

提 言

研究用原子炉のあり方について



平成25年（2013年）10月16日
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

この提言は、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内に設置された研究用原子炉のあり方検討小委員会の審議を反映して取りまとめ、公表するものである。

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

委員長	柴田 徳思	(連携会員)	公益社団法人日本アイソトープ協会常務理事
副委員長	井上 登美夫	(連携会員)	横浜市立大学大学院医学研究科教授
幹事	木南 凌	(連携会員)	新潟大学大学院医科歯学系名誉教授
委員	田中 啓二	(会員)	公益財団法人東京都医学総合研究所所長
	神谷 研二	(連携会員)	広島大学原爆放射線医科学研究所教授
	唐木 英明	(連携会員)	倉敷芸術科学大学学長
	神田 玲子	(連携会員)	(独)放射線医学総合研究所放射線防護研究センター上席研究員
	櫻井 博儀	(連携会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
	佐々木 康人	(連携会員)	医療法人日高病院腫瘍センター特別顧問
	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
	中西 友子	(連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
	宮川 清	(連携会員)	東京大学大学院医学系研究科教授
	山本 一良	(連携会員)	名古屋大学理事・副総長

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 研究用原子炉のあり方検討小委員会

委員長	柴田 徳思	(連携会員)	公益社団法人日本アイソトープ協会常務理事
副委員長	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
幹事	河村 弘		日本原子力研究開発機構福島技術本部福島廃炉技術安全研究所長
幹事	森山 裕丈		京都大学原子炉実験所所長
	唐木 英明	(連携会員)	倉敷芸術科学大学学長
委員	中西 友子	(連携会員)	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
	井頭 政之		東京工業大学原子炉工学研究所教授
	石橋 健二		九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻教授
	上坂 充		東京大学大学院工学系研究科教授
	海老原 充		首都大学東京大学院理工学研究科教授
	小野 公二		京都大学原子炉実験所附属粒子線腫瘍学研究センター客員教授

勝村 庸介	東京大学大学院工学系研究科教授
鬼柳 善明	北海道大学大学院工学研究院名誉教授
四竈 樹男	東北大学金属材料研究所教授
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	茨城県企画部技監 中性子利用推進担当
丸尾 毅	日本原子力研究開発機構東海研究開発 センター原子力科学研究所原子炉加速器 管理部長
三島 嘉一郎	原子力安全システム研究所技術システム 研究所長
山口 彰	大阪大学大学院工学研究科教授

本件の作成に当たっては、以下の職員が事務及び調査を担当した。

事務	石原 祐志	参事官(審議第二担当)
	齊田 豊	参事官(審議第二担当)付参事官補佐
	沖山 清観	参事官(審議第二担当)付審議専門職
調査	辻 明子	上席学術調査員

要 旨

1 作成の背景

原子力・放射線関係の研究・開発が本格的に開始されて半世紀余りを経過した現在、研究用原子炉（以下、「研究炉」という。）は、人類の文明、生活基盤に深く根ざした研究・開発・教育のインフラストラクチャーとなっている。利用の分野は広く、学術、科学・技術、産業利用、医療利用など多岐にわたり、それぞれの分野で一層の進展が期待されている。研究炉の利用を今後も安定的に維持・継続していくことは、我が国における学術、科学・技術の発展の観点から重要である。そのためには、研究炉が共通的・基盤的なインフラであることから、研究炉の維持と強化の方策について、中長期の視点に立った上で、研究機関や大学を問わない全国的な観点から、検討を行う必要がある。この認識をもとに、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、研究用原子炉のあり方検討小委員会を設置して我が国における研究炉のあり方を検討することとした。

2 現状及び問題点

世界的には 200 基以上の研究炉が運転中であり新たな研究炉の建設や計画もみられるが、我が国の現状をみれば、新たな研究炉の計画は無く、運転可能な 14 基の研究炉については高経年化や使用済燃料の問題などの多くの課題が山積しており、利用可能な研究炉の数は減少しつつある。加えて 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故による被害は甚大である。研究炉は中性子源であり、エネルギー源である発電用原子炉（以下、「発電炉」という。）と機能は異なるとは言え、原子炉施設としては共通する面もあり、今回の事故の教訓等を踏まえた検討が不可欠である。一方、将来の研究開発や産業の分野で中性子による分析は不可欠の手段と考えられ、その利用は大きく広がると予想される。我が国の現状は J-PARC を除くと世界をリードする中性子源はなく、J-PARC だけで我が国の中性子利用を支えることは不可能な現状がある。

3 提言等の内容

研究炉については、その利用のメリットや必要性とともに、原子炉施設としてのリスクがあり、そのリスクに対処するための真摯な取り組みが不可欠であるが、我が国における学術、科学・技術の発展の観点から、研究炉の利用を今後も安定的に維持・継続していくことが重要である。そのために求められる既存及び将来の研究炉のあり方について、以下の提言を行う。

(1) 研究炉の役割と位置付け

我が国では、研究炉は、原子力開発の初期段階から設置された施設であり、原子力の研究・開発、人材育成、研究者・学生の研究・教育に役立てられてきた。また研究炉で得られる中性子は、基礎研究、産業、医療にも利用されるなど、研究炉は我が国の学術、科学・技術、産業の発展に貢献してきた。その実績からも、研究炉は多くの分野で学術、科学・技術の発展に必要不可欠な研究基盤施設であり、国が安定・定常的に維持すべき施設である。我が国における研究炉利用のニーズについては将来的にも適切に対応する必要がある。

(2) 研究炉の安全・安定運転の確保

国内の多くの研究炉は建設から数十年が経過しており、施設設備の高経年化が課題となっている。研究炉については、施設の安全性・先端性を継続的に確保することが必要であり、その経費が国の施策として保証されるとともに、当該施設が全国共同利用制度や共用促進法のような仕組みの下で適切に運用されることが必要である。

研究炉は、発電炉の発電利用とは異なり、その多くは沸点未満、非加圧の冷却条件のもとで運転されているが、今回の事故の教訓等を踏まえた安全対策等に関し継続的に検討・評価を行う必要がある。一方、研究炉の安全規制については、現在、原子炉等規制法において発電炉とは区別して規制され、設計・施工に係る行政判断のための技術上の基準・指針では研究炉の特徴が考慮されているが、維持段階における行政上の運用においては必ずしも発電炉との違いは考慮されていない。研究炉の維持段階においても、発電炉との違いを考慮して合理的な安全規制行政が行われることが望まれる。

(3) 研究炉の燃料問題への対応

研究炉の使用済燃料の措置に関する問題については既存の研究炉が抱える喫緊の課題として迅速に対応する必要がある。即ち、我が国の研究炉で用いられた使用済燃料は、2019年5月までは米国へ引き渡される予定であるが、低濃縮ウラン（LEU）燃料を対象とする米国との契約が延長される可能性は低く、研究炉の運転を継続することが困難な状況になることも考えられる。使用済燃料の措置に関するこの問題については、個別の設置事業者では対応が困難であり、国としての政策的観点から、中長期的な方策を早急に示す必要がある。

使用済燃料については、長期貯蔵を視野に入れて、対米返還の契約延長交渉を進め、一方では再処理の可能性検討、直接処分を含めた使用済燃料の処分方策の具体的検討を並行して行っていく必要がある。その際、対米返還以外の方策については政策的検討とともに法的整備が必要であり、国の対応が求められる。

(4) 研究炉の運営・利用体制の強化

研究炉の利用については、学術研究への適用と同時に産業界のニーズにも応える必要があり、また、原子力と科学・技術の適切なバランスを保つ必要もある。国内の研究炉を更に効率的、有効に、そして合理的に活用するために、統一的な利用体制（プラットフォーム）の構築が望まれる。研究炉の有効利用と新たな利用体制の構築に当たっては、新規の測定法や装置の開発とともに利用支援を担う強力なスタッフの充実と、そのための人材育成を進める必要がある。既存の枠組みにとらわれない新たな体制の構築が不可欠である。

国際原子力機関（IAEA）の研究炉高度利用プロジェクトによれば、研究炉は、原子力及び科学・技術の分野で、今なお重要で不可欠であるとしながらも、減少しつつある研究炉については利用率の低下、戦略的ビジネスプランの欠如、老朽化と改造の必要性、燃料問題などの重要課題のあることが指摘されている。燃料問題など、我が国の研究炉についても共通する課題があり、これらの共通の課題に対しては、国内はもとより、国際的な連携協力の仕組みを構築して対応する必要がある。

(5) 研究炉の後継と将来の研究炉の検討

建設から数十年経過している我が国の研究炉については、施設や装置のアップグレードを検討する時期にきている。実際、出力5MW以下の小型研究炉であるKUR（Kyoto

University research Reactor) 及び JRR-4 (Japan Research Reactor-4) がシャットダウンした場合、我が国ではホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) などの先駆的・開拓的な研究に適した柔軟性の高い研究の場を失うことになる。BNCT については、将来的には加速器中性子源による治療施設が開発されることが望まれているが、その実現に必要な研究を含めて同様の先駆的・開拓的な研究や人材育成にも適した研究炉が必要であり、対策案を提示する必要がある。

また、KUR 及び JRR-4 に続き、JRR-3M(改造3号炉) 及び JMTR (Japan Materials Testing Reactor) の研究炉が約 20 年後には大規模改造が必要となるか、またはシャットダウンすると想定されている。研究炉の建設には長期の準備期間を必要とすることから、広く共同利用に供せられている公共性の高い研究炉の後継について適切な将来計画、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。

目 次

1	はじめに	1
2	現状と課題	2
(1)	社会と原子力（原子力の利用とリスクへの対応）	2
(2)	研究炉の役割と必要性	3
①	学術利用	4
②	産業利用	7
③	診断・治療利用	9
④	エネルギー利用	10
⑤	人材育成	11
⑥	波及効果・国際貢献	11
(3)	国内外の現状	12
①	海外の状況	12
②	国内の状況	13
(4)	課題と対策	14
①	研究炉の必要性と位置付けについて	15
②	研究炉の安全・安定運転について	15
③	研究炉の燃料問題について	16
④	研究炉の運営・利用体制について	18
⑤	研究炉の後継と将来の研究炉について	19
3	提言	21
(1)	研究炉の役割と位置付け	21
(2)	研究炉の安全・安定運転の確保	21
(3)	研究炉の燃料問題への対応	21
(4)	研究炉の運営・利用体制の強化	22
(5)	研究炉の後継と将来の研究炉の検討	22
	<参考文献>	23
	<参考資料1> 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 課題検討分科会審議経過	26
	<参考資料2> 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 課題検討分科会研究用原子炉のあり方検討小委員会審議経過	27
	<参考資料3> 放射性廃棄物の処分に関する法令について	29
	<付録1> 「現状と課題」参考図表	30
	<付録2> 我が国の研究炉の安全性に関する資料	39

1 はじめに

研究用原子炉（臨界実験装置を含む。以下、「研究炉」という。）は、原子力・放射線関係の研究・開発、そして教育を推進する上で不可欠な基盤的研究施設であり、我が国においても、従来、研究機関や大学の有する研究炉がそれぞれに大きな役割を果たしてきたところである[1]。利用の分野は広く、エネルギー利用に限らず産業利用を含めた科学・技術や学術研究にわたり、それぞれの分野で一層の進展が期待されている[2-4]。

しかしながら、我が国の研究炉の状況をみると、高経年化や使用済燃料の問題などの課題があり、その運転の継続、将来の展望には決して楽観できないものがある[3、4]。世界的には新たな研究炉の建設や計画もあるが、我が国において研究炉のような研究施設を新たに建設することは必ずしも容易ではない。折しも日本学術会議においては、21世紀の人類社会及び日本社会にとって喫緊の課題である持続可能な社会の構築を展望して、21世紀の日本における学術のあり方に関する提言を行い、従来の技術開発志向の「科学技術」の推進を諸科学の全体としての学術の総合的発展の中で位置付けることにより、科学技術立国の実現を目指すべきとしている[5]。したがって、我が国の研究炉のあり方については、中長期の視点から、また研究機関や大学の研究者及び施設管理者などによる全国的な観点からの検討が必要である。

また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故による被害は甚大である。事故への対応は続いており、並行して他の原子力発電所の安全対策はもとより、我が国のエネルギー政策、原子力政策の見直しが行われている状況である。研究炉は、発電用原子炉（以下、発電炉という。）の発電利用とは異なり、核分裂連鎖反応で発生した中性子を基礎から応用までの広い分野にわたって実験・研究等に利用することを目的とした原子炉であるが、研究炉と発電炉が持つべき機能は異なるとは言え、原子炉施設としては共通する面もあり、今回の事故の教訓等を踏まえた安全対策等に関する更なる検討も不可欠である。

この認識をもとに、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、研究用原子炉のあり方検討小委員会を設置して我が国における研究炉のあり方を検討することとした。その目的としては、我が国における学術、科学・技術の発展の観点から、研究炉の利用を今後も安定に維持・継続していくことの意義や重要性を明確にするとともに、そのために求められる既存及び将来の研究炉のあり方に関する見解・提言を取りまとめることである。取りまとめに当たっては、これまでの関係学協会等の報告（例えば[3]、[4]、[6]）を踏まえながら、中長期にわたる研究炉の意義・重要性を俯瞰した上で、研究炉の課題とその解決策について整理を行い、大局的な観点から見解・提言をまとめることとした。

なお、今回の提言は中性子利用を目的とした研究炉に関する提言であるため、高輝度 X 線やレーザービームを含む量子ビーム利用全体の中での位置づけには触れていないが、重要な課題であると認識している。

2 現状と課題

(1) 社会と原子力（原子力の利用とリスクへの対応）

我が国における原子力の利用は平和の目的に限られており、これは 1955 年の原子力基本法の成立に始まり、以来、核エネルギーの発電への利用とともに放射性同位体や加速器の利用が進められてきた。原子力関係の研究・開発が本格的に開始されてから 50 年以上を経た現在、核エネルギーによる発電量は全電力の約 3 分の 1 に達し、放射性同位体や加速器は研究から産業の現場、病院での診断や治療まで幅広く利用されるに至っている[1]。

しかしながら、その一方において、原子力の利用に対する社会的な受容性は当初からの課題である[7]。多くの人々に原子力や放射線に対する潜在的な恐怖感があり、これは第 2 次世界大戦で原子爆弾の惨禍を被り、また 1954 年の水素爆弾実験で第五福竜丸が被曝して乗組員が放射線障害を受けたことにも由来している。原子力基本法が成立して政府主導の研究開発が進み民間ベースで発電炉の設置が始まった段階では、当時の論調にも原子力に対する期待感があり社会的受容性も低くはなかったと考えられる。しかし、その後の原子力発電所の事故とその対応の問題から社会的受容性が大きく低下する傾向にあり、特に 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故以降はこの傾向が顕著である。このため、我が国のエネルギー政策、原子力政策が問われている状況である。現在でも事故への対応は続いており、原子力への依存度を減じるべきという意見も少なくない。このことにも留意して慎重に検討する必要がある。

また、研究炉の必要性を検討するとき「原子力利用」とは何かという問が改めて想起される。太陽系には鉄や金、ウランといった重元素が多く存在している。これらの重元素は、質量の大きな高温の星の内部での元素合成とその後に発生する超新星爆発によって作られたとされている。地熱エネルギーは重元素の崩壊熱であり、太陽光エネルギーは核融合に由来する。風力や波力もそれをもたらす起源は原子力エネルギーである。このように、原子力エネルギーは、自然を形成する基礎となっている。一方、放射線の持つエネルギーは地上の生命体をかたち作る化学結合のエネルギーに比べて桁違いに大きい。このことは原子力や放射線の利用を進める根源となっている。しかし、そのエネルギーの大きさが放射線の生物影響のリスクを生み出している。このリスクの大きさと得られる便益の大きさを十分に考慮して利用が図られなければならない。特に、原子力発電においては、起こる確率が小さくても、一旦起これば甚大な被害をもたらされることを今回の事故が示している。

原子力発電所の事故に限らず、遺伝子組み換えや臓器移植などの新しい科学・技術にも科学に問うことはできるが科学（だけ）では答えることのできないという「トランス・サイエンス」の領域の問題（リスク）があると言われている[8]。この言葉は 1972 年にアメリカの物理学者アルヴィン・ワインバーグによって初めて使われたものであり、彼はその例として低線量被曝の問題や稀にしか起こらないフーバーダムの決壊のような事故の問題を取り上げている[9]。科学だけでは解決できない問題であり、このような問題については、そのことを踏まえて社会的に意思決定を行わざるを得ないとされている。

戦後の高度成長の結果として、社会生活が相対的に豊かになり価値観が多様化している。また一方では、公害問題が顕在化して関係者の社会的責任が問われるようになり、さらに生命医療に関してインフォームド・コンセントの概念が登場している。つまり、価値観の多様化によって科学・技術と社会の間に予定調和（筋書き通

り)の関係が成り立たなくなってきたとも言える[8]。原子力発電についても同様であり、そのリスクについての「合意形成」や「対話」の必要性が認識され、リスクコミュニケーションなどの試みが行われているところである。科学・技術に関する意思決定、政策の決定に当たっては「トランス・サイエンス」の領域の問題についての合意が必要であり、エネルギー政策や原子力政策の決定についても、原子力利用のメリットや必要性とともに、そのリスクについての理解が不可欠である。科学もしくは科学者に対しては、科学と「トランス・サイエンス」の境界を明確にするとともに、その領域の問題をできるだけ少なくすることが求められる。

原子力発電に伴って発生する放射性廃棄物、特に高レベル放射性廃棄物についても同様のリスクがある[10]。社会的なコンセンサスを得ることが極めて難しい問題であるが、その処理・処分方法についてはこれまでも多くの検討が行われている。既に相当な量の使用済燃料が蓄積している状況でもあるので、処分候補地を決定している先行国にも学んで対策の検討を進める必要がある。

研究炉についても同様に、その利用のメリットや必要性とともに、原子炉施設としてのリスクがある。利用の目的に応じてその規模も様々であるが、それぞれの規模に応じて適切な安全確保の対策が求められる。また研究炉の利用に伴って発生する放射性廃棄物、特に使用済燃料の問題については、発電炉の場合とは異なり、その量は比較的少ないとされているが、その処理処分について適切な対策が求められる。このような課題を抱えているので、研究炉の利用についても、科学・技術の立場からだけでなく、社会科学や人文科学などの立場からも幅広く検討する必要がある。利用のメリットや必要性を明確にするとともに、そのリスクに対処するための真摯な取り組みが不可欠である。

(2) 研究炉の役割と必要性

我が国では、研究炉は、原子力開発の初期段階から設置された施設であり、原子力の研究・開発、人材育成、研究者・学生の研究・教育に役立てられてきた。また研究炉で得られる中性子は、基礎研究、産業応用、医療応用にも利用され、研究炉は我が国の科学・技術、産業の発展に貢献してきた。政府の新成長戦略(2010年6月18日)[11]において、安全確保を前提とした原子力の着実な推進、原子力を含むパッケージ型インフラ海外展開などが謳われ、その鍵を握るのは原子力利用と人材育成とされた。研究炉もそのような観点で基盤施設としての必要性が見直されていたが、その矢先、東京電力福島第一原子力発電所事故が発生した。現在、我が国のエネルギー政策の見直しが進められており、今後、原子力がどのように展開するのかは見通しが立っていない。とはいえ、以下の節において示すように、研究炉利用の大きな柱である学術、科学・技術、産業利用などについては、今後も継続して需要がある[12-25]。

これらの需要を満たすためには原子炉や加速器が必要であるが、大きな中性子束を得るには適切な規模の原子炉あるいは J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) のような大型加速器が必要となる。加速器中性子施設では、研究炉とは異なり、電荷のある陽子などの加速ビームを金属製の標的に当てて中性子を発生させる。加速ビームの時間的構造からパルス中性子が得られ、このパルス中性子の利点を活かした飛行時間法により中性子のエネルギーが測定できることから、特に中性子散乱実験で大きな成果を上げている。一方、原子炉では時間的に定常な中性子が得られる。大強度の定常中性子源は、高速に動く物体のイメージング、中性子捕獲を利用する放射化分析、放射性同位元素(以下「RI」という。)の製造、原

子力エネルギーの利用に不可欠な物質の放射線耐性の試験などに欠くことができないものである。

東京電力福島第一原子力発電所の事故以降、原子力発電所の建設に反対する意見が多い。しかし、研究炉に関しては、日本原子力研究開発機構（JAEA）の研究炉を設置している茨城県の東海村や京都大学原子炉実験所のある大阪府の熊取町では、安全の確保に細心の注意を払うことは求めているが、研究炉による研究に関しては理解を示している。

今後、中性子による分析は、学術利用や産業利用など、あらゆる分野で不可欠な手段となってくるので、いろいろな分野で中性子の利用が広がっていくと考えられる。しかし、我が国には、これを満たす中性子源建設の計画はほとんど無いのが現状である。このような状況では我が国の科学技術立国はとてもおぼつかない。世界をリードする中性子源として J-PARC しか持たない我が国の現状を改善するには、多くの研究機関に設置するための小型加速器による小規模中性子源の開発と将来を託す研究炉の建設計画の立案が喫緊の課題である。

① 学術利用

研究炉の学術利用は、低速中性子ビームによる基礎研究が主要なウエイトを占めている。中性子は X 線と比較して、強い透過力を持ち、軽元素、特に水素に高い感度と、同位体の判別能力を持つ。中性子の波長及びエネルギーは物質の構造と動的な性質の研究に最適で、しかも中性子は磁気を帯びているので磁性体の研究にも有益である。そのため、中性子を利用することで、X 線による回折や散乱実験、トモグラフィなどでは不可能な多くの情報を得ることができる。中性子は物理、化学、材料といった伝統的な基礎科学分野から、工学、生物、医学や農学、考古学、宇宙・天文、さらにエネルギー、環境、情報と複合分野への応用も始まり、新しい産業の開拓と育成を目指した研究開発にも本質的で不可欠な量子プローブとなっている。さらに、中性子の持つエネルギーが物質の緩和や励起などの研究にも適しているため、精密な構造解析や、理論やモデルと実験データの比較が容易で、非常に信頼性の高い情報を得ることができる [12]。また、JAEA の材料試験炉 JMTR (Japan Materials Testing Reactor) を用いて照射損傷素過程の解明に関する研究、アクチノイドの物性解明に関する研究や岩石等の生成年代同定に関する研究といった学術利用にも使われている。

中性子散乱の学術利用を牽引しているのは、東京大学物性研究所が行っている中性子散乱全国共同利用事業である。JAEA の改造 3 号炉 JRR-3M (Japan Research Reactor-3M) が運転を開始した 1990 年代初期より大規模な共同利用を推進し、現在では年 300 課題の中性子散乱実験を実施し、物性物理をはじめとし、材料学、化学、生物分野の研究に貢献している。また、実験のみならず装置開発を通じて若手研究者や学生の教育にも貢献し、多くの人材を輩出している。2010 (平成 22) 年度の JRR-3M 中性子ビームの利用状況 (JAEA 中性子利用専門部会資料) は 5063 日・装置の利用日数であったが、そのうち東京大学物性研究所の大学共同利用は 2187 日・装置 (約 43%) を占めている。

一般に原子炉を中性子散乱のための放射線源として考えた場合、良質、大強度の中性子を発生できることが最も大きな特徴であるが、加速器による中性子ビーム利用も拡大する傾向にあり、研究炉の定常中性子と加速器のパルス中性子、両者の特徴を活かした併用が今後国際的に主流となる [13、14] (付録 1 の表 1-1、図 1-1 参照)。運動量-エネルギー空間の広い領域を一挙に測定したい場合 (粉末構造解

析、非弾性散乱など)は短パルスビームによって高い測定効率が実現する。一方、中性子イメージングによる高速動画撮影や3次元中性子スピン偏極解析など、原子炉で発生する定常中性子でなければ困難な実験が存在する。また運動量-エネルギー空間の比較的狭い領域に集中した信号を測定したい場合(小角散乱、磁気散乱など)は中性子総量が重要となり、時間平均中性子束が大きな研究炉や長パルス線源の利用が有益である[15]。ILL(ラウエ・ランジュバン研究所、仏国)やHFIR(High Flux Isotope Reactor、米国)などの研究炉は定常中性子源、ISIS(中性子・ミュオン研究施設、英国)は短パルス中性子源であり、これらに加えてヨーロッパ核破砕中性子源(ESS)やオークリッジ研究所(米国)のSNS(核破砕中性子源)第二ターゲットステーションでは長パルス中性子源が採用されており、バラエティが保たれている。ESSでは比較的 low 額の建設予算でILLとほぼ同等の時間平均中性子束が得られる計画である[13]。一方我が国の加速器中性子源はJ-PARCの短パルス中性子ビームのみであり、時間平均中性子束では将来、海外施設の1/10程度に留まる懸念がある。

日本学術会議第三部は2011年に理学・工学分野における「科学・夢ロードマップ」を提言している(付録1の図1-2参照)[16]。このマップは、今後20~30年後の科学(サイエンス)の発展を考えたときに描くことのできる、最先端科学が進化した世界を予想したものである。これをみると、分野全体の提言84件のうち中性子が関わるものは50件に及ぶ。将来の科学の発展を考える上でも、中性子が新材料の構造を決定する不可欠なツールであることがその理由である[6]。また、高速中性子による材料構造変化に関する基礎研究は、格子欠陥物理から耐照射損傷材料開発までの幅広い分野をカバーしており、研究炉利用の重要な柱の一つとなっている。これに関連した活動については、エネルギー利用の分野で詳述するが、それ以外のもの、具体的には宇宙関連の半導体、素子開発などについては本節で適宜取り上げることとする。以下分野ごとに記述する。

ア 物理(基礎物理・物性物理)及び地球科学(付録1の図1-3参照)

基礎物理分野では中性子の寿命、電気双極子モーメントや重力相互作用の測定が、ビッグバン宇宙の初期元素合成過程や素粒子間の重力の解明、物質と時空を統一した究極理論へ繋がる。磁気モノポール、ディラック電子やトポロジカル効果等の新奇量子現象の解明、さらに新しい量子現象に基づく新デバイス/センサー開発やスピントロニクスの研究が行われる。超伝導社会の実現のため新高温超伝導(室温超伝導体)実現に向けた研究では、構造と励起が中性子によって明らかにされる。地殻-マントルの鉱物の構造や水素の役割を直接観測することで地球の内部構造やそのダイナミクスの理解につながる。

イ 化学・材料・高分子(付録1の図1-4参照)

ほとんど全ての物質が中性子の研究対象である。ナノ構造体、分子性物質、高分子・超分子は有望な素材で、構造や強度等の諸物性を明らかにし、刺激応答性や自己修復性の獲得が期待される。人工臓器・器官、燃料電池やリチウム電池材料などといった実用化されつつある材料から、次世代磁石、新高温超伝導体の合成と構造決定といった将来にわたる課題が数多く存在する。一方で、完全固体照明やディスプレイ・センサーなどに役立つ無機有機物質・薄膜、次世代高効率照明の実現が期待されている。さらには、触媒の構造と動的機能の解明、ゾル/ゲル、イオン伝導体、液晶、液体、超臨界状態の構造と解明、炭素系、金属系材料、超

高強度、超耐環境材料、メタンハイドレートなどエネルギー材料の構造機能性研究などが期待される。

また物質の極微量分析技術として、中性子誘起反応に基づく放射化分析、中性子即発 γ 線分析などの方法は感度の点や多種の核種を同時に測定できることから、考古学、地球科学、宇宙科学、年代測定、環境化学、美術品分析(絵画、彫刻)などの広い分野での応用が展開されている。

ウ 工学分野、中性子イメージング (付録1の図1-5参照)

集合組織と残留応力測定は重要な非破壊測定手法であり、あらゆる機械部品、溶接部や鋼板などの加工品と加工法の開発に応用される。中性子イメージングによって自動車・航空機のエンジンやタービンなど機械や燃料電池、建築物内部(鉄筋コンクリートの鉄筋の腐食や水の侵入)の様子や動作を非破壊的に観察できる。また偏極ビーム利用による磁場分布の測定は、例えば導体内部の電流分布の可視化を可能にする。彫刻絵画などの研究、遺跡埋蔵物の考古学的研究、生きている生物の内部構造や水・物質などの内部移動など中性子イメージングはあらゆる分野に応用可能で威力を発揮する。

後述のエネルギー利用と大きく関連した基礎基盤分野、特に原子力用先進材料開発、材料信頼性評価などの分野においても、研究炉は重要な役割を果たしている。例えば核融合炉材料開発分野において日本は百名を超える世界最大規模の基礎研究者人口を擁し、JAEAを中心とした開発責任組織と大学基礎研究者群、開発に直接携わる産業界との緊密な連携関係が研究炉の共用を通じて構築されてきている。同様のことは、先進核分裂炉開発、軽水炉の安全性向上のための基礎基盤研究でも言えることである。

また宇宙開発においては、宇宙線による機器の損傷劣化が大きな問題となっており、研究炉を利用した耐放射線の素子やセンサーの開発が着実に進められている。

なお、放射化分析は、極微量分析手法として引き続き基礎基盤分野から実用材料開発までの幅広い分野で重要な分析手法となっている。

エ 生命科学 (付録1の図1-6参照)

中性子による軽元素(水素原子など)の高い検出能は、生体を構成する様々な分子の構造と機能の解明に効果的である。水素原子は、生体高分子の構成元素の約半数を占めるため、水素原子の存在(有・無)と位置(コンホメーション)の情報を得ることができ、また酵素分子内の機能性アミノ酸のプロトン化についても決定できるため、近年その特徴を活かした解析によって様々な成果を上げ始めている。

生体に関連した機能性物質の解析例としては、水から分子状水素を生成する酵素(ヒドロゲナーゼ)の機能を模倣するモデル錯体と水素原子の相互作用状態の解明があげられる(図1-6a) [17]。また人工光合成への糸口の解明を目指した光反応中心の中性子解析や、呼吸を司る分子チトクロームc酸化酵素、多機能蛋白分解酵素など超大型分子の中性子解析を目的とした装置開発も進行中である。

医薬品の標的分子として、あるいは医薬品そのものとして応用されているタンパク質分子の中性子構造解析も行われている。中性子による立体構造解析で観測可能となる原子数は、X線解析法の約二倍に達するので、タンパク質と医薬品の相互作用、さらにはタンパク質の機能発現メカニズムの正確な把握が可能となる。

その例として創薬標的酵素と医薬品候補分子の複合体構造を図1-6bに示す[18]。ドラッグデザインにおける全水素原子位置の利用などはその計算精度を飛躍的に向上させるため中性子解析で得られる新知見は、ウイルスや細菌による感染症の治療やがん治療を目的とした創薬研究への貢献が期待される。

また、生体物質を構成する原子と中性子の間で生じるエネルギー交換を利用することにより、生体物質や水和状態の運動(ダイナミクス)情報を定量的に得ることができる(図1-6c)[19]。この特長を活かすことによって、タンパク質機能発現における水和水の重要性が示された。また、タンパク質分子の遺伝的な変異によるメカニカルな異常が引き起こす拡張型心筋症などの分子的原因究明にも応用され始めている。さらに薬剤の効果的な運搬に向けて、リポソームの動的な特徴の解明にも利用されている。

農学研究分野においては、植物や土壌中の水の中性子イメージング(図1-6d)によって、植物の生理学的研究にも応用されている。また原子炉を用いるRIの生産(②-ウ、③-イ参照)は、RIを用いる診断薬や治療薬の開発研究にも重要な役割を有している。

オ 環境分野 (付録1の図1-7参照)

安全安心、持続可能社会の実現、ゼロカーボン都市、再生可能エネルギーなどがキーワードで、水素の挙動、電池材料、元素戦略に中性子は大きく関わっている[6]。例えば、電気自動車の普及に向けては有機電解質を用いる既存のリチウム電池に代わる次世代の電池が必要とされており、固体のリチウムイオン伝導体の研究が進められている。同様に、燃料電池等の水素利用エネルギーシステムの構築に際しては、安全な水素の貯蔵・輸送システムや燃料電池の開発が必要とされ、そのためには水素吸蔵材料や電池材料中における水素原子や分子、あるいは水分子の挙動等の動的解析が必要となる。これらは中性子ビームの利用によってのみ可能となるので、中性子ビーム源の高強度化による時間分解能及び中性子ビーム収束技術の向上が望まれている[20]。

この他、環境分野での中性子の利用としては、放射化分析による環境微量分析、環境低負荷な材料開発などがある。

② 産業利用

ア 中性子産業利用の市場

中性子は、電子デバイス、バイオテクノロジー、内部応力解析、化粧品開発、ラジオグラフィー、医療など、工学から医学における応用研究や産業に幅広く利用されると見込まれている(付録1の図1-8参照)[21]。このことから、中性子は、今後大きな市場規模に成長する製品開発に貢献するものと期待される。J-PARC/MLF(物質・生命科学実験施設)の供用が2008年に開始されて3年半経過した時点で、産業界からの課題申請は全体の約40%を占めており、JRR-3でもJAEAが設置した装置の約15%を産業界が利用している。成果専有での利用をみると、J-PARCでは、2012年度で採択された課題の約40%を占め、JRR-3においては、直近の2008-2010年度の平均で70%を超える状況にある。中性子産業利用は拡大しつつあるが、潜在的な需要はまだ多く存在し、産業向きの装置を整備することでさらに利用が拡大することが期待される。中性子の学術的利用において、原子炉の定常中性子源と加速器のパルス中性子源の特徴を考慮し、それぞれの中性子源に設置された装置の利点を生かして最大限の成果を得るといった基本的戦略があるが、

産業利用においても全く同じである。

イ 中性子を利用する産業分野

付録1の表1-2に中性子を利用する産業分野とその適用対象、直近の重点課題、そして測定方法をまとめた。表中下線を引いた箇所は原子炉中性子による測定方法等（小角、分析・イメージング、偏極等）が利用される開発項目と製品であり、中性子利用を行う全ての産業分野において原子炉中性子源が重要であることが分かる。付録1の表1-3は、今後原子炉中性子源が重要となる測定方法を用いる産業分野の適用対象をまとめたものである。

磁性材料の開発において、偏極技術は重要な測定手法であり、今後普及していくことが予想される。特に、現在主流となっている Nd-Fe-B 磁石は高性能化のために Nd を大量に用いており、その耐熱性向上のために Dy を添加している。Nd と Dy はいずれも希少元素であり、その原産地が中国に集中しているため将来的に安定的に供給されないのではないかと危惧がある。特異な機能のために希少元素は磁石以外にも利用されており、最近では「元素戦略」が声高に叫ばれている。Nd や Dy を使用しない、あるいは、使用量を大幅に減らした材料で現在の Nd-Fe-B 磁石と同じような性能を発揮する磁石の開発が喫緊であり、そのためには原子炉中性子源の偏極回折装置が重要である。

イメージングに関しては、現段階では機械など構造物の動作時の高速度撮影や高分解能撮影が産業利用の中心テーマであり、時間平均の中性子束密度が高い、原子炉中性子源に設置された装置に対する需要が高い。残留応力測定は、産業界にとって非常に重要な測定手法であり、多くの産業分野で利用されている（付録1の表1-2、1-3参照）が、この場合は測定精度や効率の観点からパルス中性子源の利用に期待が寄せられている。ただし、比較的小型の試料において空間分解能を上げて測定したい場合や、試料の表面から 1mm 以下の表面層の応力勾配の厳しい残留応力分布を 0.1mm 間隔で詳細に測定したい場合には、JRR-3M に設置された残留応力測定装置が向いている。また、実験のしやすさや試験環境がよいため、JRR-3M は新しい測定技術や装置の開発に適している。

粉末及び単結晶の構造解析については、測定及び解析手法が確立すれば、広い波数領域を効率よく測定できるパルス中性子源が圧倒的に有利であり、例えば J-PARC の高強度全散乱装置 (NOVA) の測定波数領域は $0.01 \sim 100 \text{ \AA}^{-1}$ である。逆に、特定の狭い観測領域に狙いを定めた測定や、装置や回折計のセッティングを試行錯誤によって変え、s/n 比をあげる限界に近い測定などでは、装置が簡単で単色中性子を用いる原子炉中性子源が有利である。

原子炉中性子源の産業利用を本格的に行うために測定効率の向上が必要であり、試料位置の入射中性子束を $10^5 \text{ n/cm}^2\text{s}$ 以上にする必要がある。そのため薄い Si 膜を重ねて曲げた収束性の高いモノクロメータや、縦方向収束ラジアルコリメータの改良が必要である。検出器についても検出効率の高い大面積の 2 次元検出器の開発が望まれる。

ウ 密封 RI 製造

JMTR、JRR-3M、JRR-4 では、各種密封 RI の製造が行われており、製造された RI は、非破壊検査や医療機器等に利用されている [22]。RI 製品は、長期にわたって品質の高い RI を定常的に供給することが不可欠であるため、複数の原子炉を併用し、安定した製造ができるシステムを保持することが RI 製造のための基本的要件

である。現在、需要の約半分が国内生産されている Ir-192 などの一部を除くと我が国の密封 RI の 99.8%が輸入されているが、国外からの供給には様々な不確実性があり、基本的には国内での供給、それを補う海外からの輸入という体制を有することが望ましい[22]。

エ シリコン半導体の製造

JRR-3M、JRR-4 では、中性子ドーピング法 (NTD 法) によるシリコン半導体の製造を行っている。NTD 法は、他の半導体製造方法と比べて均一性の高い高抵抗のパワー半導体が製造できるため、ハイブリットカー等のパワー半導体としての需要が急増している。現在、JRR-3M 及び JRR-4 では、年間約 3.5 トンの製造を行っているが、世界的には海外の研究炉で 200 トン/年程度が生産されている。また、2050 年頃には 1200t/年以上と予想されており、JMTR を利用したシリコン半導体の製造が検討されている。

③ 診断・治療利用

ア ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT)

BNCT はがん細胞に取り込まれたホウ素 (^{10}B) と低速 (熱) 中性子との核反応で放出される極短飛程 (10 ミクロン程度) の α 粒子とリチウム原子核 (^7Li) によって、そのがん細胞を選択的に破壊する次世代のがん放射線療法である。高い中性子束が必要であるが故に研究炉と附設の重水設備が使われてきた。我が国における関連の基礎及び臨床研究は従来出力 5MW 以下の小型研究炉である KUR (Kyoto University research Reactor) 及び JRR-4 (Japan Research Reactor-4) で行われてきており、特に KUR での臨床研究は症例数と対象がんの種類で世界一の実績を重ねている。

BNCT は新たな適応がんを開拓する場合や新たなホウ素化合物が開発されるごとに、基礎からの研究の積み上げが必要であり、細胞レベルは勿論のこと小中の実験動物による研究が不可欠である。現在、BNCT の臨床用に加速器中性子源が開発され、今後は臨床用中性子源の中心が研究炉から加速器に移行する状況にあるとはいえ、基礎研究の内容に応じて様々な条件下での照射を行うことが可能な研究炉や附設の重水設備は今後も不可欠な研究設備である。即ち、研究炉の方が、加速器中性子源に比べて、照射面積や時間的定常性に優れていることから、厳密かつ様々な照射条件が求められる基礎研究にとって必要であり、世界における現在の研究上の地位を維持、確固たるものにするためにも不可欠な設備である。さらに、加速器中性子源での薬事法上の治験に先立ち、探索的研究 (translational research) によって BNCT 適応がんの探索を行うには、研究炉中性子源を併せ持つことの優位性は高い。

イ 放射性医薬品製造

JMTR、JRR-3M、JRR-4 では、Ga-67、I-123、Ti-201、Ir-192 などの一部の放射性医薬品の製造が行われており、製造された放射性医薬品は医療分野での治療や診断等に利用されている[22]。放射性医薬品は安定供給が不可欠であるため、複数の原子炉を併用して安定した製造ができるシステムを保持しなければならない。特に、各種疾病診断等に使われている $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の原料となる ^{99}Mo は重要であるが、全てを輸入に頼っていて、海外の研究炉の高経年化による故障や空輸のトラブルで供給不足に陥り、大きな問題に発展した。これに対応するため、内閣府は JMTR を

用いた国内生産を行うことが不可欠との答申をまとめた[23]。付録1の表1-4は、今後、疾病診断・がん治療薬等の医療分野で重要となるRIをまとめたものである。

④ エネルギー利用 ア 既存の発電炉

発電炉の健全性を維持し、安定にしかも長期間にわたる稼動を実現するためには、燃料、材料、冷却水の健全性確保が必須で、そのための技術開発を継続する必要がある。発電炉は発電を目的に建設され、それをを用いた実験は困難であり、技術開発には本来の原子炉環境条件である高温、高圧、強放射線場を実現できる研究炉が不可欠である。具体的な利用ニーズとしては、軽水炉の長期利用に伴う構造材料の健全性や燃料（混合酸化物（MOX）燃料を含む）高燃焼度化などの経済性の向上等に係る課題、現行軽水炉の高経年化対応、MOX燃料を含む軽水炉燃料の高性能化及び安全評価、東京電力福島第一原子力発電所事故の分析を含むシビアアクシデント研究などが挙げられる。これらの研究には、実環境を可能な限り模擬した照射試験が不可欠であり、高中性子束を有するJMTRの改修が決定された[24]。

東京電力福島第一原子力発電所の事故への対応は続いており、原子力政策については不透明となっているが、安全性研究や高経年化対策研究の基盤技術を支える研究施設としての役割が期待される。

イ 将来的なエネルギー利用

資源の乏しい我が国にとって、高速炉と核燃料サイクル、高温ガス炉（水素利用）、核融合炉等、原子力エネルギーが選択肢の一つであることには将来的にも変わりはない。しかし特に核分裂炉については、これまでの研究開発プロジェクトが見直される可能性があるため、基盤となる技術力・人材の育成・維持、限られた開発資源をもとに効率的に研究開発を進めるための国際協力等を如何に進めていくかが、今後の重要課題になる。既存の研究炉をこれらの国内の基盤、国際協力の現場として、今後とも活用していくことが期待される。

また、東京電力福島第一原子力発電所の事故以降、原子力安全行政に対する信頼回復とその機能向上が強く求められている。これまでは原子力安全委員会によって、1976年以降「安全研究年次計画」として、また2004年以降「原子力の重点安全研究計画」として、国が実施すべき安全研究計画が5年ごとに示され、その中では軽水炉の安全研究にJMTR、NSRR（Nuclear Safety Research Reactor）等、新型炉の安全研究にHTTR（高温工学試験研究炉）、常陽、NSRR等の研究炉を維持・活用していくことの重要性が指摘されてきたところである。安全研究は、安全規制の科学・技術的な基盤を確立し、規制活動の水準を向上させることを目的としており、この要求は今後益々強くなると予想される。

新型炉分野では炉型によって燃料・材料の研究開発に必要となる中性子エネルギースペクトル、温度環境等が異なることから、各々の特徴に合った研究炉を利用して研究開発を展開していく必要がある。例えば新型炉の国際協力として代表的な第4世代原子力フォーラムで対象としている6つの炉型のうち、3つは高速炉であるが、高速炉開発に利用しうる研究炉は世界的に不足している[25]。今後の原子力政策によっては、JAEAの常陽にも役割がある。また高温ガス炉は、同じく第4世代炉の候補である上、将来のクリーンエネルギーとして水素製造の研究

開発への期待もある。JAEAのHTTRは、水素製造に利用する高温核熱の供給可能性を世界で初めて実証するなど、この分野での研究開発ニーズに応える希有な能力を有している。

核融合エネルギーについては、その実現を目指して、仏国に実験炉を建設・運用する国際共同プロジェクトITER（国際熱核融合実験炉）計画とともに、日欧間では幅広いアプローチ(BA)活動が並行して進められている。BA活動では、核融合炉材料開発のために、大強度の中性子照射試験を担う国際核融合材料照射施設(IFMIF)建設に向けた工学実証・工学設計活動(EVEDA)が開始されている。核融合炉近似条件の中性子照射試験はIFMIF以外で実現することは困難であるが、IFMIFでは照射容積等が制約されることから、研究炉等で取得した照射データを核融合炉に適用するための相関則の確立や、試験片のサイズ効果の把握などが重要な課題とされている。IFMIFでの材料開発を補完する位置付けで「常陽」等の高速中性子照射場の有効活用が期待される。

ウ 放射性廃棄物の管理技術

既存の原子力発電所の継続運転によって、年間数百トンの使用済燃料が発生・蓄積していくことになる。廃棄物管理は、そのエネルギーの恩恵を受けた世代が解決に向けて取り組むべき課題であり、原子力利用国に共通の課題である。廃棄物管理は、核燃料サイクル政策（再処理政策）と切り離して議論することはできない。今後の核燃料サイクル政策の動向によっては、マイナーアクチニド(MA)の分離・核変換の研究開発が、廃棄物減容や放射性毒性の影響の低減等によって廃棄物管理の方法に柔軟性を持たせる観点から、今後益々重要となる可能性がある。従来より、核燃料サイクルにおけるMAの均質リサイクル技術は、「常陽」及び関連施設を用いた研究開発が進展しているが、この分野においては、今後も研究炉の役割は大きいと予想される。

⑤ 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2010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る。また、京大炉においても、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、特に臨界集合体実験装置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1975年から行われている(付録1の図1-9参照)。さらに、材料試験炉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、2010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る。

⑥ 波及効果・国際貢献

開発途上国との協力に関しては、人材育成や原子力発電導入のための準備活動等に協力すること、先進国との協力に関しては、研究開発に係る不確実性や負担を低減させること、国際的な中核的研究拠点(COE)化を目指すこと、多層な人的ネットワークを構築することが、原子力政策大綱(2005年10月11日策定)[26]に記され

ている。これらに対応するため、JMTR では、汎用照射試験炉に関する国際会議やアジアにおける汎用照射試験炉に関する国際会議を開催し、ワールドネットワーク及びアジアネットワークを構築しながら、国際的に活用される研究基盤を整備するとともに、世界の照射試験ニーズを増やす試みを行っている。

(3) 国内外の現状

世界で稼働中の研究炉 230 基のうち約 2/3 が運転期間 30 年を超え高経年化が進んでいるが、世界的には研究炉の建設は継続的に行われている（付録 1 の表 1－5 参照）。一方、我が国で稼働中の研究炉は 14 基であり、その数は減少している（付録 1 の表 1－6 及び図 1－10 参照）。

① 海外の状況

国際原子力機関（IAEA）のデータベース[27]によれば、世界全体で 2012 年 8 月現在までに、685 基の研究炉が設置され、加えて 4 基が建設中、4 基が計画中、計画がキャンセルされたもの 5 基がある。既設の 685 基のうち運転中のものは 230 基、一時停止中が 14 基、停止中が 133 基、廃炉されたものが 308 基となっている。現在運転中の研究炉 230 基を地域別（IAEA の分け方による）にみると、東欧 67 基、北米 49 基、西欧 39 基、極東 31 基、中南米 17 基、中東・南アジア 14 基、アフリカ 7 基、東南アジア・オセアニア 6 基である。また、運転中（一時停止中も含む）の研究炉の熱出力は、1MW 未満が 138 基と最も多く、1～10MW が 55 基、10～100MW が 42 基、100MW 以上が 9 基である。

東欧では、現在 67 基が運転中である。ロシアが世界で最多の運転中の研究炉 47 基を IAEA に登録しており、多種多様な炉型の研究炉、材料試験炉、実験炉を建設して、原子力の研究開発、科学研究、RI の製造等に積極的に利用している。運転中の研究炉で世界でも最も古いのはクルチャトフ研究所の F-1（熱出力 0.024MW、黒鉛炉）であり、初臨界の 1946 年以來 60 年以上稼働している。新しい研究炉としては、ロシアが熱出力 100MW のタンク型研究炉 PIK の建設を進めている。

北米では、米国が過去最大で 227 基の研究炉を設置したが、多くの研究炉が既に停止し、現在稼働中のものは 42 基（北米全体では 49 基）である。それでもなお、世界の研究炉の約 1/5 がこの地域で稼働している。米国ペンシルバニア州立大学の PSBR（Penn State Breazeale Nuclear Reactor、1MW、TRIGA（Training、Research、Isotopes、General Atomics）型）は世界で 2 番目に古く、初臨界は 1955 年である。この炉は、2009 年に 20 年の運転延長が認められている。高出力の研究炉としては、ATR（Advanced Test Reactor、250MW、1967 年～）や HFIR（85MW、1965 年～）などがあり、継続して利用されている。HFIR は当初熱出力 100MW であったが、現在 85MW に制限して運転を継続している。このように北米では、大学所有の小型研究炉が次々に停止され、しかも、新たな研究炉建設の計画は無いものの、高性能の研究炉に利用を集約して長期運転を継続している。

西欧では、現在 39 基が運転中であり、3 基が一時停止中、2 基が建設中、1 基が計画中である。この地域では、古い研究炉が閉鎖されている一方、新しい研究炉の建設も進められている。ドイツではミュンヘン工科大 FRM-II（20MW、軽水減速・冷却、重水反射体付き）が 2004 年に運転開始、ビーム利用を中心に、年々利用件数が増加している。フランスでは 2014 年運転開始を目指し大型照射炉 JHR（100MW、軽水減速・冷却、Be 反射体付き）を建設中であり、オランダでは HFR-Petten（High Flux Reactor-Petten、45MW、1961 年～）が医療用 RI 製造のために利用されてきたが、2015

年停止予定であり、その後継炉として PALLAS を計画中である。研究炉利用に関係の深いホットラボ施設としては、ドイツの国際超ウラン元素研究所 (ITU)、仏の ILL などが国際研究の拠点になっている。このように西欧では、研究炉が原子力研究開発や中性子科学研究、医療用 RI 製造等に積極的に利用され、また、長期運転された研究炉の更新、代替炉の建設も着実に進められている。

アジア・オセアニア地域では、44 基の研究炉が運転中である。この地域では、最新の研究炉が運転中または建設中であり、韓国では多目的研究炉 HANARO (High-flux Advanced Neutron Application Reactor、30MW) が 1995 年に運転を開始、中国では CARR (China Advanced Research Reactor、60MW) と CEFR (China Experimental Fast Reactor、65MW) が 2010 年に相次いで運転を開始した。この地域では、比較的新しい研究炉が多く、原子力研究開発、中性子科学研究、医療用 RI 製造などへの積極的な利用が推進されている。なお、我が国は、文部科学省の進めるアジア原子力協力フォーラム FNCA 事業において、アジア地域の原子力分野の協力を効率的かつ効果的に推進する目的で日本が主導する原子力平和利用協力の枠組みで、研究炉ネットワークや放射化分析、放射線育種、放射線治療等のプロジェクトを進めており、オーストラリア、バングラデシュ、中国、インドネシア、カザフスタン、韓国、マレーシア、モンゴル、フィリピン、タイ、ベトナムがこれに参加している。

参考のために、以上の地域で現在運転中の出力 10MW 以上の主な研究炉の利用分野を、IAEA の分類に従ってまとめると、付録 1 の表 1-5 のようになる。

以上で述べた以外の地域で運転中の研究炉は合計 31 基であり、それぞれの地域で研究炉の利用が進められている。IAEA では、これらの研究炉の利用促進を図るために、研究炉を所有する国に対しては、その所有する研究炉の特性に応じた利用促進のための技術援助を行い、研究炉を所有しない国に対しては、地域センターを作って地域連合体を形成し、研究炉の利用促進を図るプロジェクトを進めている [28]。また、現在、世界で稼働中の研究炉のうち約 2/3 が 30 年以上の長期にわたり運転が継続されており、高経年化が進んでいる。IAEA は、この問題に関心のある国々に対し、高経年化対策に関連する技術的課題に関する情報と経験の共有を目的に研究炉の高経年化データベースを提供している [27]。

なお、IAEA の研究炉高度利用プロジェクト [28] では、研究炉は、原子力及び科学・技術の分野で、今なお重要で不可欠であるとしながらも、減少しつつある研究炉については、利用率の低下、戦略的ビジネスプランの欠如、老朽化と改造の必要性、高濃縮度燃料の調達と処理、高品質高密度の低濃縮度燃料の不足、使用済燃料の蓄積、廃炉計画の策定とその実施、といった重要課題があること、加えて、新たな研究炉の建設計画がある国の中には研究炉について十分な経験が無い国がある、というような問題を指摘している。

② 国内の状況

我が国では、これまでに、臨界実験装置を含め研究炉 28 基が建設され、そのうち 14 基が既に停止、1 基が改造 (JRR-3M) され運転が継続されている [27]。2011 年 4 月現在、運転中のものは付録 1 の表 1-6 及び図 1-10 [29] に示す 14 基である。東京都市大学 (旧武蔵工業大学) 教育用原子炉 MITRR が 1989 年、立教大学教育用原子炉 RUR が 2001 年、東芝教育訓練用原子炉 TTR が 2001 年に停止しており、東京大学の弥生炉も 2011 年に停止した。国内外の主な研究炉の比較を図 1-11 [30] に示す。

現在運転中の研究炉については、JAEA の JMTR は改修し、2030 年頃まで運転する計画であるが、その後の見通しは明らかではない。JRR-3M は中性子科学研究等の共

同利用に供されてきたが、既に改造後 20 年以上が経過しており、今後の取り扱いを検討する時期に差しかかっている。京都大学の KUR も当分運転する計画であるが、使用済燃料の対米返還期限の問題があり、その見通しは明らかではない。KUR は 2006 年から 2010 年まで一時停止していたが、その間、JRR-4 も 2008 年から 2009 年まで一時停止した。このように、共同利用に供される複数の研究炉の停止期間が重なった場合、利用者のニーズに応えられない事態が発生することにもなる。

近畿大学教育用原子炉 UTR-KINKI は、現在運転中で、共同利用に供されているが、すでに運転開始後 50 年を迎えている。このほか、KUR は 2014 年に、JRR-4 は 2025 年に、JMTR は 2018 年に、JRR-3M は 2040 年に、それぞれ初臨界から 50 年目に到達するため、いずれの炉も運転継続のためには高経年化対策と維持費の確保が課題となっている。また、使用済燃料の処分の問題をどう解決するかは、米国の政策に左右され、そして、東京電力福島第一原子力発電所事故を受けて見直されている国のエネルギー政策とも関連して、いまだに解決の糸口が見つかっていない。先に述べた文部科学省が進める FNCA のプロジェクトでは、研究炉利用におけるアジアの地域センターを目指しているが、国内の研究炉の状況を見ると、今後の見通しは必ずしもそれを保証するようなものではない。

JMTR は改修を 2012 年 3 月に完了し、今後発電炉のリプレイスが一段落する 2030 年頃まで運転する予定である。改修により施設の信頼性が高まり、高い稼働率を目指せる準備が整った。また、震災後、設備及び機器等の機能確認を行い正常であること、全交流電源が喪失しても燃料は健全であることを確認し、安全確保上の自主的な取り組みとして、計装電源用の非常用バッテリー電源の充実を図るとともに、JMTR の全交流電源喪失を模擬した訓練等を実施し、安全確保に努めている。利用拡大に向けた取り組みとして、照射技術開発や利用性の向上に努めており、文部科学省の「最先端研究基盤事業」として、2010 年 6 月から 3 年間かけて、軽水炉環境を模擬可能な照射装置、高線量試験片に対して精度の高い観察が可能な解析装置を整備し、照射機能及び照射後試験機能の高度化を図っている。なお、「常陽」は、計測線付実験装置 MARICO-2 の炉内トラブルにより、2007 年以降停止しているが、2014 年度内の復旧完了を目標として、現在復旧作業を進めている。

以上のように、着実に研究炉利用の環境が整えられている海外の状況に対し、我が国においては、研究炉とその関連施設を将来どうするかは喫緊の課題となっている。これらの問題が解決しない場合には、文部科学省の目指す研究炉におけるアジアの地域センターとしての役割も果たせなくなるばかりか、中性子科学分野を中心とする国内の利用者のニーズにさえも応えられなくなる状況が懸念される。

(4) 課題と対策

既に述べたように、研究炉は多くの分野でそのニーズがある。これらのニーズについては将来的にも適切に対応する必要があり、そのためには、研究炉が共通的・基盤的なインフラであることから、研究炉の維持と強化の方策について、中長期の視点にたった上で、研究機関や大学を問わない全国的な観点から、検討する必要がある。一方、研究炉のような研究施設を新たに建設することは必ずしも容易ではないことから、実効を上げるためには既存の研究炉の課題に対する当面の対策が必要である。また並行して、研究炉自体の課題、即ち使用済燃料の措置については、原子力政策大綱[26]にも示されたように、個別の状況を踏まえつつ、その取扱いを、合理性を考慮しつつ検討すべきであり、現行及び将来の研究炉利用に支障を来さないように遅滞なく対応する必要がある。このような個別の設置事業者では対応の困難な課題については、国

としての政策的対応が必要である。

① 研究炉の必要性和位置付けについて

研究炉は、多くの分野で学術、科学・技術の発展に必要不可欠な研究基盤施設であり、我が国における研究炉利用のニーズについては将来的にも適切に対応する必要がある。実際、現在稼働中の我が国における主な研究炉は1960年代に建設されたものであり、その後の原子力研究開発の進展や科学・技術の展開に沿って利用されてきたが、今後の研究炉のあり方については新たな政策の方向性にも沿って再定義される必要がある。即ち、従来、原子力政策の一環として取り扱われてきた感のある研究炉であるが、科学・技術（量子ビーム技術）の研究開発のツールとしての役割と原子力研究開発のための照射炉及び臨界実験装置としての役割があることを考えると、科学・技術政策と原子力政策の両面での位置付けからその必要性が明確にされるべきである。

「新成長戦略」（2010年6月18日策定）[11]に基づく「第4期科学技術基本計画」（2010年12月24日、総合科学技術会議答申）[31]では、環境・エネルギーを対象とする「グリーンイノベーション」と、医療・介護・健康を対象とする「ライフイノベーション」を2つの大きな成長の柱としており、科学・技術の共通基盤の充実、強化を図ることとしている。また「原子力政策大綱」[26]では、放射線利用や原子力研究開発に対してはもとよりライフサイエンスやナノテクノロジー・材料等の分野に対しても研究炉が欠くことのできない研究手段を提供してきているとしている。

東京電力福島第一原子力発電所の事故への対応は続いており、原子力政策については不透明となっている。とはいえ、様々な物質・材料の研究などに不可欠な研究炉は、安全性研究や高経年化対策研究の基盤技術を支える研究施設としての役割の他に共通的・基盤的な施設として、環境・エネルギーを対象とする「グリーンイノベーション」と、医療・介護・健康を対象とする「ライフイノベーション」への貢献が期待される。特に、後者の中性子を利用した科学・技術の研究開発においては、最近、大強度加速器パルス中性子源 J-PARC が稼働を始めたところである。この J-PARC と原子炉定常中性子源 JRR-3M とが互いに補完することにより、この分野の研究開発力において世界的な優位性をもたらさなければならない。

② 研究炉の安全・安定運転について

研究炉については、施設の安全性・先端性を継続的に確保することが必要であり、「国が持つべき重要な最先端研究施設」として、研究炉の継続的な運転管理に必要不可欠な人材や費用を国費で着実に確保する必要がある。

ア 安全・安定運転の確保

国内の多くの研究炉は建設から数十年が経過しており、施設設備の高経年化が課題となっている。具体的な問題としては、数十年以上経過した機器の中には製造中止（陳腐化）になったものも多く、許認可手続きの必要な新式機器に交換するか、もしくは旧式機器の同等品を新たに製作する必要があること、また分解点検すべき機器が増加していることなどがあり、定期検査の高コスト化や長期化の要因となっている。しかしながら、各施設とも厳しい財源状況の中で予備機器等の準備が十分ではなく、事後対策・事後保全とせざるを得ない状況が生じている。このため、トラブル時の修復への即時対応が遅れ、結果として稼働率が低下する

要因となっている。施設の安全性・先端性を継続的に確保するには、必要な経費が優先的に確保されるような仕組みが必要である。

事業者による施設の利用目的の問題もある。我が国唯一の本格的な中性子ビーム利用が可能な JRR-3M は、JAEA 内の利用以外に施設供用制度により、広く外部利用に供されており、その利用実績からは我が国全体の中性子研究者の共同利用施設の性格が非常に高い施設である。しかしながら、このような共同利用施設としての機能を維持するためには、JAEA がこの施設を施設供用制度で運用し続けることが必須であるが、現状では JAEA の施設は JAEA の研究利用を第一目的にしているため、財政状況や法人内の研究優先順位によって、運転維持（施設供用）にも影響が及ぶ可能性が高くなっている。このように、公共性が強い施設でありながら、一法人の判断が国全体の中性子利用研究に直接的に影響を及ぼすことになる。このような事態を避けるためには、十分な稼働率確保のための運転維持費が国の施策として保証されるとともに、当該施設が全国共同利用制度や共用促進法のような仕組みの下で適切に運用されることが必要である。

イ 更なる安全対策・評価

研究炉の安全性については、東京電力福島第一原子力発電所の事故後に、文部科学省の指示により、巨大地震等により電源機能等が喪失した際の炉心等に関する安全性評価が実施された。当該評価の結果、一部の研究炉は、長期間何ら対策が講じられないなどの仮定をした場合に、使用済燃料等の安全性が損なわれる可能性があるとしてされたが、これらの研究炉の設置者からは、安全対策の実施方針が報告されている[32]。研究炉の規制基準については、国際基準[33]も参考に、設計基準を超える事象に対する対策を要求することが検討されている[28, 34]。(研究炉の安全性に関しては、<付録2> 我が国の研究炉の安全性に関する資料参照)

研究炉は、発電炉の発電利用とは異なり、核分裂連鎖反応で発生した中性子を基礎から応用までの広い分野にわたって実験・研究等に利用することを目的とした原子炉である。研究炉の多くが沸点未満、非加圧の冷却条件のもとで運転されているが、今回の事故の教訓等を踏まえた安全対策等に関し継続して検討・評価を行う必要がある。定型的な板状又は棒状の燃料を使用する等、多くの研究炉の間で共通的な部分も多いとされているが、その炉型、出力規模、運転形態等はそれぞれの目的にも応じて炉ごとに異なることを考慮して適切に対応する必要がある。

研究炉の安全規制については、現在、原子炉等規制法において発電炉とは区別された枠の中で規制され、設計・施工に係る行政判断のための技術上の基準・指針では研究炉の特徴が考慮されているが、運転段階における行政上の運用においては必ずしも発電炉との違いは考慮されていない。電気出力百万 kW（熱出力は約 3 百万 kW）の発電炉と比較して、研究炉は 5 万 kW 級のものでも出力・崩壊熱はその出力に比べて小さく、十分な量の冷却水を保有していることから、例えば全ての電源の喪失を仮定しても燃料の損傷には至りにくいという特徴を有し、計画外停止（スクラム）に関する考え方は異なる。研究炉の運転段階においても、研究炉の特徴を考慮して合理的に安全規制行政が行われることが望まれる。

③ 研究炉の燃料問題について

既存の研究炉については、施設の安全性を前提として安定した運転を継続的に確

保することが必要である。中でも、使用済燃料の措置に関する問題については既存の研究炉が抱える喫緊の課題として迅速に対応する必要がある。

ア 使用済燃料の対米返還期限の延長

日本原子力学会の報告書[4]にも指摘されているように、KUR、JMTR 及び JRR-3M などの研究炉で用いられた使用済みのシリサイド燃料 (U_3Si_2 燃料) は、米国エネルギー省 (DOE) との契約の下、2019 年 5 月までは米国へ輸送し引き渡される予定であるが、これは、米国の核不拡散政策及び GTRI (Global Threat Reduction Initiative) 政策の下、高濃縮ウラン (HEU) 燃料返還を促進するためとされている。HEU 燃料の返還が終了すると低濃縮ウラン (LEU) 燃料を対象とする本契約が延長される可能性は低くなり、このため、この状況を放置しておくことと研究炉の運転を継続することが困難な状況になると考えられる。使用済燃料の措置に関するこの問題については、個別の事業者では対応が困難であり、国としての政策的観点から、中長期的な方策を至急に示すことが必要である。

イ 返還期限後の措置 (中間貯蔵等)

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ため、その後の処理処分体制を構築することが必要となる。使用済燃料の措置として国内での再処理を考えた場合、商業ベースに乗る可能性は低いと考えられている。他の方策としては、再処理せずに国内で直接処分を行なうか、または国外で再処理を行う、の二つの選択肢が考えられるが、国外での処理では、返還される回収 U、Pu、そして再処理廃棄物等の扱いが問題として残る。したがって、直接処分を含めて検討し、使用済燃料の扱いについて国として方針を定めることが必要である。

ウ 新燃料、使用済燃料の保障措置及び核物質防護

研究炉の運転には、使用済燃料の措置だけでなく将来にわたって研究炉燃料を安定に調達できることが前提となる。素材としての低濃縮ウラン原料については、使用済燃料の引き取り政策との関連から、我が国の研究炉については米国からの調達となっているが、燃料要素は仏国から供給されており、相手国の方針にも強く依存している。将来的な調達リスクを低減するため、燃料調達先の開拓と確保が必要である。

将来、研究炉燃料は現在のシリサイド燃料 (U_3Si_2 燃料) に比べて再処理性が優れていると言われている U-Mo 燃料へ変換されていくと考えられている。しかし、現在開発中の U-Mo 燃料は、まだ見通しが得られておらず、もし U-Mo 燃料に変更するとすれば、安全性試験や許認可のために相当の期間を要すると考えられている。また、シリサイド燃料に比して容易とされてはいるが、再処理が必要であり、その廃棄物の処分の必要性もなくなるわけではない。したがって、使用済燃料の米国への返還問題と合わせて、この U-Mo 燃料の導入可否を含めた長期的な戦略を持つ必要がある。

エ 使用済燃料の最終処理処分

現行の原子力政策大綱[26]において原子燃料サイクルに関する主な方針の原則については「使用済燃料を再処理すること」が掲げられているが、同大綱第 2 章第 3 項の放射性廃棄物の処理処分において、「研究炉の使用済燃料の取扱いについて、個別の状況を踏まえつつ、その取扱いを、合理性を考慮しつつ検討すべきで

ある」との文言を踏まえると、再処理ありきの考えではなく、再処理にかかるコストと再利用することによって得られる利益とのバランスとを検討することが重要である。現在のところ、使用済燃料の対米返還が2019年以降も継続可能ならば、対米返還が合理的である。対米返還が継続不可能であるならば、以下の処理処分方法が考えられる（付録1の表1-7参照）。

- ・当面貯蔵保管（現状で最小でも20年間保管可能であり、経済的にも合理的であるが、抜本的な解決策とならない。）
- ・処分（国外での実績、技術的知見が蓄積されれば使用済燃料の直接処分に係る技術的信頼性は高まると考えられ、また、経済的にも合理的であると考えられる。しかしながら、国内の政策等の変更を必要とする。）
- ・再処理（アルミナイド(U-Al)、シリサイド(U₃Si₂)及びモリブデン(U-Mo)燃料の再処理は、技術的に可能であるが、200～3000倍の希釈を必要とし、商業ベースに乗らないとされている。また、返還廃棄物等の問題がある。）

以上、まとめると、長期貯蔵を視野に入れて、対米返還交渉を進め、一方では再処理の可能性検討（国内再処理、海外再処理）、直接処分を含めた使用済燃料の処分方策の具体的検討を並行して行っていく必要がある。その際、対米返還以外の方策については政策的検討とともに法的整備が必要であり、国の対応が求められる（＜参考資料3＞放射性廃棄物の処分に関する法令について 参照）。

④ 研究炉の運営・利用体制について

研究炉の利用については、学術研究への適用と同時に産業界のニーズにも応える必要があり、原子力と科学・技術の適切なバランスを保つ必要がある。また将来の研究炉においては、我が国全体としてより効率的な利用が行える体制を整えるとともに、燃料問題など他国の事情に依存しない安定運転が確保できる体制の構築に努める必要がある。

ア ユーザーフレンドリーな利用体制

大学の研究者らによる研究炉の利用については、全国共同利用研究所としての京都大学原子炉実験所がいち早く設立され、爾後、国内の大学関係の基礎基盤研究を振興してきた。東海地区の研究炉利用においては東京大学、さらにJMTRやJOYOを中心とした大洗地区の大型研究炉については東北大学が基礎基盤研究を振興してきており、基礎物理から生物、応用工学に至るまでの幅広い研究者からの様々な要望に応じてきている。利用の分野は拡大しており、利用者の利便性をますます高める必要がある。

JAEAの有するJRR-3Mなどの利用においては、施設供用制度と大学共同利用制度（東京大学原子力機構施設利用管理本部が所管）が共存している。このため、利用者の立場から見た場合、2元的な利用窓口の複雑さや課題採択審査などでの課題の重複の可能性などの非効率性が存在し、また、施設全体の成果を最大限にするためのシステムとして必ずしも合理的ではない。研究炉の利用については、産業界のニーズにも応える必要があり、原子力技術開発と科学・技術研究開発の適切なバランスを保つ必要があることを考えれば、国内の研究炉を有効に合理的に活用するために、統一的な利用体制（プラットフォーム）の構築を含めた新たな枠組みの検討は不可欠である。フランスで建設中のJHRの場合は、CEA（原子力庁）の責任の下に費用の分担者による共同事業体（コンソーシアム）を組織しており、同様のコンソーシアムを組織することも提案されている[4]。

研究炉の有効利用と新たな利用体制の構築に当たっては、原子炉、装置、研究分野を熟知し、新規の測定法や装置の開発とともに利用支援を担う強力なスタッフの充実と、そのために人材育成を進める必要がある。そのためには、施設、大学、産業界、それぞれの特徴と強みを活かしながらも、既存の枠組みにとらわれない新たな体制の構築を模索する必要がある。これら既存の研究炉における人材育成の発展によって、後述する大型研究炉（JMTR、JRR-3M）の後継と将来を担う人的資源を確保することができる。

イ 国内外の研究炉との連携強化

既に述べたように、IAEA の研究炉高度利用プロジェクト[28]によれば、研究炉は、原子力及び科学・技術の分野で、今なお重要で不可欠であるとしながらも、減少しつつある研究炉については、利用率の低下、戦略的ビジネスプランの欠如、老朽化と改造の必要性、高濃縮度燃料の調達と処理、高品質高密度の低濃縮度燃料の不足、使用済燃料の蓄積、廃炉計画の策定とその実施、といった重要課題があることが指摘されている。燃料問題など、我が国の研究炉についても共通する面があり、これらの共通の課題に対しては、国内はもとより、国際的にも連携協力の仕組みを構築して対応する必要がある。その際、特にアジア地域においては我が国が主導する研究炉利用の事業を進めている立場から、他国との協力体制のもと、抜本的な解決に、国際的な視野のもとに取り組むべきである。

国内の連携に関しては、JMTR、常陽、HTTR が設置され、かつ大学も含む充実したホットラボ群が設置された JAEA 大洗のようなサイトは世界的にも例がない。図 1-1-11 からわかるように、汎用の材料試験炉である JMTR では軽水炉の燃料・材料の照射試験、一方、常陽では高速中性子による照射試験、HTTR では高温炉心における照射試験が可能であり、特にエネルギー利用の分野では、こうした多岐にわたる研究炉の能力を、各々適した研究開発分野で最大限に発揮していくことが重要と考えられる。また、中性子スペクトルや温度環境の異なる多様な研究炉の相互の連携を強化し、互いに補完していくことで様々なデータの蓄積が促進され、ひいては燃料・材料の安全性に関する本質的な理解も深まることになり、世界唯一と言える包括的な研究開発の COE 化を達成しうる。各々の研究炉が持つ特長の多様さ、それらの相互連携によるユニークさを、比較的新しい研究炉が多く積極的な利用が推進されているアジア地域の中で追求していくことによって、その波及効果として、我が国は今後とも世界最先端の研究開発に関与し続け、次世代を担う人材を育成し続け、国際社会に貢献し続けていくことが期待できる。相互の連携と COE 化は、我が国の研究炉が採りうる重要な戦略の一つである。

⑤ 研究炉の後継と将来の研究炉について

建設から数十年経過している我が国の研究炉が、J-PARC/MLF の稼動や小型研究炉の停止等の情勢変化の中で、国際競争力を維持し有効利用されるためには、安定的な運転維持費確保や高経年化対策以上に施設や装置のアップグレードを検討する時期にきている。広く共同利用に供せられている公共性の高い研究炉については、設置機関が有する原子力研究目的のみでなく、広い視野から国策として検討される必要がある。持続的な研究開発を可能とする研究基盤施設として、加えて、原子力技術者の育成が急務となっているアジア諸国等への人材育成という国際貢献を念頭に置きながら、既存研究炉の後継研究炉の検討を開始すべきである。

ア 小型研究炉（KUR、JRR-4）の停止後の対策（特に BNCT について）

出力 5MW 以下の小型研究炉である京大 KUR 及び JRR-4 がシャットダウンした場合、我が国では BNCT などの先駆的・開拓的な研究に適した柔軟性の高い研究の場を失うことになる。BNCT については社会からの期待も大きく、将来的には加速器中性子源による治療施設が開発されることが望まれているが、加速器 BNCT が確立したとしても種々の基礎研究や臨床研究が必要であり、大面積で時間的にも安定した照射が可能な研究炉の役割は極めて大きい。これらの研究を含めて同様の先駆的・開拓的な研究や人材育成にも適した研究炉が必要であり、改修や更新を含めた対策案を提示する必要がある。

イ 大型研究炉（JMTR、JRR-3M）の後継と将来の研究炉

KUR 及び JRR-4 に続き、JRR-3M 及び JMTR の研究炉が約 20 年後には大規模改造が必要となるか、またはシャットダウンすると想定されている。このため、20 年後には国内で稼動する研究炉がなくなることが想定される。もし、その後継研究炉を整備することができなければ、我が国には大型研究炉がなくなり、研究炉利用において世界を先導してきた地位を失うことになる。これは、原子力開発における基礎研究及び技術力に対する世界的な信用を失うことを意味し、原子力技術の海外展開において重大な障害となると考えられる。したがって、後継研究炉について適切な将来計画、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が必要である。先進的で信頼性安全性の高い炉心をもつ 10^{15} n/cm²s 程度の定常中性子源を JRR-3M の後継炉として建設し、ビーム実験に加え、広い照射場を確保して照射実験、RI 生産などに供することは、我が国の国際優位性に著しく貢献することが期待される。また最先端の研究炉建設により、優秀な原子力専門家の育成が期待できる。

3 提言

研究炉については、その利用のメリットや必要性とともに、原子炉施設としてのリスクがあり、そのリスクに対処するための真摯な取り組みが不可欠であるが、我が国における学術、科学・技術の発展の観点から、研究炉の利用を今後も安定に維持・継続していくことが重要である。そのために求められる既存及び将来の研究炉のあり方について、以下の提言を行う。

(1) 研究炉の役割と位置付け

我が国では、研究炉は、原子力開発の初期段階から設置された施設であり、原子力の研究・開発、人材育成、研究者・学生の研究・教育に役立てられてきた。また研究炉で得られる中性子は、基礎研究、産業、医療にも利用されるなど、研究炉は我が国の学術、科学・技術、産業の発展に貢献してきた。その実績からも、研究炉は多くの分野で学術、科学・技術の発展に必要な不可欠な研究基盤施設であり、国が安定・定常的に維持すべき施設である。我が国における研究炉利用のニーズについては将来的にも適切に対応する必要がある。

(2) 研究炉の安全・安定運転の確保

国内の多くの研究炉は建設から数十年が経過しており、施設設備の高経年化が課題となっている。研究炉については、施設の安全性・先端性を継続的に確保することが必要であり、その経費が国の施策として保証されるとともに、当該施設が全国共同利用制度や共用促進法のような仕組みの下で適切に運用されることが必要である。

研究炉は、発電炉の発電利用とは異なり、その多くは沸点未満、非加圧の冷却条件のもとで運転されているが、今回の事故の教訓等を踏まえた安全対策等に関し継続的に検討・評価を行う必要がある。一方、研究炉の安全規制については、現在、原子炉等規制法において発電炉とは区別して規制され、設計・施工に係る行政判断のための技術上の基準・指針では研究炉の特徴が考慮されているが、維持段階における行政上の運用においては必ずしも発電炉との違いは考慮されていない。研究炉の維持段階においても、発電炉との違いを考慮して合理的な安全規制行政が行われることが望まれる。

(3) 研究炉の燃料問題への対応

研究炉の使用済燃料の措置に関する問題については既存の研究炉が抱える喫緊の課題として迅速に対応する必要がある。即ち、我が国の研究炉で用いられた使用済燃料は、2019年5月までは米国へ引き渡される予定であるが、LEU燃料を対象とする米国との契約が延長される可能性は低く、研究炉の運転を継続することが困難な状況になることも考えられる。使用済燃料の措置に関するこの問題については、個別の設置事業者では対応が困難であり、国としての政策的観点から、中長期的な方策を早急に示す必要がある。

使用済燃料については、長期貯蔵を視野に入れて、対米返還の契約延長交渉を進め、一方では再処理の可能性検討、直接処分を含めた使用済燃料の処分方策の具体的検討を並行して行っていく必要がある。その際、対米返還以外の方策については政策的検討とともに法的整備が必要であり、国の対応が求められる。

(4) 研究炉の運営・利用体制の強化

研究炉の利用については、学術研究への適用と同時に産業界のニーズにも応える必要があり、また、原子力と科学・技術の適切なバランスを保つ必要もある。国内の研究炉を更に効率的、有効に、そして合理的に活用するために、統一的な利用体制(プラットフォーム)の構築が望まれる。研究炉の有効利用と新たな利用体制の構築に当たっては、新規の測定法や装置の開発とともに利用支援を担う強力なスタッフの充実と、そのための人材育成を進める必要があり、既存の枠組みにとらわれない新たな体制の構築が不可欠である。

国際原子力機関 (IAEA) の研究炉高度利用プロジェクトによれば、研究炉は、原子力及び科学・技術の分野で、今なお重要で不可欠であるとしながらも、減少しつつある研究炉については利用率の低下、戦略的ビジネスプランの欠如、老朽化と改造の必要性、燃料問題などの重要課題のあることが指摘されている。燃料問題など、我が国の研究炉についても共通する課題があり、これらの共通の課題に対しては、国内はもとより、国際的な連携協力の仕組みを構築して対応する必要がある。

(5) 研究炉の後継と将来の研究炉の検討

建設から数十年経過している我が国の研究炉については、施設や装置のアップグレードを検討する時期にきている。実際、出力 5MW 以下の小型研究炉である KUR 及び JRR-4 がシャットダウンした場合、我が国では BNCT などの先駆的・開拓的な研究に適した柔軟性の高い研究の場を失うことになる。BNCT については、将来的には加速器中性子源による治療施設が開発されることが望まれているが、その実現に必要な研究を含めて同様の先駆的・開拓的な研究や人材育成にも適した研究炉が必要であり、対策案を提示する必要がある。

また、KUR 及び JRR-4 に続き、JRR-3M 及び JMTR の研究炉が約 20 年後には大規模改造が必要となるか、またはシャットダウンすると想定されている。研究炉の建設には長期の準備期間がいることから、広く共同利用に供せられている公共性の高い研究炉の後継について適切な将来計画、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。

<参考文献>

- [1] 日本学術会議 原子力工学研究連絡委員会及びエネルギー・資源工学研究連絡委員会核工学専門委員会、報告「人類社会に調和した原子力学の再構築」、2003年3月17日。
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/18pdf/1842.pdf>)
- [2] 日本学術会議 科学者委員会学術の大型研究計画検討分科会、報告「学術の大型施設計画・大規模研究計画マスタープラン 2011」、2011年9月28日。
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-h135-1.pdf>)
- [3] 日本原子力産業会議、「研究炉の在り方に関する検討報告書」、2000年3月。
- [4] 日本原子力学会 将来必要となる共同利用に供する研究施設検討特別専門委員会、「将来必要となる共同利用研究施設について」、2010年9月。
- [5] 日本学術会議、「日本の展望—学術からの提言 2010」、2010年4月5日。
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-tsoukai.pdf>)
- [6] 日本中性子科学会 次世代研究用原子炉検討特別委員会、「次世代研究用原子炉検討特別委員会報告書—次世代研究用原子炉の建設に向けて—」、2012年12月。
(http://www.jsns.net/jp/html/committee/Next_Reactor_Final_Report_2012Dec.pdf)
- [7] 日本学術会議 安全・安心な世界と社会の構築特別委員会、報告「安全で安心な社会の構築に向けて—安全と安心をつなぐ—」、2005年6月23日。
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-19-t1030-4.pdf>)
- [8] 小林傳司、社会における科学リテラシー、講義録「科学における社会リテラシー 1」、総合研究大学院大学、2003年。
(<http://sas.soken.ac.jp/ja/wp-content/uploads/lecture/kagakuniokerushakailiteracy1/kobayashi.pdf>)
- [9] Alvin M. Weinberg, *Minerva*, 10 (2), pp. 209-222, 1972.
- [10] 日本学術会議、回答「高レベル放射性廃棄物の処分について」、2012年9月11日。
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-k159-1.pdf>)
- [11] 閣議決定、「新成長戦略」、2010年6月18日。
(<http://www.kantei.go.jp/jp/sinseichousenryaku/sinseichou01.pdf>)
- [12] European Spallation Neutron Source (ESS), “Neutrons for Science, Neutrons for Society”, 2009.
(http://ess-scandinavia.eu/documents/Neutrons_for_Science.pdf)
- [13] Institut Laue-Langevin (ILL), “Report from the ILL Associates’ Working Group on Neutrons in Europe for 2025”, 2011.
(http://www.ill.eu/fileadmin/users_files/documents/news_and_events/news/Report_from_ILL_Neutron_Working_Group.pdf)
- [14] 森井幸生、藤井保彦、連載講座「中性子回折の基礎と応用」を終わるにあたって、*Radioisotopes*, 60, pp. 151-161, 2011.
- [15] 日本原子力研究開発機構 JRR-3・J-PARC 中性子実験装置整備計画検討作業グループ、「JRR-3 と J-PARC/MLF における中性子実験装置の役割分担と連携及び JRR-3 の中性子実験装置に関する将来計画」、2008年6月。
- [16] 日本学術会議 第三部、報告「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」、2011年8月24日。
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-21-h132.html>)

- [17] S. Ogo et al., Science, 316, pp. 585–587, 2007.
- [18] M. Adachi et al., PNAS, 106, pp. 4641–4646, 2009.
- [19] 中川洋 (原子力機構)、私信、2013.
- [20] 文部科学省量子ビーム研究開発・利用推進検討会、「量子ビーム研究開発・利用の推進方策について (中間とりまとめ) –中性子・R I ビームによる物質・生命・環境分野の課題解明・産業応用の新地平開拓に向けて–」、2005年7月。
(http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/010/houkoku/05081201.htm)
- [21] 茨城県サイエンスフロンティア 21 構想懇談会、「サイエンスフロンティア 21 構想報告書」、2002年3月。
(<http://www.pref.ibaraki.jp/kikaku/kagaku/senryaku/pdfs/sf21/hokoku.pdf>)
- [22] 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「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」、2008年7月24日。
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-t60-5.pdf>)
- [23] 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、内閣府 原子力委員会、「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」、2011年7月7日。
(<http://www.cao.go.jp/oaep/mo-supply/houkokusho.pdf>)
- [24] 日本原子力研究開発機構 JMTR 利用検討委員会、「我が国における材料試験用原子炉の役割と JMTR のあり方等に関する検討報告書」、2006年3月。
(http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/010/shiryu/06061222/001.htm)
- [25] Nuclear Energy Agency (NEA) Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), “Research and Test Facilities Required in Nuclear Science and Technology”, 2010.
(<http://www.oecd-nea.org/science/reports/2009/6293-Research-Test-Facilities.pdf>)
経済協力開発機構 (OECD) 原子力機関、「原子力の科学技術で必要とされる試験研究施設」、2010年。(和訳レポート)
(<http://www.oecd-nea.org/science/reports/2010/nea6947-Research-Test-JAP.pdf>)
- [26] 原子力委員会、「原子力政策大綱」、2005年10月11日。
(<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/taikou/kettei/siryu1.pdf>)
- [27] International Atomic Energy Agency (IAEA), “Research Reactor Database (RRDB)” and “Research Reactor Ageing Database (RRADB)”.
(http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/Technical_Areas/RRS/databases.html)
- [28] International Atomic Energy Agency (IAEA), “Project on Enhanced Utilization and Applications of Research Reactors”.
(http://www-naweb.iaea.org/naweb/physics/research_reactors/index.html)
- [29] 原子力規制委員会、「試験研究用原子炉施設の規制基準について」(第4回核燃料施設等の新規制基準に関する検討チーム資料)、2013年4月16日。
(http://www.nsr.go.jp/committee/youshikisya/kaku_shinkisei/data/0002_03.pdf)

- [30] 四竈 樹男、「核融合材料の照射効果評価の高度化」(平成 23 年度核融合科学研究所双方向型共同研究成果報告会)、2012 年 1 月 26 日。
(http://www.nifs.ac.jp/kenkyo/kyodo-kenkyu/houkokukai/h23/sou_pdf/sou_3-1.pdf)
- [31] 閣議決定、「第 4 期科学技術基本計画」、2011 年 8 月 19 日。
(http://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/detail/__icsFiles/afiel_dfile/2011/08/19/1293746_02.pdf)
- [32] 文部科学省、「文部科学省所管の試験研究用原子炉施設に関する電源機能等喪失時における炉心等の健全性評価の結果と原子炉設置者の今後の対応方針について」、2011 年 5 月 23 日。
(http://www.nsr.go.jp/archive/mext/a_menu/anzenkakuho/news/genshiro_ankenkisei/1306222.htm)
- [33] International Atomic Energy Agency(IAEA), “Safety of Research Reactors”.
(http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1220_web.pdf)
- [34] 原子力規制委員会、「試験研究用原子炉施設の新規性基準の考え方」(第 6 回核燃料施設等の新規性基準に関する検討チーム資料)、2013 年 5 月 28 日。
(http://www.nsr.go.jp/committee/youshikisya/kaku_shinkisei/data/0006_03.pdf)

<参考資料1> 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
(研究用原子炉のあり方検討小委員会に関する
審議のあった分科会)

2011年

- 1月25日 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（第21期・第5回）
・研究用原子炉のあり方検討小委員会の活動報告
- 4月13日 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（第21期・第6回）
・分科会と小委員会の合同会議
・記録案「研究用原子炉のあり方」の概要説明

2012年

- 1月17日 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（第22期・第1回）
・22期研究用原子炉のあり方検討小委員会の設置

2013年

- 1月10日 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（第22期・第3回）
・提言案「研究用原子炉のあり方」の審議
・査読委員の決定
- 3月6日 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（第22期・第4回：メール審議）
・査読の結果を入れて修正した提言案「研究用原子炉のあり方」に関するメール審議
- 3月13日 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（第22期・第5回：メール審議）
・修正した提言案「研究用原子炉のあり方」を承認

**<参考資料 2> 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
研究用原子炉のあり方検討小委員会審議経過**

2010年

- 12月14日 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
検討分科会研究用原子炉のあり方検討小委員会（第21期・第1回）
・小委員会の進め方について

2011年

- 1月18日 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
検討分科会研究用原子炉のあり方検討小委員会（第21期・第2回）
・小委員会での取りまとめの方針及び課題リスト
- 3月1日 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
検討分科会研究用原子炉のあり方検討小委員会（第21期・第3回）
・京都大学原子炉の状況
・近畿大学原子炉の状況
・小委員会での検討と取りまとめ方針
- 4月13日 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（第21期・第6回）及び同分科会研究用原子炉のあり方検討小委
員会（第21期・第4回）
・大型計画・大規模研究について
- 7月6日 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
検討分科会研究用原子炉のあり方検討小委員会（第21期・第5回）
・東北地方太平洋沖地震の研究用原子炉への影響
・記録（案）の扱い
- 9月16日 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
検討分科会研究用原子炉のあり方検討小委員会（第21期・第6回）
・研究炉に関する論点整理
・今後について

2012年

- 3月27日 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
検討分科会研究用原子炉のあり方検討小委員会（第22期・第1回）
・役員の選出
・今期の活動方針
- 5月16日 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
検討分科会研究用原子炉のあり方検討小委員会（第22期・第2回）
・審議のまとめ（案）に関する検討
- 8月7日 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
検討分科会研究用原子炉のあり方検討小委員会（第22期・第3回）
・まとめについて
- 9月26日 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
検討分科会研究用原子炉のあり方検討小委員会（第22期・第4回）
・まとめについて

11月8日 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
検討分科会研究用原子炉のあり方検討小委員会（第22期・第5回）
・まとめについて

<参考資料 3> 放射性廃棄物の処分に関する法令について

放射性廃棄物には高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物がある。

・高レベル放射性廃棄物

使用済燃料からウラン・プルトニウムを分離・回収した後には、液状の廃棄物が生じ、この廃棄物は、放射能レベルが高いことから「高レベル放射性廃棄物」と呼ばれる。日本ではガラスと混ぜて固化処理しガラス固化体にする。また、再処理せずに使用済燃料をそのまま処分する場合には、使用済燃料そのものが「高レベル放射性廃棄物」となる。

・低レベル放射性廃棄物

原子力発電所や原子燃料サイクル施設から発生する放射能レベルの比較的低い放射性廃棄物、RI を使用する医療機関や研究機関等から発生する RI 廃棄物、研究炉や核燃料物質使用施設等から発生する研究所等廃棄物などがある。

処分の規定されている放射性廃棄物は、

1. 発電用原子炉の再処理で生じた高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）
2. 低レベル放射性廃棄物

であり、その他のレベルの高い放射性廃棄物に関しての法令はない。上記のうち1は原子力発電環境整備機構（NUMO）が処分の実施主体とされており、2のうち、原子力発電所や原子燃料サイクル施設から発生する低レベル放射性廃棄物は日本原燃が処分の実施主体とされ、その他は日本原子力研究開発機構が処分の実施主体とされている。研究炉の使用済燃料については、その再処理によって生じる放射性廃棄物の処分をNUMOに委託することができるとしても、国内の再処理事業者は存在しない。このため、海外再処理もしくは直接処分を検討する必要がある。その際、政策的検討とともに法的整備が必要であり、国の対応が求められる。

（補足）

独立行政法人日本原子力研究開発機構法では、機構の業務の遂行に支障のない範囲内で、国、地方公共団体その他政令で定める者の委託を受けて、これらの者の核原料物質（原子力基本法第三条第三号に規定する核原料物質をいう。）、核燃料物質又は放射性廃棄物を貯蔵し、又は処理する業務を行うことができるとされ、また放射性廃棄物（特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（平成十二年法律第百十七号）第五十六条第一項及び第二項に規定する原子力発電環境整備機構の業務に属するものを除く。）の処分に関する業務として、機構の業務に伴って発生した放射性廃棄物及び機構以外の者から処分の委託を受けた放射性廃棄物（実用発電用原子炉及びその附属施設並びに原子力発電の関連施設から発生したものを除く。）の「埋設処分」を行うとされているが、研究炉の使用済燃料については特に規定されていない。

一方、特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律では、原子力発電環境整備機構の業務の遂行に支障のない範囲内で、委託を受けて、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物を固型化し、又は容器に封入した物（発電用原子炉の運転に伴って生じた使用済燃料の再処理等を行った後に生じる特定放射性廃棄物を除く。）について最終処分と同一の処分を行うことができるとされている。

<付録 1> 「現状と課題」参考図表

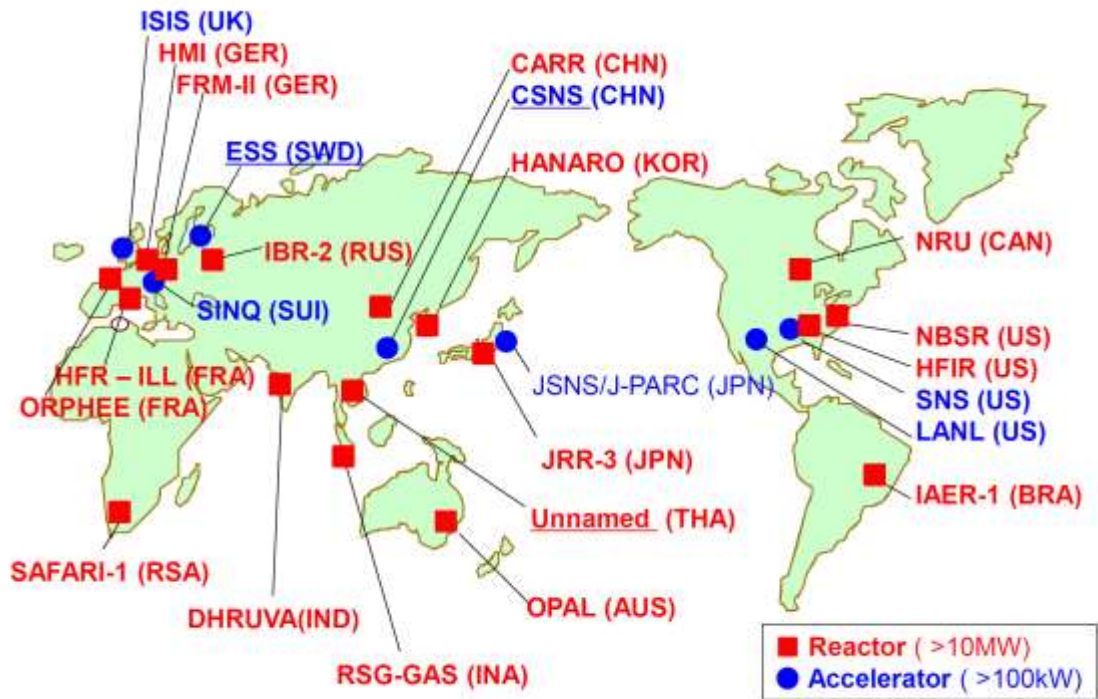


図 1-1 中性子ビーム実験に利用されている世界の大型中性子源（参考文献[14]の図2を一部修正）



図 1-2 理学・工学分野における科学・夢ロードマップ（参考文献[16]）

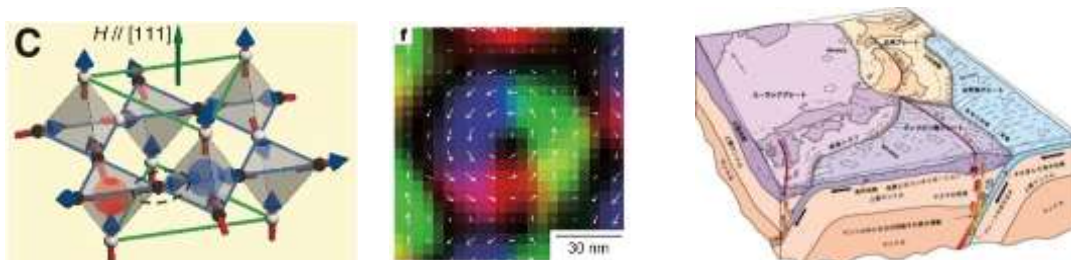


図 1-3 物理(基礎物理・物性物理)及び地球科学: 磁性体中の磁気モノポール(左、http://neutrons.issp.u-tokyo.ac.jp/modules/scientific_highlight/index.php?)、スカーミオン(中央、<http://www.cmr.t.u-tokyo.ac.jp/index.shtml>)、地殻-マントル鉱物の構造と水素の役割は地球科学の重要なテーマである(右、<http://blogs.yahoo.co.jp/yukuowigoclub/8884333.html>)。



図 1-4 化学・材料・高分子: 新しい高温超伝導(左)や高分子の自己修復性(中央、<http://yoshielab.iis.u-tokyo.ac.jp/research.htm>)、そして超分子(右、<http://www.chem.sci.osaka-u.ac.jp/lab/harada/index.html>)は夢の材料として中性子を用いた研究が期待される。

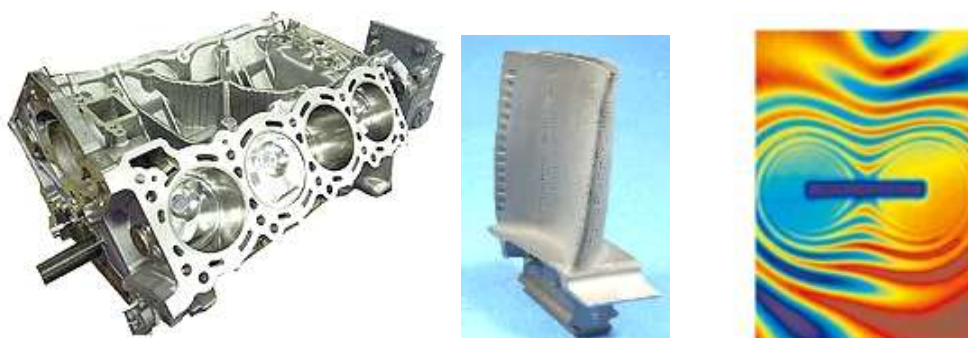


図 1-5 工学分野、中性子イメージング: 中性子はエンジン(左)やタービン(中央)の残留応力や集合組織を非破壊的に明らかにする。偏極中性子イメージングによる磁場分布の測定(右、http://www.helmholtz-berlin.de/forschung/funkma/werkstoffe/methoden/n-tomo_en.html)。

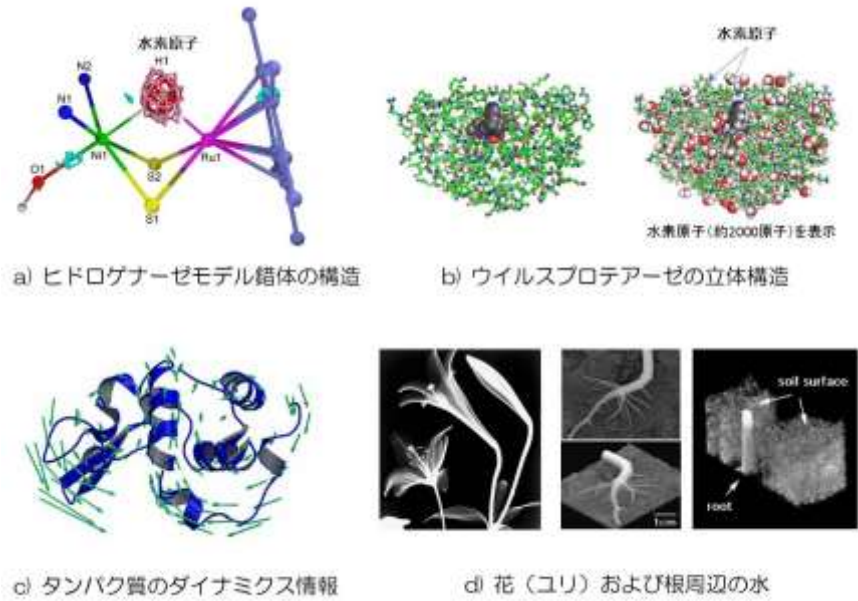


図 1-6 生命科学： a) 水素原子を保持するヒドロゲナーゼモデル錯体の立体構造 (参考文献[17])、b) 創薬標的蛋白質(ヒト免疫不全ウイルスプロテアーゼ)の水素原子を除く主要原子の構造と中性子解析で観測できる水素原子と水和水の情報を加えた全原子構造 (参考文献[18]: 約2000個の水素原子座標を含む3480個の座標を決定)、c) 中性子散乱及び計算科学で得られる生体高分子のダイナミクス情報(参考文献[19])、d) 中性子イメージングによる植物及び土壌中の可視化 (<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/radio-plantphys/themes.html#previous>)。

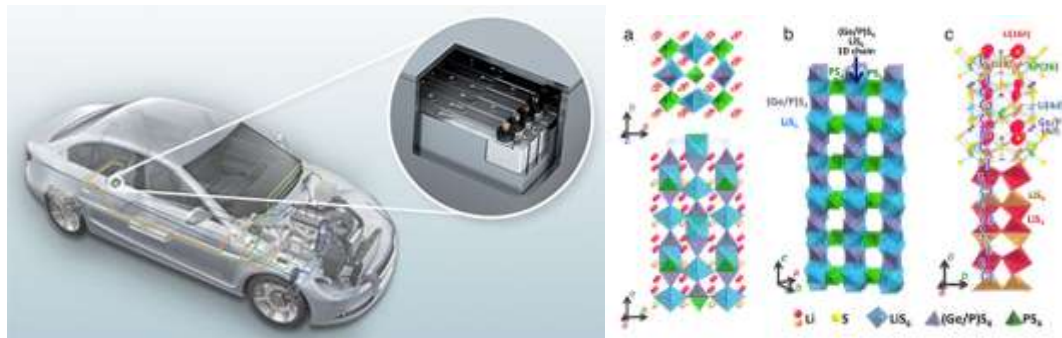


図 1-7 環境分野： Li や燃料電池材料の構造と動作のその場観察に中性子は不可欠である(左、<http://bmw.jugem.cc/?eid=11192>、右、http://www.titech.ac.jp/file/20110801_ion.pdf)。

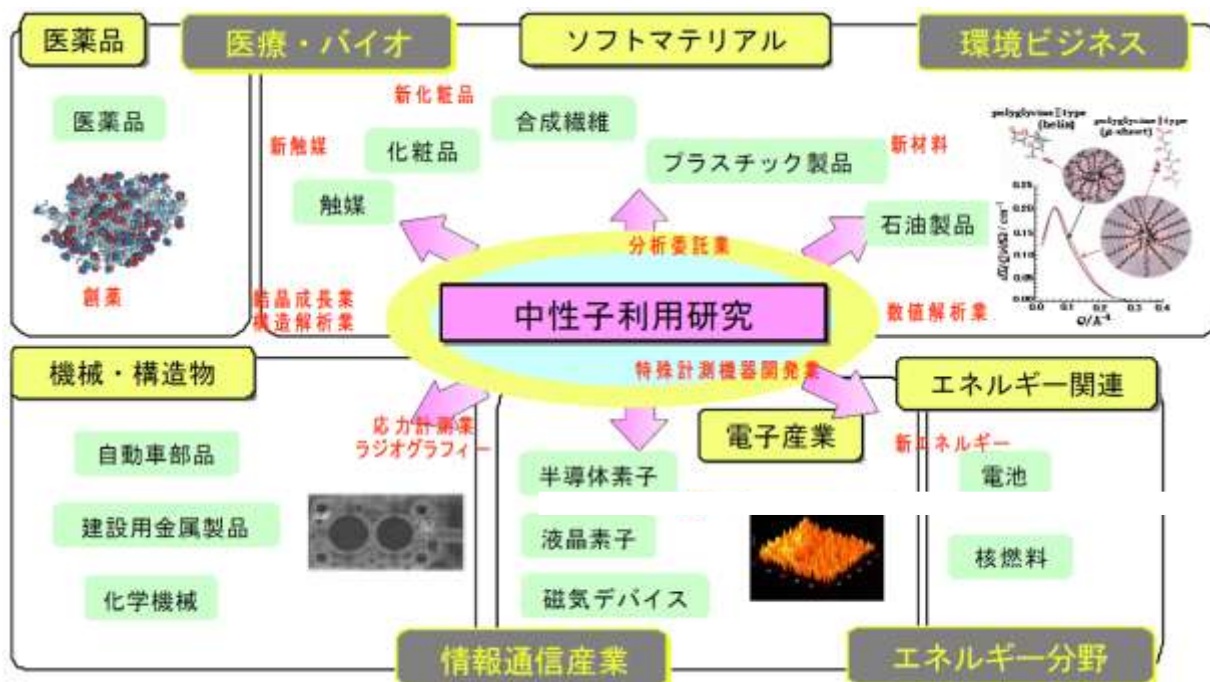


図 1-8 中性子の産業利用による市場 (参考文献[21])

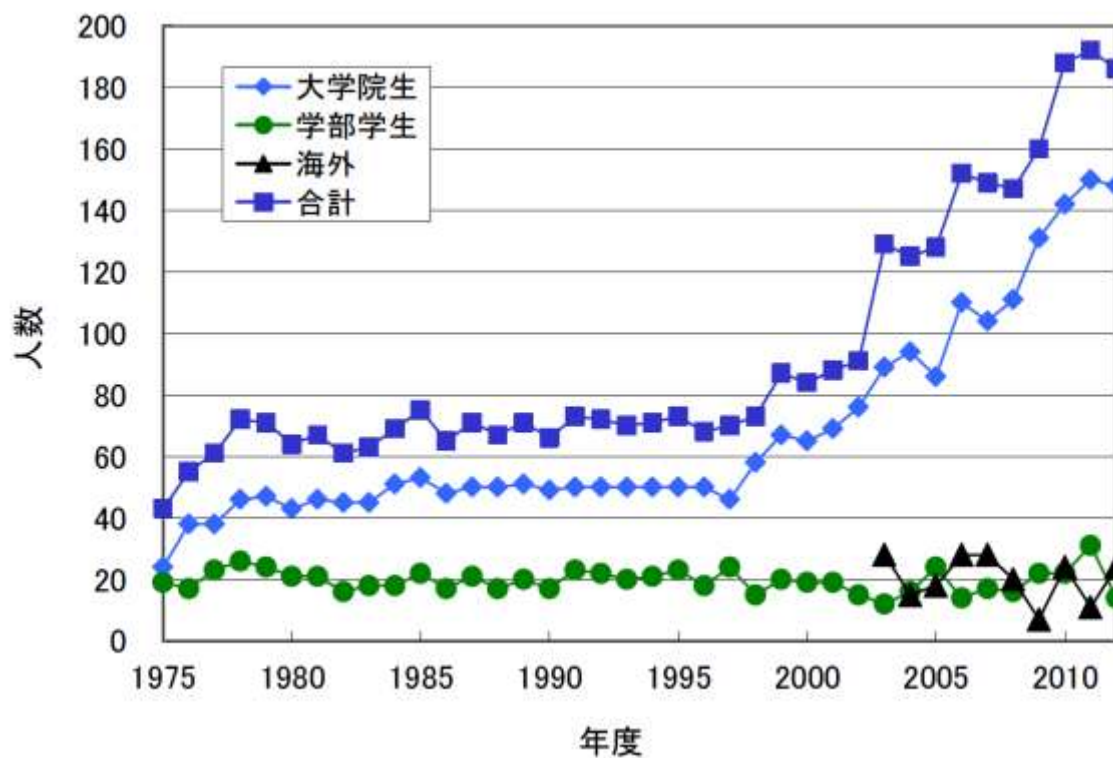


図 1-9 京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA) における炉物理実験教育

東海

- × 東京大学原子炉(弥生)
- 【(独)日本原子力研究機構】
- 定常臨界実験装置(STACY)
 - U-Pu濃縮燃料タンク型(200W)
- 過渡臨界実験装置(TRACY)
 - U溶液燃料タンク型(定出力10kW,過渡5GW)
- 原子炉安全性実験炉(NSRR)
 - 濃縮U燃料水素化Zr減速不均質型(定出力300kW,パルス23GW)
- JRR-3
 - 低濃縮U軽水減速冷却プール型(20MW)
- JRR-4
 - 濃縮U軽水減速冷却スイミングプール型(3.5MW)
- 高速炉臨界実験装置(FCA)
 - 濃縮U-Pu燃料水平二分割型(2kW)
- 軽水臨界実験装置(TCA)
 - 濃縮U-Pu燃料軽水減速型(200W)
- × JRR-2

大洗

- 【(独)日本原子力研究機構】
- 材料試験炉(JMTR)
 - 濃縮U軽水減速軽水冷却タンク型(50MW)
- 高温工学試験研究炉(HTR)
 - 低濃縮U₂O₃被覆粒子燃料黒鉛減速Heガス冷却型(30MW)
- 高速実験炉(常陽)
 - U-Pu混合酸化物燃料Na冷却高速中性子型(140MW)
- × 重水臨界実験装置(DCA)

	● 運転段階	建設段階	× 廃止措置段階	計
原子炉施設	14	0	8	22

むつ

- 【(独)日本原子力研究開発機構】
- × 原子力第1船むつ

川崎

- 東芝臨界実験装置(NCA)
 - 低濃縮U軽水減速不均質型(200W)
- × 東芝教育訓練用原子炉(TTR-1)
- × 東京都市大学
- × 日立教育訓練用原子炉(HTR)

横須賀

- × 立教大学炉

東大阪

- 近畿大学炉
 - 濃縮U軽水減速黒鉛反射不均質型(1W)

熊取

- 京都大学研究用原子炉(KUR)
 - 濃縮U軽水減速軽水冷却不均質型(5MW)
- 京都大学臨界実験装置(KUCA)
 - 濃縮U不均質型(0.1kW,短時間1kW)

図 1-10 国内の主な研究炉 (参考文献[29])

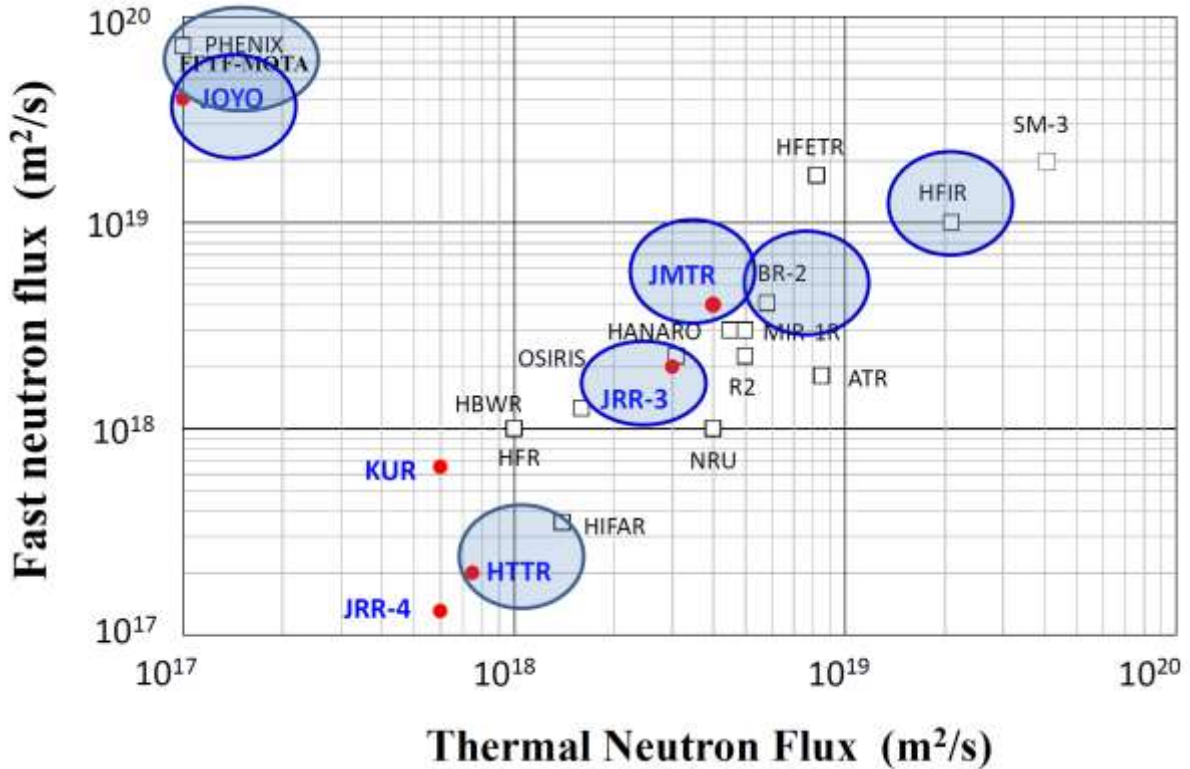


図 1-11 国内外の主な研究炉の比較 (参考文献[30])

表 1-1 研究炉定常、短パルス、長パルス中性子源の特徴

	ピーク強度	時間平均中性子束	照射実験・RI 製造
研究炉	△	◎	◎
短パルス	◎	○	×
長パルス	○	◎	×

表 1-2 中性子の産業利用適用対象と直近の重点課題、
研究開発に利用される測定方法

産業分野	適用対象	直近の重点課題	測定方法
電機・電器	MRAM、光磁気ディスク、磁気記録ヘッド、液晶ディスプレイ	稀少元素レス高性能磁石、Li イオン電池材料	粉末回折、 <u>偏極回折</u> 、反射率計
化学・繊維	高分子触媒、 <u>機能性プラスチック</u> 、ゴム、半導体素材、 <u>高張力繊維</u>	<u>ディスプレイ用機能性薄膜</u>	<u>小角散乱</u> 、粉末回折、反射率計、 <u>ドーピング</u>
鉄鋼・金属	燃料電池用水素貯蔵用容器、Ti-Al 合金、 <u>磁石</u>	<u>超高張力鋼</u> 、 <u>燃料電池用水素貯蔵材料</u>	<u>小角散乱</u> 、 <u>偏極回折</u> 、残留応力、集合組織
自動車 自動車部品	<u>エンジン</u> 、 <u>燃料電池</u> 、 <u>自動車部品</u>	Li イオン電池材料	<u>イメージング</u> 、 <u>小角散乱</u> 、粉末回折、残留応力、集合組織
重工・機械	<u>発電プラント</u> 、 <u>建設機械</u> 、 <u>一般機械</u>	構造物の残留応力	<u>イメージング</u> 、 <u>残留応力</u> 、 <u>集合組織</u>
電力・ガス	<u>発電プラント</u> 、 <u>燃料電池</u> 、	構造物の残留応力	<u>イメージング</u> 、 <u>小角散乱</u> 、粉末回折、残留応力、集合組織
建設・土木	<u>コンクリート構造</u> 、 <u>橋梁</u> 、 <u>建築物一般</u>	<u>コンクリートの耐腐食性</u>	<u>イメージング</u>
製薬・食品 化粧品 バイオ応用	<u>医薬品開発</u> 、 <u>機能性食品</u> 、 <u>バイオエネルギー</u>	<u>感染症治療薬</u> 、 <u>抗がん剤</u> 、 <u>製剤</u> 、 <u>機能性化粧品</u> 、 <u>バイオマス利用</u> 、 <u>人工光合成</u>	<u>小角散乱</u> 、粉末回折、単結晶構造解析

表 1-3 今後定常中性子源が重要となる測定方法を用いる産業分野の適用対象

定常中性子源が重要な測定手法	適用対象
小角散乱	高分子触媒、機能性プラスチック、ゴム、高張力繊維、ディスプレイ用機能性薄膜、超高張力鋼、燃料電池、機能性食品、機能性化粧品、ゲル
分析・イメージング	エンジン、燃料電池、発電プラント、建設機械、一般機械、コンクリート構造、橋梁、建築物一般
偏極回折	MRAM*、光磁気ディスク、磁気記録ヘッド、磁石

*MRAM: Magnetoresistive Random Access Memory

表 1-4 疾病診断・がん治療薬等の医療分野で重要な RI

核種	半減期	生産方法	用途・特記事項
^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$	66h/6h	$\text{U}(\text{n}, \text{f})^{99}\text{Mo}$ $^{98}\text{Mo}(\text{n}, \gamma)^{99}\text{Mo}$	核医学診断薬、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレーター原料、液体燃料炉利用 PZC カラムの開発
^{89}Sr	50.5d	$^{88}\text{Sr}(\text{n}, \gamma)^{89}\text{Sr}$	がん骨転移の疼痛系減薬 強 β^- : 1.495MeV (100%)
^{188}W - ^{188}Re ^{188}Re	69.4d/17h 17h	$^{187}\text{W}(\text{n}, \gamma)^{188}\text{W}$	^{188}Re ジェネレーター、MAB 標識がん治療薬 強 β^- : 0.965MeV (25.6%)、2.12MeV (71.0%)
^{90}Sr - ^{90}Y	28.7y/64h	$\text{U}(\text{n}, \text{f})^{90}\text{Sr}$	^{90}Y ジェネレーター、MAB 標識がん治療薬 強 β^- : 2.28MeV (100%)
^{125}I	59.4d	$^{124}\text{Xe}(\text{n}, \gamma)^{125}\text{Xe}$ $^{125}\text{Xe} \rightarrow ^{125}\text{I}$	前立腺がん治療用線源

表 1-5 世界の高出力研究炉の利用分野

	炉の名称	出 (MW)	運 転 開 始 年	燃 料 ・ 材 料	RI 生 産	中 性 子 散 乱	ラ ジ オ グ ラ フ イ	放 射 化 分 析	核 変 換	地 質 年 代	捕 捉 療 法	教 育	訓 練	その他
北 米	ATR	250	1967	○	○									
	NBSR	20	1967			○	○	○						
	HFIR	85	1965	○	○	○	○	○				○	○	γ線照射
	MURR	10	1966		○	○	○	○	○			○		
	NRU	135	1957	○	○	○							○	
西 欧	BR-2	100	1961		○				○			○	○	
	OSIRIS	70	1966	○	○			○	○					核融合炉材料
	HFR	58	1971		○	○	○							核データ
	CABRI	25	1963	○										燃料棒のRIA試験
	ORPHEE	14	1980		○	○	○	○		○				
	FRM-II	20	2004		○	○	○	○	○		○	○	○	高速中性子捕捉療法
	HFR-Petten	45	1961	○	○	○	○	○	○	○	○		○	
	HBWR	20	1959	○										
ロ シ ア	VK-50	200	1964	○				○					○	次世代炉、熱電供給
	WWR-M	18	1959	○	○	○		○	○	○			○	導管
	IVV-2M	15	1966	○	○	○			○				○	
	MTR	100	1966	○	○			○						GEN-IV
	WWR-TS	15	1964		○				○			○	○	
	SM-3	100	1961	○	○			○	○				○	GT-MHR
	BOR-60	60	1968	○									○	ITER、GEN-IV等
オ セ ア ニ ア ・ ア ジ ア	HFETR	125	1979	○	○				○			○	○	
	CARR	60	2010	○	○	○	○	○	○		○			
	CEFR	65	2010	○										電力供給
	HANARO	30	1995	○	○	○	○	○	○	○		○	○	
	OPAL	20	2006		○	○	○	○	○				○	
	RSG-GAS	30	1987		○		○	○	○				○	○
	DHRUVA	100	1985	○	○	○		○				○	○	
	FBTR	40	1985	○	○								○	
	JMTR	50	1968	○	○			○						
JRR-3M	20	1990	○	○	○	○	○	○	○					

表 1-6 国内の主な研究炉

場所	機関	原子炉	運転開始	熱出力	利用の目的					備考		
					エネルギー利用	学術利用	産業利用*	医学・治療利用**	人材育成		波及効果・国際貢献	
東海	JAEA	JRR-3M	1990	20MW		○	○	○		○	中性子散乱、燃・材料照射、RI 製造、放射化学分析	
		JRR-4	1965	3.5MW			○	○	○		BNCT、放射化学分析、教育・訓練	
		NSRR	1975	300kW 30W(ノリス)	○						○	反応度事故時燃料安全研究
東海	JAEA	STACY	1995	200W	○							溶液燃料臨界実験
		TRACY	1995	2kW 50W(ノリス)	○							臨界超過過渡実験
		TCA	1962	200W	○					○		炉物理教育、反応度測定法開発
		FCA	1967	2kW	○							高速炉、新型炉の炉物理研究
		JMTR	1968	50MW	○	○	○	○	○	○		燃・材料照射、RI 製造等
大洗	JAEA	HTTR	1998	30MW	○					○	高温ガス炉開発研究	
		JOYO	1977	140MW	○					○	高温ガス炉開発研究、燃・材料照射	
川崎	東芝	NCA	1963	200W	○						技術・製品開発、電力事業者等からの委託研究	
東大阪	近大	UTR-KINKI	1961	1W		○				○	教育・訓練、放射化学分析等	
熊取	京大	KUR	1964	5MW		○				○		中性子散乱、材料照射、RI 製造、BNCT、教育・訓練等
		KUCA	1974	100W	○					○		炉物理研究、放射線物理研究、教育・訓練等

*：工業用 RI、Si 半導体の製造を含む

**：BNCT 及び医療用 RI 製造を含む

表 1-7 研究炉で発生する使用済燃料の措置

政 策	方 式	政策変更	国内輸送	海外輸送	返還 廃棄物	廃棄物 処分	中間貯蔵	備 考
燃料リサイクル (再処理)	米国へ返送	×	○	○	×	×	△	現行通り。返送期限の延長が不可欠。米国の政策に依存。
	海外再処理	×	○	○	○	○	△	IAEA で調査中。研究開発が必要。採算？
	国内再処理	×	○	×	×	○	○	技術的には可能。研究開発が不可欠。原子力自主開発路線。
ワンスルー (直接処分)	国内処分	○	○	×	×	○	○	処分場未定。原子力自主開発路線。
	海外処分	○	○	○	×	×	○	現在の国際的通念は自国内処分。
長期保管	再処理	×	△	-	-	-	-	将来、再処理することにした上で保管。
	直接処分	○	△	-	-	-	-	将来、直接処分することにした上で保管。
	決定 先延ばし	○	△	-	-	-	-	再処理するか、直接処分をするかは、技術開発状況等を見定めた上で、将来決定することとして保管。

<付録2> 我が国の研究炉の安全性に関する資料

1. 研究炉の熱除去等[34]

炉型	ナトリウム冷却炉	ガス冷却炉	水冷却炉等			
			高出力炉(10MW以上、50MW以下)		中出力炉(500kW以上、10MW未満)	
炉名	常陽	HTTR	JMTR	JRR-3	KUR	JRR-4
熱出力	140MW	30MW	50MW	20MW	5MW	3.5MW
炉型	U・Pu混合酸化物燃料Na冷却高速中性子型	低濃縮UO ₂ 被覆粒子燃料黒鉛減速Heガス冷却型	濃縮U軽水減速軽水冷却タンク+プール型	低濃縮U軽水減速冷却プール型	濃縮U軽水減速冷却プール型	濃縮U軽水減速冷却プール型
燃料(濃縮度) 芯材/被覆材	棒状(U18%、Pu16~21%) MOX/SUS316	被覆粒子燃料(3~10%) UO ₂ /炭化珪素	板状(20%) U ₃ Si ₂ -Al/Al	板状(20%) U ₃ Si ₂ -Al/Al	板状(20%) U ₃ Si ₂ -Al/Al	板状(20%) U ₃ Si ₂ -Al/Al
炉心寸法	直径:約0.8m 高さ:約0.5m	直径:約2.3m 高さ:約2.9m	直径:約0.4m 高さ:約0.75m	直径:約0.6m 高さ:約0.75m	縦横:約0.5m 高さ:約0.6m	直径:約0.7m 高さ:約0.6m
冷却材(一次冷却材出口温度)	液体金属ナトリウム(約500℃)	ヘリウムガス(約840℃)	軽水(約50℃)	軽水(約30℃)	軽水(45℃)	軽水(約28℃)
冷却材圧力	約0.5MPa	4MPa	約1.5MPa	大気圧	大気圧	最高1kg/cm ₂
冷却方法	強制循環冷却	強制循環冷却	強制循環冷却	強制循環冷却	強制循環冷却	強制循環冷却

炉型	水冷却炉等							
	低出力炉(500kW未満)		臨界実験装置					
炉名	NSRR	近畿大学原子炉	FCA	TRACY	STACY	TCA	NCA	KUCA
熱出力	300kW	1W	2kW	10kW	200W	200W	200W	100W
炉型	濃縮U水素化ジルコニウム減速プール型	濃縮U軽水減速黒鉛反射非均質型	濃縮U・Pu燃料水平二分割型	U溶液燃料タンク型	U・Pu濃縮燃料タンク型	濃縮U・Pu燃料軽水減速型タンク型	低濃縮U軽水減速タンク型	濃縮U非均質型
燃料(濃縮度) 芯材/被覆材	棒状(20%) U-2rH/SUS304	板状(90%) U-Al/Al	板状95%未満)U、Pu、天然U、劣化U	溶液燃料(10%)	溶液燃料(4、6、10%) 棒状(約5%)	棒状(~3.2%) UO ₂ 、PuO ₂ -UO ₂ /Al	棒状(1~4.9%) UO ₂ /Al	角形、湾曲型(46、93%) U-Al
炉心寸法	直径:約0.6m 高さ:約0.4m	約1.4×1.1m 高さ:約1.5m	約2.8×2.8m 横2.6m	直径0.5、0.8m 高さ:約0.6m	直径:約0.6m 高さ:約0.6m	直径:約1.8m 高さ:約2.1m	直径:約1.8m 高さ:約2m	約1.6×1.6m 高さ約1.5m、直径約50cm 高さ80cm
冷却材(一次冷却材出口温度)	軽水(約35℃)	冷却系なし	冷却系なし	冷却系なし	冷却系なし	冷却系なし	冷却系なし	冷却系なし
冷却材圧力	大気圧	冷却系なし	冷却系なし	冷却系なし	冷却系なし	冷却系なし	冷却系なし	冷却系なし
冷却方法	原子炉プールの自然循環による熱除去	冷却系なし	冷却必要なし	冷却系なし	冷却系なし	冷却系なし	冷却系なし	冷却系なし

2. 研究炉に係る型式及び出力毎の機能、事故時影響の比較[34]

設計基準を超える事象が想定される研究炉については、国際基準[33]も参考に、災害の防止上の観点から対策を要求する（ただし、低出力炉（500kW未満）については、設計基準を超える事象を想定した設備対応は必要としない）ことが検討されている[29, 34]。

炉型		ナトリウム冷却炉	ガス冷却炉	水冷却炉等		
				高出力炉（10MW以上、50MW以下）	中出力炉（500kW以上、10MW未満）	低出力炉（500kW未満）
一次系	最高使用温度	常隔 出口500°C(140MW)	HTTR 出口950°C(30MW)	JMTR（50MW） 入口約49°C JRR-3(20MW) 43°C	KUR(5MW)55°C JRR-4（3.5MW）60°C	NSRR(300kW)60°C NCA(200W)80°C 近大炉(1W)10~30°C FCA(2kW)40°C TCA(200W)80°C KUCA(100W)80°C
	圧力	約0.5MPa	4MPa	JMTR 約1.5MPa JRR-3 大気圧	大気圧	大気圧
冷却機能		強制冷却	強制冷却	強制冷却	強制冷却	低出力炉：冷却不要又は自然循環 臨界実験装置：冷却不要
電源機能喪失時の影響	原子炉	自然循環により燃料の健全性は維持	自然対流により燃料の健全性は維持	自然対流により燃料の健全性は維持	自然対流により燃料の健全性は維持	NSRR：自然対流により燃料の健全性は維持 NCA、近大炉、FCA、TCA、KUCA：冷却不要
	使用済燃料プール	3.5ヶ月後に冠水が換なわれる	・原子炉建屋内：33日後に収納ラックが損傷※1 ・使用済燃料貯蔵建屋内（空冷）：28日後に収納ラックが損傷※1	JMTR：燃料の健全性維持 JRR-3：43日後に冠水が換なわれる	燃料の健全性維持	NSRR：燃料の健全性維持 NCA、近大炉、FCA、TCA、KUCA：冷却不要
全機能喪失時の影響		大	大	大	大	NSRR(0.5mSv)、 NCA(0.2mSv)、 近大炉(0.09mSv)、 FCA(1.7mSv)、 TCA(0.05mSv)、 KUCA(0.41mSv) STACY※2 TRACY※2

※1 現時点では使用済燃料は保管されていない。

※2 STACY及びTRACYは燃料全量が瞬時に炉室内に漏えいし、一切の閉じ込め機能を期待しない、非現実的な条件での評価値はそれぞれ5mSv超であるが、仮想事故の評価ではそれぞれ8μSv、0.4mSv