

(案)

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）〇月〇日

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実験所所長、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		福井大学附属国際原子力工学研究所副所長・教授
海老原 充		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		北海道大学工学研究院量子理工学部門教授
楠 剛		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		東京大学物性研究所教授
橋本 憲吾		近畿大学原子炉研究所教授
林 眞琴		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		大阪大学大学院工学研究科教授
山本 章夫		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、スピンをもつこと、陽子との反応断面積が比較的大きいことなどから中性子による分析は放射光による分析と相補的な分析手段である。このために我が国の試験研究用原子炉（以下「研究炉」という。¹⁾）やその関連施設の多くは、学术研究分野、医療分野や産業利用分野で広く用いられてきた。また、発電用原子炉に使用する燃材料の照射試験等により、原子力発電の安全性を判断する知見がもたらされてきた。

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(JAEA²⁾)の研究炉 JRR-3[†]や京都大学複合原子力科学実験所の研究炉 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。平成 25 年 9 月には JAEA の研究炉 JRR-4[†]の廃炉の決定、平成 29 年 3 月には JAEA の研究炉 JMTR[†]の廃炉の決定が示された。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適している。一方、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。

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。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。具体的には、压力容器の中性子照射による脆性破壊の防止、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などの過酷事故対策、水化学管理技術など多岐にわたるが、JAEA の照射試験炉 JMTR が廃炉となり、このような研究が国内ではできない状況にある。

¹ 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。

² [†]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。

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、アクションプランが公表され、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、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。なお、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。

今後の原子力発電所の廃炉、使用済み燃料の処分など、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は重要な課題である。

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 の高度化として、冷中性子源の増強と中性子導管のスーパーミラー[†]化等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み燃料の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は平成 25 年に提言を発出した[1]。そ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。

学術界や産業界では、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、スピンをもつこと、陽子との反応断面積が比較的大きいことなど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⁺、原子炉施設の照射炉として JMTR、ビーム炉として JRR-3、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。そのため、事故の進展も穏やかで、環境への影響も小さいなどの特徴がある。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]。一方、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。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。新規規制基準の適合性確認を合理的に進めるためには、個々の炉の安全上の特徴を考慮したグレーデッドアプローチの適切な適用が有効である。＜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、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

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⁺。

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、中性子がスピンをもつこと、陽子との反応断面積が比較的大き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。また中性子はスピンを持っているために磁性粒子であり、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、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実験所が運営している。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では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、使用済み燃料の処理・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。使用済み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～30MW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クラスの照射試験炉	燃料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	5×10 ¹⁴ 程度	60体以上	発電炉の開発、安全

(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。

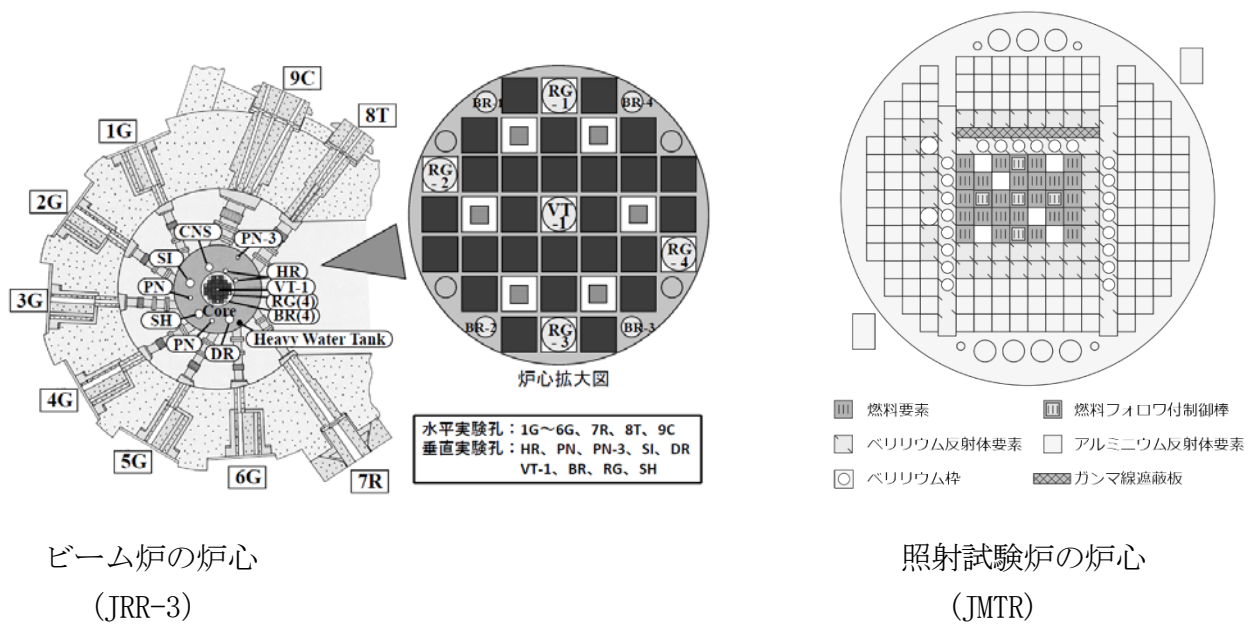


図1 ビーム炉と照射炉の炉心

(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/Gr	無	高温ガス冷却炉開発	19
STACY	JAEA	均質炉	0.2kW				窒化ウラン溶融燃料臨界安全研究	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、ZRH	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

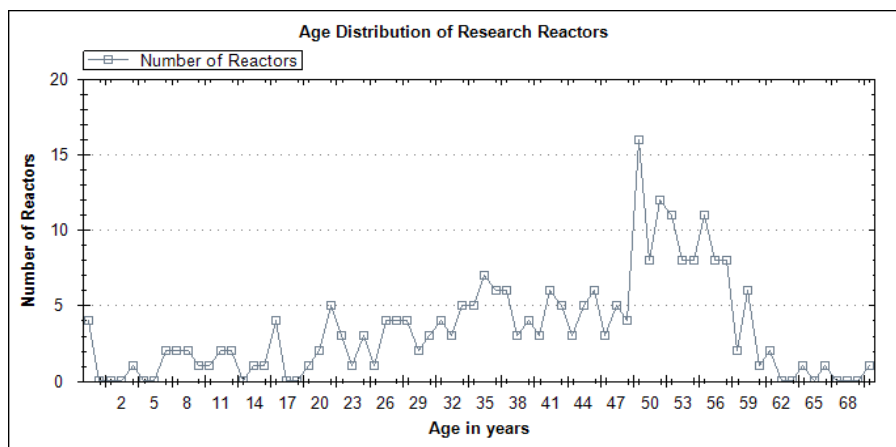


図 2 世界の研究炉運転年数

(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⁺でいう第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ージメントに則り、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、アクシデントマネー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、照射炉を国内に保持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。

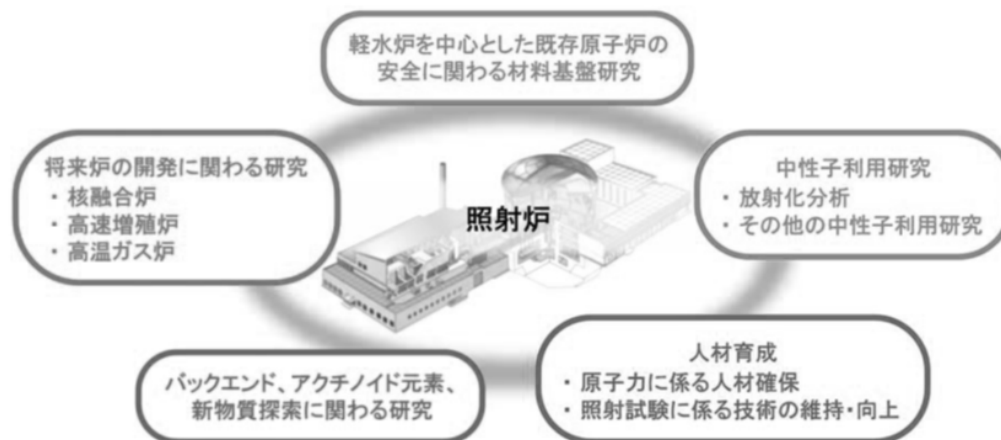


図3：照射炉の必要性（参考文献[3]より）

以上の照射炉の研究ニーズや、国内に照射炉を保持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、フレキシビリティ

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な変遷の可能性もある。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フレキシブルかつ精度良く制御できることが重要な要件である。

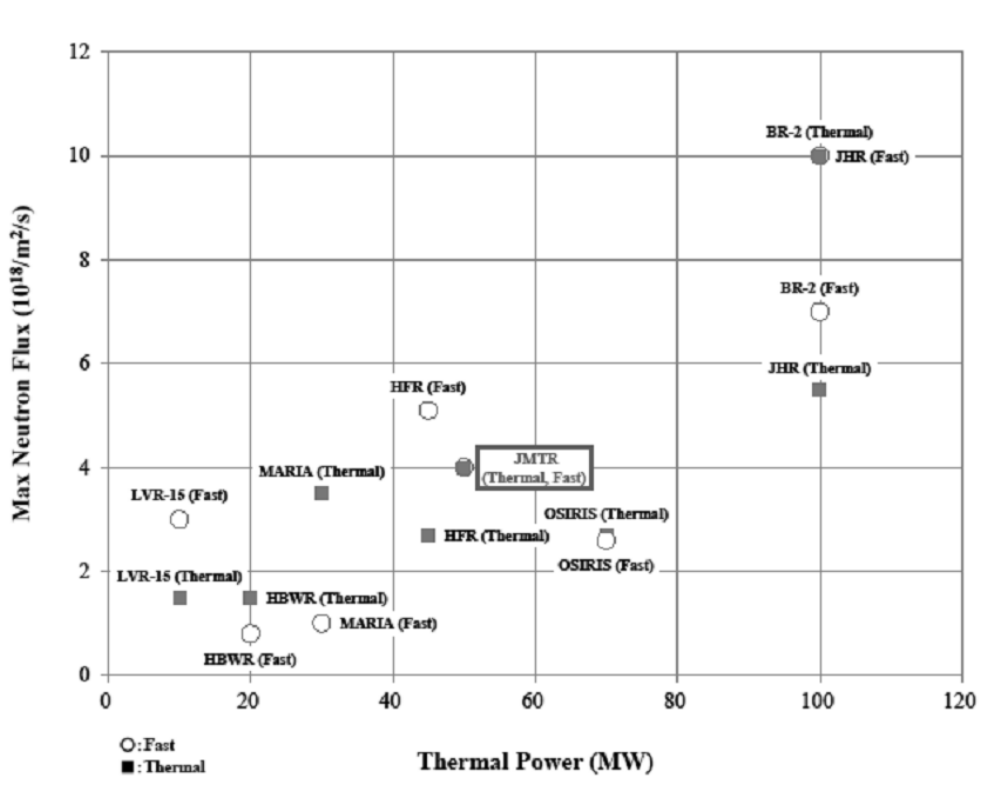


図4：世界の主要な照射炉の中性子束

(出典) IAEA RRDB に基づき等分科会で作成

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、压力容器の

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チャンネ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。

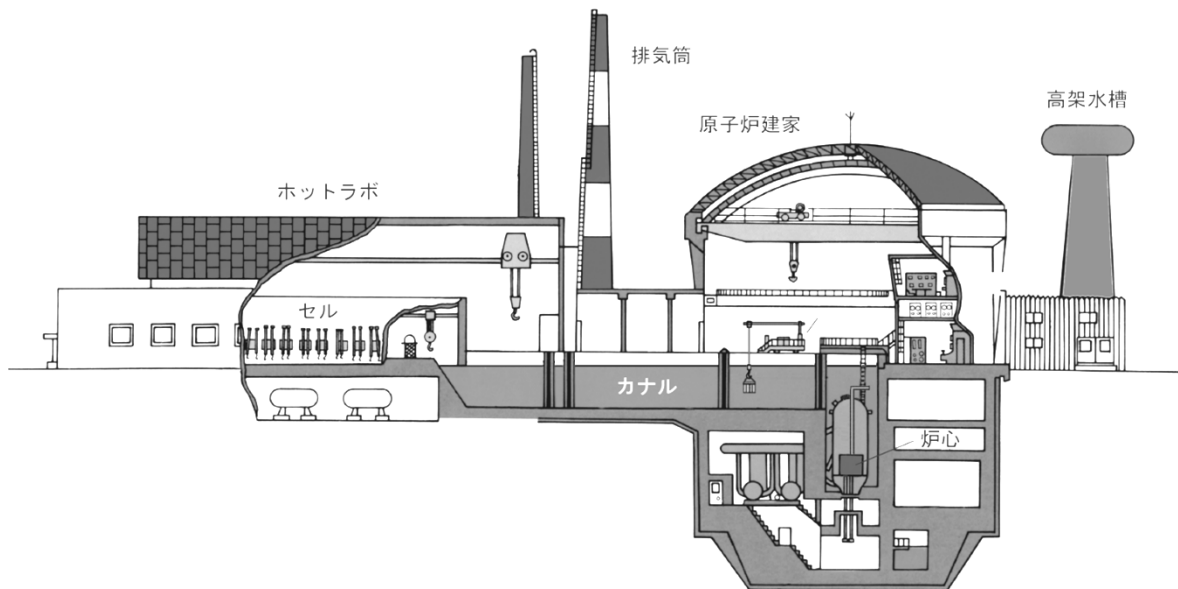


図5：照射炉とホットラボ

（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 先端的研究を行う研究グループが敷地内あるいはごく近傍にあること

最も重要な要件として研究炉を置く敷地内あるいは近傍に研究組織があり、その組織が実験装置などを常時使用し、改善を加え、先端的な研究のできる状況を保つことである。

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 6 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 の高度化は中性子科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、

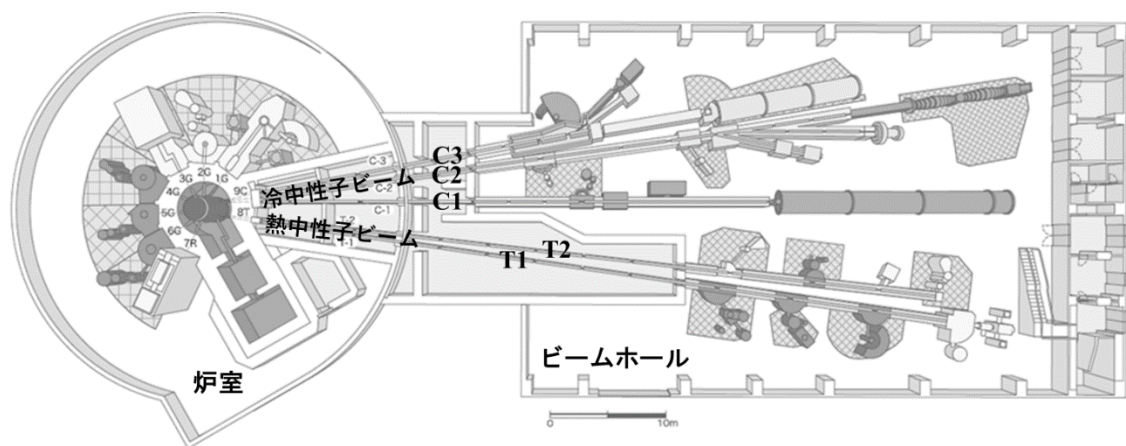


図6 JRR-3 の平面図

(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。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