

もんじゅサイトを活用した新たな  
試験研究炉の在り方に関する調査

委託業務成果報告書

平成 30 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平成29年度「もんじゅサイトを活用した新たな試験研究炉の在り方に関する調査」の成果を取りまとめたものです。

## 目 次

1	本調査の目的.....	1
2	我が国における研究炉の現状.....	2
2.1	研究炉の必要性.....	2
2.2	研究炉建設と運転実績.....	2
2.3	運転継続予定の研究炉.....	4
2.4	ビーム炉と照射試験炉.....	5
2.5	まとめ.....	5
3	海外における研究炉を取り巻く動向.....	8
3.1	海外の研究炉の動向の概要.....	8
3.2	世界の研究炉の現状と利用動向の概要.....	10
3.2.1	研究炉の型式と運転中の研究炉.....	10
3.2.2	研究炉の運転.....	11
3.2.3	研究炉の利用の概要.....	12
3.2.4	海外で運転中の代表的な研究炉.....	15
3.3	海外研究炉の検討、計画と建設の各段階にある研究炉の概要.....	17
3.3.1	構想検討中の研究炉.....	17
3.3.2	計画中の研究炉.....	18
3.3.3	建設中の研究炉.....	20
3.4	海外の低中出力の研究炉.....	21
3.5	海外の研究炉の使用経験で提起されている核燃料に関する課題.....	22
3.6	海外での研究炉計画の戦略的な取り組み.....	23
4	研究炉の必要性和ニーズ調査.....	28
4.1	研究炉の必要性和位置付け.....	28
4.2	ニーズ調査.....	29
4.2.1	日本原子力学会「将来必要となる共同利用研究施設について」.....	29
4.2.2	JAEA-Review「次期研究用原子炉（ビーム炉）のニーズ調査」.....	30
4.2.3	JAEA-Review「照射炉の照射ニーズに関する報告書」.....	30
4.2.4	日本学術会議「研究炉の長期停止に伴う影響調査 <記録>」.....	30
4.2.5	学術利用及び産業利用（技術開発）に関する動向（過去の調査結果との比較） .....	33
4.2.6	個別訪問調査.....	34
4.3	利用分野.....	40
4.3.1	医学・治療（BNCT、医療用 RI）.....	40

4.3.2	エネルギー利用（燃料・材料照射）	44
4.4	利用目的と研究炉出力	45
4.5	まとめ	49
5	人材育成	51
5.1	概要	51
5.2	原子力人材育成の必要性	51
5.2.1	人材育成の必要性	51
5.2.2	OECD/NEAにおける人材育成の提言	53
5.3	日本における人材育成の現状	54
5.3.1	概要	54
5.3.2	JAEA の人材育成の枠組みの概要	57
5.3.3	福井県の人材育成の枠組みの概要	58
5.4	人材育成ネットワークの展開	59
5.4.1	概要	59
5.4.2	日本における人材育成ネットワーク	61
5.4.3	EU における人材育成ネットワーク	63
5.4.4	IAEA による人材育成ネットワークの支援	64
5.5	研究炉を利用した人材育成の動向	65
5.5.1	日本における研究炉を利用した人材育成 <sup>(14)</sup>	65
5.5.2	海外における研究炉を利用した人材育成 <sup>(22), (25)</sup>	67
5.6	研究炉利用による人材育成の課題	70
6	共用施設の運営状況・体制の在り方	81
6.1	インフラ分野における運営体制	81
6.2	国内事例	83
6.2.1	大型研究実験施設共同利用 フレーム事例：SPring-8/JASRI	84
6.2.2	大型研究実験施設共同利用 フレーム事例：J-PARC/CROSS	86
6.3	海外事例	88
6.3.1	EU 研究開発連携の体系と体制	88
6.3.2	EURATOM (European Atomic Energy Community)	90
6.3.3	PALLAS (オランダ)	91
6.3.4	北米 原子力研究炉を活用したプラットフォーム構造と特徴 <sup>(7)</sup>	92
6.3.5	海外 (EU、北米) における運営体制及び連携のあり方・特徴	94
6.4	研究開発機能の分析	94
6.4.1	機能・構造の基本的分析	94
6.4.2	共同利用を伴う民間活力導入事例による機能・構造分析	95
6.4.3	既存研究炉における構造化と機能分析	97

6.5	研究開発 運営体制構築 .....	100
6.5.1	運営体制の基本的な枠組み .....	100
6.5.2	共用法適用による運営スキーム及び運営体制の構築 .....	100
6.5.3	共用法適用外による運営スキーム及び運営体制の構築 .....	101
6.6	共用法の適用に関する評価 .....	102
7	試験研究炉の機能・オプション .....	104
7.1	研究炉の仕様と主要な利用 .....	104
7.2	研究炉の具体例 .....	105
7.2.1	臨界実験装置 .....	105
7.2.2	低出力汎用炉 .....	106
7.2.3	中出力ビーム炉 (KUR 相当) .....	107
7.2.4	高出力ビーム炉 (JRR-3 相当) .....	108
7.2.5	高出力照射炉 (JMTR 相当) .....	109
7.2.6	附属施設 .....	111
7.3	建設費と運転経費 .....	113
8	もんじゅサイトに新たに研究炉を設置する際に考慮すべき要件 .....	117
8.1	検討に当たっての前提条件 .....	117
8.2	もんじゅサイトの設置場所の調査 .....	118
8.2.1	調査の方法 .....	118
8.2.2	もんじゅサイトの概況 .....	118
8.2.3	調査した場所と状況 .....	119
8.3	試験研究用原子炉施設の設置許可基準規則で要求されるサイト条件 .....	126
8.3.1	地盤、地震及び津波、並びに外部からの衝撃による損傷の防止 .....	127
8.3.2	その他の考慮すべき条件 .....	133
8.4	環境影響評価法と自然公園法等 .....	135
8.4.1	環境影響評価法に基づく環境影響評価 .....	135
8.4.2	自然公園法に基づく自然景観と自然環境の保全 .....	136
8.4.3	公有水面埋立法による埋立免許 .....	137
8.5	関係自治体との協定等 .....	137
8.5.1	試験研究用等原子炉施設の原子力災害対策重点区域の範囲の目安 .....	137
8.5.2	関係自治体との安全協定 .....	139
8.5.3	福井県漁連との協定 .....	139
8.6	原子炉等規制法による設置 (変更) 許可申請と廃止措置計画認可申請の関係 .....	140
8.7	まとめ .....	142
8.7.1	考慮すべき要件のまとめ .....	142
8.7.2	今後の検討課題 .....	143

9	調査のまとめ.....	146
9.1	概要.....	146
9.2	国内外の動向調査 .....	146
9.3	ニーズ調査 .....	148
9.4	人材育成.....	149
9.5	運営体制の検討.....	150
9.6	サイト調査と考慮すべき要件の検討.....	151
9.7	調査の総括と課題 .....	152
10	外部有識者委員からの意見.....	154

## 目次

図 3-1	世界で運転中の研究炉.....	8
図 3-2	現在の研究炉の状況（内訳）.....	9
図 3-3	研究炉の出力別基数.....	11
図 3-4	運転中の低・中出力の研究炉の基数.....	11
図 3-5	OECD 加盟国の研究炉出力と年間経費の関係.....	12
図 4-1	産業を中心とした中性子利用の市場.....	29
図 4-2	中性子を利用する目的.....	31
図 4-3	シリコンインゴットとウエハー.....	34
図 4-4	BNCT のがん放射線治療における棲み分け <sup>(10)</sup> .....	41
図 4-5	主な非密封アイソトープ供給量の年度推移.....	41
図 4-6	主な密封アイソトープ供給量の年度推移.....	42
図 4-7	放射性医薬品の供給量.....	42
図 4-8	モリブデン製造国の内訳と日本の輸入割合.....	43
図 4-9	モリブデン-テクネチウム製造の実施体制.....	43
図 5-1	原子力関連学科の学生数の推移.....	52
図 5-2	原子力の人材育成に必須の 3 要素.....	53
図 5-3	原子力関係従事者の推移 <sup>(8)</sup> .....	55
図 5-4	政府支援制度と日本原子力学会の意見（青字部分） <sup>(10)</sup> .....	56
図 5-5	原子力分野の人材育成の課題を踏まえた今後の施策の方向性 <sup>(10)</sup> .....	57
図 5-6	JAEA の人材育成センターの活動概要.....	58
図 5-7	福井県国際原子力人材育成センターの概要.....	59
図 5-8	日本の人材育成ネットワークの関連図.....	61
図 5-9	JN-HRD の参加機関と支援組織.....	62
図 5-10	JNEN の参加機関と主要な活動.....	62
図 5-11	EU のプラットフォームの中での ENEN の位置付け.....	63
図 5-12	IAEA の運用/支援をしているネットワーク活動の構造.....	64
図 5-13	研究炉を利用して実施した人材育成（学生、社会人対象）.....	66
図 5-14	研究炉の運転実習による人材育成（学生対象）.....	66
図 6-1	インフラ分野における変化の流れ.....	81
図 6-2	文部科学省 大型施設運用+プラットフォーム.....	84
図 6-3	ビームラインの取り扱い状況.....	85
図 6-4	大強度陽子加速器施設（J-PARC）.....	87
図 6-5	関係者の役割分担による利用者への提供の在り方.....	87
図 6-6	EU の研究開発連携の体系.....	90

図 6-7	EURATOM、共同研究センター（JRC）の構成と立地 <sup>(5)</sup> .....	91
図 6-8	PALLAS 準備スケジュール.....	92
図 6-9	北米における原子力研究炉を活用したプラットフォーム構造.....	93
図 6-10	研究開発事業における構造分析と構成要素.....	95
図 6-11	幌延深地層処分研究計画 PFI 事業の構造とスキーム.....	96
図 6-12	宮城県女川町震災復興 PFI 事業の構造とスキーム.....	96
図 6-13	滋賀県産業労働会館複合施設整備運営 PFI 事業の構造とスキーム.....	97
図 6-14	国内の研究炉の共同利用に関する事業構造と新たに重要となる視点.....	98
図 6-15	新たな連携・展開を目指した運営体制構築の視点.....	99
図 6-16	共用法適用での想定スキーム・運営体制の基本的枠組み.....	101
図 6-17	共用法適用外での想定スキーム・運営体制の基本的枠組み.....	101
図 7-1	UTR-KINKI.....	105
図 7-2	低出力汎用炉（DNRR）の全体像と炉心断面.....	106
図 7-3	低出力ビーム炉(KUR)の水平断面.....	107
図 7-4	JRR-3 の水平断面.....	108
図 7-5	JMTR の原子炉とホットラボ.....	109
図 7-6	JMTR 水平断面.....	110
図 7-7	高燃焼度燃料への再計装と照射キャプセルへの組込み.....	111
図 7-8	ループキュービクル（JMTR）.....	111
図 7-9	JRR-3 の炉プールと隣接プール.....	112
図 7-10	研究炉の出力と建設費.....	114
図 7-11	原子炉出力と運転維持費.....	115
図 7-12	原子炉出力と運転員数.....	115
図 8-1	もんじゅサイト（2015年3月時点）.....	118
図 8-2	もんじゅサイト内の設置場所の調査位置.....	120
図 8-3	もんじゅサイト内の調査場所の状況.....	120
図 8-4	④荷揚岸壁（EL+5m）.....	121
図 8-5	⑤原子炉建屋横海岸部（EL+5m）.....	122
図 8-6	⑥山側資材置場（EL+132m）.....	124
図 8-7	①、②、③及び⑦もんじゅ施設設置場所.....	125
図 8-8	もんじゅサイトの周辺監視区域.....	134
図 8-9	若狭湾国定公園内のもんじゅサイト.....	137
図 8-10	もんじゅサイトを中心とした半径 0.5km～30km の範囲.....	138



## 表目次

表 2-1	我が国で建設された研究炉.....	3
表 2-2	運転継続予定の研究炉.....	4
表 3-1	運転中の研究炉の主要項目比較表.....	9
表 3-2	研究炉出力と利用の統計.....	14
表 3-3	世界の研究炉の主な利用法と主要項目.....	15
表 3-4	特徴ある運転中の研究炉.....	16
表 3-5	検討中の研究炉.....	18
表 3-6	海外で計画中の研究炉.....	18
表 3-7	海外で建設中の研究炉.....	20
表 3-8	海外で運転中の低・中出力の代表的な研究炉.....	21
表 3-9	研究炉の課題と戦略的な取り組みの例.....	25
表 4-1	最も関心のある研究分野（利用分野）の具体例（常陽、NCA を除く）.....	32
表 4-2	学術利用及び産業利用（技術開発）における利用分野一覧.....	39
表 4-3	海外の主な研究炉を利用したシリコンドーピングの製造実績と計画.....	40
表 4-4	医療用 RI の現状・課題とニーズ（方向性）.....	44
表 4-5	研究炉出力と人材育成.....	45
表 4-6	研究炉出力とビーム実験.....	46
表 4-7	研究炉出力と照射試験.....	46
表 4-8	研究炉出力と RI 製造.....	47
表 4-9	利用目的と概要、中性子環境と研究炉の出力分布（海外例）.....	48
表 5-1	日本の研究炉を利用した人材育成テーマの概要.....	67
表 5-2	OECD 主要国での研究炉利用の人材育成.....	68
表 5-3	海外で研究炉を使つての社会人教育実施の例.....	68
表 6-1	主な法人形態比較と研究開発事業適用における方向性.....	82
表 6-2	運営体制の基本的な枠組み.....	100
表 7-1	臨界実験装置、低出力汎用炉、中出力及び高出力ビーム炉並びに高出力照射試験炉.....	104
表 7-2	世界の低出力汎用炉仕様と利用.....	107
表 7-3	使用済燃料発生量と必要な貯蔵施設.....	113
表 7-4	研究炉の建設費.....	114
表 8-1	もんじゅサイトの調査場所の状況と研究炉施設設置上の課題.....	126
表 8-2	試験炉設置許可基準規則で要求されるもんじゅサイト設置場所の立地条件（地盤・地質、地震及び津波）.....	130

表 8-3	試験炉設置許可基準規則で要求されるもんじゅサイト設置場所の立地条件 (外部からの衝撃による損傷防止：自然現象) .....	131
表 8-4	試験炉設置許可基準規則で要求されるもんじゅサイト設置場所の立地条件 (外部からの衝撃による損傷防止：人為によるもの) .....	132
表 8-5	試験研究用等原子炉施設の原子力災害対策重点区域(UPZ)の範囲の目安 ..	138

## 1 本調査の目的

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」については様々な不確実性の伴う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（以下、「原子力関係機関等」という。）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。

本委託事業では、全国の大学・研究機関等が参画するコンソーシアムが運営する試験研究炉を「もんじゅ」サイト内に新たに設置するにあたり、どのような試験研究炉が国内外の研究者等のユーザーからニーズがあるのか、全国の大学・研究機関が参画するコンソーシアムの構築体制等はどのような形が良いのか等について、外部有識者で構成した委員会の提言を得つつ調査を行った。

本年度の調査は、国内外の試験研究炉に関する現状及び動向やニーズ等を幅広く把握することを目的として、我が国における研究炉の現状、海外における研究炉を取り巻く動向、研究炉の必要性とニーズ調査、人材育成、共用施設の運用状況・体制、試験研究炉の機能・オプション、もんじゅサイトに新たに試験研究炉を設置する際に考慮すべき要件について、文献調査、原子力関係機関等への聴き取り調査、現地調査等を実施した。本調査結果に基づき、専門家及びユーザー関係の有識者等で構成された外部有識者委員会を 2 回開催し、調査内容、調査の進め方、今後の検討課題等について多くの意見を得た。

本報告書は、本年度に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 我が国における研究炉の現状

### 2.1 研究炉の必要性

日本学術会議では、平成25年10月に「研究炉のあり方について」で次のような提言を行っている<sup>(1)</sup>。

#### (1) 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<sup>注1</sup>の研究炉については高経年化や使用済燃料の問題等、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。我が国の現状は大強度陽子加速施設（以下、「J-PARC」という。）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。

#### (2) 研究炉の役割と位置づけ

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。

### 2.2 研究炉建設と運転実績

表 2-1 に高出力炉（10MW 以上～50MW 以下）、中出力炉（500kW 以上～10MW 未満）及び低出力炉（出力 500 kW 未満）と臨界実験装置に分類した日本における研究炉建設の実績を示す<sup>(2)</sup>。表中の運転継続、廃止措置に関しては直近の情報を記述した。

---

注1 平成 29 年度末で運転継続予定の研究炉は 9 基。

表 2-1 我が国で建設された研究炉

名称	管理者	出力	減速材/冷却材	初臨界	運転年数**	現状
<b>高出力炉 (10MW 以上～50MW 以下) *</b>						
JMTR	JAEA	50 MW	軽水/軽水	1968	46	廃止措置に移行
HTTR	JAEA	30 MW	グラファイト/ He	1998	19	運転継続
JRR-3	JAEA	20 MW	軽水/軽水	1990	27	運転継続
JRR-2	JAEA	10 MW	軽水/軽水	1960	57	解体中
常陽	JAEA	140 MW	/Na	1977	40	運転継続
<b>中出力炉 (500 kW 以上～10 MW 未満) *</b>						
KUR	京大	5 MW	軽水/軽水	1964	53	運転継続
JRR-4	JAEA	3.5 MW	軽水/軽水	1965	52	廃止措置に移行
<b>低出力炉 (500 kW 未満) *と臨界実験装置</b>						
NSRR	JAEA	300 kW (パルス炉)	グラファイト、軽 水/軽水	1975	42	運転継続
武蔵工大炉	武蔵工大 (現 東京都 市大)	100 kW	軽水、水酸化ジル コニウム/軽水	1963	54	解体中
TRIGA-II 立教大炉	立教大	100 kW	軽水、水酸化ジル コニウム/軽水	1961	56	解体中
HTR	日立	100 kW	グラファイト/	1961	56	解体中
TTR	東芝	100 kW	軽水/軽水	1962	55	解体中
JRR-1	JAEA	60 kW	軽水/軽水	1957		解体済
弥生	東大	2 kW (パルス炉)	/空気	1971	46	解体中
TOSHIBA NCA	東芝	200 W	軽水/軽水	1963	54	運転継続
UTR-KINKI	近畿大学	1W	軽水/無	1961	56	運転継続
DCA	JAEA	臨界実験装置	軽水/軽水	1969	48	解体中
FCA	JAEA	臨界実験装置	無/無	1967	50	停止
TCA	JAEA	臨界実験装置	軽水/	1962	55	停止
TRACY	JAEA	臨界実験装置		1995	22	廃止措置に移行
KUCA	京都大学	臨界実験装置	軽水、ポリエチレ ン/軽水、空気	1974	43	運転継続
STACY	JAEA	臨界実験装置	無/無	1995	22	運転継続
VHTRC	JAEA	臨界実験装置	グラファイト/ 無	1985		解体済
JMTRC	JAEA	臨界実験装置	軽水/軽水	1965		解体済
AHCF	JAEA	臨界実験装置	軽水/軽水	1961		解体済
SCA	住友原子 力工業	臨界実験装置	軽水/軽水	1966		解体済
OCF	日立	臨界実験装置	軽水/軽水	1962		解体済
MCF	三菱原子 力工業	臨界実験装置	軽水/軽水	1969		解体済

IAEA “Research Reactor Data Base”

\*出力区分は、原子炉等規制法設置許可基準による

\*\*2017 年度末時点

日本の研究炉は、1957 年に初臨界になった当時の日本原子力研究所の JRR-1 を始めとして 28 基の研究炉が建設された。その後多くの研究炉は高経年化あるいはその役割を終えたことから、停止又は廃止措置に移行し、現在運転継続予定の研究炉は 9 基のみである。このことから、研究炉に関わる技術者が減少するとともに高齢化しており、研究炉の運転管理、ビーム実験や照射実験技術開発に係る技術の継承が大きな課題となっている。

研究炉の建設時期については、1957年に初臨界のJRR-1が最初であり、最後に建設されたのは1998年初臨界のHTTRであり、20年程度新たな研究炉の建設がない。このことから、研究炉の設計・建設を経験した技術者がいなくなる危惧を招いている。

### 2.3 運転継続予定の研究炉

運転継続予定の研究炉は表 2-2 に示すように 9 基である。(2)

表 2-2 運転継続予定の研究炉

名称	管理者	型式	出力	中性子束 (n/cm <sup>2</sup> /s)	減速/冷却	ビーム ポート	利用目的	運転 年数
UTR-KINKI	近大	教育訓練用小型炉 (アルゴノート型)	1 W	熱 1.2×10 <sup>7</sup> 高速 1.3×10 <sup>6</sup>	軽水/無	無	教育訓練 検出器開発 生物照射 中性子ラジオグラフィ 放射化分析	56
KUCA	京大	臨界実験装置	100 W	熱 1.0×10 <sup>9</sup> 高速 1.0×10 <sup>9</sup>	軽水、ポリエチレン /軽水、空気	無	炉物理実験 教育訓練	43
KUR	京大	タンク	5 MW	熱 6.0×10 <sup>13</sup> 高速 6.5×10 <sup>13</sup>	軽水/軽水	有	中性子ラジオグラフィ 中性子散乱実験 BNCT 教育訓練 燃・材料照射試験 (基礎研究)	53
JRR-3	JAEA	プール	20 MW	熱 2.7×10 <sup>14</sup> 高速 1.4×10 <sup>14</sup>	軽水/軽水	有	中性子散乱実験 中性子ラジオグラフィ Si ドーピング RI 製造 放射化分析 燃・材料照射試験 (基礎研究)	27
NSRR	JAEA	パルス炉	300 kW	熱 1.9×10 <sup>12</sup> 高速 6.3×10 <sup>15</sup>	軽水、水酸化ジルコ ニウム/軽水	無	燃・材料安全研究	42
TOSHIBA NCA	東芝	臨界実験装置	200W	熱 1.0×10 <sup>9</sup> 高速 3.0×10 <sup>9</sup>	軽水/軽水	無	臨界実験装置	54
STACY	JAEA	均質炉	200 W			無	窒化ウラン溶融燃料臨界安全研究	22
HTTR	JAEA	高温ガス炉	30 MW	熱 7.5×10 <sup>13</sup> 高速 2.0×10 <sup>13</sup>	Gr/He	無	高温ガス冷却炉開発	19
常陽	JAEA	Na 冷却 高速炉	140 MW	高速 4.0×10 <sup>15</sup>	/Na	無	高速増殖炉開発 教育訓練	40

熱；熱中性子（中性子エネルギー；0.06eV 以下） 高速；高速中性子（中性子エネルギー；1MeV 以上）

その内、HTTR は高温ガス冷却炉開発、常陽は高速炉開発に、NSRR は原子炉の反応度事故時に係る安全研究に、STACY は溶融燃料の臨界研究にそれぞれ特化された研究炉であり、KUCA は臨界実験装置、UTR-KINKI は主に教育訓練を目的とした低出力炉である。従って、汎用炉（ビーム実験と炉内照射可能な炉）としては、KUR と JRR-3 のみである。このことから、研究炉のマシントイムの確保に課題を有している。

臨界実験装置は、炉物理実験が主要目的となるが、出力が小さいために積極的な冷却系は不要である。そのために、原子炉施設の運転に当たって、監視しなければならない項目が少なくなり、原子炉に関する基礎知識を有しない学生や社会人などの研修・人材育成に活用されている。ビーム実験孔を有する KUR や JRR-3 は、中性子科学、放射化分析等で先進的研究のツールとして活用されている他、KUR では、中性子ラジオグラフィによる産業イノベーション、ホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy, 以下、「BNCT」という。) による医療に活用されている。しかしながら、JMTR の廃止措置により、本格的な照射試験専用炉は国内に無くなった。また、JRR-3 については初臨界から

27年、KURについては53年経過しており、将来の利用研究を見据えて次期炉の検討を開始するべき段階にきている。

## 2.4 ビーム炉と照射試験炉

KURとJRR-3は、ビーム利用と炉内照射利用が可能であるが、ビーム利用に焦点が絞られた研究炉であり、炉内照射試験に関する制限が多いことから、機能的な観点からビーム炉とも言われる。ビーム炉の場合、燃料を装荷する炉心領域は、その外側に配置される重水領域での中性子ビームの性能確保（中性子束、エネルギー）のために、コンパクトに設計される。そのために、垂直実験孔の数や大きさが制限される。また、重水領域では、当領域での中性子エネルギー分布に外乱を与えないために、垂直実験孔に挿入される燃・材料照射試験片、特に高速中性子源となる燃料の種類と量が制限される。

一方、照射試験炉（炉内照射専用炉）の場合、垂直実験孔の数が多く、その径も大きく設計される。従って、複合環境<sup>注1</sup>下での燃・材料のその場試験<sup>注2</sup>等の先進的照射試験が可能であり今後の照射試験研究の主流になっている。また、中性子束、エネルギー等をパラメータとする照射試験が可能となることから、材料の照射損傷メカニズム研究等の基礎研究にも広がりを見せている。

以上のことから、中性子ビーム性能を第一義に設計され、先進的中性子科学研究に利用されるビーム炉と先進的照射試験研究やMoを含む放射性同位体（RI）製造に主体をおいた照射試験炉を別に有することが望ましい。

## 2.5 まとめ

国内の研究炉は、28基建設されたが、施設の高経年化やその役割を終えたことから今後運転継続が見込まれるのは9基のみである。この9基の内、多くは、高速炉開発、高温ガス炉開発、原子炉の反応度事故時に係る安全研究、熔融燃料の臨界研究にその利用研究が特化されており、汎用の研究炉はKURとJRR-3のみであることから、研究炉を利用した研究においてはマシンタイムの確保に課題を有している。

また、JMTRの廃止措置により、発電炉等の安全性向上に関する研究についても課題がある。

さらに、研究者や技術者の減少、高齢化に伴う技術継承、設計・建設経験者の不足等も国全体として継続的な対応が求められる。日本原子力学会の報告<sup>(4)</sup>では、研究炉の状況と問題点を6項目挙げている。その項目は、(1)新規規制基準対応（グレーデッドアプローチ）、(2)高経年化対策、(3)使用済燃料対策、(4)核セキュリティ強化対策及び燃料の低濃縮化、(5)廃止措置及び次期研究炉の検討、(6)運転員の力量と士気の確保である。特に、使用済燃料については、多くの研究炉は米国における引き取り政策に基づいて対応しているが、本政策が今後も長期間継続することが想定しにくい状況にあることから、将来的には、使用済燃料の保管、処理・処分について国の政策として検討する必要がある。また、研究炉の多くは新規規制基準対応で再稼働が遅れているが、安全を確保しつつ合理的な観点から研

---

注1 複合環境；中性子の他、試験体への応力、水質、圧力などを制御可能な照射環境

注2 その場試験；研究炉で照射中に機械的負荷（燃料被覆管への内圧、引張応力負荷など）、照射中の試験体の歪みやクラック生成、破損検出、燃料からのFP放出測定などを行う試験

究炉の特徴、リスクの程度に応じた安全要件、対策等を適用するグレーデッドアプローチ（等級別扱い）への取り組みが極めて重要である。



【参考文献】

- (1) 提言「研究用原子炉のあり方について」、日本学術会議基礎医学委員会・総合工学委員会合同 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会、平成 25 年 10 月 16 日
- (2) IAEA, “Research Reactor Data Base”
- (3) IAEA TECDOC Series No.1715(IAEA 2013), IAEA Nuclear Energy Series No.NP-T-5.3 (IAEA2014)  
他
- (4) 日本原子力学会「我が国における研究炉の役割について（中間報告書）」（平成 28 年 3 月）

### 3 海外における研究炉を取り巻く動向

2章においては日本の過去の経緯や現状について述べたが、海外の動向については、国際機関の公開された文献や、有識者の情報などにより、現在の動向を調査分析した。将来に向けての検討段階、概念が固まり計画を公表している計画段階、すでに建設を始めている建設段階、運転利用している使用段階、停止または廃止措置に分けて整理した。

#### 3.1 海外の研究炉の動向の概要

2017年11月現在約217基が55か国で運転されており、これまですでに352基が廃止措置となっている。運転中の研究炉は、世界各国で使われているが、その分布は図3-1のようになっている。<sup>(1)</sup>

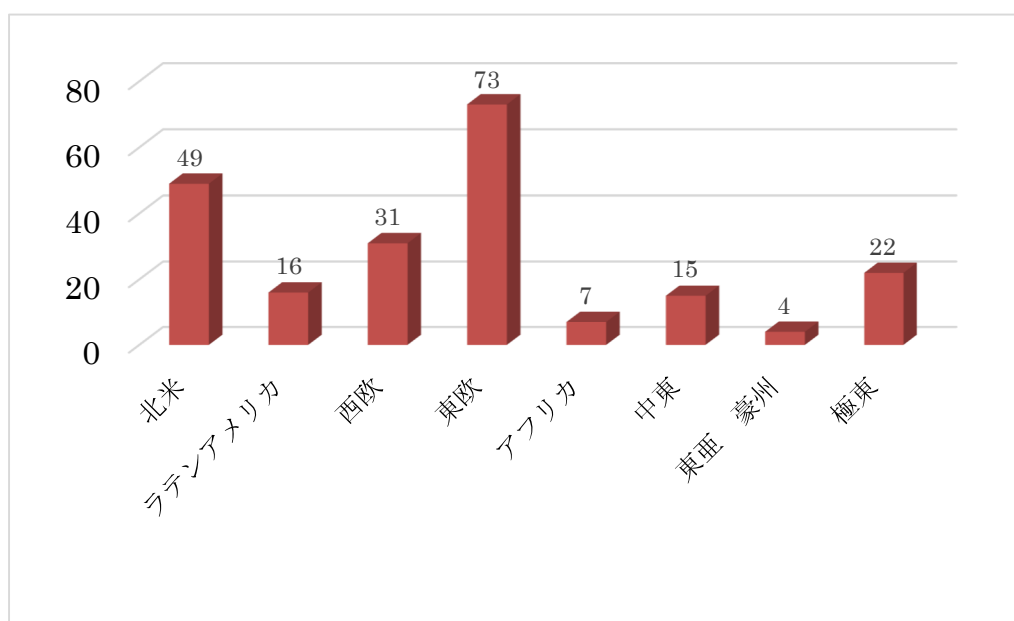


図 3-1 世界で運転中の研究炉

世界中では770基を超える研究炉が建設され、うち264基が米国、118基がロシアである。米国では1950年から60年代に許可を受けた研究炉が圧倒的に多い。

一方、過去に建設された研究炉や現在建設・計画が進められている研究炉の内訳は2017年10月現在、図3-2のようになっている。<sup>(1)、(2)</sup>

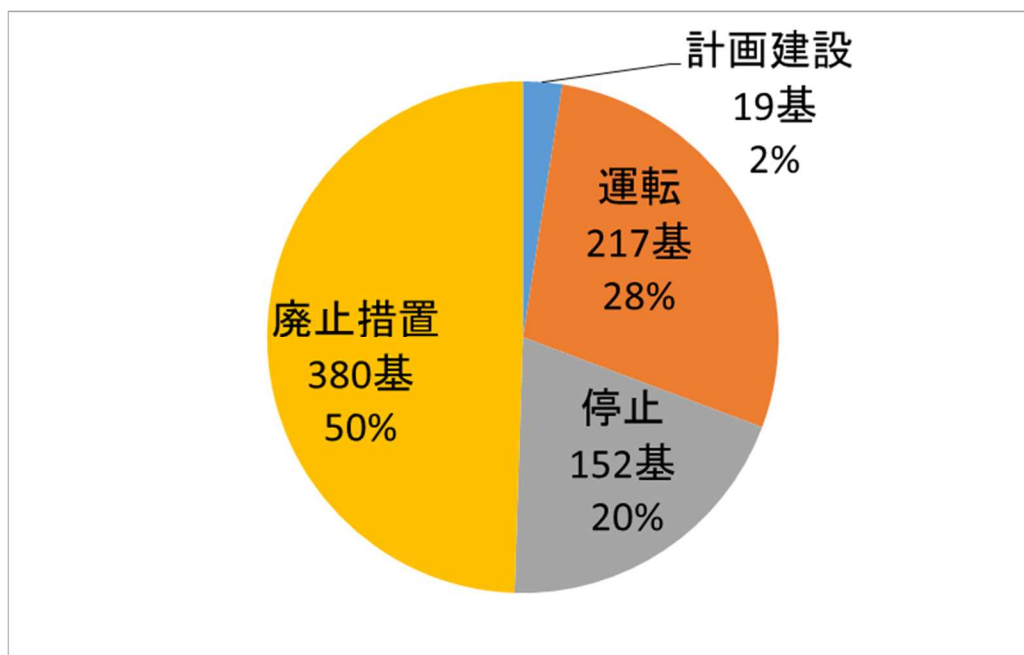


図 3-2 現在の研究炉の状況 (内訳)

この中で運転中の研究炉は、ロシア：63基、米国：42基、中国：17基、フランス：10基、日本<sup>注1</sup>、ドイツ：8基、などと続いている。また、多くの開発途上国でも研究炉を保有しており、具体例としては、バングラデシュ、アルジェリア、コロンビア、ガーナ、ジャマイカ、リビア、タイ、ベトナムなどである。

また、運転中の研究炉の主要な項目について大別すると表 3-1 のようになる。<sup>(1)</sup>

表 3-1 運転中の研究炉の主要項目比較表

カテゴリ	低水準	中水準	高水準
運転経過時間	92基 (40年未満)	—	141基 (40年以上)
熱中性子束	107基 ( $10^{12}$ 以下)	89基 ( $10^{14}$ 未満)	42基 ( $10^{14}$ 以上)
定常出力	61基 (1kW以下)	66基 (1MW未満)	95基 (1MW以上)
稼働率	123基 (4週間/年以下)	73基 (20週間/年未満)	42基 (20週間/年以上)

IAEA“Research Reactor Data Base”2017年5月の集計

この表に示すように、40年以上経過した研究炉はすでに60%を超え、廃止措置や停止中の研究炉の数の多さをからみても老朽化が大きな課題であることや、燃料や運営経費などの理由から年間20週間以上稼働をしている研究炉が20%以下であることなど、研究炉の運用にも課題があると言える。

注<sup>1</sup> 2018年3月時点では9基となっている。

## 3.2 世界の研究炉の現状と利用動向の概要

### 3.2.1 研究炉の型式と運転中の研究炉

研究炉は発電炉に比べ構造的には多様な型式のものが多く、運転方法も連続運転やパルス的な運転をするものがあるが、代表的な炉型をあげると以下のようなになる。

世界中の研究炉のうち約 70 基は**プール型**で、水プール中に燃料を束ねて設置し、燃料と組み合わせた制御棒や照射や実験のための設備による炉心構成になっている。燃料はアルミニウムで被覆した板状燃料を使用するものが多い。これは発電炉に比べて出力密度が高い研究炉燃料の冷却を効率的に行うためである。冷却には軽水を、減速材としては軽水、グラファイト、重水などを、反射体としてはベリリウム等を使う。また、このプールの壁面には中性子ビームを炉心外部に取り出すための孔を設けている構造が一般的である。

一方、大型の照射試験炉の場合、沸騰防止を目的として冷却水を加圧するためにタンクを設置している。この**タンク型炉**が 30 基以上運転されている。

他の型式の研究炉としては**トリガ型**があり、1950 年代から米国や西欧を中心に多く使われ、現在でも世界には約 40 基が使われている。この研究炉の構造は、アルミニウム製の管にウラン燃料と水酸化ジルコニウム（減速材）を混ぜた燃料体 60～100 本を円筒形状に配置して炉心を構成し、グラファイトまたはベリリウムを反射体として使っている。この種類の原子炉はパルス的な運転も可能で、かなり高い出力まで（～25,000MW/秒）の広い範囲に対応できる点に特徴がある。燃料には高い負の温度係数を持たせ、迅速な出力上昇や出力の停止を行うように設計している。

他の設計では、**重水やグラファイト減速の研究炉**もある（12 基）。また数は少ないが**高速研究炉**もあり、ウランとプルトニウムの混合燃料を使って減速材を使わない方式のものもある。**均質型炉**では炉心をウラン塩化合物の液体で構成し、これを約 300mm 径の円筒タンクに入れて運転する方式である。これは簡単な構造で 1950 年代には数多く建設され、現在でも数基が使われている。この中には 20kW と小さな出力のものが 2 基存在する。この関連では 2008 年、IAEA から「熔融型原子炉は、医療用同位元素の製造には低価格、小さな臨界量、本質的な受動安全性、燃料の扱いやすさ、同位体の純度管理の簡単さなどから有望な性能が期待される」と指摘がある。このため、この型式で米国、中国、ロシアは本格的に商業的な放射性同位元素製造用の原子炉についての検討に入っている。

このような種々の型式で運転している全研究炉の出力別の基数を図 3-3 に示す。

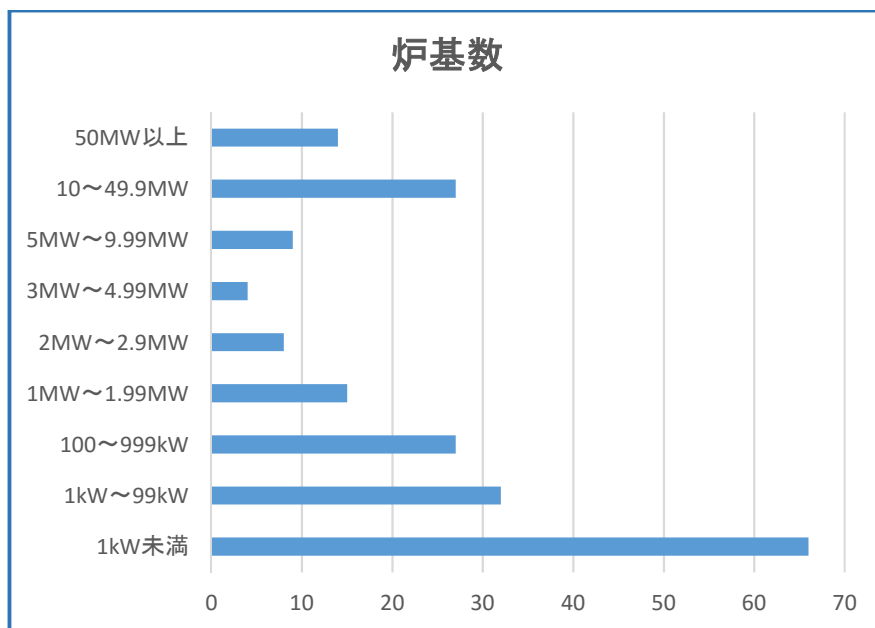


図 3-3 研究炉の出力別基数

この図から 100kW 未満の研究炉が半数を占め、高出力の 10MW 以上の研究炉も 40 基（全体の約 20%）程度使われている。

また、低・中出力の研究炉について、より詳細に示すと図 3-4 のようになる。

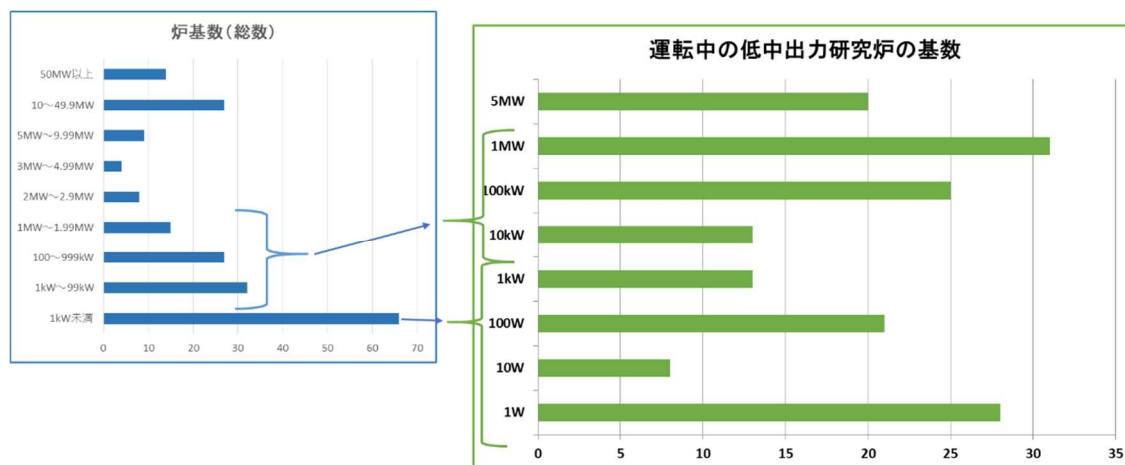
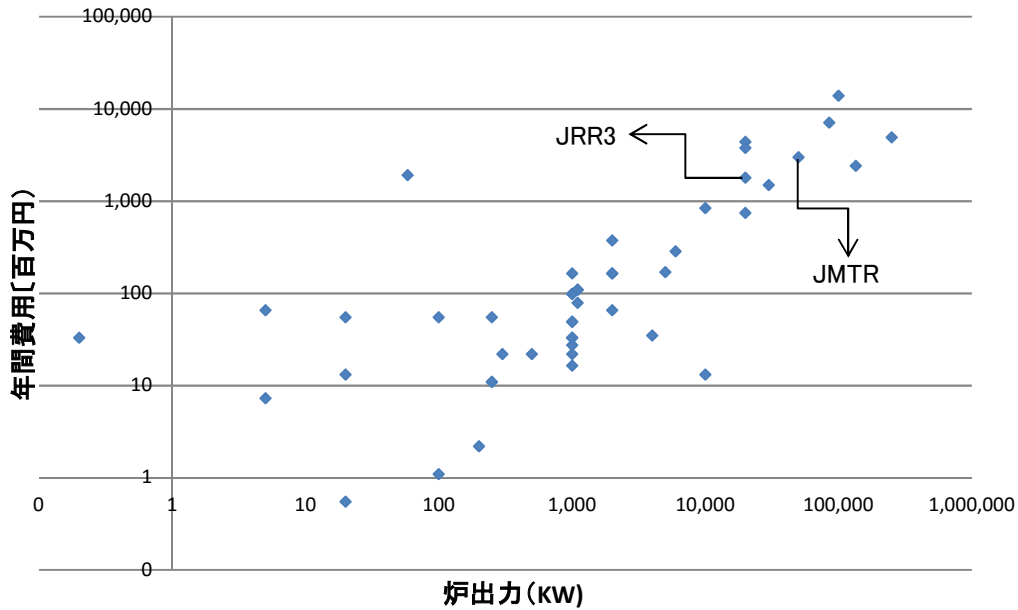


図 3-4 運転中の低・中出力の研究炉の基数

### 3.2.2 研究炉の運転

研究炉の運用についての資源（ヒト・カネ）についてデータベースから抽出して調査した。この対象は、OECD 加盟諸国の研究炉を対象にして、炉出力と年間の経費、炉出力と運転員数、及び炉出力と所属研究機関の職員数の 3 項目を選び、それぞれの変数に対して、両対数の散布図法による相関関係を炉出力と年間費用について求めた。この結果を図 3-5 に示す。



IAEA “Research Reactor Data Base”2017年5月を整理

図 3-5 OECD 加盟国の研究炉出力と年間経費の関係

この図には、参考のために、日本の JRR-3 と JMTR の値を矢印を使い明示した。

このデータ分析により、出力の低い研究炉については相関関係にばらつきが多いが、概略年間の運用の経費は、1MW クラスで、1～10 億円（各国通貨を 2017 年 10 月時点の交換レートで円換算）、10MW クラスでは約 10 億円、100MW クラスでは約 100 億円必要であると言える。

同様の分析により、必要な運転員の数については 1MW クラスで 3～10 名、10MW クラスで 20～30 名、100MW クラスで 30 名程度であることが分かった。また、運営する研究機関の人員規模については 10MW クラスで 20 名、100MW クラスで 100 名程度の研究者が所属して研究を展開している。

### 3.2.3 研究炉の利用の概要

IAEA では、研究炉の主目的に応じて、約 60 基の臨界実験装置（ゼロ出力）、2 基の原型炉、そして約 160 基の多目的の研究炉の 3 つに分類し、主に、教育訓練はもとより、研究や同位体製造やシリコン半導体材料中への不純物注入などの産業応用に使われている。特に、研究目的の原子炉は、中性子の物理に関係した研究、材料の分析や試験、高い原子番号の同位体の探索や特性研究、医療応用など広い範囲に使われており、原子力発電炉の基礎技術の強化、核融合炉研究の推進、環境科学への応用、先端材料開発、薬品開発や核医学関係での実用化開発にも幅広く利用されている。

具体的な利用法については、IAEA のデータベースなど(1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(6)、(7)、(8)で使われている利用分類に沿って整理すると以下ようになる。

**\*教育／訓練：**原子力を専攻している学生、院生、原子力発電所や研究機関に従事する技術者や研究者、原子力行政や規制を担当する官僚などの技術知識や技術能力を向上させるためのツールとして利用。

- \* **放射化分析**:物質に中性子を照射し、その中に含まれる原子核を放射化し(放射性同位元素を生成)、その放射線を分析することで、微量な元素(原子)を検出、定量化し、幅広い分野で利用。
- \* **同位体製造**:中性子の照射によって、放射性同位元素を製造し、医療用(診断、治療)、研究用(トレーサー、放射線源)、工業用(非破壊検査、厚み計、イオン発生)などの利用先に供給、特に医療用では、Mo-99、Ir-192、I-125、Co-60などが、工業用ではIr-192やKr-85などが多く使われている。
- \* **地質年代測定**:地質の性質を知るために岩石や土壌を、放射化分析法と同様の方法で、蓄積された年代などの評価などに中性子を利用する方法である。
- \* **シリコンドーピング**:世界各国で使われている半導体のほとんどで利用されている。シリコン半導体の性能を発揮するために、中性子照射により純粋なシリコン結晶を、放射化によってリンの原子を生成する方法で、特に大電力スイッチング用半導体の製造プロセスの一端を担う。
- \* **中性子ラジオグラフィ (RG と略すこともある)**:中性子を使って物質の内部の構造を映像化する技術で、中性子の透過力の特性(鉄などの比重の大きな物質中で透過する能力は $\gamma$ 線やX線に比べて高く、水素などの軽い元素に対しては透過力は小さい)を利用した非破壊検査などに利用。
- \* **中性子散乱**:中性子の持っている特性で、物質と中性子の相互作用の中で、波の性質を利用した散乱現象や回折現象を使って、原子や分子の構造に関する情報を得る方法で、X線や $\gamma$ 線を利用する方法に比べ、中性子の透過特性を使った幅広い応用が開発されている。
- \* **陽電子源**:陽電子が結晶構造の解明に役立つ方法であることから、最近この研究開発に取り組む機関が増えている。その内容は陽電子の発生(陽電子崩壊同位元素の製造法や、 $\gamma$ 線消滅法など)と原子炉からの取り出しなど、その応用研究も徐々に進められている。
- \* **医薬学**:薬品関係での利用は、前述の散乱現象を用いて薬剤の性能評価を行っているが、これ以外に、脳や肝臓などのがん治療に中性子を用いている例がある。この方法は、ボロンを患者の治療部に注入し、ボロンに中性子を照射すると、 $\alpha$ 線トリチウム同位体はかなり高い確率で放出され、この $\alpha$ 線等のがん細胞の破壊能力を使ってがん治療を行う。
- \* **計測器校正・基板照射**:発電用原子炉や大型研究炉で使われる電子機器関係の特性変化を調べるために研究炉を使用する方法で、原子炉出力を中性子の増減で計測する時に使われる中性子検出器(電離箱、核分裂計数管など)の校正試験や、プラント内で計測/制御の主要機器である半導体基板の中性子、 $\gamma$ 線などの放射線による劣化状況を調査するための照射試験に使われる。
- \* **材料・燃料照射**:原子力発電所で使われている、燃料や炉心を構成している鋼材などは、長時間中性子の照射を受け、材料の特性が変化する(燃料の場合は核分裂による同位元素の発生の効果、鋼材の場合はもろくなる等の変化)。この状況を把握して、保守などの対応策を検討する。このために、発電用原子炉で使われている材料の特性や、改造に使われた材料などを照射し、特性の変化の監視などが行われ、発電炉の安全性の維持に役立っている。
- \* **学術/工学的基礎研究**:今後の原子力発電や中性子に関連する素粒子などについての研究全体を表現した利用方法であるが、代表的なものには、高レベル放射性廃棄物に含まれる長寿命の放射性物質の核変換(マイナー・アクチナイドの消滅)の基礎研究、冷却材喪失時に炉心温度が上がっても容易に溶融しない燃料被覆材の研究、医療用の新放射性同位体元素の製造、

がん治療時の放射線防護のシミュレーションの研究、短寿命核種や即発 $\gamma$ 線放出核種の中性子断面積の測定、さらに未来技術でもある反ニュートリノ粒子を使った画像化研究<sup>(16)</sup>、などがある。

これまで述べた利用先に対して、世界の研究炉がどのように分布しているのかを、研究炉の出力別に整理し、表 3-2 に示す。

表 3-2 研究炉出力と利用の統計

炉出力	教育 訓練	放射化 分析	同位体 製造	地質	シリコ ンドー ピング	NRG	中性子 散乱	陽電子 源	BNCT 等 の医療	計測器校 正・基板照 射	学術工学 基礎	燃材料 試験	炉基数
1kW 未満	39	12	2	0	0	3	2	0	0	6	3	7	66
1kW～99kW	20	19	7	3	0	6	1	0	2	3	3	4	32
100～999kW	14	16	9	1	0	12	2	0	2	2	1	5	27
1MW～1.99MW	14	13	10	5	1	8	3	1	1	0	0	4	15
2MW～2.9MW	7	7	5	2	0	6	4	0	1	0	1	3	8
3MW～4.99MW	4	2	3	1	2	3	2	0	0	0	1	1	4
5MW～9.99MW	5	7	8	2	1	4	2	0	3	0	0	6	9
10MW～49.9MW	17	16	19	4	4	11	15	0	5	2	6	12	27
50MW 以上	10	9	12	1	3	4	5	0	0	0	9	13	14
合計	130	101	75	19	11	57	36	1	14	13	24	55	202

IAEA “Research Reactor Data Base” 2017 年 5 月を整理

これらの利用についての詳細な内容の説明と研究炉で適用するときに留意すべき主要な項目、必要な設備や費用の概略、利用のために望ましい人材などについて、IAEA から提起されている資料<sup>(4)・(5)</sup>を整理し、研究炉のニーズの整理に活用した。

また、これらの研究炉の利用の中で、比較的多く利用している国の割合や研究炉全体に占める割合、利用するための準備期間や費用などの概要を表 3-3 にまとめて示す。



表 3-3 世界の研究炉の主な利用法と主要項目

	教育訓練	放射化分析	同位体製造	地質年代測定	シリコンドーピング	中性子ラジオグラフィ	中性子散乱	医薬学 BNCT	燃料・材料照射
利用国数	54	54	45	21	20	40	33	13	29
同上割合 (%)	98	98	82	38	36	73	60	24	53
利用研究炉数	172	125	94	25	31	71	50	23	71
同上割合 (%)	71	51	39	10	13	29	21	9	29
望ましい最低出力	～1kW	100kW	10MW	10MW	10MW	10MW	10MW	100kW	10MW以上
準備及び利用期間 (年)	0.5～1	2～3	0.5～5	0.5	3～5	2～4	4～10	5	3～10
追加設備費用 (KUSD)	5～80	150～600	50～5,000	10	20～1,000	500以上	2,000以上	2,000～5,000	5,000以上
日本円換算	55～880万円	16.5百万～66百万	5.5百万～5.5億円	1.1百万	22百万～1.1億	55百万	2.2億以上	2.2億～5.5億	5.5億以上
必要な人員	1～3	2	2～20	1	2～6	2～3	2～4	2～3	2～20

IAEA NP-t-5.3 “Application of Research Reactors”, IAEA, 2014 を参照して編集。55 各国、243 基の運転研究炉のデータ。

2013 年調査分

### 3.2.4 海外で運転中の代表的な研究炉

現在運転中の海外の研究炉<sup>(1)-(8)</sup>の中で、特徴のある研究炉の幾つかを取り上げ、その主な利用先や特徴を整理して表 3-4 に示す。

表 3-4 特徴ある運転中の研究炉

地域	国名	炉名	出力	運転開始	主な利用	特徴
アジア オセア ニア	オーストラリア	OPAL 軽水プール	20MW	2006年	中性子散乱研究、Siドーピング、RI製造	国際協力、近代的研究／実験設備の充実
	中国	CARR 軽水プール／タンク	60MW	2010年	燃材料照射、RI製造、Siドーピング、散乱、ラジオグラフィ、分析	中国産化炉 産業化、中性子散乱研究
	韓国	HANARO 軽水プール	30MW	1995年	RI製造、Siドーピング、散乱研究、分析、トモグラフィ、人材育成	国際協力、産業化
北米	米国	ATR 軽水タンク	250MW	1967年	軽水炉燃・材料の照射 革新的原子力研究 散乱研究	共同利用 連携研究のとりまとめ 革新的原子力研究
		HFIR 軽水タンク	85MW	1965年	軽水炉燃・材料の照射 散乱研究 新材料開発 人材育成	中性子散乱 新材料開発 シミュレーション技術
		MITR 軽水タンク	6MW	1958年	材料照射基礎研究、BNCT、散乱研究、分析 人材育成	BNCT研究、 材料基礎研究の連携
	カナダ	NRU 重水プール／タンク	135MW	1957年	RI製造 (Mo-99)、燃材料相は、散乱研究、人材育成	Mo-99の供給事業 中性子散乱研究
ヨーロッパ	ドイツ	FRM-II 軽水プール	20MW	2005年	中性子散乱、放射化分析、ラジオグラフィ、BNCT、Siドーピング、教育・訓練	先端技術・実験装置の利用、Siドーピングの照射技術、BNCTを含む治療
		FRMZ TRIGA	100Kw	1965年	RI製造、ラジオグラフィ、放射化分析、教育、核物理研究、バイオ研究	低出力炉で多目的利用
	フランス	ISIS 軽水プール	700kW	1971年	教育／訓練	教育／訓練専用炉 遠隔教育
		ILL 重水	58.3MW	1971年	燃材料照射、中性子散乱研究、材料・バイオ研究 RI製造	仏で最高中性子束利用 耐震補強、基礎研究から 実用化研究
		OSIRIS	70MW	1966年 1970年 出力増加	RI製造、Siドーピング、放射化分析、核融合／第4世代炉材料照射	仏で最高出力照射炉、 次世代原子炉開発
	ベルギー	BR-2 軽水タンク／プール	100MW	1961年	燃材料照射、RI製造、(Mo-99)、Siドーピング、教育、基礎研究	西欧最高出力炉、 西欧向けRI製造
	オランダ	HFR 軽水タンク／プール	45MW	1961年	燃材料照射、RI製造、中性子散乱研究、ラジオグラフィ、Siドーピング、	老朽化対策として PALLAS炉へのつなぎ、 西欧向けRI製造
ロシア	ロシア	VK-50	200MW	1964年	発電炉安全性評価、熱電併用の実証、放射化分析	熱電併用炉の開発、自動 運転化
		IRT-T 軽水 プール	6MW	1967年 1984年 出力増加	RI製造、放射化分析、Siドーピング、宝石照射、基礎物理	基礎研究から実用化に 向けたサービスの展開
		IBR-2M 高速パルス炉	平均2MW パルス 1.830MW	1978年	中性子散乱、放射化分析、核物理、放射線生物の研究	パルス高速実験炉、散乱 実験、パルス放射化分析
その他の 地域	ポーランド	MARIA 軽水プール	30MW	1974年	RI製造、中性子散乱研究、ラジオグラフィ、天然石照射、検出器校正	RIの東欧圏への販売、 天然石照射、検出器校正
	南アフリカ	SAFARI-1 軽水タンク／プール	20MW	1965年	Mo-99を中心にRI製造、中性子散乱、ラジオグラフィ、放射化分析、Siドーピング、地質関係	Mo-99の西欧への販売、 PGNAA放射化分析
	アルゼンチン	RA-3 軽水プール	10MW	1967年	RI製造、燃材料照射、BNCT、放射化分析	Mo-99の南米供給 ラテンアメリカでの BNCT
OECD	ノルウェー	HBWR 重水	20MW	1959年	燃料、炉心材料の研究、原子力の安全性研究	世界的な共同研究の運用

これらの研究炉の特徴は、利用方法に特徴がある炉、実用化や基礎研究の内容に特徴のある炉、運用や国際協力に貢献している炉などの視点から選んだ。ここで取り上げた特徴は、研究炉利用技術の産業化への取り組み、原子力産業の推進、活性化するための研究炉の活用、国際連携の中核に大別さ

れる。

これを地域別に見ると、米国は高出力の研究炉による原子力産業の支援としての軽水炉用の燃料、材料の照射利用が多く、基礎的な学術利用とのバランスをとった利用が特徴である。アジアでの利用は、発電炉支援もあるが、RI 製造やシリコンドーピングなどの産業化への取り組みにウエイトをおいているように見える。

ヨーロッパは、アジアに比べより発電炉支援に重点を置いているが、産業化への動きは米国に比べ比率が高い。

このように地域別に見ても、研究炉の利用方法に差が出ていることは興味深い。

### 3.3 海外研究炉の検討、計画と建設の各段階にある研究炉の概要

海外では多くの研究炉が検討／計画／建設を進めているが、それらの動向は、運転中の研究炉と並んで、今後の我が国の研究炉の計画に参考にすべき点が多く、これらの研究炉の主要目の整理とともに代表的な研究炉の概要について触れる。

#### 3.3.1 構想検討中の研究炉

現在、海外でも多くの将来に向けた研究炉や実験炉などの検討が進められており、文献や公開情報源を通しその構想などの一部が公表されている。代表的な研究炉では、第4世代型発電用原子炉の見通しを得るための研究のインフラとして、EUを中心に検討されている実験確認のための研究炉の構想の動きがある。これは、軽水炉開発計画の NUGENIA プロジェクトと並んで設けられている ESN11 としての高速炉研究開発プラットフォームにより取り組んでいるものである。

これに該当する研究炉としては、ASTRID、ALFRED、ALLEGRO でいずれも 2025 年以降の建設を目指して組織的な研究が進められている<sup>(2) (9)</sup>。

一方、既存の原子炉の世界的な普及に向けて、原子力先進国である、ロシアや中国、フランスなどが開発途上国の発電炉の建設支援に先立ち、人材育成や研究基盤形成の一環として原子力協力協定を締結して、研究炉の概念検討を始めている例も数多く見られる<sup>(2) (3)</sup>。

これらをまとめたものを表 3-5 に示す。

表 3-5 検討中の研究炉

国名	炉名	出力	型式	建設開始	建設費概算	利用目的
ボリビア	未定	0.1~0.2MW	プール	2017年	未定	多目的研究炉
フランス	ASTRID	600MWe	Na冷却	2025年以降	約700億円	実験実証
ルーマニア	ALFRED	120MWe	鉛冷却	2030年以降	約1,400億円 (約1B€)	実験実証
ハンガリー	ALLEGRO	未定	ガス冷却	未定	未定	実験実験
ウガンダ	未定	未定	未定	2017年 契約締結	未定	研究炉
ケニア	未定	未定	未定	2016年 契約締結	未定	研究炉
アゼルバイ ジャン	未定	未定	未定	2014年 契約締結	未定	研究炉

IAEA“Research Reactor Data Base”(2017年5月)、WNA(2017年10月17日)

### 3.3.2 計画中の研究炉

海外炉の中でも計画が明確になり IAEA が確認していて特に本事業で検討を行う上で参考になると考えられる研究炉について整理をした。現在、10基が計画中であり、この概要を表3-6に示す<sup>(1)</sup>。

これらの計画の中には、タイの45kW規模の研究炉からベルギーで計画している85MWの鉛冷却高速炉の研究炉と幅広くあり、炉の冷却方式も軽水炉、鉛冷却-加速器併用炉、トリウム炉(ペブルベッド方式や熔融塩方式)、ヘリウム冷却など多岐にわたり、また多様な研究炉の利用も取り込んだ計画になっている。

表 3-6 海外で計画中の研究炉

国名	炉名	出力(MW)	型式	建設開始	利用目的
ベルギー	MYRRHA	85	高速炉		消滅、多目的
ブラジル	RMB	30	プール		多目的
中国	TFHR	2	Th PB	2017	実験実証
中国	TMSR	2	Th MS	2020	実験実証
韓国	KJRR	15	プール	2014	照射、散乱、RI
オランダ	PALLAS	(30MW)	プール		RI中心
タイ	SUT	0.045	MNSR	—	—
ウクライナ	多目的炉	20	プール	2014	多目的
米国	HT3R	25	He冷却炉		照射、水素
ベトナム	多目的炉	15	プール		多目的

IAEA“Research Reactor Data Base”(2017年5月)、WNA(2017年10月17日)

以下に主要な計画中の研究炉の特徴を述べる。

### (1) MYRRHA (ベルギー) <sup>(11)</sup>

EUが進めている、第4世代の原子炉の実現性の研究と数々の第3世代から第4世代に使われる燃料や材料を照射するための炉で、2024年の運転開始で約30年間の運転を目指している。

この炉は鉛-ビスマス合金の冷却高速炉で、プロトン加速器を取り付け、核反応と核分裂反応を使った、マイナー・アクチナイド（高レベル放射性廃棄物に含まれるPuを除いた超ウラン元素）の照射（ADS：粒子加速器による破砕システム機能）や燃料／材料照射、同位元素製造も行うことを目的とした研究炉である。

粒子加速器では、2.5mAのプロトン（陽子）を600MeVまで加速し、原子炉に導く。一方原子炉は、50～100Mwの未臨界と100MWの臨界状態の2つのモードで運転出来るように設計されている。

また、この研究炉の建設に係わる費用は2010年から2023年の間で、エンジニアリング費は202M€（283億円）、機器装置類は370M€（518億円）、建屋196M€（275億円）、予備費192M€（269億円）、合計960M€（1,344億円）である。

更に、運転開始後の収支バランスについても公表されており、2024年から30年間に亘り毎年の支出は、組織運営費を14.6M€（20億円）、運転管理費を46.6M€（65億円）と算出し、一方、収入をコンソーシアムからの資金25.2M€（35億円）、科学技術関係活動の収入17.1M€（24億円）、シリコンドーピングや放射性同位元素製造などのサービス事業で18.8M€（26億円）以上を見込んでおり、研究だけでなく事業収入をかなり期待している。

### (2) RMB (ブラジル) <sup>(10)</sup>

2013年に建設が決定された多目的炉で、アルゼンチンのRA-10とほぼ同規模で放射性同位元素の製造、材料等の照射、放射化分析、中性子の散乱に関する学術研究やサービスを目的にしている。また建設もアルゼンチンのRA-10と同様、INVAPによるもので、お互いに競い合い、南アメリカの原子力研究をこの2つの研究炉がリードしてゆくものと見られている。

### (3) KJRR (韓国) <sup>(14)</sup>

現在運転中のHANAROに追加して、韓国南東部に商業活動を目指した研究炉の建設を考えている。Mo-99を始めとする放射性同位元素（Ir-192、P-33、Lu-177、I-131、Co-60など）の製造や、Si合金12インチ径までのドーピング照射、さらに中性子散乱などの照射サービスなどの産業化を目指した研究炉である。

### (4) PALLAS<sup>(12)(13)</sup>

オランダの国立研究所で現在稼働中のHFR（高中性子束炉）の代替として検討されている研究炉で、Mo-99などの放射性同位元素の製造を主目的とする多目的炉で、燃料・材料の照射も視野に入れて設計を進めている研究炉である。在来技術を活用したプール型で、出力は30MW以下になるよう（2017年5月現在）設計を進めている。またホットセルなどの付帯設備は在来の研究施設も利用する計画である。この研究炉については、民間会社NRGが建設、運用に当たることにな

っているが、建設は公費（国や自治体）で賄い、運用では、独立経営を目指すなど、民営化を指向した新しい運営スキームに特徴を持っている。

### 3.3.3 建設中の研究炉

海外では現在、建設中の研究炉は 8 基あり、これらも国内の研究炉の今後の展望に役立つところが多々ある。その一覧を表 3-7 に示し、代表的な研究炉の概要を以下に述べる。

表 3-7 海外で建設中の研究炉

国名	炉名	出力(MW)	型式	建設開始	利用目的
アルゼンチン	RA-10	30	プール	2014	燃料実証試験 SMR の試験
アルゼンチン	CAREM25	100	PWR	2013	実証試験
フランス	JHR	100	タンクイン プール	2007.3.19	燃材料試験 同位体製造
ロシア	MBIR	150	高速炉	2015.11.18	
ロシア	IRV-2M	4	プール	1974.1.1	中性子療法
ロシア	PIK	100	タンク	1976.1.1	燃材料試験
タジキスタン	Argus-FTI	0.05	均質炉	1981	多目的
サウジアラビア	LPRR	0.03	プール		
ウクライナ	KIPT	0.00019	未臨界	2013.1.1	多目的

IAEA“Research Reactor Data Base”(2018年3月)、WNA(2017年10月17日)

#### (1) CAREM<sup>(2)</sup>、<sup>(15)</sup>

一体型 PWR の小型炉 (SMR) の原型炉で、熱出力 100MW、電気出力 27MWe の実証実験炉である。また、水循環用のポンプは無く、自然循環冷却をしている。建設の許可を 2009 年に受け、2015 年に機器設置を終了し、2016 年には燃料装荷、そして 2017 年に運転を開始したいとしている (2017 年 11 月現在)。

#### (2) JHR (フランス) <sup>(17)</sup>

EU においては、原子力の推進のために、戦略的な研究計画が進められている。現在建設中、運転中の第 3 世代の軽水炉についての安全性向上などの研究開発や、第 4 世代炉の材料・燃料開発のために重要な要素である、構造材料や燃料体の照射効果を研究するための施設である。従来から活用してきた OSILIS 炉などが老朽化してきたことから、EU は研究炉についての戦略 (SNETP) を策定し、今後数十年にわたる取り組戦略を立てている。この戦略計画の一環で、ジュール・ホロヴィッツ炉 (以下、「JHR」という。) は照射炉としてフランスのカダラッシュ研究所の一角に、2007 年に建設着手、2020 年当初の運転開始を目指している。

JHR の原子炉建屋は、直径約 37 メートル、大きな補助建屋に 3 つの使用済燃料プールや照射後試験をするためのホットセルのある実験室を 4 室設けている。

この建設プロジェクトは、フランス原子力庁 (CEA) が事務局となって EC の研究開発局、フランスのフランス電力会社 (EDF) 等の企業の他、ベルギー・チェコ・フィンランド・スペイン・スウェーデン・インド・イスラエル・英国などの公立研究機関がメンバーとなったコンソーシアムを形成して推進している。

このメンバーには、出資額に応じた施設の利用権利を付与することや、国際的研究炉利用枠組み (ICERR) への参加権利も付与されるとしている。また日本原子力研究開発機構 (以下、「JAEA」という。) も立ち入りに関する特別の契約をしている。

### (3) MBIR (ロシア 高速炉) <sup>(20)</sup>

この研究炉は高速炉心を用いた MTR (照射用原子炉) で、多くの実験孔を持った特徴のある研究炉である。また、IAEA による 2 つの国際協力による研究炉利用である、ICERR<sup>(18)</sup> の枠組みの一つとしてフランスの JHR と並んで活動を開始している。

この研究炉は 2009 年に建設を決定し、2014 年には建設プロジェクトが発足、2018 年には周辺設備を含んだコンプレックス全体の建設に着手し、2020 年に完成予定である。

## 3.4 海外の低中出力の研究炉

前節までは、海外の研究炉の概念検討の段階から運転中までの概要を述べたが、ここでは、従来から数多く使われてきた出力のやや低い研究炉の動向について述べる。

海外で運転している低・中出力の研究炉の基数については図 3-4 に示したが、今後の検討の参考になるとと思われる研究炉を取り上げ、その概要を表 3-8 に示す。

表 3-8 海外で運転中の低・中出力の代表的な研究炉

No	国名	炉名	出力	臨界	主要な利用
1	韓国	AGN-201K	10W	2008	人材育成
2	中国	ZPRFAST	50W	1970	人材育成
3	フランス	MINERVE	100W	1959	人材育成、検出器開発
4	スイス	PSI CROUCUS	100W	2011	EU プロジェクト (COLIBRI, VOID, PETAL) 中性子雑音測定
5	ジャマイカ	JM-1 (UWI CNS SLOWPOKE)	20kW	1984	中性子放射化分析
6	ブラジル	IPR-R1 (TRIGA)	100kW	1960	炉物理 (核データ収集)、人材育成、放射化分析
7	アルゼンチン	LPRR	100kW	計画中	人材育成、散乱
8	ドイツ	FRMZ(TRIGA)	100kW	1965	ラジオグラフィ、放射化分析、人材育成、医学、バイオ
9	フィンランド	FiR1(TRIGA)	250kW	1962	BNCT、RI 製造、医学・工学教育/訓練
10	ベトナム	DNRR(TRIGA)	250kW	1984	人材育成、RI 製造、放射化分析、Si ドーピング
11	アルゼンチン	RA-6	500kW	1982	教育訓練 (Web 利用遠隔教育)
12	フランス	ISIS	700kW	1966	人材育成 (教育訓練専用炉)
13	イタリア	RC-1(TRIGA MK2)	1MW	1960	炉物理/工学の研究
14	米国	Coqui MIPF (プール型)	1MW	計画中	RI 製造専用 (病院付設)
15	オランダ	HOR	2MW	1963	RI 製造、中性子散乱、放射化分析、教育訓練、陽電子ビーム
16	アルゼンチン	RA-10	3MW	建設中	多目的炉 (Mo-99 製造中心)
17	ヨルダン	JRTR (プール型)	5MW	2016	教育、放射化分析、散乱
18	米国	MURR	10MW	1966	BNCT、放射化分析、散乱

IAEA "Research Reactor Data Base" (2018 年 1 月)

この表に示すように、低・中出力の研究炉でも、100W を超すと、人材育成以外の活用が広がりを見せ、250kW 程度でもかなりの種類の研究開発からサービスまで行えることが分かる。ただし RI 製造は、製造可能な核種は限定され、Mo-99 などのグローバルな市場性の高い RI の製造には余り使われてはいない。

また一部の国では、教育訓練にかなり高い出力の炉が使われているが、これは 10W 以下の研究炉では実現出来ない、炉心部での温度効果などの発電炉の運転上重要な現象の学習を充実させる目的である。

### 3.5 海外の研究炉の使用経験で提起されている核燃料に関する課題

研究炉の計画立案にとって、これまでに深く触れなかった核燃料についての問題がある。これについては、多くの運転経験や国際協定の推移を反映する必要もあり、最近提示されている資料から、現状の課題を整理し以下に述べる<sup>(2)</sup>。

#### (1) 高濃縮ウラン燃料からの転換

1970 年代前に建設された多くの研究炉の燃料は、発電炉に比べてかなり高い濃縮度（現在では 20%程度）の燃料を使っている。この理由は、U-238 が少ないために燃焼後のアクチナイドの量が低いことや核分裂生成物による発熱が比較的少ないことなどの特長がある。

研究炉での燃料は数キログラムで、発電炉の数トンに比べて極端に少ない。また運転温度も低温（100℃以下）ではあるがそれらを厳しく守って運転する必要がある。

一方、発電炉の燃料の出力密度はほぼ 5kW/cc であるが、研究炉では約 17kW/cc と高い。また燃焼度も高くそのため構造的強度も破壊を避けるために高くする必要がある。

また高濃縮ウラン（以下、「HEU」という。20%以上の U-235）は炉心を小型化でき高い中性子束を利用でき、かつ燃料交換をしないで長時間運転できるという特徴もある。そのために 1970 年代までの研究炉は 93%という高い濃縮度の燃料を使っていた。

1980 年には国連主催の国際原子力燃料サイクル評価会議で、兵器転用を防ぐために研究炉の燃料の濃縮度は 20%以下を目標とするとされた。これに従って米国では Reduced Enrichment for Research and Test Reactors（以下、「RERTR」という。）の枠組みが発足した。

ほとんどの研究炉の燃料は米国とロシアから供給されているため、その枠組みはこの 2 か国を中心に取り扱われている。（RERTR プログラムは、1MW 以上の研究炉の燃料について関わることになっている。）

全体で 207 基の HEU を使っている研究炉のうち、129 基の研究炉の燃料の変更が行われ、その対象になった HEU は 20 トンにもなった。

2004 年には米国 National Nuclear Security Administration（以下、「NNSA」という。）が地球的規模脅威削減イニシアティブ（Global Threat Reduction Initiative（GTRI））を設定し RERTR と整合性を持った高濃縮の新・使用済燃料や放射性物質の取扱いに関する方針を提示した。それに伴って、2010 年の 1 月には 915kg の新・使用済 HEU が 9 か国（ハンガリー [155kg]、セルビア、ルーマニア、リビア、ウズベキスタン、ポーランド、チェコ、ラトビア、ベトナム）からロシアに返還されている。2016 年には残りの 700kg の HEU がポーランドから追加して返還された。

一方 2010 年の 1 月中旬に、1240kg の米国起源の HEU が、ヨーロッパ、イスラエル、トルコ、



ラテンアメリカ、日本、及び東南アジアから返還され、引き続き、ベルギー、イタリア、チリ、メキシコ、ウクライナ、南アフリカ、及びオーストリアなどが返還している。2016年の半ばにはプルトニウム、数百 kg 以上（日本の高速臨界実験装置燃料を含む）が米国へ返還された。

2011年にはカザフスタンの 33kg の HEU は希釈され核物理研究所の WWR-K 炉で使えるように低濃縮化した。

2014年3月までに HEU はプルトニウムと分離して 12 か国が返還した。追加して 14 か国の 24 基の研究炉は HEU から低濃縮ウラン（以下、「LEU」という。）に変更された。ポーランドの 30MW の Maria 原子炉は 2014年に LEU に切り替えられた。

米国では 2008年の後半にテキサス A&M、フロリダ大学、パデュー大学、オレゴン州立大学、ワシントン州立大学の研究炉は 20%濃縮の燃料に変更し、ウィスコンシン大学は 2009年に変更した。

中国では 2016年に小型中性子源（MNSR）の燃料を稠密 LEU 燃料へ変換する共同研究に米国の NNSA とアルゴンヌ国立研究所（ANL）との共同で着手した。

2016年4月には、90基以上の HEU の研究炉で、世界中の 30年以上運転してきた炉では変換あるいは停止をし、5.3トン以上の HEU やプルトニウムを回収したことが確認されている。

## (2) 使用済燃料の返還、再処理

世界中での使用済燃料の返還についての考え方では、米国製の燃料は米国が引き取って最終処分をするプログラムを制定して、ほぼ 0.5 トンの HEU が返還されている。このプログラムの最終時の 2006年には U-Mo として利用できると考えてきたが、この米国引き取りの目標日は 10年間延長されていて現在のところ使用国が保管管理をしていて、このプログラムは完了していない。

ロシアでは、3極共同プログラムにより、IAEA と米国と共同で 2 トンの LEU と 2.5 トンの HEU 使用済燃料をチェリアピンスク近郊のマヤーク再処理施設に送り込まれた。このロシアの研究炉燃料返還プログラム（RRR FRT : Russian Research Reactor Fuel Return Program）では燃料引き取りと新燃料の輸送で、2005年から 2008年までに 10か国の間に 38航路を想定し、さらに 6か国の交換された燃料も輸送することとなった。17か国は旧ソビエトの供給した研究炉を保有し、25基がロシア国外で運転され、15基は現在も運転されている。シリアはこのプログラムに参加しているが、北朝鮮はこの枠組みには入っていない。

2004年で構築されたロシアと米国の使用済燃料の回収共同プログラムでは 14か国の参加から 2016年から 2024年の間に拡大することになっている。現在参加している 14か国は、ベラルーシ、ブルガリア、ハンガリー、ベトナム、ドイツ、カザフスタン、ラトビア、リビア、ポーランド、ルーマニア、セルビア、ウズベキスタン、ウクライナ、チェコである。

研究炉の使用済燃料の崩壊熱は  $2\text{kW}/\text{m}^3$  以下で、放射能レベルは高いが中レベル廃棄物（ILW）に分類される。また U-Al 燃料や U-Mo はフランスの AREVA 社で再処理することが出来る。しかし、U-Si や TRIGA 炉の燃料は通常の再処理施設では処理が出来ないとされてきたが、少なくとも一つの商業用再処理会社は U-Si、U-Al などと共通な溶液を準備すれば可能であると考えている。

## 3.6 海外での研究炉計画の戦略的な取り組み

前項まで、研究炉の動向を報告してきたが、今後の研究炉の導入に当たっての課題も整理しておくことも必要であるため、課題の一部について、数々の公開文献から見て取れる代表的な国々や地域

が対応のために計画／実践をしている対応戦略を整理した。

現在の研究炉の課題は、指摘するまでもなく、多くは 1960 年代以前建設されたものが多く、老朽化の課題を指摘する意見は多い。また、この時代に建設された研究炉では高濃縮ウラン燃料を採用していたが、核不拡散の観点から 1990 年代から低濃縮化が計られ、それに従った燃料転換、改造なども行われ、それによる研究炉の一時的な停止などが課題として指摘されてきた。さらに、東日本大震災に伴う、東京電力福島第一原子力発電所事故による教訓から、安全対策などの見直し対策も多くの研究炉にとって大きな課題でもある。この対応については、IAEA からのガイドラインに沿って、フランス、中国、韓国などから改善レポートが発行されている。

一方、先進国の原子力関係の研究開発費の拡大による研究炉への予算配分の低減などの理由から、新規の建設に回る費用の低下などの財源問題があり、これも老朽化などの課題対応が難しくなるなどの二重の課題もあるように見える。

このような先進国の動向は、新規の原子力導入国などの基盤整備などの支援にも影を落としている場面もあるように見える。

以上の課題の対応には、当事国だけで一挙に解決する方策はないと思われるが、それらの課題で、取り組みに工夫を重ね、解決策を考え、着実に実現している例も多く見られる。

この中で我が国でも参考になる例も見られ、代表的な課題とその対応策の例を表 3-9 にまとめて示す。

表 3-9 研究炉の課題と戦略的な取り組みの例

課 題	対応戦略	事 例	概 要
研究炉の長期停止	国内でのバックアップ体制	米国：NSURF (参考文献 22)	アイダホ国立研究所 (INL) の ATR がとりまとめて国立研究所、大学などの研究炉や施設の相互融通プラットフォーム
		韓国：国内での増設によるバックアップ (参考文献 13)	運転中の HANARO (30MW)に追加して、KJJR(15MW)を建設中
		中国：国内に分散設置している研究炉の相互融通 (参考文献 23)	最新の CARR(60MW)を中心に、HFTR(150 MW)、CMRR(20MW)、MJTR (5MW) などや、2 基の中型炉の多目的炉との連携
		フランス：国内の研究炉の相互融通 (参考文献 24)	3 研究所で管理している、多目的炉の ILL(58.3MW)と、ORPHEE(14MW)の相互連携や CABRI(25MW)などのバックアップ
	国際的なバックアップ体制	EU:SNETP (持続可能な原子力技術プラットフォーム) の枠組みの中での連携、人材区政ネット ENEN の枠組みで連携 (参考文献 9)	人材育成では、ISIS (フランス) を中心に、域内の大学や研究機関の研究炉の相互融通、研究開発では役割分担をしているなかでのバックアップ
		EERRI (Eastern Europe Research Reactor Initiative): 研究炉所有国を中心にした東欧諸国のネットワーク (参考文献 25)	オーストリア、チェコ、ポーランド、ハンガリー、ルーマニア、セルビア、スロベニア 7 か国に設置してある 9 基の研究炉の利用 (教育、分析、散乱研究、材料照射など) の利用についてのネットワーク (IAEA 支援)
建設・運転・廃止措置の費用の確保	プラットフォーム結成による公的資金確保	米国 GAIN 枠組み (参考文献 26)	DOE, NRC, EPRI 連携による新規技術の商用化。2015 年発足時に DOE 100 億 \$ をインフラのために出資、その後毎年 10 億 \$ の研究費などの予算
		EU SNETP への投資と民間出資 (参考文献 9)	Horizon 2020 の枠組みで、ESPI (戦略投資組織) や ERDF (ヨーロッパ地方ファンド) が投資し、一方で参画している企業からの出資
	共同出資による建設	JHR の建設コンソーシアムによる資金調達 (出資額に応じた利用権の付与) (参考文献 27)	コンソーシアムメンバー ・フランス原子力庁 EDF,EU,SCK-CEN,VTT,Vattenfall 等
	建設の公費使用と運用の民営化	オランダ PALLAS 炉 (参考文献 12)	設計や準備期間の費用は公共資金 (国と自治体) が負担 (約 8M€) し、建設段階から、私企業 NRG 社が負担。そのための事業は、医療用 RI 製造、原子炉による各種サービス、原子炉の管理などを計画。
途上国支援	国際機関による制度	IAEA による ICERR (International Center based on Research Reactor)	2014 年に設立された制度で、フランスの研究機関 (サクレー、カダラッシュ) の研究炉、及びロシア、ロスアトム社の研究炉を使って、途上国の国々の研究者などに導入に先った研修や実験などを行う機会を作っている制度である。
	研究インフラ支援	研究所、研究炉などの基礎技術取得のためにインフラ整備や留学生受け入れ活動 (参考文献 28)	ロシアや中国、韓国、フランスなどの原子力供給企業が積極的に資金援助や留学生の受け入れなどにより、将来の発電プラントの受注を目指している。

これらの対応の戦略の中には、我が国の研究炉の構想を進める上で参考になるものについては、5 章の人材育成、6 章の運用体制などでも触れる。

## 【参考文献】

- (1) IAEA “Research Reactor Data Base”, As May 2017
- (2) WNA “Research Reactor” (Sept.2017)
- (3) IAEA NP-T-5.1 “Specific Considerations For A Research Reactor Project” (IAEA 2012)
- (4) WNA “Emerging Nuclear Energy Countries”, (Sept. 2017)
- (5) IAEA NP-T-53 “Applications of Research Reactors”, (IAEA 2014)
- (6) IAEA TECDOC-1715 “Commercial Products And Services Of Research Reactors”, (IAEA 2013)
- (7) IAEA No482 “History, Development And Future Of TRIGA Research Reactors” (IAEA 2016)
- (8) IAEA No455 “Utilization Related Design Features Of Research Reactors : A Compendium” (IAEA 2007)
- (9) EU SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform) “Deployment Strategy” (DS 2015)
- (10) C.M.Mazufri, “Designs Of Medical Isotope Production Facilities”, (Proc. On RRFM 2015)
- (11) SCK/CEN “An innovative and unique irradiation research facility” (IAEA INPRO 2015)
- (12) MARISA VAN DER WALT et.al, “DESIGN OF A PALLAS-REACTOR”, (Proc. On RRFM 2016)
- (13) D.Zekveld “Optimizing PALLAS Reactor Utilizing Support an Economically Viable Business Case”, (Proc. On RRFM 2016)
- (14) C.Park, “Current Status Of The KJRR Project And Its Design Feature”, (KAERI 2014)
- (15) Will Davis, “Small Modular Reactors at ANS 2013 Winter Meeting”, (ANS Nuclear Café 2013)
- (16) L.Giot et.al, “BR-2 REACTOR COUPLED MCNPX & MURE SIMULATION FOR THE SOLID EXPERIMENT (ANTINEUTRINO DETECTION)”, (Proc. RRFM 2015)
- (17) J.Estrade et.al, “The Jules Horowitz Reactor: A New High Performance MTR(Material Testing reactor) Working As An International User Facility In Support To Nuclear Industry, Public Bodies And Research Institutes”, (Proc. RRFM 2015)
- (18) NED XOUBI, “JORDAN RESEARCH AND TRAINING REACTOR UTILIZATION FACILITIES” (IAEA-TM-38728, 2010)
- (19) WNA, “World Nuclear Energy : Country Profile Jordan”, (Nov, 2017)
- (20) IAEA, “IAEA designated International Centre based on Research Reactor (ICERR)”, IAEA 2014
- (21) IAEA, “INPRO Dialog Forum in Nuclear Innovation 2010”
- (22) US DOE, “NSURF (Nuclear Science User Facility) Over View”, (2016 NSURF Annual Program Review)
- (23) FENG SHEN, “THE PRESENT STATUS AND FUTURE POTENTIAL APPLICATIONS OF RRS IN CIAE, (IAEA TM38728 2010)
- (24) CEA INSTN “6 Doctoral Level Courses In Nuclear Engineering” (INSTN Web Site)
- (25) J.Vyshinianskas, “Utilization of Research Reactors for Nuclear Education and Training : Overview of Activity (IAEA 2015)
- (26) GAIN “Website : <https://gain.inl.gov/List/Newsroom>
- (27) J.Estrade, “The Jules Horowitz Reactor :A New High Performance MTR Working As An International User Facility In Support To Nuclear Industry, Public Bodies, And Research Institute” (Proc. On

RRFM 2015)

- (28) G.Bigman et.,al “The CEA Scientific and Technical Offer as a Designed ICERR By the IAEA (Proc. Of RRFM 2016)

## 4 研究炉の必要性とニーズ調査

### 4.1 研究炉の必要性と位置付け

研究炉は、初期の原子力開発から核物理学等の基礎研究に用いられ、これまで研究開発、人材育成、産業、医療などの各分野において、我が国の学術、科学・技術、産業に多大な貢献を果たしてきた。

研究炉の利用分野<sup>(1)</sup>は、

- (1) 学術利用（基礎物理、物質科学、工学、生物、農学、生体物質、薬学、医学、食品など）
- (2) 産業利用（リチウム電池、燃料電池、化粧品、プラスチックなどの新製品開発、工業用 RI）
- (3) 医学・治療利用（BNCT、医療用 RI）
- (4) エネルギー利用（原子炉燃料・材料照射試験、放射線化学、測定技術など）
- (5) 人材育成（大学、研究者、原子力技術者、原子力運転者、放射線科学者、外国人原子力技術者など）
- (6) 波及効果、国際貢献

など広範囲に利用されている。

学術利用は、中性子の性質である波動性を利用し多様な物質の構造や運動など深層構造を解明する物質科学から、有用な性質の応用を目指したナノテクやソフトマター（高分子、コロイド、生体膜、タンパク質など）のような新機能材料の開発などの先端技術まで利用されている。また、中性子の強い透過性を利用し、文化遺産や生物の非破壊的な内部透視などにも応用される。

産業利用は、中性子照射による工業用、医薬用の放射性同位元素（RI）の開発、半導体材料の電気的特性を格段に向上したパワー半導体の開発、航空機エンジン内部の燃料挙動の解明などがある。

医療・治療利用としては、BNCT によるがん治療の研究開発が挙げられる。エネルギー利用においては、現在運転中の原子力発電所あるいは新しい原子炉の材料・燃料試験や放射線計測器の開発などがある。図 4-1<sup>(2)</sup>に産業を中心とした中性子利用の市場を示す。

また、研究炉は共通的・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<sup>(3)</sup>。更に人材育成として、学生に対する原子炉運転実習、院生の研究開発、原子炉運転者、技術者への教育や国際交流など利用分野は多岐にわたる。

以上のように、研究炉は我が国の科学技術立国の基盤となる必要不可欠な公共的、基盤的研究施設であり、今後とも科学技術水準の飛躍的な向上や多くの分野で学術、科学・技術の発展に寄与するものと期待されている。

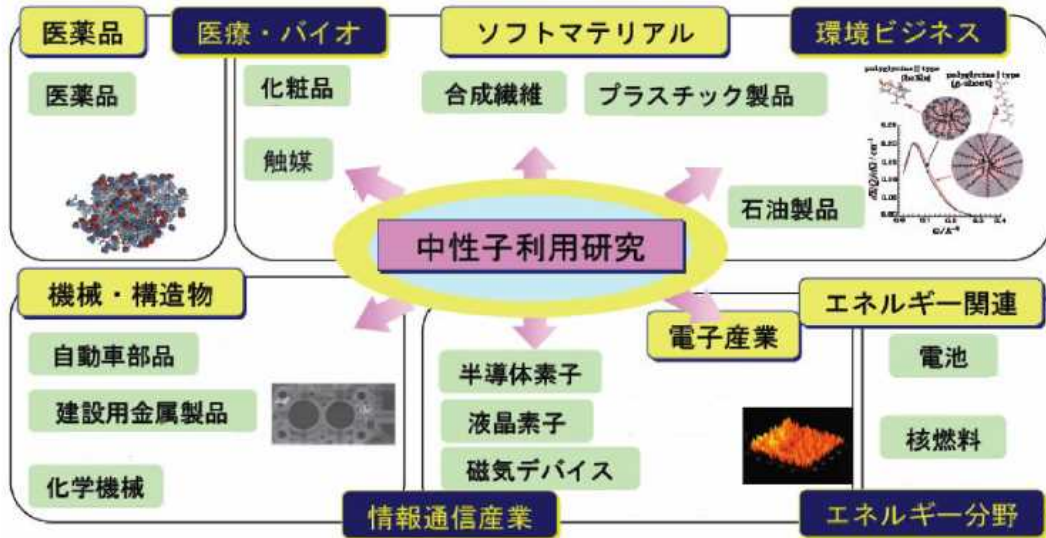


図 4-1 産業を中心とした中性子利用の市場

## 4.2 ニーズ調査

研究炉のニーズ調査は、新たな試験研究炉の機能や仕様を決める上で重要な視点となる。そのため、研究者や産業界がどのような目的で研究炉を利用しているのか、また、どのような研究炉を望んでいるのかを把握する必要がある。ニーズに対しては将来的にも適切に対応する必要があることから、これまで多くの利用者のニーズ把握や関係者の調査が行われ報告されている。本報告書では、これまで報告されたニーズ調査結果を活用し、必要に応じ分析を行い最近の動向などについて言及する。

また、原子力関係機関等を訪問し聞き取り調査を行った。

これまで行われた研究炉の必要性やニーズ調査に関する概要は、次のとおりである。

### 4.2.1 日本原子力学会 「将来必要となる共同利用研究施設について」

研究炉に対するニーズ調査については、主として原子力学会の会員を対象としてアンケート（対象者 48 名）を実施し、補完的に聞き取り調査や文献調査を実施している<sup>(4)</sup>。利用目的をエネルギー利用、産業利用、学術利用及び人材育成の 4 つのカテゴリーに分類し、アンケート調査結果に文献調査等を加え、将来の共同利用研究炉の利用ニーズや研究炉に対する要望事項を取りまとめている。また、ホットラボや運営上の課題にも言及しており、より具体的な検討が行われている。利用ニーズについては後述するが、将来の研究炉のタイプとして 3 案が提案され、国内外の利用者の把握、燃料調達方法、建設や運営の費用などの観点から更に検討を進めることが望ましいと結論付けている。その 3 案は、

- (A) 高速～熱中性子が利用できる高速多目的炉
  - (B) 軽水炉の燃・材料実証、中性子科学における中性子利用、半導体製造を目的とした大型多目的炉
  - (C) 将来の人材育成を考慮した臨界集合体規模の小型原子炉
- である。

#### 4.2.2 JAEA-Review 「次期研究用原子炉（ビーム炉）のニーズ調査」

JRR-3 が改造後 25 年を過ぎたことから、次期研究用原子炉の在り方について検討している<sup>(5)</sup>。科学・技術における中性子科学の重要性、中性子利用におけるビーム炉の重要性など国の政策（グリーンイノベーション・ライフイノベーション（平成 19 年 6 月）及び Cool Earth-エネルギー革新技術計画（平成 20 年 3 月）から、将来の中性子利用技術の必要性や全体的な方向性を示している。

#### 4.2.3 JAEA-Review 「照射炉の照射ニーズに関する報告書」

平成 28 年 10 月に JMTR 及びホットラボを廃止措置対象施設とすることを施設中長期計画で公表したこと、及び東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、照射炉に係る利用ニーズと照射炉の必要性を検討している<sup>(6)</sup>。結論として 3 つの提言にまとめられている。

- (1) 世界の原子力開発を先導してきた我が国にとって照射炉は基盤施設として必須であり、次期照射炉を視野に入れた中核的照射試験施設を早急に確保すること。
- (2) 軽水炉開発、科学技術の向上、産業利用などの利用ニーズに十分対応できるように、これまで蓄積してきた照射技術、ホットラボでの照射試験技術を継承すること。また、原子力に係る人材を育成すること。
- (3) 原子力分野に係る国際的なリーダーシップを発揮し、特に近隣アジア諸国の中核として貢献すること。

具体的なニーズとして、軽水炉の安全対策高度化、高経年化対応の材料・燃料の開発、RI 製造、シリコンドーピングによる半導体製造などを挙げている。

#### 4.2.4 日本学術会議「研究炉の長期停止に伴う影響調査 <記録>」

東京電力福島第一原子力発電所の事故を受けて、研究炉等の再稼働の見通しが立たず利用停止が 5 年間に及ぶことから、学術研究や産業界の研究開発に与える影響についてアンケート調査を実施している<sup>(7)</sup>。アンケートは 146 名（大学 92 名、国公立機関 32 名、民間 16 名、その他 6 名）から回答があり、利用者の分布、利用した研究炉、利用分野、最も関心のある研究分野及び中性子利用の目的を調査し、更に自由記述で意見を求めている。

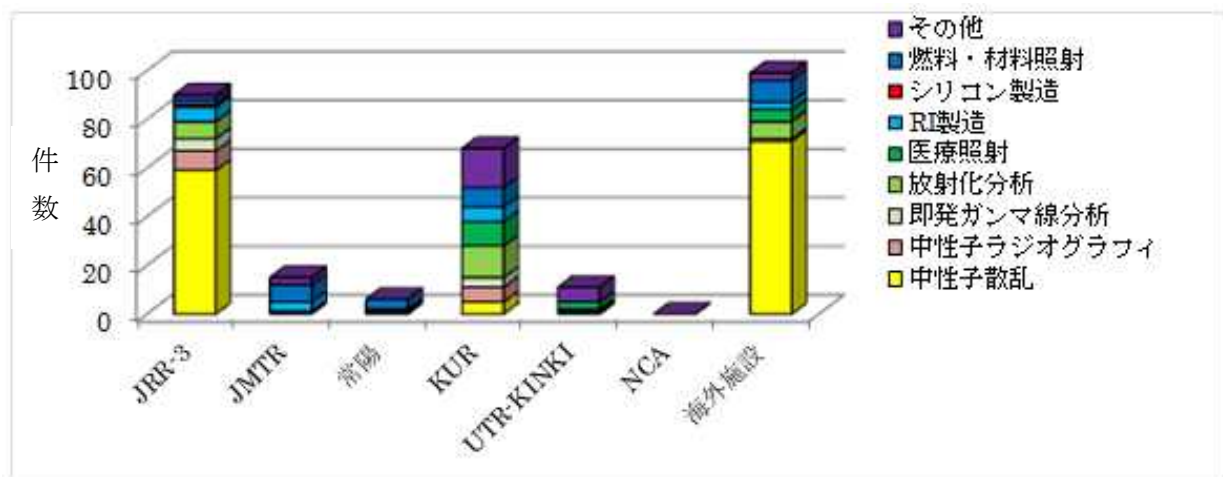
アンケート結果の概要は以下のとおり。

- (1) 研究炉を利用する組織は大学関係者が多く、JRR-3 が約 50%、KUR が約 80%、UTR- KINKI が 100%程度で、海外施設の利用も約 60%が大学関係者である。次に多いのが国公立機関で、JRR-3 が約 30%、海外施設が約 20%である。民間の利用は、JRR-3 が 20%弱、海外施設が約 10%である。
- (2) KUR、JRR-3、海外施設の 3 施設の利用件数を比較すると、1:1.4:1.5 の比率となる。海外施設の利用は、その殆どが国内の研究炉が停止したことによる代替として利用（移行）したものである。海外施設の利用先は多い順でオーストラリア、アメリカ、フランス、韓国、ドイツとなっている。HFR（フランス）は実験施設としての性能は高いが稼働率の低さや実験採択の難易度（倍率）が高いなどの理由で、施設の利用のし易さから OPAL（オーストラリア）の利用が 1 番多い。
- (3) 研究炉を利用するにあたって、最も関心のある研究分野（利用分野）の具体例を研究炉毎に表



4-1<sup>7)</sup>にまとめた。また、中性子を利用する目的を図 4-2<sup>7)</sup>に示す。最も関心のある研究分野と中性子を利用する目的は、現在関心をもって研究または利用している分野で、研究炉を利用するニーズ（目的）を表わしている。これらのデータから以下のことが言える。

- 1) 利用分野では、中性子散乱実験、原子炉燃料・材料照射、人材育成の利用が圧倒的に多い。
  - 2) UTR-KINKI は、原子炉運転実習、放射線医療に係る研究開発に利用されている。
  - 3) KUR は、中性子放射化分析、医療照射、燃料・材料照射など多くの分野ではほぼ均等に利用されている。特に KUR は BNCT の他に核物理や加速器駆動システム（ADS）の研究及びバックエンド研究など広範にわたる。
  - 4) JRR-3 は、中性子散乱実験（特段に多い）、中性子ラジオグラフィ、即発ガンマ線分析、中性子放射化分析が約 70%を占め、中性子ビーム実験に多く活用されている。
  - 5) JMTR は、燃料・材料の照射試験に係る研究分野が中心となっているが、RI 製造技術の開発、放射線計測器の特性評価などにも利用されている。
  - 6) 海外施設は、中性子散乱実験が多く中性子ビーム実験に活用されている。
- (4) このように、研究炉を利用する場合、研究炉の特徴（出力の大小、ビーム炉か照射炉かなど）や保有する実験設備の種類や機能に応じて研究者や利用者が選択している。これは、新たな試験研究炉を設置する場合、研究者、利用者のニーズに沿った炉型や実験設備を設置することが重要であることを意味する。



(日本学術会議「研究炉の長期停止に伴う影響調査」より引用)

図 4-2 中性子を利用する目的

表 4-1 最も関心のある研究分野（利用分野）の具体例（常陽、NCA を除く）

（日本学術会議「研究炉の長期停止に伴う影響調査」より引用）

NO	利用目的	UTR-KINKI	KUR	JRR-3	JMTR	海外施設
1	中性子散乱実験		<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子散乱分光法</li> <li>固体材料の小角散乱</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子回折</li> <li>固体物理、結晶構造解析</li> <li>磁性研究</li> <li>高分子科学</li> <li>超伝導</li> <li>医学・生命科学</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子回折</li> <li>固体物理、結晶構造解析</li> <li>磁性研究</li> <li>高分子化学</li> <li>超伝導</li> <li>医学・生命科学</li> <li>残留応力測定 (機械・構造用材料の強度評価、材料工学、集合組織測定技術の標準化活動)</li> <li>中性子デバイス開発 (磁気光学素子開発のための極冷中性子を用いた性能評価試験)</li> </ul>
2	中性子ラジオグラフィ		<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料電池</li> <li>建材中の水分挙動の中性子イメージング</li> <li>電子機器の放熱部材の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料電池</li> <li>建材中の水分挙動</li> </ul>		
3	即発ガンマ線分析					
4	中性子放射化分析		<ul style="list-style-type: none"> <li>高精度測定</li> <li>微量成分分析</li> <li>環境分析</li> <li>地球科学</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高精度定量</li> <li>環境分析</li> <li>地球科学</li> </ul>		
5	医療照射 (BNCT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射線医療応用</li> <li>ホウ素薬剤の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>がん治療に関する研究開発</li> <li>ホウ素薬剤開発</li> </ul>			
6	RI 製造		<ul style="list-style-type: none"> <li>同位体及び Mo-99 の製造技術の開発</li> <li>メスバウアー線源</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>医療用、創薬研究</li> <li>メスバウアー線源による研究</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mo 製造技術の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mo 製造に係る技術開発</li> </ul>
7	シリコン製造					
8	原子炉燃料・材料照射 原子炉物理 測定技術 安全研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>医療用放射線の線量測定</li> <li>原子炉物理実験の基礎研究</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>照射損傷機構/照射脆化機構の解明/材料工学 (中性子と材料の相互作用、照射効果)</li> <li>原子炉物理 (未臨界度測定法の開発、新型炉・新材料の核特性の検証用データ取得、核変換工学)</li> <li>放射線計測機器の研究開発</li> <li>軽水炉の安全性強化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>照射損傷機構の研究</li> <li>検出器校正</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>照射効果/照射損傷/照射脆化の研究</li> <li>放射線計測器の特性評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉燃料の照射挙動</li> <li>照射損傷に関する研究</li> <li>核変換用燃料の開発</li> </ul>
9	原子炉運転実習 (人材育成)	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉起動や制御に関する教育訓練</li> <li>原子炉物理実験の基礎研究</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>学生実験を含む原子炉物理実験</li> </ul>			
10	その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子線の生物影響</li> <li>中性子線量評価技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射線生物学</li> <li>地質科学</li> <li>地球惑星科学</li> <li>食品科学</li> <li>核物理 (不安定原子核などの核データ計測)</li> <li>加速器駆動システム (ADS) (未臨界炉の基礎研究、ADS 及び MA の核変換に関する研究開発)</li> <li>陽電子消滅分光法</li> <li>バックエンド (アクチノイド化学、核燃料サイクル工学、放射性廃棄物処理、ガラス固化プロセス)</li> <li>放射化学</li> <li>核化学的研究</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地質学</li> <li>地球惑星科学</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地質試料の Ar-Ar 年代測定</li> </ul>	

#### 4.2.5 学術利用及び産業利用（技術開発）に関する動向（過去の調査結果との比較）

現時点のニーズが10年先にどうなるのか、新たに試験研究炉を設置する場合、可能な範囲で将来を予測することが重要である。特に産業利用に係わる技術開発については、企業の動向把握や国の政策の方向性などを注視するとともに、当初から企業と連携した取り組みを行うことが重要となる。ここでは、過去に実施した調査や報告内容を比較し、推移や動向を検討する。

表4-2に、平成29年度に実施した日本学術会議のアンケート調査、平成22年度に実施した日本原子力学会の調査、平成23年度の日本中性子科学会の中間報告について、学術利用及び産業利用（技術開発）の観点から整理、比較した。

本表から全体的に中性子の利用範囲が広がっていることが分かる。特に、産業利用としての技術開発の動向について以下に整理した。

- (1) 産業利用（技術開発）の適用対象は、化学・繊維、自動車・自動車部品、電気・電器、電力・ガス、製薬・食品・化粧品・バイオマス応用など多方面の技術開発として利用されている。
- (2) 中性子散乱では、ディスプレイ用機能性薄膜や磁気記憶媒体のハードディスク用ヘッドの磁性膜の開発、生体タンパク質、機械・構造材及びガラス・セメント材の構造解析、中性子ラジオグラフィを利用した航空機ジェットエンジン部品の残留応力測定、シリコンドーピングを利用したパワー半導体の開発などがある。
- (3) シリコンドーピングは、シリコン半導体に中性子を照射し、均一性の高い高抵抗の半導体ウエハー（図4-3）を製造する方法であるが海外の研究炉で盛んに行われている。表4-3に海外の主な研究炉を利用したシリコンドーピングの製造実績と計画<sup>(8)</sup>を示した。

現在、電力業界はスマート社会を目指して変革の時代にあり、NTDシリコンは高性能ディスクリット部品として電力用に供されている。メーカーはSiCやGaN等のパワー半導体の開発を継続しつつ、海外の照射炉を利用しているのが現状である。半導体開発では、基板に含まれる不純物の低減化は高品質化に向け重要であり、そのための中性子放射化分析は微量不純物の定量に優れた手法として利用される。

- (4) 最近の利用では、有機薄膜材料のソフトマターと言われる新機能材料の開発、東京電力福島第一原子力発電所の事故で生じたデブリの再臨界センサ開発がある。また、コンクリートなどの建築材料は長期間にわたって中性子照射による観察が必要となり、この分野への適用は国内で始まったばかりである。

更に、高輝度LED開発やパワーエレクトロニクス的小型化などへ応用されるベーパーチェンバー<sup>注1</sup>に関する研究、低摩擦、耐摩耗コーティング用として使われるダイヤモンドライクカーボン（以下、「DLC」という。）膜の開発などがある。

- (5) DLC膜とは、ダイヤモンドと黒鉛の中間的な性質をもつユニークな材料である。電気・電子機器（ハードディスク、ビデオテープ、集積回路）や切削工具、金型、自動車部品、光学部品、ペットボトル、衛生機器、レンズ・窓、装飾品など応用範囲は広い。低摩擦、耐摩耗コーティングとして使われる。DLC膜は年間100億円の市場規模を持つ産業分野であり、日本

---

注1 ベーパーチェンバーとは、ヒートパイプの一種で局所的な入熱に対して、熱を高速で移動拡散させるもの。高輝度LED開発やパワーエレクトロニクス的小型化などへ応用される。

が世界をリードする数少ない産業素材の一つである。日本の DLC メーカーの優位を保つために、経産省においても、日本の研究者が中心となって国際標準規格（ISO 規格）の制定を支援している。この結果、これまでに剥離試験と分類法に関して、ISO/TC107 に提案を行っている。DLC 膜の自由体積は、DLC 膜に残された大きな構造因子であり、このデータ把握は次の ISO 規格制定、さらには日本の DLC 産業にとって大きな貢献が期待されているが、原子炉の停止により進捗が遅れている。データ取得が遅れた場合、ドイツ・イギリス・中国・韓国などに主導権を握られる可能性があり、一刻も早い再開が待たれる<sup>(7)</sup>。

- (6) このように、利用領域の裾野の広がりが見られ、継続的に実施してきた基礎的な学術利用研究以外に、新材料、新機能材料の開発のような産業利用への応用を目指す研究開発は、大学、企業において将来とも拡大されると思われる。



図 4-3 シリコンインゴットとウエハー

#### 4.2.6 個別訪問調査

アンケートによるニーズ調査は、全体的な傾向や個別意見の把握には大変有効であるが、先生方個人の体験、考え方や企業の意見は紙面調査より対面調査の方がより正確に把握できる。日本学術会議や日本原子力学会のアンケート調査を補完するために、大学や研究機関等に個別訪問を実施しニーズや研究炉に対するご意見を頂いた。

今回の訪問箇所は、現地施設見学やサイト調査等も含めると、6 大学、6 研究機関・公益法人、1 企業で日数にして約 1 か月程度となる。ここでは、個別訪問で得られたニーズ調査や情報を紹介する。

##### (1) 大学への調査

大学の先生方からは、示唆に富んだ考えやアイデアなど多くの情報、意見が寄せられた。主な意見を分野毎に区分したが、分類が複数にまたがる場合は主たる内容の分類に含めた。

##### 1) 人材育成

- ・臨界集合体は、1kW 以下の出力で UTR-KINKI、KUCA や NCA（東芝）などを利用し、原子炉物理実験や人材育成を行い、炉物理の理解と臨界条件の体感など教育効果があった。しかし、大学院留学生の利用制限（NCA）や使用料金（NCA）が発生するなどの課題があった。

- ・ 照射炉 (JMTR) は、材料分野の育成に利用され材料科学の理解に役立っている。
- ・ 中性子ビーム利用炉 (JRR-3M、KUR、TRIGA 炉他) は、中性子ビームを使った種々の分野で使われ、関連の研究者の人材育成にも貢献でき、研究を通して多くの分野の科学的な理解が深化できた。
- ・ シミュレータで教育の一部を実施することが出来る。長所はスクラムをしても規制官庁への届出は不要で炉心の変更なども容易にできる。短所は緊張感が乏しく体験性に欠ける。
- ・ 原子力エネルギー研究・開発、利用人材の具体的な姿のイメージ化、併せて企業内教育 (CPD) やエネルギー利用における放射線利用人材の育成についても明確にしておく必要がある。人材育成は、育成する人材像を明確化すること。
- ・ 過酷事故シミュレータの訓練は、原電敦賀にて 1 週間で体験できる。旅費、使用料金が必要。
- ・ シミュレータ利用は、人材育成に対しては「規制課題」の理解、「規制と調和した教育」には有効な手段だと思う。また、今後も増えてくる自主規制の遂行のための「書類作り」なども実体験として教育・訓練に取り込めば実用的な教育になる。このような規制との調和の土壌作りに有効に使うことも期待したい。
- ・ 研究炉における「スクラム動作」や「異常時操作」などを当初からカリキュラムに織り込んで、想定内として体験させることが望ましい。ナトリウムリークを例にとればフランスやソ連での研究炉で起こった場合、その対応に学生や施設管理者が経験し、ステップアップして実用化、復旧技術の発展に繋がっている。社会もこのような対応を受け止める仕組みを最初から考えておくべき。
- ・ シミュレータ訓練が、学生に原子炉を理解させるのにかなり良いことが分かった。人材育成のための研究炉は全く不要。
- ・ 人材育成に、数百億円の研究炉を作ることは、コスト・パフォーマンスから見て疑問がある。1,000 億円近い費用で作った研究炉で毎年 300 名の育成をすることに比べて、日本の水産大や水産高校が持っている練習船はもっと多くの船員や水産技術者を送り出していると思われる。その比較も重要。
- ・ 人材育成のコスト・パフォーマンスを考えると、アジア圏とのコラボレーションの施設を、中国やベトナムに建設し、そこで教育する制度を作ることも一案である。
- ・ 「もんじゅ跡地」ということであれば、近大炉を移設して使うことも案としてあり得る。現在の近大炉は街中にあり、近大と福井大などが共同で運用することも考えられる。
- ・ 臨界実験装置は学生、公衆の人材育成にはよいが、原発技術者の育成はできない。(炉物理の教育が必要なのは、1000 人のうち多くても 1 割で炉物理の教育は学生時代に既に行っている)
- ・ 現状の人材育成の役割は、JRR-3、J-PARC は大学院生、KUCA は大学生、基礎学力がメイン、UTR-KINKI は学生、一般の方が対象。
- ・ 研究炉を用いた大学生への教育は重要である。臨界実験装置では初歩的な核物理面での教育はできるが、温度と核的な相互作用については学べないので、ある程度核加熱が出来る炉の使用が望ましい。
- ・ 現在臨界実験装置を使って教育をしているが、京大炉への旅費、東芝の NCA の利用には費

用がかかるので、この点も考えた方策が欲しい。

- ・ロシアでは高速炉の開発を精力的に行っていて、いくつもの高速発電炉が計画されている。この辺も見て、今後の教育も考えていく必要がある。
- ・人材育成も含めて、海外に対して日本としてリーダーシップのとれる研究炉が欲しい。特に、中国や韓国を除いたアジア諸国が参加出来る研究炉の設計を期待している。ベトナム、マレーシア、インドなどと JHR のような共同利用を考えられないか。アジアのニーズとして医療、産業などもある。国内の人材育成に限定したら幅が狭く、どこまで必要なのかになる。

## 2) ニーズ

- ・シリコンドーピングは将来とも絶対必要。日本の企業が MIT に委託したと聞いている。
- ・産業に繋がるシーズが欲しいのであれば研究炉だけでは不十分、日本一の教育県を生かしたものを考えるのも一案。研究炉を核にしたメンテナンス産業もある。
- ・シリコンドーピングは、今後も必要な技術であると考え、以前研究炉の設計研究をした。(約 15MW の PWR 燃料を用いた専用炉で、年間 110 トン程度の照射は可能としている)。
- ・国内の研究炉が早く稼働できれば、大口径のシリコン照射も可能であると考えている。
- ・研究炉を使った基礎研究は、散乱・回折現象を利用するものだけでも、ライフサイエンスでの蛋白質の構造や振る舞いの解明、新材料の中性子顕微鏡的な構造評価などにも幅広く利用でき、ノーベル賞の種にも繋がる研究が数多くある。
- ・研究炉の目標設定の基本的な視座は、産業への貢献とコスト・パフォーマンスであり、最優先で検討を進めるのは半導体製造を中心においた「多目的炉」の建設である。高速・熱中性子利用や人材育成用の炉の検討は次の段階でも良い。
- ・特に半導体製造は、今後の電気自動車の発展に伴うサイリスタやインバータの需要の急激な伸びなどから、1,000 億円程度の投資により炉を建設しても見合うと思われる。半導体製造と並行して、中性子ビーム利用が可能なので研究も並行して行える。具体例は中国を訪問した時に CARR の機能の話聞いたがこのレベルだろうと思っている。
- ・放射化分析は産業界のニーズはあるのか。放射化分析は殆どが代替できる。
- ・医療、BNCT などは住民に分かりやすく地域の医療の充実に繋がる。
- ・地元企業との結びつきとして、東洋紡が薄膜製造を行っており、ソフトマターとの展開の可能性がないのか、ムラタは窯業のメーカーでセラミック技術を有している。
- ・半導体のシリコンドーピングは、中国、オーストラリアなどが研究炉で生産する戦略であるが、これから参入して産業化を狙っても建設した時期には必要としないのではないのか。大量生産は海外炉でいいのではという考えもある。
- ・世界の拠点化を目指すためにどうあったら良いか模索している。研究炉は福井県の拠点化を目指す象徴的なプロジェクト。人材育成だけでなく、産業育成や医療に広げてゆきたいと考えている。このためには中性子ラジオグラフィやレーザーなどの基盤技術の自動車産業への展開、宇宙や航空分野の利用も考えられる。
- ・航空機、ロケット関連は中京地区の産業である。中京地区にはトヨタ関連企業もあり、大手企業がバックアップしてくれば理想的。

- ・研究炉は、シンボルや目的をしっかりと定める。例えば医療用とか。
- ・地場産業としては、メガネ、繊維産業などがある。メガネ、レンズの着色技術、変形しない素材開発の企業もある。
- ・BNCT は加速器中性子源をメインに開発しているが、研究炉は十分な遮蔽と中性子スペクトルがきれいというメリットがあり、薬剤開発の評価などの臨床実験、動物実験など研究炉の利用が必要である。
- ・もんじゅサイトに研究炉を作るならば、そこの研究炉でしかできない研究を織り込んで世界から注目を集める炉であるべきだと考える。
- ・どのような研究炉か、目的を明確にする。
- ・国産の医療薬開発は、原子炉での製造は難しいので加速器での製造を目指す研究を行っている。がん治療は、診断は陽電子放出断層撮影（以下、「PET」という。）、治療はアルファ線治療を主眼に開発している。米国でも取り上げられた、精密治療という概念で臓器単位ではなく分子レベルで放射線の影響を、がんに集中させて行う治療方法である。RI を使って診断と治療を微視的なレベルで行う。

### 3) 炉型、機能

- ・小型炉は受動安全系を採用しやすく、事故の要因かを調査反映し設計できる利点がある。この設計・運転にはシミュレーションと組み合わせる統合化が有効である。具体的にはハードの結果を取り込んで、規模のシミュレーションや事故・故障の評価などを取り込み、次の発電炉の進化のステップに繋げることが出来る。(研究炉とシミュレータを組み合わせる複合化の理念)
- ・複合化研究施設については、韓国でも熱流動を重視しインパイル・ループや炉外ループを併用した設備を検討して、新規の研究炉でも3つの異なったループを考えている。これも参考になる事例である。
- ・JRR-3、JMTR、KUR、KUCA、UTR-KINKI 等ともんじゅサイトとのすみわけ、役割分担をどう考えるのか。
- ・今後の研究炉は競争力が必要。研究炉として魅力があるのか。研究成果を出すことが海外競争力に繋がる。JRR-3、JMTR 規模なら OK。中性子利用実験は、フラックスが高くないと論文は作れない。KUR は中途半端で、KUR 程度のフラックスはサイクロトロンで作れる。KUR の位置付けは、新しい研究のためのフィジビリティスタディにすぎず、論文を作るのは J-PARC や JMTR、JRR-3 である。
- ・原子炉は一回でいろんな研究ができるのがメリット。ユーザは、利用しやすければトップクラスは海外に出かける。海外炉を利用できるのは一握り。研究炉の弱点は、稼働率の低さ、トラブルなど安心感がない。PP 上、出入り管理が厳しい。出来てしまえば利用するかも知れないが 5MW ではコスト・パフォーマンスが悪い。10MW 以上で高ければ高いほうがよい。
- ・ドイツのミュンヘン工科大学では、ミュンヘン市郊外に FRM-II (20MW) を建設し、2005 年 4 月から多目的に使っている。この原子炉の周辺に医学部も移転し研究炉の利用も活発に行っている。この新しい研究炉の炉心設計には、学生のコンペで選ばれた炉心概念が使わ

れていて大変参考になる。

- ・フランスの JHR を建設初期に見学に行ったが、JHR も参考になる研究炉である。このコンソーシアムで運用している手法は研究炉の建設への出資金に応じた利用権が主張でき、さらに利用者からの投資への見返りもある制度である。アジア各国でも利用出来る仕組みであり、これをアジアでアジア原子力協力フォーラム（以下、「FNCA」という。）の枠組に取り組むようにしたら福井県の期待の研究炉になる。
- ・小さくても多目的の研究炉がよい。小さな出力でも産業を支える、そして研究を通して人材育成を行うので良いのでは。
- ・もんじゅの研究開発マインドを消さないよう、研究炉へつなげて欲しい。産業育成、人材育成ができる多目的炉を指向したい。
- ・研究炉の概念設計を学生や先生方でコンペするのはよい。

#### 4) 運営体制

- ・もんじゅサイトに、ビーム炉を作る時はトップクラスの研究組織が必要。
- ・基礎的な研究では JRR-3 を現在使用できないことから、物性研ではオーストラリアの OPAL を使っているが、使用料や渡航費などの費用問題や使い勝手が悪いことから大変な苦勞をしている。それまでは、約 200 件の研究のうち物性研の回折実験だけでも 30～40 件ほどあった。
- ・MYRRHA、JHR、PALLAS がそれぞれ役割分担で研究炉の欠点を補っている。ビジネスになると、運転にすきまができるとう惑をかける。運転継続性を考え、例えば JRR-3、KUR、もんじゅサイトの研究炉で融通するとか、海外炉と連携するなどが必要となる。日本全体で戦略を考えそれぞれの研究炉の役割を明確化する。

#### 5) その他

- ・J-PARC に文部科学省予算でビームラインを作ったが、JAEA のメンバーと一緒にだったので建設、研究がスムーズにできた。
- ・フランスの JHR だけでなく、米国でも最近、研究炉の改造や新設には力を入れており、パデュー大学、MIT、ORNL などでも動きがあるがトランプ政権での研究費の削減は気になる。

### (2) 研究機関・公益法人及び研究炉への現地調査

訪問先は、(大) 京都大学原子炉実験所 (KUR、KUCA)、(国研) JAEA 及び (公社) 日本アイソトープ協会 (以下、「RI 協会」という。) である。京都大学原子炉実験所は KUR、KUCA を、JAEA は JRR-3、JMTR、J-PARC、もんじゅ施設の施設見学、現地調査及びそれぞれの事業概要の説明を受けた。訪問に当たっては、事前に質問を送り効果的な会議に努めた。

JAEA からの情報は、もんじゅ、JRR-3、JMTR、J-PARC などの情報以外に、試験研究炉の運転・保守に係る保安活動と規定類に関して、原子力規制に関する動向、運転・保守に係る保安活動・規定、同一敷地内で別事業者が共存する場合の許認可上の考え方などについて情報を得た。また、人材育成センターにおける人材育成の活動全般についても情報を得ることができた。なお、JAEA からの具体的な情報については、各論に反映した。



表 4-2 学術利用及び産業利用（技術開発）における利用分野一覧

NO	利用目的	日本学術会議アンケート集計（2017年8月） <sup>(7)</sup>		将来必要となる共同利用研究施設について <sup>(4)</sup> 日本原子力学会（H22年（2010年）9月）		中性子の産業分野適用対象と直近の重点課題 <sup>(9)</sup> 次世代研究用原子炉検討特別委員会中間報告（2011年8月）※3	
		最も関心のある研究分野（利用分野）の 具体例※1	産業利用（技術開発）に おける主な利用例※2	学術利用	産業利用（技術開発）	産業利用の適用対象	直近の重点課題
1	中性子散乱実験	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子回折</li> <li>固体物理、結晶構造解析</li> <li>磁性研究</li> <li>高分子化学</li> <li>超伝導</li> <li>医学・生命科学</li> <li>中性子散乱分光法</li> <li>固体材料の小角散乱</li> <li>残留応力測定 (機械・構造用材料の強度評価、材料工学、集合組織測定技術の標準化活動)</li> <li>中性子デバイス開発（磁気光学素子開発のための極冷中性子を用いた性能評価試験）</li> </ul>	ハードディスク用ヘッドの磁性膜の開発 有機薄膜材料のソフトマター開発（物質科学） 機械・構造材の強度評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>結晶構造解析、磁気構造解析、ガラス・アモルファスの構造解析</li> <li>中性子非弾性散乱実験による格子振動、スピン波、結晶相転移の解明</li> <li>中性子生命影響研究（保物研究）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>溶接部の残留応力測定</li> <li>水素貯蔵材料の結晶構造解析</li> <li>ナノ磁性粒子の磁気構造解析</li> <li>電解質膜の構造解析</li> <li>生体タンパク質の構造解析</li> <li>触媒や電極材料の非弾性散乱による構造解析</li> <li>ガラス材料、セメント材料などの構造解析</li> <li>超イオン伝導体、超臨界状態の構造解析</li> </ul>	(電気・電器) MRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) 光磁気ディスク、磁気記録ヘッド液晶 (化学・繊維) 高分子触媒、機能性プラスチック、ゴム、高張力繊維 半導体素材  (鉄鋼・金属) 燃料電池用酸素貯蔵用容器 Ti-Al合金、磁石 (製薬・食品、化粧品) 機能性食品 機能性化粧品 ゲル	ディスプレイ用機能性薄膜   燃料電池用酸素貯蔵材料 超高張力鋼  機能性化粧品
2	中性子ラジオグラフィ	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料電池（開発）</li> <li>建材中の水分挙動の中性子イメージング</li> <li>電子機器の放熱部材の開発</li> </ul>	航空機ジェットエンジン部品の残留応力測定	<ul style="list-style-type: none"> <li>二層流研究における流動解析</li> <li>植物中の水分挙動解析</li> <li>コンクリート等の建設材料中の水分挙動解析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料電池内の水分挙動解明</li> <li>エンジンや真空ポンプ内の潤滑油挙動解明</li> <li>溶接部の非破壊検査</li> <li>液体ロケットの非破壊検査及び内部挙動観察</li> </ul>	(自動車・自動車部品) エンジン 燃料電池 (重工、機械) 発電プラント、建設機械、一般機械	Liイオン電池材料
3	即発ガンマ線分析			<ul style="list-style-type: none"> <li>考古学試料中の微量元素分析</li> <li>宇宙・地球科学試料中の微量元素分析</li> </ul>		(電力・ガス) 燃料電池 (建設・土木) コンクリート構造、橋梁 建設物一般	
4	中性子放射化分析	<ul style="list-style-type: none"> <li>高精度測定</li> <li>微量成分分析</li> <li>環境分析化学</li> <li>地球科学</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>食品中の微量（有害）元素の特定及び定量</li> <li>汚染土壌中の微量（有害）元素の特定及び定量</li> </ul>			コンクリートの耐腐食性
5	医療照射（BNCT）	<ul style="list-style-type: none"> <li>がん治療に関する研究開発</li> <li>放射線医療応用</li> <li>ホウ素薬剤の開発</li> </ul>	がん治療用線源の開発				
6	RI製造	<ul style="list-style-type: none"> <li>医療用、創薬研究</li> <li>同位体及びMo-99の製造技術の開発</li> <li>メスパワー線源による研究</li> </ul>	RI製造（がん治療、非破壊検査用） Mo-99製造技術の開発				
7	シリコン製造（ドーピング）				<ul style="list-style-type: none"> <li>パワー半導体の製造技術開発</li> </ul>		
8	原子炉燃料・材料照射測定技術/安全研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>照射効果（照射損傷、照射脆化）の研究、材料工学</li> <li>原子炉物理（未臨界度測定法の開発、新型炉・新材料の核特性の検証用データ取得、核変換工学）</li> <li>放射線計測機器の研究開発、医療用放射線の線量測定</li> <li>検出器校正</li> <li>軽水炉の安全性強化</li> </ul>	原子炉材料の開発（長寿命化） 炉内計測用センサの開発 原子力の安全性に関する研究				
9	原子炉運転実習（人材育成）	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉起動や制御に関する教育訓練</li> <li>学生実験を含む原子炉物理実験</li> </ul>					
10	その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>核物理（不安定原子核などの核データ計測）</li> <li>放射線生物学/中性子線量評価技術</li> <li>地質科学/地質試料のAr-Ar年代測定</li> <li>地球惑星科学</li> <li>食品科学</li> <li>バックエンド（アクチノイド化学、核燃料サイクル工学、放射性廃棄物処理、ガラス固化プロセス）加速器駆動システム(ADS) (未臨界炉の基礎研究、ADS及びMAの核変換に関する研究開発)</li> <li>陽電子消滅分光法</li> <li>放射化学</li> <li>核化学的研究</li> </ul>					

※1 表 4-1 を集計

※2 日本学術会議のアンケート「表 2 産業利用における主な利用例」より引用

※3 中間報告書（P21）表 3 の定常中性子源を抜粋

表 4-3 海外の主な研究炉を利用したシリコンドーピングの製造実績と計画

国名	炉名称	出力	照射可能な寸法	照射容量 (年間)
豪州	OPAL	20MW	4～8インチ	25トン
ベルギー	BR2	100MW	125mm	15トン
ブラジル	IEA-R1	5MW	125mm	1.2トン
中国	CARR	60MW	3～5 インチ	50トン(予定)
	HFETR	125MW	6 インチ	10トン
	MJTR	5MW	2～6 インチ	20トン
フランス	ORPHEE	14MW	152mm	10トン
	OSIRIS	70MW	125mm	12トン

### 4.3 利用分野

4.1 における研究炉の利用分野の項目のうち、(2)産業利用については 4.2.5 で述べたが、(3)医学・治療利用 (BNCT、医療用 RI の製造)、(4)エネルギー利用 (燃料・材料照射) について触れる。なお、(1)学術利用については全般的な内容として簡単な原理等の説明を 4.4 (表 4-9) で、(5)人材育成については、5 章で記述する。

#### 4.3.1 医学・治療 (BNCT、医療用 RI)

##### (1) BNCT (Boron Neutron Capture Therapy)

BNCT は腫瘍にホウ素化合物を注入し、それに中性子を照射して  $\alpha$  線を発生させ、集中的に腫瘍細胞を破壊して治療する方法である。ホウ素 ( $^{10}\text{B}$ ) は中性子を吸収し、 $\alpha$  線を放出する (核反応:  $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^4\text{He} + ^6\text{Li}$ )。 $\alpha$  粒子は電離の能力が高くその影響を及ぼす範囲は細胞の直径とほぼ同じであるため、がんの細胞や組織を選択的に破壊することが可能となる。 $^{10}\text{B}$  と中性子の核反応の確率は遅い中性子のほうが大きい。表面または浅い腫瘍は熱中性子で照射し、数センチメートルの深さのものは熱外中性子 (エピサーマル) で照射する。

中性子捕捉療法研究の大部分は、悪性黒色腫及び脳腫瘍、特に多形性グリア芽細胞腫に焦点を当てている。BNCT のがん放射線治療における棲み分けを図 4-4 に示す。現在の研究は、数分の短時間で処理を中心として正常組織への影響を低減させて実証研究が進められている。

必要とされる中性子エネルギーは熱中性子で $\sim 0.025\text{eV}$ 、熱外中性子で $0.5\text{eV}\sim 10\text{KeV}$ で、その中性子束強度は $\sim 10^9\text{n/sec/cm}^2$ であり、主に加速器源中性子による研究が行われている。加速器によるBNCTは、病院へ併設し医療機器としての申請が可能であるなどの利点があるが、スペクトルが固定な為、適用できる腫瘍に限られることやバックグラウンドが高いなどの課題がある。そのため、新たな適用がんを開拓する場合や新たなホウ素化合物が開拓されるなど基礎研究での様々な照射実験において、研究炉の利用が期待されている。

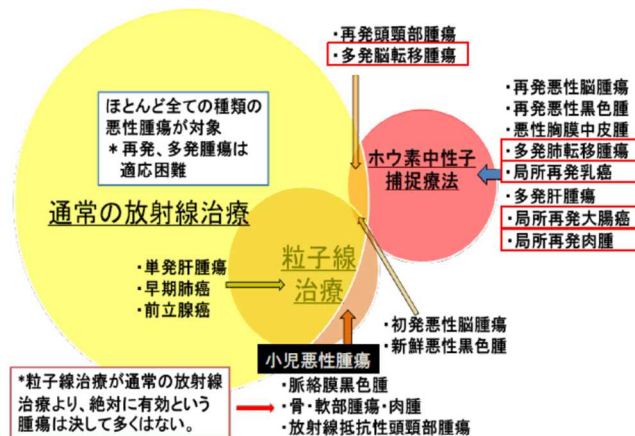


図 4-4 BNCT のがん放射線治療における棲み分け<sup>(10)</sup>

(2) 医療用 RI (RI 協会への個別訪問により情報を入手)

医療用 RI は、非密封アイソトープ、密封アイソトープ、放射性医薬品に分類される。非密封アイソトープは 36 核種あるが、トリチウム、Mo-99 がほぼ半分を占め、トリチウムは大学の使用が 70%以上である (図 4-5)。密封アイソトープは 19 核種、Co-60 (滅菌、がん治療) が 95%以上を占め、次いで Ir-192 (非破壊検査、子宮がん線源)、Cs-137 (非破壊検査)、I-125 (前立腺がん線源) が多い (図 4-6)。

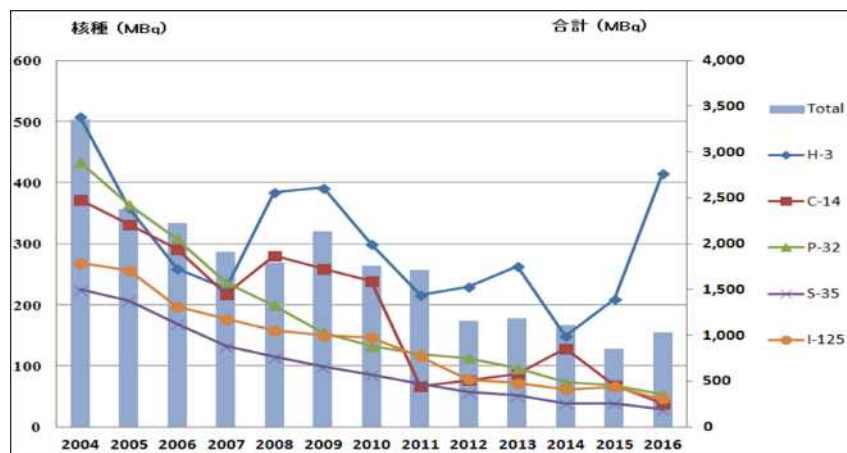


図 4-5 主な非密封アイソトープ供給量の年度推移

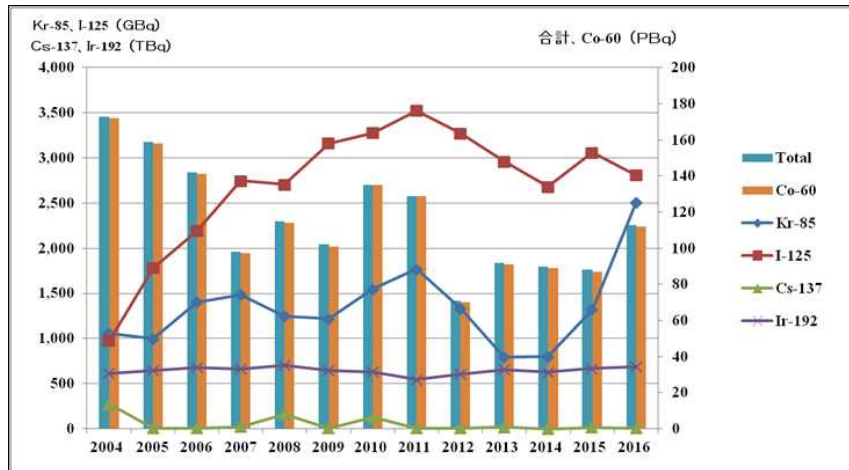


図 4-6 主な密封アイソトープ供給量の年度推移

放射性医薬品には、主にがん治療用に使用されるもの（治療用医薬品）、体内に注射するなど画像診断に使用するもの（診断用医薬品）、血液中に極微量存在するホルモンやビタミンの検出定量に使用するもの（体外診断用医薬品）がある。日本で流通している放射性医薬品のうち、約 80%弱は主に画像診断用に使用される Tc-99m と、その原料となる Mo-99 が占めている（図 4-7）。Mo-99 を原料とする放射性医薬品は、主に腫瘍の転移や再発、梗塞など骨や脳・心筋の血流状況等の検査に用いる。国内需要は世界需要の 9%を占める（図 4-8）。F-18 は、PET 検査に使用され約 9%を占める。F-18 は超短半減期（6 時間）の核種で国内事業者により加速器で製造されている。

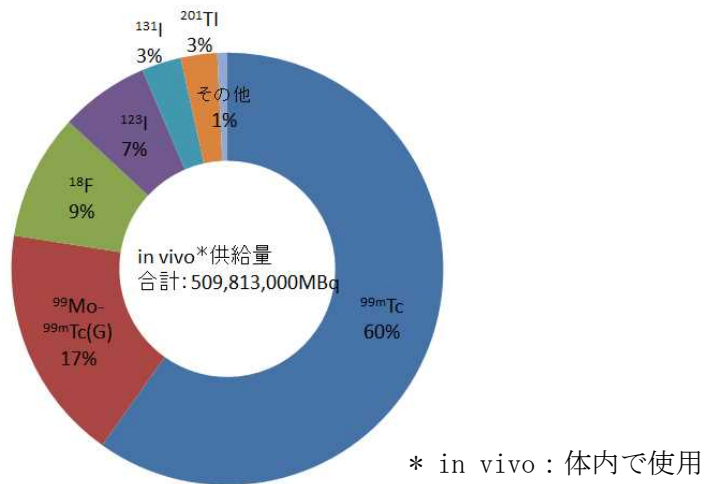


図 4-7 放射性医薬品の供給量

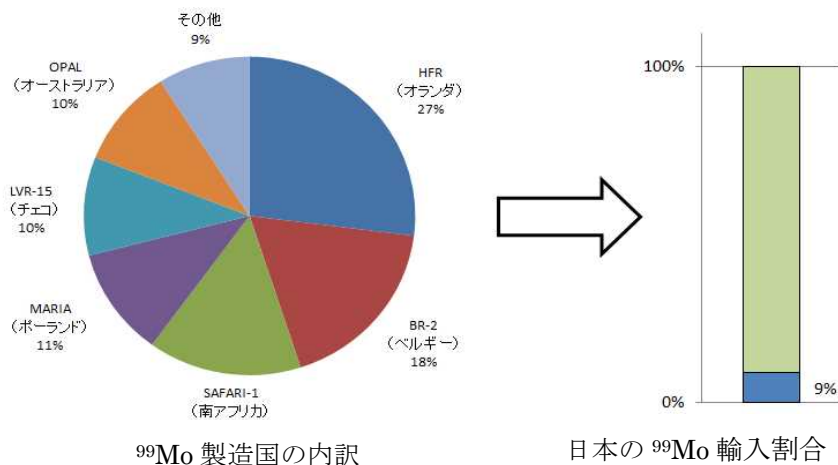


図 4-8 モリブデン製造国の内訳と日本の輸入割合

Mo-99 については、100%輸入に依存しており、海外原子炉の運転の不安定、流通ルート of 不安定性、製造価格の変動など国際的にも問題視された。我が国においても官民検討会において、「我が国におけるテクネチウム製剤の安定供給に向けたアクションプラン<sup>(1)</sup>」が検討され、一定量の国産化を目指すとの方針の基で開発を行っているところである。その製造法の一つであるウラン 235 を原材料としない放射化法による技術開発をつくば国際戦略総合プロジェクトにより進められている。茨城県等自治体、JAEA、京都大学、大学付属病院、民間企業等が連携・協力し、平成 32 年度に国産化を目指すとしている（図 4-9 参照）。

また、アイソトープの中で輸入量の多い、Co-60 や IR-192 についても、価格や供給量に不安定さがあることから、国内製造が望まれる。コバルト 60 は、コンテナ船で運ぶため、船会社の手配などの課題がある。これらの課題も含め、表 4-4 に医療用 RI の課題とニーズをまとめた。方向性として加速器で製造する核種と研究炉で製造する核種に分類している。

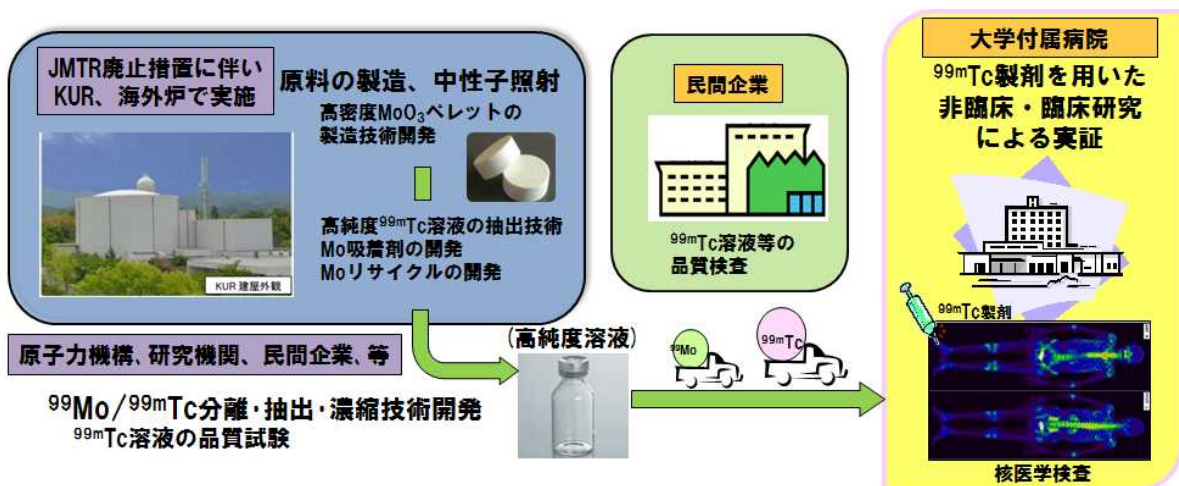


図 4-9 モリブデン-テクネチウム製造の実施体制

表 4-4 医療用 RI の現状・課題とニーズ（方向性）

区分	核種	供給元	現状・課題	ニーズ（方向性）
非密封	$^3\text{H}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{32}\text{P}$ , $^{35}\text{S}$ , $^{125}\text{I}$	海外		(海外)
密封	$^{60}\text{Co}$	海外	・密封用の 95% を占める。コンテナ船の輸送が大変。 ・価格や供給が不安定	研究炉による一定量の製造
	$^{192}\text{Ir}$	海外	・米国から航空便で輸入 ・価格（3～4 倍に高騰）や供給が不安定	
	$^{85}\text{Kr}$ , $^{125}\text{I}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{198}\text{Au}$	海外		(海外)
医療用	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ / $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}(\text{Ge})$ ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 半減期 6 時間) ( $^{99}\text{Mo}$ 半減期 66 時間)	海外	・医療用の 77% を占める。原料となる $^{99}\text{Mo}$ をすべて輸入し国内で $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を製造 ・我が国として競争力のある一定量の国産化を目指す。(H23 年 7 月:「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) ・海外の原子炉の老朽化、航空便輸送ルート不安定性、製造価格上昇による供給不足の懸念 ・仏国 OSHIRIS は H27 年度製造中止、カナダ NRU は平成 28 年 10 月製造中止	研究炉、加速器による一定量の製造 (開発中)
	$^{89}\text{Sr}$ , $^{90}\text{Y}$ , $^{125}\text{I}$ , $^{131}\text{I}$	海外	・海外原子炉の停止により、安定供給に懸念	研究炉による一定量の製造
	$^{18}\text{F}$ , $^{67}\text{Ga}$ , $^{123}\text{I}$ , $^{201}\text{Tl}$	国内 (加速器)	・短半減期は国内生産 $^{18}\text{F}$ (110 分)、 $^{67}\text{Ga}$ (3 日)、 $^{123}\text{I}$ (13 時間)、 $^{201}\text{Tl}$ (73 時間)	加速器による製造
医薬品開発	$^{211}\text{At}$ , $^{213}\text{Bi}$	将来	・先進的ながん治療など医薬品開発として必要 ( $\alpha$ 核種)	加速器による製造
	$^{177}\text{Lu}$ , $^{90}\text{Y}$		・先進的ながん治療など医薬品開発として必要 ( $\beta$ 核種)	研究炉による製造

・日本原子力学会アゴラによる調査報告書、RI 協会の情報を整理

### 4.3.2 エネルギー利用（燃料・材料照射）

エネルギー分野の主な利用は、原子炉燃料・材料の照射であり、研究炉利用の当初から取り組んできた活動の一つである。第 3 章（表 3-2）でも述べたが、この利用割合は高く海外でも利用全体の約 40% の利用に上っている。低出力から高出力にわたって分布している。

この利用目的は、発電炉等の安全性や経済性に直接結びつく、重要な構造材や燃料の中性子照射による挙動を調査することや検証することである。

低出力炉は、燃料特性の一つである臨界特性などを評価するため、燃料ピンや燃料集合体の配置を変えた試験により設計値の実験的検証に利用される。中・高出力炉では、燃料の照射に伴う特性の変化や被覆管との相互作用、あるいは事故時の挙動などを研究するために使われている。また、構造材については、長時間の中性子照射による「脆化」や「照射に起因する腐食」などの現象解明や改善のデータ収集のために使われる。このために、低出力炉から高出力炉を研究目的に応じて試験片を選択する等工夫して照射し、照射後の組織変化の観察を行うなど材料への中性子照射による性質の変化を研究している。

材料照射は、高出力炉であっても照射時間は短時間から 1 年近くにわたるものがある。この時間短縮のために、原子力先進国では高出力炉は必須のツールとして、研究炉の更新や新設、改造が行われている。照射を目的とした海外の更新例は、オランダの PALLAS 炉やフランスの JHR（建設中）、ドイツの FRM-II、中国の CARR 炉がある。改造例では、オーストラリアの OPAL 炉や、韓国の HANARO 炉等がある。（表 3-4 参照）

また、燃・材料の照射に際しては、使用する機器、設備や照射後の試験を行う際のホットラボなどの付帯設備が必要となる。

#### 4.4 利用目的と研究炉出力

表 4-5～表 4-8 に人材育成、ビーム利用実験、照射実験及び RI 製造に関して原子炉出力との依存性について示す<sup>(12)</sup>。人材育成に関しては、研究炉により学生・一般から職業人まで対象範囲が異なる。ビーム利用実験については、ビーム強度の関係で出力が大きいほど研究の幅が広がる。照射の場合、高照射線量が必要な材料の照射損傷実証研究は、出力の小さい研究炉では対応はできない。また、RI 製造に関しても、製造可能な RI の量は原子炉出力に依存する。

参考までに、表 4-9 に利用目的と中性子環境、海外の研究炉の出力分布例を示した。

表 4-5 研究炉出力と人材育成

	臨界実験装置 UTR-KINKI 相当 <sup>注1</sup>	中出力炉 KUR, JRR-3 相当	高出力炉 JMTR 相当	高出力高速炉 JOYO 相当
一般の訪問者	・見学、運転体験 ・初歩的放射線計測 (A)	・施設・運転見学 (B)	・施設・運転見学 (B)	・施設・運転見学 (B)
専門大学基礎教育	・原子力工学基礎実験 ・保守運転実習 (A)	・運転保守作業見学 (B)	・運転保守作業見学 (B)	・運転保守作業見学 (B)
専門大学院教育	・テーマ研究実施 ・研究補助 OJT (～1 週間) (B)	・テーマ研究実施 ・研究補助 OJT (～1 か月) (A)	・テーマ研究実施 ・研究補助 OJT (～1 半年) (A)	・テーマ研究実施 ・研究補助 OJT (A)
職業人 (運転員) 訓練	・基礎原理確認 ・放射線計測 (B)	・基礎原理確認 ・運転/保守実習 ・非常時訓練 ・廃棄物管理実習 (A)	・運転/保守実習 ・非常時訓練 ・廃棄物管理実習 (A)	可能性はあるが現在 までの実績は小 (B)
職業人 CPD	・基礎原理確認 (B)	・基礎原理確認 ・運転/保守実習 ・施設見学 (A)	・運転/保守実習 ・施設見学 (A)	・基礎原理確認 ・運転/保守実習 ・施設見学 (B)
(A) ; 概ね満足 (B) ; やや満足 (C) ; 課題あり				

注1 臨界実験装置の分類では KUCA であるが、人材育成を中心とする UTR-KINKI を参考例とした。

表 4-6 研究炉出力とビーム実験

	臨界実験装置 UTR-KINKI 相当	中出力炉 KUR 相当	高出力炉 JRR-3 相当	高出力高速炉 JOYO 相当
放射化分析	試料サイズや分析対象元素が限定 (C)	試料サイズや分析対象元素はほぼカバー、照射時間調整の幅は低い (B)	試料サイズや分析対象元素はほぼカバー、照射時間調整の幅は低い (B)	特殊な試料と元素の制約あり (B)
ラジオグラフィ	静的画像化が中心 (C)	動的か増加や断層画像化可能 (A)	解像度向上、時間短縮可能 (A)	減速材必要 (C)
散乱・回折分析	中性子束不足 (C)	限定された分析は可能 (B)	幅広く分析可能 (A)	分析は限定 (B)
BNCT	中性子束不足 (C)	やや長時間治療 (B)	治療拡大の可能性大 (A)	可能性はあるが現在までの実績は小 (B)
基礎研究*	冷中性子束不足 (C)	冷中性子束はやや不足 (B)	冷中性子束などの利用は可能 (A)	高速中性子実験可 (A)
(A) ; 概ね満足 (B) ; やや満足 (C) ; 課題あり				

\*基礎研究の利用範囲は、出力規模（中性子束）によって異なる。

表 4-7 研究炉出力と照射試験

	臨界実験装置 UTR-KINKI 相当	中出力炉 KUR、JRR-3 相当	高出力炉 JMTR 相当	高出力高速炉 JOYO 相当
シリコンドーピング	原理確認のみ (C)	大型結晶の対応や量産に不安 (B)	最適 (A)	妨害不純物生成の可能性？ (B)
燃料／被覆管照射	小試験片での照射試験 (C)	大型試験片の炉内照射は可、ループ試験には不向き (B)	炉内、ループ試験とともに可能 (A)	高温炉内照射が可能、FP放出模擬は一部可能 (C)
構造材照射	小試験片での照射試験 (C)	大型試験片での炉内照射は可能 (B)	大型試験片の炉内照射、ループ照射可能 (A)	高速炉関係の中型試験片の詳細可能 (A)
炉心構成試験	複数案への対応自由度が多数 (A)	許認可対象で実験点数は限定 (A)	同左 (B)	同左 (B)
核断面積測定	一部の評価は可能 (C)	軽水炉関係データ確認可能 (A)	同左 (A)	高速炉関係のデータ確認可能 (B)
(A) ; 概ね満足 (B) ; やや満足 (C) ; 課題あり				



表 4-8 研究炉出力と RI 製造

	臨界実験装置 UTR-KINKI 相当	中出力炉 KUR,JRR-3 相当	高出力炉 JMTR 相当	高出力高速炉 JOYO 相当
Mo-99 製造	原理確認は可能であるが 量産は不可 (C)	市販品製造可能、大量生産 は不可 (B)	大量供給可能 (A)	中出力炉と同等、コスト パフォーマンスは課題 (B)
Co-60, Ir-192 製造	同上 (C)	製造可能、ただし大量生産 は不可 (B)	大量生産可能 (A)	低出力炉並 (C)
Na-24 などの 短寿命核種 製造	コストメリットもあり、 最適 (A)	コストメリットはやや低 い (B)	コストメリット低い (C)	コストメリットは低い (C)
Cf-252 製造	不可能 (C)	コストメリットは低い (A)	最適 (A)	コストメリットは低い (C)
(A) ; 概ね満足 (B) ; やや満足 (C) ; 課題あり				

表 4-9 利用目的と概要、中性子環境と研究炉の出力分布（海外例）

区分	利用目的	概要	中性子環境など*	出力分布例（海外研究炉）**				
				1kW	10kW	100kW	1MW	10MW
学術利用	(1) 中性子散乱・回折	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱中性子や冷中性子が軽元素（水素原子や炭素原子など）と散乱した振幅を測定して物質の結晶構造解析などを行う。</li> <li>熱中性子の波長は原子間距離と同程度であり、エネルギーも原子・分子の運動エネルギーと同程度であることから、原子の位置と運動を同時に精度よく測定が可能</li> <li>この特性を利用して、セメント、タンパク質、植物、動物、生体などの結晶構造を静的に解析するのに利用される。近年、高分子、液晶、コロイド、生体膜、生体分子（DNA、タンパク質）などのソフトマターの新機能材料の開発など利用範囲が広がっている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱中性子・冷中性子 中性子照射場：<math>\sim 10^7</math> (n/cm<sup>2</sup>/s) 程度</li> <li>短時間で得るためには中性子のビーム強度を高くする必要がある。</li> <li>中性子ビームを原子炉から多く取り出すとともに、可能な限り多くのポートを設置することが求められる。</li> </ul>					
	(2) 中性子ラジオグラフィ	<ul style="list-style-type: none"> <li>X線では透過できない厚い金属などでできた大型機器、X線では感度が極めて小さい水素を含んだものを透過撮影できるユニークな方法。定常中性子源は、空間高精細度撮影に有利であるとともに動画撮影が可能。</li> <li>物質の動態解析に必要な中性子は、パルス中性子源よりは定常的に中性子を供給できる原子炉からの中性子が最適。</li> <li>水などの沸騰現象の可視化や植物内水分挙動、燃料電池内水分挙動、自動車・航空機内部の燃料挙動、材料の残留応力の測定など基礎的な研究から産業応用まで広い分野で利用される。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱中性子・冷中性子 中性子照射場：<math>\sim 10^9</math> (n/cm<sup>2</sup>/s) 程度</li> <li>ビームポートが必要</li> </ul>					
	(3) 即発ガンマ線分析	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子を用いた元素分析法。分析対象試料を破壊することなく、多元素を一度の操作で定量可能で、中性子ビームを利用する方法（即発<math>\gamma</math>線）、原子炉内で中性子を照射する方法（中性子放射化分析：壊変<math>\gamma</math>線）がある。物質中の透過能が高く、表面分析にとどまらず全試料分析ができることが特徴。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱中性子・熱外中性子 即発<math>\gamma</math>線分析 中性子照射場：<math>10^8</math> (n/cm<sup>2</sup>/s) ～ 中性子放射化分析 中性子照射場：<math>10^{10}\sim 10^{13}</math> (n/cm<sup>2</sup>/s)</li> <li>即発ガンマ線分析ではオンラインの専用中性子ビームラインと<math>\gamma</math>線測定器が必要</li> </ul>					
	(4) 中性子放射化分析	<ul style="list-style-type: none"> <li>即発<math>\gamma</math>線分析では、例えば考古学的試料を破壊せずに分析ができる。分析対象試料や分析実施機関が非常に多岐にわたる。</li> </ul>						
産業利用	(5) 医療照射（BNCT）	<ul style="list-style-type: none"> <li>ホウ素中性子捕捉療法 BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) ががん細胞に取り込んだホウ素と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<math>\alpha</math>粒子とリチウム原子核によって、がん細胞を選択的に破壊する次世代のがん放射線療法</li> <li>加速器での研究が盛んに行われているが、新たな適用がんを開拓する場合や新たなホウ素化合物が開拓されるなど基礎研究での様々な照射実験において、研究炉の利用が期待されている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱中性子、熱外中性子 中性子照射場：<math>10^9\sim 10^{10}</math> (n/cm<sup>2</sup>/s)</li> <li>研究炉近傍に専門の医療チームが必要</li> </ul>					
	(6) RI 製造	<ul style="list-style-type: none"> <li>工業用 RI (Ir-192、Co-60)は、非破壊検査の線源として利用</li> <li>医療用 RI は、診断用、治療用に利用されている。国内では短半減期の核種の製造（加速器）はあるが殆どが輸入。一定規模の供給や医薬品の開発の観点から研究炉の利用が期待されている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱中性子、熱外中性子 中性子照射場：<math>10^{12}\sim 10^{14}</math> (n/cm<sup>2</sup>/s)</li> <li>特殊照射設備、ホットラボが必要</li> </ul>					Mo 製造 →
	(7) シリコン製造（ドーピング）	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子ドーピング法（NTD法：S-30をP-31に核変換）は、シリコン半導体に中性子を照射し、均一性の高い高抵抗の半導体ウェハを製造する方法</li> <li>パワー半導体（高電圧、高使用温度）の需要は拡大傾向でわが国のメーカーが優位な技術。産業利用の場合、安定した炉内照射が課題</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱中性子、熱外中性子 中性子照射場：<math>10^{12}\sim 10^{13}</math> (n/cm<sup>2</sup>/s)</li> <li>炉内照射設備、照射済ウェハの冷却設備が必要</li> </ul>					
(エネルギー利用)	(8) 原子炉燃料・材料照射測定技術／安全研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>軽水炉の長期利用に伴う構造材料の健全化や燃料の高燃焼度化などの研究は、実環境を可能な限り模擬した照射試験が不可欠。高速中性子束を有する研究炉で、安全研究や高経年化研究の基盤技術を支える研究が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>軽水炉燃料照射 熱中性子 中性子照射場：<math>10^{13}</math> (n/cm<sup>2</sup>/s)</li> <li>材料照射（炉心構造物） 高速中性子 中性子照射場：<math>10^{14}</math> (n/cm<sup>2</sup>/s)</li> <li>ホットセルが必要</li> </ul>					
	人材育成	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究炉用原子炉を用い、1Fの廃炉や運転中の発電炉の安全確保を支える。（原子力科学技術委員会・研究開発計画における主な研究開発等の項目より）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験研究炉での実践的教育</li> </ul>					

\* 中性子束は、IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-5.3, “Applications of Research Reactors”を参照

\*\* IAEA “Research Reactor Data Base” 2017年5月から10MW以下を整理

#### 4.5 まとめ

- (1) 研究炉から発生する中性子は、基礎研究、産業、医療など多くの分野で、我が国の科学、技術、産業の発展に貢献してきた。研究炉は学術、科学、技術の発展に必要な不可欠な研究基盤施設であり、今後とも安定的に維持・継続していくことが重要である。そのため、我が国における研究炉利用のニーズを適切に把握し、近隣アジア圏内の利用など国際的な視点も含め、将来的にも対応する必要がある。
- (2) 日本学術会議のアンケート結果によれば、研究炉の利用目的は学術利用、産業利用など多岐にわたり、原子炉運転実習（人材育成）、中性子散乱実験、原子炉燃料・材料照射に多く利用され、更に、医療照射（BNCT）、中性子ラジオグラフィ、中性子放射化分析、RI 製造、シリコンドーピングなどに利用されている。
- (3) 国内の研究炉の長期停止の影響を受け、中性子散乱、シリコンの研究開発・製造などは海外の研究炉へ移行している。
- (4) BNCT は、加速器中性子源をメインに開発しているが、研究炉は十分な遮蔽と中性子スペクトルがきれいというメリットがあり、薬剤開発の評価などの臨床試験、動物実験など研究炉の利用が必要である。
- (5) RI 製造は、殆どを輸入に頼っている状況であるが、輸入量の多い Co-60 や Ir-192 は価格や供給の安定度に不安があることから、研究炉による国内製造が望まれる。また、日本で流通している放射性医薬品のうち約 80%を占める Tc-99m とその原料となる Mo-99 は、国産化開発プロジェクトで開発研究が行われている。また、医薬品の開発においては先進的ながん治療の研究が進んでおり、研究炉の利用については今後の動向を見極める必要がある。
- (6) シリコンドーピングは、海外の研究炉を利用しているが、更に高品質なパワー半導体の開発が行われている。国内の研究炉を産業として利用する場合は安定した炉内照射が課題となるが、半導体基板中の微量不純物の定量として中性子放射化分析に対するニーズは高い。
- (7) 産業利用においては、新材料、新機能性材料などの開発など利用範囲が広がりつつある。上記以外の研究項目としては以下のような項目が挙げられるが、具体的な産業化に結び付く開発研究についてはマーケットなどの視点も含め、今度更に調査を行う必要がある。
  - ・中性子散乱によるソフトマター開発（高分子触媒、機能性プラスチック、有機薄膜材料）
  - ・中性子ラジオグラフィによる可視化計測技術の高度化（建築・構造材の強度評価、航空機エンジン部品の残留応力測定）
  - ・ベーパーチェンバーや DLC 膜の開発
  - ・コンクリートなどの建築材料への中性子照射影響
  - ・海底熱水鉱床から採取した鉱石試料の分析
  - ・東京電力福島第一原子力発電所事故デブリの臨界・計量管理手法の高度化、再臨界計測センサ開発

【参考文献】

- (1) 日本原子力委員会新大綱策定会議（第 20 回）資料第 2-3 号「研究用原子炉のあり方について」
- (2) 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」（2008 年 7 月）
- (3) 日本学術会議「研究用原子炉のあり方について」（平成 25 年 10 月）
- (4) 日本原子力学会「将来必要となる共同利用研究施設について」（平成 22 年 9 月）
- (5) JAEA-Review 「次期研究用原子炉（ビーム炉）のニーズ調査」（2015 年 [平成 27 年] 5 月）
- (6) JAEA-Review 「照射炉の照射ニーズに関する報告」（平成 28 年 [2016 年] 12 月）
- (7) 日本学術会議「研究炉の長期停止に伴う影響調査<記録>」（平成 29 年 8 月）
- (8) IAEA-TECDOC-1681 NEUTRON TRANSMUTATION DOPING OF SILICON AT RESEARCH REACTORS, 2012
- (9) 日本中性子科学会「次世代研究用原子炉特別委員会中間報告」（平成 23 年 11 月）
- (10) 第 9 回原子力委員会資料第 2 号中性子利用研究の展開と中型中性子源の役割（平成 30 年 3 月 6 日）
- (11) 原子力委員会資料第 2-1 号「我が国のテクネチウム製剤の安定供給」に向けてのアクションプラン（平成 22 年 7 月 7 日）
- (12) IAEA Research Reactor Data Base 2017 年 5 月

## 5 人材育成

### 5.1 概要

研究炉による人材育成は、1950年代から70年代にかけて、自由主義圏で主流であった研究炉の商品名にも「訓練」を先頭に置いて「TRIGA(Training, Research and Isotopes GA)<sup>(1)</sup>」と名付けたように、研究炉は研究の推進と並んで原子力の発展には必須の要件として考えられ、設計や運用に反映されてきた。また、これらの研究炉を利用して、新規に原子力を導入する計画を持った国々はもちろん、原子力先進国と言われているロシアやOECD諸国でも教育や訓練を行い、原子力施設で活躍する技能者、技術者、研究者及び規制関係や原子力行政に携わる人々などの育成に取り組んでいる。

しかし、1990年代までは、人材育成は個々の組織、あるいは国別の課題としての取り組みが中心であったが、チェルノブイリ原子力発電所事故の教訓などの反映、中国やインドなどの原子力新興国の新規計画への取り組みの活発化、原子力カルネッサンスといわれる欧米の原子力計画の再興などの機運から、21世紀当初から、OECD<sup>(2)</sup>、<sup>(3)</sup>を中心にして人材育成の必要性が改めて議論されるようになった。

この動きを契機として、人材育成の従来の枠組みの課題整理に基づいて、国際的に共通な対応策のガイドラインが提案され、それに基づいた活動が展開され始めた。

このガイドラインは、人材育成のネットワーク化、研究炉を中心にしたインフラ活用、さらにそれらを統括する運営体制の重要性を浮き彫りにしており、多くの国々はこの提言を参考に人材育成の枠組みを構築している。このことから、人材育成のツールの中心は研究炉であることは、従来通りの共通の認識であることが読み取れる。

ここでは、これらの国際的な人材育成の動向を調査し、原子力全般に関わる国内外の人材育成の必要性、人材育成全般への取り組みの概観、国内外での研究炉を活用した人材育成、研究炉利用を含む人材育成の枠組みなどを整理する。また、研究炉利用上の課題などを整理し、今後の研究炉計画への要求事項を検討する。

## 5.2 原子力人材育成の必要性

### 5.2.1 人材育成の必要性

我が国では東日本大震災前までは、54基の原子力発電所で国内電力の30%以上をまかなってきたが、現在はほとんどの原子炉は停止中で、また新規の発電所の建設も中断したままである。

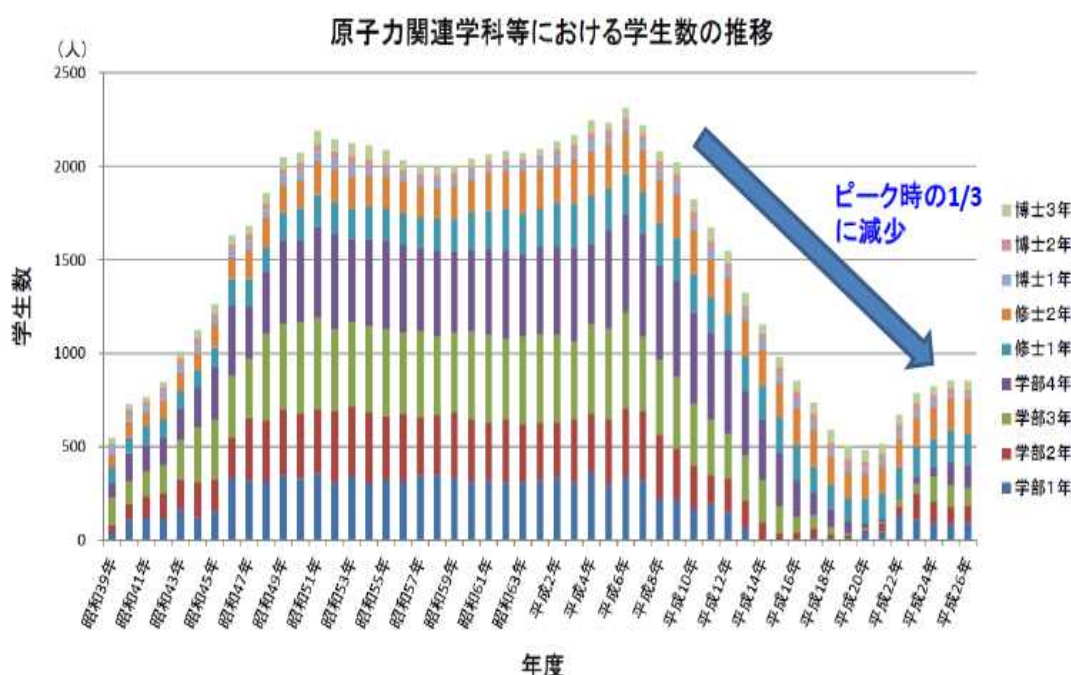
しかし、エネルギー長期計画によれば、原子力はベースロード電源として位置付けられ、徐々にではあるが国民のコンセンサスを得ながら再稼働や建設の再開、さらには新規の建設にも着手すると思われる。一方、事故後の東京電力福島第一原子力発電所の廃炉や、原子力発電所の廃炉などにも取り組みが始まり、原子力事業は引き続き継続するものと思われる。これらの事業を支えるためには幅広い技術者、技能者、及び研究者の育成は必須であり、平成28年度の「原子力白書」<sup>(4)</sup>の人材育成の章では以下のように述べている。

『事故の教訓を踏まえ、更なる安全性の高みを追求していくためには、高度な技術と高い安全意識を持った人材の確保が必要です。また、使用済燃料の再処理及び放射性廃棄物の処理・処分、廃止措置、さらに東京電力福島第一原子力発電所の廃炉を確実に実施するためには、様々な技術の確

立が必要であり、これを担う人材の育成と確保が必要になります。また、原子力分野においては、発電事業に従事する人材以外にも、大学や研究機関の教員や研究者、利用政策及び規制に携わる行政官、医療や農業、工業等の放射線利用分野において様々な人材が必要です。』

このような要求の背景には、図 5-1 に示す学生数の推移にあるように原子力を中心に学習する人材が平成 10 年（1998 年）以降約 10 年にわたって減少していることも一つの要因である。ただし、この学生数の減少は、多くの大学で学科名を『原子力や原子核』と明確な表現から『エネルギー、量子工学』と代えたため見かけ上の減少も含まれることも割り引いて考える必要もある。

原子力工学関連の学科等における学生数は、平成6年度をピークに減少し、近年はほぼ横ばいにて推移



(文部科学省 科学技術/学術審議会研究計画/評価分科会 原子力科学技術委員会 原子力人材育成作業部会配付資料 [平成 27 年 7 月] より転写) (5)

図 5-1 原子力関連学科の学生数の推移

学生数の減少は平成 20 年（2008 年）頃まで続き、それ以降はほぼ一定に推移している。この減少傾向は、電力会社やプラントメーカー、及び JAEA を始めとする公的研究所などの人材の総計では減少傾向は見られるもののこれほど大きくない。しかしながら、約 10 年にわたる過渡期の学生数減少は今後の人材の供給に不安を覚える。

このような傾向に対して、平成 24 年度に制定された『原子力大綱』(6)では、

- 世界高水準の安全確保に向けた人材育成が重要課題である。
- 原子力発電所の建設や運転・保守を支える技術基盤の維持・向上は、原子力発電所の安全性を継続的に高めていくためにも重要。国内で原子力発電所の建設を継続し、世界で信頼される原子力技術を確立・維持すること及びそれを支える人材を育成することが重要となる。
- 人材育成については、育成の拠点（大学等）の重要性や、予算的な裏付け等、具体的な政策行

動を行う必要がある。福島事故以降の原子力否定ムードの中で、優秀な人材を育成していくことの困難さと重要性、問題の打開策は国の政策として優先課題である。

- 安全を担うのは人間である。大学や高専でどのような技術者を育て、規制機関や産業界で経験を積みどう生かすか、原子力業界全体としての人材の確保と知識や技術が蓄積される仕組み作りが必要である。
- 安全を支えるのは高い技術を有する人材である。優秀な人材は衰退産業には集らない。原子力産業が活力と魅力を持つことも重要である。また、日本の技術がアジアの安全確保に資するためにも国内において運転技術をしっかり伝承する必要がある。

と記述されていて、人材育成の必要性に関する意見も提起されており、現在でも多くの枠組みの検討が行われている。

### 5.2.2 OECD/NEA における人材育成の提言

海外諸国や国際機関においても、人材の確保や育成には多くの対応策の検討が進められてきた。特に 2000 年前後<sup>(2)</sup>に経済協力開発機構/原子力機関 (OECD/NEA) の呼びかけで人材育成の課題調査とその課題解決の方策をとりまとめ、2012 年<sup>(3)</sup>にガイドラインを公表した。

このガイドラインでは、戦略的な取り組みの要素を明確にし、それらを実施する組織の役割などを示している。その内容には、人材育成の必須の要件を図 5-2 に示すように三角形で示している。

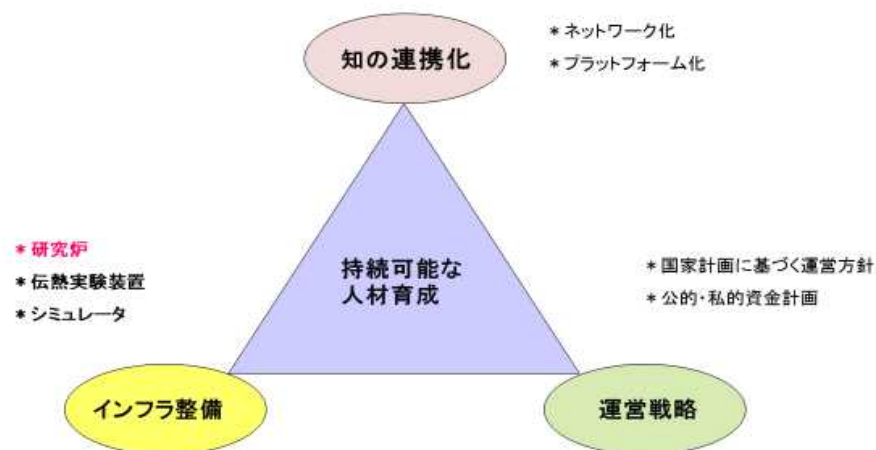


図 5-2 原子力の人材育成に必須の 3 要素

この3要素とは、連携化、インフラ整備、運営戦略である。

連携化は、ネットワーク構成やプラットフォーム化により、知識や情報を効率よく共有して価値を向上するための活動で、これに沿ってすでに多くの教育ネットワークが生まれ、一方では長期的な財源確保などにも効果を発揮している。

2 番目はインフラの整備である。原子力の分野での人材育成の大型インフラとしては、研究炉、

伝熱実験装置及びシミュレータがある。これらは育成カリキュラムに応じて選択されるが、設備費用が高価であり、また研究炉の運用にも資金が必要であり、採用に当たってはコスト対効果を考えておく必要がある。さらに、重要なのは上記 2 つの項目を持続的に下支えするためには運営方針の戦略化や継続的な財源の確保が要求される。この運用については、戦略に関わる、それぞれのステークホルダーに期待する要件を整理し、以下のような提言をしている。

**【政府の取り組み】**

育成の対象とする人材の区分や目標の設定、専門家育成の大学等への資金準備、人材育成ネットの支援。

**【大学の取り組み】**

教育/訓練のためのインフラの整備、国際感覚を持った人材育成プログラムの構築、大学間の交流（ステークホルダーとの連携も含む）。

**【企業の取り組み】**

若手技術者の育成プログラムの推進支援、企業内の継続教育（CPD: Continued Professional Development）の実施、技術継承のためのプログラム構築。

**【研究組織の取り組み】**

企業にとって魅力のある研究開発の取り組み、大学と連携による技術の事業化への橋渡し、長期的な研究開発のための大型研究用インフラ（研究炉など）、技術情報の社会への適切な発信。

**【国際機関の取り組み】**

国際的な連携枠組みの支援、技術の拡大化と核拡散防止の枠組みの構築、技術移転/伝承の枠組み構築の支援、国際的な技術/社会経済に関するイベントの開催。

この提言を受けて、国内外の関係組織は人材育成のために種々の枠組みを構築し、実践に移している。

## 5.3 日本における人材育成の現状

### 5.3.1 概要

日本における原子力の人材育成は、1950 年代の原子力の導入期から、大学、研究機関、企業がそれぞれ国の支援を受けて海外の動向などを参考にして改善/改良を重ねて枠組みを構築し進めてきた。

大学では、平成 26 年の統計<sup>(7)</sup>では、国立、私立大学合計で 11 の大学に原子力関係の専攻学科や講座が設置され、幅広いカリキュラムにより教育をしている。

また企業のうち、電力会社は、運転・保守、計画・調達に関わる技術者や技能者を対象にした訓練センターを会社ごと、あるいは BWR、PWR ごとに設置し、国家資格や民間資格を取得するための教育も含め実務的な育成を行っている。また、製造/建設に携わるメーカーやゼネコンなどの技術者は社内教育制度の中で、原子力関係の非履修者も含めた教育を行い、発電所の建設、改修、あるいは海外での計画に参画するとともに国家資格や技術士などの国際的に通用する技術者の教育を行っている。



参考のために、企業の従事者の推移を図 5-3 に示す。



出典：日本原子力産業協会 “原子力発電に係わる動向調査－2014年調査－” (2015)

図 5-3 原子力関係従事者の推移<sup>(8)</sup>

さらに、日本を代表する原子力専門の研究開発機関である JAEA は、旧日本原子力研究所時代から、研究所内だけで無く、民間や外国人まで対象を広げた研修を行うための研修センター<sup>(15)</sup>を設置し、IAEA などとも協力して人材育成を行ってきた。

また、国際的にも注目を集めている活動に、「福井県国際原子力人材育成センター」<sup>(17)</sup>があり、このセンターも IAEA などとも協力して国内外からの研修生を受け入れている。

以上述べた、産・官・学それぞれの単独の活動に加え、国内でも OECD の提言でも述べた連携ネットワークも構築している。このネットワークの枠組み動向の詳細は、EU や IAEA の事例とともに、5.4 章で述べる。また、日本の政府機関や個別の大学や研究機関へのインフラ整備計画などの活動についても、次節で述べる。

人材育成ネットワークの枠組み、人材育成の国際連携やその他で多くの支援制度を整備している。特にアジア圏での国際連携の枠組みである FNCA<sup>(9)</sup>でも人材育成は継続課題として取り上げて日本が指導的な役割を果たしている。

参考のため、日本原子力学会がまとめた政府支援とその課題<sup>(10)</sup>に、さらに今後の方向性について触れている資料を図 5-4、図 5-5 に示す。これによると、政府支援は約 50 億円の資源はあるが、日本原子力学会はこの資金では育成できる人数は限定され、かつ全体をとりまとめる機能や分析に弱さが見られ、懸念を示している。この内容は我が国特有の日本の戦略的な取り組みの弱さが出ているのではないかと推察される。この詳細は図 5-5 で触れられているが、先々への不安要素を指摘していることは、国への財政支援の期待を大きく持っていることの証ではないかと思われる。

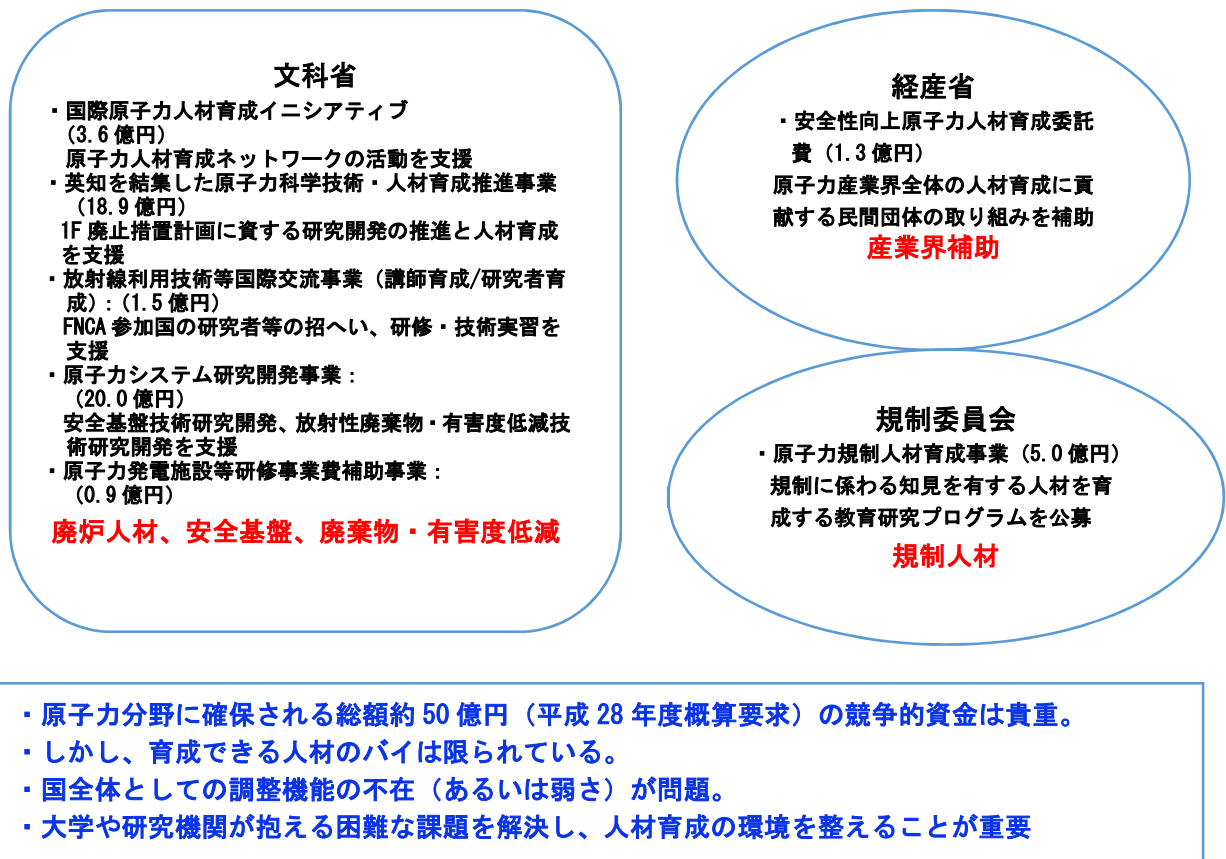
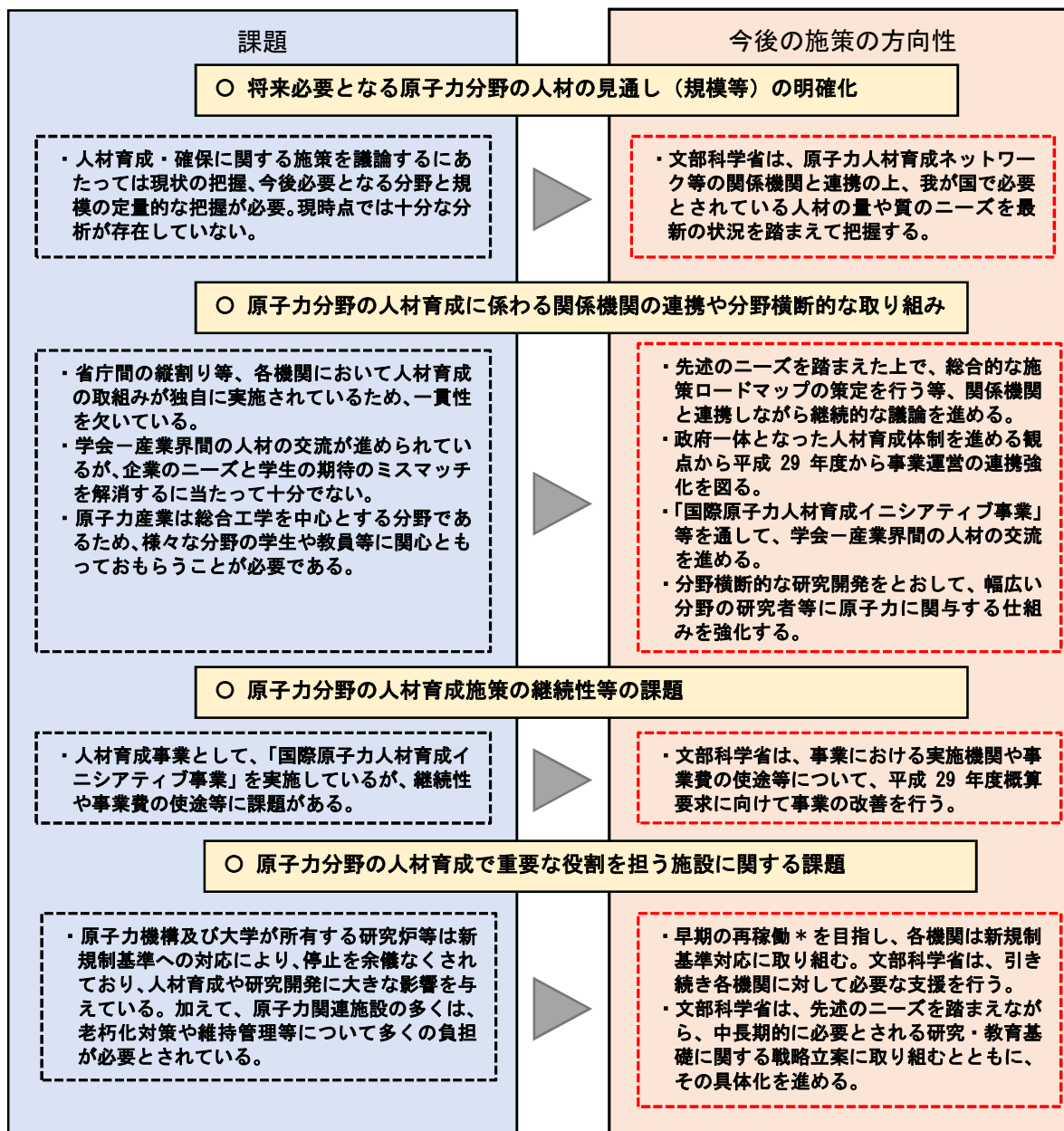


図 5-4 政府支援制度と日本原子力学会の意見 (青字部分) <sup>(10)</sup>



(出典) 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 原子力人材育成作業部会  
「中間取りまとめ」(2016年)

\* 2018年3月現在、京都大学及び近畿大学所有の研究炉は再稼働している。

図 5-5 原子力分野の人材育成の課題を踏まえた今後の施策の方向性<sup>(10)</sup>

### 5.3.2 JAEA の人材育成の枠組みの概要

JAEA の人材育成への取り組みは古く、旧日本原子力研究所の時代から、原子力／放射線技術の拡大を目指して研修所が設立され、半世紀以上も継続して日本の人材育成のセンターとして活動をしてきた。この活動は現在に引き継がれ、平成 27 年から平成 34 年に向けての JAEA の中長期計画<sup>(11)</sup>では以下のように取り組みの理念を述べている。

『我が国における原子力人材育成のため、東京電力福島第一原子力発電所事故への対応など、国

内産業界、大学、官庁等のニーズに対応した研修等の更なる充実とともに、機構が有する特徴ある施設等を活用し、大学連携ネットワークをはじめとした大学等との連携協力を強化推進する。さらに関係行政機関からの要請に基づき、アジアを中心とした原子力人材育成を推進し、国際協力の強化に貢献する。国内外関係機関と連携協力し、原子力人材育成情報の収集、分析、発信等の原子力人材育成ネットワーク活動を推進する。これらの事業を着実に取り組むことにより、国内外の原子力分野の人材育成に貢献する。』

このように幅広い人材育成の国内の中核としての活動の展開を行い、国内はもとより、国際的にも原子力先進国のリーダー役を果たし、FNCA<sup>(9)</sup>の活動の中心的な役割も果たしている。その活動の概要<sup>(12)</sup>を図 5-6 に示す。

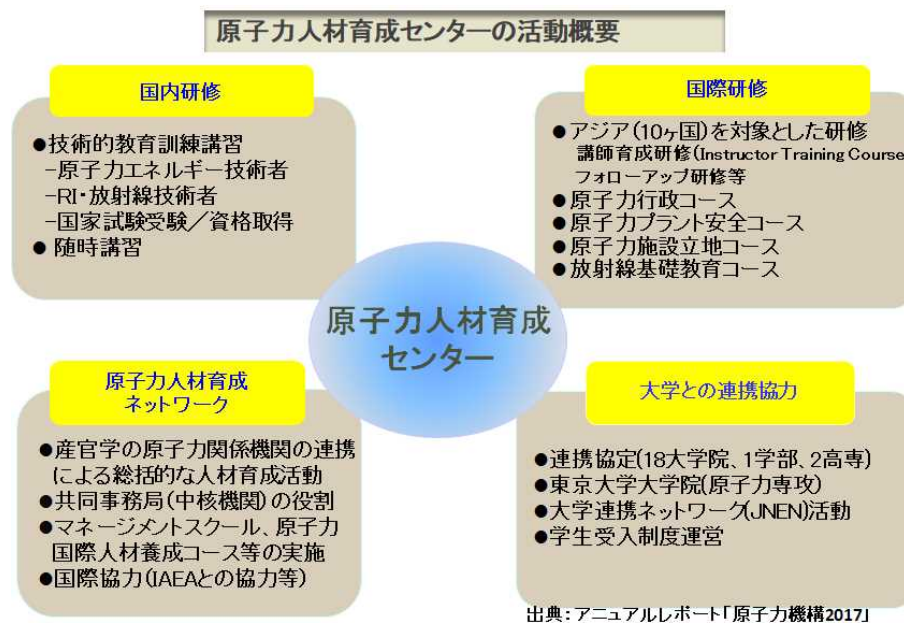


図 5-6 JAEA の人材育成センターの活動概要

図 5-6 では、4つの主要な活動を示しており、その具体的な内容は以下のとおりである。一つ目は、国内の研究者/技術者を対象にした研修、二つ目はアジアの 10 か国を対象にした、行政官や管理者、技術者などを対象にした国際研修、三つ目は産・官・学の連携ネットワークの取りまとめや国内外機関との連携活動の実施、四つ目は大学との連携による人材育成である。

### 5.3.3 福井県の人材育成の枠組みの概要

福井県では平成 23 年 4 月に、原子力の「アジアを始めとする世界の原子力の利用・安全技術向上と人材育成への貢献」を理念として「福井県国際原子力人材育成センター」<sup>(16),(17)</sup>を設立した。

このセンターの目的・機能は

- 世界の国々、特に原子力の新規導入を計画している国の研修生を対象とした国際原子力人材育成事業
- 海外からの研究者・留学生の受入れ、国際会議の開催、国内学生の外国への派遣支援、

国内技術者の国際化支援等の原子力国際交流促進事業

- 国内技術者・学生等を対象とした原子力発電所等の保守に携わる広範な基盤技術者の育成

である。また、福井県では平成 25 年 10 月に IAEA と原子力発電、原子力安全及び原子力科学・応用分野における協力のための覚書を交わし、共催による研修や講師招聘などの高度な人材育成事業の充実をして、中核的な役割を果たすことを目指している。これらの活動の概要や参加機関などを、図 5-7 に示す。



図 5-7 福井県国際原子力人材育成センターの概要

## 5.4 人材育成ネットワークの展開

### 5.4.1 概要

OECD のワーキンググループの提言<sup>(2)</sup>は、ネットワーク化の目的は、「知識の拡張化」と「研究インフラの共同利用化」の促進である。研究インフラである「研究炉」は、研究炉本体のみならず付属設備も必要で、かつ高度な信頼度や核拡散防止の対策などが要求されるために、限られた国や組織だけが保有している（現在は約 50 か国が所有）。このため、所有国と非所有国の間や、所有者（国）同士の相互融通の連携が進められている。その中で世界各国の原子力の人材育成の連携では、研究炉、熱流動装置、シミュレータを活用しているが、その多くは研究炉の利用が中心である。しかし、3 つのインフラ利用の中では、研究炉の老朽化、運転保守技術者の高齢化、規制対応による利用制限が課題になり、今後一層ネットワークによる効率的な育成が検討されると思われる。

このような背景において、代表的なネットワークによる人材育成の取り組みについて、OECD/NEA<sup>(2)</sup>の報告書から紹介すると以下のようなになる。

**(1) 日本**

産学官連携による原子力人材育成ネットワーク JN-HRD (Japan Nuclear Human Resource Development Network) <sup>(13)</sup> は 政府支援により大学、研究機関、企業など 62 団体が加盟して 2010 年に発足した人材育成のためのプラットフォームであり、現在の参加機関数は 75 である。他に JNEN (Japan Nuclear Education Network) は JAEA と 3 大学の連携、及び福井県国際原子力人材育成センター<sup>(14)</sup>、<sup>(15)</sup>が組織している産・官・学によるネットワークが活動中である。

**(2) 米国**

人材育成を目的としたネットワークは、西部地区の大学で結成されている研究炉の共同利用を目指した WNSA (Western Nuclear Science Alliance) がある。この他に、研究を主体とした大学連携のネットワークや、産・官・学などによる技術移転ネットワークがあるが、その中で人材育成も On the Job Training (以下、「OJT」という。) で実施していると思われる。この財源は DOE の「イノベーションのためのインフラ・教育財源」である。

**(3) 英国**

英国には多くの大学、あるいは研究所と企業間の連携体(コンソーシアム)がある。規模が大きいネットワークとしては、大学と研究機関の間で構成されている、修士課程修了者の育成を目的としたコンソーシアムである NTEC (Nuclear Technology Education Consortium)がある。これらの支援を行うために、民間企業による大学の財政確保のための組織である NAIL (Nuclear Academic Industry Liaison Subcommittee) が設立されている

**(4) ドイツ**

Alliance for Competence in Nuclear Technology と呼ばれる、政府、大学、研究機関、企業によるネットワークで、全国の技術者・研究者の育成に向けた活動をしている。この他に地域別のネットワークがあり、南西部に原子力研究・教育連合、西部地区放射線研究人材育成連盟、地下処分の研究のための研究者育成グループなど具体的な目標を設定した連合体なども数多く設立されている。

**(5) ベルギー**

BNEN は、国立研究所である SCK・CEN (ベルギー原子力研究センター) が中心になり、6 大学、公営電力会社による教育ネットワークにおいて、“Master after Master”の育成を目指している。

**(6) EU**

EU では戦略的研究プラットフォームの中で、人材育成を担うネットワークとして ENEN (European Nuclear Education Network) が 2003 年に設立し、2007 年に再編成が行われ、2010 年時点で 60 の研究所、企業、大学が参加している。この枠組みでは、多国間での教育カリキュラムの交換や認定制度の設定などが行なわれている。また、EU のフレームワークプロジェクトとして活動している企業の共同体として ENEL (European Nuclear Energy Leadership Academy) があり、EU 内で展開している多くのプラットフォームなどの財源の担い手の一つとなっている。

## (7) IAEA

原子力発電工学部門の中に人材育成に関係した、原子力知識管理ユニット（Nuclear Knowledge Management Unit: NKM）を設置し、原子力発電所の新規建設を計画している国々や経験の浅い国々の人材開発、あるいは先進国による技術継承などの枠組みがある。ここでは、国際的なネットワークの設立・持続的支援、先進国の人材育成支援などを行っている。また、アジア原子力教育ネットワーク（ANENT：Asian Network For Education in Nuclear Training）の設立や支援も注目される IAEA の活動である。さらに、2012 年 国際的な参加型連携組織 ICERR（International Center Based on Research Reactor）と呼ばれる研究炉連携ネットワークを設立し、フランスの研究施設とロシアの研究施設の 2 か国を中心に、開発途上国の研究炉の利用による研究や人材育成の実践を促す枠組みが活動を始めている。

### 5.4.2 日本における人材育成ネットワーク

OECD/NEA<sup>(2)</sup>の報告書でも紹介されているが、日本の人材育成のネットワークは海外からも注目されている。この枠組みの概念を図 5-8 に示す。

前節でも述べたように、日本の人材育成に関連したネットワークは、原子力産業会議と JAEA が事務局をつとめて運用している「JN-HRD」、JAEA が 7 大学と連携している「JNEN」、及び福井県原子力国際人材育成センターが組織しているネットワークがある。

JN-HRD<sup>(6)</sup>は図 5-9 に示すように、国内の法人、高専・大学、学会、自治体、企業、研究機関、など 73 機関（平成 29 年 4 月現在）が参加し、関係省庁が支援、また IAEA とも連携をしている。

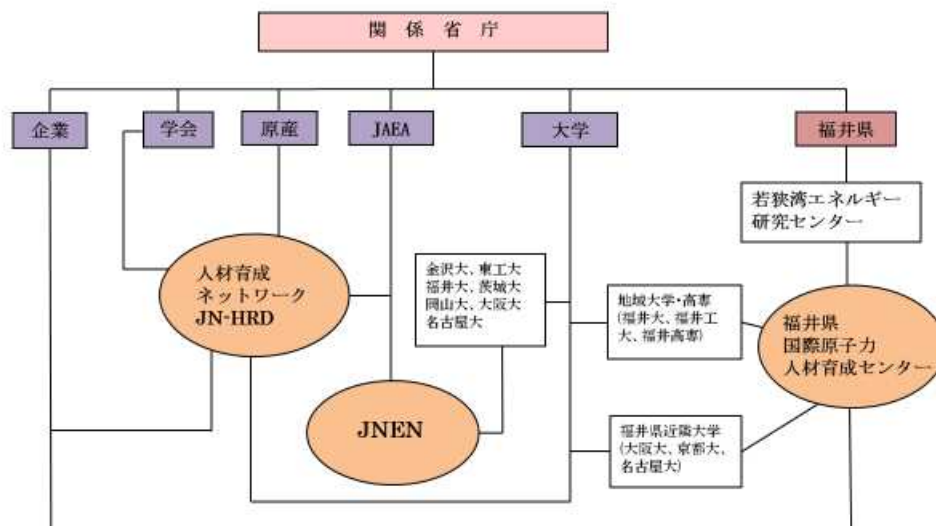


図 5-8 日本の人材育成ネットワークの関連図

# ネットワーク参加機関

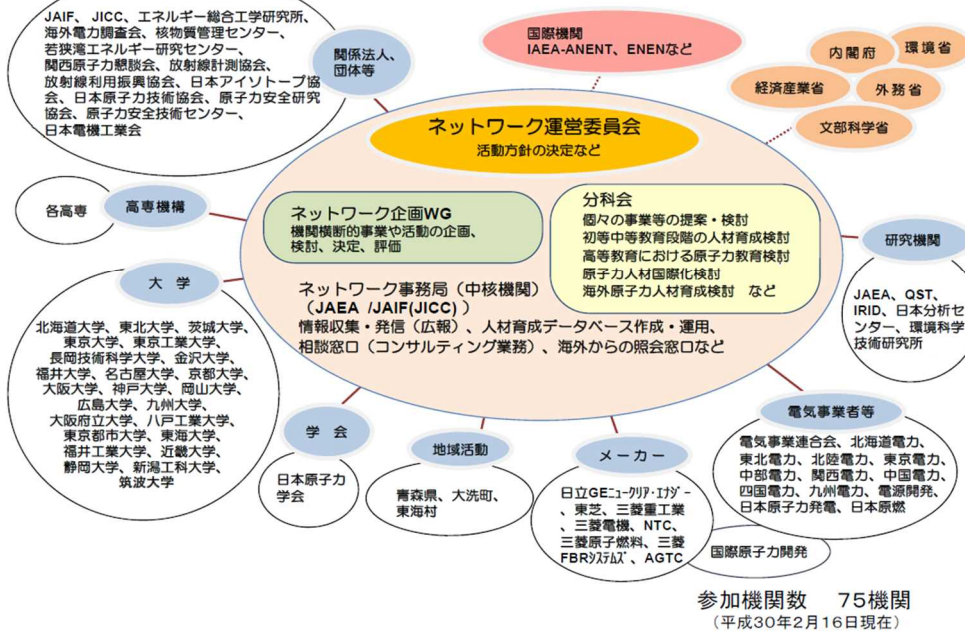
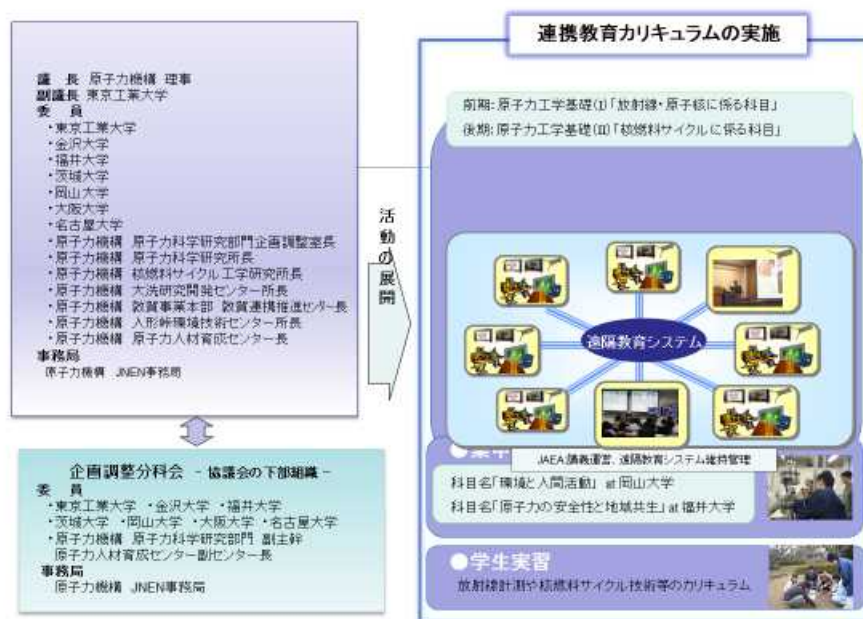


図 5-9 JN-HRD の参加機関と支援組織

また JNEN の参加機関や主要な活動状況を図 5-10 に示す。このネットワークは大学教育の充実を目指したネットワークで、これを研究機関が支援するという特徴がある。



情報提供: JAEA原子力人材育成センター

図 5-10 JNEN の参加機関と主要な活動



また、福井県国際原子力人材育成センターが組織しているネットワークはすでに図 5-7 に図示したが、自治体の研究機関が中心になり、それを自治体や国が支援し、地域の大学や研究機関、企業（電力会社やメーカー）が参加しているという組織的に特徴のあるネットワークである。

### 5.4.3 EU における人材育成ネットワーク

EU の大学院生の人材育成を中心とした ENEN は、研究開発のネットワークやプラットフォームと並んで EU のフレームワークの中で構築されており、他のプラットフォームとの関係を図 5-11 に示す<sup>(2)</sup>、<sup>(18)</sup>、<sup>(21)</sup>。

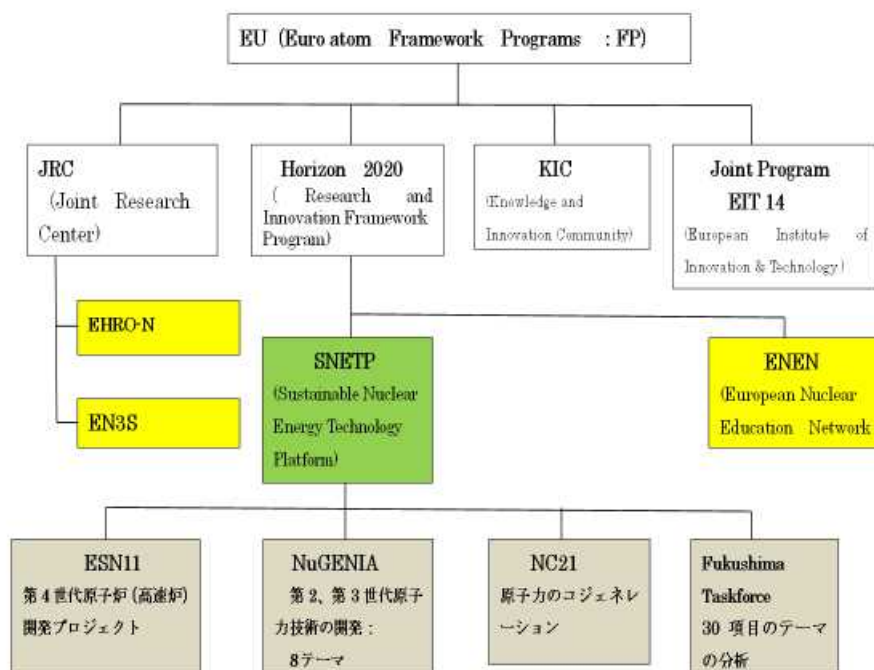


図 5-11 EU のプラットフォームの中での ENEN の位置付け

図 5-11 で、ENEN の他にも黄色に着色した枠組みは人材育成に関連したもので、EHRO-N は専門的な工業職業人の育成枠組みであり、EN3S は EU の原子力安全と安全保障のための学校の「European Nuclear Safety and Security School」の略称である。

この人材育成の中心である ENEN<sup>(21)</sup>の活動については、このネットワークの主目的が、高度な原子力技術力を維持するための教育・訓練の実施を国際協力によって高めることであり、その連携メンバーは、EU 域内の 55 大学、研究機関、規制行政、企業などが正規メンバーとして、また域外のロシアや日本の組織（東工大、福井大）などは、MOU（了解覚書）を交わして準会員として参加している。このネットワークの本部はフランスの CEA-INSTN にあり、修士課程の教育は、サクレーの研究所において英語で実施している。その活動は、①学生や技術者、研究者の教育訓練の高度化、②教育訓練の質の確認、③学生や研究者への原子力技術の魅力の誘発、④EU 内大学院修士、博士課程の教育の適正化、⑤大学、研究機関、規制行政、企業などの活動の相互理解・相互協力の機会提供などである。

これらの活動を通して、EU 域内での修士課程を中心にした認定制度の定着化、人材育成のツール（遠隔教育、研究炉・伝熱流動装置などの大型施設など）の活用や維持管理、企業や規制行政に係わる専門家の教育の高度化、途上国への支援などで幅広い成果を出している。

これらは、我が国のアジア地区を含めた国際ネットワークの検討に参考になる点が多く、今後の動向を注視しておく必要がある。

#### 5.4.4 IAEA による人材育成ネットワークの支援

IAEA は 5.4.1 で述べたようにネットワークによる研究開発や人材育成のシステム構築の支援に取り組んでいる。<sup>(20)</sup>その取り組み組織や支援に関する連携内容を図 5-12 に示す。

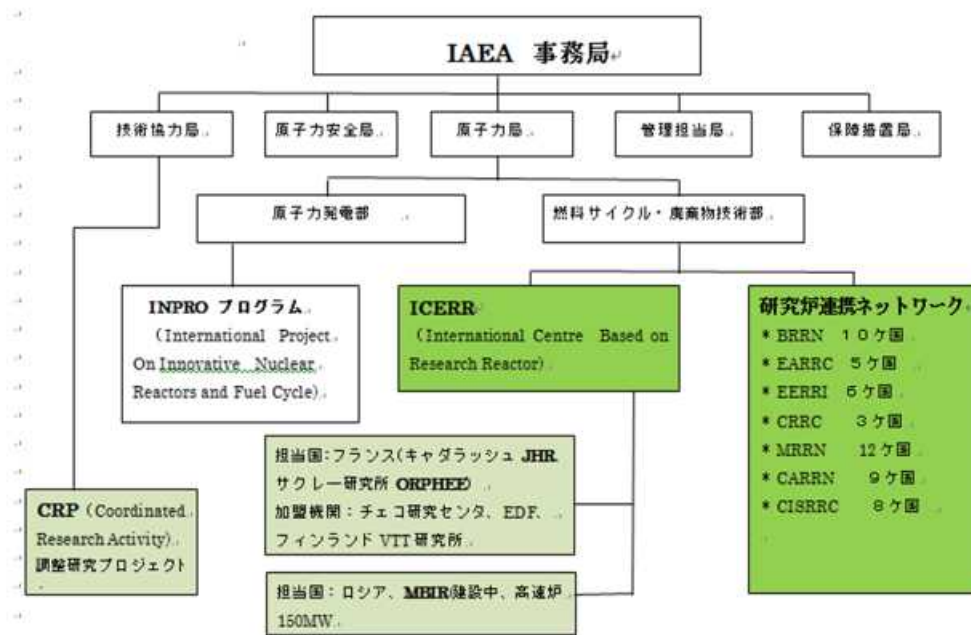


図 5-12 IAEA の運用/支援をしているネットワーク活動の構造

この IAEA のネットワークによる連携活動は、数多くそのすべてを網羅することは不可能である。その中から、研究炉の利用による人材育成に特化し、連携の代表的なものを選定すると図 5-12 に緑色で示した 2 つの枠組みとなる。

そのうちの 1 つは、原子力技術の利用拡大を目指して、研究炉の共同利用により人材育成や基盤技術の取得の国際的な枠組みである ICERR<sup>(19)</sup> (International Center based on Research Reactor) である。これは 2015 年に発足し、研究炉の非保有国が所有国の研究炉を利用する場合の制度で、費用や手続きに時間がかかるといった課題を改善することを目指している。利用する国は IAEA に研究炉や付帯設備の使用希望を伝え、それを IAEA は研究炉の所有者 (ICERR メンバー) と調整して、迅速にかつ低価格で利用することが出来る。それに対して研究炉の所有者は、ICERR 同士でのネットワークにより連携研究の展開や、研究炉の改善、参加国研究者などの指導・協力、論文作成などの研究活動を透明性をもって行う。さらにこの活動のための費用は、商業ベースで所有者と利用者側との間で取り決めをすることや新規に ICERR のメンバーとなるための認定の費

用は所有者の負担が原則である。2017年10月現在では、フランス（JHRとORPHEE）を中心に、チェコやフィンランドと連携したヨーロッパ勢、及びロシア（高速研究炉）がICERRに認定されている。研究炉を所有している国で利用時間に余裕のある国々は、研究炉の運転費の捻出の手段として加盟する国々の利用が今後増えてくることが予想される。

二つ目の枠組みは地域で連携した研究炉のネットワーク<sup>(23),(25)</sup>であり、これにはこの中で、研究炉を用いた人材育成のネットワークとして① EERRI Eastern European RR Initiative, 6か国、② CRRC Caribbean RR Coalition, 3か国、③ EARRC Eurasian RR Coalition, 5か国 ④ BRRN Baltic Research Reactor Network, 10か国、⑤ MRRN Mediterranean RR Network, 12か国、⑥ CARRN Central Africa RR Network, 9か国、⑦ CISRRC CIS RR Coalition, 7か国、⑧ GTRRN Global TRIGA RR Network, 15か国、の計7つのネットワークを設立し、研究炉による人材育成を行う枠組みは注目される。このネットワークでは研究炉の利用を人材育成だけでなく、幅広く多目的な技術開発利用を進めており、その面でもネットワークによる相互補完を充実している。

## 5.5 研究炉を利用した人材育成の動向

### 5.5.1 日本における研究炉を利用した人材育成<sup>(14)</sup>

これまで原子力人材育成の全体の動向でも一部触れてきたように、伝統的に研究炉を人材育成のツールとして海外でも数多く活用され、我が国でも導入期以来、活動は継続してきたが、技術の成熟化、研究炉の老朽化、東日本大震災に伴う新規制基準対応による長期の停止などにより、研究炉の活用は低下した。これらの傾向に対して、日本原子力学会は平成28年3月に「我が国における研究炉の役割について」に最近の動向についての分析とアンケートと調査結果を公表した。

この報告書によれば、研究炉を利用した人材育成は、原子力工学系の学生の教育、原子力関係の研究者や技術者に対する社会人教育、及び研究炉の運転管理技術者を対象にして行われている重要な枠組みで、この人材育成の実施形態は、①カリキュラムに沿って進める座学・実習・研修による育成、②研究炉を利用した研究開発に参画し、OJT方式での育成が、平成24年（新規制基準施行前）まで行われてきた。

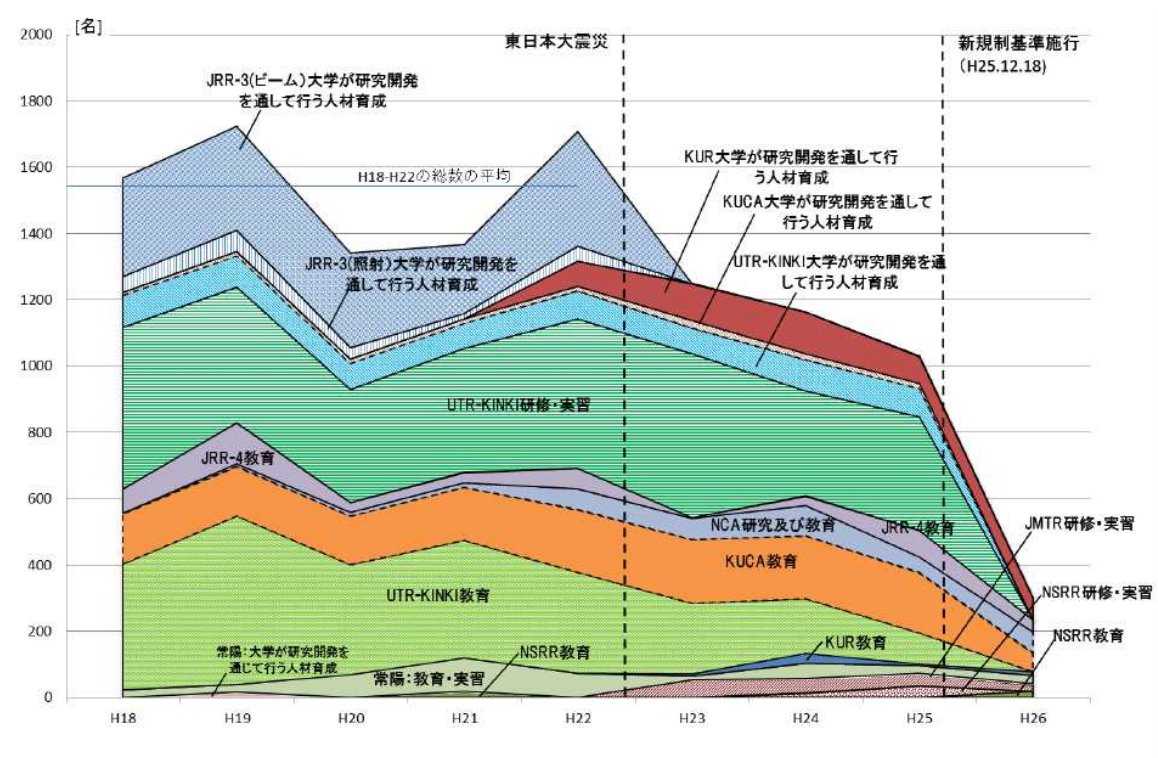
これらの人材育成の実績は図5-13、図5-14に示すような経過を辿ってきている。図5-13に示した平成18年から平成26年までの経緯は、学生及び社会人などの研修、実習、教育、OJTによる教育などを実施した研究炉別に整理したものである。

利用した研究炉はNSRR、常陽、JMTR、KUR、UTR-KINKI、NCA、JRR-4、JRR-3であり、平成18年から平成22年までは多少の変化はあるものの平均人数約1,500名で推移している。東日本大震災で被害を受けた研究炉もあって、徐々に利用数は減少し、新規制基準が施行された平成25年12月以降は激減し最盛期の20%程度、約300名程度まで低下した。

また図5-14には、図5-13と同じく平成18年から平成26年までの教育を受けた学生数の推移を研究炉別に示した。

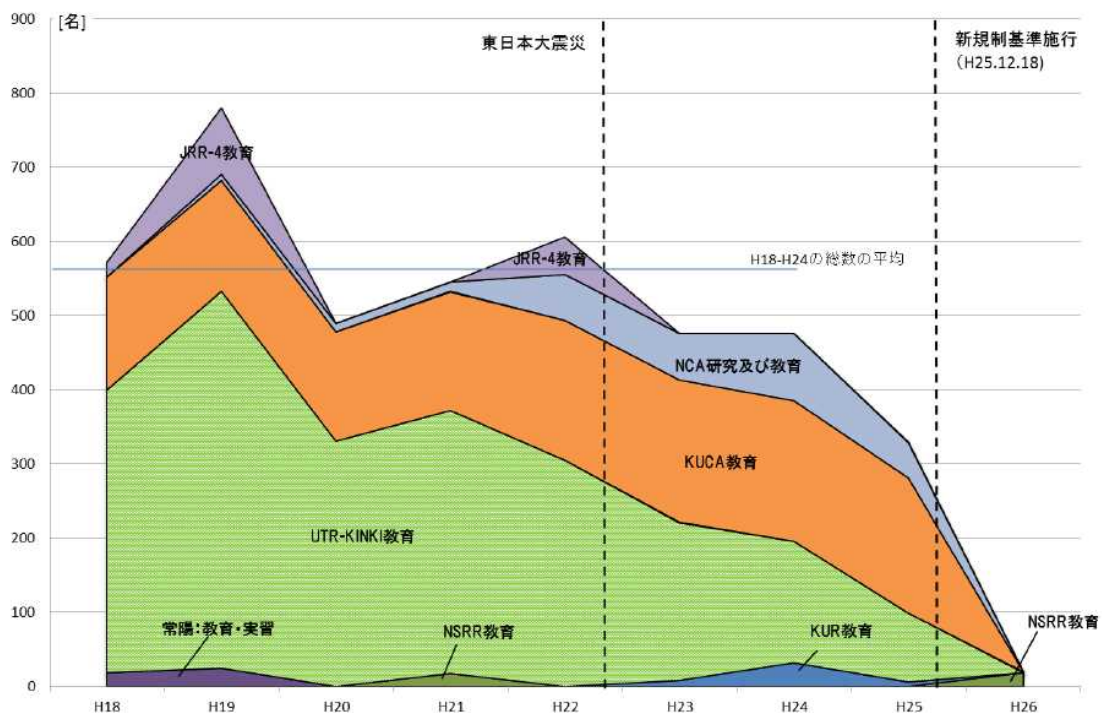
この2つの図の比較で注目すべき点は、学生の教育に比べ約2倍の社会人及び共同研究を通しての教育である。特に教育に利用した研究炉の主流は近大炉であり、その内訳は主に教師の研修、企業研究や、外国人技術者の研修等が含まれ、原子力の専門家向けの教育だけの目的ではないと思われる。

なお、日本での原子力の専門的な研修は、電力会社、メーカー等で独自の施設、カリキュラムを準備して実施している。



(日本原子力学会アゴラによる調査報告書より)

図 5-13 研究炉を利用して実施した人材育成（学生、社会人対象）



(日本原子力学会アゴラによる調査報告書より)

図 5-14 研究炉の運転実習による人材育成（学生対象）

図 5-14 の学生を対象とした全体の傾向は、東日本大震災まではほぼ一定で平均 550 人程度あり、震災、新規制基準施行以降の傾向は図 5-13 とほぼ同様である。

平成 26 年度以降、大学での人材育成のツールの利用は、国内では困難であったため、一部の大学では海外炉の利用も行っているが財源などの問題で困難な場合も多く、国内のシミュレータを使った学習も行っている。しかしシミュレータ学習の効果は、あくまでも仮想的なツールであり、臨場感に欠けるなどその効果に疑問を持つ関係者が多いことも報告されている。このことは、表 5-1 に示すように研究炉を利用した時の主要な教育テーマのように、動作体験をするものが多いことにも関係していると思われる。

表 5-1 日本の研究炉を利用した人材育成テーマの概要

設置者	炉名	主要教育テーマの概要
京都大学	KUR	原子炉の運転管理に関する実験的教育（臨界近接試験、制御棒反応度価値測定、キセノン効果測定等）及び原子炉安全管理
近畿大学	UTR-KINKI	原子炉運転、臨界近接、中性子束測定、反応度測定、制御棒校正、中性子ラジオグラフィ、空間線量測定等
JAEA	JRR-3	中性子ビーム実験：中性子散乱、中性子即発ガンマ線分析、中性子ラジオグラフィ、即発ガンマ線分析等、照射実験：放射化分析、RI 製造、半導体用シリコン照射、照射損傷、原子炉燃料材料照射
JAEA	JMTR	水力ラビットの照射試験に関する核設計、熱設計、照射後試験及び中性子照射量評価の実習、照射試験炉シミュレータ運転実習等
JAEA	NSRR	運転実習、臨界近接実験などの炉物理実験
JAEA	常陽	国内大学の連携：東大専門職大学院等、夏期実習生（数十名／年） ・1000 名以上の研究者、技術者が「常陽」の運転・保守等に従事、「もんじゅ」技術者：約 150 名、メーカ技術者：約 200 名
JAEA	JRR-4	大学院実験（臨界近接、制御棒校正、中性子束測定、スクラム実験、温度・ボイド反応度測定、未臨界度測定、運転実習等）

日本原子力学会アゴラによる調査報告書より

研究炉を利用した具体的な人材育成のテーマは、原子力工学の基礎である臨界近接及び臨界、反応度の変化や制御棒の効果や中性子などの計測からはじまり、実際の定常運転やスクラム実験など発電炉でも重要視されている運転・監視などの実習、さらには被ばく管理、放射線管理など幅広い学習や実習による体験が行われている。

### 5.5.2 海外における研究炉を利用した人材育成<sup>(22), (25)</sup>

#### (1) 海外での研究炉を利用した人材育成

3 章で述べた海外動向でも見られたが、海外でも人材育成に研究炉を利用している国は多い。東日本大震災前で主要な OECD 加盟国で研究炉を利用して育成した学生の数<sup>(2)</sup>を表 5-2 に示す。

この中で特徴的なことは、韓国は学部学生の教育が主で、オーストラリアでは研究をしている博士課程の学生の OJT が中心である。

また、オーストラリアには発電用原子炉は無いが、IAEA の枠組みである、東欧圏ネットワークである EERRI の枠組みの中で、オーストラリアの研究炉を使用し、原子力発電所を有しない国々の学生が多く利用していることは注目される。またフランス、ベルギー、オランダ、ドイツは現在でも多くの研究炉を持ち、将来的に原子力発電所を導入する計画がある国々が、これらの研究

炉を利用して人材育成に力を入れていることが分かる。

表 5-2 OECD 主要国での研究炉利用の人材育成

国名	博士研究者	受講学生数	外国人	修士論文数	備考
日本	46～51	219～231	平均 10%	203～198	大学と JAEA
韓国	0	300	0	0	HANARO
オーストラリア	96	—	—	—	使用料必要
オーストリア	25	60	15%	50	発電炉なし
ベルギー	13	40～60	10%	19	
チェコ	20	—	—	5	
フランス	180	186	10%	2	
ドイツ	0	1,140	10～20%	5	
ギリシャ	5	228	0	20	
ハンガリー	20	180	20	39	
イタリア	13	100	—	19	発電炉なし
オランダ	52	72	—	20	
ノルウェー	0	—	—	—	
スロベニア	5	30	5～10%	150	
スイス	4	200	10%	2	

OECD“Nuclear Education and Training:From Concern to Capability”(2012)より編集

表 5-3 海外で研究炉を使つての社会人教育実施の例

国名	炉型／炉名	出力	育成した社会人の数			
			2008年	2009年	2010年	2011年
オーストリア	TRIGA	250kW	15	15	15	8
ブラジル	IPEN/MB	100W	0	23	0	37
チェコ	VR-1	1.5kW	13	31	51	33
フランス	ISIS	700kW	290	310	350	400
フランス	MINERVA	100W	40	40	40	60
ドイツ	AKR-2	20W	41	50	44	25
イタリア	TRIGA	250kW	0	47	47	24
マレーシア	TRIGA	1,000kW	20	—	10	—
スロベニア	TRIGA	250kW	51	41	32	70

OECD“Nuclear Education and Training:From Concern to Capability”(2012)より編集

また表 5-3 には、表 5-2 で示した学生教育と同時期に行われた、海外で行われた社会人の教育の実施例であるが、ほとんどが中出力以下の研究炉が使われており、研究炉は人材育成を中心に利用されている。中でも、発電炉を所有しないオーストリアやイタリアでの人材育成は、アジアや

アフリカなどの途上国の人材育成に使われている。(5.5.2 (3)参照)

## (2) フランスにおける研究炉を利用した人材育成<sup>(22), (24)</sup>

世界一原子力発電のシェアが大きいフランスは、EU の人材育成において ENEN の枠組みの中でも指導的な役割を果たしている。その現状の概略を以下に述べる。

フランスでの人材育成は、原子力戦略委員会 CSFN (Conceil des pour lenergie nucleare) を設立し、政府、企業、学校等の教育機関、研究機関のそれぞれの取り組みについて検討している。具体的な内容は、それぞれのセクターの人材育成のニーズ、学生の動向、効果的な教育の在り方などの調査や提言を行う役割を持っている。また国の人材育成戦略策定委員会によってそれぞれの原子力セクター別にレベル分けを行い詳細な教育プログラムを検討している。特に注目すべきは、修士課程に相応しい教育カリキュラムが開発され、複雑で広範な原子力に特化した原子力工学プログラムがあり、これを 30 の大学や専門学校の約 1,000 名前後の学生が教育を受けている。また、世界的な原子力企業である AREVA は高等教育人材の採用や社内教育について、電力会社なども参考にしているプログラムを開発している。また CEA のほとんどの研究所は博士課程の研究者の教育を受け入れ、INSTN は技能者、技術者などの教育も含めて行っている。

次に、CEA が行っている、大学院から社会人教育 (CPD) までをカバーしている人材育成について紹介する。

人材育成を担当しているのは、フランスの CEA の組織の一つである、INSTN (National Institute for Nuclear Science & Technology) で、主にサクレー研究所に設置してある、教育訓練専用の研究炉である ISIS (700kW 出力) を使用して、学生や社会人 (フランス国内だけでなく EU の企業、政府関係組織、他の研究機関所属) の教育・訓練を行っている。

この ISIS 研究用原子炉は、2007 年に教育専用炉として、主に制御系を中心に改造し、研究時に原子炉の振る舞いを監視しやすくした。

人材育成では、修士学生と社会人は 50/50 の割合である。修士学生はフランス国内とスウェーデンの 3 大学の学生で終了後は 7 つの修士と技術の資格が取得出来るようになっている。また社会人は 1 週間から 12 週間の間で、訓練生の都合に合わせたプログラムがあり、発電所運転員、技術者、規制行政官、大学、専門学校教員が対象である。また一般の教育関係者 (学校教師など) の教育は、3 段階があり、必要に応じて選択できる。この 3 段階は、原子力に直接携わらない人は 3~6 時間、原子力の概論を学びたい人には 3~12 時間、原子力を詳しく知りたい人には 6~24 時間のコースを準備している。

これらの教育には毎年 400 名程度が参加し、360 時間内の講義のうちで 40% は英語を使っている。ここでの代表的な訓練内容は以下のようにになっている。

- ・燃料装荷中の反応度制御、臨界近接、スタートアップなどの実習
- ・制御棒校正カーブ作成、制御棒挿入時のワース評価、炉心反応度の変化測定
- ・遅発中性子の挙動の実験的確認、温度効果の実験的確認
- ・運転中・停止中の放射線防護、中性子測定、ラジオグラフィや放射化分析の実習
- ・専門運転員指導の下での運転操作実施

以上のように、フランスの代表的な人材育成の内容を紹介したが、多くの枠組みや制度の中で、700kW という中出力の教育用研究炉を使用した人材育成が大きな特徴であることを特記しておく。

### (3) IAEA のネットワークを利用した人材育成の例<sup>(20), (22), (25)</sup>

5.4.1 でも述べたように IAEA の連携ネットワークの中には、地域を限定し研究炉を利用した人材育成の例が数多くある。ここでは、その一例として EERRI (東ヨーロッパ研究炉連合) の活動例を紹介する。

このネットワークは、2008 年に発足し、メンバー国は、オーストリア、チェコ、ハンガリー、ポーランド、ルーマニア、セルビア、スロベニアの 7 か国、9 基の研究炉を所有している。この研究炉の内訳は、高中性子束炉 3 基、TRIGA 炉 3 基、訓練用原子炉 2 基、臨界実験装置 1 基である。当初は、これらの研究炉を相互に利用し、教育訓練、ビーム利用と中性子散乱、RI 製造、燃料・材料照射を行ってきたが、これらを拡大して「フェローシップ プログラム」を設立して途上国から研修生を受け入れて教育・訓練をしている。

2015 年の実施例では、6 週間にわたる教育プログラムには途上国から 75 名が参加し、研究炉の導入に備えた学習（設計や運転）や発電炉の検討が出来る知識を習得した。

その中の主要地域は西アジアから 32 名、南アジアと北アフリカからそれぞれ 9 名、東南アジア 8 名、南アフリカと南アメリカからそれぞれ 6 名あり、現在原子力の導入を準備中の西アジアや東南アジア諸国の意欲が見られる。

このように、種々の幅広い研究炉の利用による研修制度は新たな試みとして注目され、今後、我が国での研究炉利用による国際的な原子力人材育成にも参考になる点が多いと思われる。

## 5.6 研究炉利用による人材育成の課題

研究炉を利用した人材育成については、国際的な視点から整理されている課題と、国内では日本原子力学会の分析結果及び原子力人材育成ネットワークの提案がある。その要約を整理した。

### (1) IAEA が整理している課題<sup>(23)</sup>

IAEA は、原子力導入先進国（地域）から導入途上国（地域）や検討国まで幅広く多様な課題を整理し、それらの解決に取り組んでおり各国や地域の支援に役立てている。

ここで取り上げられている課題は IAEA の国際機関としての視点から整理した課題であり、必ずしも各国の戦略立案に共通に役立つものばかりではないが、今後の参考として以下に列記する。

#### ・人材育成の戦略が国や地域によって多様化

この多様化の課題は国際的な教育支援や指導をしている IAEA の重要な指摘であり、個別の国々が参考にする場合は、国際連携を検討する場合や諸外国の人材育成の取り組みを理解する上には貴重な指摘である。

この課題は、将来に向けての原子力発電に向けて国別、あるいは地域の戦略に直接結びつ



いており、従来の先進国対途上国という 2 層構造から、海外市場開拓の機運の高まりなど原子力開発や事業の戦略が多様化しており、それに影響を受けて人材育成戦略も多様化している。これは、現在の世界の趨勢であるとも見ることが出来る。具体例としては、第 3 世代原子炉技術が成熟している EU や米国、ロシアなどでは、約半世紀を経過した多くの研究炉を抱え、その後継機の検討の結果を反映して高出力炉、第 4 世代炉の開発につながる研究炉の建設に着手するなどの戦略が見られ、これらを活用した人材育成のプログラムも整備されている。また中国などは、発電炉はもとより研究炉でも欧米やロシアの先進国の豊富な技術を取り込み、独自の戦略を展開し始めている。

また導入を促進しているアラブ諸国やアフリカなどの途上国は、EU やアジア諸国とネットワークを組み、研究炉の利用だけでなく、自前の研究炉の建設計画の検討を行っている。

これらの途上国の研究炉の導入を先進国が技術面や資金面で援助を行うことで、商業炉の導入を見据えた事業戦略にもなっている。

これらの多様な各国や地域での戦略は、研究炉の幅広い利用により世界的に原子力発電の機運を拡大することにつながるが、核拡散の懸念もあり、そのための歯止めの枠組みの構築は必須であり、このことを念頭に置いた人材育成のプログラム構築や国際的な連携の在り方を先進国の責務として、IAEA と協力して進める必要がある。

- 教育指導者の育成システムの課題

この課題は個別の国々でも重要視すべき課題で、基礎基盤となる学術面から、現状や次世代の発電炉の技術の動向を見据えた教育プログラムの計画や、研修する人材のレベルに合わせたカリキュラムを作成できる人材を継続的に育成することは、人材の数としては多くないものの、我が国だけでなく、海外への協力の柱一つであると考えられる。

- 人材育成の財源（インフラ整備や教育のための移動費用など）の確保

継続した財源確保は、インフラの中核である研究炉の建設費や管理の費用、そして研修生の受け入れに関する費用などを継続して確保する財源は重要である。これを確実にするためには、国、企業の強力な支援が必要であり、研究炉の運用者も財源確保のための努力は必要である。日本の場合、研究炉の多くは大学や研究機関が管理していたため、従来は国からの公的資金を期待し、自ら財源を確保する活動を積極的に進めるようなことはなかった。今後はヨーロッパでの動きのような民営化などにより、研究炉の活用による収入源の確保も検討すべきであると思われる。

- 各種資格認定の国際的な共通化

研究炉の利用だけではないが原子力工学の学習の認定制度として、米国には ABET (Accreditation Board for Engineering and Technology) がある。EU にはこれにならって、ECVET (European Credit system for Vocational Education and Training) が制度化されているが<sup>2)</sup>、工学全般に適用する上では認定基準が不明確であるとの指摘もあり、他の国々が参考にして推進している様子は見えない。この指摘を IAEA も問題視しており、世界共通の認定制度の要求に対して EU 域内で、各国共通の原子力修士課程の認定を国際化する動きはある。これらの動きは、米国や日本、アジアにはまだ広がりを見せてはいないように思える。

- 新規原子力導入国の拡大への協力

この課題は、各国や地域の人材育成の戦略でも触れたが、導入国への協力は、IAEA など国際機関を通じての協力は拡大、推進すべきであるが、一部の国々の事業戦略と競合する場面もあり、国の海外戦略などとの整合性を考慮しつつ、協力の仕方の枠組みを広げるべきであると思われる。この場合も、核不拡散などの対応策も事前に十分検討しておく必要もある。

・ 国内外の連携やネットワークの設定上の諸問題

国内外の連携において目的設定や運用基準などを明確にしておかないと、持続性が保てなくなることが懸念される。単に、会合などのイベント開催でも費用が必要になり、財源問題が難しい課題となる。

以上、IAEA の研究炉利用における人材育成についての課題について、関連の資料などを参考にしてやや詳細に述べた。今後の研究炉を利用した人材育成の枠組み作りに参考として考える必要がある。

## (2) 日本原子力学会が指摘している課題<sup>(14)</sup>

日本原子力学会の調査では、① 新規規制基準への対応 ② 高経年化対策 ③ 使用済燃料の措置 ④ 核セキュリティ強化対応及び燃料低濃縮化（一部の研究炉が対象） ⑤ 廃止措置及び次期研究炉等の検討 ⑥ 運転員の力量と士気の確保の 6 項目を課題として取り上げている。

これらの課題は研究炉共通のものであることから、人材育成に直接関連した具体的な問題点を、研究炉利用の経験者などの意見も踏まえ整理した。

この結果、①研究炉の長期停止による教育計画の見直しや代替施設の準備②研究炉の所在地が限定されているための移動費用の発生③施設の老朽化と並行して機器・設備の近代化④国際的な人材育成のための指導者の確保⑤核不拡散のための海外研修者の管理などが具体的な課題として挙げられる。

これらの課題は IAEA の課題分析で述べた項目と多くのものが類似している。日本原子力学会は、『国の原子力利用・研究開発の政策において研究炉の存在が必ずしも明確には位置づけられていない。また、公共財ともいえるべき研究炉等の維持や運営に関する国としての検討は行われておらず、計画的な措置も取られていない。運用上の困難な課題を抱える施設の命運がこれら施設を保有・維持する一大学、一機関の手に委ねられている現状は大きな問題である。』（報告書<sup>(14)</sup>からの抜粋）と指摘している。今後の我が国の人材育成の政策的課題として取り上げられることが期待されている。

なお、参考のために IAEA から発行されている、人材育成のニーズを参考資料に示す。

## (3) 原子力人材育成ネットワークの提案からの課題

原子力人材ネットワークにおいて、原子力人材育成の課題と今後の対応について提案しているが、戦略的に取組むべき重要課題として研究炉等大型教育・研究施設の維持が挙げられている<sup>(27)</sup>。

福島第一原子力発電所の事故を経験した現在、我が国の原子力研究・開発・利用は原点に立ち戻り、基礎・基盤教育のあり方を見直すとともに、安全技術の高度化を中心に据えて、原子力技術の更なる高度化を目指す必要性に迫られている。特に将来、中心となって活躍すること

が期待されている原子力を専攻する学生には、原子力技術の原点である原子炉物理の基礎基盤知識を習得させ、実際に研究炉、臨界実験装置等の大型教育・研究施設等での体験学習により原子力安全や放射線を扱う緊張感を体験するとともに、種々の法規制等を臨場感を持って体得させる必要がある。また、核物質を取扱うことに伴う核不拡散や核セキュリティに関する国際規範を体験を通じて学ぶことができる。

このような大学等における研究炉等の大型教育・研究施設を用いた実験・実習の機会はかけがえのないものであり、そのための当該施設の維持が必須である。しかしながら、研究炉等の大型教育・研究施設の維持管理には多大の労力と費用を費やし、大学単独での維持管理が難しくなっている。

このような状況を踏まえ、我が国が保有する研究炉等の大型教育・研究施設の今後のあり方、維持管理方法の見直し及び更新等について、国としての基本的考え方及び支援策の検討が必要である。

## 【参考資料】

IAEA が提示している人材育成のための研究炉の要件<sup>(26)</sup>

### 1. 原子力工学の学生への教育

#### (1) 教育実習カリキュラム

原子力工学教育のためには教育内容によって 4 種類の原子炉施設の利用が考えられる。その第 1 は、原子炉の物理的な現象を静的及び動的な原子炉の基本パラメータを測定することによって原子炉の基礎を学ぶケースである。第 2 は、放射性同位体製造、中性子放射化分析 (NAA)、ラジオグラフィや中性子ビーム散乱実験などの実験を通して学ぶケースである。第 3、第 4 のケースは、より高度な原子炉の工学的な内容で、将来の研究や発電所の運転管理などに必要な技術を学ぶものである。訓練内容の例としては、反応度と冷却材の温度変化を伴う操作の経験などにより、理論と実践がどのように関連しているかを学ぶことや、運転の訓練などを経験し運転員の研修に備えた知識についての学習である。このうち第 3 は理論と実践の関連を学ぶ高度教育を、第 4 は運転員研修をレベルに応じた学習を行うことを前提にした内容であり、これらの中でどれを選択するかは、教育・訓練の対象者やレベル、育成目標によって決まる。それに伴って、どのような研究炉が適切かを選択する。以下に 4 つのレベル別の教育概要と研究炉への要求事項を述べる。

##### (a) 原子炉物理実験による基礎力養成

- ・ ビームポート及び熱カラムでの中性子束スペクトル及び変動の測定
- ・ 原子炉動特性パラメータの測定
- ・ 臨界へのアプローチ中の未臨界での増殖やシャットダウンマージン測定
- ・ 制御棒または制御ブレード位置の校正
- ・ 余剰反応度及び停止マージン測定
- ・ ペリオドの測定と遅発中性子群の 1 つまたは 6 群すべてとの相関
- ・ 温度係数及び昇温速度の測定
- ・ 熱量収支及び核計測器校正
- ・ 吸収材の反応度ワース測定
- ・ 設備設計と運転限界の条件によって許容されるホットチャネル係数の測定、制御盤の表示による制御棒の位置校正
- ・ 出力減少時の遅発中性子群測定
- ・ 反応度測定時のボイド係数

##### (b) 利用実習

これらの実習は設備が整っている場合に、以下の実験を OJT 的に行うことが望ましい。

- ・ 微量元素分析、放射性同位体生成及び核種分離
- ・ 中性子ラジオグラフィ
- ・ ビームポートを用いた中性子伝送実験
- ・ ビームポートを用いた中性子散乱実験
- ・ サーマルコラムにおいて、フェルミチョッパーを使った熱中性子飛行時間 (TOF) 実験

##### (c) 核加熱以前の原子炉運転実習

この実習の実験は、上述の原子炉物理実験とほぼ同様であるが核加熱に先立って行う操作と原子炉の制御、計装システムの理解、基本的な物理測定の実験の上で原子炉の運転員と同様の操作経験を学生に体験させることを目標としている。

- ・ 臨界近接時の制御棒の引き抜き
- ・ 臨界近接時の中性子源の影響
- ・ 線源による臨界の開始と線源除去効果
- ・ 臨界または反復増倍実験へのアプローチ
- ・ 安定時のペリオド測定と臨界実証
- ・ 制御棒校正測定
- ・ 遅発中性子観測による低出力測定
- ・ 手動 vs 自動の制御と反応のスピード実習
- ・ 反応度の温度係数とボイド係数の測定
- ・ 核計測値に対する制御棒の位置の関係

#### (d) 核加熱時の原子炉運転実習

これらの実験は、上述の原子炉物理実験と類似ではあるが、核加熱の進捗に伴って起こる現象を計装制御（I&C）システムにより動作を把握し、基本的な物理現象を理解することに重点が置かれている。この実習も原子炉運転員と同様の操作経験を実習させることを目指している。

- ・ 臨界近接時の制御棒の引き抜き
- ・ 臨界へのアプローチ
- ・ 制御棒の引き抜きまたは落下の方法による制御棒のワース計測
- ・ 温度係数及び昇温速度の測定
- ・ 遅発中性子測定による自動制御と応答速度測定
- ・ 熱量収支及び核計測器校正
- ・ 制御盤での読み取り値に対する制御棒の位置の関係
- ・ 設計及び運転制限条件によって許容されるホットチャネル係数の測定
- ・ 制御された冷却過渡状態のデモンストレーション
- ・ ホット再起動

#### (e) 原子炉計装制御システム

この実験は、定常運転から停止に至るまでの間、原子炉を安全に制御するために使用される代表的な計測器の監視の実習である。

- ・ 原子炉の I&C システムの説明
- ・ 核計装の校正
- ・ 温度計装の校正
- ・ 制御棒落下時間測定
- ・ ボロン中性子検出器

- ・核分裂中性子検出器
- ・自己出力型中性子検出器 (SPND)
- ・論理回路 (2アウト3システム)

## (2) 教育のための原子炉や実験装置の要件

これらの実習は研究炉の出力レベルの制約は無いが、低出力の訓練用原子炉が最も望ましい。また 実験装置としては、中性子束や中性子スペクトルの測定のためのガスフロー式比例計数器、シンチレーション (NaI (Tl) や LnBr<sub>3</sub>) やゲルマニウムなどの計数設備だけでなく、中性子放射化ホイル (アルミニウム、カドミウム、金、インジウムなど) によるしきい値検出器系などを使う。臨界実験は、BF<sub>3</sub>、<sup>10</sup>B または核分裂チャンバを使用した中性子検出システムと、増幅器及び読み出し装置が必要で、他のすべての実習は既存の設備で十分である。

## (3) 人材育成の指導者の要件

すべての実習には原子炉運転員が必要で、いくつかの原子炉物理実験は、既存の原子炉の計器に加えて、機器を追加して測定したデータの収集が必要である。この場合、教官は機器を設置して操作する。これらに携わる教官は運転時の実験の研究炉への影響とそれに関係する学生の測定結果などを評価することも責務である。いくつかの運転実習は、高度に熟練した原子炉運転員のみで実施することができ、他の臨界へのアプローチなどでは運転員以外の専門家を必要とする場合がある。

また、次の研究炉の利用実験には、実験エリアに常駐する人が必要である。この人は実験の手順や機材の説明や学生の作業を監督し、指揮することが責務である。

## (4) 資金調達

運転と利用の実習では通常、追加の資金調達は必要ないが研究炉で通常使用しない機器を必要とする実習では、追加の資金が必要になる場合がある。それらの費用は、実習する学生のレベルにより、50 万円位から 400 万円程度であろう。

中性子束及び中性子束分布、またはエネルギー分布の測定は、既存の計数システムを利用することができる。しかし、新しいシステムを調達しなければならない場合は、検出器の種類により、200 万円位から 900 万円位が必要になり、さらに放射化ホイルかワイヤーを追加すると 30 万円ほどが追加で必要になる。また、博士号の研究などでは、エネルギー分布の精密な測定のために、特別なフィルタや TOF 装置に 200 万円から 700 万円が必要になる。

## 2. 原子力発電所運転員研修

原子力発電所から適度な距離に位置する研究用原子炉を利用し、原子力発電所運転員の訓練を行うのに理想的であるが、多くの原子力発電所はプラントシミュレータや保全訓練施設を使うことが多く、研究炉を使用する原子力発電所の運転員の訓練は、最近あまり頻繁に行われていない。一方、途上国などはシミュレータの準備が行き届かず、研究炉の利用の可能性がある。この訓練は、通常未臨界状態から全出力運転に至る全プロセスの制御を実地で験することを目指して行わ

れる。

(1) 必要な中性子束／出力レベルと典型的な訓練コース

低出力レベルの原子炉を使用した場合、核加熱による発熱までのプロセスを実習することができ、さらに学生の実習で述べた項目もほとんどがカバーできる。

新規導入国の運転候補者の訓練をする場合を例として、考えられている訓練コースの例を以下に示す。この訓練は6週間～8週間で高度に専門化された訓練コースでもある。

(a) 行政及び組織に関連する訓練項目

- ・規制要件
- ・行動規範
- ・研究炉管理
- ・スタッフの要件
- ・サイト要件
- ・廃棄物管理
- ・公開情報
- ・核物質防護
- ・緊急時手順
- ・原子力計画及び実施及び管理
- ・廃止措置の計画及び実施

(b) 原子炉関連項目

- ・研究炉の概要
- ・研究炉の利用率
- ・原子核物理学入門
- ・炉物理
- ・I&C システム
- ・熱水力学
- ・保守点検プログラム
- ・燃料管理
- ・燃料サイクル
- ・水化学と放射線モニタリング
- ・放射線防護
- ・人的モニタリング
- ・環境モニタリング

(c) 実践的なコース

- ・原子炉物理学と動力学
- ・I&C システム
- ・放射線防護及び線量測定

- ・燃料管理

以上述べた訓練は研究炉を用いて、商業ベースの訓練を提供できることから、研究炉の経営収入として利用でき、研究所の運営費にも充当できる。



【参考文献】

- (1) IAEA TR482, “History, development and Future of TRIGA research Reactor” (IAEA 2012)
- (2) OECD/NEA, “Nuclear Education and Training from Concern to Capability” (OECD 2012)
- (3) OECD/NEA “Nuclear Education and Training : Cause for Concern ?” (OECD 2000)
- (4) 原子力委員会 “平成 28 年度版 原子力白書 ” (平成 29 年 9 月)
- (5) 文部科学省 科学技術/学術審議会研究計画/評価分科会 原子力科学技術委員会 原子力人材育成作業部会 資料 (平成 27 年 7 月)
- (6) 原子力委員会 “原子力人材/基盤について” (新大綱策定会議 第 14 回平成 24 年 2 月)
- (7) 日本原子力産業協会“原子力人材ネットワークの取り組み”(資源エネルギー調査会原子力小委員会第 4 回 2014 年 8 月)
- (8) 日本原子力産業協会 “原子力発電に係わる動向調査 2015 年－2014 年調査－ (2015)
- (9) 原子力安全研究協会“アジア地域原子力協力に関する調査業務 報告書”(平成 29 年)
- (10) 日本原子力学会 会長 上塚寛 “原子力研究開発と人材育成－原子力学会の現状から考える－”(第 45 回原子力委員会資料 2015 年 12 月)
- (11) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 “日本原子力研究開発機構中長期計画平成 27 年～平成 34 年” (平成 26 年)
- (12) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 “原子力人材育成センターパンフレット”(平成 29 年)
- (13) 日本原子力産業協会“原子力人材育成関係者協議会報告書”(中間報告 平成 20 年、最終報告 平成 22 年)
- (14) 日本原子力学会 “我が国における研究炉等の役割について－中間報告書－”(「原子力アゴラ」特別専門委員会 研究炉等の役割検討・提言分科会 平成 28 年)
- (15) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 “平成 29 年度研修生募集案内 RI・放射線技術者/原子力エネルギー技術者”(原子力人材育成センター 平成 28 年)
- (16) 福井県 ホームページ“平成 29 年度 主な事業一覧”  
[www.werc.or.jp/outline/soshiki/kokusai/](http://www.werc.or.jp/outline/soshiki/kokusai/)“人材育成センター
- (17) (公財) 若狭湾エネルギー研究センター “福井県国際原子力人材育成センターの取り組み実績”(平成 29 年 3 月 17 日)
- (18) EU SNETP “Nuclear Education and Training” (ETKM 2010)
- (19) IAEA “IAEA Designated International Center based on Research Reactor (ICERR) (IAEA 2014) ”
- (20) IAEA “The Role of Research Reactors in Introducing Nuclear Power”
- (21) EU ETKM, “Nuclear Education and Training” (SNETP 2010)
- (22) CEA INSTN, “6 Doctoral Level Courses In Nuclear Engineering” (INSTN Web Site)
- (23) J. Vyshinianskas “Utilization of Research Reactors for Nuclear Education and Training : Overview of Activity, (IAEA 2015)
- (24) French Atomic Energy and Alternative Energies Commission – CEA FRANCE ISIS TRAINING REACTOR: A REACTOR DEDICATED TO EDUCATION AND TRAINING FOR STUDENTS AND PROFESSIONALS (IAEA 2012)

- (25) IAEA “Nuclear Research and Development Institutes in Central and Eastern Europe”  
(IAEA 2009)
- (26) IAEA NP-T-5.3 “Applications of Research Reactors” (IAEA 2014)
- (27) 原子力人材育成ネットワーク 原子力人材の課題と今後の対応—原子力人材育成ロードマップの提案— (2015年4月20日)

## 6 共用施設の運営状況・体制の在り方

### 6.1 インフラ分野における運営体制

我が国のインフラ分野における運営体制の形態は、これまで、民営化や官民連携（PFI手法）に代表されるように“官から民”への変化の流れに呼応している。その起点は、鉄道（国鉄）、通信（電電公社）、たばこ（専売公社）の民営化（1980年代後半）にあるが、当時すでに海外、英国などにおいても抜本的な構造改革が進んでおり、世界的な潮流にあった。

国内では、その後、郵政民営化（1990年代末から2000年代）、特殊法人合理化や国立大学の独立行政法人化の一連の流れへと続くが、いずれも公的主体の社会的な位置づけや法人格の変更、組織再編といった大きな変化を伴う取り組みという特徴がある。それらを目指す法人は、民間企業の“経営”的手法を参考に、その成果の最大化を目指した合理的な法人活動や展開が求められることになる。この傾向はさらに、法人の在り方を変えるだけでなく、対象分野の事業化（プロジェクト化）や、法人の保有する資源の市場による資産の価値化や管理・活用を進め、民間企業の様々な経営手法を効果的に導入し、あるいは民間企業との役割分担を図り、成果獲得の取り組みにつなげる流れにもなっている。（図6-1）

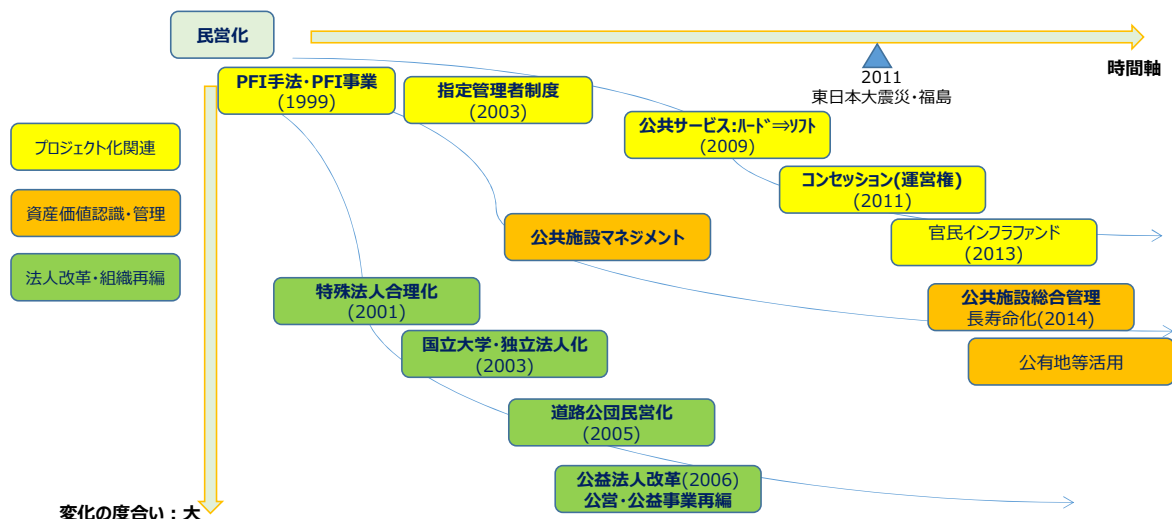


図 6-1 インフラ分野における変化の流れ

今後の研究炉整備に伴う運営体制の在り方の検討・構築に当たっては、インフラ分野における変化の流れだけでなく、さらに以下のような観点を踏まえる必要がある。

- (1) 「事業成立性」：対象事業の成果を見通すため、事業の構造化と時間軸の整理を基本
- (2) 「資産価値」：成果や資源の価値を貨幣価値換算で取り扱い、分かりやすい表現
- (3) 「運営・管理」：意思決定の仕組みや実施の体制と評価・改善、リスク管理などの体系化

これらの観点に基づき、民間企業を始め、既存の各種研究開発機関が位置づけられている主な法人形態ならびに運営の在り方や研究開発事業への取り組みの方向性に関する整理を行った。

一般社団や一般財団、国立大学法人などの法人は、いずれも法的に非営利目的と位置づけられるが、その取り組みや成果獲得の合理性を図る仕組みは、民間企業と同様の扱いである（表6-1参照）。

表 6-1 主な法人形態比較と研究開発事業適用における方向性

	株式会社 PFI 事業 SPC(特別目的会社)	合同会社 パートナー会社	一般社団法人・一般財団法人 /公益社団・公益財団	研究開発機構 /国立大学法人
根拠法 と 目的	会社法・ <b>営利</b> 営利の追求	会社法・ <b>営利</b> 営利の追求	一般社団・一般財団に関する 法律：非営利 →（公益系は認定法適用）	個別根拠法： <b>非営利</b> →研究開発法人、理化学研究所等 国立大学法人法： <b>非営利</b> →大学資産を第三者に 貸し付けが可能
研究開発 事業での 取り組み	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 研究開発の実用化を重視 ⇒研究開発の将来価値を評価</li> <li>* 研究開発段階(発注→受託)から実用化への連続性と成果の価値化</li> <li>* 産学官の共同研究をプロジェクトベースで遂行するスキーム開発（参考：海外参考事例後掲）</li> <li>* 営利要件の付与による運営の自立性や先導性を重視</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 基本フレームは株式会社形態と同一</li> <li>* コンパクトな展開が可能</li> <li>* 余剰金分配は内部で決済、地域活動にも適用可能</li> <li>* 営利目的のための運営の自立性や遂行力を重視</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 非営利性と公共性が重視され、最も多く利用されている法人形態。公的法人改革により再編</li> <li>* 研究開発の位置づけや事業性、将来性、R&amp;Dの目標設定を、新たなスキームで検討が可能</li> <li>* 運営主体のステークホルダーとの関係の構造化と、事業・PJの構造化により、事業選択肢の幅を拡げる可能性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 公的法人改革により独立行政法人化を試行錯誤により進行中。</li> <li>①研究のステップ化（基礎～実用化）により「目的・目標の明確化」の設定・判断</li> <li>②運営段階における適切な進行管理機能・能力の確保</li> <li>③運営主体のリスク管理能力と適正な役割・機能分担など、運営での最適ガバナンスの在り方から、法人フレームの運用を試行中</li> </ul>

法人改革・組織再編：民間の経営手法や体制構築を導入

プロジェクト化：目標設定とPDCA実践、成果獲得と責任明確化

資産価値活用・管理：価値認識化と活用・管理の判断・実施

## 6.2 国内事例

大型研究開発施設の共用化制度については、文部科学省において、「特定先端大型研究施設の共用の促進の制度」、「先端研究基盤共有促進事業」があり、それぞれ、以下に示す施設・機器の共同利用が実施されている。<sup>(1)</sup>

前者の共用法は、科学技術に関する試験、研究開発を行う者（研究者）による、先端大型研究施設の共用を促進し、研究の基盤強化を図り、研究機関及び研究者の相互間の交流による知識融合により、科学技術の振興に寄与することを目的に平成6年6月29日に制定された法律である。

この法律でいう「先端大型研究施設」とは、国の試験研究機関または研究を行う国立研究開発法人に重複して設置すると多額の経費を必要とする大規模な研究施設であって、先端的な科学技術分野で比類のない性能を有し、広い分野で多様な研究等に活用して、その価値が最大限に発揮されるものを指す。

この法律に従って政府は大型施設を用いた研究の支援、利用促進や共用の促進の為の必要な措置を講ずる責務を持っている。また、大型放射光施設やスーパーコンピュータ「京」等の施設設置者である理化学研究所と、J-PARCの設置者であるJAEAは、共用施設等の管理の責務を有している。

この法律では、国は、予算の範囲で、利用促進機関の業務に係わる費用の一部または全部を交付することができるとしている。この制度の対象とされる機器設備は一定以上の価格と、期待される研究成果に一定の基準を設けて運用している。

一方、「先端研究基盤促進事業」は、競争的研究費改革と連携し、研究組織のマネジメントと一体となった研究設備・機器の整備運営を行い、研究開発と共用の好循環を実現する新たな共用システムの導入を加速することを目的とした制度である。毎年公募によりテーマを決め活動している。共用装置としては、NMR、高性能顕微鏡、高速流速実験装置、臨床質量分析装置等があり、これらの枠組みを図6-2に示す。

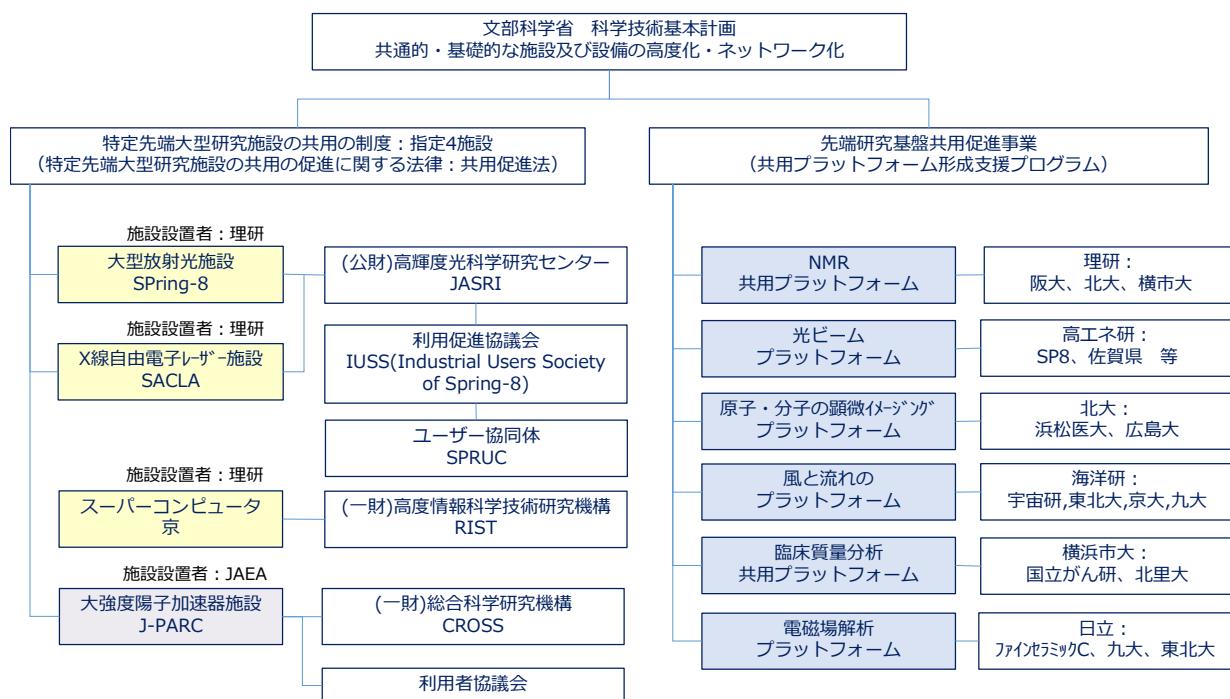


図 6-2 文部科学省 大型施設運用+プラットフォーム

### 6.2.1 大型研究実験施設共同利用 フレーム事例：SPring-8/JASRI

特定先端大型研究施設の1つである SPring-8 は、兵庫県にある大型放射光施設であり、世界最高性能の放射光を発生させ利用する施設である。(2)

SPring-8 の運営は主に (公財) 高輝度光科学研究センター (以下、「JASRI」という。) が担っている。JASRI は約 300 人の従業者からなる組織であり、理化学研究所 (以下、「理研」という。) からの委託により、SPring-8 の維持・運転・管理を担当し施設の共同利用を担っていて、JASRI 自体に研究者が在籍し研究活動も行っている。

以下、JASRI による SPring-8 の運営の概要を示す。

#### (1) 管理範囲

施設は JASRI と理研で分担して管理されており、JASRI の管理範囲は、加速器本体及び全てのビームライン (合計 48 本) の上流部分となっている。さらに、約半数 (26 本) の共用のビームラインについては、下流まで JASRI が管理している。JASRI ではビームライン毎に担当エンジニアが割り当てられている (図 6-3)。

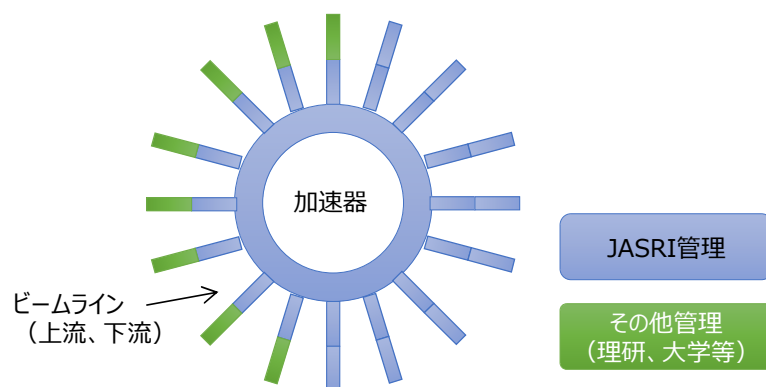


図 6-3 ビームラインの取り扱い状況

### (2) 共用ビームラインの運営

JASRI が管理する共用ビームラインは外部利用者に貸出を行っている。利用には、第 3 者機関に対して申請→審査→承認のプロセスを経る必要がある。この審査委員は任期中は非公表となっている。このような放射光施設では、海外の機関でも第 3 者機関による審査があるのが一般的であるが、施設によっては第 3 者機関と施設管理者の持ち票の配分により、実質的に施設管理者の意向が重要な意味を持つケースもある。

共用ビームラインの利用形態としては、以下に示すように、大きく「成果専有利用」と「成果非専有利用」の 2 種類がある。

成果専有利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究結果を公表しないもので、企業の利用が多い</li> <li>48 万円/8 時間+消耗品費</li> </ul>
成果非専有利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究成果を公表するもので、大学の利用等が多い</li> <li>利用料は無料だが、消耗品費は実費負担</li> </ul>

利用料は、利用者からまずは JASRI に支払が行われ、続いて利用実態に即して JASRI から理研に支払が行われる。



### (3) マネジメント体制

JASRI では、経営陣が施設運営のマネジメントを行っている。担当理事は大学や理研の研究経験のある者が行うことが慣例となっており、事業費用の獲得のため、文部科学省と理研との間の交渉を行うことが必要になる。

一方で、JASRIが実施する研究内容や、共同ビームラインの具体的なスペックについては、JASRI 在籍の研究チーム（ラボ）が主体的に設定している。研究チームごとにビームラインを担当しており、在籍する研究者が日々の研究活動の中で業界の動向情報を収集し、運営方針を作っている。これによって、新技术を志向する大学のニーズや、ユーザーの分野多様化への対応を行っている。

#### (4) 運営上の課題や問題点

最大の課題は運営が赤字となっていることである。特に、理研からの補助金がこの5～10年で1/2まで減少していることが主な要因となっている（従来の一括発注から、近年は分割発注される傾向にある）。

また、ビームラインによっては担当エンジニアが1人体制であることから、保安上の不安を感じることもあるという。

#### ⇒Spring-8・JASRIの事例研究のポイント

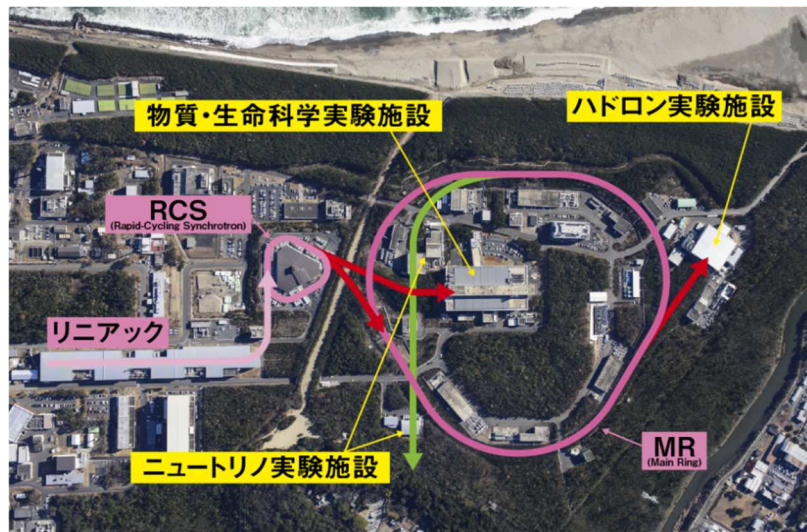
- ✓ 公共が保有する研究施設の運用では、工夫の余地は少ない。
  - 実質的に組織は運営委託費に依存しており、発注機関の意のまま
  - 共用施設がフル稼働でも赤字になる可能性
  - 共用施設の利用料金の設定等も制約がある
- ✓ 施設全体としての運用方針と、所属する研究者の運用方針の不整合

#### 6.2.2 大型研究実験施設共同利用 フレーム事例：J-PARC/CROSS

特定先端大型研究施設の1つであるJ-PARCは、JAEAと高エネルギー加速器研究機構（以下、「KEK」という。）が共同で保有、運営する、世界最高レベルのビーム出力を持つ陽子加速器施設である。<sup>(3)</sup> 3台の加速器と、二次粒子を使用する3実験施設により構成される（図6-4）。

- |                      |   |      |
|----------------------|---|------|
| ➤ リニアック……JAEA        | } | 加速器  |
| ➤ 3GeV シンクロトロン……JAEA |   |      |
| ➤ 50GeV シンクロトロン……KEK |   |      |
| ➤ 物質・生命科学実験施設……JAEA  | } | 実験施設 |
| ➤ ハドロン実験施設……KEK      |   |      |
| ➤ ニュートリノ実験施設……KEK    |   |      |





(写真提供：JAEA)

図 6-4 大強度陽子加速器施設 (J-PARC)

このうち、「物質・生命科学実験施設」が「共用促進法」の特定中性子線施設に位置付けられ、平成 23 年より (一財) 総合科学研究機構 (以下、「CROSS」という。) がビームラインの利用促進業務 (共同利用推進) を担当している。

以下では、参考事例として CROSS による共同利用推進業務について概要を示す。

### (1) 業務範囲

CROSS は、J-PARC 内の特定中性子線施設 (「物質・生命科学実験施設」) の利用者の選定、技術指導、評価等を行っている。施設の維持管理・運転は J-PARC センター/JAEA が実施しており、CROSS は担当していない。なお、事業費の 99% 以上は補助金収入である (図 6-5)。

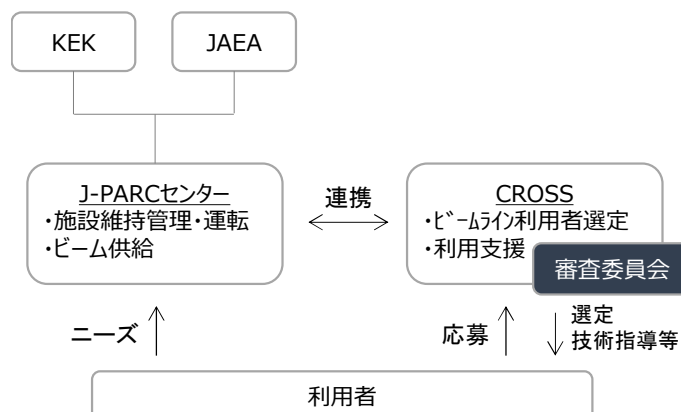


図 6-5 関係者の役割分担による利用者への提供の在り方

### (2) 利用形態<sup>(2)</sup>

施設利用者による利用形態は、「成果公開型」と「成果非公開型」の2通りあり、特徴は以下に示すとおりである。

成果公開型	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 成果を公表</li> <li>・ 利用料は無償</li> <li>・ 審査委員会による審査あり</li> </ul>
成果非公開型	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 所定の利用料金を徴収</li> <li>・ 安全性、技術的可能性の確認（委員会の審査はなし）</li> </ul>

(参考) (一財) 総合科学研究機構 HP (<http://www.cross-tokai.jp/ja/>)

## 6.3 海外事例

### 6.3.1 EU 研究開発連携の体系と体制

#### (1) 概要

- ・ 海外のプラットフォームにおける目的達成の連携の枠組みには、プログラム、プロジェクトコンソーシアム、ネットワーク、アライアンス、協同組合などの組織・体制を編成し展開している。
- ・ プログラムはプラットフォームの目標を達成するための計画（工程、戦略、参加チーム編成等）を議論する枠組みであり、プロジェクトは目標達成のため、参加者の個々のタスクの計画・実施・評価等を行う枠組みとして使われることが多い。
- ・ EU での<sup>(4)</sup>研究開発のプラットフォームとして、図 6-6 に示す枠組みがあり<sup>(5)</sup>、特徴として以下の点を挙げることができる。
  - Horizon2020：全エネルギー課題に対する研究プログラムとして位置づけられ、EFSI(欧州戦略投資基金)投資先対象の優先性も有する。
  - SNETP：企業、安全関係組織、研究機関及び学術研究機関が共同して研究開発するための3つのプログラムを設定している。
  - NUGENIA：第2、第3世代の軽水炉技術の定着を目指し国際競争力を向上させる目的で80研究機関（20か国）が参加し展開している。

#### (2) Horizon2020

- ・ 枠組みとなるプログラム（Framework Program）は2014年から2020年にかけて行う、2020年、2030年、2050年各々のエネルギー課題に挑戦する目標を研究テーマとして、イノベーションのイニシアティブの支援を狙った設定がなされている。
- ・ 「Horizon2020」はその一つであり、優先度の高いテーマとしては「優れた科学」、「企業のリーダーシップ」、「社会の挑戦」を目指している。

#### (3) SNETP

- ・ SNETP では企業、安全関係組織、研究機関、及び学術関係機関は共同して原子力の研究について、3つのプログラムとして開発に取り組む方針を示している。第2, 3, 及び第4世代と熱併給について取り上げている。
- ・ ここでは、今後 10 年間の研究開発の取り組みの優先順位をつけて示している。この結果を将来の原子力システムに反映するとともに他のエネルギー利用とのバランスも考える手立てにも使う。
- ・ 実践の戦略での優先順位は、開発の難易度を考慮し、参加メンバーの総意で決める。

#### (4) NUGENIA

- ・ NUGENIA は第2, 第3世代の軽水炉技術の定着を目指し国際競争力を向上させるため、20 か国から 80 の研究機関が参加し 8 項目のプログラムを展開している。
- ・ 企業、技術研究開発機関、学術組織や規制組織などがプラットフォームを形成し、研究開発の取り組みの促進により、最終的には企業などのエンドユーザーにとって価値あるものを創成する。
- ・ 研究テーマ
  - 1) 原子力プラントの安全性とリスク評価
  - 2) 過酷事故
  - 3) 運転性能改善
  - 4) システム、構造物、部品の健全性評価
  - 5) 燃料開発・廃棄物と使用済燃料管理・廃止措置
  - 6) 革新的軽水炉技術の設計と技術
  - 7) 社会との調和
  - 8) 供用期間中の検査、品質維持、非破壊検査の評価
    - ・ 国際組織などとの連携関係
      - ヨーロッパ原子力企業連合 (EURATOM)
      - IAEA、OECD/NEA
      - EERA (東ヨーロッパ原子力協会)
      - EPRI (電力研究所)
      - Material Aging Institute (材料劣化研究機関)
      - WNA (世界原子力協会)

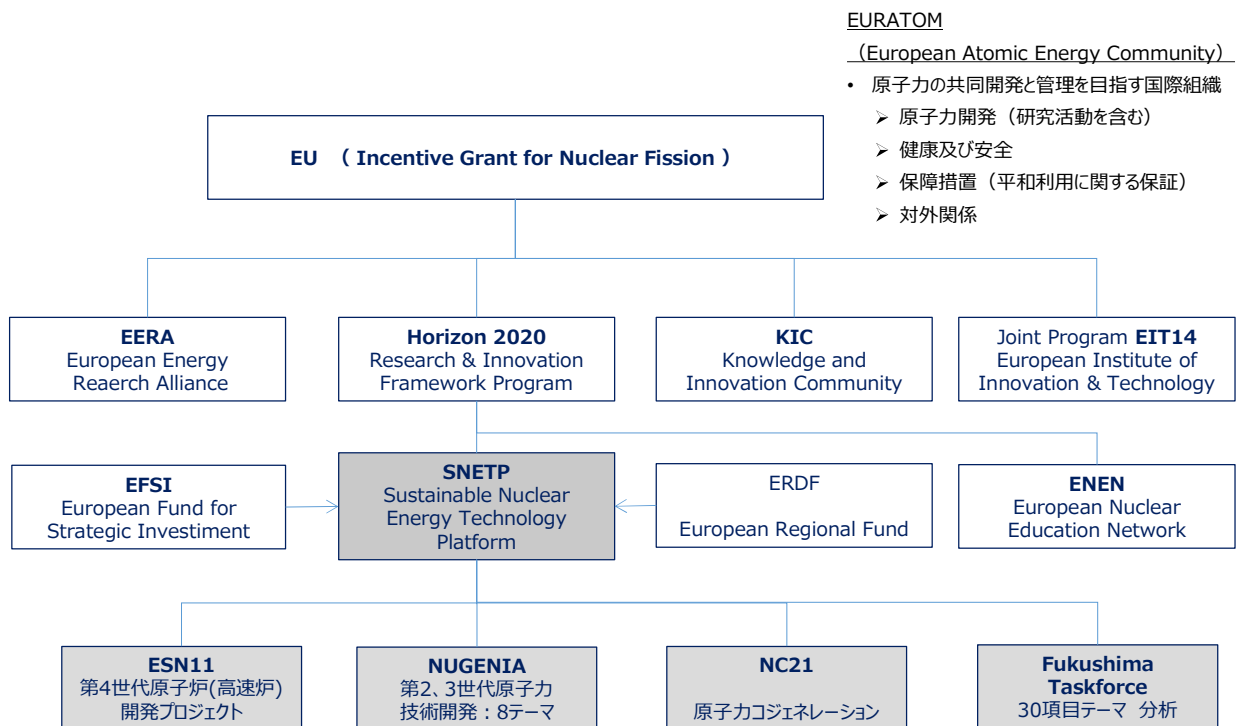


図 6-6 EU の研究開発連携の体系

### 6.3.2 EURATOM (European Atomic Energy Community)

EURATOM<sup>6)</sup>は、原子力の共同開発と管理を目指す国際組織であり、1957年にローマ条約で成立し、のちに EC に統合された。現在は EU の下に位置付けられながら、半独立機関として運営されている。EU 加盟国は EURATOM へも加盟するが、原子力利用は各国において選択可能となっている。なお、現在の加盟国は以下に示す 27 か国である。

- ドイツ、フランス、イタリア、イギリス、ベルギー、オランダ、ルクセンブルグ、デンマーク、アイルランド、ギリシャ、スペイン、ポルトガル、オーストリア、フィンランド、スウェーデン、キプロス、チェコ、エストニア、ハンガリー、ラトヴィア、リトアニア、マルタ、ポーランド、スロヴァキア、スロヴェニア、ルーマニア、ブルガリア

EURATOM の活動内容は、「原子力開発（研究活動を含む）」、「健康及び安全」、「保障措置（平和利用に関する保証）」、「対外関係」の 4 分野となっている。

EU では科学技術開発計画に相当する Framework Programmes (FP) を策定しており、その中で原子力開発に関する計画も盛り込まれている。EURATOM でも FP を推し進めるとともに、EU でも独自の FP を用意している。

EURATOM の FP の中で実行部門である JRC (Joint Research Center) は各国の研究所を統括し、それぞれの研究所の役割と分布は図 6-7 のようになっている。

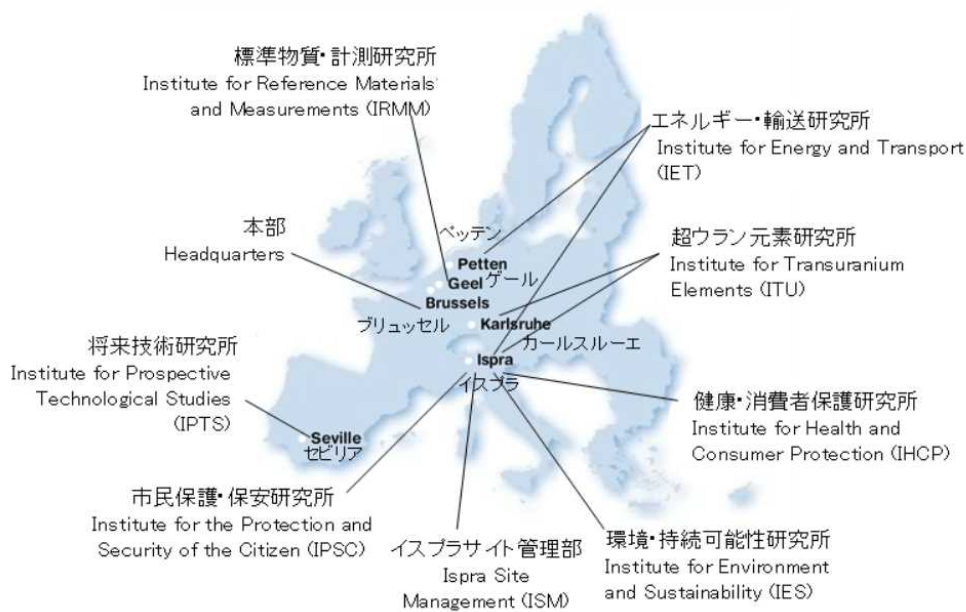


図 6-7 EURATOM、共同研究センター (JRC) の構成と立地<sup>(5)</sup>

### 6.3.3 PALLAS (オランダ)

PALLAS<sup>(6)</sup>はオランダに新設される研究炉で、完全に民間による資金調達、所有、運営、利用を目指す施設である（民間からの資金調達は法令で規定されている）。多目的の利用が可能とすることで、放射性同位元素の市場や原子力技術の研究開発において世界的に先導的なポジションを取ることを目指している。また、経済性の向上のために、収益性の高いプロダクトの選定、マーケット変化に対応できる柔軟性、初期の運転コストの低減に取り組んでいる。

PALLAS を管理する組織は、2013 年末まではオランダエネルギー研究センター (ECN) の、附属組織の一部分の NRG<sup>(7)</sup>という組織であったが、2013 年 12 月以降は独立財団に組み込まれた。

#### (1) 準備スケジュール

PALLAS の準備は 2012 年より開始された 2 つのフェーズを経て 2024 年の完成が目指されている。初めの 5 年間は第 1 フェーズという位置づけであり、8,000 万€の融資を公共セクター（国と州政府の折半）から受け、施設設計やライセンス取得を行う。また民間投資の呼び込み活動もこのフェーズから取り組んでいる。

続く第 2 フェーズは、民間資金により実施されることが想定されており、炉の建設・試験運転が行われることとなっている。

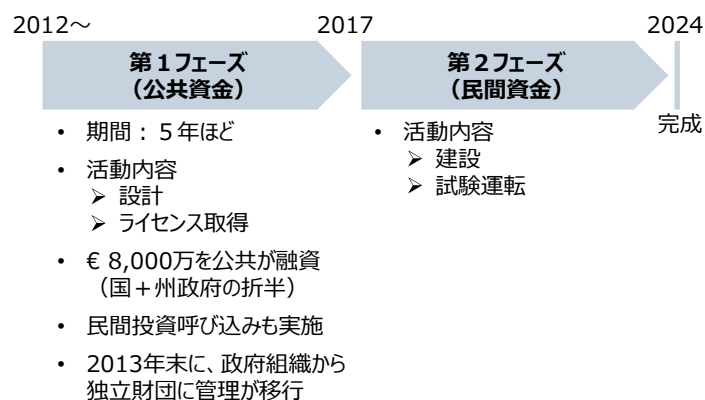


図 6-8 PALLAS 準備スケジュール

準備にあたっては、「設計&ライセンスチーム」と「ビジネスケース&ファイナンスチーム」の2チーム体制を取っており、十分な連携のもとで並行して活動を進めている。設計&ライセンスチームは、詳細設計の準備と必要なライセンスの取得が活動内容となっている。一方、ビジネスケース&ファイナンスチームは、経済的に実施可能なビジネス計画書を準備し、資金調達を行うことをミッションとしている。

#### 6.3.4 北米 原子力研究炉を活用したプラットフォーム構造と特徴<sup>(7)</sup>

##### (1) 概要

- 米国の原子力研究開発の代表的なプラットフォームは、米国エネルギー省 (DOE) が 2010 年策定の研究開発のビジョンを示した“Nuclear Energy Roadmap 2010”に沿った基本計画を実践するために数多く設立されている (図 6-9)。
- 以下の研究開発のプラットフォームが主な枠組みであり、プラットフォーム間での連携も行われている
  - 原子力に関係した大学の連携プラットフォームとして「NEUP (Nuclear Energy University Program)」
  - 研究炉を研究機関や大学、企業が有効に使う「ATR NSUF (ATR National Scientific User Facilities)」
  - 新規原子力技術の実用化の課題解決のための連携プラットフォーム IPP (Integrated Program Plan)
  - 実用化に向けて、産・官・学・規制を含めた実用を促進する、GAIN (Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear)

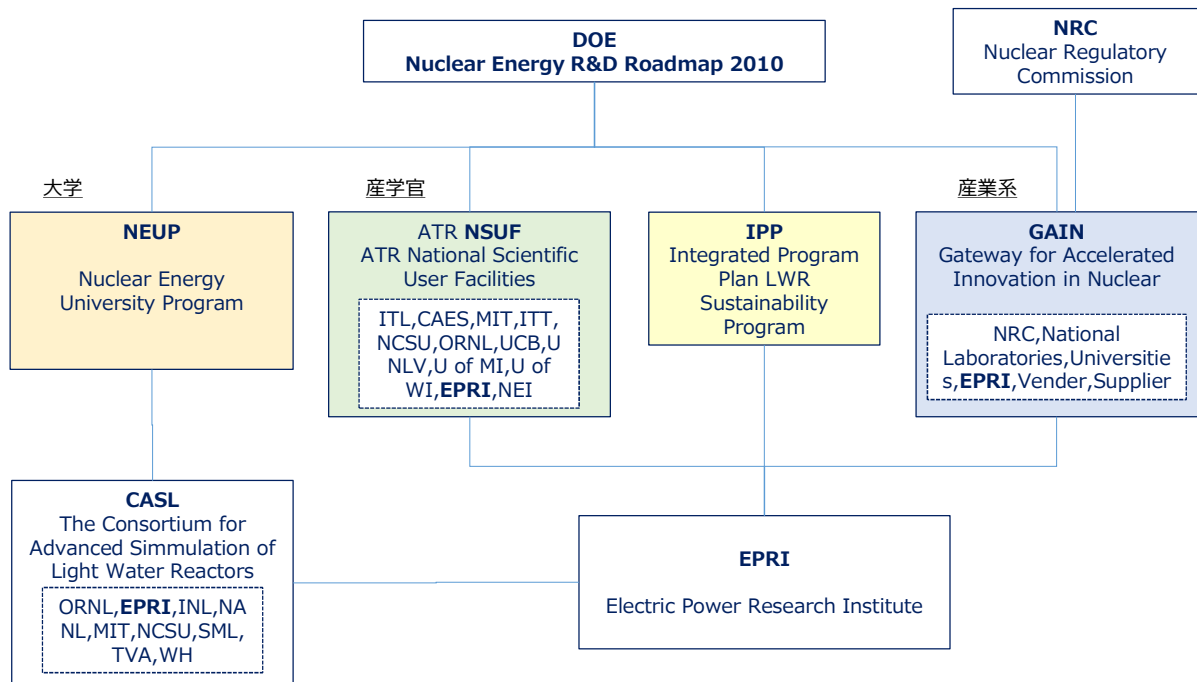


図 6-9 北米における原子力研究炉を活用したプラットフォーム構造

## (2) NEUP

- ・ NEUP の取り組みの基本は、実験と理論に基づく多種・多様なモデル構築やシミュレーション等により、工学的レベル（実用的レベル）の成果を、規制行政や産業界に反映・寄与することを目指して 2009 年設立したプラットフォームである。
- ・ 設立以来、290M\$（約 320 億円）の資金を 35 州の 89 大学に交付して、教育研究支援を展開。現在 32 の大学に約 350 億円の交付金を与え、新原子炉の概念、原子力サイバーテロ対策、新シミュレーション技術、燃料サイクル関係技術開発などを進めている。

## (3) ATR NSUF<sup>(8)</sup>

- ・ 2007 年 DOE によって設立された枠組みで、米国内の学生や研究者が世界一流の原子力施設や装置を使って高度な研究の推進を実現している。
- ・ 体制の中核はアイダホ国立研究所（INL）、CAES（Center For Advanced Study）がサブで協力し、3 国立研究所と 7 大学が参加している。
- ・ 参加組織は、研究炉、照射後試験システム、粒子加速器等を提供して共同研究に寄与する。
- ・ ショートコースも準備して企業の研究者の参加を促進している。研究テーマは、軽水炉燃料・材料の照射も多く、シミュレーションなども併用して研究効率を上げることも見据えている。

#### (4) IPP<sup>(9)</sup>

- ・ 企業の目指す持続可能性を追求するために設定した DOE のプラットフォーム。具体的には DOE-NE 「軽水炉の持続可能プログラム LWR」と EPRI 「長期間運転プログラム LTO」の統合プログラムであり、共同の研究開発計画と位置づけられている。
- ・ 主力メンバーは、DOE、米国原子力規制委員会（NRC）、EPRI、国際環境計画（UNEP）参加の大学、及び国際機関、EU の NUGENIA と連携し DOE の予算は 25MS\$、事務局は INL が担当している。

#### (5) GAIN<sup>(10)</sup>

- ・ GAIN は DOE の主に軽水炉や次世代炉の研究開発プログラム推進のために構築された組織
- ・ 基本戦略として市場が期待する原子力の先端技術を迅速でコスト効果のある開発を目指す。連携先との機能分担を見据え、DOE（グローバルな技術のリーダーを目指す）、製造企業（グローバル企業のリーダーを目指す）、電力クリーンな電力供給の最適化を目指す）などの目標設定と役割の明確化を行い戦略的に展開している。

### 6.3.5 海外（EU、北米）における運営体制及び連携のあり方・特徴

以上 EU や北米で展開されている海外研究開発における連携体制の特徴をまとめると以下ようになる。

- ・ 海外研究開発や人材育成では多くの国々や機関が、2010 年前後から合理的かつ持続可能な活動としてプラットフォームの構築を進めている。
- ・ 運用の枠組みにおいては、上位の全体戦略プラン・ビジョンに基づき目標やねらいが体系化され、各主体の位置づけや役割も明確化されている。
- ・ 実施段階では、投資家を意識したビジネスプランの策定や資金調達手法の導入といったビジネスアプローチが採用されている。
- ・ 実施プロセスや成果に関して透明性を高めるルールの設定等、**高い戦略性の確保を共通認識**としている。
- ・ プラットフォームのメンバーには海外機関（組織）などとの連携が可能な要件や条件も明確化されておりグローバル化にも対応している。
- ・ プラットフォームの中核や運営主体の多くは大型施設の管理者が特定され、**“責任の所在が明確化”**されている。
- ・

## 6.4 研究開発機能の分析

### 6.4.1 機能・構造の基本的分析

研究炉を利用した研究開発を中心とした運営体制の構築に向けて、ステークホルダー（利害関係者）具体的な機能、業務の構造や体系の整理を行う。研究開発事業の展開には、その前提



である研究炉整備に当たる「設備投資」ならびに研究炉の経常的な「資産管理」が不可欠である。これらは、さらに設計、建設、維持管理、計画修繕などの業務によって構成されており、いわゆる施設・設備（ハード）を中心とした資産の形成と維持ならびに管理業務を責務としている。

一方で、「運営」は、本業である研究開発機能の他、共同利用のための調整機能、さらに、当該分野における研究炉固有の機能である安全管理機能で構成される。いずれも詳細な個別業務に細分化されるが、研究炉施設・設備を適正に活用して研究・開発事業を行うというソフト面が大きい点に留意すべきである。

これらの設備投資、資産管理運営のおのおのについての詳細な機能を分類し、研究炉に特化してまとめたものを図 6-10 に示す。

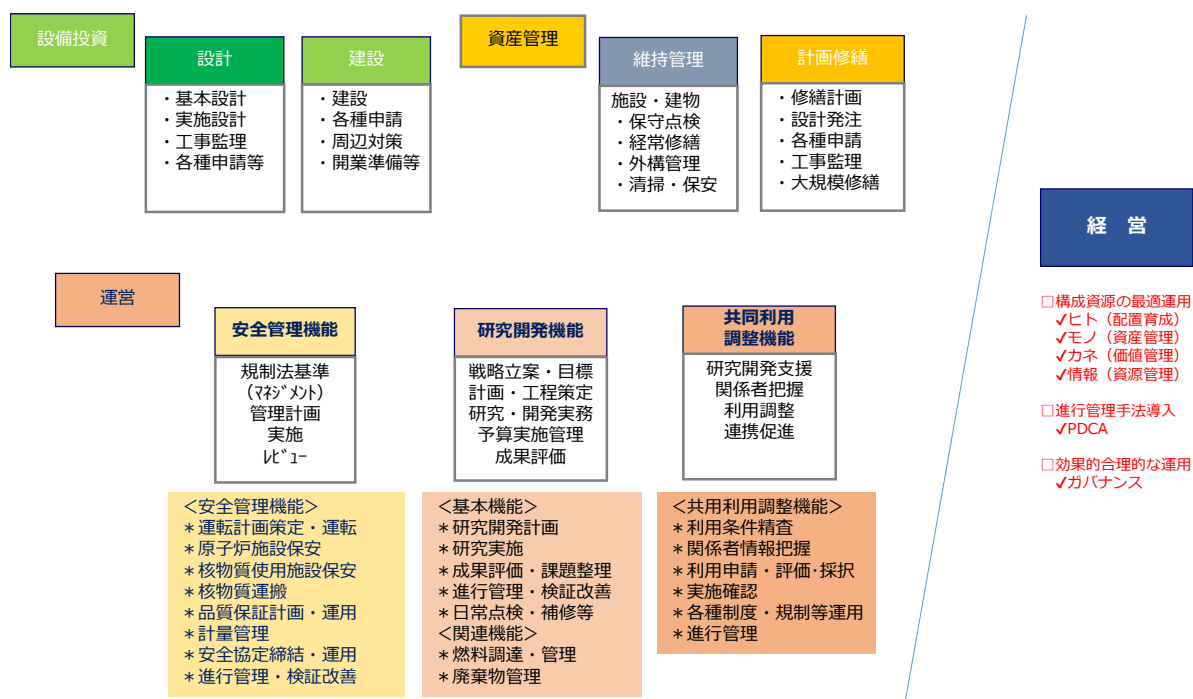


図 6-10 研究開発事業における構造分析と構成要素

#### 6.4.2 共同利用を伴う民間活力導入事例による機能・構造分析

前項での機能・構造の基本原則を基に、共同利用を伴うインフラ事業の中で、近年の傾向である官民連携分野において、民間活力導入により展開している Private Finance Initiative（以下、「PFI」という。）事業の事例を参考にして、機能や構造の分析を行う。

##### (1) 事例 A：幌延深地層処分研究計画 PFI 事業

この事例は図 6-11 に示すように、JAEA が独立行政法人化後、自らで PFI 手法の導入を図り、大規模かつ長期間にわたる実験施設の整備と維持管理を包括して民間に委ね、機構が

本業の研究開発に専念する枠組みの事例である。民間活力を積極的に導入する事業スキームとしては、初期段階の枠組みのため、業務の包括委託ではあるが、この事例以降、宇宙開発分野等、他の独立行政法人が本事業を参考に積極的な導入を図るなどの効果があがっている。

この特徴は、民間事業者は大規模な実験施設の整備と維持管理を包括で受託し、事業者役割は整備（投資）や施設維持の合理化実現に限定され、**事業リスクを負わない民活手法の基本形の代表的なものである。**

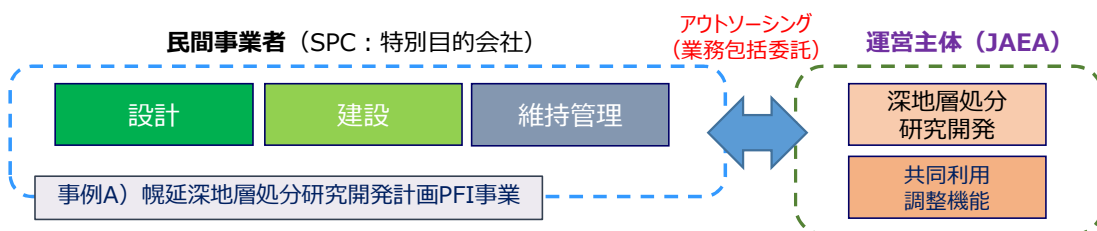


図 6-11 幌延深地層処分研究計画 PFI 事業の構造とスキーム

(2) 事例 B : 宮城県女川町震災復興（共同利用排水処理施設整備運営）PFI 事業

この事例は、図 6-12 に示すように東日本大震災の被災地の基幹産業復興を目指し、必要となる施設設備の投資だけでなく、運転から共同利用調整機能までをまとめて民間事業会社に委ねる事業である。事業経営そのものを民間企業に委ねつつ、事業投資部分や事業経営の中で公共と民間が担うべきリスクを分担するという形態であり、この場合の行政は当該事業の「投資家」と同等の立ち位置を取るという特徴、さらに民間事業者（SPC）に出資する企業において、出資割合の合理的な扱いにより、リスクの適切な分担の工夫を実現するなどの特徴を有している。民間と発注者の責務はそれぞれ以下のとおりである。

- ・ 民間事業者は復興による水産加工団地内の共同利用排水処理事業（整備・運営）全般を担う
- ・ 事業者と発注者（女川町）は震災復興・産業振興を見据えリスク分担に基づき継続性・安定性確保する**民活主導の事業経営を展開**

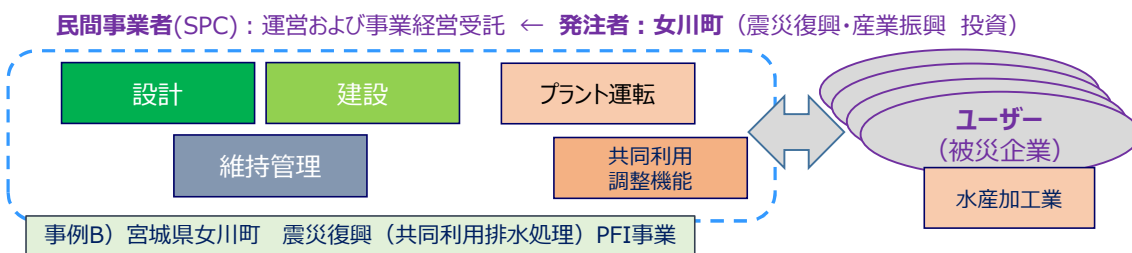


図 6-12 宮城県女川町震災復興 PFI 事業の構造とスキーム

### (3) 事例 C：滋賀県産業労働会館複合施設整備運営 PFI 事業

本事例は、図 6-13 に示すように事業投資や資産管理を概ね民間事業会社に委ね、運営の主力ならびに共同利用の調整機能を行政が担うという官民による「共同経営」する特徴がある。この場合、公共と民間が同等の経営目線で展開することが基本となるが、ハード面における事業リスクの多くを民間が負担し、ソフト・運営面での事業リスクの多くを公共が負担するという役割分担になっている。

- ・ 民間事業者は施設整備（＝資産形成）と建物所有での資産管理を中心に担う
- ・ 事業者は運営主体（滋賀県）と適切な機能・役割、リスク分担でサービスを提供する**共同での事業運営・経営**

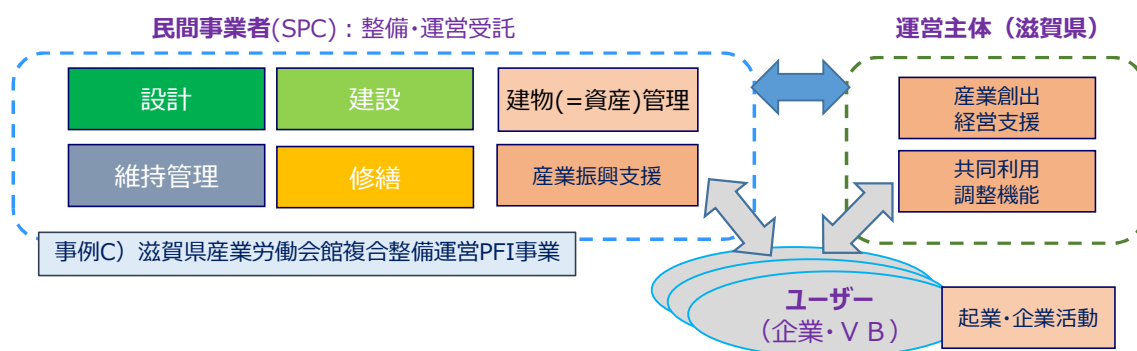


図 6-13 滋賀県産業労働会館複合施設整備運営 PFI 事業の構造とスキーム

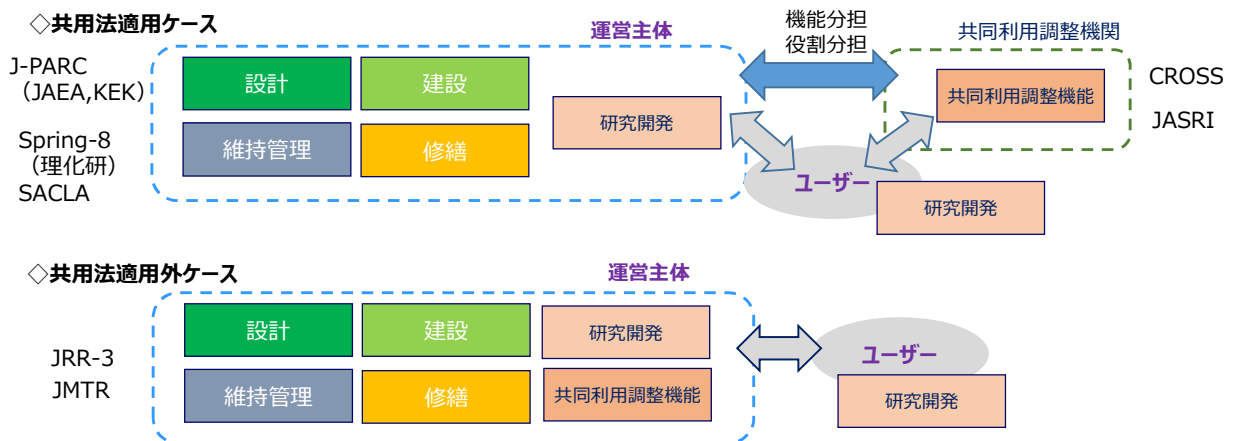
#### 6.4.3 既存研究炉における構造化と機能分析

次に、既存の研究炉における構造化と機能分析も行った。既存の研究炉では運営主体が中心となって事業展開を図り、成果獲得に向けた取り組みを進めている。共用法適法のケースでは扱っていない機能として、「安全管理機能」がある。東京電力福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、新規制基準に基づき安全管理の適切かつ確実な実現が求められるが、その安全性確保のための負担や負荷が極めて大きいことも指摘されている。

試験研究炉の運転・保持に係る法律と規定類には以下のものがある。

原子炉等規制法（運転計画、原子炉施設保安規定、核燃料物質使用保安規定、核燃料物質等所内外運搬規則、運転手引・使用手引等、品質保証計画、核物質防護規定、計量管理規定）、放射線障害防止法、原災法、消防法・労働安全衛生法・電気事業法があり、下部に要領、マニュアル類が定められている。その管理運営のためには、専門的知識と経験が必要であり、リソースの継続的維持は極めて重要である。

これらを踏まえて、共用法適用の有／無しで対比すると図 6-14 に示すようになり、これに安全管理の枠組みが加わる。



**安全管理** <今後更に重視される新たな取組み：「安全管理」の共通基盤化>

\* 新規研究炉の運営においても、“安全管理”の適切かつ着実な実現（質的な担保）が求められる。しかし、現在その役割を担っている既存実施主体にとっては、その負担・負荷が極めて大きいことに留意が必要である。

\* 今後は「安全管理」に関するノウハウ体系化や技術者の育成・充実を図るとともに、関係者への幅広い普及や実務の合理化を見据えたPDCA導入等により、その負担や負荷を軽減し、効果的に実現する重要な取組みテーマとして位置づける。即ち、持続可能な安全性担保のためグローバル・レベルの「安全管理」の共通基盤化を進めることが重要となる。

図 6-14 国内の研究炉の共同利用に関する事業構造と新たに重要となる視点

#### 6.4.4 新たな運営スキーム構築の視点

国内における研究炉の取組みの現状や、共用法による運営の現状などの分析結果を踏まえ、欧米での研究炉を中核にした運用の枠組みを参考にして新たな運営スキームや運営体制の構築に向けた視点について整理する。

共用法適用による特定大型研究施設（J-PARC や Spring-8 など）による従来の共同研究体制では、共用法の狙いである共同研究を推進する上での仕組みが構築され、活動が展開されている点では、一定の成果が出ていると言える。理想的にはこれらの枠組みに加えて、今後は欧米の研究開発プラットフォームやコンソーシアムを支えているビジョンや戦略を参考に、具体的な目標の設定や役割分担などを明確にし体系的、実効的なガバナンスの構築が必要になると考える。

一方、共用法適用外での共同研究の連携体制は、実施主体に先導的、主導的な役割が期待されることから、ほぼすべての機能を担うことになり、負担や負荷が集中する。また今後はさらに、一層の安全管理機能の充実などが要求されると想定され、法人組織としての対応力が求められる。このことは、本業の研究開発機能と、安全管理を含むその他の機能のバランスを図る意思決定メカニズムなど経営力全般の強化向上が不可欠で、抜本的なガバナンスの再構築が必須であると考えられる。

いずれにせよ、法令による制度設計の制約が有る無しにかかわらず、研究開発マネジメントに対するガバナンスの強化策を構築することが、今後の運営スキームを構築する上での中心課

題である。

このことを踏まえて、今後の研究炉の運用における連携や展開を目指した実効的な運営スキームの体制の構築に向けた検討に不可欠な視点を整理すると、図 6-15 のようになる。

この図において、共用法適用の有り・無しのそれぞれの場合について、現状の課題をそれぞれの課題解決の検討のための視点で整理した。

それぞれの視点の概要は以下の通りである。

- ① 全体ビジョン・戦略の策定と効果的な運用：運営主体・大学・ユーザなどで構成されるプラットフォーム（全体協議会）が体系的な目標設定と関係者の役割分担を明確化する。
- ② 民間経営目線に基づく運営及びガバナンスの再構築：実施主体の意思決定メカニズムや責務などのガバナンスの在り方の構築やプラン策定・PDCA 導入による具体化を図る。
- ③ 透明性の高い連携・共同利用のルール設定と効果的な運用：調整機能としての新たなプロセス、期待される成果、グローバル化を目指したルール作りと効果的な運用を行う。
- ④ 安全管理の共通基盤化：高水準の安全管理の体系化と持続可能な運用を行う。

これらの 4 つの視点から、共用法の適用・非適用の場合について検討を次節に示す。

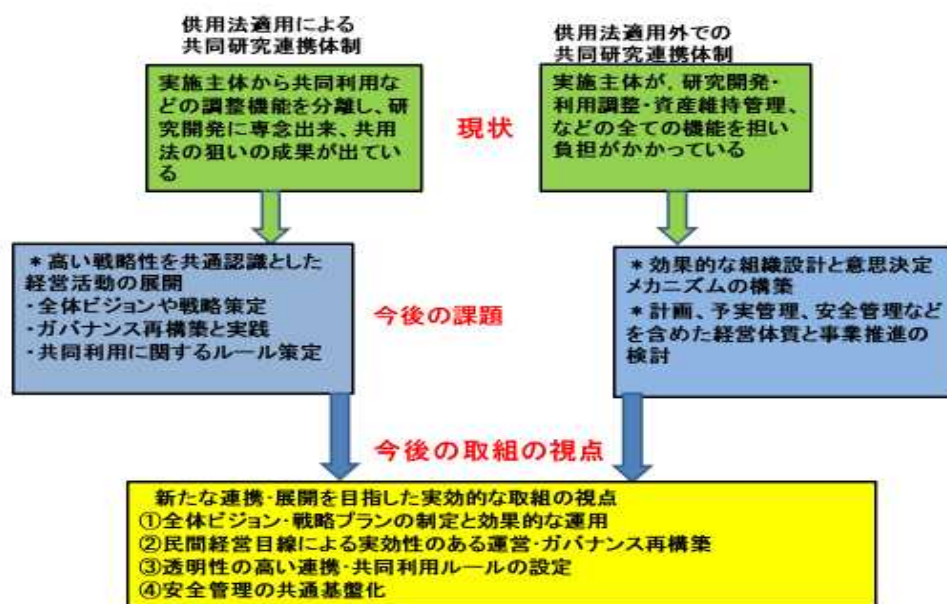


図 6-15 新たな連携・展開を目指した運営体制構築の視点

## 6.5 研究開発 運営体制構築

### 6.5.1 運営体制の基本的な枠組み

新たな連携・展開を目指し、実効的な運営体制の検討を前項で述べた4項目の視点を踏まえて、共用法の適用の有無に分けて基本的な枠組みを分析、整理した。

まず、「高い戦略性の確保」は基本的な要件であり、共用法の適用の有無には関係しない運用の大前提であることは、欧米での適用の事例と国内の実績を見れば明らかである。

さらに抽出した取り組みに関する全体の視点に対応して、運営主体や関係者の役割や機能の分担についてアプローチが必要となり、表6-2に示したような基本的な枠組みを構築することが出来る。

この枠組みの構築により、役割分担の場合の運用では、関係者全体の合意形成や連携のルール化などのガバナンスのデザインやそれに基づく運用の仕組みの検討が不可欠である。その上で、共用法適用のケースでは、共同利用調整を担う機関（組織）が前提になるため非適用に比べて関係者が多くなるという問題はあるが、参加している個別の組織は全体の在り方や展開を共通に認識した上で個別の役割や連携のルールの体系を検討する必要がある。

一方、共用法適用外のケースでは運営主体の中心的な役割と整合した組織体制の構築や運営主体の適正なガバナンスが重要であることなどに留意した更なる詳細化が要求される。

表 6-2 運営体制の基本的な枠組み

	視点① 全体ビジョンと全体プランの策定	視点② 運営及びガバナンスの再構築	視点③ 透明性のある連携や共同利用ルール	視点④ 安全管理
共用法適用	<ul style="list-style-type: none"> <li>共用法に基づくプラットフォーム構築</li> <li>組織化や役割分担の明確化</li> <li>透明性のある目標設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>全関係者によるガバナンス底上げ</li> <li>役割分担や連携体系に沿った予算確保</li> <li>民間手法による予実算管理</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>研究資源（ヒト・モノ・カネ）の重点化</li> <li>成果の公平性と透明性の確保</li> <li>民間の参加誘引</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安全管理機能を付加した組織</li> <li>管理水準の向上に向けた枠組み</li> <li>規制管理の徹底</li> </ul>
共用法適用外	<ul style="list-style-type: none"> <li>個別法に沿った組織の連携化</li> <li>実施主体による総合的ガバナンスの構築</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実施主体に全体に亘る成果の要求</li> <li>予算の最適配分への努力が要求</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>資源配分、成果の公平性、企業の参加機会などは実施主体の裁量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安全機能の構築は実施主体の責務</li> </ul>

### 6.5.2 共用法適用による運営スキーム及び運営体制の構築

共用法を適用した場合に想定されるスキームや運営体制の基本的な枠組みを、図6-16に示す。このスキームでは、運営主体、行動利用調整機関、及び研究開発を推進するユーザの間に共通認識である、全体の戦略性（視点①）や個別組織の役割分担や体系化（視点②、③、④）などのバランスの確保が最重要課題である。

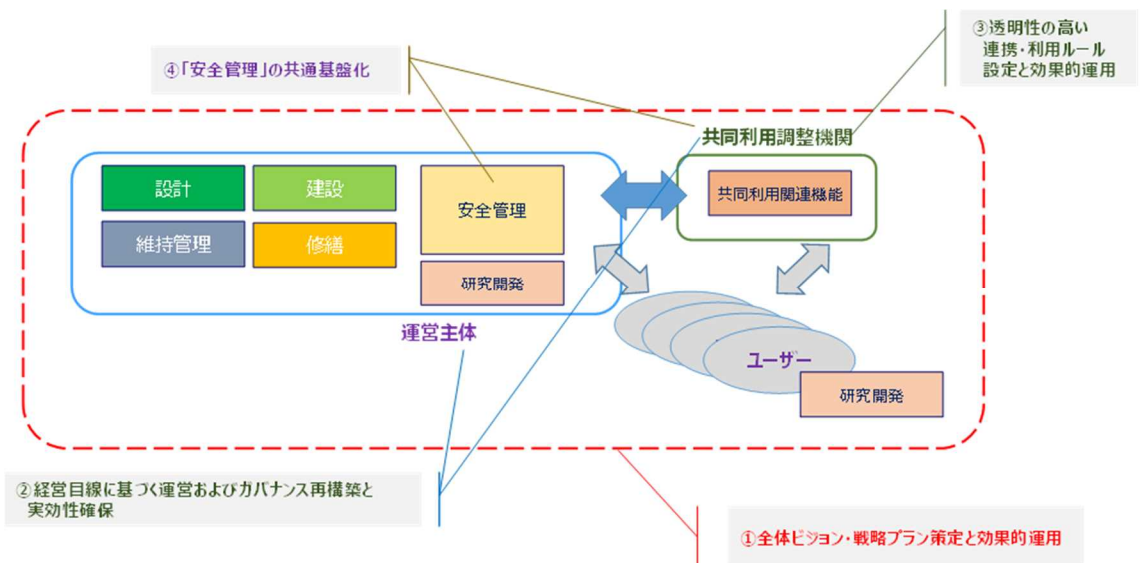


図 6-16 共用法適用での想定スキーム・運営体制の基本的枠組み

### 6.5.3 共用法適用外による運営スキーム及び運営体制の構築

共用法を適用しない場合で想定される、運営のスキーム並びに体制の基本的な枠組みを図 6-17 に示す。この場合でも視点①は運営主体とユーザをカバーしているここでは大きな差異はないが、視点②、③、④は運営主体に集中した責務の展開となっていて、関係者のバランスは大きく崩れている。

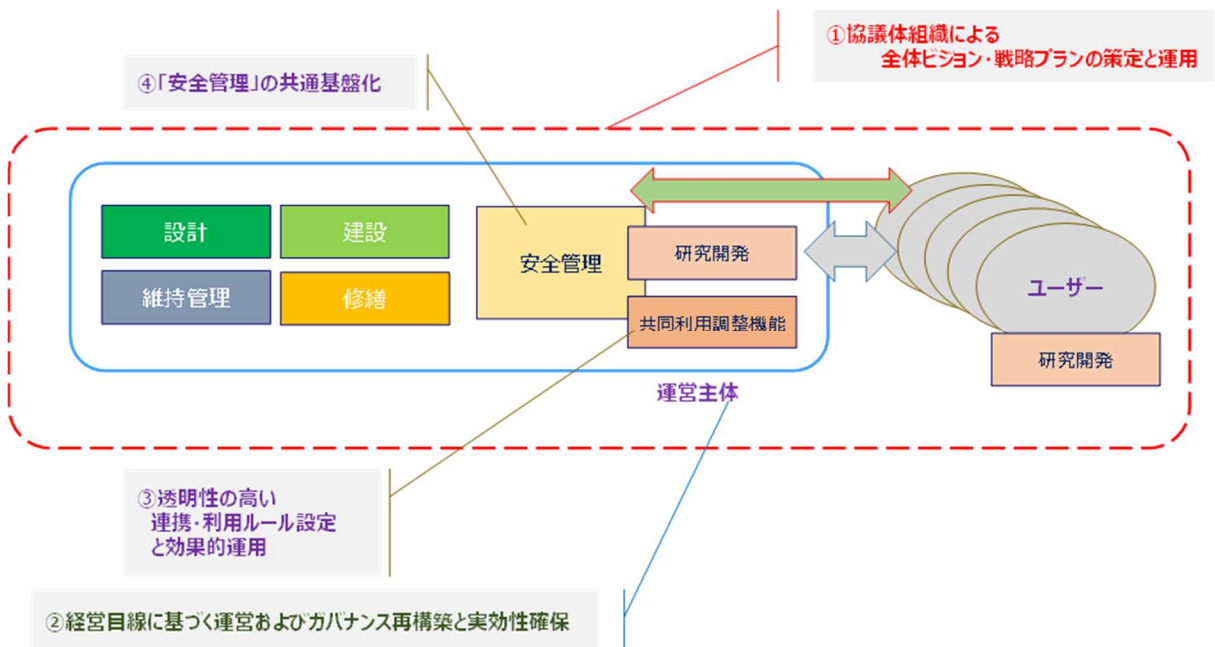


図 6-17 共用法適用外での想定スキーム・運営体制の基本的枠組み

## 6.6 共用法の適用に関する評価

以上のこのように機能や役割は共用法の適用か非適用で大きくことなるが、対象とする研究炉の規模や利用組織の性格（学術目的、産業目的など）、研究炉の利用目的、運転時間、利用の国際的な広がりなどが未定の現在では、共用法の適用の議論をこれ以上進めることは適當ではない。

今後の研究炉の概念や規模の選定と並行してこの議論をさらに詳細化する必要がある。



【参考文献】

- (1) 「特定先端大型研究施設の供用の促進に関する法律（共用法）」、科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 量子科学技術委員会 量子ビーム利用促進小委員会（第7回）：平成29年5月18日
- (2) JASRI（公財）高輝度光科学研究センター：  
[http://www.spring8.or.jp/ja/about\\_us/manage\\_structure/jasri/](http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/manage_structure/jasri/)
- (3) CROSS（一財）総合科学研究機構 中性子科学センター  
<http://www.cross.or.jp/>
- (4) ATOMICA “EURATOM”, <http://www.rist.or.jp/atomica/>
- (5) EURATOM, “Nuclear activities of the Joint Research Center Euratom Research & Training Programme”, (Oct. 2016)
- (6) D. Zekveld et al., Optimizing PALLAS Reactor Utilisation to support an Economically viable business case, RRFM Conference Proceedings 2016)
- (7) NRG Broucher 2015, “Nuclear Solutions For Health, Environment & Energy”, (2015)
- (8) NSURF, WEBSITE, “Resources for Research reactors” <https://nsuf.inl.gov>
- (9) US DOE/EPRI “Light Water Reactor Sustainability Program Integrated Program Plan”, 2013, INL/EXT-11-23452
- (10) DOE-NE Light Water Reactor Sustainability Program and EPRI Long Term Operations Program Joint Research and Development Plan 2017 DE-AC07-051D14517

## 7 試験研究炉の機能・オプション

本章においては、研究炉の機能と規模について整理するために、次のように分類した。

### ① 数 W 程度の臨界実験装置 (UTR-KIKI 相当)

教育訓練用を目的としたもので、基礎的研究も可能な実験装置

### ② 出力 100kW～500kW 程度の低出力汎用炉

冷却方式が自然対流で、原子炉システムがシンプルでかつ固有の安全性を有し、ビーム実験と簡易な炉内照射が可能な研究炉

### ③ 中出力ビーム炉 (KUR 相当)

出力が数 MW 程度で、ビーム実験を主要目的とし、簡易な炉内照射試験も可能な研究炉

### ④ 高出力ビーム炉 (JRR-3 相当)

出力が 20MW 程度で、簡易な炉内照射試験も可能であるが、③に比べビーム導入管の数が多く、かつビーム強度が大きくビーム実験の広がりが大きい研究炉

### ⑤ 高出力照射炉 (JMTR 相当)

軽水炉高経年化研究に対応するために十分な中性子束を有するとともに、照射場も大きい研究炉であり、中性子の他に応力、水環境などを制御した照射試験（複合環境下の照射試験）が可能な研究炉

## 7.1 研究炉の仕様と主要な利用

臨界実験装置、低出力汎用炉、中出力ビーム炉、高出力ビーム炉及び高出力照射炉の仕様と主な利用研究について表 7-1 に示す。

ここでは、臨界実験装置の参考例として、UTR-KINKI を記載するが、設置許可上は試験研究の用に供する低出力の原子炉（一般的にはゼロ出力炉とも言われる）に分類される。

表 7-1 臨界実験装置、低出力汎用炉、中出力及び高出力ビーム炉並びに高出力照射試験炉

	臨界実験装置 (UTR-KINKI 相当)	低出力汎用炉 (100～500kW)	中出力ビーム炉 (KUR 相当)	高出力ビーム炉 (JRR-3 相当)	高出力照射炉 (JMTR 相当)
施設構造	1 階床面に生体遮蔽タンクが設置され、その中央部に炉心がある。二分割炉心となっており、軽水を満たした二つの燃料タンクに燃料が装荷されている。	自然対流冷却が可能な構造で、固有の安全性と施設の簡素化が図られる。	炉室 1 階炉容器内に炉心が装荷される、垂直実験孔と水平実験孔を有する。水平実験孔からの中性子ビームを用いた研究が利用の主体となる。		炉心は原子炉プール内の压力容器内に設置される。原子炉とホットラボはカナルで接続される。
出力	1 W	100 kW～500 kW	5 MW	20 MW	50 MW
燃料	板状燃料				
冷却材	なし	軽水（自然対流）	軽水（強制対流）		
減速材	軽水				
実験孔	垂直実験孔	垂直/水平実験孔	垂直/水平実験孔		垂直実験孔
中性子束 (n/cm <sup>2</sup> /s)	熱 1.2×10 <sup>7</sup> 高速 1.3×10 <sup>6</sup>	熱 2.1×10 <sup>13</sup> 高速 6.0×10 <sup>12</sup>	熱 6.0×10 <sup>13</sup> 高速 6.5×10 <sup>13</sup>	熱 2.7×10 <sup>14</sup> 高速 1.4×10 <sup>14</sup>	熱 4.0×10 <sup>14</sup> 高速 4.0×10 <sup>14</sup>
運転	1 日単位	4 日/週 12 週/年	4 日/週 23 週/年	7 日/週 28 週/年	7 日/週 26 週/年
利用研究等	炉物理実験、検出器開発、生物照射、中性子ラジオグラフィ（静止画のみ）や放射化分析などの基礎研究にも活用されるが教育訓練が主体	大型炉利用研究の基礎研究として中性子照射試験や中性子ビーム利用研究に活用される。	多くの中性子ビーム孔を有し、先進的中性子散乱実験に利用される。一方、中性子ビームの質と強度の確保を優先するために、垂直実験孔を用いた燃・材料照射試験は制限される。大型のビーム炉はビーム孔の数とビーム強度で小型炉に比べて利用研究の幅が広がる。		多くの大口徑の垂直実験孔を有し、複合環境での照射試験やその場計測等、先進的な照射試験に対応できる。

臨界実験装置とビーム炉については、国内の既存炉である UTR-KINKI、KUR、JRR-3 を、照射炉については、廃止措置に移行しているものの国内の大型照射試験炉である JMTR を事例とした。低出力汎用炉については、出力 100kW～500kW で自然対流冷却が可能な汎用炉を想定した。

一般的には、臨界実験装置の場合、原子炉出力が小さいために、冷却系統が不要になる。低出力汎用炉の場合、原子炉の出力密度が小さいことから、自然対流冷却が可能となるとから固有安全性を有し、冷却系統がシンプルとなる。中出力ビーム炉、高出力ビーム炉及び高出力照射炉の場合、強制対流冷却が必要となり、関連して必要な安全機能が増えるとともに原子炉システムが複雑になる。

運転用燃料については、棒状燃料を使用しているものもあるが、一般的には発電炉に比べて出力密度が高い研究炉の場合、冷却効率の良い板状燃料を用いる。

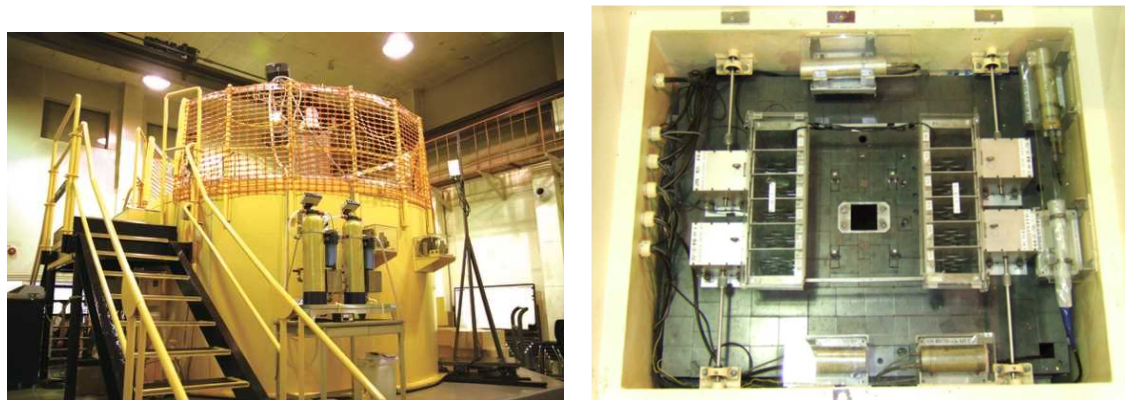
利用研究については、ビーム実験、炉内照射共に原子炉出力に依存する中性子密度に応じた研究が対象となる。

運転については、臨界実験装置の場合、1日単位の運転、低出力汎用炉及び中出力ビーム炉の場合、1週間単位の連続運転、高出力ビーム炉と高出力照射炉の場合、1ヶ月程度の長期連続運転となる。連続運転の場合、複数の運転クルーが必要となり、必要な運転員数も増える。

## 7.2 研究炉の具体例

### 7.2.1 臨界実験装置

図 7-1 に臨界実験装置 (UTR-KINKI) の全体像と炉心断面を示す<sup>(2)</sup>。



(写真提供：近畿大学)

図 7-1 UTR-KINKI

本炉は、出力が小さく冷却系統を有しないことから安全性が極めて高く、学部の学生及び大学院生の他、原子炉の運転、炉物理実験を通して、原子炉に関する基礎知識を有しない学生や中学高校の先生等を対象とした教育訓練に活用され、原子力の正しい知識と意識の普及に大きく貢献している。炉物理実験に関しては、燃料板を徐々に追加することによる臨界近接実験や、制御棒の反応度値測定、炉雑音による未臨界度測定などができる。なお、本炉は原子炉冷却

系、プール、ホットラボ等の施設が不要であるとともに、運転用燃料が半永久的に使用できることから、施設の維持管理費が合理化される。さらに1日単位の運転であることから、運転に係る人員が合理化される。

### 7.2.2 低出力汎用炉

低出力汎用炉の例として、出力 500 kW の DNRR（ベトナム）を図 7-2 に示す<sup>(3)</sup>。

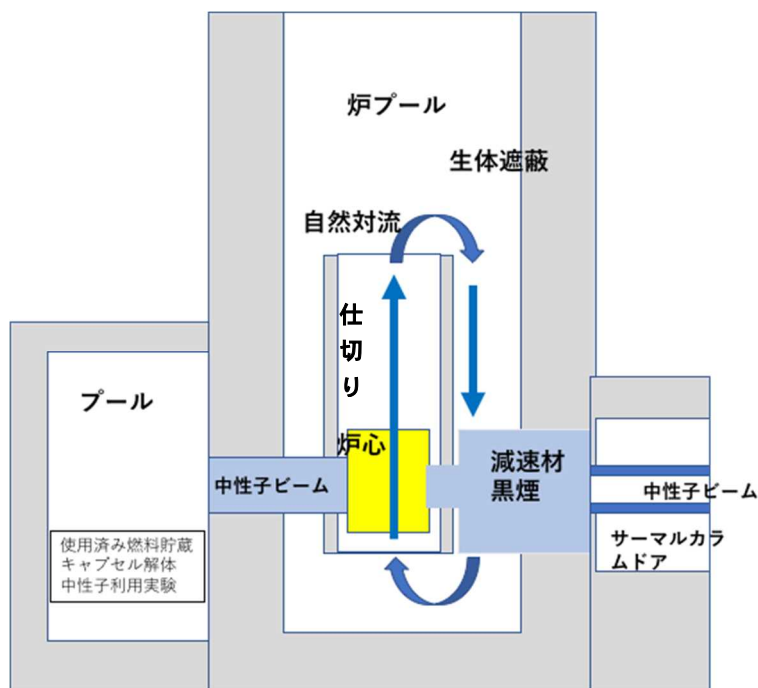


図 7-2 低出力汎用炉（DNRR）の全体像と炉心断面

本炉は、出力 500kW の自然対流冷却炉であり、中性子ラジオグラフィ、BNCT、放射化分析、RI 製造などに利用される。本炉は図 7-2 に示したように、自然対流を促すために、長尺の仕切り壁を設けられている。炉心の冷却は、自然対流であり、固有の安全性を有するとともに、1次・2次冷却系がなく施設が合理化される。また、出力が小さいことから、発生する使用済燃料が少なく、この点でも施設全体の規模が小さくなる。

水平実験孔は KUR 並みに 4 チャンネル、垂直実験孔については、炉中央の高中性子束領域の 2 孔と低中性子束領域に 40 孔を有する。

出力 100kW から 500kW の低出力汎用炉を表 7-2 に示す<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>、<sup>(6)</sup>、<sup>(7)</sup>。

表 7-2 世界の低出力汎用炉仕様と利用

施設名称	国	出力 kW	冷却方式	中性子束 (n/cm <sup>2</sup> /s)		減速/冷却材	中性子ラジオグラフィ	中性子散乱実験	放射化分析	BNCT	RI製造
				熱	高速						
DNRR	ベトナム	500	NC	2.1E13		軽水/軽水	実施	実施	実施	実施	実施
RA-6	アルゼンチン	500	FC	1.1E13	1.8E12	軽水/軽水	実施	無し	実施	実施	実施
IPR-R1	ブラジル	250	NC	4.3E12	1.5E12	軽水/軽水	実施	—	実施	—	実施
FRMZ	ドイツ	100	NC	4.2E12	4.8E12	軽水/軽水	実施	実施	実施	実施	実施
TRIGA-II	オーストリア	250	NC	1.0E13	1.7E13	軽水/軽水	実施	実施	実施	無し	無し

NC ; 自然対流 FC ; 強制対流

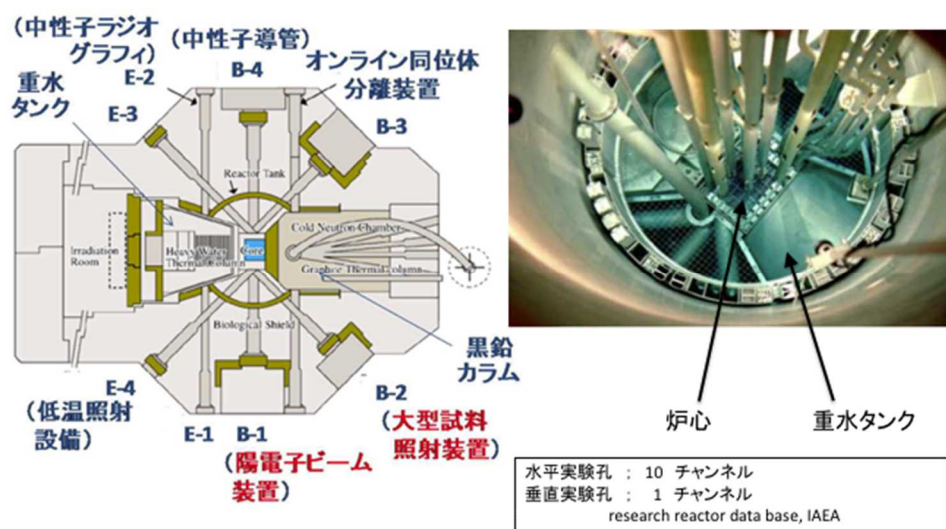
表中 RA-6 は強制対流冷却であるが、他は自然対流冷却である。自然対流冷却の原子炉は 1 次・2 次冷却系が無く、システムが簡素化されることを示す。また、出力が小さいことから、発生する使用済燃料が少なく、使用済燃料貯蔵施設が合理化される。

利用研究等に関しては、中性子ラジオグラフィ、中性子散乱実験、BNCT、RI 製造、放射化分析が可能である。放射化分析については、即発ガンマ線による分析が可能であり、数ワット程度の臨界実験装置に比べて、基礎研究から医療や産業創生の研究に大きな広がりを見せる。

運転は、108 時間連続運転と 3 週間のメンテナンスを 1 サイクルとしている。このことから、運転要員は長期連続運転を行う大型炉に比べて合理化できる。

### 7.2.3 中出力ビーム炉 (KUR 相当)

図 7-3 に KUR の水平断面を示す<sup>(8)</sup>。



(写真提供 : 京都大学)

図 7-3 低出力ビーム炉(KUR)の水平断面

KUR は、水平実験孔（中性子ビーム孔）と垂直実験孔（照射孔）を有する多目的研究炉であるが、後に述べる JRR-3 に比べて全体にコンパクトになっている。炉心構成上、垂直実験孔を用いる炉内照射試験は 2.4 項で述べたように、照射試験炉に比べて制限される。

KUR は、コンパクトな炉心部の外側に重水タンクを配置し、重水タンクで減速された中性子は、ビーム導管を通して実験設備に導かれる。炉心部には少しの垂直実験孔を有し、簡易な照射試験ができる。なお、KUR は BNCT 設備と中性子ラジオグラフィ施設を有し、医療や産業創生分野にも貢献している。重水タンクの外側には水プールが配置され、プール内での照射後試験の実施や使用済燃料の一時貯蔵が行われる。

### 7.2.4 高出力ビーム炉（JRR-3 相当）

図 7.4 に JRR-3 の炉心とビームホールを示す<sup>(9)</sup>。

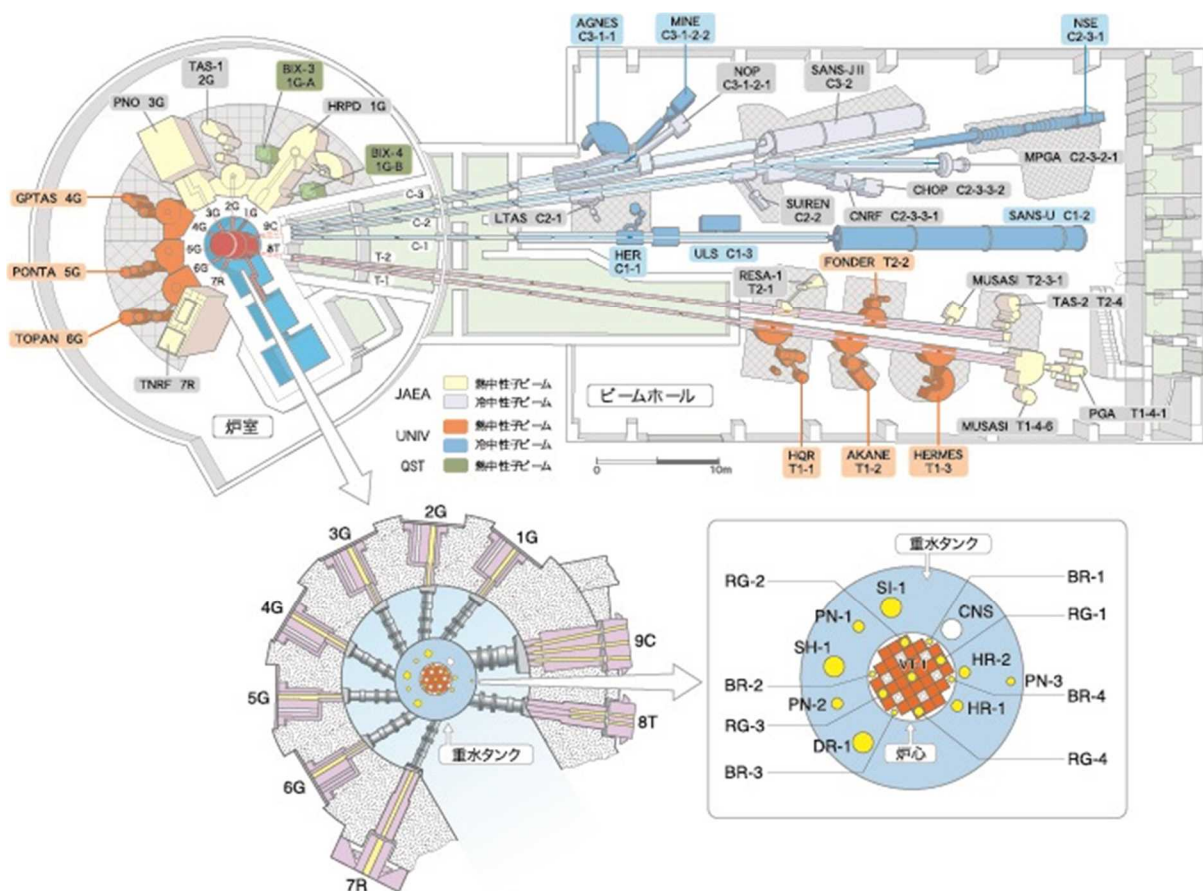


図 7-4 JRR-3 の水平断面

JRR-3 は、KUR と同様にコンパクトな炉心と重水タンク、隣接プールで構成され、原子炉出力が KUR の 5MW に対して 20MW と大きく、中性子ビーム導管が長くなることから、多くの枝管が設けられ、ビーム利用研究の質と量において、KUR を大きく凌ぎ、中性子散乱実験の中核的施設となっている。垂直実験孔は、炉心部と重水タンクに有しているが、ビームの中性

子源の質を優先するために、照射試験は制限される。水平実験孔については、数多くの実験ポートが設けられる。照射済みのキャプセルの内、短尺のものは炉頂部から移送キャスクに挿入されるが、長尺キャスクや使用済燃料は隣接されるプールに移送される。

### 7.2.5 高出力照射炉（JMTR 相当）

図 7-5 に JMTR の炉心及びホットラボ（以下、「HL」という。）を含めた全体構成を示す<sup>(10)</sup>。また、図 7-6 に JMTR の水平炉心断面を示す<sup>(10)</sup>。JMTR はタンクタイプの炉内照射試験専用炉であり、水平実験孔を有しない。垂直実験孔は、約 100 孔あるが 30 日連続運転に必要な余剰反応度を確保するためには、炉心に装荷可能なキャプセル等は約 60 体となる。

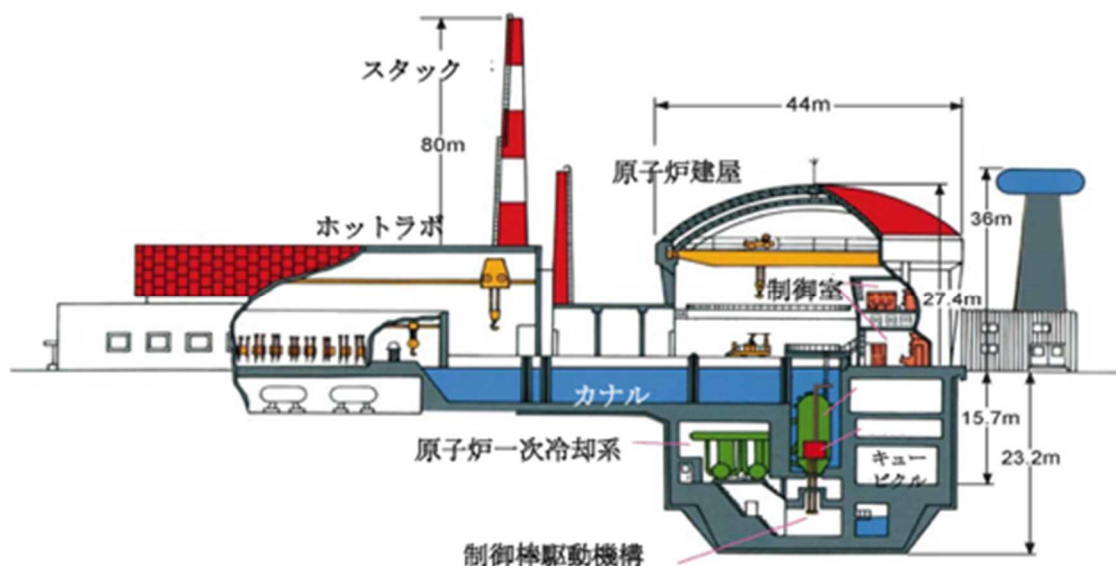


図 7-5 JMTR の原子炉とホットラボ

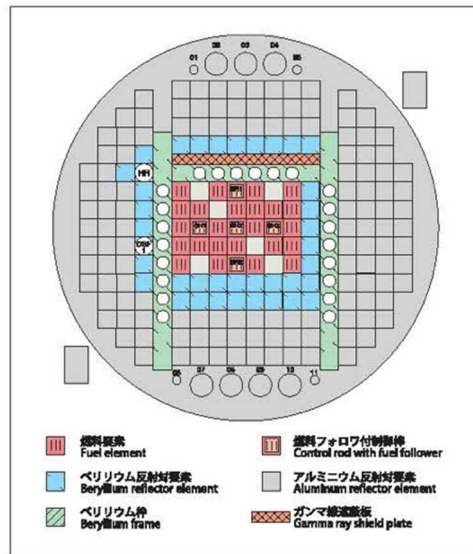


図 7-6 JMTR 水平断面

照射試験を終了した、照射装置（キャプセル）と使用済燃料（以下、「SF」という。）は、一定期間、カナルで冷却後に照射後試験のために、HLに移送する。また、SFはカナル内の貯蔵ラックに収納する。

近年の照射試験は、他の照射場（発電炉、他の研究炉、加速器等）で照射した試料をJMTRでその場試験することが重要となっている。図7-7に発電炉で照射された高燃焼度燃料に中心温度測定用熱電対の計装と再照射試験用キャプセルへの組込の手順を示す<sup>(11)</sup>。再照射キャプセルは、カナルを通して炉心に移送される。そのために、原子炉とHLがカナルで連結していることは不可欠である。なお、照射試験炉の場合、軽水炉高経年化に係る材料照射試験のために $5 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>/s程度的高速中性子束が必要条件となる。



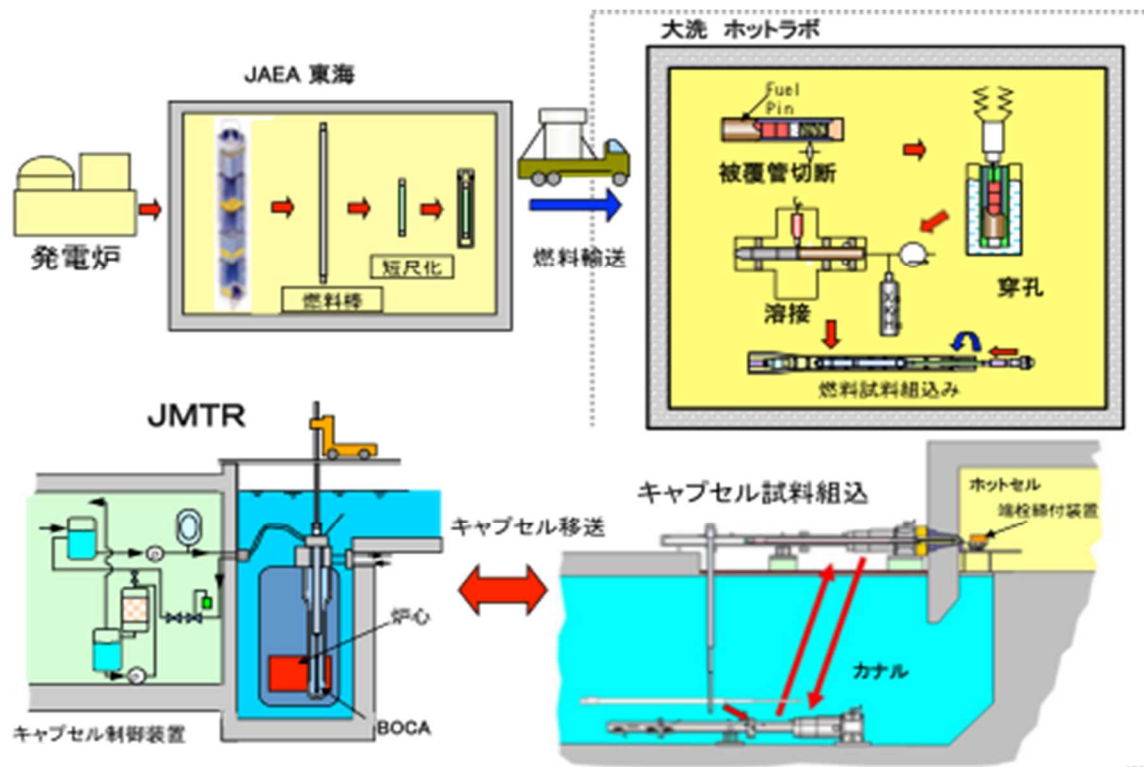
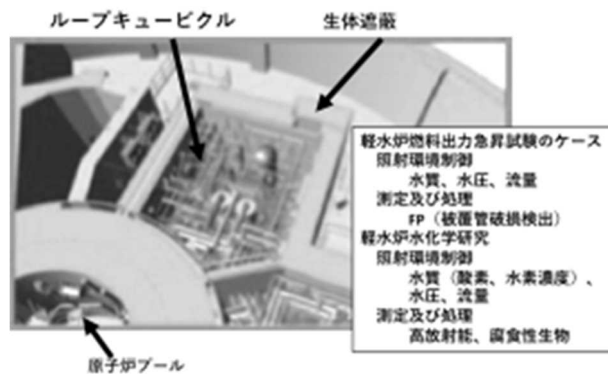


図 7-7 高燃焼度燃料への再計装と照射キャプセルへの組み込み

## 7.2.6 付属施設

### (1) ループキュービクル

近年の照射試験では、中性子照射、環境（水質、圧力）、応力等の複合環境下での照射試験、照射中の材料のクラック発生と進展測定、燃料からの FP（核分裂生成物）放出や被覆管の破損挙動を測定するその場試験主流となっている。そのために、照射環境を制御する装置（炉外装置）を収納し、炉外装置に放出される FP や高放射能腐食生成物等を取り扱う施設（ループキュービクル）が必要である。図 7-8 に JMTR のループキュービクルを示す。



(写真提供:JAEA)

図 7-8 ループキュービクル (JMTR)

## (2) 隣接プール

使用済燃料や長尺キャプセルはキャスクでの移送はできないために、原子炉プールに隣接した水プールが必要である。使用済燃料については、当プールで所定の期間冷却した後、輸送キャスクに装荷される。また、長尺キャプセルは当プールで短尺化した後、キャスクに装荷される。なお、本プールはプールサイドファシリテーターとして照射後試験等に利用される。図 7-9 に JRR-3 の隣接プールを示す<sup>(12)</sup>。

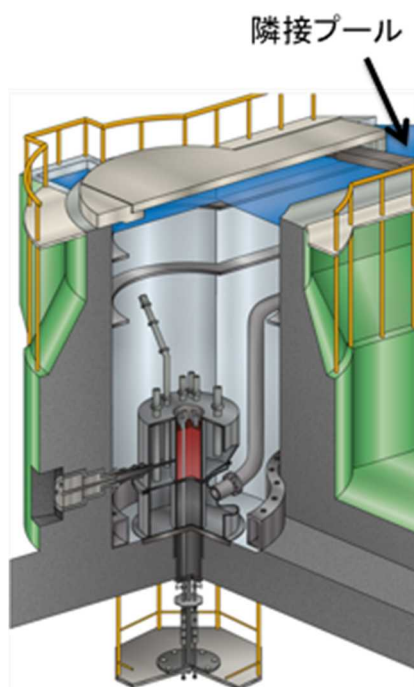


図 7-9 JRR-3 の炉プールと隣接プール

## (3) 冷却系統

大型研究炉の場合、燃料やガンマ線による材料の発熱密度が極めて高いために、照射装置（キャプセル）内での温度勾配が大きくなる。そのために、照射試験温度制御を容易にするために、ベース温度となる冷却材温度は、ほぼ 50℃ 程度に設計される。このことから、1 次冷却水の流速は大きくなる（JMTR の場合 10m/s、JRR-3 の場合 5.9m/s、KUR の場合 3.0m/s）。従って、発電炉に比べて、その出力の割に 1 次・2 次冷却系の規模が大きくなる。

## (4) ホットラボ

出力 1W 程度の低出力炉の場合、照射サンプルの放射化が小さいことから HL は不要である。低出力汎用炉や中出力炉及び高出力ビーム炉の場合、キャプセルの短尺化あるいはキャプセルからの照射試料の取出しを隣接プールで行うことによって、それらをキャスクで移送できることから、原子炉から離れた場所にある HL を活用することも可能である。高出力照射炉の場合、燃料や材料の再照射試験が重要課題となる。再照射試験は、発電炉や他の照射

場で照射した燃・材料を HL で加工、計装を施した上でキャプセルに装荷して照射試験炉で照射するものである。この場合のキャプセルは 4m を超える長尺になることから、キャスクでの移送はできないために、図 7-5 に示したように、HL と原子炉は放射線遮蔽に十分な深さを有するカナルで接続されていることが必要である。

### (5) 使用済燃料貯蔵施設

原子炉施設の場合、異常時の対応として 1 炉心分の燃料貯蔵施設が必要である。使用済燃料については、現在米国に返還することを原則としている研究炉が多いが、その場合でも輸送まで 1 年以上の冷却期間が必要である。また、米国における使用済燃料引き取り政策は、今後も長期に継続することが想定し難い状況にある。そのため、使用済燃料の処理までにサイト内に貯蔵する施設が必要である。表 7-3 に出力 1W から 50MW の研究炉で発生する使用済燃料数と必要な貯蔵施設の容量を示す。20 年分の貯蔵量は、米国における使用済燃料引き取り政策がなくなり、20 年後にはサイト外に貯蔵施設を設ける場合を想定したものである。

表 7-3 使用済燃料発生量と必要な貯蔵施設

種 類		高出力 照射炉	高出力 ビーム炉	中出力 ビーム炉	低出力炉	
例		(JMTR)	(JRR-3)	(KUR)	(UTR-KINKI)	
出 力		50 MW	20 MW	5 MW	1 W	
運 転 形 式		直運転	直運転	直運転	1日単位運転	
燃料	炉心装荷燃料数	26	32	29	12	
	発生する使用済燃料 (年間)	63	20	10	0	
	緊急避難用燃料貯蔵	26	32	29	12	
	必要な SF 貯蔵 施設 (含緊急避難)	2年後に米国に変換ケース	152	72	46	12
		20年貯蔵ケース	1286	432	226	12

原子炉出力が 1W の場合、使用済燃料の放射能が低いため、貯蔵施設に特に放射線遮蔽が必要でないが、出力が大きくなると、十分な放射線遮蔽能力を有する貯蔵施設が必要であり、通常水プールが使用される。貯蔵施設としては、隣接プールで一次貯蔵後にサイト内の別の施設に貯蔵することが考えられる。

### 7.3 建設費と運転経費

表 7-4 と図 7-10 に、計画中、建設中及び最近建設した研究炉の出力と建設費を示す<sup>(13)</sup>。低出力の研究炉の場合、冷却系統が簡素化されることと、使用済燃料貯蔵施設等の周辺施設が合理化されることで建設費が合理化される。

表 7-4 研究炉の建設費

名称	国	出力	建設時期	建設費
JRTR	ヨルダン	5 MW	2013 年建設開始	190 億円
KJRR	韓国	15 MW	計画中	290 億円
RA-10	アルゼンチン	20 MW	建設中	310 億円
PALLAS	オランダ	55 MW	計画中	810 億円
JHR	フランス	100 MW	建設中	900 億円

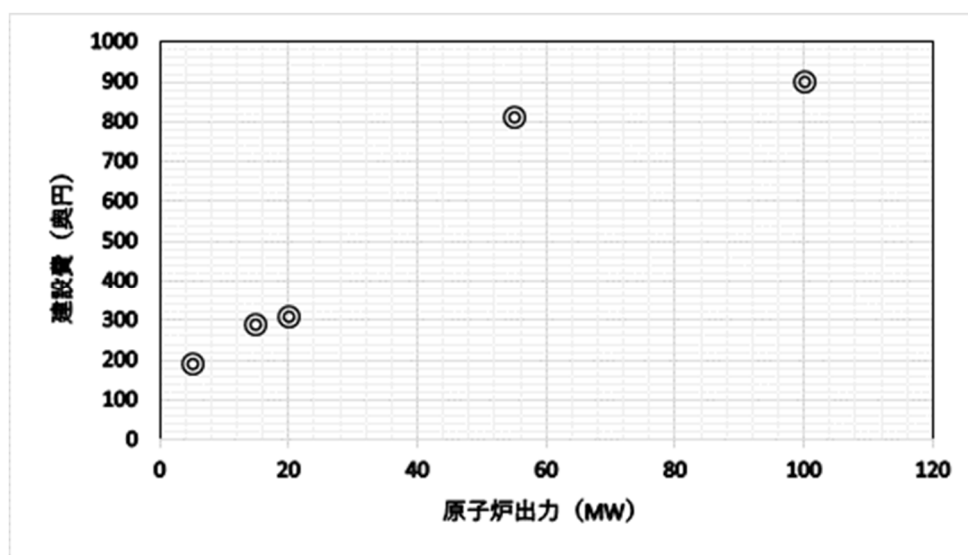


図 7-10 研究炉の出力と建設費

図 7-11 に、原子炉出力と運転維持費の関係を示す<sup>(13)</sup>。低出力の研究炉の場合、高出力炉に比べて施設が簡素化されているとともに、燃料の消費量が少なくなることで、運転維持費が合理化される。また、図 7-12 に原子炉出力と運転員数を示す<sup>(13)</sup>。低出力の研究炉の場合、高出力炉に比べて必要な運転員数が少なくなるのは、施設が簡素化されることと、運転が 1 日単位運転になるか、連続運転日数が減ることによる。

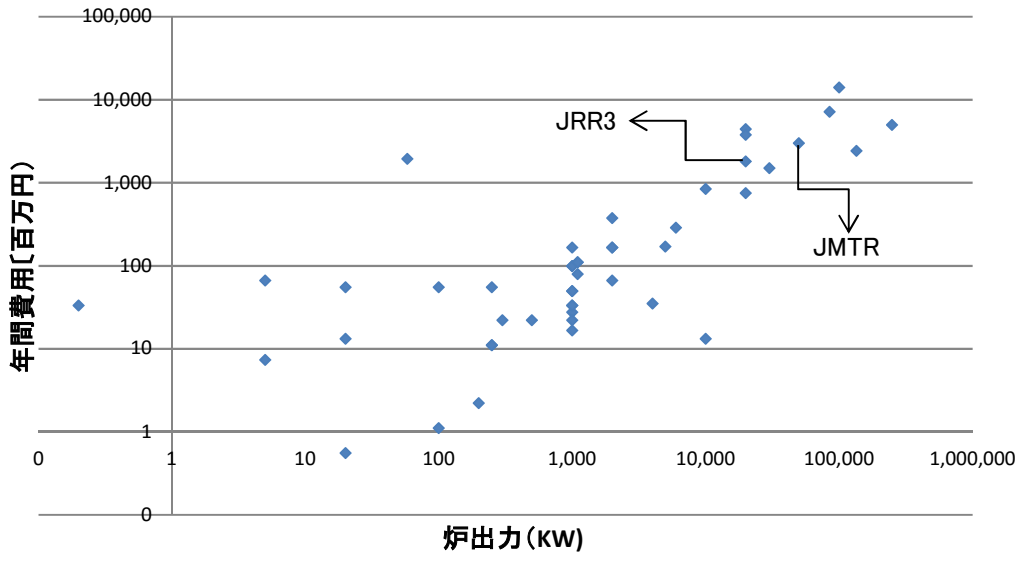


図 7-11 原子炉出力と運転維持費

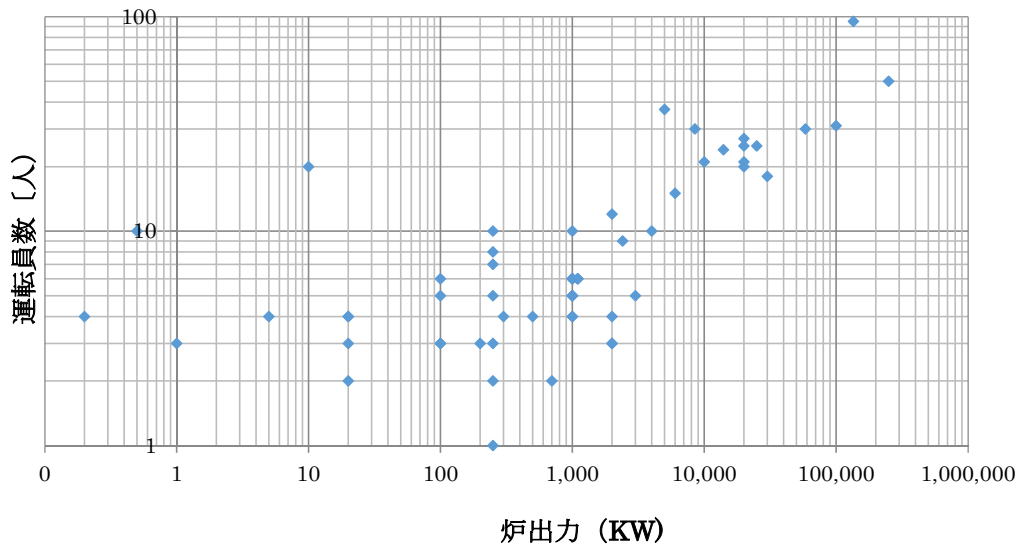


図 7-12 原子炉出力と運転員数

【参考文献】

- (1) IAEA Data Base, Research Reactor Section
- (2) 近畿大学における原子力人材育成、科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 原子力人材育成作業部会（第3回） 平成27年10月 資料
- (3) The Role of a Research Reactor in the National Nuclear Energy Programme in Vietnam, International Conference on research reactor, 14-18 November 2011
- (4) IAEA Data Base
- (5) Utilisation of Dalat Research Reactor after It's Core Conversion, Joint IGORR 2014/IAEA Technival Meeting, 17-21 November 2014
- (6) The Role of a Research Reactor in the National Nuclear Energy Programme in Vietnam : Present and Future, International Conference on "Research Reactors, 14-18 November 2011
- (7) Operation Status of DARAT Nuclear Research Reactor and Decommissioning Planning, Technical Meeting on "The Research Reactor Decommissioning Demonstration Project, 12-16 November 2007
- (8) KURの概要、京都大学原子炉実験所、2006年2月
- (9) 日本原子力研究会開発機構原子力科学研究所ホームページ
- (10) NEW JMTR、日本原子力研究開発機構
- (11) JMTR照射試験・照射後試験に関する技術レビュー、 JAEA-Review 2017-016
- (12) JRR-3、日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所
- (13) WNA Inform the Library: Country Profile

## 8 もんじゅサイトに新たに研究炉を設置する際に考慮すべき要件

### 8.1 検討に当たっての前提条件

平成 28 年 12 月 21 日に原子力関係閣僚会議が取りまとめた「もんじゅ」の取扱いに関する政府方針<sup>(1)</sup>における今後の「もんじゅ」の位置付けとして、次の 3 本柱が謳われている。

- ・ もんじゅの安全な廃止措置
- ・ もんじゅを活用した高速炉研究と実用化に向けた技術開発等の実施
- ・ 新たな試験研究炉の設置による原子力研究と人材育成

もんじゅサイトに研究炉を設置する際に考慮すべき要件を検討する場合、もんじゅサイトにおいて、上記の 3 項目の事業（プロジェクト）が相互に支障なく鼎立して進められるように、もんじゅサイトの使用・利用計画を策定し実施できるようにする必要がある。現時点での 3 項目の検討状況は、次のとおりである。

#### ① もんじゅの廃止措置計画におけるサイト使用計画

JAEA が平成 29 年 12 月 6 日に原子力規制委員会に申請した高速増殖原型炉もんじゅの原子炉施設廃止措置計画認可申請書<sup>(2)</sup>によると、廃止措置は 4 段階で行い、2047 年までの 30 年間で実施するとしている。廃止措置に伴い発生する放射性固体廃棄物は、クリアランスレベルを含め約 26,700 トンと推定している。もんじゅの廃止措置においては、これらの解体廃棄物をサイト外に搬出するまでの間の一時保管場所、ナトリウム機器の解体・処理作業場所、廃止措置に必要な資機材置場等をサイト内に確保する必要があるが、現時点ではこれらのサイト使用計画については未定である。

#### ② 高速炉研究開発拠点としての「もんじゅ」の活用計画

日本における高速炉開発の進め方については、原子力関係閣僚会議が平成 28 年 12 月 21 日に取りまとめた高速炉開発の方針<sup>(3)</sup>に従い、高速炉開発会議（議長：経済産業大臣）の戦略ワーキンググループで検討中であり、2018 年を目途に戦略ロードマップを策定するとしている。もんじゅは、ナトリウムの取扱い技術の高度化とナトリウム炉の解体技術等の技術開発の場としての活用が考えられているが、高速炉研究開発におけるもんじゅサイトの活用計画については未定である。

#### ③ ニーズ調査に基づく試験研究炉の検討状況

もんじゅの今後の取扱いに関する政府方針において、新たな試験研究炉は、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ことを目的としている。もんじゅサイトに設置する試験研究炉のスペック（炉型、出力、付加する実験装置等）は、試験研究炉の性能・機能に対するニーズ・シーズと設置場所の条件、建設・運転費等の兼ね合いで決める必要があり、現在、調査中である。

以上のように、もんじゅサイトの使用・利用に係る上記の計画等が検討中または未定な状態であるので、今年度のもんじゅサイト（周辺監視区域内）に新たに試験研究炉を設置する際に考慮すべき要件の調査・検討においては、もんじゅの廃止措置及び高速炉研究開発におけるも

もんじゅサイトの使用・利用計画等とリンクさせずに、もんじゅサイトに試験研究炉を設置する  
とした場合の考慮すべき要件、課題を全般的に検討することとした。

## 8.2 もんじゅサイトの設置場所の調査

### 8.2.1 調査の方法

もんじゅサイトに新たに試験研究用等原子炉施設（以下、研究炉施設：原子炉、実験設備等  
及び付属する施設を含む。）を設置する場合の設置場所の調査では、研究炉施設の設置可能性  
がありそうな、平坦である程度の広さがある場所として複数箇所を選定し、その場所の地勢、  
地盤状況等について、JAEA から提供された情報等を基に調査した。

### 8.2.2 もんじゅサイトの概況

高速増殖原型炉「もんじゅ」のサイトは、敦賀半島の北端部、福井県敦賀市白木の若狭湾国  
定公園内に位置する。敦賀半島はリアス海岸の若狭湾の東部に突き出た半島で、主に花崗岩の  
山地からなり、起伏の多い丘陵地である。サイトの敷地面積は約 108 万  $m^2$  あり、もんじゅの  
原子炉建屋は海側の傾斜地を掘削した標高 5m の堅固な花崗岩の岩盤上に設置し、その周りに  
原子炉補助建屋、メンテナンス・廃棄物処理建屋、タービン建屋等を配置している。この掘削  
工事で発生した約 230 万  $m^3$  の掘削土石（表層土とその下の岩盤を砕いた石）のうち、約 100  
万  $m^3$  を海岸部の埋め立てに使用し、荷揚岸壁と防波護岸を造成した。また、約 100 万  $m^3$  を山  
側の標高 60m から 150m の傾斜地に盛土し、資材置場等に使用した。残量は、サイト外の丹生  
仮設用地造成に 20 万  $m^3$ 、建屋周囲の戻し土等に 10 万  $m^3$  を使用した<sup>(4)、(5)</sup>。

その後、2013 年～2014 年に原子炉建屋背後斜面裕度向上工事として、原子炉建屋背後斜面  
の一部の表層土（約 83,000 $m^3$ ）を除去し防波護岸に盛土した<sup>(6)</sup>。もんじゅサイトの 2015 年 3  
月時点の状況を図 8-1 に示す。また、もんじゅ建設工事時のサイト状況を図 8-3(c)に示す。



(Google Earth より)

図 8-1 もんじゅサイト (2015 年 3 月時点)



### 8.2.3 調査した場所と状況

もんじゅサイト内の研究炉の設置場所として、ある程度の広さの平坦な空スペースがある場所は、図 8-2 に示す 7 か所がある。各場所の状況写真と概要を図 8-3 に示す。研究炉施設の設置場所として見た場合の各場所の状況、課題等は、以下のとおりである。

#### ① 固体廃棄物貯蔵庫前エリア、② 原子炉建屋山側倉庫エリア及び③管理棟前駐車場

①の場所は、固体廃棄物貯蔵庫とメンテナンス・廃棄物処理建屋の間の場所（約 55m<sup>L</sup>×25m<sup>W</sup>）であるが、図 8-3、図 8-7 に示すように、廃止措置で発生する固体廃棄物の移送作業等と干渉する、また研究炉施設を設置するには狭く周囲に建屋があるためスペースの拡張が難しい。

②の場所は、原子炉補助建屋と山の崖の間の場所（約 60m<sup>L</sup>×45m<sup>W</sup>）で、資材倉庫、可搬型電源車等が置かれている場所である。この場所は、図 8-3、図 8-7 に示すように、研究炉施設の必要設置スペースに比べて狭く、周囲に建物と山の崖があるためスペースの拡張が難しい。

③の場所は、管理棟の玄関前の駐車場（約 60m<sup>L</sup>×55m<sup>W</sup>）で、もんじゅ廃止措置の作業者と車が入り出す場所である。この場所は、図 8-3、図 8-7 に示すように、研究炉施設の必要設置スペースに比べて狭く、また地下にタービン復水器及び原子炉補機冷却用海水管が埋設されていることから研究炉施設の地下階基礎と干渉する可能性がある。

以上のとおり、①～③の場所は、もんじゅ建屋の直近の場所でもんじゅの廃止措置作業と干渉する可能性があり、またスペースが狭いため、研究炉施設の設置場所としては課題が多いと考えられる。



(国土地理院の地図より)

- ①固体廃棄物貯蔵庫前エリア ②原子炉補助建屋山側倉庫エリア ③管理棟前駐車場 ④荷揚岸壁  
 ⑤原子炉建屋横海岸部 ⑥山側資材置場 ⑦もんじゅ施設設置場所(廃止措置後の跡地)

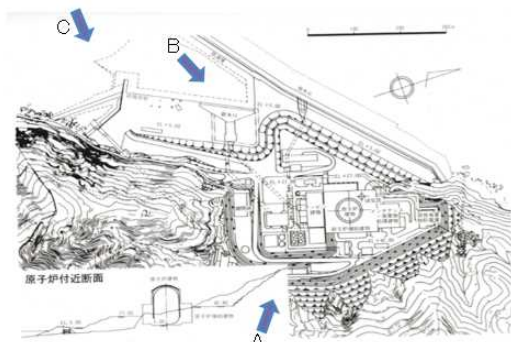
図 8-2 もんじゅサイト内の設置場所の調査位置



(a) A矢視



(b) B矢視



(d) もんじゅサイト図(動燃20年史より)



(c) C矢視(もんじゅ建設工事時)

図 8-3 もんじゅサイト内の調査場所の状況

④ 荷揚岸壁

荷揚岸壁（バース）は、水深約 6.5m の海岸部をもんじゅ原子炉建屋等の基礎の掘削土石で埋立てた長さ約 160m、幅約 90m、EL+5m の天端面（地表面）をアスファルトで覆った荷揚岸壁で、3,000 トン級の船舶が係留できる。この岸壁のうち、もんじゅの廃止措置で発生する大型解体物、使用済燃料輸送容器の搬出等の船積み作業に支障にならないように船舶が接岸する側に日本原電敦賀発電所の荷揚岸壁（長さ約 160m、幅約 40m）と同程度の広さを確保し、残りのスロープ（接近道路）側の範囲が研究炉設置場所として使用可能な場合、その設置スペースは、図 8-4 に示すように最大約 120m<sup>L</sup>×40m<sup>W</sup>となる。

荷揚岸壁の地盤は、JAEA から提供された荷揚岸壁付近の地質断面図<sup>(7)</sup>を基に作成した図 8-4 中の A-A 断面図に示すように、EL-10m にある花崗岩の岩盤（C<sub>L</sub>、C<sub>M</sub>級）上の埋立部が EL+0m の海水面まで海水に浸かっている状態である。岸壁の埋立地盤が地震時の液状化で不同沈下（不等沈下）する可能性がある場合は、地盤強化（セメントミルクで固結する等）が必要である。また、もんじゅサイトの津波評価<sup>(8)</sup>によると、地震による津波高さと同潮時の潮位を合わせた海面高さは約 EL+5.2m（再評価<sup>(9)</sup>では EL+8.8m）となっており、荷揚岸壁の天端高さの EL+5m を超えるので、海水が侵入しないように研究炉施設の設置場所の周囲に防潮堤を設置するか、盛土で嵩上げする必要がある。

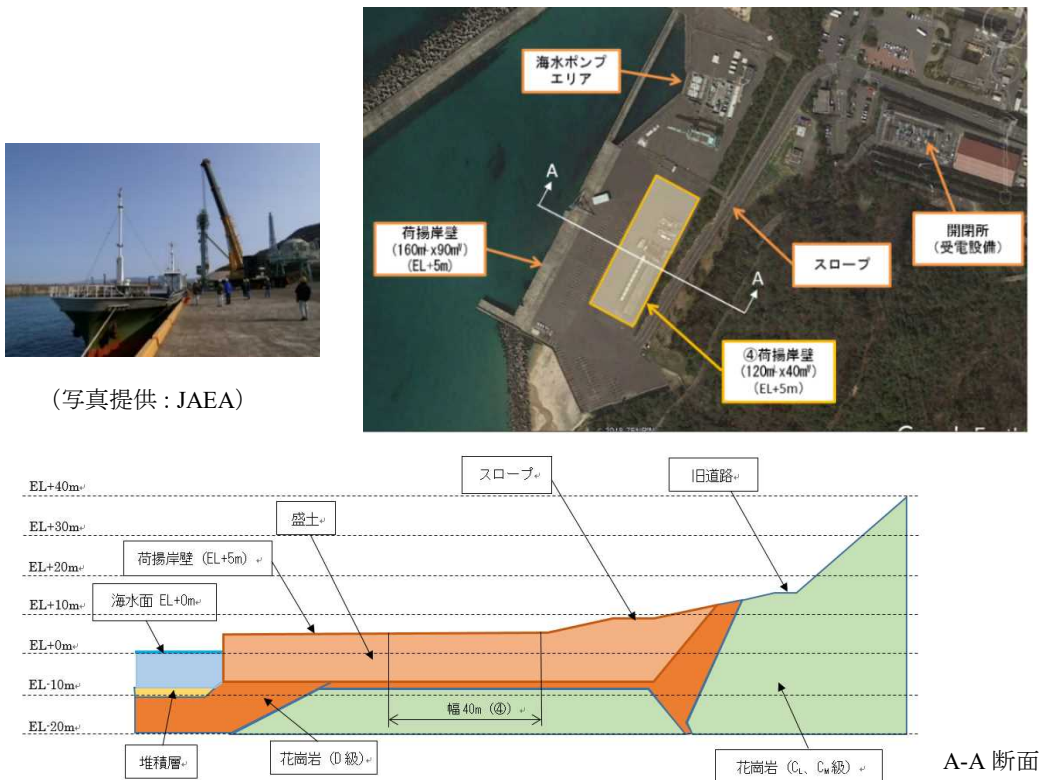


図 8-4 ④荷揚岸壁 (EL+5m)

⑤ 原子炉建屋横海岸部

原子炉建屋横の海岸部は、図 8-5 に示すように水深約 10m の海岸部をケーソン堤で囲み原子炉建屋等の基礎掘削で生じた土石で EL+5m まで埋立てた防波護岸で、前面部に消波ブロックを積み上げている。現在の防波護岸は、もんじゅ建設時に造成した防波護岸の傾斜堤の上に、2013 年～2014 年に原子炉建屋背後斜面裕度向上工事で発生した掘削土石を積み増したので、防波護岸上の平坦スペースは約 200m<sup>L</sup>×15m<sup>W</sup> である。この幅を広げるには、建設時に山側斜面に盛土した土石をこの場所に移して防波護岸前を埋め立てること等が考えられるが、かなりの工事量になる。

この防波護岸の場所は、④の荷揚岸壁と同様に海岸部の埋立地であるため、地盤の強化と防潮堤の設置等の対策が必要である。また、この場所の地盤は、図 8-5 中の B-B 断面図に示すように、EL-10m に花崗岩の岩盤 (C<sub>L</sub>、C<sub>M</sub> 級) に破碎帯があるため、研究炉施設の原子炉等が耐震重要設備 (S クラス) に該当する場合は、この破碎帯が活断層でないことの調査・確認が必要である。

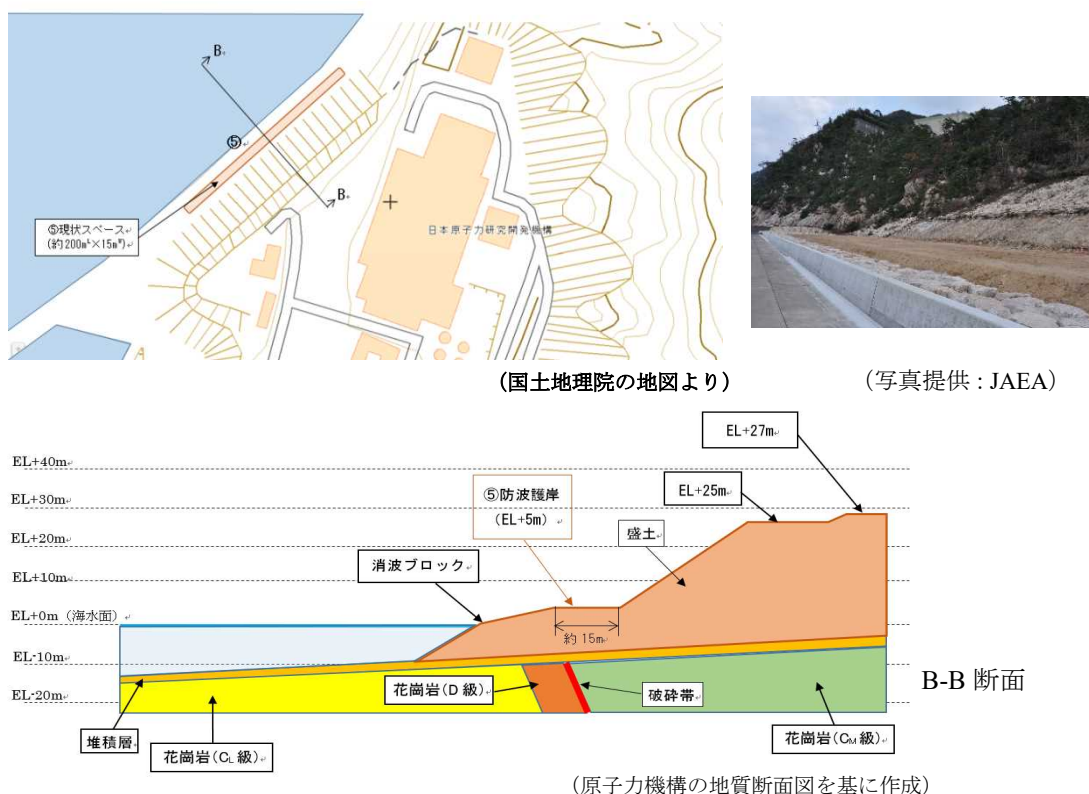


図 8-5 ⑤原子炉建屋横海岸部 (EL+5m)

⑥ 山側資材置場

山側資材置場は、もんじゅ建設時の掘削土石を山側斜面に盛土した箇所のうち、標高 132m の地点を平坦に整地し、資材置場等に使用した場所である。この場所のスペースは、図 8-6

に示すように、約 130m<sup>L</sup>×54m<sup>W</sup>あり、資材置場中央部 C-C の地質断面に示すように、花崗岩の岩盤斜面（斜度約 17 度）と堆積層の上に厚さ約 14m～27m の盛土が盛られている場所である。この場所の南北の方向（130m<sup>L</sup>）の北側端には沢があり、南側道路端は標高約 115m まで下る斜面がありその麓に建屋が建っている。また資材置場の上方（東側）斜面に、EL+150m にある ISI 建屋に通じる道路が付けられている。山側資材置場の盛土した斜面には、洪水時の斜面崩壊防止のための水抜き路が設けられている。

研究炉施設を設置する地盤は、原子炉等規制法に基づく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）<sup>(10)</sup>において、想定する地震力に対して十分な支持力を持つ安定した地盤であることが要求されている。研究炉施設の原子炉建屋等が耐震重要施設（S クラス）に相当する場合は、その施設部分を設置する場所は、盛土を除去し斜面を平坦に削った岩盤上にコンクリートマット等を築いて地震時の荷重を支持できる安定した基礎基盤とする必要がある。資材置場を広げるには、山側斜面の切土等をする必要がある。また、除去した盛土の置場の確保が必要である。

耐震重要施設でない施設（B クラス、C クラス）については、地表面から岩盤まで貫入する深さに応じた長さの鋼管杭または PHC 杭を杭打ちして建屋基礎を設置することが考えられる。この場合、盛土はもんじゅ建屋基礎を掘削した土壌と岩盤を砕いた大小の礫、石から成り、締固めが十分でない部分に隙間があると、地震時の盛土内の動きにより、打ち込んだ杭に水平力、負の摩擦力（下向きの力）が加わる可能性があるため、これらを考慮して杭基礎の設計・設置を行う必要がある。

今回の調査で JAEA から入手した地質図は、図 8-6 の C-C の 1 か所の断面図だけである。山側資材置場に研究炉施設を設置する場合は、この敷地全体の地盤について、地盤調査に関する審査ガイド<sup>(11)</sup>、<sup>(12)</sup>に従い、地盤及び盛土の地質、強度、破碎帯（活断層）の有無、地下水位等について精査し、研究炉施設の設置場所としての適性を確認・評価する必要がある。

また、山側資材置場の上方には標高 400m 以上の山がある。試験炉設置許可基準規則で要求されている周辺斜面の安定性に関して山側斜面の地質調査をし、この場所に地滑りが生じないことの確認・評価が必要である。

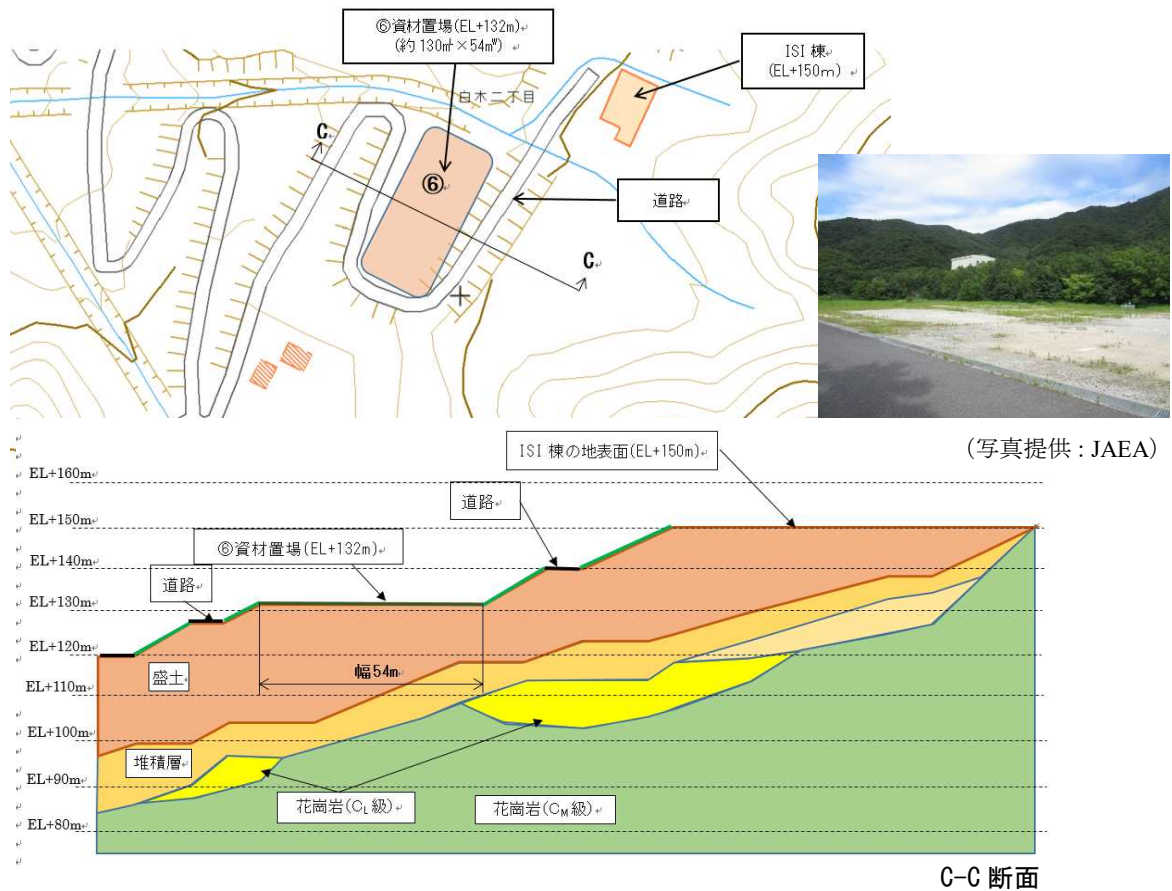


図 8-6 ⑥山側資材置場 (EL+132m)

⑦ もんじゅ施設設置場所 (廃止措置後の跡地)

現在、もんじゅの原子炉建屋等は、標高 5m～42.8m の堅固な岩盤上に設置されている。建屋基礎の岩盤に破碎帯があるが、活断層ではないと評価されている。この場所は、図 8-7 に示すように、研究炉施設を設置する場所としても十分な広さと地盤強度がある場所である。もんじゅの廃止措置計画申請書<sup>(2)</sup>によると、建屋内の設備・機器の解体撤去は第 3 段階 (廃止措置期間 I) で行い、その後、建屋の解体撤去は第 4 段階 (廃止措置期間 II) で行い、2047 年度 (30 年先) に終了するとしているが、撤去作業の工程と撤去後の場所の状態等は現時点で不明である。研究炉施設を建屋内の設備・機器撤去後のスペース又は建屋撤去跡地に設置する場合の検討には、設置可能な時期と状態、取合い条件等を明確にする必要があるが、その情報が提示される時期は、相当先になると考えられる。



図 8-7 ①、②、③及び⑦もんじゅ施設設置場所

以上、もんじゅサイト内の 7 か所の場所のうち、研究炉施設の設置場所としては、⑦もんじゅ施設建屋の廃止措置後の跡地が研究炉設置に十分な広さと強固な地盤がある場所と言える。

一方、「もんじゅ」の取扱いに関する原子力関係閣僚会議の政府方針の中で、今後の「もんじゅ」の位置付けとして「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」とされているが、国内の既設の研究炉の多くが運転停止、廃止措置に入っていく中で、これらに替わる新たな試験研究炉の早期の建設が望まれる。早期の建設を検討する場合には、その建設作業ともんじゅの廃止措置作業が干渉する可能性が高いもんじゅ建屋直近の①～③の場所に比べ、もんじゅ建屋から数百 m 離れた位置にある④または⑥のいずれかの場所を研究炉施設の設置場所として検討することが考えられる。課題としては、④荷揚岸壁は、海岸部の埋立地であることから埋立地盤の液状化、不同沈下を防ぐための地盤強化が必要であり、津波・高潮による海水の侵入を防ぐための防潮堤の設置等も必要になる。⑥山側資材置場は、山の斜面の盛土地であることから、上記に述べた地盤調査を行い、想定される地震力に対して十分な支持力を持つ安定した地盤であることの確認・評価が必要である。なお、もんじゅの廃止措置計画において、これらの場所をもんじゅの解体廃棄物の保管場所として使用する可能性がある場合は、その計画と調整する必要がある。表 8-1 に調査場所の状況と研究炉施設設置上の課題をまとめて示す。

今回の調査では、8.1 の前提条件に述べたように、もんじゅサイトに設置する研究炉施設のニーズ側からのスペック（炉出力、機能、施設と必要スペース等）は調査中であるので、選定されたスペックの研究炉施設の④または⑥の場所への設置可能性の検討は、今後行うものとする。

表 8-1 もんじゅサイトの調査場所の状況と研究炉施設設置上の課題

候補場所		スペース 海拔	設置候補場所の状況と研究炉設置上の課題	備考
①	固体廃棄物 貯蔵庫前	約 55m×25m EL+42.8m	1) 固体廃棄物貯蔵庫とメンテナンス・廃棄物処理建屋との間の場所。スペースが狭いく、周囲に建屋があり拡張は難しい。 2) もんじゅ建屋に直近の場所で、廃止措置の廃棄物の移送作業等と干渉する可能性あり。	図8-3 図8-7
②	原子炉建屋 山側倉庫	約 60m×45m EL+42.8m	1) 原子炉補助建屋と山との間の仮設倉庫が置かれている場所。スペースが狭く、拡張は難しい。 2) もんじゅ建屋に直近の場所で、廃止措置作業と干渉する可能性あり。	図8-3 図8-7
③	管理棟前駐 車場	約 60m×55m EL+21m	1) 人が常時出入りする管理棟前の駐車場で、スペースは狭い。 2) 地下に埋設されているタービン復水器と原子炉補機冷却用の海水管と干渉しないようにする必要がある。	図8-3 図8-7
④	荷揚岸壁	約 160m×90m の岸壁のう ち、約 120m×40m EL+5m	1) 水深約 10mの海岸部を、もんじゅ設置場所から掘削した土壌でEL+5mまで埋立した荷揚岸壁。 2) 埋立地のため地盤の液状化、不等沈下を防ぐ地盤改良が必要。埋立天端はEL+5mのため、津波・高潮を防ぐ防潮堤又は嵩上げが必要。	図8-4
⑤	原子炉建屋 横海岸部	約 200m×15m EL+5m	1) もんじゅ原子炉建屋横の水深約 10mの海岸部を、もんじゅ設置場所から掘削した土壌でEL+5mまで埋立した防波護岸部で、設置場所の幅が約 15mと狭い。 2) 埋立地のため、地盤の液状化、不等沈下を防ぐ地盤改良が必要。埋立天端はEL+5mのため、津波・高潮を防ぐ防潮堤又は嵩上げが必要。 3) 地下の岩盤にある破碎帯が活断層でないことの確認調査が必要。	図8-5
⑥	山側資材置 場	約 130m×54m EL+132m	1) 花崗岩(C <sub>1</sub> 級、C <sub>II</sub> 級)の岩盤上に厚さ約 7mの堆積層が被った山側の傾斜地(傾斜角約 17度)に、もんじゅ設置場所から掘削した土壌を厚さ約 14m~27mに盛土した場所。 2) 山側資材置場の山側斜面を切り土することで、スペースの拡張可能性あり。(現状約 130m×54m⇒拡張約 130m×95m) 3) 山側傾斜地の盛土地ため、研究炉施設の基礎は盛土を除去して岩盤上に設置するか、十分な支持力がある杭基礎構造にする必要がある。 4) 岩盤調査と斜面安定性の調査が必要。	図8-6
⑦	もんじゅ原 子炉施設設 置場所(廃 止措置後の 跡地)	約 300×170m EL+27m	1) 原子炉建屋等はEL+5mの強固な岩盤上にあり、スペース的には広い場所。 2) もんじゅ原子炉建屋、補助建屋等を解体撤去後に研究炉の設置が可能になるが、廃止措置終了は30年後になる。	図8-7

### 8.3 試験研究用原子炉施設の設置許可基準規則で要求されるサイト条件

もんじゅサイトに新たな試験研究炉を設置する場合、平成 25 年 7 月に施行された新規規制基準による原子炉等規制法(第 4 章第一節試験研究用等原子炉の設置、運転に関する規制)に基づく「試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則」(試験炉規則)、「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」(試験炉設置許可基準規則)と同規則の解釈、「試験研究の用に供する原子炉等の性能に係る技術基準」、試験炉設置許可規則に係る審査ガイド等の各種関係法令・基準、指針等に従い、要求機能・性能を満たす試験研究炉施設の設計、製作、据付及び運転をする必要がある。

試験炉設置許可基準規則では、設置する研究炉の型式として水冷却型研究炉、ガス冷却型原子炉及びナトリウム冷却型高速炉があり、原子炉熱出力に応じて低出力炉(500kW 未満)、中出力炉(500kW 以上~10MW 未満)及び高出力炉(10MW 以上~50MW 以下)に区分されている。もんじゅサイトに設置する研究炉の炉型と熱出力は現時点で未定であるが、研究炉施設



に対する要求機能・性能は、熱出力の区分に応じた規制条項（例えば、第 34 条 残留熱を除去することができる設備、第 40 条 多量の放射性物質等を放出する事故の拡大の防止のように、低出力炉には適用されない条項等）はあるものの、安全確保の観点からの基本的な要求は同じである。

研究炉施設が考慮すべき基準規則における研究炉施設の設備・構築物に対する設計条件として、設置場所に依存する事項（地盤、地震・津波等の外的自然条件等）とサイト条件に依存しない施設に対する設計条件・安全要求（必要機能と系統温度・圧力・荷重、等の設計条件、内部火災・溢水対策、多重・多様性、独立性等の安全要求）がある。後者は、設置するサイトに依存しないが、前者は設置するサイトによって異なる。このため、「もんじゅサイト」に新たに試験研究炉を設置する際に考慮すべき要件の項目として、前者のもんじゅサイトの特有条件（地盤、地震・津波等の外的自然条件等）について、JAEA が実施したもんじゅの頑強性評価（ストレステスト）の情報<sup>(8)</sup>、<sup>(13)</sup>を基に、試験炉設置許可基準規則の関連条項ごとに調査した。

### 8.3.1 地盤、地震及び津波、並びに外部からの衝撃による損傷の防止

2011 年 3 月に発生した東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所の事故を受けて、新たな試験炉設置許可基準規則等が制定された。研究炉施設の設置許可または設置変更許可申請に対する審査において、原子力規制委員会が特に重点をおいて詳細な審査を行う設置サイトにおける外的条件の評価項目として、次の項目がある。

第 3 条 試験研究用原子炉施設の地盤

第 4 条 地震による損傷の防止

第 5 条 津波による損傷の防止

第 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止

想定すべき項目（規則の解説に記載されている項目）：

- ① 地震と津波以外の自然現象として、洪水、風（台風）、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
- ② 人為によるもの（故意によるものを除く）として、飛来物（航空機落下等、竜巻による飛来物も含む）、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突、電磁的障害等

もんじゅサイトに新たに設置する研究炉施設は、上記の項目に対して、設置場所の条件を詳細に調査し、十分な根拠と裕度をもって施設設計・評価をし、施設の安全性を示す必要がある。今回の調査では、もんじゅサイト内の研究炉施設の設置場所の候補として、8.2.3 に述べた 7 か所を調査した。表 8-2、表 8-3、表 8-4 に、調査した 7 か所について第 3 条～第 6 条の各項目に関する設置場所の状況を示す。本調査結果による主な結果は、次のとおりである。

#### (1) 地 盤

第 3 条の地盤については、場所ごとに異なる状態であり、④荷揚岸壁と⑤原子炉建屋横海岸部は埋立地、⑥山側資材置場は盛土地であることから、安定した基礎地盤にする対策が必要で

ある。今回の調査では、JAEA から提供を受けたもんじゅサイトの地質断面図から図 8-4～図 8-6 の設置場所の断面の地盤構造を推定したが、設置場所として選定するには、原子炉施設の「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」及び「基礎地盤及び周囲斜面の安定性評価に係る審査ガイド」に示されている調査項目・方法に従って詳細な地盤調査・評価が必要である。また、⑥山側資材置場及び周辺は傾斜地であるので、斜面の安定性に関する調査・評価も行う必要がある。

## (2) 地震

第 4 条の地震については、平成 18 年 9 月に改訂された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の対応として、敦賀半島に発電所を持つ関西電力㈱、日本原子力発電㈱及び JAEA の三者が共同で調査した活断層評価結果により JAEA が策定したもんじゅサイトの開放基盤での基準地震動（760gal）を基に、もんじゅサイト内の研究炉施設の設置位置での地震力の評価が必要である。原子炉施設の設備・構築物の耐震重要度分類は、試験炉設置許可基準規則の別記において、装置等の機能喪失による公衆の放射線被ばくの程度によって S クラス（耐震重要施設：発生事故当たり 5mSv を超えるもの）、B クラス（50 $\mu$ Sv～5mSv）、及び C クラス（目安線量 50 $\mu$ Sv 以下）に分類され、各々の耐震重要度に応じて設備・機器等の設計、対策が求められる。地震時の機能喪失時の周辺公衆の放射線被ばくの評価においては、設置サイトの気象条件（風向、風速等）と周辺公衆までの距離等が関係するため、もんじゅサイトの研究炉施設設置位置での地震と気象条件、サイト周辺状況等を考慮した設計・評価が必要である。

## (3) 津波

第 5 条の津波については、もんじゅ海岸の津波と潮位を合わせた海水面高さは EL+5.2m（再評価では+8.8m）と評価されているので、地表面レベル（GL）が EL+5m にある④荷揚岸壁と⑤原子炉建屋横海岸部に研究炉施設を設置する場合は、津波防護施設・監視設備の設置が必要であり、防潮堤等を設置しまたは地表面の嵩上げをして施設内に海水が侵入しないような対策が必要である。

## (4) 外部からの衝撃による損傷の防止

第 6 条の外部からの衝撃については、もんじゅサイト内の 7 か所の条件はほぼ同じであるが、場所によって異なる条件、状況を想定する必要がある。もんじゅサイトの特有な気象条件として、積雪がある。過去の気象記録から積雪厚さとして 2m を設計評価積雪としている。研究炉施設は、地震時の荷重等とともに、この積雪荷重に耐える建屋設計が要求される。また、もんじゅサイトの気象条件（風向、風速）は、通常運転時及び事故時のもんじゅサイト周辺の公衆の被ばく線量評価に直接関係する事項になるので、排気筒の設置位置（標高等）での観測データの取得が必要である。

⑥山側資材置場は、標高 132m の斜面にあり、降水時に背後の山からの水が集まる箇所であ

るので洪水に対する評価とともに周囲の山斜面の地滑りに対する評価が必要である。

人為的な事象として、④荷揚岸壁は、3,000 トン級の船が着岸する場所であるので、船舶の荷揚岸壁へ衝突、燃料火災等の想定される事象の評価が必要である。

もんじゅサイトに設置する研究炉施設の原子炉及び付属実験設備・利用設備等の規模、機能及び設計スペックは、ニーズ・シーズ調査等に基づく試験研究、利用の目的・要求を達成することができる施設にする必要がある。その一方、新規規制基準等の関係法令で要求される安全規制、基準に適合するするものでなければならない。研究炉施設の機能・設計スペックの検討・選定に当たっては、これらの両面からの要求条件、及びもんじゅサイトの立地条件等を考慮し、最適な設計をする必要がある。また、試験研究炉については、その出力規模と事故時の周辺環境への影響の程度（5mSv を超えない場合）によって規制の程度を変えるグレーデッドアプローチも検討されていることから、この適用性についても調査・検討が必要である。

表 8-2 試験炉設置許可基準規則で要求されるもんじゅサイト設置場所の立地条件  
(地盤・地質、地震及び津波)

立地条件*		地盤・地震及び津波**		
		地盤・地質	地震	津波
①	固体廃棄物貯蔵庫前	原子炉建屋北側斜面を EL+42.5m まで掘削した地盤。	もんじゅの耐性テスト(頑強性評価)で評価した基準地震動 $S_s$ は、760gal。この地震動は、新耐震設計審査指針に対応して JAEA、関電、原電の三者が協同で検討した地震動評価をベースに、もんじゅサイトの地震動を見直したもの。新規基準に適合するものとして承認された値ではないので、見直しの可能性あり。研究炉の設置に際しては、設置場所・敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造の調査をし、研究炉の耐震重要施設の耐震性を評価する必要がある。 (耐震 S クラスの施設:安全機能の喪失による周辺公衆の実効線量が事故当たり 5mSv を超える施設及び津波防護施設)	もんじゅの耐性テストで評価した津波高さ+高潮の海水面高さは、EL+5.2m (再評価では EL+8.8m)。 (この耐性テスト時の値は、新規基準に適合するものとして承認された値ではないので、見直しの可能性あり。以下の項目も同じ) ①～③は EL+21m～42.5mにあるので、津波は達しない。 ④は、EL+5mにある。津波と高潮が敷地内に流入しないように防潮堤が必要。 ④と同じ。 ⑥は、EL+132mにあるので、津波は達しない。
②	原子炉建屋山側倉庫	原子炉建屋山側(東側)斜面を掘削し、EL+42.5m まで埋戻した地盤。EL+5mの花崗岩層に破碎帯があるが活断層なし。		
③	管理棟前駐車場	原子炉建屋山南東側を掘削し、EL+21m まで埋戻した地盤。地下にタービン復水器循環水管、補機冷却海水配管が敷設。		
④	荷揚岸壁	海岸部を EL-6m～+5m まで埋立てした盛土の地盤。EL 約-10m に花崗岩層あり。		
⑤	原子炉建屋横海岸部	海岸部を EL-10m～+5m まで埋立てし、EL 約+25m まで防波護岸を設置。防波護岸部地下の花崗岩層に破碎帯あり。破碎帯が活断層でないことの調査が必要。		
⑥	山側資材置場	勾配約 0.22 の斜面に、厚さ約 14～27m の盛土をした地盤。耐震重要施設(原子炉等)は、盛土と堆積層を除去した岩盤上の基礎基盤に設置する必要あり。設置位置の地質調査要。		
⑦	もんじゅ原子炉施設設置場所(跡地)	①、②と同じ。		

\*もんじゅの立地条件は「現状のプラント状態におけるもんじゅの安全性について」(JAEA, 平成 29 年 7 月)及び「事故等に係る説明事項

及び大規模損壊事故への対応について」(JAEA, 平成 29 年 10 月)

\*\*試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則の第 3 条、4 条、5 条の項目

表 8-3 試験炉設置許可基準規則で要求されるもんじゅサイト設置場所の立地条件  
(外部からの衝撃による損傷防止：自然現象)

立地条件 候補場所		外部からの衝撃による損傷防止（自然現象）***		
		洪水	風（台風）・竜巻	凍結・降水・積雪・落雷等
①	固体廃棄物貯蔵庫前	もんじゅサイト周囲に洪水をもたらす可能性のある大きな川、湖、ダムはない。	もんじゅの耐性テストでは竜巻はF3クラスの100m/sを想定。台風等の風速はこの値内とし、耐風性を評価。竜巻による飛来物飛散も評価。	もんじゅの耐性テストにおいて、降水強度は230mm/hを想定。積雪量は2mを想定。山側からの流水及び地下水は、排水路を通して海に放流。
②	原子炉建屋山側倉庫			
③	管理棟前駐車場			
④	荷揚岸壁	①～③と同じ。 ④の地表面はE+5mで、防潮堤が必要、また研究炉建屋地下階が海面より下になる場合は浸水対策が必要。	①～③と同じ。	①～③と同じ。 ④は海に面しているため塩害対策が必要。
⑤	原子炉建屋横海岸部	④と同じ。	①～③と同じ。	①～③と同じ。 ⑤は海に面しているため塩害対策が必要。
⑥	山側資材置場	①～③と同じ。	⑥は、EL+132mの山の斜面。研究炉を設置する場合は、地形による風速への影響を入れて耐風性を評価。	①～③と同じ。
⑦	もんじゅ原子炉施設設置場所（跡地）	①～③と同じ。	①～⑤と同じ。	①～③と同じ。

\*\*\* 試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則の第6条第1項の項目

表 8-3 試験炉設置許可基準規則で要求されるもんじゅサイト設置場所の立地条件  
(外部からの衝撃による損傷防止：自然現象) (続き)

立地条件 候補場所		外部からの衝撃による損傷防止（自然現象）***				備考
		地滑り	火山	生物学的影響	森林火災等	
①	固体廃棄物貯蔵庫前	①～③は、もんじゅ施設の周辺の場所。もんじゅの耐震新基準対応時にもんじゅの山側の山崩れの可能性がある箇所を削り取り済み。	もんじゅの耐性テストにおいて、半径160km内に直接的影響を与える活火山はない。火山灰の堆積量は10cmを想定。研究炉を設置する場合は、同様な条件で評価。研究炉の最終ヒートシンクは、冷却塔からの大気への熱放出。いかなる場合も、この機能が損なわれないようにす	もんじゅの耐性テストでは評価なし。研究炉では、海水による冷却なし。クラゲによる海水取水支障等の影響なし。	もんじゅでは、周辺の森林火災から施設への延焼を防止する消火設備を設置済み。研究炉を設置する場合も周辺の森林火災からの延焼を防止する防火帯、消火設備等を設置する必要あり。	中出力炉及び高出力炉については、設計基準事故より発生頻度が低い事故で、自然現象等の共通要因となる外部事象等による事故において、公衆の放射線被ばく線量が5mSv/回を超える
②	原子炉建屋山側倉庫					
③	管理棟前駐車場					
④	荷揚岸壁	④の場所の山側に斜面あり。削り取りが必要か斜面安定性評価が必				

立地条件 候補場所		外部からの衝撃による損傷防止（自然現象）***				備考
		地滑り	火山	生物学的影響	森林火災等	
		要。	る必要あり。			おそれのある施設は、事故評価と拡大防止対策が必要。 (第40条)
⑤	原子炉建屋横 海岸部	⑤の場所は、原子炉建屋の海側で、山側から離れており、山崩れの影響の可能性なし。				
⑥	山側資材置場	⑥の場所は、海拔132mで、この上方に標高400m以上の山がある。山斜面の安定性について調査・評価し、地滑り・崩落しないことの評価が必要。	①～⑤と同じ。	①～⑤と同じ。	①～⑤と同じ。	
⑦	もんじゅ原子炉施設設置場所（跡地）	①～③と同じ。	①～⑤と同じ。	①～⑤と同じ。	①～⑤と同じ。	

表 8-4 試験炉設置許可基準規則で要求されるもんじゅサイト設置場所の立地条件（外部からの衝撃による損傷防止：人為によるもの）

立地条件 候補場所		外部からの衝撃による損傷防止（人為によるもの）****		備考
		飛来物（航空機落下等）	ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災等	
①	固体廃棄物貯蔵庫前	もんじゅの耐性テストで評価した原子炉施設への航空機落下確率は、約 $7.4 \times 10^{-8}$ 回/炉・年で、対策が必要とされる $10^{-7}$ 回/炉・年より小さいと評価している。研究炉を設置する場合は、施設の大きさ、位置等を考慮して落下確率を評価し、評価基準を超える場合は対策する。	もんじゅサイトは、敦賀半島の先端部に位置し、ダム、工場等から離れた場所。これらの崩壊、火災等の人為的事象が原子炉施設に影響を及ぼす可能性は小さい。	
②	原子炉建屋山側倉庫			
③	管理棟前駐車場			
④	荷揚岸壁	①～③と同じ。	④の場所は、3000トン級船舶が接岸する荷揚げ場にあるので、この衝突による影響（衝撃、燃料油火災等）を評価する必要がある。（新規基準第6条第2項の解釈にある船舶の衝突に関する評価）	
⑤	原子炉建屋横海岸部	①～③と同じ。	①～③と同じ。	
⑥	山側資材置場	①～③と同じ。	①～③と同じ。	
⑦	もんじゅ原子炉施設設置場所（跡地）	①～③と同じ。	①～③と同じ。	

\*\*\*\* 試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則の第6条第3項の項目

### 8.3.2 その他の考慮すべき条件

もんじゅサイトに研究炉施設を設置する場合の考慮すべきその他の条件として、廃止措置中のもんじゅと建設・運転中の研究炉施設が共存する状態になる。研究炉施設の管理・運営主体が JAEA と異なる場合、以下の事項について、もんじゅサイト内の核物質防護防護に係る周辺及び立入制限区域、サイト周辺監視区域を両者で調整し、管理・運営する必要がある。

#### (1) 人の不法な侵入等の防止

試験炉設置許可基準規則の第 7 条（試験研究用等原子炉施設への人の不法な侵入等の防止）において、試験研究用等原子炉施設への人の不法な侵入、試験研究用等原子炉施設に不正に爆発性または易燃性を有する物件、その他人に危害を与え、または他の物件を損傷するおそれがある物件が持ち込まれること及び不正アクセス行為（サイバーテロ）を防止するための設備を設けなければならないとされている。

もんじゅサイトに研究炉施設を設置するに際し、同一サイトにおいて JAEA と研究炉施設の管理・運営主体が異なる場合、サイトへの不法な侵入を防止するための対策と警備体制、連絡体制等について、両者の間で調整、対応する必要がある。

#### (2) 核物質防護の対応

試験炉設置許可基準規則第 14 条の 3（防護措置）において、試験研究用等原子炉設置者は、特定核燃料物質の区分に応じ、防護区域、周辺防護区域及び立入制限区域を設け、見張人を置き、区域内の巡視と監視、人の立入り制限等の処置を取ることとされている。もんじゅサイトに研究炉施設を設置するに際し、同一サイトにおいて JAEA と研究炉施設の管理・運営主体が異なる場合、核物質防護上の立入制限区域の設定と管理、核物質防護規定等について両者の間での調整、対応が必要である。

#### (3) 周辺監視区域の設定と線量管理

もんじゅサイトに研究炉施設を設置する場合の考慮すべき要件として、同一サイト内に 2 つの原子炉施設があり、もんじゅは廃止措置中、研究炉施設は運転中の状態になる。この場合、2 つの原子炉施設からサイト周辺の公衆が受ける放射線量は、下記 1)～3)の法令上の線量限度、目標線量を越えないように、両者が周辺監視区域を共同で設定・管理する必要がある。また、サイトから放出する空気中または水中の放射性物質の濃度が法令の定める限度濃度を越えないように両者が放射性物質の放出管理をする必要がある。

もんじゅサイトに研究炉施設を設置する場合、設置位置が周辺監視区域境界付近になる等によって、既設のもんじゅの周辺監視区域境界で公衆の受ける線量限度と目標線量が線量限度を超える恐れがある場合は、線量限度以内に入るように周辺監視区域境界を拡大するか、または原子炉施設から出る直接ガンマ線の強度、放射性物質の排出量を制限する必要がある。図 8-8 に、現状のもんじゅサイト周辺監視区域の範囲を示す。

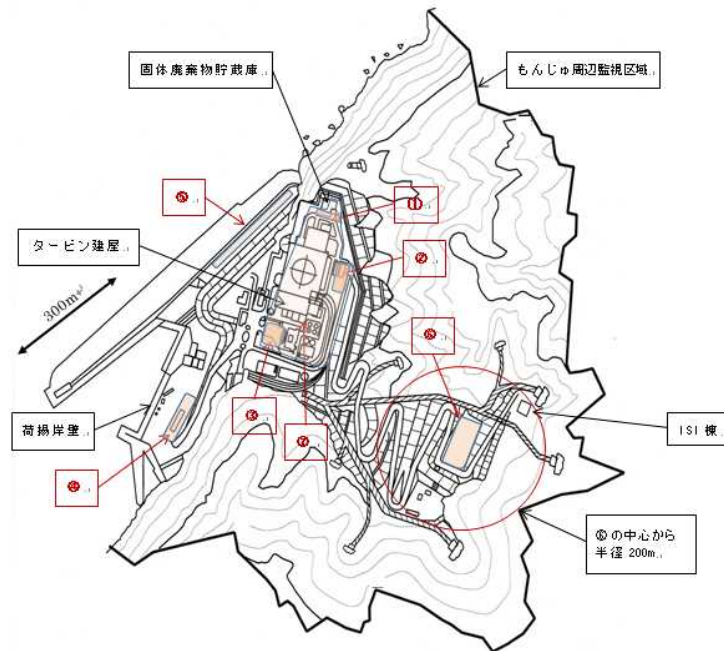


図 8-8 もんじゅサイトの周辺監視区域

1) 通常運転時のサイト周辺の公衆が受ける線量限度と目標線量

原子炉施設のサイト周辺の公衆が受ける通常運転時の実効線量限度は、「試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則等の規定に基づき、線量限度等を定める告示」の第3条（周辺監視区域外の線量限度）により、1年間（4月1日を始期とする1年間をいう。）につき1mSvとされている。

また、試験炉設置許可基準規則の第24条（工場等周辺における直接ガンマ線等からの防護）において、試験研究用等原子炉施設は、通常運転時の試験研究用等原子炉施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による工場等周辺の空間線量率が十分に低減できるものでなければならないとされ、本条項の解釈において「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針」（昭和50年5月13日原子力安全委員会決定）の線量目標値として50 $\mu$ Sv/年、また「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について」（平成元年3月27日原子力安全委員会了承）の目標値（空気カーマ）として1年間当たり50 $\mu$ Gy以下にすることが要求されている。もんじゅ施設と研究炉施設からの線量の合計が、この目標線量を超えないようにする必要がある。

2) 周辺監視区域外に放出する排気中及び排水中の放射性物質の濃度限度等

もんじゅサイトにおいて、もんじゅ施設と研究炉施設から周辺環境に放出する排気中及び排水中の放射性物質の濃度は、「試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則等の規定に基づき、線量限度等を定める告示」第9条（周辺監視区域外の濃度限度等）に定められ濃度を越えないように、排気・廃水を適切に処理・排出、監視する必要がある。



### 3) 事故時の被ばく線量

原子炉施設の事故時の周辺公衆の被ばく線量に関して、「水冷却型試験研究用原子炉施設の安全評価に関する審査指針」解説において、設備・機器が事故・故障により機能喪失をしても周辺公衆の実効線量が発生事故当り 5mSv を超えなければリスクは小さいとされ、当該装置・機器は、耐震重要設備（S クラス）の対象から外れる。一方、試験研究炉基準規則の第 40 条（多量の放射性物質等を放出する事故の拡大の防止）の解釈において、中出力炉または高出力炉に区分される試験研究用等原子炉施設については、設計基準事故より発生頻度は低いが、敷地周辺の公衆に対して過度の放射線被ばく（実効線量の評価値が発生事故当り 5mSv 超えるもの）を与えるおそれのある事故・故障については、サイト条件を考慮し周辺公衆の被ばく評価及び対策を求めるとされている。もんじゅサイトに設置する研究炉施設の設置許可申請においても、サイトの気象条件（風速、風向出現頻度等）、周辺公衆までの距離等の条件を入れて事故時の周辺公衆の実効被ばく線量を評価し、5mSv を超えるおそれがある場合は、事故の発生及び拡大の防止、放射性物質の放出による影響の緩和に必要な常設または可搬型設備の設置及び手順の策定等をする必要がある。

## 8.4 環境影響評価法と自然公園法等

原子炉施設を設置する場合の考慮すべき事項に関し、原子炉等規制法の基づく設置許可申請をする前の主要な法的手続きとして、環境影響評価法に基づく環境影響評価（環境アセスメント）をすること、及び、もんじゅサイトは若狭湾国定公園内にあることから、自然公園法に基づく原子炉施設の設置に関する福井県知事の許可を得る必要がある。また、研究炉施設の設置に際し、もんじゅサイト海岸部の海岸海域を埋め立てる場合は、公有水面埋立法に基づく埋立免許の取得が必要である。以下にその内容を示す。

### 8.4.1 環境影響評価法に基づく環境影響評価

環境基本法第 20 条に基づく環境影響評価法の規定により、原子炉施設を設置する事業者（第一種事業者）は、原子炉施設（工作物）の設置・運転等の事業の実施が立地地域の環境に及ぼす影響について、環境の構成要素に係る項目ごとに調査、予測及び評価を行うとともに、その事業に係る環境の保全のための措置を検討し、環境影響を総合的に評価することが求められている。

環境影響評価の作業手順は、原子炉施設の計画立案段階で事業が実施される区域における当該事業に係る環境保全のために配慮すべき事項（計画段階配慮事項）を記載した配慮書の作成から始まり、国、及び設置する区域の自治体と住民等からの意見を踏まえつつ、当該事業に係る環境影響評価を行う方法を記載した環境影響評価方法書、影響評価項目のスコーピング、環境影響評価の実施、影響評価実施結果をまとめた準備書と評価書の作成と公表をし、国及び自治体等の意見を踏まえた評価書の修正・確定後に、初めて事業の実施が可能になる。

環境アセスメントは、目標クリア型アセスメント方式ではなく、実行可能なより良い対策を

とっているかどうかの検討などにより環境影響をできる限り回避、低減するとの視点から審査されるベスト追求型アセスメント方式である。もんじゅサイトに設置する研究炉施設の計画・設計においては、もんじゅサイト近隣の原子力発電所の環境影響評価と自治体等の意見の事例を参考・考慮しつつ、環境保全を最大限に配慮した事業計画にする必要がある。

#### 8.4.2 自然公園法に基づく自然景観と自然環境の保全

もんじゅサイトは、図 8-9 に示すように若狭湾国立公園の第 1 種特別区域に指定されている区域内にある。第 1 種特別区域は、特別保護地区に準ずる景観を有し、風致を維持する必要性が最も高い地域であって、現在の景観を極力保護することが必要な区域である。国立公園内で工作物を設置・運転する場合は、自然公園法に基づき、その事業の開始前に国立公園を所管する福井県知事の許可を受ける必要がある。自然公園法では、公園内での事業の実施は、公園の自然景観と自然環境を可能な限り保全することが求められている。

もんじゅサイトに研究炉施設（工作物）を設置する場合は、自然公園法第 20 条第 3 項 1 号の工作物の新築に該当するので、同法施行規則第 10 条の規定による特別地域内での原子炉施設の設置行為に関する許可申請書を福井県知事に提出する必要がある。福井県は、原子炉施設の設置の申請内容について、国立公園の自然景観と自然環境を可能な限り保全することの観点から審査し、次の同施行規則第 11 条の許可基準に適合する場合に許可される。

- ① 建築物は、学術研究その他、公益上必要であり、かつ、申請に係る場所以外の場所においてはその目的を達成することができないと認められる建築物の新築であること。
- ② 当該建築物の屋根及び壁面の色彩並びに形態がその周辺の風致または景観と著しく不調和でないこと。
- ③ 当該建築物の撤去に関する計画が定められており、かつ、当該建築物を撤去した後に跡地の整理を適切に行うこととされているものであること。

もんじゅの建設時において、動力炉・核燃料開発事業団（現、JAEA）は、昭和 54 年 2 月に自然公園法に基づく自然環境調査書を提出し、福井県の自然環境保全審議会自然公園部会で審査された結果、植生保全の観点から一部レイアウトの変更を行い、昭和 55 年 3 月に自然公園法に係る審議会の承認の答申が知事に出された。その後、昭和 55 年 9 月に環境影響評価の審査も終了し、これを受けて昭和 55 年 12 月にもんじゅの原子炉設置許可申請を行った<sup>(14)</sup>、<sup>(15)</sup>。

もんじゅサイトに研究炉施設を設置する場合、その施設の設置位置と配置設計等は、もんじゅ及び近隣の原子力発電所の自然公園法に係る自治体からの意見の事例を参考・考慮しつつ、環境保全に配慮した計画とし、自然公園法における上記の許可条件に適合するようにする必要がある。



図 8-9 若狭湾国定公園内のもんじゅサイト

#### 8.4.3 公有水面埋立法による埋立免許

研究炉施設をもんじゅサイトに設置する際、⑥山側資材置場の盛土の一部を取り除いた除去土石をもんじゅサイト海岸部の公共の海岸海域を埋め立てるような場合は、公有水面埋立法に基づく埋立免許の取得が必要である。

公有水面埋立法は、公共の海域、河川等を埋め立てる場合、その申請（願書）を当該地点の都道府県知事に提出し、免許を受けることとされている。その際、国（国土交通省）の認可（50haを超える場合は環境省の意見も聞く）も必要になる。免許の条件として、同法第4条において、国土利用上適正かつ合理的であること、埋立てが環境保全及び災害防止について十分な配慮がされていること等が付けられている。

もんじゅサイトの⑤原子炉建屋横海岸部を埋め立てる場合は、環境保全等に配慮した計画とし、公有水面埋立法に基づく埋立免許を取得する必要がある。

### 8.5 関係自治体との協定等

#### 8.5.1 試験研究用等原子炉施設の原子力災害対策重点区域の範囲の目安

原子炉施設を設置する地域においては、原子力災害防止法第6条の2第1項の規定による「原子力災害対策指針」（平成29年7月5日全部改正）<sup>(16)</sup>において、試験研究用原子炉施設に関する原子力災害対策重点区域については、次のとおりとしている。

試験研究用等原子炉施設の場合の原子力災害対策重点区域としては、予防的防護措置を準備する区域（以下、「PAZ」という。）の設定は不要であり、緊急防護措置を準備する区域（以下、「UPZ」という。）のみを設定する。

UPZの範囲は、試験研究用等原子炉を一定の熱出力で継続して運転する場合における熱出力の最大値に応じ、当該試験研究用等原子炉施設からおおむね表8-5に掲げる距離を目安とされている。研究開発段階発電用原子炉施設のもんじゅ（714MWt/28万kWe）のUPZは、30kmになる。図8-10に、もんじゅサイトを中心とした半径0.5km～30kmの範囲を示す。

表 8-5 試験研究用等原子炉施設の原子力災害対策重点区域(UPZ)の範囲の目安

熱出力の最大値	原子力災害対策重点区域(UPZ)の範囲の目安(半径)	該当する研究炉
熱出力が <sup>1)</sup> 10MWを超え、100MW以下の試験研究用等原子炉	5km	JMTR(50MW廃炉)、常陽* HTTR(30MW)、 JRR-3(20MW)
熱出力が <sup>2)</sup> 2MWを超え、10MW以下の試験研究用等原子炉	500m	KUR(5MW)
その他の原子炉施設： 熱出力(一定の熱出力で継続して運転する場合におけるその熱出力)の最大値が2MW以下の試験研究用等原子炉施設	原子力災害対策重点区域を設定することは要しない。	KUCA(100W)、UTR-KINKI(1W)、 STACY(300kW)他

\*常陽は、出力を140MWから100MWに変更して設置変更許可申請。



図 8-10 もんじゅサイトを中心とした半径0.5km～30kmの範囲

原子力災害対策指針には、原子力災害対策重点区域の設定に当たっての留意点として、以下の記載がある。もんじゅサイトに2つの原子炉施設が設置されている場合の防護措置は、施設の状態を踏まえて施設ごとに対応する必要がある。

地方公共団体は、各地域防災計画(原子力災害対策編)を策定する際には、本指針の考え方を踏まえつつ、原子力災害対策重点区域を設定する必要がある。その際、迅速かつ実効性のある防護措置が実施できる区域を設定するため、原子力災害対策重点区域内の市町村の意見を聴くとともに、試験研究炉用原子炉の出力が2MWを超える場合は、上記のUPZ(試験研究用原子炉の場合はPAZの設定はなし。)の数値を一つの目安として、地勢、行政区画等の地域に固有の自然的、社会的周辺状況等及び施設の特徴を勘案して設定することが重要である。UPZに含まれる地域は、複数の道府県の一部を含む場合も想定されるため、国が積極的・主体的に関与し、区域内での対策の整合を図り、複数の道府県間の調整等を行うことが必要である。

なお、この防災計画は、原子炉施設ごとに策定することが基本である。同一の原子力事業所内に複数の原子力施設が設置される場合、原子力災害の発生時に講ずべき防護措置は、異常事態が発生した施設の緊急事態区分等を踏まえたものとする必要がある。

### 8.5.2 関係自治体との安全協定

原子炉施設を設置・運転する場合、前記 8.5.1 に述べたように、原子力災害対策指針に基づき、原子炉出力に応じた原子力災害対策重点区域（UPZ）に入る自治体は、あらかじめ原子炉施設ごとに原子力災害対策に係る地域防災計画（原子力災害対策編）を策定・準備し、定期的に防災訓練等を行うことが求められている。もんじゅ施設では、UPZ の範囲が半径 30km である。これに含まれる下記の関係自治体と安全協定を締結している。JAEA は、福井県及び敦賀市と「高速増殖原型炉もんじゅ周辺環境の安全確保等に関する協定書」を平成 4 年 5 月に締結している<sup>(17)</sup>。この協定書及び協定の運用に関する覚書は、もんじゅの廃止措置の決定に伴い、平成 29 年 12 月 5 日に廃止措置計画認可申請書の提出に先立ち改定された。隣接する他の自治体との安全協定書、隣々接の自治体との安全確保に関する通報連絡等協定書も同様である。

- ・ 立地協定（福井県、敦賀市）
- ・ 相互立地協定（美浜町、敦賀市）
- ・ 隣接協定（南越前市、滋賀県他）
- ・ 隣々接協定（若狭町他）

自治体の地域防災計画は、原子炉施設ごとに策定することが基本であることから、もんじゅサイトに研究炉施設を設置する場合、研究炉施設に係る地域防災計画を策定することになる。この場合、研究炉の熱出力により UPZ の範囲は表 8-5 のとおりで、炉出力が 2MW 未満は不要であるが、2MW を超え 10MW 以下の研究炉の UPZ の目安は 0.5km であるので、この場合は敦賀市のみが含まれる。10MW を超え 50MW 以下の研究炉の場合の UPZ は 5km になるので、図 8-10 に示す範囲となり敦賀市及び美浜町が相互立地協定の自治体として含まれる。

もんじゅサイトでの研究炉施設の設置、運転には、地元自治体の理解と協力を得ることが重要である。研究炉施設の設置・運転に関わる関係自治体との安全協定は、立地自治体（福井県、敦賀市）とともに、研究炉出力によっては UPZ に入らない区域も含めて自治体への説明・協議のうえ、必要により研究炉施設の設置・運転に関わる周辺環境の安全確保に関する協定を締結することを検討する必要がある。

### 8.5.3 福井県漁連との協定

JAEA は、もんじゅの運転に関し、福井県漁業協同組合連合会と漁業環境の保全と操業の安全確保に関する漁業協定書を締結している。

研究炉施設をもんじゅサイトに設置する場合、研究炉は、通常、発電設備を持たず原子炉で発生する熱の最終ヒートシンクは大気であり、海へ温排水を出さない。一方、研究炉施設で発生する放射性廃液の処理水は法令の濃度限度以下にして海に放流される。処理装置の故障等で海水汚染が生じ漁業に影響を与えることを防止するとともに、仮に影響が発生した場合等の連絡・対応・補償等に関する漁業協定について、もんじゅと同様に締結することを検討する必要がある。

## 8.6 原子炉等規制法による設置（変更）許可申請と廃止措置計画認可申請の関係

### (1) 法令上の記載

もんじゅサイトに研究炉施設を設置する場合、研究炉施設の設置ともんじゅの廃止措置が並行して行われることになる。この場合の原子炉等規制法上の設置許可と廃止措置の関係については、以下のとおりであり、試験炉設置許可基準規則では、同一サイトの2基以上の原子炉の間の安全施設の共用に関する規定はあるが、同一サイトで廃止措置する施設と新規に設置する施設の関係を直接的に規制する条項はない。

#### ① 試験研究等原子炉の設置許可の条件

##### 1) 原子炉等規制法の第4章第1節試験研究用等原子炉の設置、運転等に関する規制

###### 第24条（許可の基準）

原子力規制委員会は、第23条第1項の許可の申請があつた場合においては、その申請が次の各号のいずれにも適合していると認めるときでなければ、同項の許可をしてはならない。

- 一 試験研究用等原子炉が平和の目的以外に利用されるおそれがないこと。
- 二 その者（試験研究用等原子炉を船舶に設置する場合にあつては、その船舶を建造する造船事業者を含む。）に試験研究用等原子炉を設置するために必要な技術的能力及び経理的基礎があり、かつ、試験研究用等原子炉の運転を適確に遂行するに足りる技術的能力があること。
- 三 試験研究用等原子炉施設の位置、構造及び設備が核燃料物質（使用済燃料を含む。第43条の3の5第2項第7号を除き、以下同じ。）若しくは核燃料物質によつて汚染された物（原子核分裂生成物を含む。以下同じ。）または試験研究用等原子炉による災害の防止上支障がないものとして原子力規制委員会規則で定める基準に適合するものであること。

##### 2) 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

###### 第12条（安全施設）の6項

安全施設は、2つ以上の試験研究用等原子炉施設と共用し、または相互に接続する場合には、試験研究用等原子炉施設の安全性を損なわないものでなければならない。

この条項は、同一サイトの2基以上の原子炉施設の間で同一の構築物、系統または機器を使用する場合に適用される条項である。もんじゅサイトに設置する研究炉施設がもんじゅの施設（例えば、受電設備等）を供する場合は、共用される構築物、系統及び機器の想定される故障により同時に2つの原子炉施設の事故（共通要因事故）が発生しないようにする必要がある。

#### ② 研究開発段階発電用原子炉の廃止に伴う措置の条件

もんじゅの廃止措置計画認可に適用される研究開発段階発電用原子炉の設置、運転等に

## 関する規則

### 第 114 条（廃止措置計画の認可の基準）

- 一 廃止措置計画に係る炉心等から燃料体を取り出されていること。
- 二 核燃料物質の管理及び譲渡しが適切なものであること。
- 三 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の管理、処理及び廃棄が適切なものであること。
- 四 廃止措置の実施が核燃料物質若しくは核燃料物質によって汚染された物又は発電用原子炉による災害の防止上適切なものであること。

## (2) 原子炉の設置（変更）許可申請と廃止措置計画認可申請を同一サイトで行った事例

原子力発電所において、発電所の同一サイトで、一つの原子炉について廃止措置計画認可申請をし、他の原子炉について新基準対応をして運転再開するための設置変更許可申請をしている例として、関西電力㈱美浜原子力発電所と四国電力㈱伊方原子力発電所の例がある。

美浜発電所では、1号炉及び2号炉の廃止処置計画認可申請書（補正）<sup>(18)</sup>の廃止措置の基本方針において「廃止処置の実施に当っては、3号炉の運転に必要な機能に影響を及ぼさないことを確認した上で工事を実施する。また、3号炉を運転する上で廃止措置計画の変更が必要になった場合は、変更認可を受ける。」と記載されており、原子力規制委員会は廃止措置計画の審査書において、1号炉と2号炉の廃止措置が3号炉運転の安全に支障がないことを確認したとして、廃止処置計画を認可している。

### ① 関西電力㈱美浜原子力発電所の例

美浜 1 号炉及び 2 号炉の廃止措置計画認可申請書	： 平成 28 年 2 月 申請
同 上の廃止措置計画の認可	： 平成 29 年 4 月 認可
美浜 3 号炉の設置変更許可申請書	： 平成 27 年 3 月 申請
同 上の設置変更の許可	： 平成 28 年 10 月 許可

### ② 四国電力㈱伊方発電所の例

伊方 1 号炉の廃止措置計画認可申請書	： 平成 28 年 12 月 申請
同 上の廃止措置計画の認可	： 平成 29 年 6 月 認可
伊方 3 号炉の設置変更許可申請書	： 平成 28 年 1 月 申請
同 上の設置変更の許可	： 平成 29 年 10 月 許可

上記の事例のように、同一サイトで、一つの原子炉施設を設置し、他の原子炉施設の廃止措置を行う場合、両者の作業が干渉せずに各施設の安全が確保されれば、廃止措置認可申請と改造・運転または新設のための設置変更許可申請を並行して原子力規制委員会に申請でき、それぞれの申請が審査され、許可または認可され、別々の原子炉で設置変更・運転と廃止措置を並行して行うことは可能である。もんじゅサイトの場合、研究炉の設置者が JAEA と異なる場合は、両者の工事に安全上問題がないよう調整・対処し、各事業者が原子炉等規制法等の関係法

令に基づき各々の申請を行うことになる。

現実的課題としては、両者の工事が相互に干渉せずそれぞれの計画に従い安全に進められるようにする必要があり、研究炉施設の設置場所ともんじゅ廃止措置に伴う解体廃棄物保管場所との調整・確保、研究炉設置場所へのアクセスルート、放射線モニタリング、受電設備等の共同で運用する設備の使用、周辺監視区域及び核物質防護立入制限区域等の共同監視・管理等について、両者の調整が必要である。

## 8.7 まとめ

### 8.7.1 考慮すべき要件のまとめ

もんじゅサイトに新たに研究炉を設置する際に考慮すべき要件について調査した結果をまとめると、以下のとおりである。

#### (1) もんじゅサイトの調査

研究炉施設をもんじゅサイト（周辺監視区域内）に設置する場所として、7か所（①～⑦）について、候補場所のスペースと地質等を調査した。その結果、廃止措置作業で解体するもんじゅ建屋から離れた場所で、かつ、ある程度の広さがある場所として、④荷揚岸壁と⑥山側資材置場及び⑦もんじゅ施設設置場所（廃止措置後の跡地）がある。④と⑥の場所は、もんじゅの建設時に建屋基礎を掘削した土石で埋立てた場所または盛土した場所である。原子炉施設は、十分な支持力がある安定した地盤に設置することが要求されているので、詳しい地盤調査を行い、研究炉施設の設置場所としての適性を評価する必要がある。また、もんじゅの廃止措置計画において、この場所が、もんじゅの解体廃棄物の保管場所として使用する可能性がある場合は、その計画と調整する必要がある。⑦もんじゅ施設設置場所は、堅固な地盤にあり十分な広さがある。この場所は、廃止措置第4段階の建屋の解体・撤去後に研究炉施設の設置が可能になるが、その時期は30年後になる。

#### (2) もんじゅサイトの立地条件（地盤、地震、津波及び外部からの衝撃による損傷の防止）

研究炉施設の設置場所について、新規制基準で要求される自然現象と人為的事象に関して考慮すべき条件に係るもんじゅサイト特有の立地条件に関して、もんじゅの耐性テスト（頑強性評価）等の結果を参考に調査した。

地盤、地震に関しては、④、⑤は埋立地、⑥は盛土地であるため、原子炉施設の設置基礎基礎としての地盤の精査、周辺斜面の安定性の調査・評価等を行い、原子炉施設（特に耐震重要施設）の設置場所としての適性の評価が必要である。

津波に関しては、最大約5.2m（再評価では+8.8m）との評価されている。④荷揚岸壁と⑤原子炉建屋横海岸部の埋立地の地表面はEL+5mであるため、研究炉施設を設置する場合は、津波防護施設、津波監視装置等の設置の検討が必要である。竜巻、火山、火災等の自然現象の条件についても、新規制基準に従って評価が必要である。

その他、同一サイトで、研究炉の設置・運営主体がもんじゅ施設と異なる場合は、両者の核



物質防護、周辺監視区域等の設定・管理等の在り方の検討が必要である。

### (3) 環境保護法と自然公園法等

⑥の場所は、盛土部分の掘削と盛土斜面の掘削・整地工事及び掘削土石の置き場所の確保が必要となる。環境と自然景観の保全に与える影響を最小限にする工事範囲及び方法とし、環境影響評価法と自然公園法に基づく環境影響調査等と評価を行い、研究炉施設設置に係る許可を取得する必要がある。また、⑤原子炉建屋横海岸部の埋立て工事をする場合は、公有水面の埋立て免許を取得する必要がある。

### (4) 関係自治体等との協定等

もんじゅサイトに新たに研究炉施設を設置する場合は、原子力災害対策指針による原子炉の熱出力に応じた原子力災害対策重点区域を設定する必要がある。この区域及び隣接区域の地元自治体との安全協定等が必要である。

### (5) 研究環境及び生活環境の整備

もんじゅサイトの研究炉で研究活動を行う場合、研究者及び学生、施設の運転・保守及び管理者等が必要とする研究環境として、研究・人材育成のための資機材等、サポート体制と生活インフラの整備・充実が必要である。また、研究者等の生活環境の整備も必要である。

## 8.7.2 今後の検討課題

もんじゅサイトに新たに研究炉施設を設置する際に考慮すべき要件に関する今後の主な検討課題は、次のとおりである。

### (1) もんじゅ廃止措置におけるサイト使用計画及び高速炉研究開発拠点としてのもんじゅサイトの使用計画との整合性

今回の調査では、前提条件として、もんじゅ廃止措置計画及び高速炉研究開発拠点としてのもんじゅサイトの使用計画とはリンクさせずに、もんじゅサイト（周辺監視区域内）に研究炉施設を設置する場合の候補場所として7か所を調査し、④荷揚岸壁、⑥山側資材置場または⑦もんじゅ施設跡地（廃止措置後）を設置場所の候補としたが、この場所が、次のもんじゅサイトの使用・利用計画と相互に干渉しないように調整・整合を図る必要がある。

- ① もんじゅ廃止措置におけるサイト使用計画（廃止措置に必要な資機材の置場、放射性廃棄物を含む解体廃棄物のサイト外搬出までの保管場所等との調整）
- ② 高速炉研究開発におけるサイト使用計画（試験研究施設の設置場所等との調整）

なお、新規制基準では、新設する研究炉施設においても、設置許可時点で、廃止措置方針を作成することが求められているので、もんじゅサイトの使用計画の検討において、この点も考慮する必要がある。

## **(2) 研究炉のニーズ調査の反映**

現在、国の原子力研究開発基盤作業部会において、日本の今後の原子力開発と其中での研究炉の進め方等について検討されている。この全体的視点・方針に整合し、かつ研究炉のニーズ調査結果を基にもんじゅサイトに設置する研究炉施設へのニーズ・シーズの絞り込み・定量化を行い、もんじゅサイト（設置スペース、地盤条件等）を考慮した研究炉施設の基本機能とスペック、主要実験装置等と関連施設を検討・選定する必要がある。研究炉施設的设计スペックについては、新規制基準に適合するものとし、その際、原子炉規模と周辺公衆への影響程度に応じた規制としてグレーデッドアプローチの適用性の調査・検討も行う。

## **(3) もんじゅサイトの研究炉の設置場所の地盤、自然現象等の立地条件の調査**

上記の(1)と(2)の検討により選定された研究炉施設の設置候補場所における地盤、自然条件、自然環境等について、新規制基準の審査ガイド、環境影響評価法、自然公園法等に従って、地質・地盤調査、自然環境影響の準備調査・観測等を行い、研究施設の設置場所としての適切性の評価・確認をする必要がある。

#### 【参考文献】

- (1) 原子力関係閣僚会議、「もんじゅ」の取扱いに関する政府方針、平成 28 年 12 月 21 日
- (2) 日本原子力研究開発機構、高速増殖原型炉もんじゅ原子炉施設廃止措置計画認可申請書、平成 29 年 12 月 6 日
- (3) 高速炉開発の方針、原子力関係閣僚会議、平成 28 年 12 月 21 日
- (4) 動力炉・核燃料燃事業団、動燃技報 No.51 「もんじゅ特集」、1984 年 9 月
- (5) 動力炉・核燃料燃事業団、動燃 20 年史、1988 年 10 月
- (6) 日本原子力研究開発機構、高速増殖原型炉もんじゅ平成 23 年東北地方太平洋沖地震の知見等を踏まえた原子力施設への地震動及び津波の影響に関する安全性評価のうち周辺斜面の安定性評価について、2012 年 5 月
- (7) 日本原子力研究開発機構、高速増殖原型炉もんじゅ「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価報告書 改訂（補正）、平成 22 年 3 月 12 日
- (8) 日本原子力研究開発機構、現状のプラント状態におけるもんじゅの安全性について、平成 29 年 6 月 26 日、平成 29 年 7 月 26 日
- (9) 日本原子力研究開発機構、高速増殖原型炉もんじゅ原子炉施設廃止措置計画認可申請書について、平成 30 年 2 月 23 日
- (10) 原子力規制委員会、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
- (11) 原子力規制委員会、敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド、平成 25 年 6 月
- (12) 原子力規制委員会、基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド、平成 25 年 6 月
- (13) 日本原子力研究開発機構、事故等に係る説明事項及び大規模損壊事故への対応について、平成 29 年 10 月 10 日
- (14) 原子力委員会、原子力委員会月報 26(1)高速増殖炉開発の現状、昭和 56 年 9 月
- (15) 核燃料サイクル開発機構、「もんじゅ」建設の歩み No.1 (JNC TN4440 2002-12)、2002 年 9 月
- (16) 原子力規制委員会、原子力災害対策指針（平成 29 年 7 月 5 日全部改正）、平成 29 年 7 月
- (17) 福井県・敦賀市と日本原子力研究開発機構、高速増殖原型炉もんじゅ周辺環境の安全確保等に関する協定書、平成 17 年 5 月 16 日改定
- (18) 関西電力(株)、美浜発電所 1 号及び 2 号発電用原子炉施設廃止措置計画認可申請書（補正）、平成 29 年 2 月 10 日

## 9 調査のまとめ

### 9.1 概要

もんじゅサイトを活用した試験研究炉の在り方に関する調査は、8章までに述べたように国内外の研究炉の動向、研究炉の利用のニーズ、人材育成のための利用の現状とニーズ、大型研究施設の運用や体制、試験研究炉の機能・オプション、研究炉の設置に考慮すべき要件などの調査を行い、それぞれの項目についてまとめをすると同時に、テーマ別の課題を整理した。

今回の調査に際して、研究炉の利用については、日本学術会議、日本原子力学会、及び国際機関や海外諸国からの出版物、有識者委員会の方々、さらには、大学、研究機関、企業で研究炉等に携わっている方々に直接面会して情報を収集・分析し、それらの結果は有識者委員会の方々の評価・意見を入れて最終報告として取りまとめた。

この調査は、1章でも述べたように「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づける。」と、国の方針として決定されている。これを受けて福井県では、より具体的に研究炉を導入して地域活性化を図りたいとのニーズの方向性が示されている（福井県ホームページ“エネルギー研究開発拠点化推進会議”（同会議議事録、平成29年3月））。

これらニーズの具体的な内容は、先端学術研究拠点の展開、人材育成の中核、及びそれを梃子にして、新規事業の誘発と牽引を目指す研究炉の在り方を模索した結果の方向性の提示である。このことは、研究炉へのニーズは、従来の理工学的なニーズに沿った研究炉の選定に加えて、社会経済的なニーズが強調されている結果と見ることが出来る。このような前提に立ち、今回の調査は、ニーズ調査を幅広に行い、原子炉本体や付帯設備の検討をし、建設・運転の連携や運用の枠組みの構築や戦略的な計画に利用できる諸条件を調査し、研究炉の地域への貢献のビジョンの策定につながる現状の動向の分析評価などを行った。これらの調査、分析の主要な結果と今後の課題を以下に述べる。

### 9.2 国内外の動向調査

この調査は、日本学術会議や日本原子力学会が行った動向調査を参考にし、国内では訪問調査により最新動向を把握し、海外動向は国際機関の資料を精査することによって動向を整理した。

#### (1) 国内動向の概要

- ①1960年代に建設された研究炉が多く、中性子による核物理の基礎研究、原子力関係の人材育成（学生や技術者及び原子力行政に関わる人々を対象）、発電炉の導入のための技術開発、中性子を利用した応用技術開発などに利用されてきたが、その老朽化や低濃縮燃料への転換などの理由から廃止措置に向けて停止中の研究炉も数多くある。
- ②日本学術会議や日本原子力学会の報告によれば、東京電力福島第一原子力発電所事故後の新規基準により、多くの研究炉は一旦停止され、再稼働までに長時間を要している。そ

の間、大学での学生教育、大学・研究機関・企業などの研究開発と製品照射、アイソトープ生産などに多くの支障が出ている実情を取りまとめ公表している。

- ③研究炉の老朽化対策、新規規制基準対応や核セキュリティ対応、核物質管理など、大学や研究機関はそのための負担が増大し、持続性のある財源確保や人材育成に懸念があることが関係組織から提起されている。
- ④国内研究炉の停止中に、オーストラリア、韓国を始め、諸外国の研究炉所有の機関と共同利用契約を結んで人材開発や研究開発、委託照射を行っている。
- ⑤新規の研究炉については、国は日本学術会議や有識者の協力を得て今後のビジョンや戦略策定に取り組んでいる。
- ⑥研究炉や粒子加速器による中性子を利用した産業化については、鉄鋼協会や茨城県で、促進のための協議会などを設立して活動をしている。

## (2) 国内の研究炉に関する課題

- ①老朽化や国内外の規制対応に向けた研究炉の維持管理の継続的な財源や人材確保は急務の課題である。特に、燃料の調達や使用済燃料の管理については優先度を高めて取り組む必要がある。
- ②新規の研究炉の建設に伴って、在来の研究炉の活用を含めたビジョンの策定は必須である。その場合、研究炉が長期停止した場合の研究・利用に支障が生じないようにするための「研究炉停止時の代替」の戦略の策定は必須である。
- ③研究炉の役割は従来の人材育成や研究などのアカデミア領域から産業化に向けて取り組む、技術継承の枠組みの検討が必要である。

## (3) 海外動向の概要

- ①国内と同様、1950年代から1960年代にかけて建設された研究炉は約半数が老朽化による停止や廃止措置を行っていて、運転中の研究炉でも燃料の低濃縮化や出力増加、あるいは東京電力福島第一原子力発電所対応などに向けた改造が行われている。
- ②建設中や計画中の研究炉は約20基あり、低出力炉は途上国で、高出力炉は先進国に多く、最近の学術的、事業サービスニーズに対応し、かつ安全性も向上させた施設とするよう取り組んでいる。
- ③運転中の研究炉は、国や地域での原子力研究開発の戦略の下に、先進国では国内や域内の連携を密にして、研究炉の課題でもある、停止中の補完（代替手段）や異なった機能の役割分担をしながら効率的に利用する枠組みが進んでいる。
- ④途上国への支援としてはIAEAを中心に、先進国の研究炉を利用した研究や人材育成の経験機会の提供、留学生の受け入れ、あるいは研究インフラ整備のための資金援助などが活発に行われている。
- ⑤運転中や建設・計画中の多くの研究炉は維持管理のために、外部からの資金獲得のために、

有料で多様な事業・サービスを行っている。

#### (4) 海外での研究炉の課題

- ①前項で述べた最近の動きはすべて、海外での近年の課題に対応した項目であり、改めて整理すると、老朽化、低濃縮燃料化、財源確保、研究開発のロードマップとの整合性、長期停止時の補完問題、途上国支援の在り方などである。
- ②これ以外の課題としては、使用済燃料の保管・処理の問題、核不拡散対応、他の人材育成に使われる施設との連携（伝熱流動施設やシミュレータなど）、研究炉利用の拡大化などが挙げられる。

### 9.3 ニーズ調査

#### (1) 調査結果の概要

ニーズの調査は、学術研究、事業化開発、事業展開、人材育成などの視点で、各種文献やヒアリング調査の結果から以下の点が明らかになった。

- ①人材育成、中性子散乱、原子炉燃料・材料照射の利用が圧倒的に多い。
- ②中性子ラジオグラフィ、中性子放射化分析は産業応用に利用範囲が広がりつつある。
- ③BNCTの研究は加速器利用の基礎研究としてのニーズは大きい。
- ④RIは殆どを輸入に頼っている状況であり、供給の安定性に不安がある Co-60 や Ir-192 など一定量について国内生産のニーズがある。先端的ながん診断に使う Mo-99 の製造についても一定のニーズがあり、がん治療研究に取り組んでいる。
- ⑤シリコンドーピングは、研究炉活用が高品質な半導体製造手法であるが、研究炉の運転状況に左右されるため、供給が不安定で継続生産に不安要素がある。そのため現状は、日本の研究炉の代わりに海外の研究炉を利用している。半導体内の不純物測定として放射化分析の需要がある。
- ⑥基礎研究としては、新型原子炉の炉心の開発やマイナー・アクチナイドの核特性の把握、中性子検出器の開発など基礎的な研究要素もある。

#### (2) 今後の課題

上記のニーズに対しこれらの整理に当たっての課題も数多くあり代表的なものを列挙すると以下ようになる。

- ①上記のニーズ①と②は利用する対象者の範囲は広いが③から⑤は利用者が限定的であり、このために研究組織と事業者の連携が必要である。
- ②利用者として、中性子散乱は東大物性研が JRR-3 と、原子炉燃料・材料照射は東北大が JMTR と共同で、BNCT は京大が KUR を使って、それぞれが担当している。このことから、大学の研究炉の利用は、大学の特色、地域性を考慮し、利用においては大学・研究機関・企業などの研究者や技術者が一体となって共同して取り組む必要があること、及び人

材育成や地域の活性化は長期的な取組みになるために戦略的計画が必要となることに留意する必要がある。

- ③産業化については、ニーズの一般論は調査ができたが、地域性や国内外の市場動向については調査に企業機密などの多くの課題がある。海外では、国際的な市場（グローバル マーケット）対応、地域内（EU など）や国内対応（ドメスティック マーケット）に分けて、研究炉の所有者の対応が見られる。しかし、今後はさらに地域を限定したニーズに関係した地方の市場（ローカル マーケット）対応の検討が含まれるためかなりの時間をかけた調査になると思われる。
- ④基礎研究の展開については、大学や研究機関の戦略によって研究炉へのニーズは幅広いものと想定されるが、この方向性も、産業界の動向把握以上に困難さもある。個々の大学教官、研究機関の管理者などの将来構想や、現在の研究活動の分析、海外の先行事例、学生や若手研究者などの好奇心向（関心研究テーマ）、などを調べ、整理する必要がある。
- ⑤ニーズに応える研究炉全体の役割は幅が広く、使い方も多様で、効率よく利用する枠組みは国際機関との連携、国の支援などの要望も多く、この枠組みの検討も含め、評価基準を決めた上で整理が必要と思われる。

## 9.4 人材育成

### (1) 人材育成の動向

人材育成についても、国内や海外の代表的な国や地域の動向を、文献調査や国内でのヒアリング調査を行い以下のような結果を得ている。

- ①世界各国とも、学生から社会人にわたる原子力人材育成の有力なツールとして研究炉を使っていて、研究炉の所有国だけでなく、非所有国でもネットワークの枠組みなどの下に先進国の研究炉を利用して教育・訓練を行っている。
- ②我が国でも、東日本大震災前までは、2,000 名を超える学生や社会人の教育・訓練を京大 KUCA、KUR、及び近畿大学の UTR-KINKI、JAEA の研究炉を利用して行ってきた。しかし震災後の新規制基準対応による再稼働の遅れは、多くの大学関係者や企業に教育計画の実効性に不安を与えた。
- ③研究炉利用による学部や修士学生を対象にした場合は、原子力工学の基礎的な内容のカリキュラムを設定した教育中心に行うが、博士課程では、研究に従事しながら教育を受ける OJT 的な教育を、専門技術職の場合は、プラント運転を想定した訓練を中心に行うことが多い。
- ④研究炉の教育を受けたことの認定を制度化している国も、一部には見られる。
- ⑤研究炉などのインフラの共同利用やカリキュラムの作成、獲得知識の拡大などを目指した人材育成ネットワークは国際的、地域的（EU）、あるいは各国で構築されている。我が国でも、政府の支援を受けて、産学官連携プラットフォームである原子力人材育成ネットワーク JN-HRD（大学、研究機関、企業）、JNEN（JAEA と 3 大学）、福井県人材育成ネット

ワーク（研究機関、大学、企業）などが活動している。

## (2) 研究炉利用上の課題

上記の現状に対して今後検討すべき課題も数多くあり代表的なものを列挙すると以下のようになる。

- ①研究炉の長期停止は人材育成の上でも、計画された教育が全うされず、海外炉の利用やシミュレータの利用をせざるを得なかった。このような時に備えた代替システムの準備を、国を挙げて検討しておくことが必要である。
- ②人材育成のネットワークは活動が定着し、一定の成果を挙げていると思われるが、さらに拡大をして、アジア、環太平洋、及び世界に拡張する場合には、長期的にわたる戦略の策定が必要である。
- ③大学教育においては、研究炉の利用教育などの終了認定制度と共通する枠組みがあれば、海外での認定者も受け入れることができ、技術者の流動性が広がるが、現状では国際的に共通な認定制度はないように見える。

## 9.5 運営体制の検討

### (1) 国内外の運営体制の概要

研究炉を運営するための体制の検討に当たっては、文献調査と有識者との面談により国内外の研究炉や公的な大型の研究開発設備の管理・運営についてまとめた。その結果の概要を以下に列挙する。

- ①国内の公的な2つの大型研究施設は、共用法の適用によって共同使用の実施や連携機能の充実を図る取り組みが進んでいて、共用法の目的に沿った一定の成果を出している。この連携組織は、所管技術の基礎研究から産業化まで幅広い活動をしていることは参考になる体制である。
- ②欧米での研究炉等の運営体制の中には、研究開発戦略と連動した高い戦略性を持った計画や体制を確立し、運営主体の役割や責務を明確化した持続可能なプラットフォームの構築を、資金計画などの事業経営的な要素を付加して展開している例が見られる。
- ③欧米での研究炉を利用したプロジェクトの運営体制の多くは、大学、研究機関、産業界が目的を明確にした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からの協力を得て効率よく研究開発を推進している。
- ④EU では研究炉によるサービスの事業化や、民間企業による運営が計画されていて、その成果が注目される。

### (2) 運営体制の課題

上記の国内外の現状に対して今後検討すべき課題を列挙すると以下のようになる。

- ①研究炉の運営体制の理想的な在り方は、透明性、効率性、等の観点から設計や建設の初期



投資から、許認可業務、安全管理を含めた施設の実運用、使用済燃料の処理、廃止措置までライフサイクル全体にわたる一連の運営を継続することが望ましい。

- ②この観点から、研究炉の設置者と運営主体をどのような形態にするかを早急に検討し、長期的な財源確保、人材確保、国内外との連携の枠組みなどの運営組織の基礎作りを行うこと。
- ③研究炉等の研究成果を産業と結ぶ枠組みの例として、茨城県の「中性子利用推進協議会」があるが、今回の検討対象である福井地区だけでなく、幅広く、北陸・関西・中京以西の地域を含めた広域の企業などに呼びかけ、事業化推進組織を構築をすること。

## 9.6 サイト調査と考慮すべき要件の検討

### (1) 調査・検討結果の概要

今回の調査では、研究炉の設置地点として「もんじゅサイト」であることを前提に、サイト内の設置可能性のある場所の調査と考慮すべき要件について、現時点で入手可能な情報を基に予備的な検討を行った。その主な結果は、以下のとおりである。

- ①もんじゅサイト内の設置候補場所としては、荷揚岸壁、山側資材置場、及び廃止措置が終了した時点での原子炉施設の建屋内又は建屋跡地などが考えられる。荷揚岸壁は「もんじゅ」建設時に掘削した土石を海拔 5mまで埋立てした埋立地、山側資材置場は海拔 132mの斜面に掘削土石を盛土して平地を造成した場所である。
- ②大きな工事をしないという前提で、現状利用可能と考えられる場所と面積は、荷揚岸壁は約 120m×40m、山側資材置場は約 130m×54m である。
- ③ここに研究炉を設置する場合、新規制基準で要求されるサイト特有の主要な条件として、地盤の支持力等のほか、もんじゅの頑健性評価条件と同様に、地震の基準地震動  $S_s$  は 760gal、津波の海水面高さは EL+5.2m（再評価では+8.8m）を再検討する必要がある。
- ④原子力災害対策重点区域（UPZ）の設定は研究炉の出力に応じて決まる。2MW 以下の研究炉の場合は設定の必要はないが、2MW～10MW では 500m、10MW～100MW では 5km までが UPZ の範囲になるため、圏内の自治体は防災計画を策定する必要がある。

### (2) 検討課題

上記の調査・検討の結果を踏まえ、今後の本格的な取り組みに備えた検討課題を整理すると以下ようになる。

- ①原子炉建屋などの耐震上重要な施設は、十分な支持力のある安定した地盤に基礎を設置する必要がある。研究炉を設置する地盤については、地質・地盤調査を行い設置場所としての適性を評価する必要がある。荷揚岸壁は埋立地、山側資材置場は盛土地であることから、地盤改良、盛土の除去等が必要と考えられ、その工事費の高価格が懸念される。
- ②ニーズ調査等に基づく機能・スペックの研究炉と付帯設備の設計検討は、上で述べた立地条件や費用などを加味して行う必要がある。また、グレーデッドアプローチによる研究炉

の規制対応については、専門家による検討が必要である。

- ③もんじゅの廃止措置の詳細な計画とサイト内の土地使用計画は現時点で未定であり、ここで挙げた設置候補場所の使用可能性について早急な結論を出すことが難しい状況にあるが、研究炉の建設計画は、もんじゅの廃止措置計画と整合を取って進める必要がある。

## 9.7 調査の総括と課題

以上、調査の結果を5項目に分け、それらの主要課題も整理した。これらの調査結果や課題の整理には、外部有識者委員会での貴重な指摘を極力取り込んだが、一部は時間制約や調査の前提条件を変えないと対応できない項目もあった。

多くの指摘の中では、多様な研究炉の利用ニーズの整理に関する項目が多く、ニーズの内容の詳細化、ニーズの優先度、ニーズの定量化、ニーズの広域化（グローバル ニーズからローカル ニーズまで）、などが主要な項目であった。

これらの指摘は、研究炉のニーズ調査⇒主要な必要機能の抽出⇒研究炉建設の制約条件（建設サイト、安全・環境規制など）との整合性検討⇒複数の研究炉案の主要性能の比較⇒新研究炉概念の選定、という手順を想定しての、ニーズ指向による検討手順の初期条件を決める重要なポイントであるという認識である。

一方、海外動向や国内の実績などから、研究炉の炉形や規模についての、シーズ面からの整理も重要であり、これらについては、インパイル・ループの利用炉、多重炉心スペクトル炉、ADS（加速器駆動システム）方式炉、についての利用可能性の指摘もあり、選定する炉型・機能を議論する場合は、この点が主要な論点になる。

また人材育成については、ここで検討された研究炉だけをツールとして利用する方向性だけでなく、他の施設（ナトリウムループや地域の原子力施設）の利用も視野に入れるべきという指摘もあり、複合化した人材育成システムの構築も必要であると考えている。

このため、これらの指摘に対して、来年度以降の活動としては以下の項目について取り組むことを提案する。

- ①ニーズについて詳細検討とシーズ面からみた新規性のある炉型・機能等の検討について、タスクフォースにより取り組む。
- ②ニーズについては、産業振興に向けた方向性と基礎研究や応用研究の方向性についての詳細調査を行う。この場合のメンバーとしては、地元や関西地域での産業振興担当の関係者、主要産業の経営者、経営学者、社会心理学者、人材育成関係者などが望ましい。
- ③シーズ検討のタスクフォースでは、炉工学・炉物理専門家、伝熱工学・構造工学専門家などを中心にしたメンバーが候補になる。
- ④それ以外の課題は、建設地の絞り込みも重要な課題であり、調査検討には、地元や関係組織の協力を仰ぎながら継続することが望まれる。
- ⑤人材育成のツールとしての研究炉を中核とし、他の原子力施設の活用も幅広く利用する「統合化教育・訓練システム」に向けての検討も引き続きすべきである。

⑥上記の課題に加えて、運営組織の構想も、海外事例の具体性なども調査を深め、日本的なモデルを構築する方向での取り組みは重要である。

以上のように、本委託調査の方針や外部有識者委員会の指摘に基づいて取りまとめた結果から今後の提案をしたが、研究炉の建設は日本としても約 30 年ぶりのプロジェクトでもあり、この調査が世界に誇ることの出来る研究炉の設計に繋がることを祈念し結びとする。

## 10 外部有識者委員からの意見

本調査では、各専門家からなる外部有識者委員会を設置し、計2回の外部有識者委員会を開催した。委員の方から頂いた意見は、以下のとおりである。

### <運営体制>

- (1)原子力の安全を考えると国が責任をとるような体制が必要。但し欧米では民営化が進んでおり予算化などは民間的な取組とするのがよい。
- (2)共用法の適用か、共用法適用外との折衷案など明確にするための議論が必要。
- (3)安全管理や規制対応は、従来付帯業務と扱われてきたが今は本来業務である。研究炉の特徴に合わせたグレーデッドアプローチは規制からの受け身ではなく、研究炉の運営体制と連携しながら検討していくべき。規制の問題もしっかり議論していく必要がある。
- (4)多様な利用機関も含めた運営体制の検討が必要であり、理研等も含めた運営体制を検討願いたい。
- (5)設置者は国（JAEA）の役割が重要である。規制対応を考えると JAEA の技術的能力が必要でブランチ的な考え方もある。
- (6)もんじゅサイトの研究炉は科学主導か人材育成が中心かの議論がある。いずれにせよ研究炉の設計・建設プロジェクトは JAEA が中心にならざるを得ないと考えられるので、JAEA 中心に進めて欲しい。

### <ニーズ・人材育成>

- (1)設置スペースは、ニーズ調査を分析してこれを根拠に必要なスペースを決める流れでないといけない。どこにどんなニーズがあるかしっかりと踏まえた上で研究炉のタイプを決めなければならない。
- (2)BNCT の研究をしており、加速器型中性子源をメインに考えているが、色んな問題があり、原子炉でなければというところが出てくる。
- (3)ニーズ調査は、市場規模の定量化が必要である。研究炉での利用といっても、産業規模を考えないと意味がない。学術の進歩という面での利用が高いものも考える必要がある。ニーズ調査では、産業利用、人材育成の定量性の調査が必要である。
- (4)産業利用の「開発」については、研究炉で分析等を行いその情報を産業として利用しており、研究炉に生産ラインがあり製品ができる訳ではないので、そのまま市場規模には繋がらない。研究開発での利用規模と市場規模が誤解されないようにする必要がある。
- (5)福井県としても関西・中京地区を中心に企業ニーズを把握して見極める必要がある。福井県も企業ニーズを調査する考えがあり、その場合本委員会の先生方のご見識、事務局等の協力を得たい。
- (6)茨城県は J-PARC、JRR-3 等があり企業化等も行っているので、茨城県と連携を取って調査するのが良い。

- (7)人材育成と産業利用を一緒に行うことは難しい。研究炉を設置しただけでは地元の産業の発展にはならない。研究炉で得たものを企業化し地元で工場等を造るようになれば地元の発展になる。
- (8)原子力人材育成については、その中味を精査すべきである。原子力は総合システムであるので、原子力以外の工学基礎分野（機械、化学、電気・・・）の人材育成、確保を充実させることが重要である。炉物理の原子力専門は一握りで良く、その分野の人材育成は現状で十分である。
- (9)近年の IT 技術の進歩により、シミュレータによる運転訓練は非常に発達している。研究炉を建設するより遙かにコストパフォーマンスがよく、人材育成に効果的である。研究炉を利用した人材育成はベターであり不可欠なものではない。
- (10)研究炉のニーズとして人材育成が表に出ているが、学術研究も重要である。これもきちんと書いて欲しい。
- (11)新しい研究炉については、日本全体でみて判断することが重要である。一部関係者で議論しているように見える形は好ましくなく、他分野を含め多くの専門家に議論に参加してもらうこと、議論している姿を専門家でない方々に見ていただくこと、それによって日本にとり本当に必要なものが明らかになってくる。
- (12)産業化を全面に出して地元で夢を与えるのは間違いである。産業化への可能性はハードルが高い。

#### <機能・オプションに係る検討の進め方>

- (1)4 ケースしか検討していないように見える。数 W~5MW の中間の研究炉の記載が不十分なので分類の仕方を変えること。
- (2)具体的なイメージの検討は、A 案、B 案、C 案・・・と分けて境界条件を明確にして比較検討するのがよいのではないか。
- (3)ニーズなのか代替炉なのか、研究したい人もバラバラである。これから発展していく技術と海外の情報をどう選択するか、日本でしかできないところを選択するとかある。
- (4)地域の要望などから、単に人材育成だけしか当てはまらないという議論は避けて欲しい。地の利で関西、中京、北陸のエリアへ利便性がある。東、西とかの棲み分けの問題もあるが、今の段階では幅広く大きく色々な議論を深めて欲しい。
- (5)ニーズを絞って専用炉を造るのではなく、柔軟性のある炉を造るべきである。小さい炉でも多目的に使えるコンセプトの研究炉があると良い。
- (6)次期の研究炉を考えるに当たって、2つの方法を考えるべきである。一つ目は海外の研究炉の状況を見て、我が国ではこのような研究炉が必要かということで炉型を決めていく方法、二つ目は研究炉に関する提案を公募し、決まったメンバーの検討ではなく、広く研究者のアイデア・意見を求める方法がある。
- (7)今回提案のスペクトルシフト炉に固執するものではなく、広く基礎的な研究ができ、高速炉

の研究にも使える炉が良いと考える。研究者の意見を広く集めるのが良い。

- (8)ユーザーニーズに合わせてベストの設置サイトを探すとすると、色々なニーズが出てきて日本全国に広がり兼ねない。大きい炉から小さい炉まで羅列的に並べるのではなく、もんじゅサイトで何が出来るかどうか、もっと重要な事である。もんじゅサイトに設置すればこの様になる、これを超える場合は国全体で議論して方向性を探るのが良いのではないか。
- (9)小型炉でも色々なことができる。ニーズの中で、もんじゅサイトで出来るものと、出来ないものを明確に仕分けする必要がある。
- (10)ポストもんじゅの炉型やサイトの課題の議論が先行しているが、JMTR や JRR-3 の議論抜きでは前に進まない。国としてポストもんじゅをどう考えるのか見えない。役割、位置付け、ロードマップを明確にすべきである。
- (11)日本としての方針を明確にすることが重要である。具体的には、茨城地区の研究炉の機能、学術や産業の支援戦略、関西地区のニーズなどを見えるようにすることも必要である。茨城地区と競合することは中途半端になる恐れがある。茨城（東海）地区を分析して参考にして新規の研究炉構想を作るのも一案。京大炉の後継機としての位置付け、関西圏の研究拠点など議論が必要。
- (12)今後の日本の研究炉の高度化、次期計画など役割分担を明確にし、ロードマップの明示が不可決。中性子学会の提言には JRR-3 の運転停止が予想される 2030 年頃までに次世代研究炉を建設するとあり、JRR-3 の今後についての議論抜きでは進まないのではないか。ポストもんじゅの炉型や場所の課題だけでは不十分である。

#### <研究炉の具体的な機能・オプション>

- (1)すぐに賛成ではないが、MYRRHA 計画のような原子炉プラス加速器の研究はないのか。J-PARC 関連で ADS 計画があったが、臨界集合体を東海地区に作れるか見えない。日本のどこかでのオプションもあると思う。核変換は、FCA のような高速炉体系で行うのが本来で、検討をしておくのはよいのではないか。  
パルス中性子源であれば核データの測定ができる。加速器の研究と核データの測定や RI など他への利用もある。
- (2)もんじゅサイトが前提であると、小規模の研究炉になった場合、地元にとって魅力があるものではない可能性があるのではないか。一方で、玉虫色の提案も期待が先行するので報告書のまとめ方が重要である。
- (3)研究炉は、近大炉のような単なる人材育成ではなく産業利用ができるものが必要である。サイトなどの問題があれば明確にすべきである。嶺南地区に企業団地を作る計画もあり、敦賀は交通網の利便性がよくなる。試験研究炉はその核になることを期待している。

<サイトの状況について>

- (1)京大炉と近いので大学を含めた研究ができるのではないかと。サイトが狭いようなのでどこまでできるかの判断が肝要である。ビーム炉、照射炉は規模が違うので今回の議論から外して、現在の場所ですることには焦点を当てるべき。ビーム炉のユーザの立場から見れば 20MW、30MW を作らなければならない。併設する宿舎なり、アクセスがよいとか、研究機関が近くにあることが必然的な要件。
- (2)KUR の使用済燃料を 2026 年度まで米国に引き取って貰うが、その時期で運転開始から 60 年を経過する。西日本側にそれに変わるものを作れないか。KUCA は人材育成で残る。「もんじゅ」サイトに大きなものを作れないのであれば、人材育成と基礎的な研究を中心にして、例えば国内の技術者の養成とアジア地区の人材育成のプラットフォームができればよいのではないかと。
- (3)もんじゅのサイト要件を見ると、研究炉を荷揚岸壁又は資材置場に設置する場合、もんじゅの廃止措置を縛ることになる。廃止措置を止めなければ、研究炉はできないと思われる。もんじゅの廃止措置と研究炉の建設の同時進行は、建設によって絶対に影響を受け、廃止措置が遅れるので地元のためにはならない。それは地元にとってリスクを抱え続けるだけになる。その場合は、廃止措置が完了した後に、研究炉を建設する以外にない。
- (4)もんじゅサイトの制約条件だけでなく、新幹線が数年以内に開通する予定である等、地元の有利な条件もある。

<その他>

- (1)現状のもんじゅスペースだけでなく、宿舎や関連研究施設、あるいはもんじゅ本体の活用を含めて考えれば新たな提案も考えられる。
- (2)地元振興のために研究炉を作るのなら、産業の集積、物流システムを考慮して地元産業と直結できるような場所に建設すべきである。
- (3)新規に研究炉を建設する場合、新規基準では廃棄物の処理・処分などを含めた廃止措置方針を明確化する必要がある。研究炉の検討と合わせて、研究炉廃棄物処理に関する議論を進め、研究炉廃棄物の処分に目処をつけておくことが、新規研究炉の建設には必須である。
- (4)使用済燃料の政策が定まっていないのは問題なので、国において試験研究炉の使用済燃料の方針を定めることが重要と報告書に記載すべきである。

以上