施設
BNCT	Boron Neutron Capture Therapy、中性子捕捉療法
ESRF	European Synchrotron Radiation Facility、欧州の放射光施設
FRM-II	ドイツの研究炉
HANARO	High-Flux Advanced Neutron Application Reactor、韓国の研究炉
HFR	High Flux Reactor、フランスの研究炉
HFIR	High Flux Isotope Reactor、米国の研究炉
HTTR	High Temperature Engineering Test Reactor、高温工学試験研究炉
IASCC	Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking、照射誘起応力腐食割れ
ILL	Institute Laue-Langevin、フランス グルノーブルにある研究所
ISIS	英国の加速器中性子源
JAEA	Japan Atomic Energy Association、日本原子力研究開発機構
JMTR	Japan Materials Testing Reactor、JAEA が持つ材料試験炉
JOYO	高速実験炉「常陽」
J-PARC	Japan Proton Accelerator Research Complex、大強度陽子加速器施設
JRR-3	Japan Research reactor No. 3、JAEA が持つ研究炉
KEK	高エネルギー加速器研究機構
KUCA	Kyoto University Critical Assembly、京都大学臨界集合体実験装置
KUR	Kyoto University Research Reactor、京都大学研究用原子炉
MLF	J-PARC の Materials and Life Science Experimental Facility、物質・生命科学実験施設
NIST	National Institute of Standards and Technology、アメリカ国立の計量標準研究所
NSBR	米国度量衡基準局（現在の NIST）の原子炉
NSRR	Nuclear Safety Research Reactor、JAEA の原子炉安全研究炉
OPAL	Open Pool Australian Light-water reactor、オーストラリアの研究炉
RI	Radio Isotope、放射性同位元素あるいは放射性同位体
SNS	Spallation Neutron Source、米国の加速器中性子散乱施設
Spring-8	播磨科学公園都市にある大型放射光施設 Super Photon ring-8 GeV に由来している
インパイルループ	軽水炉内の水環境を模擬する条件で、炉室内に置く照射試験が可能な高温水循環、供給装置

ウラン・シリサイド燃料	低濃縮燃料の代表的なもので、ウランにケイ素を混ぜた燃料
ウラン・モリブデン燃料	低濃縮燃料の一つで、ウランとモリブデンの合金燃料
可燃性毒物	燃料燃焼に伴う反応度低下を補償する物質。中性子を吸収し、中性子の吸収の少ない他の同位体に変化する。研究炉では主にカドミウムが用いられている。
グレーデッドアプローチ	原子炉のリスクに応じた合理的な規制を行うための手法。IAEA「基本的安全原則」での記載によると、「安全のために設置者によって投入されるリソースや、規制の対象範囲および厳格さとその適用は、放射線リスクの大きさとその制御可能性に見合ったものでなければならない。」とされている。
シリコンドーピング	原子炉内に設置したシリコン単結晶に中性子を照射すると、シリコン中に存在する Si-30 が中性子照射を受け Si-31 が生成され、これがベータ壊変して安定同位元素のリン (P-31) に変換する。シリコン中性子照射ドーピングはこの反応を利用して単結晶中にリンを均一に配置させる方法
深層防護	原子炉の安全対策を多重に講じること。第1～3層はプラントの当初の設計にかかわるもので、異常運転や故障の防止と制御、事故の制御を目的とする。第4層は、プラントの設計基準外の部分で、事故の進展や重大事故の影響緩和を目的とし、格納容器の防護などが含まれる。第5層は、放射性物質が大規模に放出された場合の影響の緩和が目的で、原発の敷地外も含めた緊急時の対応方法を定める必要があるとする。
スクラム	原子炉の緊急停止
スーパーミラー	中性子を効率よく導くために内側を特殊な膜で覆ったもので、ニッケル全反射のm倍という言い方で性能を表す。m=2を2Q、m=3を3Qという。
破壊靱性試験	切り欠きを有する試験片に単調増加荷重を与え、荷重と切り欠き開口変位等の関係から、亀裂が伝搬して破壊する際に示す材料の抵抗性を評価するための試験である。
ホットラボ	放射能の強い物質を安全に取り扱える 施設を有する実験室
娘核種	放射線壊変では壊変前の核種がα線やβ線を放出して壊変後の核種に変わる。壊変前の核種を親核種といい、壊変後の核種を娘核種という。
もんじゅ廃炉	JAEAは高速増殖原型炉「もんじゅ」の運営を行っていたが、「もんじゅ」を巡っては平成27年11月に原子力規制委員会が半年を目途に、安全に運転できる新たな事業者を示すよう文部科学大臣に異例の勧告を出した。しかし、文部科学省は勧告に対する回答期限を過ぎても新たな事業者を示せず、結局廃炉となっている。
リグ	多重に計装を施した燃料集合体をひとまとめにし、それを収納容器中に入

	<p>れて原子炉に装荷している。この多重計装燃料付きの収納容器を総称して、照射リグといい、測定リグ、多目的リグのように用いる。</p>
<p>ループキュービクル</p>	<div data-bbox="497 300 1225 719" data-label="Image"> </div> <p>遮蔽能力があり、各種のループ試験設備を設置するための設備</p>
<p>レオメーター</p>	<p>材料の粘土を測定する装置</p>