

もんじゅサイトを活用した新たな
試験研究炉に関する調査

委託業務成果報告書

令和2年3月
公益財団法人 原子力安全研究協会

本報告書は、文部科学省の委託業務として、公益財団法人原子力安全研究協会が実施した令和元年度「もんじゅサイトを活用した新たな試験研究炉に関する調査」の成果を取りまとめたものです。

目次

1. はじめに	1
2. 試験研究炉の概念設計実施に向けた調査.....	3
2.1 候補となり得る炉型の具体的な仕様等の検討	3
2.1.1 概要	3
2.1.2 臨界実験装置.....	5
2.1.3 低出力炉	6
2.1.4 中出力炉	7
2.1.5 パルス炉	9
2.1.6 スペクトルシフト炉.....	11
2.1.7 革新炉開発炉.....	12
2.1.8 燃料調達、使用済燃料の処理等の検討.....	13
2.1.9 試験研究炉の主な利用	15
2.1.10 主要設備のレイアウト及びもんじゅサイトの配置.....	20
2.2 技術課題、建設費等の検討.....	31
2.2.1 技術課題.....	31
2.2.2 建設費、運転費	32
3. 原子力研究や人材育成を支える基盤となる中核的拠点化に向けた運営のあり方に関する 検討.....	34
3.1 規模別・目的別の運営・連携の在り方	34
3.1.1 運営・連携における主な利用目的	34
3.1.2 規模及び目的ごとの運営・連携の基本的な在り方.....	34
3.1.3 運営・連携における人員及び費用に関する想定目標の設定	35
3.2 想定される運営主体の調査.....	35
3.3 国内利用実績	37
4. 試験研究炉の建設開始に必要なとなる諸事項の調査.....	43
4.1 国内における試験研究炉の規制に関する調査	43
4.1.1 試験炉設置許可基準規則.....	43
4.1.2 試験炉設置許可基準規則に対する既設の試験研究炉の対応状況	43
4.1.3. もんじゅサイトに設置する試験研究炉のサイト条件	43
4.2 試験研究炉のニーズの整理.....	47
4.2.1 ニーズ調査の概要と試験研究炉の利害関係者のニーズの目標.....	47
4.2.2 試験研究炉のニーズの詳細	48
4.2.3 概念設計や運営体制への反映	51

4.3 経済性評価に関連した項目の評価	52
4.3.1 概要	52
4.3.2 試験研究炉における投資額や収支の概要	53
4.3.3 経済性評価の今後の展開.....	54
4.4 人材育成のツールの考察	55
4.4.1 試験研究炉を中核にした人材育成のためのツールの考察	55
4.4.2 熱水流動装置による人材育成や研究開発ニーズ.....	55
4.4.3 旧 AREVA 社の熱流動装置の概要.....	55
4.4.4 日本原子力学会「熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ」にみる課題	56
4.4.5 国内の熱流動装置	56
5. まとめ.....	57

図目次

図 2-1 臨界実験装置（固体減速）の例.....	6
図 2-2 低出力炉の概要.....	7
図 2-3 中出力炉概念（KUR の例）.....	8
図 2-4 炉心構成の例.....	8
図 2-5 パルス炉の概要.....	10
図 2-6 パルス発生機構.....	10
図 2-7 スペクトルシフト炉の中性子スペクトル解析例.....	12
図 2-8 大型照射試験炉.....	12
図 2-9 HP 冷却小型炉による中性子ビーム利用研究施設.....	13
図 2-10 臨界実験装置+加速器の配置案.....	22
図 2-11 低・中出力炉配置案.....	24
図 2-12 低・中出力炉配置案フロア図.....	25
図 2-13 臨界実験装置を山側資材置場に設置する場合の配置検討図（ケース A）.....	29
図 2-14 低・中出力炉を山側資材置場に設置する場合の配置検討図（ケース C）.....	30
図 3-1 運営主体ならびに事業関係者による取り組みの流れ（想定）.....	37
図 3-2 KUCA の炉物理実験教育参加者推移.....	39
図 3-3 原子炉実習参加数（学生）の推移.....	39
図 3-4 共同利用研究の採択課題数の推移.....	39
図 3-5 複合原子力科学研究所における共同利用実績.....	40
図 3-6 JRR-3 の利用実験課題の公募・審査制度.....	40
図 3-7 JRR-3 のビーム利用年度推移と 2010 年度の利用者分布.....	41
図 3-8 JRR-3 によるビーム利用分野（2010 年度）.....	41

表目次

表 2-1 もんじゅサイトを活用した新たな試験研究炉概要.....	4
表 2-2 世界の連続パルス炉.....	9
表 2-3 核物質防護区分.....	14
表 2-4 試験研究炉の主な利用分野.....	18
表 2-5 試験研究炉の主要設備の比較.....	21
表 2-6 もんじゅサイトにおける試験研究炉の配置検討結果.....	28
表 2-7 技術課題.....	32
表 2-8 試験研究炉の建設費及び運転費概算.....	33
表 3-1 規模別・目的別の運営・連携の在り方.....	35
表 3-2 運営主体の担うべき業務と計画策定の役割分担.....	36
表 3-3 国内試験研究炉の利用実績.....	38
表 4-1 もんじゅサイトの試験研究の設計・評価で考慮すべきサイト条件（試験炉設置許可基準規則の主な関係条項）.....	45
表 4-2 試験研究炉の利用ニーズの概要.....	49
表 4-3 人材育成対象規模.....	51
表 4-4 試験研究炉の投資及び年経費、収入等の項目.....	53
表 4-5 旧 AREVA 社の目指す熱流動装置の機能.....	56

1. はじめに

平成 28 年末に決定された政府方針（「もんじゅ」の取扱いに関する政府方針）において、「もんじゅ」については原子炉としての運転再開はせず、今後、廃止措置に移行することが決定した。一方で、将来的には「もんじゅ」サイトを活用し、新たな試験研究炉を設置することで、もんじゅ周辺地域や国内外の原子力関係機関・大学等の協力も得ながら、我が国の今後の原子力研究や人材育成を支える基盤となる中核的拠点となるよう位置付けることが決定された。

本調査は、上記方針に基づきもんじゅサイトを活用した新たな試験研究炉について、外部有識者で構成する委員会の提言を得つつ調査検討を行ってきており、今年度で 3 年目となる。これまでの調査の概要は以下のとおりである。

1 年目（平成 29 年度）は、国内外の試験研究炉の現状と利用動向、国内外の運営体制及び立地サイトの予備的調査等全体的な調査を行った。

国内外とも半数を超す試験研究炉が老朽化や改造等により停止している。現状では約 220 基が運転中であり、各国や地域における原子力研究開発や人材育成のインフラ施設として利用されている。

我が国においても 29 基の試験研究炉が建設されたが、運転継続は 8 基のみであり研究活動の低下の懸念や老朽化対策、規制対応及びセキュリティ対応等の負担が増大し、継続的な財源確保等も急務の課題となっている。試験研究炉は原子力・放射線に関連した科学技術の向上や発展に寄与する必要不可欠な基盤的研究施設と位置付けられており、学術、産業、医療、エネルギー、人材育成等多岐にわたる利用ニーズがあることが確認された。

また近年、欧米での試験研究炉の運営体制については、大学、研究機関、産業界が役割や目的を明確にしてプラットフォームやコンソーシアムを構成し、公的機関の支援や海外の協力を得て自立かつ事業経営的な要素を付加して活動をしている。

立地サイトの予備的調査では、設置可能性のある候補地を複数箇所選定し、その地質調査や立地条件についての情報収集等を行った。

2 年目（平成 30 年度）の調査では、前年度の調査を踏まえ、国内外の原子力を取り巻く状況、求められる試験研究炉のニーズ調査、試験研究炉の運営体制の検討、試験研究炉の建設開始に必要な諸事項の調査の 4 項目を実施した。

原子力を取り巻く状況調査では、次世代炉や SMR（Small Modular Reactor）の開発を目指して新規の計画を発表している米国へ現地視察を行い、多目的試験炉（VTR: Versatile Test Reactor）建設計画や試験研究炉を利用した事故耐性燃料の試験、高経年化対策、大学での Si ドーピング等のサービス事業等、今後の参考になる多くの情報が得られた。

求められる試験研究炉の学術利用、産業利用、人材育成に関するニーズについては、地元や関西・中部地域の大学、国内の企業や研究機関（約 20 社、約 70 名）を訪問し対面調査を行った。学術利用ニーズは原子炉工学の基礎的研究から医療分野まで多岐にわたり、産業利用ニーズでは中性子散乱が多く、次いでラジオグラフィ及び放射化分析であり、トライアルユースや利用上の要望も多く、今後の制度設計の上で参考となる。人材育成ニーズについては、欧米でも原子力人材が増加傾向にあり、熱流動装置、シミュレータの利用や遠隔教育等との組み合わせで総合的な教育・訓練が実施されている。

また、運営体制の面では、想定される運営主体（研究機関、大学）や利用組織との対面調査により、安定した経営基盤の確保やマネジメントの重要性、施設管理者や利用者を支援するコーディネータ等の人材確保等課題が明確になった。

試験研究炉の建設開始に必要な諸事項の調査では、サイトスペースから有力な候補場所 2箇所を選定した。いずれも活断層等の地質調査を最優先で実施する必要があること及び土木工事の規模が大きく、大量の残土処分場所の確保が課題であることが新たに明確になった。

さらに、建設費を推定するために海外でのここ 10 年ほどの試験研究炉の建設実績から、国内の建設時に試算が可能な近似的な算定式を示すとともに、もんじゅサイトに設置する試験研究炉として 6 つの炉型（臨界実験装置、低出力炉（一定出力、パルス）、中出力炉、スペクトルシフト炉、高出力炉）を提案した。

以上の検討経緯を踏まえ、今年度は 2020 年度に概念設計に着手することを前提として、以下の項目について調査を実施した。

(1) 試験研究炉の概念設計実施に向けた調査

- ・各炉型の仕様、主な利用、レイアウト、技術課題、建設費

(2) 運営の在り方に関する検討

- ・規模別目的別の運営体制、国内利用実績

(3) 試験研究炉の建設開始に必要な諸事項の調査

- ・試験研究炉の規制に関する調査、ニーズの整理、経済性評価項目、人材育成ツール

なお、今年度の検討体制については、より専門的な調査を実施するため外部有識者委員会（添付資料 1 参照）の下に「概念検討タスクフォース」と「利用運営タスクフォース」の 2 つのタスクフォースを設置し、「概念検討タスクフォース」では(1)を、「利用運営タスクフォース」では(2)、(3)を主に検討した。

本報告書は、今年度実施した各調査項目の具体的な調査内容及び調査結果及び今後の課題等についてとりまとめたものである。

2. 試験研究炉の概念設計実施に向けた調査

2.1 候補となり得る炉型の具体的な仕様等の検討

2.1.1 概要

我が国の既存試験研究炉（KUR、JRR-3等）との棲み分け、今後の原子力開発の動向（次世代炉開発等）とともにもんじゅサイトの敷地の制約等を踏まえ、臨界実験装置、低出力炉、中出力炉、パルス炉、スペクトルシフト炉及び革新炉開発炉の6つのタイプを想定した。

表2-1に想定した6タイプの試験研究炉について、その特徴、型式、中性子束、実験設備、主な利用、燃料及び建設費（含土木工事費）の概要を示す。表中のパルス炉、スペクトルシフト炉及び革新炉開発炉は、概念設計に先立って技術開発が必要な研究炉として整理した。なお、型式についてはIAEAの研究炉データベースの型式分類に従った。

主な利用の中で人材育成については全てのタイプの研究炉で行われるが、臨界実験装置の場合、出力が小さいことや原子炉の起動・停止を随時行えることから、一般学生や専門学生を対象とした核特性（反応度、制御棒の反応度値、出力分布等）に関する教育に優れている。他のタイプの研究炉については、その原子炉の利用に係る技術、研究が人材育成の主体となる。さらに、研究炉の設計・建設は原子力技術の継承、技術者育成に大きく寄与する。

臨界実験装置は、熱中性子から高速中性子にわたる幅広いエネルギー領域の炉物理基礎研究、核データの取得、加速器との併用による加速器駆動システム（ADS：Accelerator Driven System）研究の拠点となる出力数kW以下の空冷の実験装置である。

低出力炉は、燃・材料の中性子照射影響に関する基礎研究と複合環境下照射損傷研究等の原子炉工学実験用で出力500kWの自然対流軽水冷却炉である。

中出力炉は、中性子散乱実験等中性子ビーム利用を主たる目的とする強制対流軽水冷却炉である。出力はKURの2倍程度（最大10MW程度）とし、JRR-3やJ-PARC等と連携して中性子利用研究の一翼を担う。また、小径垂直実験孔によりRI製造、放射化分析、小型試験片の照射試験にも対応できる。

パルス炉は、中性子散乱実験の萌芽研究を主たる目的とするベース出力250kWの強制対流軽水冷却連続パルス炉であり、回転型のパルス発生機構で連続パルスを発生する。中性子ラジオグラフィは静止画像に限定される。

スペクトルシフト炉は、出力2MWの強制対流軽水冷却炉で、高速中性子から熱中性子まで広範な中性子スペクトル場を構成する。高速中性子場は将来の高速炉開発を視野に炉物理研究、照射基礎研究等に利用する。また、熱中性子場は中性子散乱実験、中性子ラジオグラフィ、RI製造開発等に利用する。

革新炉開発炉は、多種多様な革新炉開発に資するもので、革新炉開発炉の一つはナトリウム冷却照射試験炉であり、高速中性子場で燃・材料の開発、安全研究を目的とする。本炉は、米国で2026年を目標に開発中であるVTRに相当する100MWの大型照射試験炉である。また、もう一つはヒートパイプ（HP）で冷却する小型の実験炉であり、中性子ビームを取り出して基礎研究に利用できる。

それぞれ各炉の概念検討結果を次項以降で述べる。また、その詳細な仕様等のデータを添付資料2-1~2-5に示す。

表 2-1 もんじゅサイトを活用した新たな試験研究炉概要

	臨界実験装置	低出力炉	中出力炉	パルス炉	スペクトルシフト炉	革新炉開発炉	
						大型照射試験炉	HP 冷却小型炉
特徴	炉物理、加速器による核変換実験、炉心変更が容易な構造 数 kW 以下	基礎的な燃・材料照射による原子炉工学実験 500kW	中性子ビーム利用 ～10MW	パルスを利用したビーム実験 (定常出力 250kW) 最大パルス出力 約 30MW	高速～熱中性子場による炉物理実験 2 MW	高速中性子場 大型照射試験炉 100MW	中性子ビーム実験を兼ねた 小型実験炉 ～40MW
型式	臨界実験装置 自然通風 (空冷)	プール型 自然対流軽水冷却	プール型 強制対流軽水冷却	プール型 強制対流軽水冷却	プール型 強制対流軽水冷却	タンク型 Na 冷却	タンク型 HP 冷却
中性子束 n/cm ² /s	熱 ; ~10 ⁹ 高速 ; ~10 ⁹	熱 ; ~10 ¹³ 高速 ; ~10 ¹³	熱 ; ~10 ¹⁴ 高速 ; ~10 ¹³	熱 ; 10 ¹⁴ ~10 ¹⁵ (最大パルス出力時)	熱 ; ~10 ¹³ 高速 ; ~10 ¹⁴	高速 ; ~10 ¹⁵	熱 ; ~10 ¹⁴ (期待値)
実験設備	ADS 用加速器、サンプル温度調整装置、微小反応度測定装置類、RI 利用設備、放射化分析装置	水力 (気送) ラビット、キャプセル、小規模 PIE 施設、中性子ラジオグラフィ、ループ型環境制御照射装置	水力 (気送) ラビット、キャプセル、中規模 PIE 施設、中性子ビームポート、中性子ラジオグラフィ	水力 (気送) ラビット、キャプセル、小規模 PIE 施設、中性子ビームポート、中性子ラジオグラフィ	炉内照射孔、水力 (気送) ラビット、キャプセル、中規模 PIE 施設、中性子ビームポート、中性子ラジオグラフィ	水力 (気送) ラビット、キャプセル、ループ照射施設、大規模 PIE 施設	中性子ビームポート
主な利用	ADS 開発、炉物理基礎研究、核データ研究、新型炉核特性評価、検出器開発、人材育成	複合環境下照射損傷基礎研究、核データ取得、放射化分析、ラジオグラフィによる静止画像撮影、短寿命 RI 製造と RI 開発、人材育成	中性子散乱実験、ラジオグラフィによる動画像撮影、複合環境下照射損傷基礎研究、核データ取得、放射化分析、RI 製造と RI 開発、人材育成	中性子散乱実験萌芽研究、放射化分析、ラジオグラフィによる静止画像撮影、RI 開発、人材育成	高速～熱中性子の核データ取得、燃・材料照射基礎研究、中性子散乱実験、ラジオグラフィによる動画像撮影、短寿命 RI 製造と RI 開発、人材育成	燃・材料照射試験 (実証試験と安全研究)、RI 製造、人材育成	HP 冷却小型炉実証試験、中性子ビーム利用研究、人材育成
燃料	低濃縮金属燃料、 U-Mo	U ₃ Si ₂	U ₃ Si ₂	U-ZrH	U ₃ Si ₂	LEU-Pu	低濃縮 UO ₂ 又は UN
建設費 (含土木 工事費)	240 億円	250 億円	540 億円	240 億円	400 億円	2,500 億円	未定

2.1.2 臨界実験装置

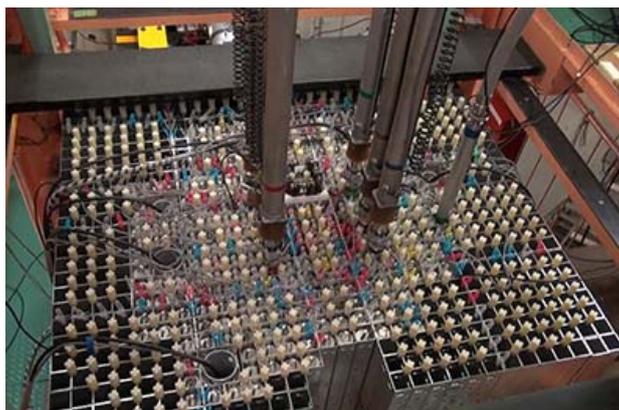
臨界実験装置は、炉心構成の変更や設備の追加・改造が比較的容易であるといった特徴を有する。そのため、同装置を用いる基盤研究は、核データ・計算コード検証のためのベンチマーク実験、ADSを用いた分離変換技術による高レベル放射性廃棄物の減容化研究、次世代炉の開発等に重要な役割を担う。また、人材育成のツールとして、炉心構成、原子炉の運転、運転データの収集・分析、原子炉施設の管理までを一貫して実体験できる研究炉であり、原子力に携わる技術者・研究者の育成に役立つものである。

また、日本原子力学会炉物理部会から、次世代炉物理実験施設に求められる機能として、炉心の模擬性を確保できる臨界実験装置が望ましいとの提言¹⁾がなされている。本検討では、固体燃料や模擬物質（プラスチック）の使用により KUCA(熱中性子炉)や FCA(高速炉)の両機能を継承しつつ、広範囲な中性子スペクトルに対応できる臨界実験装置を候補とした。

さらに、併設する加速器は、陽子加速器（京都大学の FFAG のアップグレード、大阪大学のサイクロトロン等）又は電子線加速器（LINAC）を想定し、未臨界度測定の高性能化、未臨界状態での反応度値測定や、核破砕用ターゲット材の核特性評価の要素技術開発にも貢献できる。

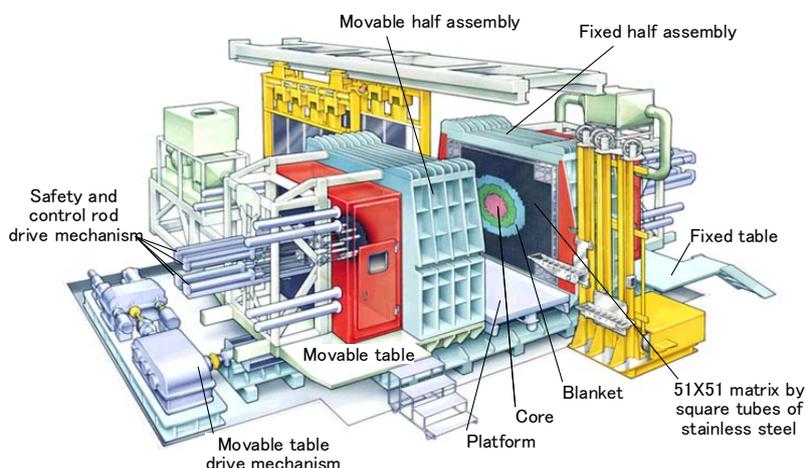
JAEA の核変換物理実験施設（TEF-P：Transmutation Physics Experimental Facility）計画で検討されている ADS の部分模擬実験には、相当量(数十 kg)のマイナーアクチノイド（MA）及び MOX 燃料の使用が前提で、核セキュリティ、放射線防護、冷却方式等の対策が必要である。また、燃料調達、設備対応、運用管理等に関連したコストが大幅に増大することが予想されるので、燃料の取扱量は、予算、燃料調達、規制対応等に応じて段階的に増やしていくことを想定し、運用初期は少量サンプルを用いた実験から開始することとした。そのため、本検討における建設費の評価では、MA 及び MOX 燃料の調達費は対象外とした。

臨界実験装置の概念は、図 2-1 に示した既存の KUCA(垂直型式)又は FCA(水平型式)のいずれかの型式を採用する。炉心構成として燃料と固体減速材の組合せを変えることで、実験に応じて中性子スペクトルを可変とする。



京都大学複合原子力科学研究所 HP より

KUCA(垂直型式)



JAEA 原子力科学研究所 HP より

FCA(水平型式)

図 2-1 臨界実験装置（固体減速）の例

2.1.3 低出力炉

国内では JMTR が廃止に移行し、海外ではハルデン炉（HBWR）の廃止措置も決定され、軽水炉の高度化、安全研究に関して大きく寄与してきた重要な照射試験炉が失われた。しかし、現行軽水炉の高度化や安全研究、次世代炉開発のための照射試験炉の必要性は高い。低出力炉は出力密度が小さい（低中性子束）ため、燃・材料の実証試験はできないが、これらの中性子照射損傷メカニズム解明には有効である。本炉は 500kW の自然対流軽水冷却で多くの垂直実験孔を有する試験研究炉である。図 2-2 に低出力炉の概要を示す。炉心は、四角形の下部格子板に燃料要素、反射体要素、制御棒案内管を挿入して構成する。人材育成については、燃・材料の照射試験、中性子ラジオグラフィ、放射化分析、RI 製造の利用を通して、原子力専攻の学生の OJT や、原子力関係技術者の訓練に供することが出来る。

炉内照射試験は反射体要素に設ける垂直実験孔に温度等の照射環境を制御できるキャプセルを

装荷して行う。プールサイドファシリティにはループ型環境制御照射装置が装荷され、温度圧力等の環境を制御した条件下での燃料の過渡試験、燃・材料の水化学に関するその場試験を行う他、短寿命の RI 製造、放射化分析に活用される。グラファイト反射体には中性子ビーム導管を挿入し、中性子ラジオグラフィに供するが、ビーム強度が小さいため静止画像のみとなる。

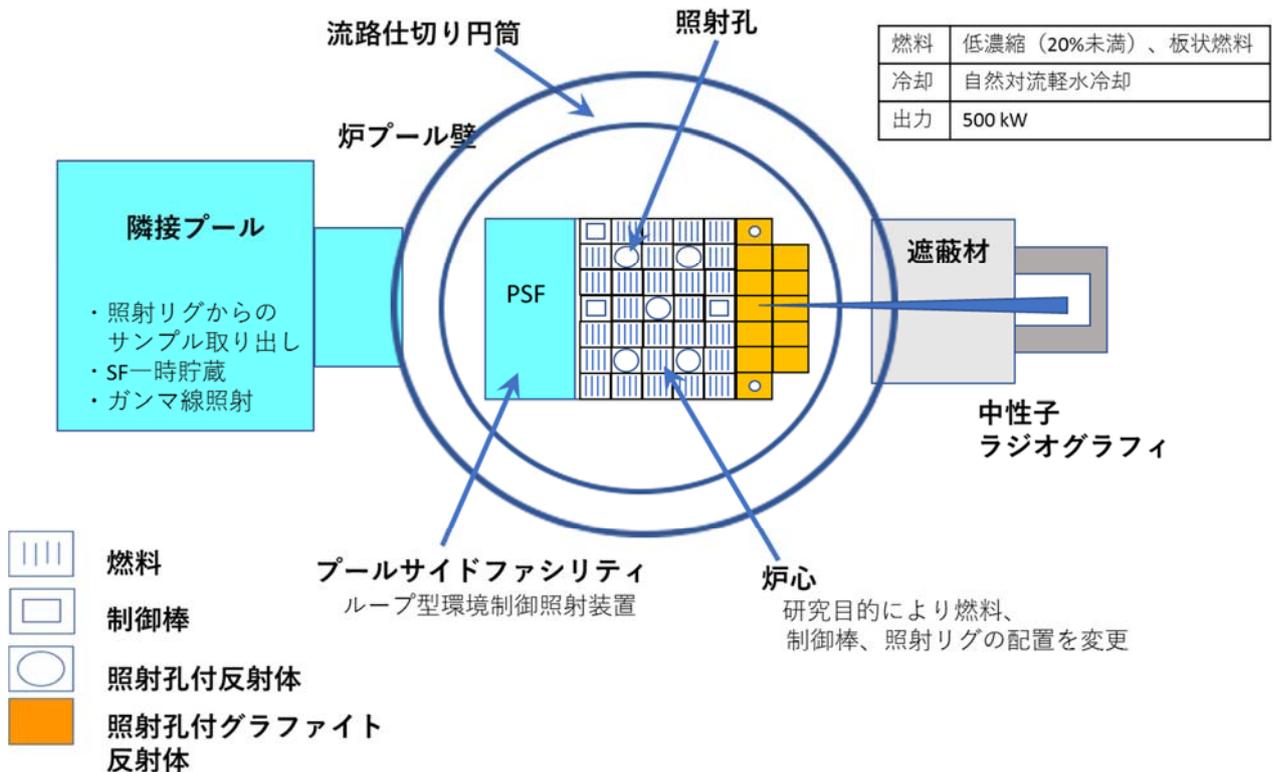


図 2-2 低出力炉の概要

2.1.4 中出力炉

この試験研究炉は、京都大学複合原子力科学研究所に設置されている KUR (5MW) が米国への使用済燃料返還期限から運転継続が困難になる状況を鑑み、その後継試験研究炉としての役割を果たすことを想定して検討したものである。図 2-3 に KUR の炉心断面図 (左)、炉心図 (右) を示す。

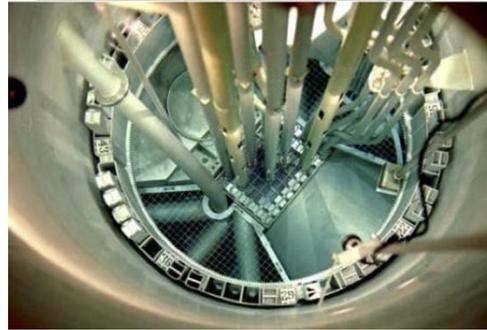
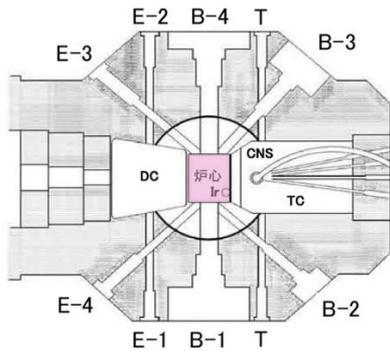
原子炉は、立地サイトの制約を踏まえて最大 10MW 程度の出力とし、JAEA の JRR-3 等と同様なプール型の軽水冷却とする。燃料は当初 U_3Si_2 燃料を想定するが、他炉での実績を踏まえてウラン密度が高い低濃縮 U-Mo 燃料とする。反射体の材料構成を工夫し、利用目的に合致した中性子スペクトルを形成できるようにする。概念検討の例として、図 2-4 (左) に示すように反射体領域にベリリウム、重水及びアルミニウムを配置した結果、図 2-4 (右) に示すように熱中性子あるいは高速中性子スペクトルが優勢となる場が各々の領域で形成できる。

学術利用として中性子散乱、中性子ラジオグラフィ、放射化分析、生物照射、機器開発等の分野の先進的な研究を目指して、冷中性子を含めた多数の中性子ビームライン、可動式垂直照射孔、輸送ラビット、炉内照射環境制御装置、陽電子発生装置等を設置する。また、中性子ビーム利用分野では JRR-3、J-PARC や放射光施設と連携し調和的に研究利用を図る。

運転は、1～2 週間の連続運転により原子炉利用の稼働率向上を図り、研究者の利用機会と自由度の確保を目指す。

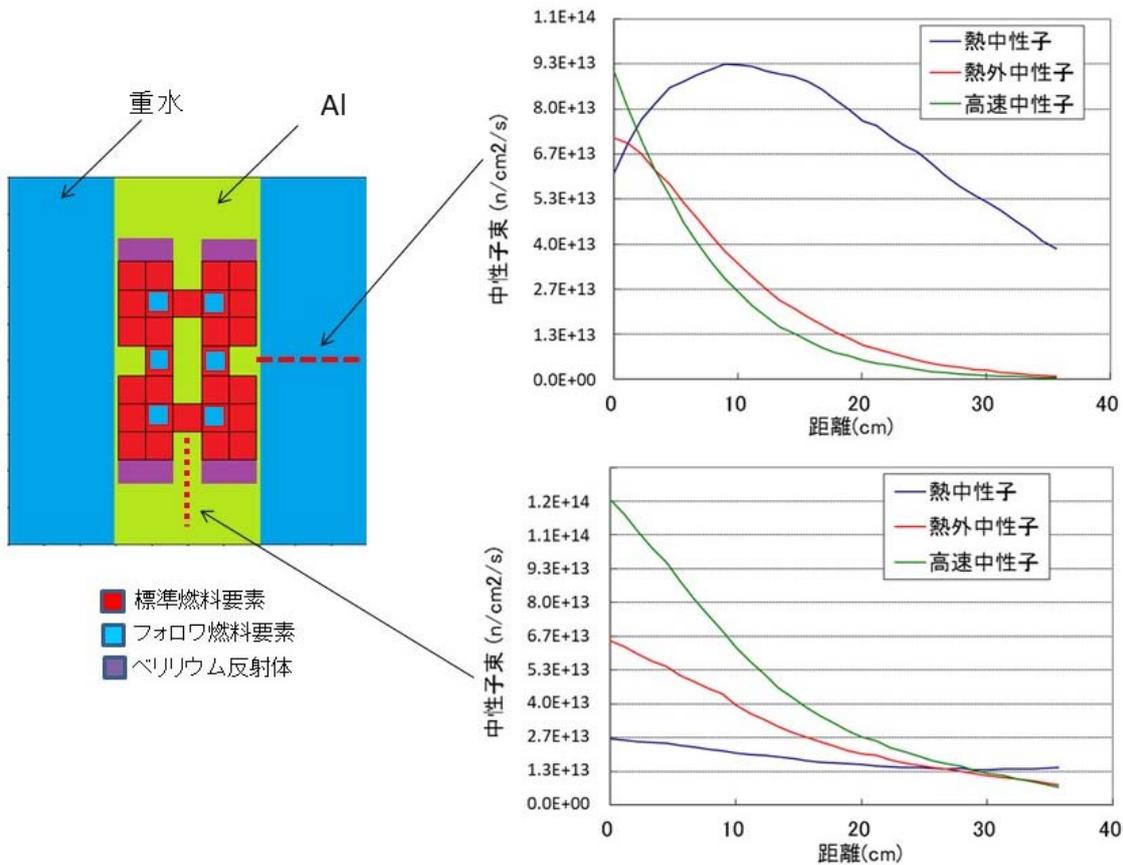
これら原子炉や中性子ビームの特徴を活かして、次世代の研究者育成や他の産業分野の人材参入機会の提供等を図り、教育・人材育成に利用する。

なお、今後の設計検討に際しては、KUR や JRR-3 等先行炉の経験と教訓を活かすことが重要である。また、前述の反射体構成変更による中性子スペクトル変更等、開発要素を少なくしつつも将来の研究利用の幅を広げる工夫も必要である。



試験研究用原子炉施設耐震安全性評価妥当性確認 WG より

図 2-3 中出力炉概念 (KUR の例)



(右上図：重水を透過し熱中性子成分が多い。右下図：アルミニウムを透過し高速中性子成分が多い。)

図 2-4 炉心構成の例

2.1.5 パルス炉

中性子散乱実験を主たる目的とする連続パルス炉である。中性子散乱実験を目的とする試験研究炉は我が国の JRR-3、オーストラリアの OPAL 等で優れた成果を出しているが、パルス炉は中性子散乱実験及び中性子ラジオグラフィの萌芽研究、設計・開発した実験装置のトライアルコースとして JRR-3 との連携によりこれらの研究のイノベーションに貢献できる。

現在世界で活用されているパルス炉は 23 基あるが²⁾、連続パルス炉は、表 2-2 に示す 4 基がある³⁾。ロシアの IBR-2M はナトリウム冷却で他の 3 基は軽水冷却である。

候補として検討したパルス炉は原子炉システムの簡略化を優先して軽水冷却型とした。表中、ピークの中性子束は中性子ビーム導管を挿入する位置の減速材領域の値である。

表 2-2 世界の連続パルス炉³⁾

		TRIGA2 オーストリア	IBR-2M ロシア	FRMZ ドイツ	SNI, IR-100 南アフリカ
初臨界		1962/3/7	1978/12/15	1965/8/3	1967/4/18
出力	ベース	250 kW	2 MW	100 kW	200 kW
	ピーク	250 MW	1,830 MW	250 MW	5,000 MW
中性子束	ベース	熱 1.0×10^{13}	熱 1.0×10^{13}	熱 4.2×10^{12}	熱 5.4×10^{12}
		高速 1.7×10^{13}	高速 1.5×10^{14}	高速 4.8×10^{12}	高速 6.2×10^{12}
	ピーク	熱 1.0×10^{16}	熱 1.0×10^{16}	熱 1.0×10^{16}	—
		高速 1.7×10^{16}	高速 2.6×10^{17}	高速 1.2×10^{16}	—
冷却材		軽水	Na	軽水	軽水
減速材		軽水、ZrH	軽水	軽水、ZrH	軽水

図 2-5 に検討したパルス炉の概要を示す。炉心は下部格子板に燃料、反射体、制御棒を挿入して燃料領域を構成し、燃料領域の外側には黒鉛の減速材を配置する。中性子散乱実験用及び中性子ラジオグラフィ用中性子導管は黒鉛減速材中に合わせて 6 本挿入する。パルス発生機構は炉心中央部に装荷する。

中性子パルスの発生機構は図 2-6 に示すように⁴⁾、原子炉に正負の反応度を加える非吸収材又は燃料と中性子吸収材を交互に貼り付けた円盤をステッピングモーターで回転することによって連続パルスを発生する。中性子パルスについては、燃料の安全性確保のために中性子パルスのピーク出力とパルス間隔を適切に制御する必要があるが、その特性は概念設計における核熱計算と完成後の特性試験で確認する。

中性子ラジオグラフィは、産業利用のためにはできるだけ大口径のビームが必要であるがビーム強度との関係で口径を決定する。なお、冷中性子源はラジオグラフィの高度化に寄与するものとして設置した。

燃料については、燃料が高温になったときに負の反応度が加わる自己制御性を持つ低濃縮 (20%) U-ZrH を使用する。

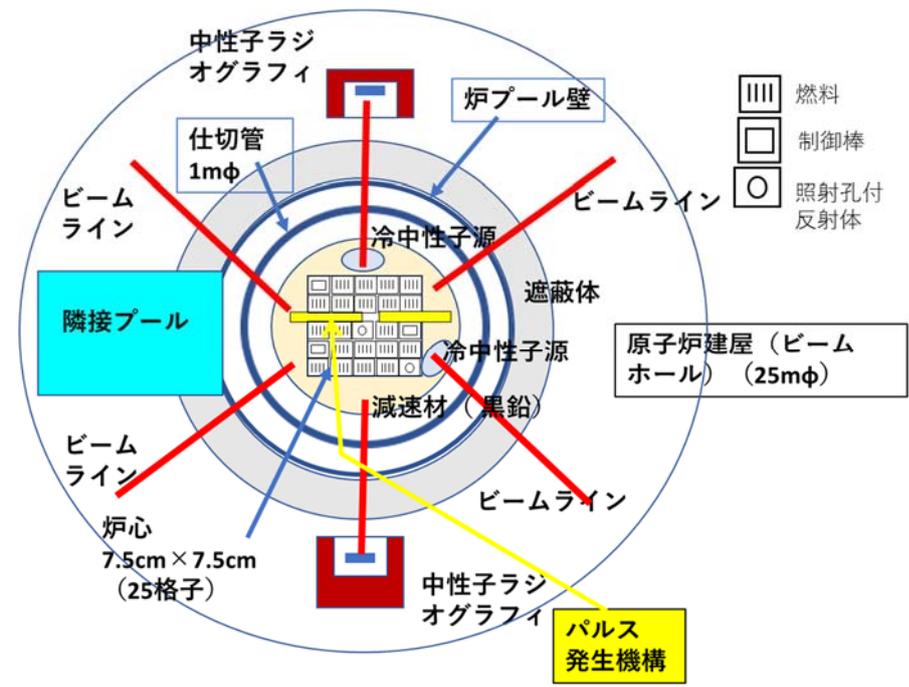


図 2-5 パルス炉の概要

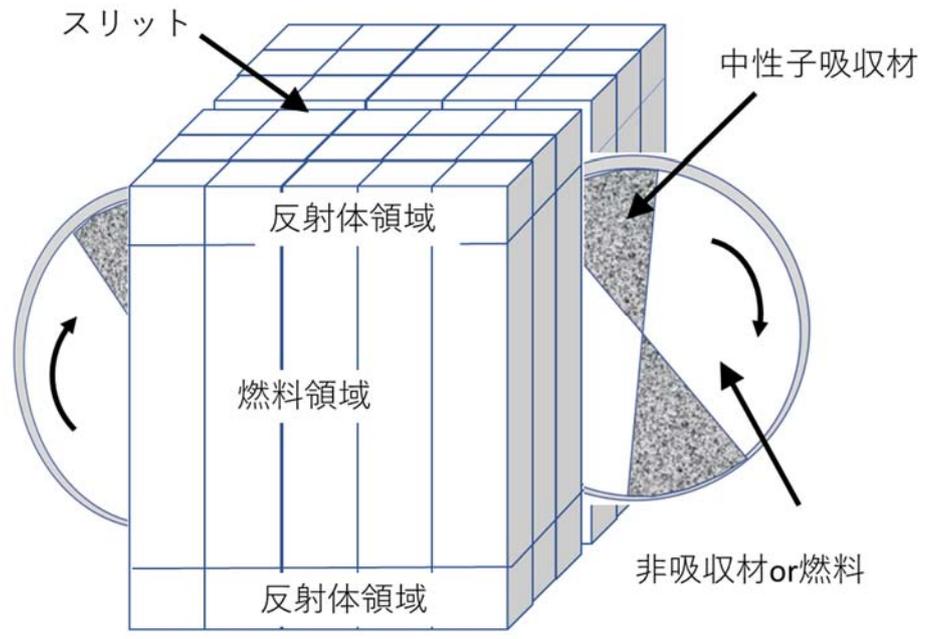


図 2-6 パルス発生機構 4)

2.1.6 スペクトルシフト炉

この試験研究炉の概念は地元大学の研究成果に基づいて提案された概念である。高速中性子から熱中性子まで幅の広いスペクトル場が同じ原子炉内に存在する試験研究炉概念である。炉心部に中性子スペクトルの異なる領域を設け、高速中性子領域は MA 核種の核データ、高速炉特性等の炉物理基礎研究や材料照射影響研究等に利用し、将来の高速炉研究開発に貢献する。同時に、炉内外の熱中性子は照射や中性子ビームとして利用する。

高速中性子場を提供する候補として、ナトリウム冷却炉、ガス冷却炉、低減速炉について検討した。ナトリウム冷却炉は「常陽」があること、ガス冷却炉はイタリアの TAPIRO (5kW) や東京大学弥生炉 (2kW) のように出力が小さく利用範囲が限定されること、低減速炉は MOX 燃料を利用した沸騰小型軽水炉 (RBWR) 等が提案されているが開発段階であることから除外した。従って、以下の予備検討結果から水プール型の炉とした。

炉心概念の成立性を見通すため板状燃料を用いた水冷却炉について、炉心構成と臨界性及びスペクトル特性の予備検討を行った。この検討では、JMTR の板状燃料を参考に燃料密度と板状枚数をパラメータとして解析した結果、燃料を稠密化することで高速中性子の卓越するスペクトルが得られることを確認した (図 2-7 右図)。この結果を踏まえて構築したスペクトルシフト炉の炉心構成例を図 2-7 左図に示す。稠密燃料領域で主に高速中性子場を形成し、炉心外周部は標準的な燃料で取り囲み、必要な反応度確保と出力分布の適正化を図る。高速中性子はコリメータ (スリット) 構造を介して炉外へ取り出せるようにする。また、稠密燃料領域の周りを減速材で囲み熱中性子を取り出す。

この炉の技術課題は、燃料を稠密化することで冷却水路が狭くなることから、除熱性能と燃料稠密度の最適化を検討評価する必要がある。

なお、図 2-7 の右図で示されるように、燃料を稠密化しない場合でも既に高速中性子成分が優位にあり、カドミウム等熱中性子の吸収材を使用すれば高速中性子が多い照射領域を得ることができる。また、2.1.4 中出力炉の項で説明したように反射材の構成を工夫することも考えられる。

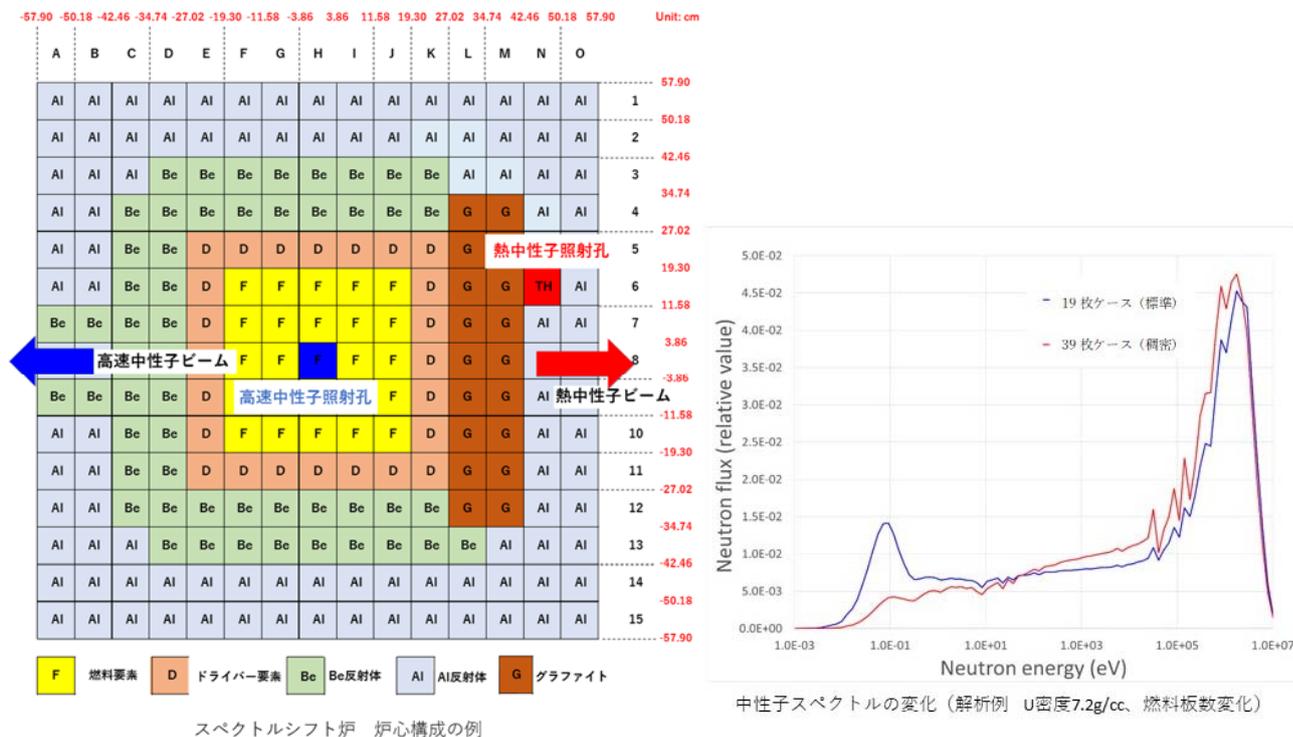


図 2-7 スペクトルシフト炉の中性子スペクトル解析例

2.1.7 革新炉開発炉

革新炉には、次世代炉等があり、これらの革新炉開発に供するため、大型照射試験炉とヒートパイプ冷却小型炉について検討した。

(1) 大型照射試験炉

材料の加速試験や革新炉の冷却材の環境を模擬した照射が可能な大型照射試験炉として、米国の開発プロジェクトとして取り上げられている VTR (図 2-8) 5.6)を参考にして検討を行った。この検討では、100MW のナトリウム冷却高速炉を想定し、実験装置として、照射ループ (ナトリウム、鉛、鉛ビスマス、ヘリウム、熔融塩ループ等) を設置する。

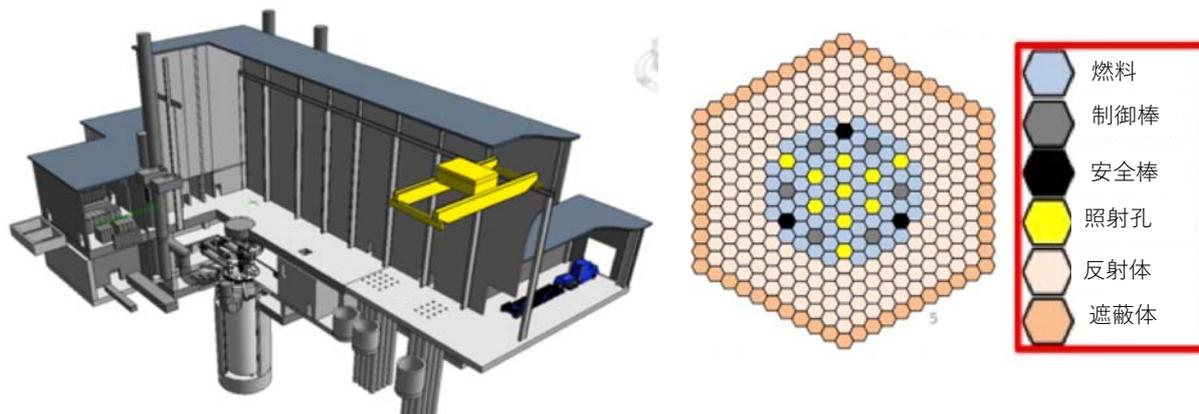


図 2-8 大型照射試験炉 5.6)

(2) HP 冷却小型炉

小型炉の中でも開発が進んでいるヒートパイプ冷却小型炉（HP SMR）の代表的なものとして eVinci^{7,8)}がある。本研究施設はこの試験研究炉に中性子ビームラインを付加して、HP SMR の実証試験を行うとともに中性子ビーム利用研究を行う。

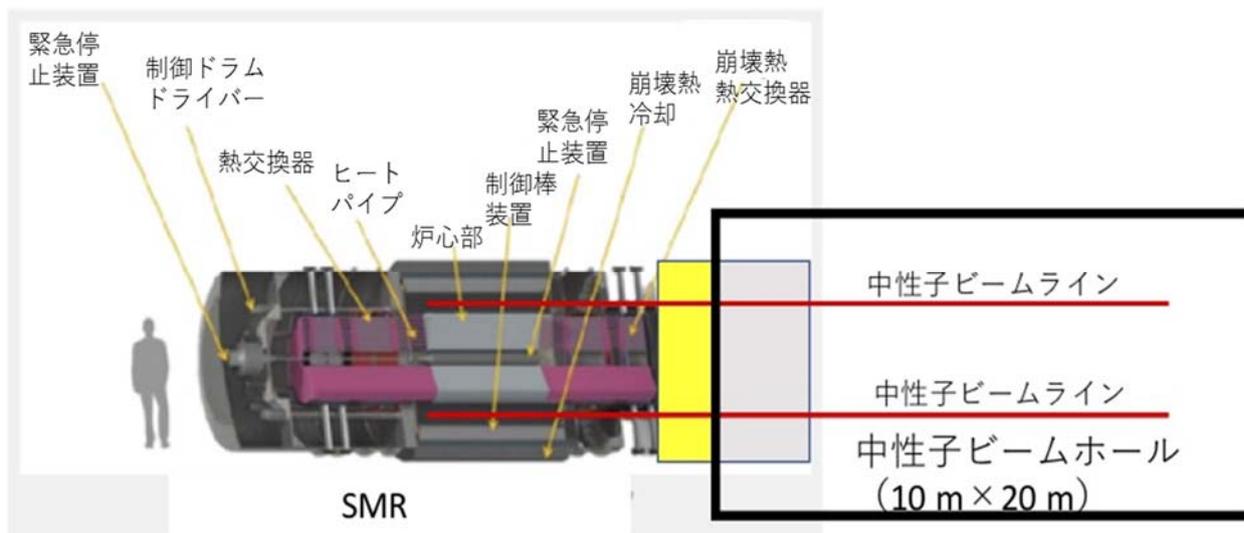


図 2-9 HP 冷却小型炉による中性子ビーム利用研究施設^{7,8)}

2.1.8 燃料調達、使用済燃料の処理等の検討

試験研究炉の燃料は低濃縮ウラン燃料が想定されており、その調達と処理等について検討する。燃料調達は原料調達と燃料製造とに分かれ、相応の期間と費用が必要となる。そのため、事前に燃料仕様を明確にし、中長期的な調達計画案を策定したうえで、原料入手先及び燃料加工メーカー等と調整しておく必要がある。

(1) 燃料調達

【原料入手】

試験研究炉で使用が想定される U_3Si_2 燃料、U-Mo 燃料の場合、原料となる低濃縮ウランを試験研究炉設置事業者が米国エネルギー省ウラン濃縮施設と直接契約を締結し、購入することになる。低濃縮ウランのコストは、米国エネルギー省が決めている基本価格をベースに、購入時点でのウラン市場価格や施設側管理コスト（濃縮役務コスト）等を反映した価格が設定される。（注：ロシアも生産をしているが、詳細は不明である。）

燃料加工メーカーへ供給する必要な原料の量は、製造時の歩留まり等を考慮する必要がある。

【燃料加工メーカーまでの原料輸送】

燃料加工メーカーへの原料輸送には、原料輸送用の容器調達（米国側施設への空容器輸送を含む）、米国ウラン濃縮施設における作業、燃料加工メーカー工場までの輸送及び燃料加工メーカー側の受け入れ作業が必要となる。燃料加工メーカーはフランス等の実績があり、輸送コストもかかる。

また、調達するウラン原料の量にも依存するが、通常の試験研究炉の場合、20%未満低濃縮ウ

ランは、U-235 量が 10kg を超えることが予想されるため、核物質防護上の区分Ⅱに分類される（表 2-3 参照）。このため、輸送時には濃縮度 5%以下の発電用原子炉用ウラン原料と比べセキュリティ対策の強化が必要となる。

表 2-3 核物質防護区分⁹⁾

(未照射の核物質)

		区分		
		I	II	III
プルトニウム		2kg 以上	500g を超え 2kg 未満	15g を超え 500g 以下
濃縮ウラン*	20%以上	5kg 以上	1kg を超え 5kg 未満	15g を超え 1kg 以下
	10%以上 20%未満		10kg 以上	1kg を超え 10kg 未満
	天然ウランの比率を超え 10%未満			10kg 以上
U233		2kg 以上	500g を超え 2kg 未満	15g を超え 500g 以下

* 濃縮ウランについては、U-235 の量を示す。

(2) 燃料製造

燃料の設計、形態に大きく依存するが、JRR-3、JMTR、KUR 等の従来型試験研究炉の板状燃料要素を製造する場合は、過去の実績を参考とすることができる。

ただし、フランスの燃料加工メーカーの場合、近年の規制強化を受けた施設改造等のコストが燃料製造コストに反映（上乘せ）されており、この傾向は将来的にも継続するため、製造コストは年々上昇する可能性が極めて大きい。

また、燃料要素の設計、1 回の製造キャンペーンで作成する燃料要素の数にもコストは大きく依存する。具体的なコスト算出のためには、ある程度具体的な燃料要素スペックを元にした燃料加工メーカーからの見積もりを取得することが必要となる。

【燃料加工メーカーからサイトへの輸送】

例えば、フランス燃料加工メーカーからの調達を考えると、フランス国内陸上輸送→フランスから我が国までの海上輸送→我が国の国内陸上輸送の 3 つの輸送が必要となる。このうち、コストの大半は国際海上輸送が占める。現在検討している試験研究炉の炉型を考えると、少なくとも初期装荷分（+取替燃料）の燃料要素の総量は、20%未満低濃縮ウランで、U-235 量で 10kg を超えることが予想されるため、核物質防護上の区分Ⅱ輸送となると想定すべきである（取り換え燃料の場合は、調達する燃料体本数によっては区分Ⅲの範囲で収まる可能性あり）。ただし、区分Ⅱ輸送の場合、専用船（チャーター）が必要となる。

(3) 燃料再処理

使用済燃料の扱いについては、原子炉設置許可申請を行う際に明確にしておく必要がある。現在の我が国の再処理計画を踏まえると国内再処理に期待するのは難しい状況である。現状、再処理施設として利用可能と想定されるのは、米国、フランスであるが、中長期的な利用については相手国との調整が必要であり、日本政府を含めて計画段階から調整が必要である。また、再処理に加えて、使用済燃料の輸送、返還廃棄物（HLW ガラス固化体）の輸送と保管場所等の検討も必要となる。

燃料調達、使用済燃料再処理のいずれにおいても専用の輸送容器（キャスク等）を所定数製作して保有する必要がある。返還廃棄物返送用の輸送容器は、HLW ガラス固化体の乾式貯蔵容器を兼ねた輸送容器をフランス ORANO 社から調達することが可能であり、再処理コストとあわせて調査が必要である。

2.1.9 試験研究炉の主な利用

世界では約 220 基¹⁰⁾（2018 年 12 月末）の試験研究炉が稼働しており、その利用の分野はエネルギー利用に限らず、医療及び産業利用を含めた科学技術研究や学術研究等多岐にわたる。IAEA では試験研究炉の利用を 11 項目の技術や分野別の目的に整理し、毎年の世界の試験研究炉の利用状況の変化が報告されている¹¹⁾。ここでは、11 項目の利用方法を参考に、「人材育成」、「基礎基盤技術」、「照射利用」、及び「ビーム利用」の 4 項目に分類し、本検討の対象とした各試験研究炉が持つ機能及びその能力がどのような利用に適しているかについて検討し表 2-4 にとりまとめた。表中の評価は、利用目的をすべて満足すると考えられるものを「A」、利用目的の一部を満足すると考えられるものを「B」、利用目的をほとんど満足しないと考えられるものを「C」として評価した。なお、同表には参考として、既存の JRR-3、JMTR も記載している。

(1) 人材育成

原子力を専攻する国内外の学生や院生のカリキュラムに基づく知識習得、原子炉の運転管理や研究業務に参加しながら指導員のノウハウ等を学ぶ OJT 等のスキル習得訓練、国内外の原子力技術者や研究者が実務上必要な素養を身に着けるコンピテンス習得訓練、原子力技術のアップデートやスキル等の見直しのための継続的な技術者の養成等が利用対象である。さらに原子力専攻以外の理工系や医学系の学生の教育や一般市民の見学等もこの利用に含まれる。

すべての試験研究炉は、その特徴や能力に関係なく教育と訓練に利用できるが、臨界実験装置は一般から専門職まで幅広い教育に利用でき人材育成に最も適している。また、低出力炉やパルス炉は、出力が低く運転も短時間（デイリー運転）のため、アクセス性も他の試験研究炉に比べ比較的容易であり実際の運転を体験する訓練に適している。また、原子力技術の持続的展開のためには、これらの教育、訓練のプログラムの中に技術の継承を行うための制度や枠組みの検討を行う必要がある。その一例として、新規の研究炉の建設に当たっての設計/建設/運転の各段階での技術的な経験を積み重ねる枠組みの検討も重要なポイントである。

(2) 基礎基盤技術

基礎基盤技術とは、現行の原子力発電炉の安全性・経済性向上のための研究開発や、次世代炉

等の炉構造や核・熱プロセスのモデル化の研究開発に使われる技術を指す。具体例として、核分裂断面積や核反応断面積等の基礎的な核特性データ収集、未臨界度測定等臨界安全性に関連した実験、計算コード検証のためのベンチマーク実験データの取得等の基礎研究分野を挙げることが出来る。高速炉や SMR 等の次世代炉や粒子加速器と組み合わせた ADS 等の開発に加え、中性子検出器や遮蔽構造、AI 等を利用した制御系の開発等の技術開発分野もこのカテゴリーである。なお、燃・材料の開発や評価は、次の照射利用で扱う。

また、スペクトルシフト炉の炉心内部の高速中性子スペクトル照射場での MA の燃焼・核特性研究は、高速炉開発に係る基礎研究に位置づけられる。革新炉開発炉については、多くの技術的課題が残るが、設計開発に関わることからこの利用目的に含めた。

(3) 中性子照射利用

原子炉の燃料、材料の耐久性、健全性等を調べる「燃・材料照射評価」、原子炉内で中性子を特定の材料に照射して医療や工業、あるいは学術関係で数多く使われている放射性同位元素の製造 (RI 製造)、材料・試料中に含まれる微量物質の検出・定量化の手法として中性子を一定量照射し放射化して分析する「放射化分析」等が主な利用として挙げられる。なお、半導体材料である Si や Ge を照射し不純物を材料内に生成する「ドーピング技術」は、現在までの調査で、国内メーカーについては、試験研究炉の安定度や費用の点から将来の需要が不透明であり、ここでの利用候補からは除外した。

照射利用への適合の度合いは、中性子スペクトル、中性子束強度、照射時間等に左右される。燃・材料照射評価のうち材料の照射メカニズム解明等の試験片レベルでの照射利用は照射設備が設置されていれば可能であるが、軽水炉の安全性向上に必要とされる寿命延長評価 (加速照射) には 2×10^{14} n/cm²/s 以上の中性子束が必要であり、その要件を満たすのは革新炉開発炉 (大型照射試験炉) に限られる。また、RI 製造においても一般には、高い中性子束が要求される。¹⁹⁸Au や ²⁴Na のような一部の短寿命 RI であれば低出力炉でも製造は可能であるが、⁹⁹Mo、¹⁷⁷Lu、¹⁸⁸Re、¹⁹²Ir 等今後需要が見込まれる多くの RI を製造するには、 1×10^{14} n/cm²/s 以上の中性子束で数日間連続して照射できる条件が必要となる。中出力炉は部分的ではあるが、その利用ニーズを満たすことができる。

(4) 中性子ビーム利用

中性子と物質の相互作用により、物質の微視的構造やダイナミクスを測定する中性子散乱技術による材料・物質の物性評価、中性子が X 線とは異なる物質中の透過力を持つ性質を利用し静止画像や動画像を得る中性子ラジオグラフィ技術、中性子によるがん治療等の手法の基礎データや生物の放射線影響等を調べるための生物照射等が代表的な利用方法である。なお、これらの利用には、BNCT (ホウ素中性子補足療法) のような直接治療行為に関する利用は、粒子加速器の利用が実用段階にあることから基礎的な利用を除きここでの検討からは除外した。

円滑に中性子散乱・解析実験を行うためには、測定試料位置において 10^6 n/cm²/s 以上 (炉心出口では 10^{10} n/cm²/s 以上) の熱または冷中性子が必要となる。中出力炉及びピーク出力時のパルス炉においてはその要件を満たすことが想定されるが、実験装置の設置スペースや施設へのアクセス性等他の制約が課せられるため、利用ニーズを全て満足することは難しい。中性子ラジオグ

ラフィの利用については、一定以上の利用を満たすことが想定される。

表 2-4 試験研究炉の主な利用分野

(凡例) A: 利用目的をすべて満足するもの、 B: 利用目的を一部満足するもの、 C: 利用目的をほとんど満足しないもの、 -: 利用不可能 ※比較のため特徴的な内容を太字で記載

利用分野		利用目的と内容	臨界実験装置	低出力炉 500kw	中出力炉 ~10MW	パルス炉 250kw	スペクトルシフト炉 2MW	革新炉開発炉 100MW~40MW	既存炉	
大分類	小分類								JRR-3	JMTR
人材育成	教育 (一般学生、専門学生)	<ul style="list-style-type: none"> 原子力専攻学生: 炉物理の基礎中性子・放射線測定、原子炉安全管理、発電炉の基礎 一般学生: 原子炉の原理、放射線の特性と測定、中性子の応用 	<p>A</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子力専攻学生教育: 炉物理基礎、放射線測定、原子炉工学基礎学習、原子炉安全管理実習 一般学生: 原子炉の原理、放射線の特性と測定技術 市民を含む見学対応 	<p>B</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子力専攻学生: 炉物理基礎の一部、原子炉工学の一部、原子炉安全管理実習 一般学生: 原子炉の原理、放射線の特性と測定技術 市民を含む見学対応 	<p>B</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子力専攻学生: 炉物理基礎の一部、原子炉工学の一部、原子炉安全管理実習 一般学生: 原子炉の原理、放射線の特性と測定技術 市民を含む見学対応 	<p>B</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子力専攻学生: 炉物理基礎の一部、原子炉工学の一部、原子炉安全管理実習 一般学生: 原子炉の原理、放射線の特性と測定技術 市民を含む見学対応 	<p>B</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子力専攻学生: 炉物理基礎の一部、原子炉工学の一部、原子炉安全管理実習 一般学生: 原子炉の原理、放射線の特性と測定技術 市民を含む見学対応 	<ul style="list-style-type: none"> 原子力専攻学生: 炉物理基礎の一部、原子炉工学の一部、原子炉安全管理実習 一般学生: 原子炉の原理、放射線の特性と測定技術 市民を含む見学対応 	B	B
	訓練 (大学院生、研究者、技術者、企業、国際研修生)	<ul style="list-style-type: none"> 原子力専攻院生: 原子炉・中性子ビーム特性実習 OJT、中性子場・核データ測定 OJT 研究者・技術者の CPD 教育 海外学生・技術者研修: 原子炉工学基礎、原子炉安全管理研修 学生・技術者の原子炉設計・建設、運転・保守の技術継承 	<p>B</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子力専攻院生、研究者、技術者共通: 炉心構成変更 OJT、研究炉プロジェクトの原子炉設計・建設時に設計(含む、許認可手続き)運転・保守の技術継承 国際連携での学生・技術者研修: 炉工学技術継承 	<p>A</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子力専攻院生、研究者、技術者共通: 反応度測定や中性子特性、核データ採取、照射・ビーム技術の OJT、研究炉プロジェクトの原子炉設計・建設時に設計、運転・保守の技術継承 国際連携での学生・技術者研修: 炉工学技術継承 	<p>B</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子力専攻院生、研究者、技術者共通: 反応度測定や中性子特性、核データ採取、中性子ビーム技術 OJT、研究炉プロジェクトの原子炉設計・建設時に設計、運転・保守の技術継承 国際連携での学生・技術者研修: 炉工学技術継承 	<p>A</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子力専攻院生、研究者、技術者共通: 反応度測定や中性子特性、核データ採取、中性子ビーム技術 OJT、研究炉プロジェクトの原子炉設計・建設時に設計、運転・保守の技術継承 国際連携での学生・技術者研修: 炉工学技術継承 	<p>B</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子力専攻院生、研究者技術者共通: 反応度測定や中性子特性、核データ採取、中性子ビーム技術 OJT、研究炉プロジェクトの原子炉設計・建設時に設計、運転・保守の技術継承 国際連携での学生・技術者研修: 炉工学技術継承 	<ul style="list-style-type: none"> 研究炉プロジェクトの原子炉設計・建設時に設計、運転・保守の技術継承、燃材料照射 OJT 国際連携での学生・技術者研修: 炉工学技術継承 	B	B
基礎 基盤 技術	<ul style="list-style-type: none"> 核分裂断面積測定・評価 核反応断面積測定・評価 反応度、未臨界度測定 新型炉炉心構成研究 ADS 基礎研究 	<p>A</p> <ul style="list-style-type: none"> 核データの精度検証、未臨界測定の高性能化、反応度価値測定等 ADS の要素技術開発 MA 核特性評価 	<p>C</p> <ul style="list-style-type: none"> 軽水炉に係る核データの取得と精度検証 	<p>C</p> <ul style="list-style-type: none"> 軽水炉、高速炉に係る核データ取得と精度検証 	<p>C</p> <ul style="list-style-type: none"> 軽水炉に係る核データ取得と精度検証 	<p>A</p> <ul style="list-style-type: none"> 軽水炉、高速炉の核データの取得 MA 核変換新型炉の研究 炉特性試験から炉解析検証 	<ul style="list-style-type: none"> 革新炉に係る核データの取得 	C	C	

利用分野		利用目的と内容	臨界実験装置	低出力炉 500kw	中出力炉 ~10MW	パルス炉 250kw	スペクトルシフト炉 2MW	革新炉開発炉 100MW~40MW	既存炉	
大分類	小分類								JRR-3	JMTR
	研究開発 (原子炉設計技術開発)	・次世代炉設計技術開発 ・検出器開発/校正	A ・新材料、新燃料の炉心特性評価、実証・確認	C ・環境を模擬した小規模な燃・材料の照射研究	—	—	B ・多種スペクトル場での検出器開発、反応率・反応度のスペクトル依存データ取得	A ・革新的な試験研究炉の設計開発	—	—
照射利用	燃・材料照射 (照射挙動、大線量照射)	燃料・材料の照射効果の測定とモデル化	—	B ・中性子照射効果 ・環境制御照射	B ・中性子照射影響	B ・中性子照射影響	B ・中性子照射影響 ・MA試験照射	A [大型照射試験炉] ・照射影響・実証 ・環境中性子照射試験	B	A
	RI製造 (医療用、工業用)	学術用、医療用、工業用、農業・生命科学研究用	—	C ・新規 RI の研究開発 ・短寿命 RI (¹⁹⁸ Au、 ²⁴ Na、 ³² P 等) の製造	B ・ ⁹⁹ Mo、 ¹³¹ I、 ¹⁶⁶ Ho、 ¹⁵³ Sm、 ¹⁹² Ir、 ¹⁹⁸ Au、 ¹⁸⁶ Re、 ¹⁷⁷ Lu 等の製造 ・他の研究炉との安定供給の枠組み構築	C ・新規 RI の研究開発 ・短寿命 RI (¹⁹⁸ Au、 ²⁴ Na、 ³² P 等) の製造	C ・新規 RI の研究開発 ・短寿命 RI (¹⁹⁸ Au、 ²⁴ Na、 ³² P 等) の製造	—	B	A
	照射 (生物照射、影響評価、医療照射研究)		—	B ・低線量照射効果の実験 ・放射線生物学への応用 ・学生や研究者の教育や訓練	B ・低線量照射効果の実験 ・放射線生物学への応用 ・学生や研究者の教育や訓練	B ・低線量照射効果の実験 ・放射線生物学への応用 ・学生や研究者の教育や訓練	B ・低線量照射効果の実験 ・放射線生物学への応用 ・学生や研究者の教育や訓練	—	—	—
	放射化分析 (放射化分析、即発γ線分析)		—	A ・ほぼ全ての元素の分析可能	A ・ほぼ全ての元素の分析可能	A ・ほぼ全ての元素の分析可能	A ・ほぼ全ての元素の分析可能	A [HP冷却小型炉] ・ほぼ全ての元素の分析可能	A	A
ビーム利用	中性子ラジオグラフィ		C ・静止画像撮影	B ・静止画像撮影 ・断層写真撮影	A ・動的機器等の動作や、熱流動現象の動画撮影 ・断層写真撮影	B ・静止画像撮影	B ・動的機器等の動作や、熱流動現象の動画撮影 ・断層写真撮影	B [HP冷却小型炉] ・動的機器等の動作や、熱流動装置の運転状況の動画撮影 ・断層写真撮影	A	—
	中性子散乱・回折 (熱・冷中性子)		—	—	B ・散乱・回折実験、萌芽的研究 ・JRR-3 との相補的実験が可能	B ・散乱・回折基礎実験 ・設計・開発した実験装置のトライアルユース	C ・散乱・回折基礎実験 ・学生や研究者の教育や訓練 ・実験室レベルの測定	—	A	—

2.1.10 主要設備のレイアウト及びもんじゅサイトの配置

(1) 試験研究炉の主要設備

各試験研究炉の特徴、主な利用目的を考慮し、必要な主要設備について表 2-5 に整理した。原子炉建屋、制御棟、放射性廃棄物廃棄施設及びユーティリティ設備等は各試験研究炉に共通して必要な施設である。利用施設及び冷却設備については、各試験研究炉の特徴に応じて以下のとおり整理した。なお、革新炉開発炉については、今後の技術検討課題が多くその仕様が未定であるため、本検討には含めない。

1) 臨界実験装置

臨界実験装置は出力が小さく放射化も少ないので、冷却や遮蔽のための設備が簡略化できる。また、ビーム・照射利用は行わないため、ビームホールやホットラボといった大型の付属施設は不要である。

一方、臨界実験装置を用いた核データ・計算コード検証のためのベンチマーク実験に加え、高レベル放射性廃棄物の減容化に向けた ADS の要素技術開発のため、数百 MeV クラスの陽子加速器又は電子線加速器の併設を想定する。

2) 低出力炉

炉心は多量の冷却水を保有するプール内に設置されるが、運転時の熱出力は 500kW 程度と低く、自然対流で十分に冷却することができる。そのため、強制循環のための設備や熱を大気中に放出するための二次冷却設備は不要となる。

利用設備については、放射化分析、生物照射、医療用 RI の研究開発に加え、試験片レベルでの照射利用を想定し、それらを取扱うことができる中規模のホットラボを設ける。また、中性子ラジオグラフィの実験装置を炉室内の実験フロアに設置する。

3) 中出力炉

中出力炉は、中性子散乱・回折実験、中性子ラジオグラフィ等のビーム利用に加え、RI 製造や材料の基礎照射等にも利用する。ビーム利用のための実験設備は、炉室内の実験フロアに加えビームホールを設け、複数のビームラインと実験装置を設置する。また、RI 製造や材料の照射後試験を行うためのホットラボを設ける。

4) パルス炉

パルス運転時の最大出力は約 30MW と試験研究炉としては大きいため冷却システムは強制対流冷却とする（一定出力運転時の熱出力は 250kW と低く自然対流で冷却可能）。

利用設備については、ピーク出力時の高強度パルス中性子による散乱・回折実験が主体となるため、中出力炉と同様のビームホールを設ける。

5) スペクトルシフト炉

スペクトルシフト炉の特徴として、炉心内部の高速中性子スペクトルと炉心外側の熱中性子スペクトルの両方の特性スペクトルを利用できることにある。高速中性子スペクトルを利用し

た MA の核特性研究又は高速炉の基礎研究等は原子炉建屋に併設するホットラボを使用し、放射化分析や中性子ラジオグラフィ等の熱中性子スペクトル利用は炉室内の実験装置を使用することを想定する。

また、スペクトルシフト炉の熱出力は、低出力炉と中出力炉の間となる 2MW を想定している。自然対流のみでは燃料を冷却することは難しいことから、一次冷却設備に加え二次冷却設備が必要となる。

表 2-5 試験研究炉の主要設備の比較

施設・設備		臨界実験装置	低出力炉	中出力炉	パルス炉	スペクトルシフト炉
原子炉施設	原子炉建屋	炉室、原子炉本体、燃料保管設備				
	制御棟	運転制御室、出入管理室、運転員及び補助員等の居室				
	冷却塔	—	—	二次冷却設備 冷却ファン	二次冷却設備 冷却ファン	二次冷却設備 冷却ファン
付属施設	放射性廃棄物廃棄設備	固体廃棄物廃棄設備（保管廃棄室、保管廃棄容器） 気体廃棄物廃棄設備（排風機、排気浄化装置、排気筒） 液体廃棄物廃棄設備（廃液タンク、排水処理装置）				
	ユーティリティ設備	電源設備、空調設備、圧空設備、貯水槽				
利用施設	ビーム実験装置	—	2 台（炉室）	10 台（ビームホール）、 6 台（炉室）	10 台（ビームホール）、 6 台（炉室）	7 台（炉室）
	ホットセル等	—	セル 3 基、 フード 5 台	セル 6 基、 フード 5 台	セル 1 基 フード 2 台	セル 6 基、 フード 5 台
	加速器	数百 MeV クラスの陽子加速器又は電子線加速器	—	—	—	—

(2) 試験研究炉のレイアウト

もんじゅサイトに試験研究炉を新たに設置する場合、設置候補地のスペースを考慮すると、主要設備を 1 箇所に集約し、かつ 1 つの建屋を複数の施設・設備で共用することにして設置面積の合理化を図る必要がある。主要設備のレイアウトの案を以下に述べる。

1) 臨界実験装置+加速器

臨界実験装置としては、原子炉施設に加え、前述の加速器施設を併設する。建屋の配置案を図 2-10 に示す。原子炉施設と加速器施設を合わせ、95m×35m (3,325m²) の面積となる。

原子炉建屋及び制御棟の大きさは、J-PARC において建設が計画されている TEF-P¹²⁾を参考にした。TEF-P は、臨界実験装置に陽子ビームを導入し、核破砕中性子源により未臨界状態の原子炉を駆動する際の様々な特性を実験的に検証するための施設であり、本検討における臨界

実験装置と同規模と想定される。原子炉建屋は、地上1階から3階までの吹抜け構造とし、1階中央に臨界実験装置の本体を設置する。管理棟は原子炉建屋に隣接し、運転制御室、燃料取扱室、燃料貯蔵室、換気空調機械室、電気室等で構成され、複数の設備を共用することで設置面積を合理化することができる。

加速器施設としては、京都大学複合原子力科学研究所のイノベーションリサーチラボ内に設置されている FFAG 加速器システムを参考にして、直径約 10m の FFAG 加速器を原子炉建屋に隣接した加速器施設内に設置し、加速器から取り出した陽子ビームを臨界実験装置に輸送することを前提とした。加速器施設内には加速器の他に、加速器制御室、電源設備、冷却設備、実験設備等を原子炉施設とは別に配置する。

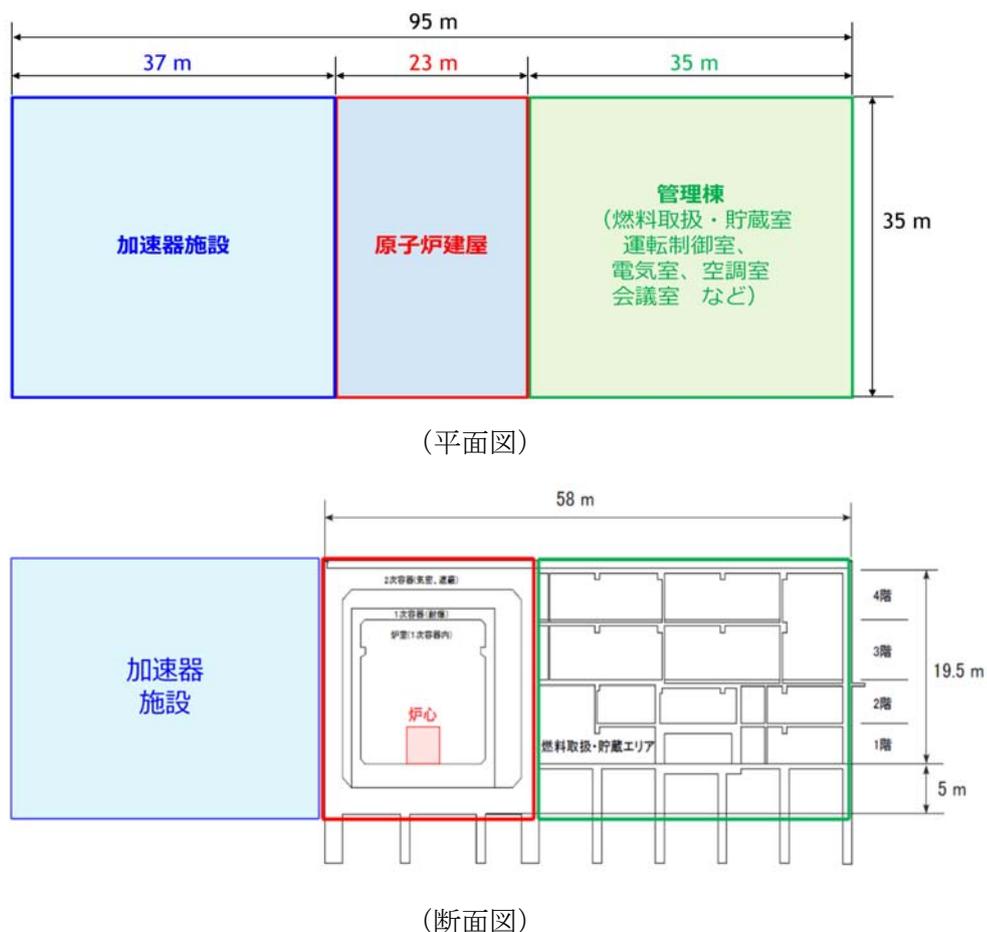


図 2-10 臨界実験装置+加速器の配置案

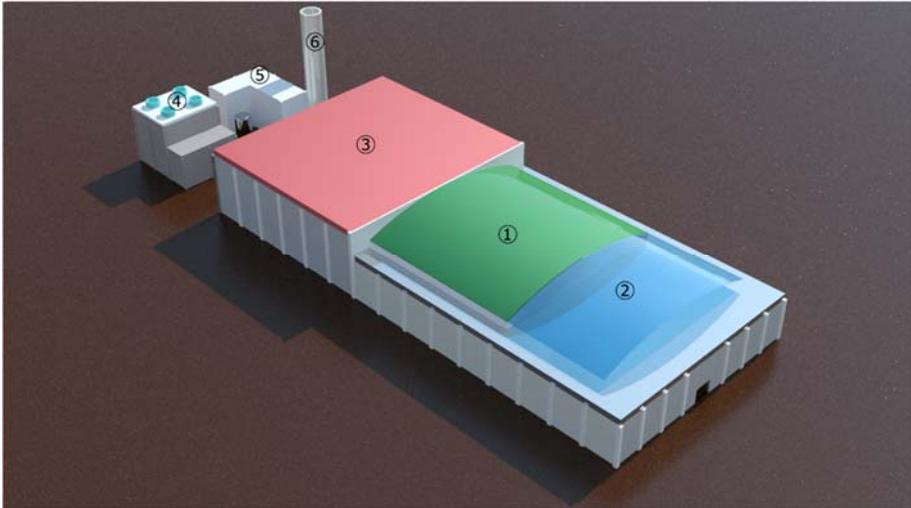
2) 低出力炉、中出力炉、パルス炉、スペクトルシフト炉

低出力炉、中出力炉、パルス炉、スペクトルシフト炉（以下、「低・中出力炉」という）の4つの試験研究炉については、熱出力に違いはあるが、炉心は多量の冷却水を保有する原子炉プール内に設置され、原子炉プールがある原子炉建屋の大きさは同規模とした。また、制御棟、ビームホール、ホットラボ及びその他の付帯施設は、厳密には各試験研究炉の特徴に応じて規模は異なるが、本検討においては想定される範囲内で同規模として取り扱った。全体の配置を図 2-11 に示す。

原子炉建屋は、KUR（5MW：原子炉建屋 28m ϕ ×30m H ）と JRR-3（20MW：原子炉建屋 33m ϕ ×37m H ）を参考にして、地上 1 階地下 2 階の 3 階建ての建物（27.5m L ×36m W ×30m H ）とする。地上 1 階の炉室には、原子炉プール、 Canal 及び使用済燃料プールを一体化したプールを設置し、原子炉プール内に原子炉本体を設置する。原子炉プールの水面を地表レベル（GL）に合わせた場合、炉心は GL から約 8m の地下に設置することになる。また、地下 1 階の実験フロアには、炉心から取り出した中性子ビームを利用するための実験装置を設置する。地下 2 階には、制御装置、原子炉冷却系統機器及び計器類を収容する部屋を設ける。なお、各階へのアクセスは個別に管理する。

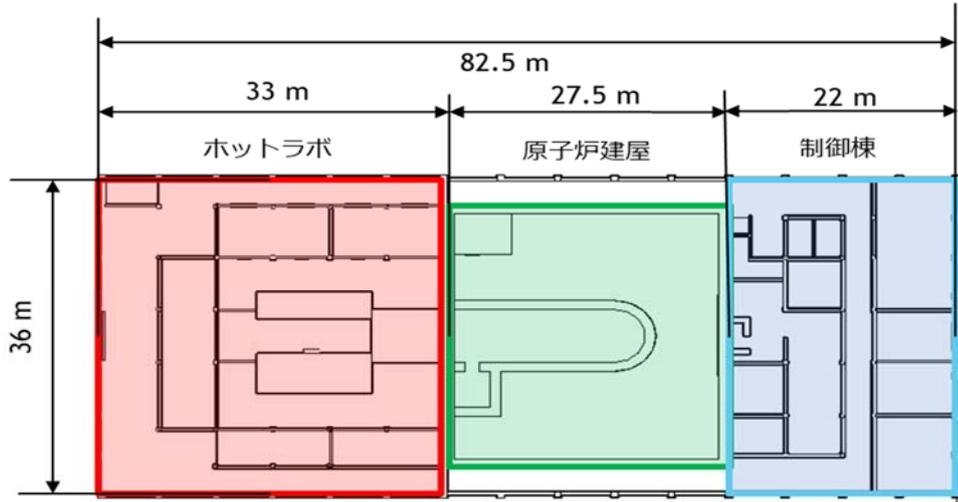
材料の照射後試験、RI の製造・研究開発、放射化分析等種々のホット作業に使用するセル、フード、グローブボックス等は、原子炉建屋に隣接したホットラボに設置する。照射後試料は原子炉プールからホットラボの詰替セルへ、管理区域外を経由せずに転送又は移送することができる。また、ホットラボ内を核燃料使用施設と RI 使用施設に区分けし、出入管理も区別することで、利用者のアクセス性の向上が期待できる。ホットラボの地下は、固体・液体・気体の各種放射性廃棄物の廃棄設備等を設置するスペースに利用する。

また、中出力炉及びパルス炉のビームホールについては、実験フロア床レベルとビームホール床レベルを合わせる必要があるため制御棟の地下に設ける。ビームホールの実験装置には、4本のビームラインを設置し、中性子導管により炉心からの熱及び冷中性子を輸送する。

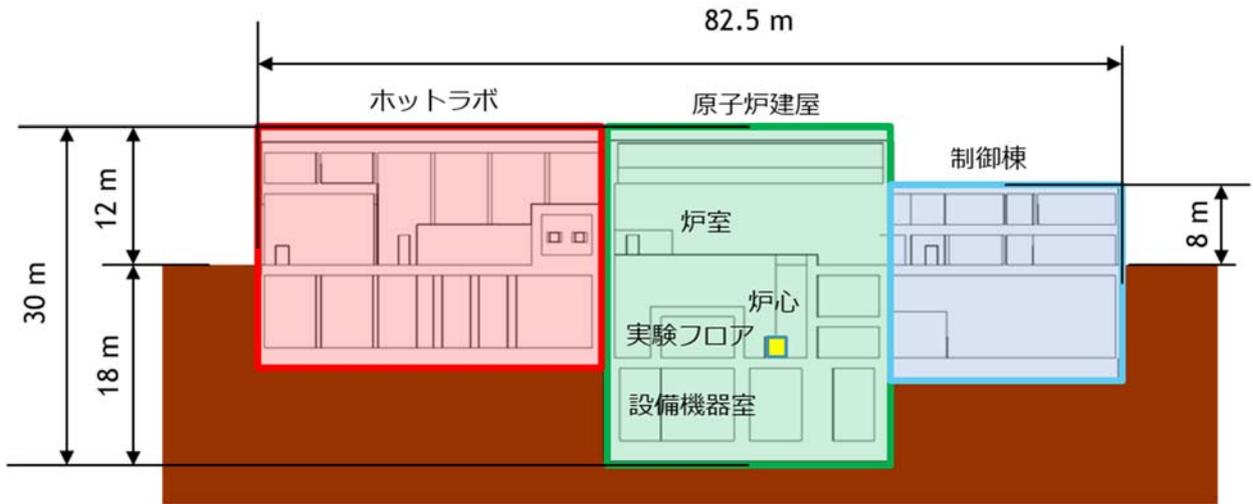


①	原子炉建屋
②	制御棟
③	ホットラボ
④	冷却棟
⑤	電源供給棟
⑥	排気筒

(鳥瞰図)



(平面図)



(断面図)

図 2-11 低・中出力炉配置案

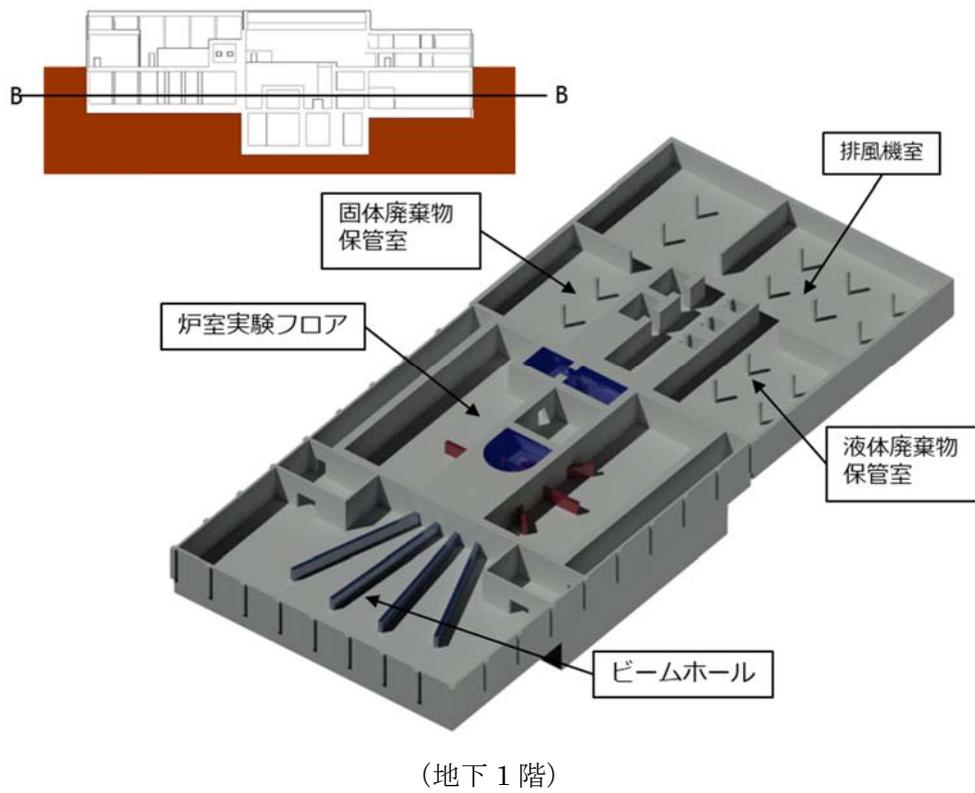
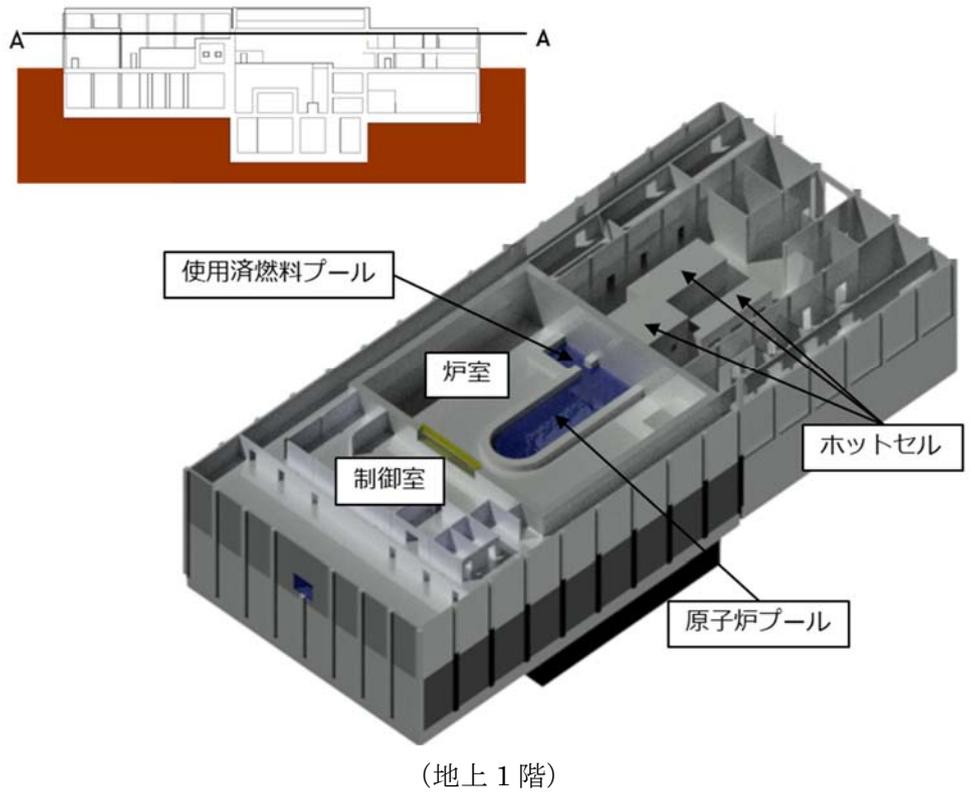


図 2-12 低・中出力炉配置案フロア図

(3) もんじゅサイトにおける試験研究炉の配置検討

もんじゅサイトにおける試験研究炉の配置検討は、臨界実験装置と低・中出力炉の主要施設のレイアウトと建屋寸法を基に、これらの試験研究炉施設をもんじゅサイトに設置する場合の場所、配置、土木工事について検討した。

1) 試験研究炉の設置スペースと設置可能な場所の検討

図 2-10 の臨界実験装置又は図 2-11 の低・中出力炉を設置する場合、施設建屋周囲に幅 10m の通路スペースを設けると、必要な設置スペースは長さ約 185m、幅約 77m になる。もんじゅサイト内の候補地である山側資材置場+焼却炉場所に設置するには、もんじゅ廃止措置作業と干渉しないこと、及びこの設置場所の地質・地質構造調査を行い原子炉施設の設置場所としての適性（十分な支持力がある安定した地盤であること）を評価する必要がある。（詳細は添付資料 3、添付資料 7 を参照。）

2) 山側資材置場+焼却炉場所における試験研究炉の設置検討

試験研究炉を山側資材置場+焼却炉場所に設置する場合の配置に関しては、次の 5 ケースについて検討した。代表例として図 2-13 に臨界実験装置のケース A、図 2-14 に低・中出力炉のケース C の配置例を示す。（各ケースの配置は添付資料 3 の図-6A、6B 及び図-7A、7B、7C を参照。）

① 臨界実験装置

ケース A：原子炉施設を山側資材置場に設置、研究管理棟等を焼却炉場所に設置

ケース B：原子炉施設を焼却炉場所に設置、研究管理棟等を山側資材置場に設置

② 低・中出力炉

ケース A：原子炉施設を山側資材置場に設置、研究管理棟等を焼却炉場所に設置

ケース B：原子炉施設を焼却炉場所に設置、研究管理棟等を山側資材置場に設置

ケース C：原子炉施設と研究管理棟等の配置はケース A と同じであるが、山側資材置場側の掘削土の一部を焼却炉場所に盛土（EL+115m→EL+125m）して掘削残土を削減するケース

3) 試験研究炉を設置する場合の土木工事の検討

試験研究炉を設置する場合、臨界実験装置は耐震 B クラス又は C クラス相当施設になり建屋基礎は杭基礎構造で可能である。一方、低・中出力炉が耐震 S クラス相当施設になる場合は、盛土を取り除いて花崗岩岩盤に基礎基盤を設け、その上に原子炉建屋を設置する必要がある。この土木工事の方法、掘削土量と埋戻土量及び掘削残土量等を検討し、平成 31 年度施工パッケージ型積算方式単価表（国土交通省）を基に土木工事の概算費用を算定した。

以上の検討結果をまとめると、次のとおりである。

①臨界実験装置の場合、炉心を含む原子炉建屋と燃料取扱・貯蔵施設を含む管理棟に加え ADS の実験研究を行うための加速器施設（京都大学の FFAg 相当）を併設する施設を想定した場合、ケース A とケース B のいずれのケースでも山側資材置場+焼却炉場所のスペースに収まる。原子炉建屋等は耐震 B クラス又は C クラス相当になり、土木工事の掘削土量は約 14 万 m³になる。

②低・中出力炉の場合、ケース A, B, C のいずれのケースでも山側資材置場+焼却炉場所のスペースに収まる。施設設計に大きく影響する耐震重要度分類は、4.1.1 試験炉設置許可基準規則に

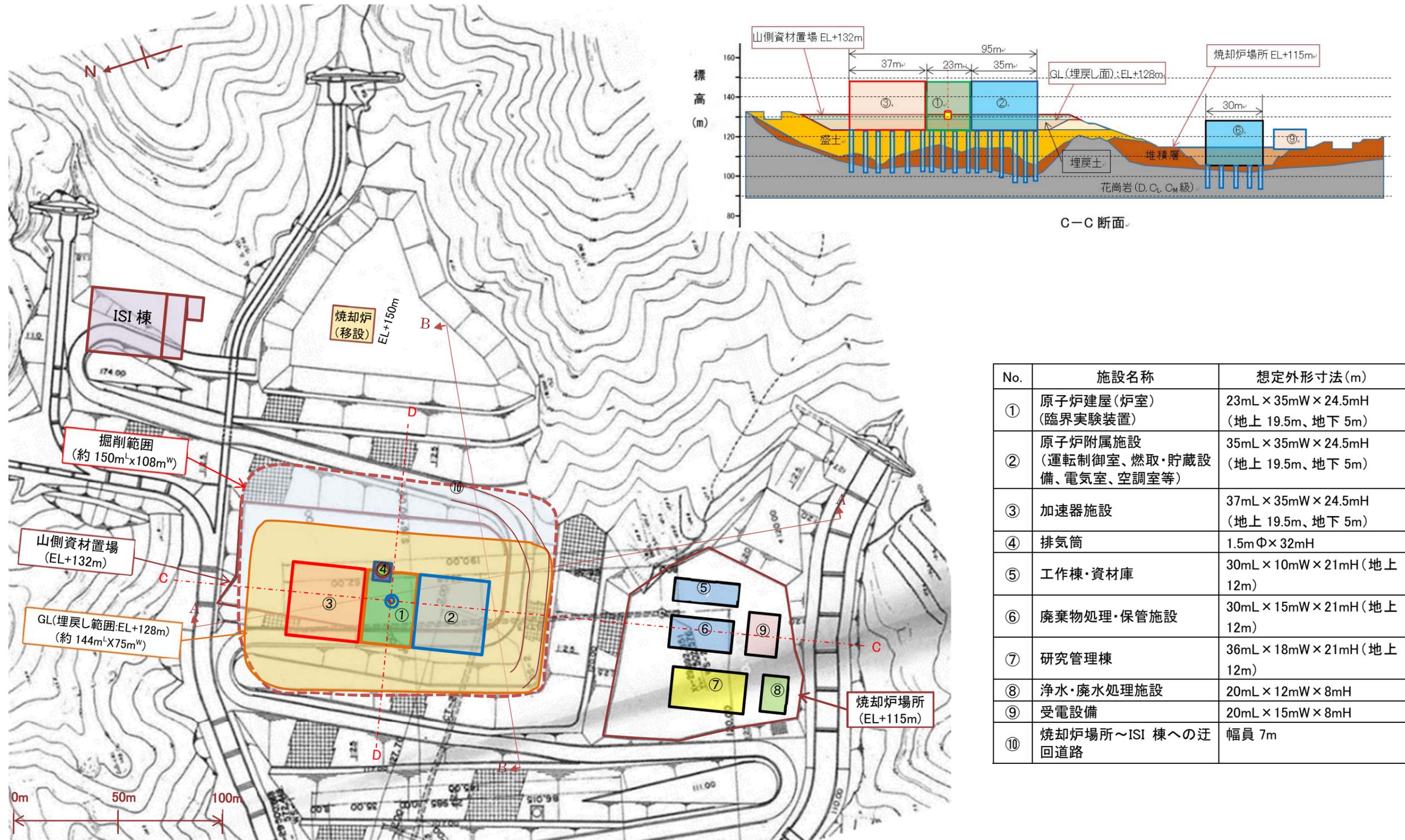
示すように想定事故状態における敷地周辺の公衆の被ばく線量によって分類される。原子炉施設が耐震重要施設（耐震 S クラス：5mSv を超える施設）に相当する場合は、図 2-14 に示すように地表面から花崗岩の岩盤部まで掘削し頑強な基礎基盤を築いた上に原子炉建屋を設置する必要がある。この場合の掘削土量は、ケース A, B, C のいずれのケースも約 44 万 m³となる。この大量の掘削土を仮保管する場所、一部を建屋周辺に埋め戻した後の残土を処理する土捨場の確保が必要である。ケース C については、山側資材置場の掘削土の一部を焼却炉場所に移して EL+125m まで盛土することから、残土量は比較的少なくなる。原子炉施設が耐震 S クラスに相当する場合は、何れのケースも設置地盤は安定した変位が生じない地盤であることが要求されることから、原子力規制委員会の審査ガイドに従い詳細な地質・地質構造調査を行い、設置地盤としての適性を評価する必要がある。

表 2-6 に、もんじゅサイトにおける試験研究炉の各ケースの配置検討結果を示す。

表 2-6 もんじゅサイトにおける試験研究炉の配置検討結果

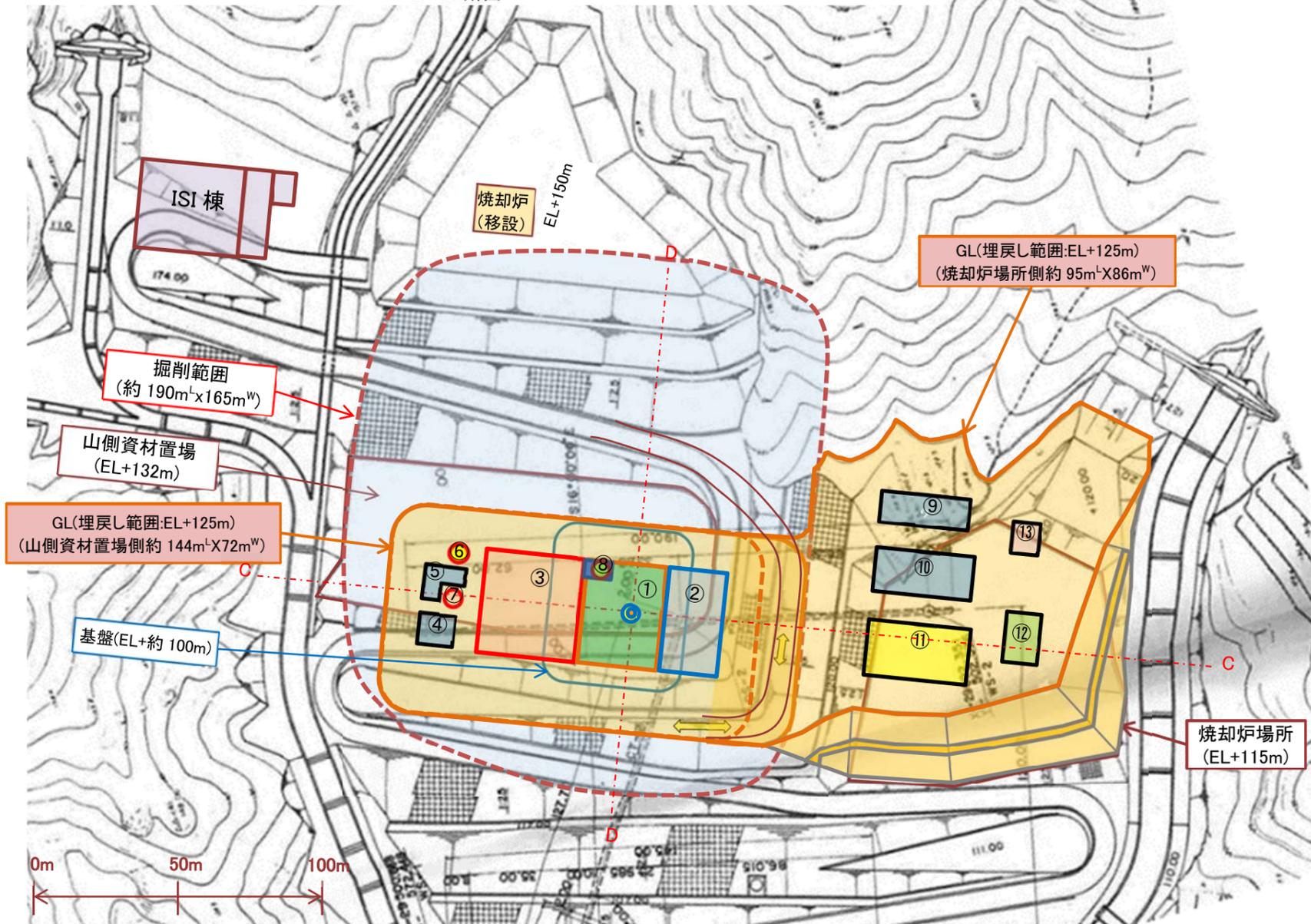
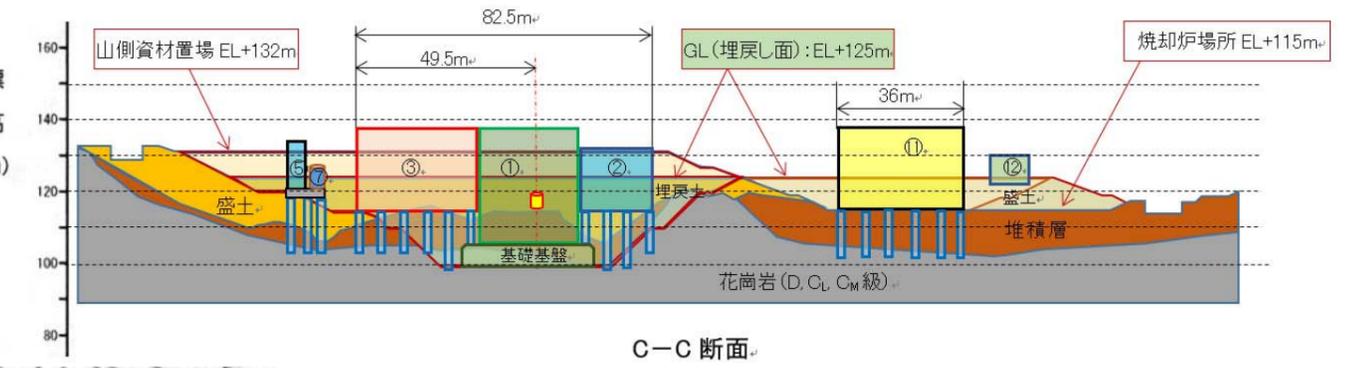
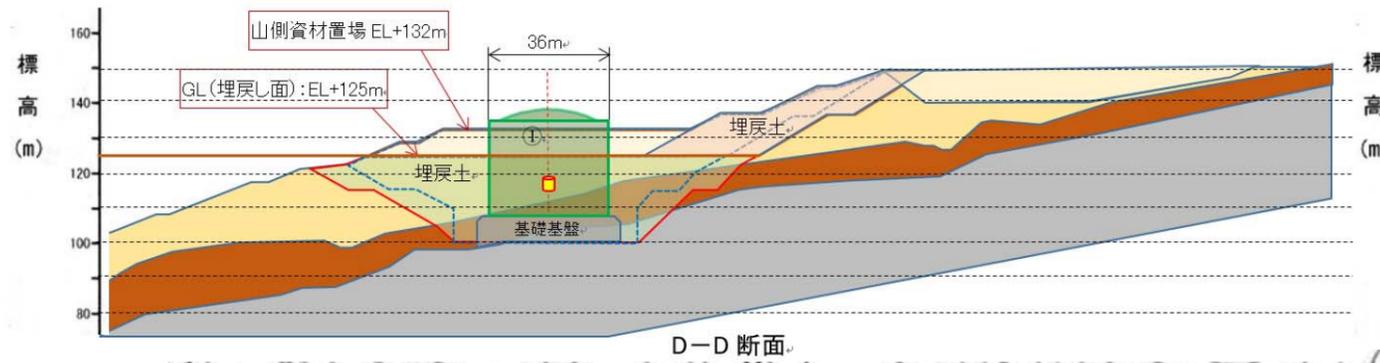
試験研究炉	設置場所	配 置	土木工事*	課題等
①臨界実験装置	山側資材置場 (ケース A) (図 2-13 参照)	原子炉建屋・加速器施設等を山側資材置場 (EL+128m) に設置、研究管理棟等を焼却炉場所 (EL+115m) に設置。	掘削土量 : 約 14 万 m ³ 残土量 : 約 8 万 m ³ 工事費 : 約 14 億円	<ul style="list-style-type: none"> ・もんじゅ廃止措置との干渉性 ・耐震 B クラス又は C クラス施設としての設置地盤の地質・地質構造調査 ・土捨場の確保 ・法面保護工法の検討
	焼却炉場所 (ケース B)	①ケース A とは逆に、原子炉建屋・加速器施設等を盛土が少ない焼却炉場所 (EL+115m) に設置、研究管理棟等を山側資材置場 (EL+128m) に設置。	掘削土量 : 約 14 万 m ³ 残土量 : 約 9 万 m ³ 工事費 : 約 13 億円	
②低・中出力炉 (低出力炉、パルス炉、中出力炉、スペクトルシフト炉)	山側資材置場 (ケース A)	原子炉建屋・ホットラボ等を山側資材置場 (EL+125m) に設置、研究管理棟等を焼却炉場所 (EL+115m) に設置。 (ユーザーズオフィス、熱流動試験装置等が必要な場合は、白木地区等のサイト外に設置。)	掘削土量 : 約 44 万 m ³ 残土量 : 約 12 万 m ³ 工事費 : 約 44 億円	<ul style="list-style-type: none"> ・もんじゅ廃止措置と干渉性 ・耐震 S クラス施設としての設置地盤と周辺斜面の詳細地質・地質構造調査 ・気象観測データの取得と被ばく線量評価及び耐震重要度分類 ・大量の掘削土の仮保管場所への搬出 ・土捨場の確保 ・法面保護工法の検討
	焼却炉場所 (ケース B)	②ケース A とは逆に、原子炉建屋・ホットラボ等を盛土が少ない焼却炉場所 (EL+115m) に設置、研究管理棟等を山側資材置場 (EL+132m) に設置。	掘削土量 : 約 44 万 m ³ 残土量 : 約 27 万 m ³ 工事費 : 約 45 億円	
	山側資材置場+焼却炉場所盛土部 (ケース C) (図 2-14 参照)	②ケース A と同様に原子炉建屋・ホットラボ等を山側資材置場 (EL+125m) に設置。研究管理棟等は、焼却炉場所を EL+125m まで盛土した場所に設置。(掘削土の一部を焼却炉場所の盛土に使用して残土量を削減し、土木工事費を低減)	掘削土量 : 約 44 万 m ³ 残土量 : 約 4 万 m ³ 工事費 : 約 43 億円	

(*土木工事費は、消費税、掘削残土の土捨場確保費用等の費用は含まず。)

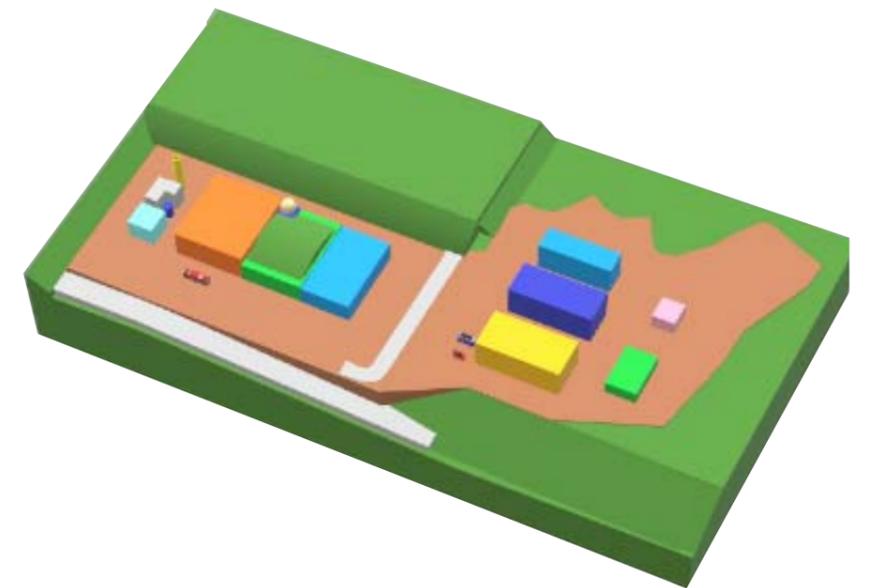


No.	施設名称	想定外形寸法(m)
①	原子炉建屋(炉室) (臨界実験装置)	23mL×35mW×24.5mH (地上19.5m、地下5m)
②	原子炉附属施設 (運転制御室、燃取・貯蔵設備、電気室、空調室等)	35mL×35mW×24.5mH (地上19.5m、地下5m)
③	加速器施設	37mL×35mW×24.5mH (地上19.5m、地下5m)
④	排気筒	1.5mΦ×32mH
⑤	工作棟・資材庫	30mL×10mW×21mH(地上12m)
⑥	廃棄物処理・保管施設	30mL×15mW×21mH(地上12m)
⑦	研究管理棟	36mL×18mW×21mH(地上12m)
⑧	浄水・廃水処理施設	20mL×12mW×8mH
⑨	受電設備	20mL×15mW×8mH
⑩	焼却炉場所～ISI棟への迂回路	幅員7m

図 2-13 臨界実験装置を山側資材置場に設置する場合の配置検討図 (ケース A)



No.	施設名称	No.	施設名称
①	原子炉建屋(炉室)	⑧	高架水槽
②	制御等(ビームホール)	⑨	工作棟・資材庫
③	ホットラボ	⑩	廃棄物処理・保管施設
④	冷却塔	⑪	研究管理棟
⑤	電源供給棟	⑫	浄水・廃水処理施設
⑥	排気筒	⑬	受電設備
⑦	貯水槽		



低・中出力炉の施設配置3Dイメージ (ケースC)

図 2-14 低・中出力炉を山側資材置場に設置する場合の配置検討図 (ケース C)

2.2 技術課題、建設費等の検討

2.2.1 技術課題

表 2-7 に各研究炉について概念設計に先立って解決しなければならない技術課題と当該研究炉の国内外での実績を示す。臨界実験装置、低出力炉、中出力炉では概念設計に先立って開発すべき課題は特に無い。

(1) パルス炉（開発期間：2～3年）

パルス炉は円盤に負の反応度を付加する中性子吸収材と正の反応度を付加する燃料等（場合によっては負の反応度が加わらない部分）を交互に貼り付けた円盤を炉心内に装荷し、これをステップモーターで回転させることによって連続パルスを発生させるものである。

円盤型パルス発生機構の抱える課題は、

- ・中性子吸収材や燃料が円盤から離脱する。
- ・円盤の回転軸の偏心により振動して円盤の破損や燃料の破損を招く。

であり、パルス発生機構を試作して特性試験を行う必要がある。

(2) スペクトルシフト炉（開発期間：1～2年）

スペクトルシフト炉では、高速中性子を得るため板状燃料の枚数や燃料密度を実績のある燃料に対し増やした稠密な燃料（稠密燃料）を炉心の一部に装荷する。その稠密燃料装荷域では冷却流路が狭くなるため、燃料の稠密度をパラメータに熱流解析を行い、燃料健全性を確認し、炉心仕様を選定することが必要となる。解析評価や流動確認には1～2年程度が必要と考えられる。

(3) 革新炉開発炉

1) 大型照射試験炉（開発期間：3～4年）

革新炉は、国内外において軽水冷却、ナトリウム、鉛、鉛ビスマス、ヘリウムガス等各種冷却方式が提案されている。革新炉の開発では、これら各種冷却材環境での燃・材料のその場試験を行うループ型照射試験装置を有する大型照射試験炉が必要である。我が国では照射試験炉（JMTR）や実験炉（常陽等）におけるヘリウムガス、ナトリウムループに関する知見は豊富であるが、鉛、鉛ビスマス、熔融塩に関する試験ループの設計・製作経験がない。このため、大型照射試験炉の設計に先立って、革新炉の燃・材料実証試験を行う照射試験ループの機能、安全システム等の設計、性能試験等を行う必要がある。

2) HP冷却小型炉（開発期間：未定）

本システムは、HP SMRの実証試験を行うとともに、HP SMRに中性子導管を挿入することによって中性子ビーム利用研究に資するものである。しかし、HP SMRは未だ開発段階であり、建設・運転の実績がないことから次年度に概念設計に着手する状況になく、当分はHP SMRの開発動向を見極めた上で、システム設計の可能性について検討する必要がある。

表 2-7 技術課題

炉 型		技術課題	技術課題の内容	国内外での実績
臨界実験装置			特に課題なし	有
低出力炉			特に課題なし	有
中出力炉			特に課題なし	有
パルス炉		パルス発生機構	車輪型パルス発生機構の設計製作と駆動試験；開発年数 2～3 年	海外で有
スペクトルシフト炉		稠密燃料領域の炉心仕様検討	スペクトル硬化のため設置する燃料稠密化領域の熱流力検討；開発年数 1～2 年	無
革新炉開発炉	大型照射試験炉	炉の成立性検討	炉のフィージビリティ検討と仕様決定（Pb、Pb-Bi、熔融塩の冷却性能・システム安全の確認等）；開発年数 3～4 年	無
	HP 冷却小型炉	炉の成立性検討	炉のフィージビリティ検討と仕様決定；開発年数 未定	無

2.2.2 建設費、運転費

候補となる試験研究炉の建設及び運転費用について概算する。（詳細は添付資料 4 を参照）

【建設費】

原子炉設備は、既設の試験研究炉の建設費用を出力との相関でフィッティングした曲線より算出した（4.3 経済性評価に関連した項目の評価及び添付資料 4 参照）。これらの建設費は公開されているものを使用した。廃棄物保管庫等は他の施設との共有設備として併設される場合もあり、これらは建設費には含まれていないと推定される。一方、実験設備については原子炉設備と一体で建設されるため、建設費として含まれていると考えられるが、各炉で多様な実験設備を有しており、ビームポートやホットセルについては実験設備として加算した。ビームポート 1 本あたり 5 億円、ホットセル 10 億円として炉型ごとに積算した。また、特徴的な臨界実験装置の少量 MA サンプル調達費、パルス炉のパルス発生機構は原子炉設備として考慮した。

試験装置は利用者負担として積算から除外したが、臨界実験装置については主要装置として見積もることとした。燃料調達については 2.1.8 燃料調達、使用済燃料の処理等の検討で述べたように不確定要因が大きい。従って、各炉型の初装荷用燃料費は実績のある KUR 等を参考としつつ、高めの約 20 億円とした。

建設に伴う土木工事費については 2.1.10 主要設備のレイアウト及びもんじゅサイトの配置の結果を使用した。

なお、建設費は設計費用や消費税は含まない。また、敷地周辺監視施設、研究者居室、食堂や研修関連施設等は試験研究炉の運営組織を踏まえて検討されるべきものとして含まないこととした。

【運転費】

運転費については、添付資料 5 に実績が示されている。本検討では、組織体制が不明確であり人件費を含まないで見積もることとし、炉型に応じ出力規模を考慮して評価した。

表 2-8 試験研究炉の建設費及び運転費概算

(単位：億円)

費用	臨界実験装置	低出力炉	中出力炉*1	パルス炉	スペクトルシフト炉	革新炉 (大型炉/HP 冷却炉)
原子炉設備*2	186	160	399	145	260	2,500/-*3
実験設備	31	40	90	40	115	
土木工事	14	45	45	45	45	
管理棟	5	8	8	8	8	
建設費総計	236	253	542	238	401	2,500/-*3
運転費	0.5	1	2	1	2	-

*1：中出力炉は 8MW として概算

*2：燃料費含む

*3：見積もり困難

【参考文献】

- 1) 日本原子力学会炉物理部会 第 51 回総会配布資料 “次世代炉物理実験施設検討に関する提案 (案)” (2019 年 9 月)
- 2) IAEA Technical Reports Series 482 “History, Development and Future of TRIGA Research Reactors” (2016)
- 3) IAEA 研究炉データベース
- 4) W.L.Whittemore “GA Pulsed TRIGA Reactor as Substitute for Long Pulse Spallation Neutron Source” (IGORR7,Oct 1999)
- 5) Kemal Pasamechmetoglu “Versatile Test Reactor” (Overview, Idaho National Laboratory, Advanced Reactors Summit 4, January 29-31, 2019)
- 6) INL “Versatile Test Reactor” Home Page
- 7) Westinghouse “Westinghouse Launches New SMR Effort” (March 31, 2019)
- 8) IAEA “Advances In Small Modular Reactor Technology Developments” (ARIS 2018)
- 9) 青木成文 “放射性物質輸送のすべて (第 2 版)” (日刊工業新聞社,2002 年 4 月)
- 10) IAEA “Nuclear Technology Review 2019” (2019)
- 11) IAEA NP-T-5.3 “Applications of Research Reactors” (2014)
- 12) JAEA Technology 2017-033 “J-PARC 核変換物理実験施設 (TEF-P) 安全設計書” (2017)

3. 原子力研究や人材育成を支える基盤となる中核的拠点化に向けた運営のあり方に関する検討

3.1 規模別・目的別の運営・連携の在り方

試験研究炉の規模や目的により、その機能や役割が異なるため、概念検討の内容に即した運営や連携の在り方について検討を行う。

3.1.1 運営・連携における主な利用目的

試験研究炉の利用目的は、基礎研究や応用研究といった「学術利用」と、民間企業による研究開発や大学と企業の産学連携等による「産業利用」は、以下のような観点から全く異なる。

学術利用：新規性（独自性や先行性）と、研究成果の創出を目指した利用
産業利用：安定性（再現性）、経済性、機密性を有した成果の創出を目指した利用

そのため、本研究炉の運営の在り方についても、これらの異なる利用目的をバランスよく取り扱う必要があり、「学術利用」と「産業利用」における運用の調整や管理をどのようにするかについて具体的に明らかにしておくことが重要である。

3.1.2 規模及び目的ごとの運営・連携の基本的な在り方

規模別、目的別の運営・連携の在り方を表 3-1 に示す。「学術利用」及び「産業利用」の目的が併存する「小規模・単体運営型」、「基礎・学術研究重視型」、「民間・連携利用重視型」のケースを設定した。いずれのケースも「学術利用」と「産業利用」の利用割合が異なる想定とし、「産業利用」は外部利用として全利用枠のうち、どの程度占めるかを目安としている。

「小規模・単体運営型」は、運営主体を大学とし、学術研究や人材育成を重視した活動を行う想定である。そのため、積極的な外部利用や産業利用とせず、運営主体の利用を主軸とした取り扱いとする。

「基礎・学術研究重視型」は、運営主体を大学と研究機関の共同で実施する体制としつつ、学術研究や人材育成を主軸とした活動や運営を行う想定である。外部利用も全利用枠の 25%程度の割合と積極的な利用を想定しないものとし、大学間の連携や研究機関との共同研究等の基礎研究を重視した運営を基本とするため、外部利用や連携等の運営関連の業務については付帯的な取り扱いになる。

「民間・連携利用重視型」は、大学連合と研究機関が共同で取り組む運営主体とし、産業利用や連携・共同研究を積極的に行う想定である。全利用枠の 60%程度を見込む外部利用を円滑に運営・促進するためには、それらの役割を担う機能や運営体制を十分に確保する必要があり、大学や研究機関が自ら行う基礎研究や学術研究とバランスの取れた運用や管理を計画的に実施し、展開することが不可欠といえる。

なお、「民間・連携利用重視型」のケースに関する先進的な事例には「あいちシンクロトロン光センター」が挙げられる。同センターは、中小企業活性化及びものづくり拠点化を目指し、地元大学連合と自治体が主体となって構想・準備を進め、整備・運営を担い取り組んでおり、最新状況として外部利用が全体の 6 割強を占める成果を上げている。

今回検討の研究炉は、利用ニーズや位置づけ等を踏まえると「民間・連携利用重視型」を重視した取り扱いを基本と捉え、先進事例の取り組み経緯や実施状況、成果等を評価、参考に、体制や費用面に関して想定目標の検討を行う。

表 3-1 規模別・目的別の運営・連携の在り方

		小規模・単体運営型	基礎・学術研究重視型	民間・連携利用重視型
運営	運営主体 施設管理者 出資主体	大学 大学 国、大学	大学+研究機関 研究機関 国(研究機関)、大学	大学連合+研究機関 研究機関 国、大学、(民間企業)
構造 機能 ・ 業務 役割	主体利用	基礎研究、人材育成	基礎研究、人材育成	基礎研究、人材育成
	維持管理 安全管理	大学 大学	大学+研究機関 大学+研究機関	大学連合+研究機関 大学連合+研究機関
	共同研究 外部利用	一部実施 一部利用	産学共同研究枠設定 外部利用枠設定	共同研究・連携重視 外部利用優先
想定 目標 (案)	運転管理* 人員 費用 利用支援 人員 費用 外部利用(想定)	約15名程度 約0.5億円 約6名程度 約1億円 全利用枠10%程度	約20名程度 約1億円 約12名程度 約1.5億円 全利用枠25%程度	約35名程度 約2億円+4億(核燃料) 約30名程度 約4億円 全利用枠60%程度

ケースイメージ: KUCA、UTR-KINKI

KUR

JRR-3、あいちシンクロトロン

*添付資料4 各炉型の建設費等概算より引用

3.1.3 運営・連携における人員及び費用に関する想定目標の設定

規模別・目的別の各ケースについて、運営・連携に関する人員及び費用に関する想定目標の設定を行う。上述のように、今回検討の研究炉の利用イメージである「民間・連携利用重視型」を目指すため、運営や連携においては効率的かつ効果的な体制や費用を目指すことが望ましいことから、既存事例だけでなく、先進事例である「あいちシンクロトロン光センター」での取り組みや状況を十分参考にして想定目標の設定を試みる。

利用支援の人員や費用は、「民間・連携利用重視型」ケースについて想定目標として設定した。

先進事例では、利用支援関連として共同利用コーディネータや調査・分析支援、共同研究開発促進、成果活用支援、技術普及啓発、人材育成等といった機能を担う人員として 29 名（財団 20 名、嘱託+企業 OB 9 名、これ以外に産学連携や産業支援機能を担う県職員 8 名、運転保守等を兼務する大学研究者 23 名）を配置している。これを参考に「民間・連携利用重視型」の利用支援に関する目標設定案として人員を約 30 名、費用を約 4.0 億円と想定した。同様に「基礎・学術研究重視型」ならびに「小規模・単体運営型」についても、「民間・連携利用重視型」の想定案をもとに規模等を考慮し想定目標を設定している。

3.2 想定される運営主体の調査

規模別・目的別の運営や連携の在り方を踏まえ、運営の担い手となる運営主体について検討を行う。運営主体の担うべき業務と計画策定の役割分担を表 3-2 に示す。運営主体は概念設計を進める現段階から、その後の基本設計段階、施設整備段階を経て、実際の運営が開始されるまでに綿密な計画策定を行う必要がある。

そのため、設計内容や整備状況に整合する運営や維持管理の内容を具体化することが不可欠であるが、様々な関係者が関わるため、主体の立場としてどのように進めるかを把握して取り組む必要がある。この調査では、運営主体の担うべき役割等も含めた整理を行う。

運営主体の役割は、前掲した表 3-1 に示すように、主体の利用目的である学術研究、人材育成が前提にあり、その上で、維持管理や安全管理を大学と研究機関が共同で担うことになる。さらに産学連携や共同研究、民間利用等の外部利用は、関係者の円滑な利用や取り組みを支援する機能や体制を運営主体に備えることが必要であるため、外部利用計画を策定することにより、着実な実施準備を進め、円滑な取り組みにつなげる。

表 3-2 運営主体の担うべき業務と計画策定の役割分担

	大学	研究機関	備考
施設整備計画	△	○	研究計画 共同・外部利用計画 維持管理計画 安全管理計画 等 と整合
機能・性能・能力	○ 検討	○ 検討	
規模・立地	△	○	
整備コスト・スケジュール	△	○	
研究計画(基礎・学術)	○	△	PDCAサイクル適用
共同・外部利用計画	○ 計画・運用	○ 計画・運用	連携体制構築 PDCAサイクル適用
維持管理計画 安全管理計画	△	○	PDCAサイクル適用

試験研究炉の概念設計は、利用目的や機能（スペック）や能力等の技術的な側面から検討し整理する段階にあるため、運営主体についても、関係する主体ならびにその中でも中心的な役割を担うと想定される特定の法人を据えつつ、網羅的に関わり方や検討の進め方を共有する必要がある。

運営主体ならびに事業関係者による取り組みの流れを図 3-1 に示す。取り組みの流れとしては、中心的な位置づけ・立場にある研究機関と大学が概念設計の後、基本設計や施設整備計画を、さらにこれらに整合して、維持管理計画や安全管理計画、研究計画や共同・外部利用計画を順次策定する。特に、施設整備が本格化すると、ハード面での機能、能力や仕様の詳細が明確になるため、運営段階での各種必要業務である維持管理、安全管理、さらに個々の研究、民間利用や共同・連携研究等各種計画内容の精度も上げることが可能となり、より実効的・効果的な内容のとりまとめが出来ることになる。さらに、それら計画に基づき、運営体制の構築や予算等確保の具体化を進めるものとなる。

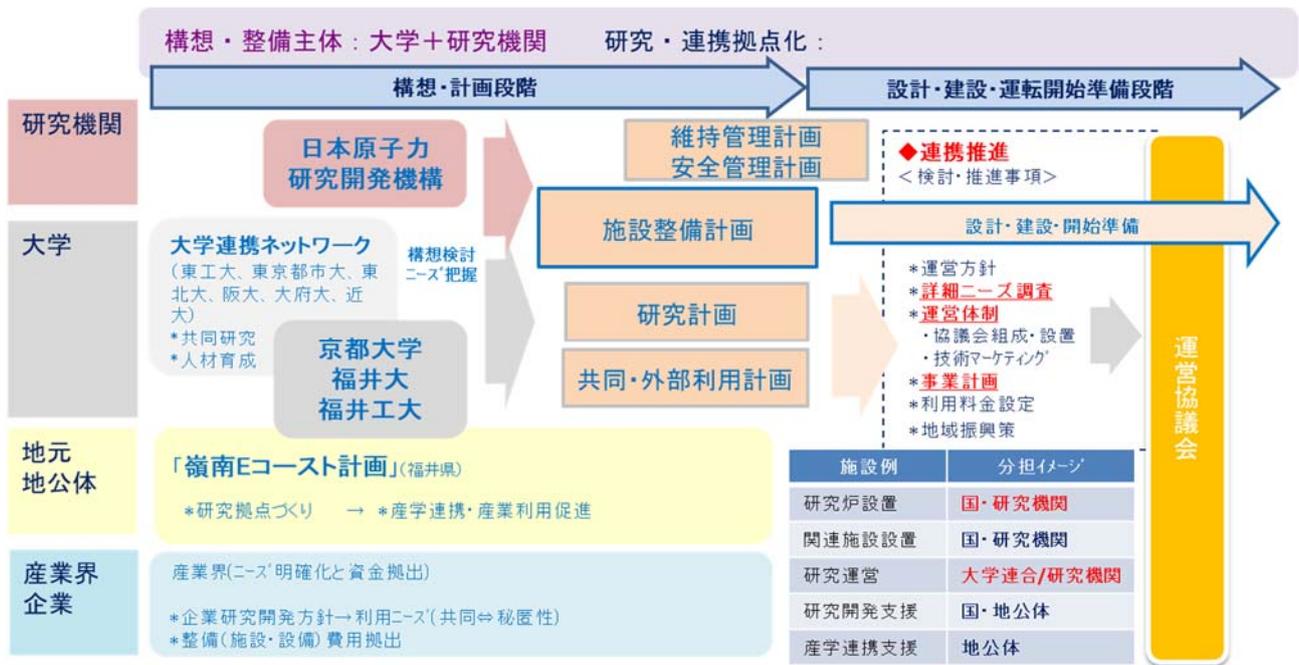


図 3-1 運営主体ならびに事業関係者による取り組みの流れ（想定）

これらの取り組みは、計画（PLAN）→実施（DO）→評価（CHECK）→見直し（ACT）、即ち PDCA サイクルに基づいた展開を基本とするが、民間の経営活動とも連動するため、全ての関係者において効率的かつ効果的な運営や適正なガバナンス確立を図ることが期待できる。

今後の概念設計以降の段階での研究炉の施設・設備等ハード面での内容の詳細化に整合した運営や連携の具体化を進めることが不可欠である。

このため、関係者において各種計画（研究、維持管理、安全管理、共同・外部利用等）策定を担う主体を特定し、体制構築と予算確保、さらに連携・分担し準備を進める関係主体の取り組み内容の明確化、さらに推進・取り組みに関するロードマップ等を整理し、円滑な計画策定ならびに連携、協議・調整による具体化、準備を進めることが重要といえる。

3.3 国内利用実績

国内の試験研究炉の利用実績を臨界実験装置 KUCA、低出力炉 UTR-KINKI、中出力炉 KUR、高出力炉 JRR-3 のそれぞれの利用者数について、各大学、研究機関の協力を得ながら表 3-3 にとりまとめた。利用区分の考え方は、人材育成は主に学生の履修科目等知識習得をメインとするものを教育に、院生の論文作成の実験研究や原子炉工学実験及び企業、自治体等を対象とした安全教育等を訓練に分類した。また、基礎研究、ビーム利用、照射利用の分類を試みたが各研究炉の利用体系が異なる等厳密な利用者の分類は困難であったため、概ねの傾向性を示すデータとして整理した。

集計結果は、KUCA が年間約 1,000 人日、UTR-KINKI が年間約 1,200 人日、KUR 及び周辺実験設備等が年間約 5,400 人日、JRR-3 が年間約 22,500 人日の利用者数である。京都大学複合原子力科学研究所については、KUCA と KUR に分類したが、KUR は周辺実験設備、ホットラボラトリ、電子線ライナック、FFAG 等の合計値であり、KUR 単独の利用者数ではない。

各集計結果の詳細については、添付資料 6 に示す。

表 3-3 国内試験研究炉の利用実績

区 分		臨界実験装置	低出力炉	中出力炉	高出力炉	
		KUCA	UTR-KINKI	KUR	JRR-3	
					JAEA 実験装置	大学 実験装置
人材 育成	教育(学生等)	811 人日	984 人日	516 人日	(143 件) 照射利用 の内数	(9,987 人日) ビーム利用の 内数
	訓練(院生、 企業、自治 体等)	223 人日	74 人日	2,076 人日		
基礎研究			/	165 人日	2,821 人日	22,533 人日
ビーム利用		—				
照射利用		—		327 件 基礎研究 を含む		—
合 計		1,034 人日	1,223 人日	5,413 人日	22,533 人日	
備 考		H25年度実績	H29年度実績	H25年度実績 KUR、ホ ットラボラ トリ、電子 線ライナッ ク、FFAG 等の合計	H22年度実績	H22年度実績

以下、各研究炉について概説する。

【KUCA】

国内唯一の大学の臨界実験装置である KUCA は人材育成及び基礎研究を目的として利用されており、平成 25 年度の利用実績は、教育として学生院生を対象とした炉物理実験教育が 811 人日、院生等を対象とした訓練、基礎研究が 223 人日の計 1,034 人日である。

炉物理実験教育の参加者は図 3-2 に示すように年間約 150 人程度で、その内訳は、全国の大学院生が 120 人(11 大学)、海外が 30 人となっている。1975 年度からの 2017 年度までの累積は約 4,000 人を超えている。¹⁾

教育内容は、臨界実験装置を利用した原子炉物理基礎、放射線計測、炉施設の安全管理等である。

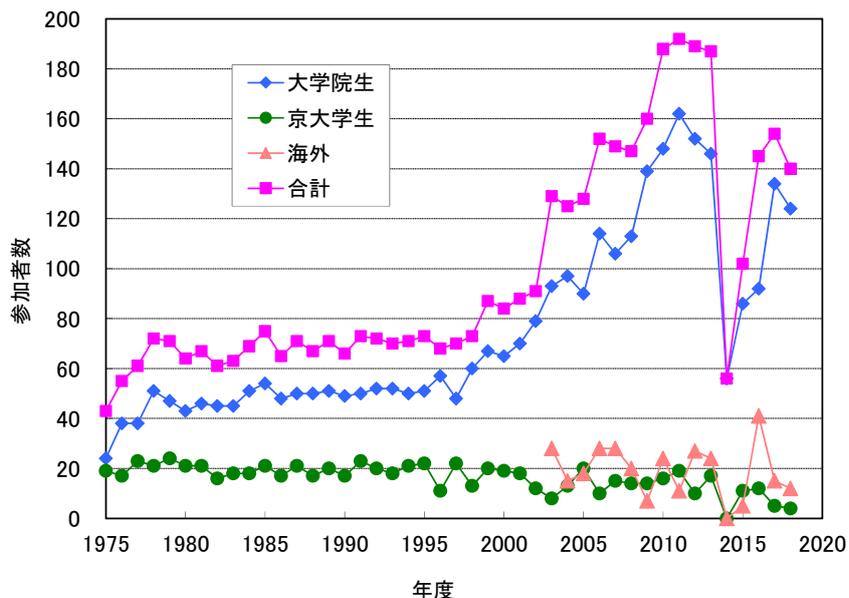


図 3-2 KUCA の炉物理実験教育参加者推移 1)

【UTR-KINKI】

平成 29 年度の利用実績は、教育が 984 人日、訓練が 74 人日、基礎研究が 165 人日、計 1,223 人日である。平均で 2 日～3 日/人程度の利用日数となる。

教育は、原子炉運転・実験実習として、臨界近接実験、中性子ラジオグラフィ、中性子束分布測定等を学内、学外（国内の 10 大学、韓国慶熙大学）の学生を対象として実施している。学生の参加推移を図 3-3 に示す。また、小・中・高校等の教員を対象として、放射線、原子炉基礎等の講義と、原子炉運転や中性子ラジオグラフィ等の実習、福島再生・復興への現状と課題に関する討論等を実施しており 2)、これらも教育の人数に含めた。

上記の他、企業研修や海外の利用については、訓練に分類した。

基礎研究については、学内の利用だけでなく近大炉利用共同研究として大阪大学を窓口として 16 課題を実施しており、図 3-4 に示すように傾向としては物理系が多く、中性子測定技術の開発や原子力・放射線教育のための教材開発等もある。

また、上記の原子力人材育成だけでなく、年間約 1,200 人の見学者を受け入れ、原子力の PA、普及活動にも貢献している。

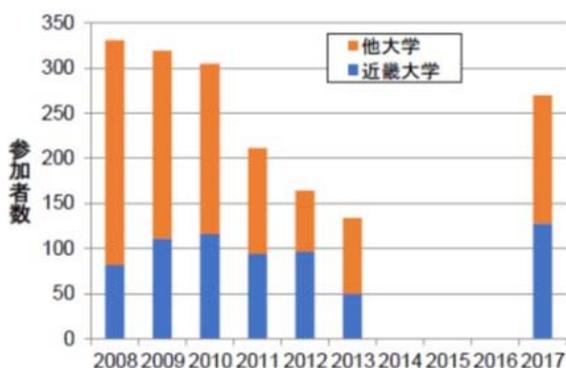


図 3-3 原子炉実習参加数（学生）の推移 3)

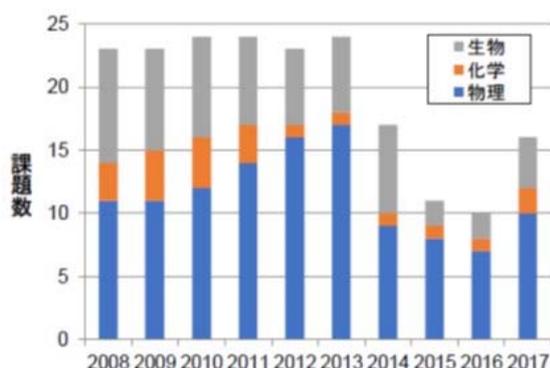


図 3-4 共同利用研究の採択課題数の推移 3)

【KUR 及び周辺実験設備等】

KUR 及び周辺実験設備等の利用は主に公募による共同利用研究の制度に基づくもので、平成 25 年度は、学生等を対象とした教育が 516 人日、院生、企業、自治体等を対象とした訓練が 2,076 人日、教職員が実施する共同利用による基礎研究が 2,821 人日の計 5,413 人日である。

教育は、共同利用や原子炉工学応用実験（原子炉反応度測定、中性子場の線量測定、未臨界実験等）であり、訓練は、原子力安全教育（放射線安全教育、中性子線医療教育、地震・津波安全教育）等である。⁴⁾

なお、共同利用の申請件数は、図 3-5 に示すように年間 200～300 件程度である。

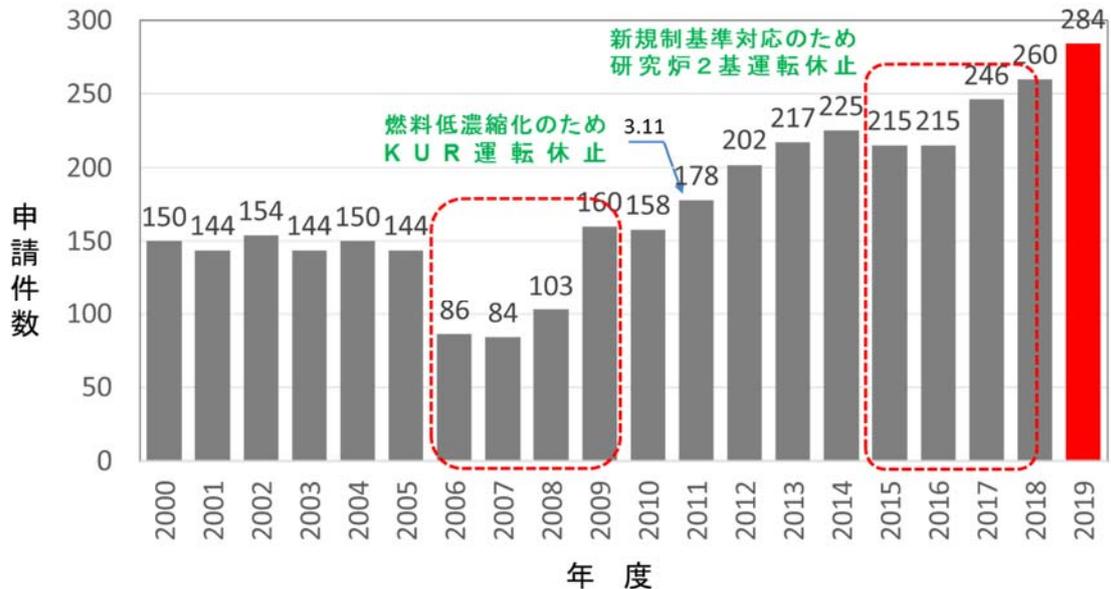
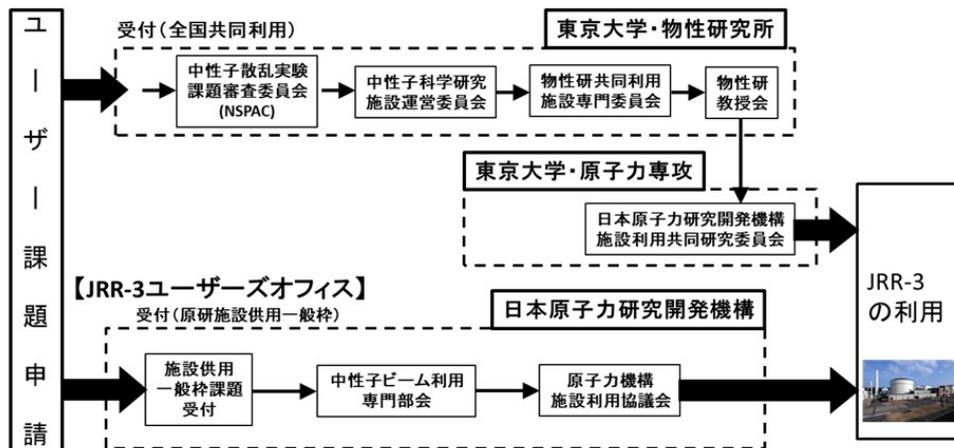


図 3-5 複合原子力科学研究所における共同利用実績¹⁾

【JRR-3】

JRR-3 をユーザーが利用する場合は、図 3-6 に示すように JAEA の実験装置は JRR-3 ユーザーズオフィスが、大学の実験装置は東京大学・物性研究所が窓口となり、それぞれの機関で実験課題公募の審査が行われる。



日本原子力学会 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より

図 3-6 JRR-3 の利用実験課題の公募・審査制度⁵⁾

JRR-3 全体のビーム利用の年度推移を図 3-7 に示す。このうち 2010 年度（H22 年度）の利用は 22,533 人日であり、JAEA が 50%、大学が 40%、民間が 7%の利用者の分布となっている。これを利用分野毎に東日本、西日本に分類すると、図 3-8 に示すように東日本の中性子散乱の利用が約 70%と最も多く、次いで西日本の中性子散乱が約 14%、東日本の中性子即発ガンマ線分析 9%、東日本の中性子ラジオグラフィ 4%の順となっている。

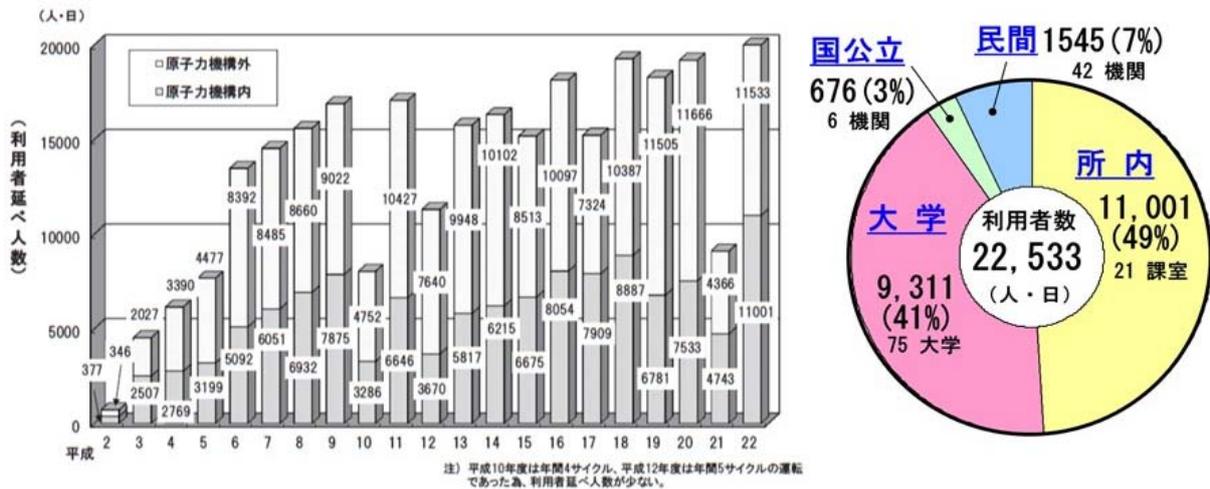


図 3-7 JRR-3 のビーム利用年度推移⁶⁾と 2010 年度の利用者分布⁷⁾

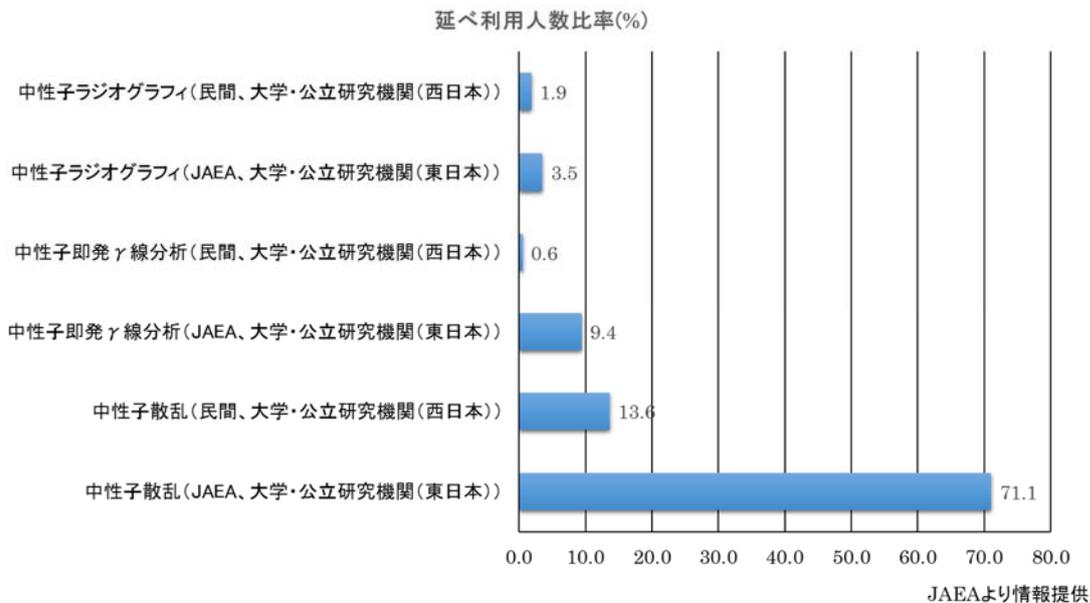


図 3-8 JRR-3 によるビーム利用分野 (2010 年度)

【参考文献】

- 1) 川端祐司“京都大学における試験研究炉の研究教育活動と地域との関係”文部科学省つるが国際シンポジウム (2019)
- 2) 伊藤哲夫“近畿大学における原子力人材育成”科学技術・学術審議会 原子力科学技術委員会 原子力人材育成作業部会 (第3回) (平成27年10月)
- 3) 若林源一郎“応用物理学会 放射線 VOL.45,NO.2,PP 105-109” (2019年7月)
- 4) 中島健“京都大学原子炉実験所の研究炉 (KUR、KUCA) について”科学技術・学術審議会 原子力科学技術委員会 原子力人材育成作業部会 (第3回) (平成27年10月)
- 5) 日本学術会議“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8月)
- 6) JAEA-Review2011-053 “平成22年度研究炉加速器管理部年報” (2011)
- 7) 三浦幸俊“原子力機構における研究炉等の利用状況と社会貢献”文部科学省つるが国際シンポジウム (2019)

4. 試験研究炉の建設開始に必要な諸事項の調査

4.1 国内における試験研究炉の規制に関する調査

原子炉施設に関する規制は、東京電力福島第一原子力発電所の事故を受けて大幅な見直しや強化がなされ、新規規制基準が策定・施行された。試験研究炉の設置許可の申請、審査については、平成 25 年 12 月に制定・施行された「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則（以下、試験炉設置許可基準規則という。）」と規則の解釈及び審査ガイド等に従って行われている。

もんじゅサイトに新たに試験研究炉を設置する場合も、基準規則等に適合するように施設の設計・安全評価等を行う必要がある。本調査では、試験炉設置許可基準規則の出力区分（低出力炉・臨界実験装置及び中出力炉、高出力炉）に応じた規制内容の違い、及び既設の試験研究炉の対応状況の調査を行った。これを基に、もんじゅサイトに設置する試験研究炉について出力区分に応じた施設設計への規制要求と考慮すべきサイト条件を調査・検討した。

4.1.1 試験炉設置許可基準規則

平成 25 年に制定された試験炉設置許可基準規則においては、水冷却型研究炉は、原子炉出力に応じて 3 区分 {低出力炉（臨界実験装置を含む）は 500kW 未満、中出力炉は 500kW 以上～10MW 未満、高出力炉は 10MW 以上～50MW} に区分されており、規制要求・程度が異なる。低出力炉は、自然対流で炉心冷却可能であり、事故時の外部への影響が小さいことから規制上の要求程度は緩和されている。（ナトリウム冷却型高速炉、ガス冷却型原子炉は出力区分がない。）

本基準規則は、既設の試験研究炉の設置変更許可（承認）申請の審査過程において、出力区分に応じた規制内容の見直し（事故時の影響程度に応じた規制：グレーデッド・アプローチの適用）として、耐震重要度分類の被ばく線量の見直し、評価する自然事象の条件（竜巻、火山及び外部火災等の評価条件）の見直しが行われ、規則の解釈に反映された。試験炉設置許可基準規則の各条項における出力区分に応じた規制要求内容を添付資料 7 の表-1 に示す。

4.1.2 試験炉設置許可基準規則に対する既設の試験研究炉の対応状況

既設の試験研究炉は、新規規制基準の試験炉設置許可基準規則に適合するための設置変更許可（承認）申請を平成 26 年に行い、2～4 年の審査を経て設置変更許可（承認）を得ている。本調査では、試験炉設置許可基準規則に従い設置変更許可（承認）申請を行って許可（承認）を得た試験研究炉のうち、JRR-3（JAEA：20MW）、NSRR（JAEA：300kW+パルス）、KUR（京都大学：5MW）、KUCA（京都大学：臨界実験装置）及び UTR-KINKI（近畿大学：出力 1W）について試験炉設置許可基準規則への対応状況を調査した。これらの試験研究炉の設置変更許可（承認）申請書¹⁻⁵⁾の比較を添付資料 7 の表-2 に示す。

4.1.3. もんじゅサイトに設置する試験研究炉のサイト条件

もんじゅサイトに設置する試験研究炉は 6 つの炉型が検討されている。上記 4.1.2 試験炉設置許可基準規則に対する既設の試験研究炉の対応状況における既設試験研究炉の設置変更許可（承認）申請書の設計・評価、許可条件を参考に、もんじゅサイトに試験研究炉を設置する場合に考慮すべき出力別（高出力炉/中出力炉及び低出力炉/臨界実験装置）のサイト条件について検討し

た結果を表 4-1 に示す(詳細は、添付資料 7 の表-3 を参照)。

なお、もんじゅサイトに試験研究炉を建設する場合の関連法令として、試験炉設置許可基準規則の他に環境影響評価法、自然公園法、森林法等による法令もあり、所要の設計対応と許可申請手続きが必要である。

以上の調査結果をまとめると、試験研究炉に対する試験炉設置許可基準規則上の施設設計要件、考慮すべきサイト条件(地盤、地震、津波、外部自然条件等)は、表 4-1 に示すようにグレード・アプローチの考え方が適用され、出力が 500kW 未満の低出力炉/臨界実験装置の場合と 500kW 以上の高出力炉/中出力炉の場合で異なっている。特に、施設設計に大きな影響を及ぼす耐震重要度分類については、想定する事故状態における周辺公衆の被ばく線量によって分類される。公衆の被ばく線量は、炉心に内包される放射性物質の種類・量及び施設外への放出率、炉心位置から公衆までの距離、放出される放射性物質の拡散状況(サイト気象条件)等を適切に評価し解析する必要がある。この評価のためには、原子炉設置位置における地質調査と合わせて、サイト気象観測データの取得が必須である。これらの情報を基に、施設設計・評価条件を設定する必要がある。

表 4-1 もんじゅサイトの試験研究の設計・評価で考慮すべきサイト条件（試験炉設置許可基準規則の主な関係条項）

条項	規則内容	もんじゅサイト条件（暫定条件）		設定根拠等 6.7)	備考
		高出力炉/中出力炉	低出力炉/臨界実験装置		
第 3 条	試験研究用等原子炉施設の地盤 (1) 十分な支持力 (2) 耐震重要施設の地盤 ・安全機能を損なわない変形 ・変位が生じないこと	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉施設の設置地盤は、堅固な安定した地盤であること。活断層がないこと。 試験研究炉を山側資材置場と焼却炉場所に設置する場合、この場所の地盤の地質・地質構造に関する情報が不足。⇒原子力規制委員会の地質・地質構造調査に係る審査ガイドに従って地盤に関するデータを取得し、試験研究炉の設置地盤としての適性を確認する必要がある。 		<ul style="list-style-type: none"> 山側資材置場と焼却炉場所の数箇所について浅いボーリング調査のデータあり。一部のボーリングコアに粘土化帯（破砕帯）が見られる。審査ガイドに従った詳細な地質・地質構造調査が必要。 	
第 4 条	地震による損傷の防止 (1) 地震力は安全機能喪失時の影響程度に応じて算定 (2) 耐震重要施設の安全機能 ・大きな地震力に対する機能保持 ・斜面崩壊に対する機能保持	<ul style="list-style-type: none"> 高出力炉/中出力炉の原子炉建屋等は耐震重要施設（耐震 S クラス）相当。 耐震重要施設の動的耐震設計に必要な基準地震動 Ss を設定し、施設の安全機能の評価。 耐震重要施設周辺の斜面の地質調査と安定性評価 	<ul style="list-style-type: none"> 低出力炉、臨界実験装置の原子炉建屋は耐震 B クラス又は C クラス相当。地震力は建築基準法による。 	<ul style="list-style-type: none"> 試験研究炉施設の原子炉等の各設備、支持構造物等の耐震重要度分類は、想定事故当たりの周辺公衆の受ける実効線量により区分。この被ばく線量評価に必要な設置場所での気象データの取得が必要。 もんじゅ施設で設定した基準地震動 Ss の適用性を検討要。 	耐震 S クラス： 5mSv 超 耐震 B クラス： 50μ～5mSv 耐震 C クラス： 50μSv 以下
第 5 条	津波による損傷の防止	<ul style="list-style-type: none"> もんじゅ施設の津波評価では、荷揚岸壁（EL+5m）での津波評価高さは 8.8m。津波対策が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 敦賀市の津波ハザードマップでの津波高さは 2～5m。 	<ul style="list-style-type: none"> 山側資材置場と焼却炉場所は、EL+115m～132m であるので津波は達しない。 	
第 6 条	外部からの衝撃による損傷の防止 (1) 自然現象 （洪水、風、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、生物学的事象、森林火災等）	<ul style="list-style-type: none"> 自然事象の評価条件は、原子力発電所の審査ガイドを準用。（以下は、評価項目の例。） 竜巻：国内の最大竜巻 F3(92m/s)に余裕をみて 100m/s を想定。 積雪：200cm を想定。 周辺 10km 以内の火災の影響評価。 	<ul style="list-style-type: none"> もんじゅ近傍の最大竜巻 F2(69m/s)を想定。 積雪：200cm を想定。 隣接する森林火災を想定して評価。 	<ul style="list-style-type: none"> もんじゅの竜巻評価の風速は 100m/s として固縛対策。 敦賀市の最大積雪記録は 192cm。 	各項目の評価条件等は添付資料 7 の表-3 を参照。

条項	規則内容	もんじゅサイト条件（暫定条件）		設定根拠等 ^{6.7)}	備考
		高出力炉/中出力炉	低出力炉/臨界実験装置		
第6条 (続き)	(2) 人為的事象 (飛来物(故意でない飛行機落下等)、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、船舶の衝突、有毒ガス、電磁的障害等)	<ul style="list-style-type: none"> 故意でない航空機落下確率を評価。衝突確率が判断基準(10⁻⁷回/炉・年)を超える場合は対策要。 半径10km以内の近隣工場等の火災・爆発、航空機落下の火災等の影響を評価。 	<ul style="list-style-type: none"> 航空機落下評価は同左。 サイト内及び近隣の火災、航空機落下の火災を想定。 	<ul style="list-style-type: none"> もんじゅ施設の航空機落下確率は約7.4x10⁻⁸回/炉・年で、故意でない航空機の落下対策はせず。但し、研究開発段階発用原子炉の基準規則では、テロ等の故意による大型航空機衝突の評価・対策が別途必要。 	
第22条	放射性廃棄物の廃棄施設	<ul style="list-style-type: none"> 試験研究炉の通常運転時に放出される放射性廃棄物による公衆の被ばく線量は、もんじゅ施設からの線量を合わせて50μSv/年以下とする。 		<ul style="list-style-type: none"> サイトから放出される気体・液体放射性物質のガンマ線及び摂取による周辺公衆の被ばく実効線量も合わせた線量限度は1mSv/年。ALARAによる目標線量の50μSv/年以下に管理。 	
第24条	周辺における直接ガンマ線等からの防護	<ul style="list-style-type: none"> 試験研究炉の通常運転時に原子炉等から出る敷地境界での直接ガンマ線及びスカイシャインによる線量(空気カーマ)が、もんじゅ施設からの線量も合わせて50μGy/年を超えないこと。 		<ul style="list-style-type: none"> 廃止措置でのもんじゅ施設からの直接ガンマ線とスカイシャインによる敷地境界(ESE方向)の線量は、5.2x10⁻⁴μSv/年。 	
第40条	多量の放射性物質等を放出する事故の拡大防止	<ul style="list-style-type: none"> 高出力炉/中出力炉は、原子炉施設の全ての安全機能を喪失した場合を想定し、事故拡大防止をする施設(常設設備、可搬式設備)を設置。 	<ul style="list-style-type: none"> 本条項は、低出力炉/臨界実験装置には適用されない。 	<ul style="list-style-type: none"> もんじゅ施設は、大規模損壊事故、テロリズム等を対象にした重大事故等対処設備を設置。 	

4.2 試験研究炉のニーズの整理

4.2.1 ニーズ調査の概要と試験研究炉の利害関係者のニーズの目標

試験研究炉を計画する場合には多様なニーズ調査を行い、そのニーズに基づいて試験研究炉の機能や役割及び設備の仕様や運営方針等が決定される。ニーズについては、日本原子力学会の資料⁸⁾や IAEA の計画ガイドライン⁹⁻¹¹⁾等を参照し、昨年度までに行ってきた対面ヒアリング調査と文献¹¹⁻¹⁷⁾による事例調査を中心にまとめる。

対面調査の主な対象は、本調査の有識者委員会の有識者を始め、学術関係で活躍をしている大学や研究所、原子力関係企業、自動車・電子機器関係の研究開発企業、さらには地元の化学・繊維・電子機器等の関係企業の方々である。

また、文献等からのニーズの調査は、約 10 年前に行われた日本原子力学会の試験研究炉のニーズ調査結果や、京都大学複合原子力科学研究所の公開資料、OECD NEA や IAEA の研究炉の利用に関する文献等に基づく評価結果を纏めた。

また、ニーズの調査に当たってはもんじゅサイトに出力 10MW 以下の試験研究炉を建設することを前提として、主要な利害団体や組織からのニーズを整理すると以下のようになる。

- ①政策的なニーズ：我が国の試験研究炉の計画策定を纏めるために全体の計画概要やプロジェクト期間、建設サイト、資金問題等についての骨格についてのニーズである。
- ②立地地域のニーズ：立地自治体は、建設に際して社会経済的ニーズが最優先であり、試験研究炉の建設から廃止措置までの安全確保、廃棄物・使用済み燃料の処理・処分等の国の政策に対するニーズがある。
- ③学術界からのニーズ：試験研究炉の利用や運営管理の一部を占める学術界も多様なニーズを持っている。試験研究炉は先端的な学術活動を継続して行うためのツールであり、試験研究炉本体は勿論、学術活動を活性化するための環境やインフラについても多くのニーズがある。
- ④人材育成組織からのニーズ：試験研究炉の利用面での大きなシェアを占めており、多くの原子力専門家の育成を目指す大学や高専、原子力・放射線を学ぶ理工・医学系学生、原子力技術者及び研究者の導入教育や継続的専門家教育（CPD）等の訓練利用等があり、試験研究炉だけでなくシミュレータ等のツールの利用を含め技術力の醸成や継承を目指した多くのニーズがある。
- ⑤エネルギー産業界のニーズ：原子力発電事業者からの試験研究炉の利用ニーズは、現行の発電炉の高度化や次世代炉の研究開発等多くの技術分野にわたる。また海外では熱エネルギー利用を考えている産業からのニーズも数多くある。
- ⑥一般産業界からのニーズ：素材産業、電子機器産業、自動車産業、医療・製薬産業等国内の主要な企業が、中性子ビームを使った技術である構造や構成元素の解析や分析、試験研究炉で製造される RI の利用、さらに中性子による核変換による材料開発等の利用を目標にしたニーズがある。

⑦その他の分野のニーズ：国内では以前、BNCT の場として試験研究炉を利用していたが、近年は粒子加速器による方法が主流になり、試験研究炉の利用例が減少してきたため、基礎的な研究を除きニーズの対象として取り上げることは見合わせた。

また、試験研究炉を使った半導体材料への不純物ドーピングは半導体材料の企業への打診の結果、当面は海外の研究炉の利用で問題がなく、サプライチェーンが構築されていることからここでの対象から除外した。

4.2.2 試験研究炉のニーズの詳細

(1) 試験研究炉の利用に関するニーズ

昨年度の調査結果や引き続き継続して行ってきたヒアリング調査及び文献・資料調査の結果の詳細を添付資料 8 の表 3 に示した。

ここでは最近の情報も加えアップデートし、2 章 試験研究炉の概念設計実施に向けた調査で扱った規模別試験研究炉の利用での分野と整合を取って整理し、主要なニーズと研究炉への主要な要件を表 4-2 に示す。

表 4-2 試験研究炉の利用ニーズの概要

分野	項目	代表的なニーズ	組織				試験研究炉の 主要な要件
			大学	研究 機関	産業	自治 体	
人材 育成 8.18. 19)	教育	原子力専攻学生の教育	◎	○	○	○	起動/停止等を含む運転 の実習、外国人立ち入り
		理工系・医学系学生の教育	○		○	○	
		国際的研修生の受け入れ		◎		◎	
	訓練	炉工学、ビーム科学 OJT	◎		◎		熱流動/シミュレータ/保 全モックアップ等
		原子炉設計・運転、保全等の 技術継承	◎		○	◎	
企業技術者 CPD、職業訓練		○	○	○	○		
基礎 基盤	基礎研究	MA 核データ採取 ^{14,16)}	◎	○	○		炉心中性子測定や RI 製 造機構の整備、炉外ニュ ートリノ測定設備
		ADS 開発 ^{14,16)}	○	◎			
		短寿命 RI 利用 ^{15,17)}	◎				
		ニュートリノ利用監視装置 ¹⁸⁾	◎				
	研究開発	計測装置開発と校正技術		○	◎		炉心構成の変更や炉内 計装可能な炉心配置
		次世代炉炉心構成研究	◎	○			
燃・新材料の核特性		○	◎	○			
照射 利用	燃・材料	事故耐性材料の照射挙動 ¹⁸⁾		○	◎		燃・材料の照射設備、照 射後試験設備確保
		次世代炉燃・材料照射挙動 ¹⁸⁾	○	○	○		
		MA 燃料照射挙動 ¹⁶⁾	○	◎			
	RI 製造 ²⁰⁾	短寿命 RI の製造	◎	○	◎		照射設備と精製・調整施 設の確保、発送施設
		医療用・工業用 RI 製造		○	◎		
		α線照射用 RI 製造研究	○	○	○		
	生物・ 生体照射	BNCT 基礎データ取得	◎				炉外照射用ビームライ ン、生体小動物飼育施設
生命科学関連試料照射		○	○				
被ばく評価基礎試験		○	○	○			
ビー ム利 用	放射化分 析 ¹⁷⁾ (含 PGA)	高分子材の不純物分析		○	◎		即発γ線分析 (PGA) 設 備、試料輸送自動ラビッ トシステム
		環境・食品中の微量物質分析	○	○	○		
		電子機器材料中の不純物分 析	○		◎		
	中性子ラ ジオグラ フィ ¹⁵⁾	軽元素挙動撮像化(水、油等)	○	◎	◎		大視野用中性子ビーム ライン及び極限環境室
		動画・3D 画像の利用と視野 拡大	◎	◎	◎		
		極限環境下の撮像化	◎	○	○		
	中性子散 乱 ^{14,15)}	粉末回折でのリチウムイ オン電池 (LIB)、水素吸蔵評価	○	○	◎		トライアルユース用設 備 (ビームラインや散乱 測定装置)
		残留応力測定や小角散乱技 術	◎	○	○		
		結晶回折によるタンパク質 構造解析	◎	○	○		
	先端ビー ム応用 ^{15,17)}	陽電子消滅法による欠陥解 析	◎				陽電子導入中性子ライ ン、遮蔽室
メスバウアー法による構造 解析		◎					

(注：◎は比較的大きなニーズ、○はニーズがあるが大きくはない)

なお、この表には、分野ごとの代表的なニーズ項目と、それらのニーズがどのステークホルダーが求めているか、そして試験研究炉の機能設計や運用等の検討にとって明記すべき項目等を記入した。

(2) 研究炉の役割や機能についてのニーズ

もんじゅサイトに新設する試験研究炉の役割や機能に関するニーズの代表的な項目を以下に示す。

- ・ 散乱技術を使った先端材料の開発のためには、**J-PARC** のような出力の大きな中性子源が必要であるが、中出力（10MW 以下）炉を使った小回りの利く試験研究炉でも萌芽的研究やトライアルユースに利用するなど役割があり、段階を踏んだ開発には有効な手段である。
- ・ 試験研究炉の利用一般に際しては、「使いやすさ」は重要な因子である。ドイツ **FRM-2** での散乱研究用のビームラインは使いやすく参考になる。
- ・ マシントimeが確保でき、かつ費用が安く安定に継続した運転が可能なこと等も重要な因子である。
- ・ **RI** 製造では、安定供給や利用費用が安価（輸入品に比べ）であることが要求され、さらに停止時に備えたバックアップの研究炉（国内外を問わない）の確保が必要。
- ・ 新規の研究炉で他所にはない特徴を考えて建設をすべきである。学術的な利用では特にその傾向がある。
- ・ 炉型選定に当たっては、国内外の **SMR** の動向もみて実験炉的な取り組みも必要。

(3) 利用・運用上のニーズ

利用する上でのルールや運用について、学术界や産業界から以下のようなニーズが提起された。

- ・ 試験研究炉を幅広い学術分野で利用する場合は、原子炉の性能よりも研究環境（研究者の層の厚さ、図書館、宿舎、アクセスの容易さ、部品試作が可能な事業者の存在等）が重要であり、研究炉の設計とともに環境づくりは重要な課題である。
- ・ ユーザーフレンドリーな実験・解析環境への期待も高く、コーディネータ制度や、ワンストップサービス体制へのニーズもある。「あいちシンクロトロン」のような産業界の利用への便宜が必要（コーディネータの民間出身者活用やトライアルユースの割引制度）。
- ・ 共同研究の場合には成果の公表が前提であり、メリット・デメリットの事前評価が重要である。
- ・ データの分析・解析への自動化の要求も多い。また機密を保つ枠組みの中で、メールインサービスも欲しい。
- ・ ビームラインの専有的な利用と費用負担の合理的な枠組みの検討が要求されている。
- ・ 関西地区の放射光施設等と連携した利用形態があると有効である。
- ・ 10年先の完成までは長すぎる。より早く建設してほしい。
- ・ 日本の研究炉の学術・産業応用は外国に比べ周回遅れである。このことを意識したうえで使い勝手の良い試験研究炉を建設すべきである。
- ・ 人材育成の費用については公費で賄うべきである。
- ・ もんじゅサイトでの建設の場合、廃止措置と建設の作業の干渉や、規制上の課題を整理して

おく必要がある。

- ・新たな試験研究炉の建設機会を捉えて、人材育成や技術継承に役立つような仕組みを取り込むことを検討すべきである。

4.2.3 概念設計や運営体制への反映

以上のような利用ニーズを初め、運営や付帯施設、研究環境等への要望等を数多く収集することが出来たが、これらを精査し実現可能性のあるものについて今後の概念設計や運営体制、及び周辺設備の設計時の仕様へ盛り込むための要件も数多くあり、多くの検討が必要である。

ここでは代表的な反映事項への提言を以下のように整理した。

(1) 人材育成への提言

人材育成の対象者の定量的な扱いについて、最近の内閣府の調査¹⁹⁾や日本原子力産業協会の資料を基に整理すると、表 4-3 になる。

表 4-3 人材育成対象規模

(人)

育成対象	全 国	関西系
原子力系学部学生*	328	199
原子力系大学院生*	322	134
非原子力系学生院生**	100	40 (40%と仮定)
医学・薬学系	—	—
海外学生・院生	—	—
電力非原子力系技術者**	70	35 (50%と仮定)
メーカー非原子力系技術者**	60	30 (同上)
行政・研究機関	—	—
合 計	880	438

*2018 年内閣府調査 **2015 年日本原子力産業協会資料

この表の数値を参照して試験研究炉の人材育成に利用する占有率を検討した。京都大学複合原子力科学研究所の報告¹⁵⁾によれば、KUCA を利用した教育には年間約 150 名の学部学生や院生が参加している。この利用期間は 8 週間であり、1 週間当たり約 20 名の教育をすることになる。

これを全国の学部学生の数 330 名に対応させると 16.5 週（年間 50 週、運転期間の 33%）関西系の学部学生だけでも約 200 名で 10 週（全運転期間の 20%）を占有することになる。

さらに大学院生、非原子力系学生、社会人等を合わせると、同じカリキュラムを使って教育した場合、対象者は 880 名になり 44 週（全運転期間の約 90%）占有することとなる。このことを念頭において実運用では、カリキュラムの検討による時間短縮や指導者数（現状では 4～5 名）増加等を検討し、占有率を適正化する必要がある。

一方、現場での実習は手触り感等の絶大な効果があるが、サイトへのアクセスの課題を踏まえると、現場実習と並行して、研究炉への入域手続きが省略できる遠隔またはサテライト集合教育

システムの導入をして試験研究炉の合理的な利用計画を検討すべきである。

また、原子力専攻の院生（全国で 300 名余り、関西で 120 名程度）の OJT も有効であるが、ここでも可能な限り、バーチャルリアリティ等を組み合わせた遠隔自動化操作を取り込んだ実験装置を採用して、サテライトから実験に参加する等の新規のシステムを取り込むことで、多数の参加者を見込めるだけでなく移動時間や費用節約につながる。

この遠隔実験システムは、昨今の 5G 通信や AI 技術を駆使することでかなりの実験装置を遠隔制御することも可能であり、建設と並行して「自動遠隔実験装置付き試験研究炉」の検討を進める事を提案したい。

(2) 学術研究の魅力ある環境創成に向けて

もんじゅサイトに試験研究炉を建設するに当たって、在来の茨城県東海地区や大洗地区、あるいは大阪府熊取地区等と比較して研究環境が不十分では無いかとの指摘は、研究環境の改善ニーズがあると解釈出来ることから今後の課題として検討した。

まず、先行している地域は 50 年以上に亘る年月を経て、現在の環境を育成してきたことを認識する一方、敦賀地区には、国内には例を見ないエネルギー関係の企業群や研究機関及び大学が集中していて、この面の「知的サプライチェーン」（仮称：事業サプライチェーンになぞった造語）の基礎は無意識のうちに確立されている地域であることを認識すべきである。また、福井大学からの提案「嶺南地区での研究の拠点化」構想¹⁸⁾もそのチェーンの一部であり、それらの環境の中で、新たに試験研究炉等の新規の研究・人材育成用のインフラを加えて、新たな「知的サプライチェーン」を構築することで、指摘された課題への解決策の一端になるのではないかと考える。この例として、新規に加える「知的要素」は、先端 AI や先端通信技術等を駆使し、無人研究炉の開発等を標榜したサテライト方式や遠隔・自動化を採用した研究炉の研究開発を産・官・学・金（金融）の連携により展開することも、一種のランドマーク的なテーマになる。

さらにこの概念は学生から若手技術者を加えたプラットフォームを構築して、開発の拠点にふさわしい活動の場の提供としても活用できる。

4.3 経済性評価に関連した項目の評価

4.3.1 概要

試験研究炉の新設や改造に当たって、政策や戦略決定に関連した重要な課題に経済性評価がある。経済性評価については、試験研究炉のライフサイクル全般を長期間にわたって運用する持続可能性の観点から、IAEA は試験研究炉の利用による収入や多くの利害関係者による出資構造を構築し、試験研究炉の建設費や年経費の回収に充てるという運営活動に関する出版物「指針の策定」を発行している^{10.12)}。

しかし、試験研究炉のライフサイクル全体に対する収支の指針は各国によって制度・規制の違い等があり、画一的に提供できるものではないために、標準的な手法の提示ではなく、考え方や先行事例等を提示しているに過ぎない。

そのため、ここではタスクフォースでの議論を含め、試験研究炉の収支に関連する諸項目についての整理の方法論について整理した結果をまとめる。詳細については、添付資料 9 に示す。

4.3.2 試験研究炉における投資額や収支の概要

試験研究炉の経済性については、複雑な会計原則ではなく収支の算出例の調査に留めた。

(1) 試験研究炉の典型的な収支モデル

試験研究炉での初期投資から年間維持費について海外炉等を調査した結果、「Full Cost Recovery」として資金回収を考えた計画を立てる例が多く、以下のような収支項目を取り上げていることが分かった。

表 4-4 試験研究炉の投資及び年経費、収入等の項目

投資・支出項目		収入等の項目
初期投資	立地費用（購入、借地料） 土木工事費 建設費 初期装荷燃料費 付属施設・設備費 エンジニアリング費 コンティンジェンシー費 廃止措置引当金	国庫補助金 コンソーシアム出資金 投資金
経費	職員人件費 減価償却費 燃料費 エネルギー・動力費 機器・施設保守費 税金 その他の雑費	コンソーシアム出資金 国庫補助・支援金 学術研究支援費用 見学・人材育成費 サービス費用(分析、散乱、イメージング) 同位体販売費 寄付金

(2) 建設費の算出方式

試験研究炉の建設費については、国内の建設実績がかなり時間を経過しているために外挿には無理があり、海外の例もそれほど多くは公表されていない。そのため、公表されている海外データの中から、2005年から2018年までに建設に着手した試験研究炉について、炉出力と建設費の関係を近似的に求め、以下のような算出式を導いた。

$$\text{建設費 (MUSD)} = 98 \times (\text{試験研究炉出力})^{0.35}$$

ここで、建設費は海外の建設例であるために、発電炉の国内外の差異（リピート習熟度、規則の格差、国の支援等）を考慮して上式に 1.7 倍の補正をし、日本円換算し、最終的には結果を以下の式を使うこととした。

$$\text{建設費 (億円)} = 185 \times (\text{試験研究炉出力})^{0.35}$$

(3) コンティンジェンシーの考え方

大型プロジェクトの建設費を算出する場合、リスクヘッジのため、見積もり額に幅を持たせて計画を進めることが多い。そこで、研究炉プロジェクトや類似のプロジェクトのコンティンジェンシーの考え方等を調査し、どの程度見積もっているかを精査した。

最近多く使われている手法は、それぞれのコスト構成項目ごとにその変動の発生確率分布を「モンテカルロ法」によって推定する方法が多い。この手法により米国電力研究所（EPRI）では、プラントの概念設計においては、このコンティンジェンシーを費用総額の 50% という値を使っているが設計の段階に応じてこの値は変わってくる。また、国内外でのプロジェクトでは FS（基本設計前）の時点で通常 25～30% 程度としており、かなり幅があることがわかり、採用は今後の課題とした。

(4) 燃料調達費用の考え方

20%未満の低濃縮ウラン燃料の費用については、IAEA²¹⁾の資料を参考にすると、30KUS\$/kg（330 万円/kg）から 60KUS\$/kg（660 万円/kg）程度必要であるとされているが、変動も考慮して計画する必要がある。

また、使用済み燃料の保管施設もオランダや米国（アイダホ）の例では 100～140US\$/kg（11～15 千円/kg）で、再処理費用も 10～15KUS\$/kg（110～165 万円/kg）としている。

(5) 廃止措置引当金

これも国際的に定まった規則はなく発電炉のような引当金制度もないために、相場観をつかむことが難しく、報告されている例も少ない。

米国の研究炉では、米国物理学会²²⁾の報告によると、10MW 以下の研究炉では、200～300MUS\$（220 億円～360 億円）の実績値を提示している。また最近の資料ではフィリピンで計画中の軽水研究炉¹⁰⁾では、建設費の約 7%を引き当てている情報もある。

(6) 試験研究炉の代表的な収入

コスト回収のために、欧米では見学や人材育成から Si ドーピング等のサービスまで広い範囲で収入のある枠組みを構築している。

- ・実習（米国）：1.6 万円/40 名、（OPAL）：45 千円・24 時間（近大炉 1 千円/人日～6 千円/人日）
- ・ラジオグラフィ（OPAL）：56 万円/日（JRR-3 最大 2 万円/日）
- ・散乱（OPAL）：55 万円/日～75 万円/日（JRR-3 最大 6 万円/日）
- ・RI 製造（OPAL）：8 億円/年（⁹⁹Mo の製造費）
- ・Si ドーピング（MIT）：2 億円/年

等が代表的なものである。

4.3.3 経済性評価の今後の展開

前項で述べた経済性に関わる諸項目の詳細は今後定められる運営主体の方針や戦略によって具体化される。しかし、「Full Cost Recovery」の原則は、「投資と効果」の視点から試験研究炉であっても避けて通ることが出来ない課題であるため、関係組織は常に念頭においた取り組みをする

必要がある。これに対し、原子力施設の建設から維持、管理については規制上の制約もあり、この原則を守ることができないという懸念もあることから「技術の発展や人材育成と規制のバランス」について今後も幅広い議論をしていく必要性もある。

4.4 人材育成のツールの考察

4.4.1 試験研究炉を中核にした人材育成のためのツールの考察

平成 29 年度の委託調査報告書の中で「先端的原子力人材育成拠点システム」の基幹構成ツールとして試験研究炉を中核に、伝熱流動装置、シミュレータ、遠隔教育システム、及び保全モックアップを取り上げるとして報告を行った。

この中で、試験研究炉と遠隔教育についてやや詳しく述べたが、今年度は熱流動についての検討をし、その概要を述べる。ここでは、熱流動に関する人材育成や研究開発のニーズや欧米国内で利用されている装置についての調査、分析を行った。

4.4.2 熱流動装置による人材育成や研究開発ニーズ

東京電力福島第一原子力発電所の事故の拡大の背景には電源喪失の対応に熱流動に関する知見が生かされていなかったとの指摘に対して日本原子力学会の熱流動部会は、「熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ」²³⁾を取りまとめ、2017年に公表した。その中で、研究開発のロードマップが示されており、これを支える基盤として人材育成の必要性についても言及していると解釈できる。

このことは、原子炉の安全を確保する上で核物理や核工学に関する知識と並んで熱水力（熱流動）の知識も必要であることの主張でもある。

そのため、熱水力の知識習得には、核工学教育でも取り入れている物理現象の実体験と同様、熱媒体である冷却材の状態把握の体験も重要な要素である。

国内では JAEA、電力中央研究所等で、海外では大学や国立研究所及びプラントメーカー等が実プラントをモデルとした装置（熱ループ）を数多く設置し、研究開発と並行して人材育成にも利用している。

次の項では代表的なプラントメーカーである旧 AREVA 社²⁴⁾（現 FRAMATOME 社）の熱流動装置について概要を述べる。

4.4.3 旧 AREVA 社の熱流動装置の概要

旧 AREVA 社は、米国バージニア州、フランス ラクルーズ、ドイツ エアランゲンに PWR や BWR に関連した熱流動装置を合計 13 基設置し、表 4-5 に示すような試験・研究目的に利用している。

表 4-5 旧 AREVA 社の目指す熱流動装置の機能

- ・ 熱伝達基礎実験
- ・ 臨界熱量評価実証
- ・ LOCA(冷却材喪失事故)評価実験
- ・ 冷却材ポンプ、主要バルブ性能試験
- ・ 事故シナリオシミュレーション実験とコード開発
- ・ 自然循環における臨界熱量評価試験
- ・ 蒸気分離器・乾燥器の実証試験
- ・ 流体振動模擬試験

(旧 AREVA 社文献²⁶⁾を参考に作成)

ここでの試験目的は、研究開発による現象解析やモデルの検証のためだけでなく、重要な機器である循環ポンプの耐久テストや保全作業の訓練等にも使われる。

このことは、平成 29 年度に提案をした「先端的原子力人材育成拠点システム」の中で取り上げた保全モックアップの考え方にも共通するツールを考えていることが分かる。

また、代表的な軽水炉の熱流動試験装置である米国での INKA は、米国で運転中の第 3 世代の BWR プラントの過酷事故のシミュレーションや非常時冷却系の動作確認等を行い、コード開発や解析コード検証に使うものであり、原子炉圧力容器 (RPV) の模擬炉心を実機大(約 31m)にし、数種類の緊急炉心冷却系の模擬流路を設置し、熱量約 22MW を供給して実験が行えるようになっている。この装置は、スイスの PANDA や米国 PUMA 等より約 100 倍の熱を扱える巨大な施設であり、我が国でも大いに参考となるものである。

4.4.4 日本原子力学会「熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ」にみる課題

日本原子力学会のまとめでは、対象とする原子炉事故時対応としては、①事故時の燃料破損防止、②圧力容器健全性維持のための格納容器への注水、③事故時水素発生時対策、④事故時 FP 挙動、等が課題であるとしている。

これらに共通して必要な物理学の素養は、専門家の指摘によれば²⁷⁾、

- * 大きな水プール表面での成層化現象
- * 大きな水プールに噴出される気泡のふるまいと荷重の評価
- * 減圧条件での飽和状態の水からの減圧沸騰現象 (気泡挙動)
- * 不凝縮性ガスを含む広い面での凝縮の劣化のデータ
- * 燃料棒周辺での膜沸騰の発生と核沸騰移行への制御

等を体験できるツールが必要であるとされている。これらの確認のためには、前述の INKA やスイスの PANDA 級の装置が必要であるとしている。

4.4.5 国内の熱流動装置

国内でも、日本原子力研究開発機構の PWR 燃料を対象にした HIDRA、電力中央研究所の BWR 試験装置、福井県関西電力安全システム研究所の伝熱ループ等があるが、目的が限定されており、直ちに多くの学生等の人材育成に利用することは難しいと考えられる。

【参考文献】

- 1) 原子力科学研究所原子炉設置変更許可申請書 (JRR-3 原子炉施設) (2018 年 11 月完本)
- 2) 原子力科学研究所原子炉設置変更許可申請書 (NSSR 原子炉施設) (2018 年 1 月完本)
- 3) 京都大学原子炉実験所原子炉設置変更承認申請書 (研究用原子炉の変更) (2016 年 9 月完本)
- 4) 京都大学原子炉実験所原子炉設置変更承認申請書 (臨界実験装置の変更) (2016 年 5 月完本)
- 5) 近畿大学原子力研究所原子炉設置変更許可申請書 (2016 年 3 月 30 日)
- 6) 高速増殖原型炉もんじゅ原子炉施設廃止措置計画申請書 (2017 年 12 月 6 日)
- 7) 高速増殖原型炉もんじゅ原子炉施設廃止措置計画申請書 (一部補正、2018 年 2 月 23 日)
- 8) 日本原子力学会 “将来必要になる共同利用研究施設について” (将来必要となる共同利用に供する研究施設検討特別委員会 2010 年 9 月)
- 9) IAEA-TECDOC-1212 “Strategic Planning For Research Reactors, Guidance For Reactor Managers” (2001)
- 10) IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.16 “Strategic Planning for Research Reactors” (2017)
- 11) IAEA Nuclear Energy Series NP-T-5.1 “Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project” (2012)
- 12) IAEA Nuclear Energy Series NP-T-5.3 “Applications of Research Reactors” (2014)
- 13) IAEA-TECDOC-1715 “Commercial Products and Services of Research Reactors” (2013)
- 14) 京都大学原子炉実験所 “第 52 回学術講演会報文集” (2018 年)
- 15) 京都大学原子炉実験所 “量子ビームと核科学の革新的複合利用による先端的物質科学・分析研究拠点の構築” (2017 年)
- 16) 京都大学原子炉実験所 炉物理専門研究会 “Proceedings of 6th Reactor Physics Workshop (RPW 2017)” (2017 年)
- 17) 川端裕司 講義資料 “応用中性子工学” (2018 年)
- 18) 宇埜正美 “福井県における試験研究炉の利用ニーズ” 文部科学省 つるが国際シンポジウム (2019 年)
- 19) 原子力委員会 “原子力分野における人材育成について (見解)” (2018 年 3 月)
- 20) WNA “Radioisotopes in Medicine” (2018 年 8 月)
- 21) IAEA Nuclear Energy Series NG-T-4.3 “Cost Aspect Of The Research Reactor Fuel Cycle” (2010)
- 22) APS Physics “Neutrons for the Nation. Discovery and Applications while Minimizing the Risk of Nuclear Proliferation” (2018)
- 23) 日本原子力学会 熱流動部会 “熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ” (2017 年)
- 24) D. Gordon “Scientific Thermal Hydraulic Testing Capabilities” (NSUF-GAIN 原子力熱水力ワークショップ (2017 年))

5. まとめ

2019 年度は昨年度までの成果を踏まえ、3 項目にわけて課題を掘り下げ、引き続き概念設計に繋げる調査を行った。

第 1 の課題は「試験研究炉の概念設計に向けた調査」であり、昨年度提起した 5 つの炉型につ

いて具体的な規模（出力や建屋・付帯施設や実験設備等）、主要な性能や機能（研究炉の構造、研究炉利用の能力、安全機能、規制担保機能等）、及び各種費用に関わる事項等を炉工学や研究炉利用経験のある専門家等を中心にした概念検討タスクフォースにより検討を行った。その結果を、出力が数百 W クラスの臨界実験装置から最大 100MW 程度の試験研究炉まで 6 種類の典型的な炉型候補について取りまとめた。また候補とした炉型の技術成立性について、国内外で多くの建設実績のあるものと新規で先駆的な要素が含まれる試験研究炉に分け、後者については研究開発課題の抽出を行った。また経済性については、土木費用、主要構造物建設・機電設備費用、付帯設備費用、初装荷燃料費用、さらに主要な運転経費等を夫々評価し、出力に対応した初期費用の概数を算出した。

しかし、これらの検討の前提は、試験研究炉の利用について人材育成、学術、産業利用の各分野別のニーズを国内外の利用事例を参照して、試験研究炉の基本パラメータを決めたことから、さらに精度の高い経済性や技術成立性を評価するためには、想定した試験研究炉の機能の範囲と最終的に求められる多様な利害関係者からのニーズの適合度の再評価等の整理を概念設計の前段階の作業として取り組む必要がある。

第 2 の課題は設計・許認可段階から建設・運転段階を通してもんじゅサイトに新設する試験研究炉の安全確保、利用者の便宜の調整及び経費管理等を行う運営体制の検討であり、我が国の放射光施設や試験研究炉の運営経験を参考にして検討を続けてきた。今年度は試験研究炉の出力規模を 3 段階にまとめて、大学・研究機関、企業等の利用や関わり等の枠組みを、福井大学等が検討している「嶺南地区の学術・人材育成の拠点化」構想等を踏まえて検討し具体案を考えた。この検討でも、利用する利害関係者のシェアの割り振りや構成組織の役割分担等が流動的にならざるを得ないために、ある程度炉型の絞り込みが進んだ段階で、再度関係者を交えた検討が必要になる。

第 3 の課題は、前述の第 1、第 2 の課題解決に向けた重要な要件として建設開始までに整備を終えるべきものの諸事項の調査であり、具体的な内容は、試験研究炉の建設から運転時にかけて遵守すべき規制要件、試験研究炉の活用を円滑に進めるための多様な利害関係者のニーズの動向、試験研究炉の経済性に係る要件等の整理が主体である。規制要件以外は、利用運営タスクフォースによって議論され、タスクフォースの意見を取り込んで整理した。

規制要件については、複数の炉型の候補別に建設場所の再検討、規制に応じた耐震区分を考慮した土木工事の規模の評価を行い、掘削や残土処理及び地盤調査等について概念設計とともに進めるべき課題を整理した。特に活断層等の地質調査は、最優先で取り組むべき課題である。また、ニーズについては、試験研究炉の利用に関する技術・制度面から多くの利害関係者のニーズについて試験研究炉での要件の整理を行った。ここで整理されたニーズは、概念設計へ反映すべきこととして、人材育成、中性子ラジオグラフィ、散乱技術応用等のビーム利用、RI 製造、生物照射等多岐にわたる利用や、試験研究炉利用のための費用や継続性、研究環境等の整備へのニーズ等を取りまとめて、概念設計へ反映することとした。

また、経済性に関する要件では、建設費、関連する経費及び運転に係る諸経費の枠組みや運転による収入予測項目の国内外事例や調査を行い、費用回収の基本的な項目の整理を行った。これらの検討結果は、概念設計と並行して継続的に取り組む課題の一つでもある。

以上、今年度の成果の概要と今後の課題を整理した。今年度の調査の取り組みでは、タスクフ

オースによる有識者の意見を伺って炉型候補の選定や規制要件、ニーズの整理手法、経済的評価の考え方、人材育成の引き続きの検討等昨年度までに提起された多くの課題を整理することが出来た。しかし、先端的で国内外で事例の少ない試験研究炉の概念については整理できたが、概念の詳細な詰めや開発費用や期間の詳細な分析等は限られた時間から検討は不十分であり、別途新規プロジェクトとしての取り扱いを期待したい。また紙面の制約上、本報告書には記載できなかった多くの検討結果は、今後引き続いて行われる概念設計への基礎データとして活用するために、報告書とは別に添付資料及び参考資料として取りまとめを行った。

本調査に当たっては、有識者委員の先生方には多大なる助言や具体的な調査をお願いし、また関係大学の先生方、研究機関、企業の方々にも多くの情報やご支援を頂き、この書面をお借りして謝意を表す。

また、この調査結果が今後の設計に反映され、将来、新たな試験研究炉が我が国の学術や産業の発展に貢献することを切に祈念するとともに、このような機会を提供していただいた委託元である文部科学省に御礼の意を示し、結びとする。

【添付資料】

添付資料 1 : 外部有識者委員会委員名簿

添付資料 2-1 : 1. 【臨界実験装置】概念検討整理表

添付資料 2-2 : 2. 【低出力炉/パルス炉】概念検討整理表

添付資料 2-3 : 3. 【中出力炉】概念検討整理表

添付資料 2-4 : 4. 【スペクトルシフト炉】概念検討整理表

添付資料 2-5 : 5. 【革新炉開発炉】概念検討整理表

添付資料 3 : もんじゅサイトにおける試験研究炉の配置検討

添付資料 4 : 各炉型の建設費等概算

添付資料 5 : 国内試験研究炉の運転経費等について

添付資料 6 : 国内試験研究炉利用実績データ

添付資料 7 : 試験炉許可基準規則ともんじゅサイトで考慮すべき条件の検討

添付資料 8 : 試験研究炉のニーズに関する整理

添付資料 9 : 試験研究炉の経済性評価

【参考資料】

参考資料 1 : ADS の開発について

参考資料 2 : 低出力炉の役割と施設概念

参考資料 3 : 中性子散乱実験を主目的とするパルス炉について

参考資料 4 : もんじゅサイトを活用した試験研究炉と連携した熱流動装置の検討