

もんじゅサイトを活用した新たな
試験研究炉に関する調査

委託業務成果報告書

平成 31 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30年度「もんじゅサイトを活用した新たな試験研究炉に関する調査」の成果を取りまとめたものです。

目次

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | はじめに..... | 1 |
| 2 | 国内外の原子力を取り巻く状況..... | 2 |
| 2.1 | IAEA 技術年報などに見る世界の原子力動向..... | 2 |
| 2.2 | 次世代炉の開発動向..... | 4 |
| 2.2.1 | 第4世代炉のロードマップ..... | 4 |
| 2.2.2 | 次世代炉・第4世代炉への主要国の取り組み概要..... | 5 |
| 2.2.3 | 国際協力による次世代炉の開発..... | 7 |
| 2.2.4 | 我が国における次世代炉への取り組み（高速炉ロードマップを中心にした議論）.. | 8 |
| 2.3 | SMR の開発動向..... | 9 |
| 2.3.1 | 概要..... | 9 |
| 2.3.2 | 海外における SMR の展開..... | 10 |
| 2.3.3 | SMR の今後の展望..... | 11 |
| 2.4 | 研究炉の動向..... | 11 |
| 2.4.1 | 最近の研究炉の利用動向..... | 11 |
| 2.4.2 | 建設・計画中の研究炉..... | 12 |
| 2.4.3 | 運転中の研究炉..... | 12 |
| 2.4.4 | 米国の研究炉（VTR）計画..... | 13 |
| 3 | 求められる試験研究炉のニーズ調査..... | 16 |
| 3.1 | 学術利用、産業利用、医療利用等の各分野が試験研究炉に求めるニーズについて、地域の特性を踏まえた調査..... | 16 |
| 3.1.1 | 学術利用ニーズ..... | 16 |
| 3.1.2 | 医療利用ニーズ..... | 22 |
| 3.1.3 | 産業利用ニーズ..... | 22 |
| 3.2 | 試験研究炉、プラントシミュレータ等による人材育成及び現状と特質の調査..... | 30 |
| 3.2.1 | 概要..... | 30 |
| 3.2.2 | 米国・EU・日本の人材育成の需給動向から見る基本戦略..... | 30 |
| 3.3 | 海外の試験研究炉のニーズに係る現状調査..... | 43 |
| 3.3.1 | 米国現地調査先と調査項目..... | 43 |
| 3.3.2 | 調査の成果概要..... | 43 |
| 3.3.3 | 米国現地調査のまとめ..... | 46 |
| 4 | 試験研究炉の運営体制の検討..... | 77 |
| 4.1 | 想定される運営主体や利用者組織からの意見聴取..... | 77 |
| 4.1.1 | 運営体制の構築における重要な視点..... | 78 |
| 4.1.2 | コンソーシアム参加・形成に関する条件や連携上の課題..... | 79 |
| 4.1.3 | 新たな試験研究炉を利用する場合の意見..... | 80 |
| 4.2 | 建設／運転時の運営体制の検討..... | 81 |
| 4.2.1 | 事業手法における基本的役割分担と連携可能性..... | 81 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.2.2 | 事例研究：東北放射光施設グランドデザインと構想 | 82 |
| 4.2.3 | 運営体制の検討における想定条件 | 87 |
| 4.2.4 | 試験研究炉プロジェクトの運営段階における必要機能 | 88 |
| 4.2.5 | 規模別・機能別の連携の在り方（案） | 89 |
| 4.3 | 運営体制を整備する際の留意事項、手続き等の調査 | 92 |
| 4.3.1 | コンソーシアムによるプロジェクト推進ロードマップ | 92 |
| 4.3.2 | 初期段階におけるコンソーシアム・第1段階 | 94 |
| 4.3.3 | 初期段階におけるコンソーシアム・第2段階 | 95 |
| 4.3.4 | 設計・建設段階におけるコンソーシアム・第3段階 | 96 |
| 5 | 試験研究炉の建設開始に必要なとなる諸事項の整理 | 98 |
| 5.1 | 「もんじゅ」サイトの地理的状況調査 | 98 |
| 5.1.1 | もんじゅサイト周辺の地質構造と活断層の調査 | 98 |
| 5.1.2 | もんじゅサイト内の地質構造 | 102 |
| 5.1.3 | ⑦もんじゅ原子炉施設場所の地理的状況の調査 | 107 |
| 5.1.4 | ④荷揚岸壁と⑥山側資材置場及び⑧焼却炉場所の地理的状況の調査 | 111 |
| 5.1.5 | もんじゅサイトの津波の評価 | 113 |
| 5.1.6 | サイトスペースから見た試験研究炉の設置可能性の検討 | 115 |
| 5.1.7 | もんじゅサイトに試験研究炉（低出力炉＋臨界実験装置）を設置する場合の検討... | 123 |
| 5.1.8 | もんじゅサイトに試験研究炉（中出力炉）を設置する場合の検討 | 129 |
| 5.1.9 | もんじゅサイトに試験研究炉を設置する場合の土木工事の検討 | 134 |
| 5.1.10 | まとめ | 139 |
| 5.2 | 地理的状況を踏まえた建設費用・年数、見込まれる組織人員等炉型選定に必要なとなる情報の調査 | 141 |
| 5.2.1 | 研究炉の建設費の評価 | 141 |
| 5.2.2 | 組織人員の算出 | 145 |
| 5.2.3 | 試験研究炉管理に関する諸元のまとめ | 147 |
| 5.3 | メーカー等建設主体からの意見聴取 | 148 |
| 5.3.1 | 各社の原子力事業の概要と研究炉等の建設実績 | 148 |
| 5.3.2 | 試験研究炉への取り組みや原子炉施設の建設経験からの助言 | 150 |
| 5.3.3 | もんじゅサイトに試験研究炉を建設する際に考慮すべき点 | 150 |
| 5.4 | 試験研究炉に求められる機能 | 151 |
| 5.5 | 試験研究炉の候補 | 153 |
| 5.6 | もんじゅサイトの試験研究炉の選定に関するケーススタディ | 161 |
| 6 | 調査のまとめ | 170 |
| 6.1 | 国内外の原子力を取り巻く状況 | 170 |
| 6.1.1 | 調査結果 | 170 |
| 6.1.2 | 今後の取り組み課題 | 170 |
| 6.2 | 求められる試験研究炉のニーズ調査 | 171 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.2.1 | 調査結果..... | 171 |
| 6.2.2 | 今後の取り組み課題..... | 172 |
| 6.3 | 試験研究炉の運営体制の検討..... | 172 |
| 6.3.1 | 検討結果..... | 172 |
| 6.3.2 | 今後の取り組み課題..... | 173 |
| 6.4 | 試験研究炉の建設開始に必要な諸事項の整理..... | 173 |
| 6.4.1 | 「もんじゅサイト」の地理的状況調査..... | 173 |
| 6.4.2 | 地理的状況を踏まえた建設費用・年数、見込まれる組織人員等炉型選定に必要な情報の調査..... | 174 |
| 6.4.3 | メーカー等建設主体からの意見聴取..... | 174 |
| 6.4.4 | 利用ニーズに対応した機能・規模のケーススタディ..... | 175 |
| 6.5 | 次年度の調査..... | 175 |
| 7 | 外部有識者委員からの意見..... | 176 |

目次

| | | |
|--------|---|-----|
| 図 2-1 | 2017 年の世界の発電..... | 3 |
| 図 2-2 | 2050 年までの世界の原子力発電設備容量の予測..... | 4 |
| 図 2-3 | 第 4 世代原子炉のロードマップ..... | 5 |
| 図 2-4 | 第 4 世代原子力システム国際フォーラム (GIF) の加盟国と分担..... | 5 |
| 図 2-5 | 海外における運転中の研究炉推移..... | 12 |
| 図 2-6 | 米国の原子力開発ロードマップ..... | 13 |
| 図 2-7 | PRISM 炉とマイクロ炉の概念図..... | 14 |
| 図 2-8 | VTR 炉心の概念図..... | 15 |
| 図 3-1 | 企業における中性子ビームの利用例..... | 24 |
| 図 3-2 | 原子力を支える人材の階層化..... | 33 |
| 図 3-3 | e ラーニングにおける情報交換の基本要素..... | 36 |
| 図 3-4 | 京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA) を用いた炉物理実験教育の受講学生数..... | 38 |
| 図 3-5 | 我が国における原子力工学関係の入学者数の推移..... | 38 |
| 図 3-6 | プラントメーカーの採用実績..... | 39 |
| 図 3-7 | 電力事業者の採用実績..... | 39 |
| 図 3-8 | 原子力企業合同説明会への参加学生数の推移..... | 40 |
| 図 3-9 | 人材育成の中核拠点の基本機能図..... | 41 |
| 図 4-1 | 東北放射光施設グランドデザイン及び地域構想による推進の流れ..... | 84 |
| 図 4-2 | 試験研究炉の運営段階における必要機能と関連業務..... | 89 |
| 図 4-3 | コンソーシアムによる今後の進め方のイメージ (ロードマップ (案)) | 93 |
| 図 4-4 | 第 1 段階：推進会議 (研究機関と大学群) イメージ..... | 94 |
| 図 4-5 | 第 2 段階：推進協議会 (地元連合：地元産学官連携コンソ) イメージ..... | 95 |
| 図 4-6 | 第 3 段階：構想推進主体 (研究機関＋大学群＋産業・企業) イメージ..... | 96 |
| 図 5-1 | 敦賀半島周辺の地形ともんじゅサイト..... | 98 |
| 図 5-2 | 敦賀半島周辺の地質図 (産総研の日本シームレス地質図より) | 99 |
| 図 5-3 | 敦賀半島周辺の活断層..... | 99 |
| 図 5-4 | もんじゅサイト地下にある活断層..... | 100 |
| 図 5-5 | もんじゅサイトの基準地震動..... | 101 |
| 図 5-6 | 敦賀半島西方ヶ岳南西部の L-1、L-2 リニアメント | 102 |
| 図 5-7 | もんじゅサイトと試験研究炉の設置検討場所..... | 103 |
| 図 5-8 | もんじゅサイトの地質..... | 104 |
| 図 5-9 | もんじゅサイトの山側斜面の河成段丘 (盛土前) | 104 |
| 図 5-10 | もんじゅサイトの起伏図と試験研究炉設置検討場所の周辺斜面..... | 105 |
| 図 5-11 | ④荷揚岸壁、⑥山側資材置場と⑧焼却炉場所、及び⑦原子炉建屋背後斜面の斜面形状 (施設境界と斜面法尻の距離を合わせて一つの図にしたもの) | 105 |
| 図 5-12 | もんじゅ原子炉建屋背後斜面の地質断面 (左図) | 106 |
| 図 5-13 | もんじゅ山側盛土斜面の地質断面 (右図) | 106 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 図 5-14 | もんじゅサイトの土砂災害危険区域（「土砂災害危険箇所、警戒区域・地質図-ArcGIS」より） | 106 |
| 図 5-15 | もんじゅ原子炉施設基礎岩盤の破砕帯の位置..... | 108 |
| 図 5-16 | もんじゅサイト内破砕帯の調査結果..... | 109 |
| 図 5-17 | もんじゅサイト内破砕帯の追加調査位置..... | 110 |
| 図 5-18 | もんじゅサイト西側を通る白木-丹生断層（活断層） | 111 |
| 図 5-19 | もんじゅサイトの破砕帯と白木-丹生断層及びL-2 リニアメント北端部 | 111 |
| 図 5-20 | ⑥山側資材置場と⑧焼却炉場所のボーリング位置（青枠の位置） | 113 |
| 図 5-21 | ⑧焼却炉場所南側の山地／段丘境界の破砕帯の分布 | 113 |
| 図 5-22 | もんじゅサイトの津波評価..... | 114 |
| 図 5-23 | ④荷揚場壁にNCA、UTR-KINKI 及び TTR-1 の施設を重ねた場合 | 118 |
| 図 5-24 | ⑦もんじゅ原子炉施設に JRR-3 施設を重ねた場合 | 119 |
| 図 5-25 | ⑧焼却炉場所に試験研究炉（臨界実験装置と低出力研究炉）を設置する場合の必要な敷地広さ | 120 |
| 図 5-26 | ⑥山側資材置場と⑧焼却炉場所に試験研究炉（中出力研究炉）を設置する場合の必要な敷地広さ | 120 |
| 図 5-27 | ⑥山側資材置場と⑧焼却炉場所に試験研究炉（JRR-3 相当）を設置する場合の必要な敷地広さ | 121 |
| 図 5-28 | ⑥山側資材置場と⑧焼却炉場所に試験研究炉（JMTR 相当）を設置する場合の必要な敷地広さ | 121 |
| 図 5-29 | 低出力研究炉と臨界実験装置を併設する場合の施設配置（例） | 124 |
| 図 5-30 | 低出力研究炉と臨界実験装置を併設する場合の施設イメージ | 125 |
| 図 5-31 | ⑧焼却炉場所に試験研究炉（低出力研究炉＋臨界実験装置）を設置する場合の施設配置（Google Earth の写真に重ねた図） | 126 |
| 図 5-32 | ⑧焼却炉場所に試験研究炉（低出力研究炉＋臨界実験装置）を設置する場合の施設配置（平面図） | 126 |
| 図 5-33 | ⑧焼却炉場所に試験研究炉（低出力研究炉＋臨界実験装置）を設置する場合の設置配置（断面図） | 127 |
| 図 5-34 | ⑥山側資材置場に試験研究炉（低出力研究炉＋臨界実験装置）を設置する場合の設置配置（平面図） | 128 |
| 図 5-35 | ⑥山側資材置場に試験研究炉（低出力研究炉＋臨界実験装置）を設置する場合の設置配置（断面図） | 128 |
| 図 5-36 | もんじゅサイトに設置する試験研究炉（中出力研究炉）の主要施設（想定） | 130 |
| 図 5-37 | ⑥山側資材置場に試験研究炉（中出力研究炉）を設置する場合の施設イメージ | 130 |
| 図 5-38 | 現状の⑥山側資材置場（EL+132m）の状態..... | 132 |
| 図 5-39 | ⑥山側資材置場に試験研究炉（中出力研究炉）を設置する場合の施設配置（Google Earth の写真に重ねた図） | 132 |
| 図 5-40 | ⑥山側資材置場に試験研究炉（中出力研究炉）を設置する場合の施設配置（平面図） | 133 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 図 5-41 | ⑥山側資材置場に試験研究炉（中出力研究炉）を設置する場合の施設配置（断面図） | 133 |
| 図 5-42 | もんじゅ原子炉建屋背後斜面耐震裕度向上工事と試験研究炉の設置土木工事 | 138 |
| 図 5-43 | 試験研究炉出力と建設費の関係の例..... | 142 |
| 図 5-44 | 高出力まで拡張したコスト評価のグラフ | 143 |
| 図 5-45 | 中出力を中心に近似したコスト評価のグラフ | 144 |
| 図 5-46 | 試験研究炉の出力とコストの概算..... | 145 |
| 図 5-47 | 試験研究炉の出力と運転員数の近似..... | 146 |
| 図 5-48 | 試験研究炉の出力と年経費の近似..... | 146 |
| 図 5-49 | 東芝エネルギーシステムズ（株）組織図..... | 148 |
| 図 5-50 | 三菱重工業（株）組織図..... | 149 |
| 図 5-51 | 日立 GE ニュークリア・エナジー（株）組織図..... | 149 |
| 図 5-52 | 京大 複合原子力科学研究所 臨界実験装置（KUCA） | 153 |
| 図 5-53 | 臨界実験装置、シミュレータ、炉外伝熱流動試験装置の併設ケース | 154 |
| 図 5-54 | Na 冷却高速パルス炉 IRB-2 の炉心近傍での減速材配置図 | 155 |
| 図 5-55 | Na 冷却高速パルス炉 IRB-2 のパルス化と主要パラメータ | 155 |
| 図 5-56 | Na 冷却高速パルス炉 IRB-2 の中性子利用研究や産業応用のレイアウト | 156 |
| 図 5-57 | 米国ノースカロライナ大学 PULSTAR 炉の炉心構成 | 156 |
| 図 5-58 | HOR 炉のビームポート | 158 |
| 図 5-59 | HOR 炉の小角散乱試験装置 | 158 |
| 図 5-60 | 京都大学複合原子力科学研究所で運転中の KUR 炉室 | 159 |
| 図 5-61 | KUR の炉心 | 159 |
| 図 5-62 | GE-HITACHI 社の PRISM 炉 | 160 |
| 図 5-63 | 試験研究炉の使用目的と今後の運転・設置計画 | 168 |

表目次

| | | |
|--------|--|-----|
| 表 3-1 | 学術研究ニーズの聞き取り調査結果の概要..... | 17 |
| 表 3-2 | 大電力半導体の種類と応用先..... | 28 |
| 表 3-3 | 米国原子力人材の需要数の変化..... | 31 |
| 表 3-4 | 米国内の主要組織の専門別人材..... | 31 |
| 表 3-5 | 原子力工学系の修了学生の推移..... | 32 |
| 表 3-6 | EU の原子力系専攻生と履修生の数の概要 | 34 |
| 表 3-7 | EU での人材需要の内訳 | 34 |
| 表 4-1 | 本事業適用の最適手法と役割分担及び連携可能性..... | 81 |
| 表 4-2 | 東北放射光施設推進協議会の概要..... | 83 |
| 表 4-3 | 地域の推進主体の設立に関する取り組み..... | 86 |
| 表 4-4 | 運営体制検討における想定条件..... | 88 |
| 表 4-5 | 規模別・機能別の連携の在り方（案） | 90 |
| 表 4-6 | 整備計画・推進の役割分担（想定案） | 92 |
| 表 5-1 | 選定された耐震設計検討用地震..... | 100 |
| 表 5-2 | サイトスペースから見た試験研究炉の設置可能性..... | 122 |
| 表 5-3 | 試験研究炉（低出力炉＋臨界実験装置）の施設名称と想定外形寸法..... | 125 |
| 表 5-4 | 試験研究炉（中出力研究炉）の施設名称と想定外形寸法..... | 131 |
| 表 5-5 | 山側資材置場に試験研究炉を設置する場合の土木工事量..... | 135 |
| 表 5-6 | 焼却炉場所に試験研究炉（低出力研究炉と臨界実験装置）を設置する場合の土木工事量..... | 137 |
| 表 5-7 | 代表的な試験研究炉の建設費..... | 143 |
| 表 5-8 | 韓国と日本、オランダでの発電炉建設費の比較..... | 145 |
| 表 5-9 | 建設費などの算出結果..... | 147 |
| 表 5-10 | 出力別建設期間の例..... | 147 |
| 表 5-11 | 試験研究炉に要求される主要な機能..... | 151 |
| 表 5-12 | PULSTAR 炉の利用可能な中性子束とビームポート | 157 |
| 表 5-13 | 試験研究炉のケーススタディ | 162 |
| 表 5-14 | 将来を見据えた研究炉の主な研究開発..... | 167 |

1 はじめに

平成 28 年末に決定された政府方針（「もんじゅ」の取扱いに関する政府方針）において、「もんじゅ」については原子炉としての運転再開はせず、今後、廃止措置に移行することが決定した。一方で、将来的には「もんじゅ」サイトを活用し、新たな試験研究炉を設置することで、もんじゅ周辺地域や国内外の原子力関係機関・大学等（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づけることが決定された。

このことから、平成 29 年度には、大学・研究機関等が参画し、建設・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当たり、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・研究機関など参画するコンソーシアムの構築体制等はどうのような方式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。

平成 29 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などについて、文献調査、原子力関係機関等への聞き取り調査、現地調査等を実施し、報告書にまとめた。

今年度は上記調査結果や文部科学省に設置された原子力研究開発基盤作業部会での議論を踏まえ、試験研究炉の外部利用ニーズを充足するためのスペックなどの概念設計に向けて、外部有識者で構成した委員会を開催し調査を行うこととした。

今年度の調査・検討項目は、

- ① 求められる試験研究炉のニーズ調査：昨年度の調査を踏まえ、学術利用、産業利用、医療利用等の各分野が試験研究炉に求めるニーズについて、地域の特性を踏まえた調査、試験研究炉、プラントシミュレータによる人材育成の現状と特質の調査及び海外の試験研究炉のニーズに係わる現状調査
- ② 試験研究炉の運営体制の検討：想定される運営主体や利用者組織からの意見聴取及び運営体制を整備する際の留意事項、手続き等の調査
- ③ 試験研究炉の建設開始に必要な諸事項の調査：「もんじゅ」サイトの地理的状況調査及びメーカー等建設主体からの意見聴取

などであり、これらの調査、検討結果について、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 3 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取りまとめたものである。

2 国内外の原子力を取り巻く状況

国内外の原子力を取り巻く状況について、国際的な原子力関係機関や国内政府関係機関の情報等をもとに国内外の動向を俯瞰し、その結果を以下にまとめた。

2.1 IAEA 技術年報などに見る世界の原子力動向^{(1),(2),(3)}

【全体的な動向】

2017年12月末の世界の原子力発電設備容量は、4基の新設により1.2GWe増加し、392GWeとなった。IAEAの高成長ケースの予測では、2030年には511GWe、2050年には748GWeに増えるとしている。また、原子力発電に伴う使用済燃料は、排出された約4分の1が再処理され多くは貯蔵施設で保管されており、将来に向けて地層処分施設の検討を行っている状況である。

また、現行の原子力発電プラントの出力増加や、新型炉の開発も行われ高速炉やガス炉に関する技術成果も蓄積されてきている。さらに、50基以上の中小型炉が精力的に開発されている。

研究炉については、238基が56か国で運転され、医療、工業、人材育成、原子力技術の開発に利用され、さらに7か国では新規の建設が行われ、また多くの国々で導入の検討が行われている。研究炉の国際的な課題である、高濃縮ウラン燃料の使用削減は2017年までに97基の研究炉の低濃縮化が進められている。また、診断用の放射性医薬品の原料である⁹⁹Moの製造に関して、将来に向けての安定供給の枠組みについて関係国で会合を開くことにしている。

【主要国の発電プラントの建設状況】

新規建設が活発に行われている中国では、2017年末現在、38基が運転中、19基が建設中、さらに2030年までに30基を建設する予定である。

現在建設中のフィンランドのオルキルオト発電所3号機は運転認可の段階で、2019年中には運転に入る予定である。パキスタンのカラチ発電所では中国製の発電プラントの建設工事が進展しており、米国のボーグル3、4号炉ではウェスチングハウス社がAP-1000（米国PWR）を建設中で、それぞれ2021年と2022年の完成を目指している。

今後の建設計画又は建設に着手した発電プラントの最近の動きを以下に列挙する。

- ・2017年3月、ハンガリーのパックス2号が建設許可を取得
- ・イランのブシャール2号としてロスアトムVVER-1000建設に着手
- ・アルゼンチンの国営企業と中国CNNC（中国核工業集团公司）とがCANDU炉（720MWe）の建設契約を締結。華龍（Hualong）炉（1,000MWeのフランスEPR型の中国版）の建設計画（2020年に開始）を発表
- ・2017年8月、インド政府がクダングラム5、6号にロスアトムVVER-1000、2基を建設する契約を締結
- ・2017年10月、南アフリカのダインフォーテンに4,000MWeの発電所建設のための環境調査を行うと公表
- ・米国で建設をしてきたサマー3、4号炉は経済的な理由により延期すると発表

【運転中の発電炉】

2017年末で運転中の448基の発電プラントのうちの約47%は運転開始後30年～40年経過し、17%は40年を経過しているため、長期間運転と経年化対策のプログラムが実施されている。その中で、フランスのEDFは10年計画として「経年化管理プログラム」を策定し、発電所の修復や安全系の改修を計画的に進めている。また、米国においては「プラント更新プログラム」に基づき、99基の原子力発電所のうち86基が60年運転を目指して許可申請を準備中であり、NRCは80年運転に向けたガイドラインを2017年7月に発行した。

日本においては、2019年2月現在、60基の原子力発電所のうち、19基が廃炉となり、9基は新規規制基準をクリアして再稼働（九電川内1、2号、玄海3、4号、四電伊方3号、関西高浜3、4号、大飯3、4号）し、6基が設置変更許可済、12基が再稼働申請中で、残りの14基が未申請の状況である。

【世界の原子力発電の概要】

世界全体の発電量のうち、約10%は原子力による発電であり60基の発電プラントを新規に建設中である。さらに150～160基の建設計画があり、これが実現すれば現在の発電量の約半分に相当する電力が供給されることになる。2017年における世界の発電量の内訳は図2-1に示すとおりである。

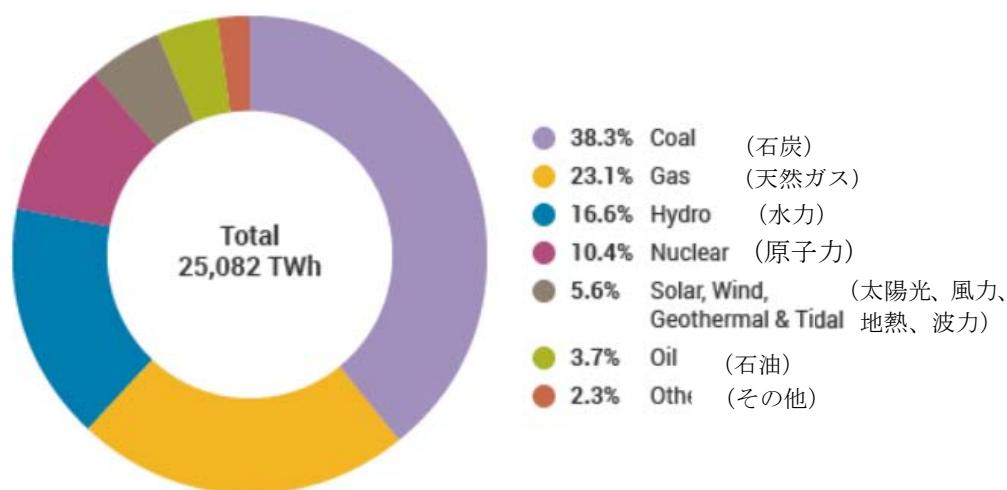


図 2-1 2017年の世界の発電⁽²⁾

原子力発電に限っていえば、2017年の発電量は2,487TWhで2015年より10TWh増えている。そのうち、自国全発電量の4分の1以上を原子力発電で賄っている国は16か国で、中でもフランスは4分の3を、ハンガリーなどは約半分、ベルギーやチェコなどは3分の1を原子力発電で供給している。また米国やロシアなどは5分の1程度である。

【原子力発電の今後の展望】

2018年のIAEAの見通しによれば、原子力発電の設備容量は、高成長ケースでは、2030年には511GWe（現在の約1.3倍）、2050年には748GWe（現在の約1.9倍）と予測しており、低成長ケースでは、現在の発電設備容量は2040年までは漸減するが、2050年までには現在レベルに復帰するとしている（図2-2）。このためには欧米で2030年前後に運転寿命を迎える発電炉が増えるため、新規プラントの建設は急務であるとしている。また、原子力は地球温暖化防止に貢献することもあり、高成長ケースの見通しは、他の原子力国際機関（WNAやOECD/NEA、IEA）もほぼ同様な傾向である。しかし低成長ケースでは機関ごとで推定値のばらつきは大きく、近未来の世界における社会経済のバランスの不確実性が反映されているものと考えられる。

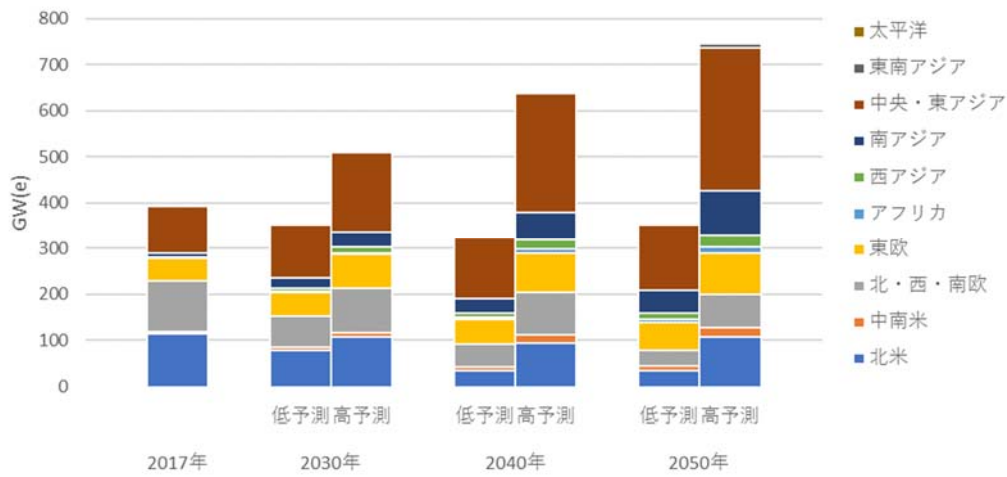


図 2-2 2050年までの世界の原子力発電設備容量の予測³⁾

日本においては、2015年の気候温暖化防止のための温室効果ガスの大幅削減を目指す2015年のCOP21（国連気候変動枠組条約第21回締約国会議）で合意されたパリ協定に基づき、日本のCO₂排出量は、2030年度までに2013年度比で26%減とし、2050年までに更なる低減を目指している。このため、2018年7月に見直されたエネルギー基本計画において、CO₂排出が少ない原子力発電は重要なベースロード電源と位置づけ、2030年の総発電電力量の22～20%を原子力発電で賄うとしている。現在、新規規制基準対応を終えて運転再開をした原子力発電所は9基であるが、更なる運転再開が望まれる。

2.2 次世代炉の開発動向

2.2.1 第4世代炉のロードマップ

1990年代の始めから、IAEAなどの呼び掛けにより次世代の発電炉の開発を効率良く行う目的で、関係諸国により次世代炉に向けての開発プログラムが制定された。

発電用原子炉は、図2-3のロードマップに示すように、導入期、黎明期の発電炉を第1世代炉、それらを各国で改良・開発された炉を第2世代炉、その後経済性向上を目指した炉を第3世代炉とし、2010年頃までの原子力カルネッサンスと呼ばれた時期以降、第3世代炉の改良普及を目指した発電炉を第3+世代炉として導入を図ってきた。一部には、この第3+世代炉を次世代炉と呼ぶこともある。



図 2-3 第 4 世代原子炉のロードマップ⁽⁴⁾

第 4 世代炉については、国際的な共同・連携の枠組みを第 4 世代原子力システム国際フォーラム (GIF) として構築し、主要国が中心になって開発に取り組んでいる。この分担を図 2-4 に示す。この枠組みでは、6 種類の候補概念について開発に取り組むことになっているが、EU は全ての炉型の開発に、日本は熔融塩炉 (MSR) を除く 5 炉型、ロシアは超高温ガス冷却炉を除く炉型を、米国と中国は超高温ガス冷却炉とナトリウム冷却高速炉などを中心に取り組んでいる。

第4世代原子力システム国際フォーラム (GIF)

▶ 国際協力による、第四世代炉の開発も進捗。特に、ナトリウム冷却高速炉は、各国の協力により、安全設計基準の国際標準化なども含め、実用化に向けた取り組みが進展。

| 候補概念 | 参加国 |
|------------------|---|
| 超高温ガス冷却炉 (VHTR) | 日本、米国、フランス、カナダ、ロシア、中国、韓国、南アフリカ、英国、米国、スイス、ユーラトム、中国、ロシア |
| ナトリウム冷却高速炉 (SFR) | 日本、米国、フランス、カナダ、ロシア、中国、韓国、南アフリカ、英国、米国、スイス、ユーラトム、中国、ロシア |
| 超臨界圧水冷却炉 (SCWR) | 日本、米国、フランス、カナダ、ロシア、中国、韓国、南アフリカ、英国、米国、スイス、ユーラトム、中国、ロシア |
| ガス冷却高速炉 (GFR) | 日本、米国、フランス、カナダ、ロシア、中国、韓国、南アフリカ、英国、米国、スイス、ユーラトム、中国、ロシア |
| 鉛冷却高速炉 (LFR) | 日本、米国、フランス、カナダ、ロシア、中国、韓国、南アフリカ、英国、米国、スイス、ユーラトム、中国、ロシア |
| 熔融塩炉 (MSR) | 日本、米国、フランス、カナダ、ロシア、中国、韓国、南アフリカ、英国、米国、スイス、ユーラトム、中国、ロシア |

<目的>
諸外国の協力により、以下の特長を持つシステムとして、第4世代炉の開発を進める。(2030年頃の実用化を目指す)
① 持続可能性
② 経済性
③ 安全性と信頼性(敷地外緊急時退避不要等)
④ 核拡散抵抗性と核物質防護

<参加国>
▶ 現在は12の国と1機関が基本協定(GIF憲章)を締結。
(アルゼンチン、ブラジル、カナダ、フランス、日本、韓国、南アフリカ、英国、米国、スイス、ユーラトム、中国、ロシア)

▶ 実際の協力活動への正式参加には枠組協定(FA: Framework Agreement)への署名が必要であり、各国は、それぞれの炉型ごとに、協定を結び、研究開発活動に参加。

図 2-4 第 4 世代原子力システム国際フォーラム (GIF) の加盟国と分担⁽⁵⁾

2.2.2 次世代炉・第 4 世代炉への主要国の取り組み概要

ここでは、2018 年後半以降に発行された国際機関の報告^{(1),(2),(6)}などを参照し次世代炉・第 4 世代炉に関する主な動きを炉型別に説明する。

[水冷却型炉]

- 水冷却型発電炉は、現在の原子力発電をリードしている炉型で約 17,000 炉年の発電実績があり、運転中の発電炉では 95%、新規建設中の発電炉の 58 基中 56 基が軽水炉である。2017 年には中国とパキスタンで 3 基が運転開始され、インドと韓国で新規に建設が始められた。最新の次世代炉を導入したのは UAE とベラルーシである。
- 最先端の軽水炉は、出力の大きい 1,000~1,700MWe クラスで、更なる規模の経済性を目指してより出力の増大を図る努力も見られる。また水冷却型発電炉の燃料サイクルを拡張し、インドでは 3 基の加圧水型重水炉 (PHWR)、高速炉及び国内に豊富にあるトリウムと低品位ウランを利用した先進型重水炉によるトリウムサイクル路線を考えている。中国では、天然ウランや減損ウランをカナダの重水炉 (CANDU 炉) で使う燃料サイクルも検討している。
- カナダでは重水を用いた超臨界炉の概念を検討中で、中国では海外炉 (EPR) を参考にした CSR1000 の国産化開発を終了している。
- EU では高性能 LWR に向けて、燃料のインパイル試験計画などを中国と共同で進めることを公表した。
- ロシアでは、中出力のロシア型加圧水型原子炉 (VVER) を使って高速炉心中性子による先端超臨界実験炉を検討している。

[高速炉]⁽⁶⁾

- 2017 年 6 月の第 3 回高速炉と関連燃料サイクル国際会議 (FR17 ロシア エカテリンブルグ) では、「次世代炉の持続可能な開発として数世代にわたってクリーンなエネルギーを保証し、廃棄物の発生抑制や燃料の節約の観点から、FBR を中心に据えた燃料サイクルは大きな貢献をする」という結論を発表している。
- 数々の先端的なナトリウム冷却高速炉 (SFR)、鉛、鉛-Bi 金属冷却高速炉 (LFR)、ガス冷却高速炉 (GFR) などが開発され、熔融塩型高速炉 (MSR) も長期的なオプションとして開発中である。
- 最も成熟した高速炉技術はナトリウム冷却高速炉 (SFR) で、すでに 420 炉年の実績がある。それらの開発に取り組んでいる国は、中国、フランス、ドイツ、インド、日本、ロシア、英国及び米国である。
- ロシアでは SFR の BN-800 が商用発電炉として 2016 年から運転中で多目的研究のための MBIR が BOR-60 に代わって 2020 年に稼働を開始予定で、重金属液体冷却炉 BREST-OD-300 も認可手続き中である。
- インドでは 500MWe の原型炉が完成し 2018 年には臨界に達し、同じサイトに 2 基の高速炉を建設する計画を公表した。
- 中国の鉛冷却の CLEAR-I は工学設計 (詳細設計) 段階で、2017 年には ADS のリファレンス炉として位置づけ、CFR-600 も詳細設計段階で 2025 年運転開始を計画している。
- 2016 年 12 月に日本は高速増殖原型炉もんじゅの廃止を決定したが、次世代炉型の開発は今後の日本のエネルギーミックスの中核と考え研究開発を続行している。
- ヨーロッパでは、フランスが原型炉 ASTRID を 2019 年までに設計完了という目標で、国際協力により開発を進めているが、出力規模等の見直しが検討されている。
- ベルギーでは鉛冷却の MYRRH を ADS のシステムとして 2024 年の運転開始を目処に建設中で

あるが、粒子加速器を除いた原子炉だけで運転する方式に切り替えた。

- ・スウェーデンでは鉛冷却の SEALER の事前ヒアリング申請をカナダと共同で行っている。この炉は 3~10MWe の「バッテリー炉」(マイクロ炉)であり、2021 年運転開始で 2025 年に商品化を目指している。また ALFRED を第 4 世代の鉛冷却炉 (LFR) として、ALLEGRO を第 4 世代のガス冷却実験炉として計画中である。
- ・米国では、テラパワー (Terra Power) 社が「トラベリング ウェーブ型炉」の炉心概念検討を終え、熔融塩炉 (MSR) として開発中である。ウェスチングハウス社も鉛冷却の 450MWe の小型炉 (SMR) を開発している。

[ガス炉]

- ・英国は、14 基の第 3 世代のガス冷却炉を運転中で、寿命延長を検討している。
- ・多くの国々では高温ガス炉 (HTGR) を開発中で、耐熱性が高いセラミック粒子状燃料やヘリウムガス冷却で工学的安全系は少なく、かつ 700°C で運転できることからプロセス熱応用にも利用できることに関心が寄せられている。
- ・中国では、高温流動床型炉 (HTR-PM) の建設が終了し 200MWe クラスの発電所 2 基が 2018 年に運転を開始した。また 600MWe の商用炉の設計が完成し 5 か所の候補地を検討中である。
- ・サウジアラビアも HTGR を国家プロジェクトとして採用を決定し、中国との技術協力提携を決定した。
- ・2017 年に、ポーランドエネルギー大臣は HTGR によるプロセス熱利用により現在の化石エネルギーの 6,500MW を徐々に原子力に代えていくという提言書を受領した。これには 10MWt のヨーロッパ製のガス冷却炉を導入することや人材育成の計画も含まれている。
- ・インドネシアは、流動床方式の 10MWt 実験炉の初期計画を発表し財源確保を行った。
- ・日本の 30MWt の HTTR は、再稼働に向け新規制基準対応を行っている。
- ・米国では、将来に向けた 3 重被覆燃料による HTGR の認可に向けて活動中である。
- ・EU の GEMINI+プログラムでは、南アフリカの HTR の経験を反映すべく、韓国やロシアと共同で基本的な技術開発の取り組みを開始した。

2.2.3 国際協力による次世代炉の開発

- ・多くの国々では国際的な次世代原子炉の開発枠組みが発足し、エネルギー需要対応、ウラン燃料の確保、使用済燃料のリサイクルと地層処分、発電効率向上、核拡散防止と安全性向上などを目指している。
- ・国際的な枠組みである INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles : 革新的原子炉及び燃料サイクル国際プロジェクト) が 2000 年に IAEA に設立され、現在では 41 か国 1 機関が参加している。
- ・オーストラリアは 2017 年に第 4 世代原子炉の開発枠組みである GIF に参加し、次世代炉の開発への取り組みを開始した。参加国は、前項の図 2-4 で示した 12 か国+1 機関に加え 13 か国になり、毎年開催される GIF-IAEA 会合では経済性や核拡散防止について検討が行われている。
- ・2016 年には”Safety Design Guidelines on Safety Approach and Design Conditions for Generation IV Sodium-cooled Fast Reactor Systems”が発行され、この指針は高速炉のベンダーや開発者に向けて反応度や熱除去などの機能喪失についての安全設計ガイドラインを提供している。

- ・ヨーロッパの SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform) は、EU での計画の議論をまとめ、その中でナトリウム冷却炉の ASTRID 計画を進めており、規模を縮小して 2020 年にフランス地区への建設を考えている。また現在、鉛冷却炉の ALFRED の建設を進めている。MYRRHA の代替には ALLEGRO を考えている。
- ・最近の国際的な設計ロードマップの検討では、2050 年に向けた研究開発計画の見直しが進められている。

2.2.4 我が国における次世代炉への取り組み（高速炉ロードマップを中心にした議論）

日本においては、現在は軽水炉の再稼働に向けた努力が続けられ次世代炉への取り組みがやや低調に見られているが、関係者の間では将来に向けての議論は継続している。最近、高速炉のロードマップが公表された⁷⁾。

2016 年 12 月の原子力関係閣僚会議で「もんじゅ」は廃止措置に移行することが決定され、同時に日本における「高速炉開発の方針」も決定された。その方針として開発の 4 原則が提示され、2018 年 12 月に同会議で戦略ロードマップが決定された。この要点は、以下のとおりである。

〈開発の 4 原則〉

- ▶原則①：国内に蓄積した技術・知見・人材の徹底活用（国内資産の活用）
- ▶原則②：国際ネットワークを利用した最先端知見の吸収（世界最先端の知見の吸収）
- ▶原則③：費用対効果の高い、コスト効率的な開発の推進（コスト効率性の追求）
- ▶原則④：国、メーカー、電力、研究機関が密に連携し、責任関係を一元化した体制（責任体制の確立）

〈高速炉開発の意義〉

①資源の有効利用、②高レベル放射性廃棄物の減容、③有害度低減が重要であること、に合わせて、米国や英国等では、高速炉でプルトニウムを使うことで保有するプルトニウムを適切な量にしていく「プルトニウムマネジメント」を主目的とした炉の開発が行われるなど、高速炉の意義が多様化している。

〈10 年の開発スケジュール〉

ウラン資源は、2014 年時点の世界のウラン需要からみて 135 年分に当たる資源量が、地球上に存在する。ロードマップでは、ウラン資源の現状等の政策環境・社会情勢を踏まえ、高速炉が本格的に利用され始めるのは 21 世紀後半になる可能性がある。そのため 21 世紀半ば頃の適切なタイミングで現実的なスケールの高速炉が運転開始されることが期待されるとしている。当面の 10 年では、最初の 5 年で多様な技術開発を推進し、その中から絞り込んだ技術を後半の 5 年間で開発するという行程を定めている。

〈研究の対象になる技術〉

ロードマップでは、これまでに培った技術・人材も最大限活用しながら、「多様な高速炉技術の可能性を追求する」こととしている。

「もんじゅ」は、ナトリウムを冷却材に使う「ナトリウム冷却高速炉」で、同様の高速炉はフランスやロシア、米国などで研究開発がされている（ただし、日本、フランス、ロシアは「MOX燃料」を、米国は「金属燃料」を使用）。中国やインドも、現在はMOX燃料を使ったナトリウム冷却型の研究が中心である。高速炉にはこの他「熔融塩」を使う熔融塩高速炉や水を冷却材に使用するタイプなどがある。ロードマップでは、「もんじゅ」などで培った技術・人材も最大限活用し、ナトリウム冷却高速炉に絞らず、さまざまなタイプの高速炉についても可能性を追求していく必要があると提示している。

〈開発体制〉

日本における高速炉の研究開発は、これまでMOX燃料を使用するナトリウム冷却型原子炉に絞って、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）が担当してきた。世界の動向では、民間を研究開発の主体として、競争的にさまざまな技術を開発するというスタイルを確立しつつある国もあり、今回のロードマップでは、日本も国と民間の役割を明確化し、世界との競争に勝つためにイノベーションを促していくことが示された。

今後は、各メーカーが各自の知恵や創意工夫を活かし、主体的に技術開発を推進していく。競争環境下に置くことで、メーカー同士が切磋琢磨し、研究開発が更に活発化することを狙い、そこからの技術の選択は、将来的なユーザーである電力事業者などが行うこととしている。

国は、こうした開発に関して方向性を提示し、①熟度に応じた財政支援や、②JAEAによる開発基盤の提供、③規制への適応を念頭に置いた安全性追求などを通じて、民間の主体的な取り組みを後押ししていくとしている。

これらの大きなポイントに加えて、今後の開発に当たってはフランスや米国などの2国間及び多国間でのネットワークを活用し、国際協力を行っていくことも示された。

今後も、高速炉実用化のための技術基盤の確立とイノベーションの促進に、国内外一体となって取り組んでいく。

2.3 SMRの開発動向^{(8),(9)}

2.3.1 概要

2017年に開催された第6回IAEA原子力安全関係国際会議では、次世代炉とともに多くのSMRも紹介され、各国の関係者の間での関心の高さが示された。ここでは、国際機関から発行された資料^{(8),(9)}を基に動向の概要を述べる。

小型炉の定義について、IAEAは300MWe以下を小型炉（Small (Sized) Reactor）、700MWeまでを中型炉（Medium (Sized) Reactor）とし、特に15MWe以下の炉をVSR（Very Small Reactor）と定義しこのVSRの一部を「マイクロ炉」と呼んでいる。これらの小型炉、中型炉を総称として「SMR」（Small and Medium Sized Reactor）と呼んでいる。

また、小型モジュール原子炉もSMR（Small Modular Reactor）と呼ばれ、最近の文献ではこの定義よる解説が多いため、以下SMRをSmall Modular Reactorとして用いる。

SMRの特長について様々な観点から論じられているが、代表的な項目を整理すると以下のようなになる。

- ・ 安全性確保に新しい概念を導入できる。
- ・ 部品、設備、システムなどの数や数量を減らすことができる。
- ・ 初期費用が低く、投資に負担が少ない。
- ・ 発電の柔軟性が高く、再生可能エネルギーのバックアップ、小規模ネットワークへの適用などが可能で、かつ負荷追従も可能。
- ・ 送電のインフラへの負担が少なく、かつ分散化にも有効。
- ・ 複数の並列化により、点検・故障対応などによる停止期間が減少し、連続的に送電可能。
- ・ 工場や施設の併熱供給や海水淡水化などに適切な規模が選定でき、大規模に必要な場合も並列化により対応可能。
- ・ モジュール化による建設の容易さと廃止措置の容易さでプラントライフサイクルコストを抑えることができる。
- ・ 中規模の並列生産により、建設コストを下げる可能性もある。
- ・ 変動費は大規模原子炉より高くなる可能性もあるが、運転や燃料管理上の規制緩和により同等にすることも可能。

多くの国々では300MWeまでの出力のSMRに関心を持ち、従来の大型発電炉に対してニッチ的な市場にも進出を検討している。具体的には、化石燃料発電の老朽化対策、分散電源、再生可能エネルギーとの連携などがある。また非発電分野では水素製造、海水淡水化、プロセス熱利用などである。また、SMRの安全性を強調し将来性のある原子炉であるとしているが、大規模発電所に比べると経済性の課題もあり、量産化、燃料利用の工夫、稼働率の画期的な向上などが議論されている。

2.3.2 海外における SMR の展開

SMRは、すでに50基以上が開発されていて建設に向けた準備をしている。アルゼンチンのCAREM-25（一体型PWR）は2019年の運転開始に備えていて、中国のHTR-PMは2018年に運転開始することになっている。またロシアのバージ搭載の2基のKLT-40SのPWRモジュール（35MWe）は2018年に認可がおりる予定であることなど、ここ数年の動きには目を離せない状況にある。

代表的な国別の動向を抽出すると以下のようなになる。

- ・ カナダの原子力安全局は、2026年にチョークリバーに建設を目指したSMRの事前申請書を受理した。また熔融塩炉も新しい選択肢とし、高温による効率向上、低圧力による安全性確保、廃棄物低減、高燃焼度の実現などが期待されている。多くの概念の中からエネルギーカナダ社のIMSR400（190MWe）が選択された。
- ・ 中国では、CNCC（中国核工業集团公司）がAP100型を2018年に建設を開始する計画を発表し、部品やシステムの製造を開始し、2022年に船用の原子炉の完成を目指している。上海原子力工学研究設計研究所は船舶炉CAP150とCAP200の概念設計を終了した。
- ・ フランスでは、EDFの率いるコンソーシアムがCEAの支援のもとに陸上ベースの150-170MWeの統合型PWRを開発し、海軍が潜水型原子炉Flexblueとして160MWeの開発を引き継いだ。
- ・ サウジアラビアのアブドラ国王原子力・再生可能エネルギー都市公団は、韓国原子力研究所（KAERI）が開発したモジュール式小型炉のSMART炉（330MWt、100MWe）技術に関するパートナーシップ協力協定を2015年に締結した。また、ヨルダン原子力委員会は海水淡水化と発電のためのSMART炉の導入を韓国KAERIと契約した。

- ・ロシアでは、小型モジュール炉RITM-200（50MWe）を開発し、統合化した砕氷船として2020年に商用化する計画である。また、先端的な高速炉である鉛-ビスマス冷却の多目的炉SVBR-100（100MW）を開発し、多くの原子力潜水艦に使われており、2030年には海外に向けて輸出する予定である。
- ・英国では、2016年3月にSMRの幅広い市場拡大を目指し技術経済的なフェージビリティ研究の一環でコンペを行い、ロールスロイスのループ型450MWeを英国型SMRとして選定した。
- ・米国NRCは、2017年3月、NuScale社の12連結PWRプラント（一基当たり50MWe）を認可、2026年にアイダホで運転開始すると発表した。この型式のプラントは英国にも売り込みをしている。またDOEは官民連合プラットフォームのGAINプログラムを通し、Holtec社の統合型PWRであるSMR-160を推進することを決めた。

2.3.3 SMRの今後の展望

海外では、2025年から2030年に向けてSMRの導入が検討されているが、日本国内の動きは海外ほど活発ではない。最近の文献では日本からの炉型の提案は2例ほどある。

SMRの研究開発として、新規使用材料の照射効果（FRP構造材などへの利用）評価、長寿命の計測機器開発、長寿命燃料の確証試験、新型電池の緊急時利用評価、緊急時冷却系の作動実証、シミュレータ開発などが挙げられる。これらを研究機関や大学の協力の下に展開する場所として、もんじゅサイトの研究炉を始めとする施設の利用の可能性が考えられる。

また、SMRの市場性を確保するためには、技術開発と並んで規制との円滑な意思疎通が重要で、制御室の設計思想、ヒューマンファクターの課題、緊急事態区分（PAZとUPZ）の考え方や地域防災、新規の計算コードや標準化の考え方等の整備も検討する必要があると、海外の例から考えられる。さらに、SMRの建設コストは、発電原価の視点からサイクル全体の評価や社会受容の観点なども考慮して考えるべきである。いずれにせよ、導入時期である2025年から2030年頃に対しての時間的な余裕はない。

2.4 研究炉の動向^{(1),(10)}

2.4.1 最近の研究炉の利用動向

研究炉の動向について、昨年度に引き続き調査を行い、ここ1年の動向を整理した。2017年12月までに建設された研究炉は合計67か国で797基であるが、この調査時点では、運転中は55か国217基である。そのうち、主要国での保有数はロシア59基、米国50基、中国17基、日本4基である。

この研究炉の利用動向は、ここ5年間、数の上では減少傾向にあるものの、学術的な報告などを見ると内容的な変化が起こっている。特に数MWの低出力研究炉では、出力を上げて中性子利用研究やサービス利用の範囲を広げる例（PULSTAR、HOR）、付帯設備を充実させて研究炉の利便性を向上させる例（HANARO、OPAL）などがあり、研究活動や産業界向けサービス向上を図っているように見える。

また図 2-5 に示すように研究炉の老朽化等により、研究炉の基数は減少してきており、現在 22 か国で 122 基の研究炉の廃止措置作業が進められている。

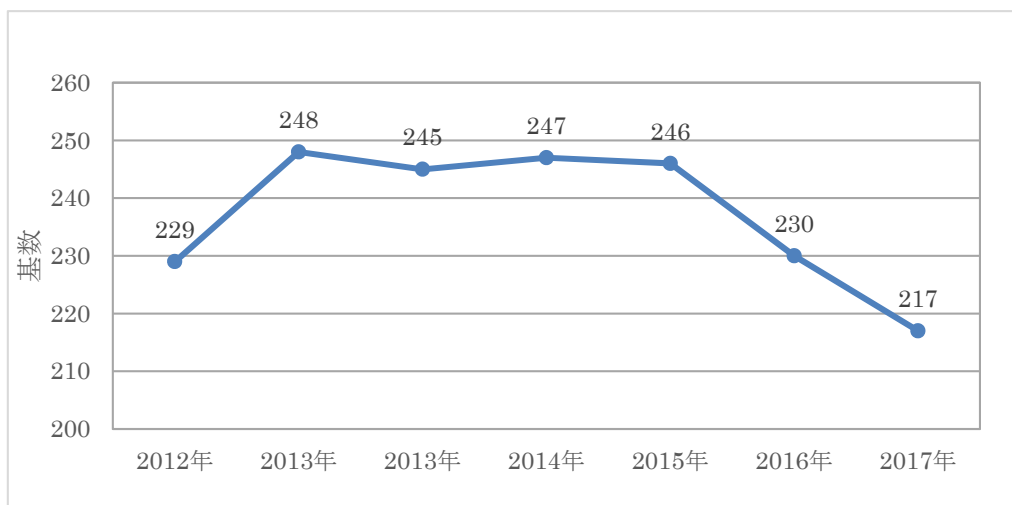


図 2-5 海外における運転中の研究炉推移

IAEA “Nuclear Technology Review 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018⁽¹⁾” より

2.4.2 建設・計画中的の研究炉

研究炉の建設がアルゼンチン (RA-10、CAREM25)、フランス (JHR)、韓国 (KJR)、ロシア (MBIR、IRV-2M、PIK) サウジアラビア (LPRR)、ウクライナ (KIPT-ADS) で継続中である。

また、正式に新規の計画を公表している国は、ベラルーシ、ベルギー (MYRRAH)、ボリビア、オランダ (PALLAS)、ナイジェリア (多目的炉)、タジキスタン (FTI)、タイ (SUT MNSR)、米国 (VTR)、ベトナム (多目的炉)、ザンビアなどである。この他、アゼルバイジャン、バングラデッシュ、エチオピア、ガーナ、ケニア、マレーシア、モンゴル、ミャンマー、ニジェール、フィリピン、セネガル、南アフリカ、スーダン、チュニジア、タンザニア、などが建設の構想を発表している。

2.4.3 運転中の研究炉

日本では京都大学の KUR と KUCA、近畿大学の UTR-KINKI 及び JAEA の NSRR は 2017 年に新規規制基準対応が終わり、再稼働を行った。5MW のヨルダンの研究炉は 2017 年 11 月に運転許可を取得し運転中で、30MW の韓国 HANARO は、3 年間の原子炉建屋の改造を終え運転を再開した。

また、IAEA 支援による研究炉利用の教育プログラムの中で、「インターネット研究炉ラボ」、「大学教育への遠隔教育システム (アフリカ、ヨーロッパ、ラテンアメリカ/カリブ海地域対象)」、「研究炉利用地域連携学校 (RRRS) 基礎教育」、「東ヨーロッパ研究炉活用機構 (EERRI)」に進捗があり、特に「IAEA 管理下の国際研究炉センター (ICERR)」にベルギー (BR-2)、米国 (INL の ATR と ORNL の HFTR) が新たに参画し注目されている。

さらに研究炉の低濃縮化については、現在までに 97 基の研究炉と 2 か所の医療用 RI 製造施設の燃料や試料の低濃縮化を完了し、フランスの AREVA は研究炉で使用したシリサイド燃料の再処理を 2017 年に初めて行ったことが報告されている。

2.4.4 米国の研究炉（VTR）計画⁽¹⁾

(1) 原子力の課題ロードマップと VTR 計画の概要

DOE は、再稼働した TREAT 炉と、建設に向けて動き出した VTR（多目的試験炉）計画を、研究開発の 2 本柱とした原子力のロードマップを発表した。図 2-6 のロードマップでは、現行の軽水炉の寿命延長と事故耐性燃料の実用化、中小型炉の導入による当面のエネルギー需要への対応、次世代炉、再生可能エネルギー、ガス炉などによるエネルギーミックスの確立、その後究極の持続可能な燃料サイクルシステムの実現を目指す計画である。高レベル廃棄物の処分も 2050 年頃までに目途を付けるとしている。

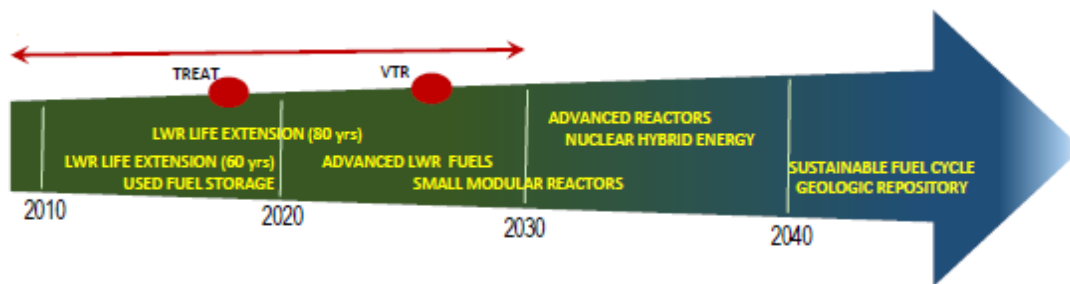


図 2-6 米国の原子力開発ロードマップ

このロードマップで目指している次世代炉の目標を以下に示す。

| | | |
|-------------|----------------------------------|--|
| 軽水炉ベースの SMR | ：各種 SMR | |
| 高温炉 | ：ヘリウム冷却、熔融塩冷却⇒事故耐性燃料と高品位グラファイト利用 | |
| 液体燃料炉 | ：高速スペクトル、熱スペクトル、高・熱ハイブリッドスペクトル炉 | |
| 高速スペクトル炉 | ： ナトリウム冷却 | Terra Power TWR、GE-Hitachi PRISM、ACR-100 |
| | 鉛及び鉛-Bi 合金 | WH 鉛炉、Gen4 Energy 鉛-Bi 合金炉 |
| | ガス冷却炉 | GA EM2 |
| | 熔融塩炉 | Terra Power MCFR、Elysium MCSR |
| | 熱パイプ型マイクロ炉 | OKLO、WH |

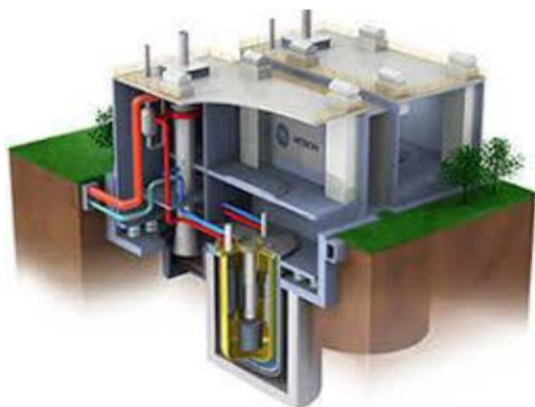
(2) VTR 計画

1) 基本仕様

VTR の基本仕様は以下のとおりである。図 2-7 に PRISM 炉とマイクロ炉の概念図を示す。

〈VTR の基本仕様〉

| | |
|-------|------------------------|
| 運転開始 | : 2026 年 |
| 研究炉出力 | : 300MW |
| 建設費用 | : 2 B USD (約 2,200 億円) |
| 事業主体 | : アイダホ国立研究所 |
| 建設業者 | : GE-Hitachi 社 (米国) |



GE-HITACHI 社 PRISM 炉



WH 社 マイクロ炉 (5MWt)

図 2-7 PRISM 炉とマイクロ炉の概念図

2) VTR の機能の目標

以上の背景を基に、DOE の研究推進の目玉である VTR (多目的実験炉) について 2018 年 3 月から 5 月にかけて公表された機能の目標は以下のとおりである。

| |
|---|
| 1. 設計検討: 3 年間の R&D を通して炉概念を決定する |
| 2. 高速中性子束は、典型的な高速炉スペクトルとしたうえで $4 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \text{s}$ とする |
| 3. 稼働率は可能な限り長期間を確保し、照射量として年間 30dpa を確保する |
| 4. 多様な R&D 項目に柔軟に対応が計れること |
| 5. 各種の高速炉用冷却材を使うインパイルループの設置を可能にし、据え付けの場所は一か所とすること (冷却材は、Na、鉛、LBE、Gas、及び熔融塩など) |
| 6. 炉心部での実効的な高さは 1 メートル以下とすること |
| 7. 運転用燃料は金属燃料とし、その燃料は、LEU、Pu、及び LEU+Pu とする。 |

構想している炉心マップの概念は、図 2-8 のとおりである。

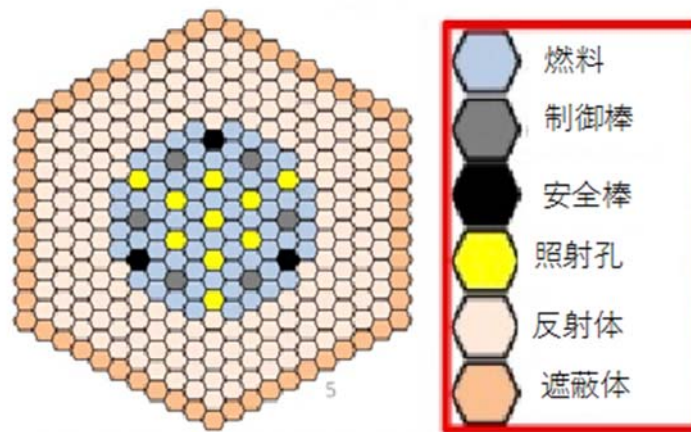


図 2-8 VTR 炉心の概念図

3) 研究炉設計に反映すべき点

VTR の基本仕様は DOE、INL が中心になって取りまとめ、建設業者は 2018 年 11 月に GE-HITACHI 社と決定した。また今後の計画を進めるために、研究テーマや研究炉の付帯設備の概念などの公募を開始している。さらに概念設計作業も DOE の費用により 3 回に分け、第 1 次概念設計は 2019 年中に、その後 3 回に分け概念設計や基本設計を行い、2026 年の運転開始に向けて計画を進めている。

このプロジェクトでは、企業のプラットフォームである GAIN の協力も仰ぎ、公表されたロードマップに従って INL が技術の方針や計画の取りまとめを推進している。

【参考文献】

- (1) IAEA, “Nuclear Technology Review 2018” (2018)
- (2) WNA, “Nuclear Power in the World Today” (2019 年 2 月)
- (3) IAEA, “Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2018 Edition”
- (4) 資源エネルギー庁 “第 4 世代原子力システムロードマップ” (エネルギー小委員会資料 平成 25 年)
- (5) 資源エネルギー庁 “第 4 世代原子力システム国際フォーラム (GIF) 加盟国” (エネルギー小委員会資料 平成 25 年)
- (6) WNA, “Fast Neutron Reactors” (2018 年 11 月)
- (7) 資源エネルギー庁 “日本の高速炉は民間の創意工夫を活かした研究開発体制へ～高速炉「戦略ロードマップ」” (2019 年 2 月)
- (8) WNA, “Small Nuclear Power Reactors” (2019 年 1 月)
- (9) IAEA, “Advances in Small Modular Reactor Technology Development” (2018)
- (10) WNA, “Research Reactors” (2018 年 12 月)
- (11) J. W. Herczegder, “US DOE Advanced reactor Research and Development Program for Fast Reactors” (DOE March, 2018)

3 求められる試験研究炉のニーズ調査

試験研究炉の設置は、原子炉そのものの技術検証という面と技術取得や教育・訓練や原子力に関連した多種多様な研究開発に利用する目的で設置され、最近では試験研究炉の特性を生かして、産業界や医療界での利用も増えている。そのために、試験研究炉の新設に際しては将来に向けた利用のニーズについて幅広く分析・検討しておくことが必要である。

本章では、学術利用、産業利用、医療利用の各分野のニーズ調査、人材育成の動向、米国現地調査の5項目について調査した。特に、「もんじゅサイト」での試験研究炉の計画を進めるに当たっては、設置するサイトが決定していることから、設置地域である福井県、さらには関西・中部地区などの地域の視点から見た試験研究炉の利用上のニーズ調査に主眼をおいた。これら地域での産業利用としては、化学産業・繊維産業、自動車・周辺機器産業、電池産業及び国内各地で事業を展開している原子力関係産業や放射性同位元素取扱産業などが想定され、地元福井県と連携しながら合同で調査を行った。

学術利用のニーズ調査は、国内外の文献調査を行い、地元や関西・中部地区の大学の先生方のご意見を伺った。

人材育成は EU、米国及び国内の動向を調査するとともに、「もんじゅ」サイトの研究炉を中核とした「先端的原子力人材育成拠点」について検討した。

海外調査については、米国のアイダホ国立研究所 (INL)、マサチューセッツ工科大学 (MIT) 及び GE-HITACHI を訪問し、米国における原子力の政策や研究開発の最新動向を調査した。

3.1 学術利用、産業利用、医療利用等の各分野が試験研究炉に求めるニーズについて、地域の特性を踏まえた調査

3.1.1 学術利用ニーズ

(1) 有識者の学術利用ニーズ

学術関係のニーズは、特に地元や関西・中部地域の大学の16名の先生方を中心にご意見を伺った。この調査項目は、試験研究炉への一般的な期待と中・低出力の利用ニーズの2項目とし、それら主な聞き取り調査結果の概要を表3-1に示す。これらのご意見を要約すると以下ようになる。

① 研究用原子炉 KUR の後継機としての位置づけ

KUR の運転は 2026 年頃終了予定であるため、後継となる試験研究炉は必要であり、KUR の技術を利用して発展させることも念頭に置くべきである。

出力は 5MW～10MW 程度、あるいは 2MW 程度という意見があり、それはコストパフォーマンスや規制対応の難しさなどによって意見が分かれた。

② 福井県に設置するメリット

大学の近くに中・低出力炉の研究炉でもあれば材料関係（軽水炉、高速炉、核融合炉の構造材）の実験が進展する。地域の産業につながる利用も数多くあると思われるので、学術利用とのバランスの良い試験研究炉とすべきである。

③ ニーズについて

低出力炉でも使える産業化技術の取捨選択は慎重にすべき（産業ニーズ）。保全技術や設計技術についての技術継承も行える枠組みが欲しい（人材育成）。スペクトル可変炉など、高

速炉の基礎研究ができる試験研究炉が必要（学術）。どのようなニーズの対応であっても、世界最高と誇れる運営、管理の手法を導入すべきである。

- ④ 試験研究炉の利用：利用技術に興味がある教官、組織による牽引が必要。
- ⑤ 管理上の課題：研究者の管理への負担は軽減すべきである。
- ⑥ 設置場所：アクセスなど研究者の集まる環境の確保が必要。

表 3-1 学術研究ニーズの聞き取り調査結果の概要

| 専門家 | 試験研究炉一般的な期待 | 中・低出力炉の利用 |
|------|---|---|
| A 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・材料関係にとっては必須のツールであり、現在は海外に頼っているが国内に早急に整備すべきである ・アイダホの研究炉の共同利用でも良いが海外炉よりは国内にあった方が良い | <ul style="list-style-type: none"> ・先端材料の基本的な性質を調べるための小型試験片を使った照射試験でも利用可能 ・多くの研究者に使いやすい炉であることが必要 ・京大炉クラスでも良いが現在は試験設備が少ない |
| B 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・レーザー利用の小型中性子発生装置を研究しているが、中性子の利用の先鞭になる応用研究を期待 | <ul style="list-style-type: none"> ・関西地区に、KUR、KUCA の後継炉は必要 ・共用の試験研究炉があれば、テーマは考える人が出てくる |
| C 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・KUR には寿命があり、その後継試験研究炉は必要 ・BNCT は加速器に代わる ・基礎基盤研究は多くあるのではないか | <ul style="list-style-type: none"> ・陽電子消滅法による物性研究など産業利用を見越した研究もある ・試験研究炉の管理で研究者の負担は減らすべきである ・BNCT 応用は小動物やペット向きの需要がある ・KUR ではラジオグラフィを拡張することを考えている |
| D 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・海外炉に引けを取らない試験研究炉は必要 ・照射利用は大型、ビーム利用研究は少なくとも JRR-3 以上が欲しい | <ul style="list-style-type: none"> ・低出力でも利用できる研究もあり、数 MW 程度で散乱関係は一部の手法は可能である ・研究者の集まる環境（アクセス、支援技術設備）の確保が必要 ・陽電子消滅などの産業化に向けた研究開発は重要 ・JRR-3 以下の性能では企業でも使わないのではないか |

| 専門家 | 試験研究炉一般的な期待 | 中・低出力炉の利用 |
|------|--|---|
| E 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・国内を見渡して、原子力エネルギー開発につながるための基礎検討をする試験研究炉が少なく、活性化する必要がある ・多様な発電炉の炉心研究のためのスペクトル可変炉、高速炉の超安全を目指した試験研究炉、中小型炉確認用実験炉などは必要 ・人材育成は社会人についてどうするかは考慮すべきである ・地域振興につながる研究は必要であるがそれらを引っ張る教官が少ない | <ul style="list-style-type: none"> ・イタリアの TAPIRO（高速中性子炉、5kW）程度の炉でも、複数のビームポートを準備して多くの実験に使っているので参考になる ・スペクトル可変の小型炉（臨界実験装置でも良い）は有力な候補（FCA や KUCA が参考になる） ・高速炉の基礎研究は継続する必要がある、試験研究炉の概念の検討も必要 ・高速炉を実現する場合、正の反応度から負の反応度を実現するために、燃焼核として Cm を使い、常に負の反応度を持つ炉心になるようにスペクトルを制御する方法を検討し、膨大な輸送方程式の計算により実現可能性が出てきた。これを実現するための研究炉を作ることも提案した。その例は水・ナトリウム減速・冷却の複合炉心を構成する、「スペクトルシフト炉」の試験研究炉である。これに類する炉は世界中にはないが、ここ 2 年くらいで叡知を集めて設計研究をすべきと考える ・その作業には事務局的には福井大、技術経験者として京大、近大、そして JAEA 及びメーカーをメンバーとしたらどうかと考える |
| F 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・産業化に向けた研究を行える試験研究炉が欲しい。具体的にはミュンヘンの FRM-2 での Si ドーピング、フランスの JHR での RI 製造など参考になる | <ul style="list-style-type: none"> ・中小型でも産業化のための利用をすることを期待 |
| G 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・炉形選定に当たっての期待 －設置場所の選定の自由度を広げるべき －アジア連携を考えるのも一手段 －産業化技術開発も重要な視点 | <ul style="list-style-type: none"> ・ニーズの調査や整理には定量化が必要 |
| H 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・保全技術の向上は必須 ・試験研究炉の維持管理や保全技術の体験（故障対応、改造対応など） ・高速炉の研究も視野に入れるべき | <ul style="list-style-type: none"> ・保全技術の育成、技術継承の枠組みも人材育成の要素に入れるべき |
| I 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉材料の研究は試験研究炉抜きでは考えられない。 ・JMTR は無理としても国内での照射炉は必要 | <ul style="list-style-type: none"> ・大学が積極的に使える試験研究炉が欲しい。規模よりは使い勝手の良いものが理想 ・もんじゅサイトであれば、福井地域の原子炉材料研究で学術、産業界に役立つのではないかと（高速炉、熔融塩炉、核融合炉も含めて） |

| 専門家 | 試験研究炉一般的な期待 | 中・低出力炉の利用 |
|------|--|---|
| J 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・ハルデン炉は、種々の材料・燃料・水化学では有効な手段であった。国内で代替機を考えるべき | <ul style="list-style-type: none"> ・中、小型炉の学術利用についてはニーズがあるかどうか不明 |
| K 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・京大炉の後継機という位置づけの試験研究炉は必要 ・過去の経験では、学術利用にも中途半端という見方もある（施設の拡張性、運転時間の制約、予算的な課題など） ・約7年後に KUR での BNCT 関係は全て加速器に切り替える（サイクロトロン利用） ・これに伴い、KUR は停止の方向にむかう。しかし、当面は、ビーム利用や照射、その他の基盤技術やトライアルユースの拠点の役割は継続する ・大学の設備である以上、KUCA を含め、国のプロジェクト研究や事業化等の研究開発は行わない ・KUCA は日米協議により当面高濃縮のまま使い続けるが、学生の基礎知識導入などの教育には向かない ・次世代炉などへの産業界の利用は従来の制度ではフレキシビリティが少なく、制度を変えて管理費用などの確保をしない限り継続は難しい ・中性子散乱は、JRR-3 が再稼働しても、J-PARC に希望が集中して新規参画は難しくなるのではないかとも思われる ・KUCA の自由度（減速体系の変更の容易さ）もあることから、高速炉や新型炉には利用機会はあるかもしれない。炉物理の研究の可能性はあるが、軽水炉の設計などは計算で十分で、検証に使うくらいという意見も理解できる | <ul style="list-style-type: none"> ・研究テーマは、関心のある学術関係者の議論から出てくるのではないか ・もんじゅの新たな研究炉は中型炉が良いと考える。その理由の第一はフラックスが低くても実験環境さえ整備すれば、管理も比較的シンプルで柔軟に実験の自由度を選択できる可能性である ・自由度が高いことは、トライ&エラーも許されるために、多様な技術開発の展開が期待できる。実験データの精度が低いものもあるが、使い勝手が良いという利点を生かし、技術活動の幅は広がる ・しかし論文の作成には不十分であるという意見も出ることはわかる ・中規模の出力であれば、ある程度の散乱技術、ラジオグラフィ、残留応力、陽電子消滅、メスバウアー効果利用分析などは可能で RI 製造も含んで考えても良い ・もんじゅの新たな試験研究炉には、設計出力を 5MW とした場合には、機能的には JRR-3 並みを、10MW とした場合には JRR-3 を超える機能を持たせるくらいの意欲を見せるべきである。新規機能としては京大炉で世界最初に開発したスーパーミラーの活用など実験環境の高度化を考えればよい ・実験環境機能を始め、運営、管理などは世界最先端のものを採用する必要はあろう |
| L 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・福井県の要望も幅広いのでどのように整理するかが課題 ・高速炉への根強い期待もある | <ul style="list-style-type: none"> ・人材育成との連携や学術振興、産業貢献などバランスをとって考慮して選択することも必要 |
| M 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・原子力研究を継続できる研究者の人材育成は必須要件、しかし現状の規制対応にはかなりのコストと気力が必要 | <ul style="list-style-type: none"> ・使いやすさを考えた選択を期待 |
| N 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・企業ニーズに対応した議論は必要ではあるが、JMTR 後継は難しい、そのため何ができる炉を考える必要あり | <ul style="list-style-type: none"> ・人材育成の検討も重要 |

| 専門家 | 試験研究炉一般的な期待 | 中・低出力炉の利用 |
|------|---|---|
| ○ 教授 | <ul style="list-style-type: none"> ・関西圏に作る試験研究炉としては2MW未達が現実的 ・KURの後継機として考え、ホットラボなどを具備したものになりたい ・臨界実験装置は、人材育成というより炉物理実験に利用することが本来の機能である | <ul style="list-style-type: none"> ・近大炉のような超小型試験研究炉は教育用には良いが、500kW以下では研究者を含めユーザーも使わない。この程度では論文も書けない ・2MW以上になると活断層の評価など色々と課題が出てくるので2MW未滿が良い ・スペクトルシフトなどの提案もあるが許認可には問題あり |

(2) 国内外における最近の学術利用ニーズ

【海外の動向】

海外では毎年ヨーロッパ原子力学会が主催している、試験研究炉の開発や利用に関する研究についての国際会議 RRFM (Research Reactor Forum Meeting) のプロシーディングス⁽¹⁾からここ5年間の発表論文内容の分析を試みた。

RRFMでは毎年ほぼ70~80件程度の試験研究炉の新設、運転管理、試験研究炉の利用などについての研究成果の論文が発表されている。このプロシーディングスの報告内容を、「学術関係」、「事業サービス関係」及び「試験研究炉管理」に分類した。さらに学術関係は、核データ、中性子利用、新型炉関係、燃料研究、材料研究、安全性の6項目のテーマごとに分類し、5年間の発表テーマの概要と件数について調査し、以下のような知見が得られた。

- ・炉工学、燃料・材料と中性子ビーム利用研究の発表数は、ここ5年間はほぼ拮抗している。
- ・中性子ビームの利用研究の項目としては、散乱・回折などの実験装置や設備に関連する報告が多く、中でも冷中性子の発生装置についての報告が多い。試験研究炉の規模は低出力から大出力にわたっている。
- ・燃料についての報告数は最大で、高濃縮燃料から低濃縮化についての課題対応が多い。
- ・燃料・材料の評価に関連した論文は、大出力の試験研究炉を利用したものが多く、しかも照射後の試験も大規模であり採取するデータは多様性がある。一方で、欧米では出力の低い試験研究炉を利用した、コストパフォーマンスを考慮した材料の基礎研究も見られる。
- ・発電炉の安全性の研究は、重要性は高いが試験の性格上、特定の研究炉に限定されるので報告数は少ない。しかし、世界各国とも東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえた試験研究炉本体の安全対策をいち早く実践しており、これらに関する多くの報告が出ている。
- ・事業関連では、放射性同位元素の製造関連の報告が多く、人材育成ではネットワークによる連携教育や遠隔教育が目立つ。
- ・試験研究炉の改造や大型設備の設置・建設関連の報告は、規制の条件が数多くある原子力施設の安全確保の体験や技術の継承にもつながる貴重な内容が多い。
- ・試験研究炉の炉物理・炉工学における設計の手順、許認可手続き、建設などの報告は、試験研究炉の基盤技術の習得や継承に役立っている。

【国内の動向】

国内の学術利用ニーズに関する動向を、日本原子力学会⁽²⁾の年2回開かれる研究報告会の予稿集により調査をした。

日本原子力学会発表の「核データ」に関連する報告は、「原子核物理、核データ測定・評価・検証、核反応工学」と「炉物理、核データの利用、臨界安全」に該当する。2018年春の年會を例にとってみると、この項目に該当する報告は、核分裂炉の技術面を扱う報告の総数（核燃料・材料は別の分類）336件中70件と約20%に達し、この割合は2007年から10年以上ほぼ一定の数で推移している。

一方、「ビーム利用」関連の報告は「中性子源、中性子工学」と「ビーム計測、ビーム利用」及び「研究炉、中性子応用」のセッションがあり、これらの合計は、2018年春の学會では30件で約9%であり、この割合もここ10年間ほぼ一定である。

さらに「安全性」に関連したテーマは「安全工学」という独立に設定された分類になっていて、2018年春には50件で約15%になっている。また燃料・材料は原子力の化学材料の中でまとめられていて、この報告件数も2018年春は38件で、この数もここ10年ほぼ横並びで推移している。

しかしその具体的な研究テーマは、その時々状況の変化に応じて変遷がある。2007年、2008年頃の代表的なテーマを見ると、第4世代炉に向けたFBRや高温ガス炉などの試験研究炉、実験炉に関するテーマや試験研究炉のビーム利用として中性子散乱、シリコンドーピングなどに取り組んできていることがわかる。具体的には

➤ 2007年・2008年の主要な発表テーマ（東京電力福島第一原子力発電所事故前）

- ・ 新型炉概念（軽水炉、第4世代（高速炉、中小型炉、超臨界炉））
- ・ 燃料材料照射（ジルカロイ中心、炉心用鋼材）
- ・ ビーム利用（散乱、シリコンドーピング、イメージング）
- ・ 試験研究炉・実験炉の運転経験・管理（もんじゅ、常陽、ガス炉など）

しかし、これらのテーマは2017年、2018年には東京電力福島第一原子力発電所事故の対応や教訓に沿ったテーマに代わり、事故耐性のある材料の評価、解析コードの見直しや検証、断面積評価などの基盤技術にも取り組んでいる。

➤ 2017年・2018年の主要な発表テーマ

- ・ 未臨界度測定・監視（東京電力福島第一原子力発電所事故対応）
- ・ 炉心解析コード・検証（BWR、ガス炉、FBRなど）
- ・ 燃料被覆管（SiC、Zr-Nb、Fe-Cr-Al-ODSなどの事故耐性燃料用）
- ・ 圧力容器材、構造材の過酷事故対応のSiCや新SUS材の評価
- ・ 中性子検出器（スペクトルメータ用、位置検出用、被ばく管理用）
- ・ 断面積評価・検証（捕獲断面積、核分裂、元素変換、ADS）
- ・ 炉心設計研究（FBR、新型炉）

このように、国内でも研究炉を利用した主要な学術ニーズ（研究テーマ）は、東京電力福島第一原子力発電所事故で一時変動があったテーマもあったが、一定の取り組みをしており、海外と共通なニーズが明らかになっている。

すなわち、核データの収集、燃料・材料照射研究、安全性への取り組み、中性子科学についての学術利用ニーズは国内外ともに継続している。

(3) 学術利用ニーズのまとめ

国際会議 RRFM での 5 年間の発表論文数の傾向は、炉工学、燃料・材料、ビーム利用の比率はほぼ拮抗して約 30% であり、原子力学会における中性子利用研究は約 30 件で全体の約 10% 弱を占め 10 年間ほぼ一定である。2011 年 3 月の東日本大震災以降、研究開発の減速もみられるがここ 10 年間で基本的に大きな変化はない。また、原子力学会報告での、炉物理、核データなどについての比率は約 20% 程度と高く、この分野の研究もほぼ一定で推移している。

一方、具体的な研究テーマでは、エネルギー利用については東京電力福島第一原子力発電所事故に関連した新規のテーマ（事故耐性燃料被覆管や構造材開発、過酷事故対策など）や次世代炉や第 4 世代炉などの研究テーマが活発化している。また、発電炉の大型炉から中小型炉への開発に伴い金属冷却の高速炉研究なども再びテーマの俎上にのっている。

また中性子ビーム科学は、中性子散乱技術を中心に最近の傾向は冷中性子の発生装置の報告が多くなっている。我が国の産業の基軸である素材産業の未来を支える基盤技術でもあり、研究開発の加速、環境整備は必須課題である。今後とも冷中性子を用いた中性子散乱の基礎技術が重要となる。そのために、今回のもんじゅサイトの新研究炉もこの一部を担う機能も期待されている。

さらに、原子力関連の有識者として地元に関係する大学の先生方から、京大炉の後継となる試験研究炉は必要であり、京大炉発の技術を発展させることも念頭におき、産業界も利用でき、さらには人材育成の観点から設計技術や保全技術の継承も行える枠組みが必要ではないかのご意見もあった。

なお、医学面での利用ニーズの一つであるがん治療法の BNCT（ホウ素中性子捕捉療法）について、人を対象とした治療が加速器利用にシフトしつつある一方で、広い面積の検出器や被ばく評価ツールの開発といった基礎的な研究や、医療関係の人材育成（資格認定を含めた学生や社会人教育を対象とした保健物理士養成）の用途で引き続き試験研究炉の役割が期待されている。

3.1.2 医療利用ニーズ

我が国における試験研究炉を利用した BNCT の取り組みは、京都大学がリードする形で進めてきた。その一方で、前述のとおり種々の法規制や設備条件などから試験研究炉の利用は減少傾向にあり、代わって加速器の利用が国内外で増えてきている。米国の MIT においても、医療行為の法規制などがあり現在は使用停止の状態である。

3.1.3 産業利用ニーズ

(1) 地元を中心にした企業ニーズの調査

1) 調査対象企業の選定及び質問内容

調査対象の企業は、JRR-3 や J-PARC など中性子ビームを利用して分析や実験を行った経験のある企業を「JRR-3 ユーザーズオフィス」の報告書⁽³⁾、(一財)放射線利用振興協会の研究報告⁽⁴⁾などの実績報告書から抽出した。さらに、関西地域で放射光、レーザー、放射線などの利用に関係した活動をしている、(一財)大阪科学技術センターの会員メンバーの中から、中性子利用に関連する企業を選定した。同様に、福井県内の企業についても、福井県工業試験センターより代表的な企業動向の資料を入手しその中から選定し、20 社に訪問することとした。

内訳は、福井県企業 7 社、関西圏企業 3 社、中部圏企業 2 社、関東圏企業 8 社である。また業

種別では、繊維・化学系 6 社、半導体 3 社、自動車 2 社、電池 2 社、原子力 2 社、重工 1 社、非鉄・サービス 3 社、公設試験機関 1 機関で、企業側の対応人数は約 70 名にも及ぶ。今回の企業のニーズ調査については、福井県と連携をしながら協働して企業訪問調査を実施した。

企業訪問時の質問事項は、以下のとおりである。

- i) 国内外の試験研究炉の利用実績（目的、成果）及び事業の課題解決策として試験研究炉を利用する製品やサービスは存在するか否か（ニーズはあるか）
 - ii) 試験研究炉や類似技術の利用動向（放射光（SPring-8）、加速器中性子（J-PARC）、汎用 X 線分析機器の利用状況など）
 - iii) 将来の事業展開のために計画している開発テーマへの試験研究炉の利用の可能性有無（将来的なニーズ）
 - iv) 試験研究炉での技術をより広く理解し採用を検討するための支援や利用上の要望など
- また原子力に取り組んでいる企業には、臨界実験装置の利用も含み、学術分野のニーズ調査で取りまとめた次世代炉や中小型炉への展望や現行の軽水炉のための取り組みについての質問をした。

2) 調査結果

各企業から提起されたニーズの概要は以下に示すとおりである。

「産業利用ニーズ」

- ・非原子力産業での主なニーズや利用希望の多い技術分野は、中性子散乱（回折も含む）、中性子ラジオグラフィ、放射化分析の順であった。
- ・これらの技術に関心のある事業分野は繊維・化学業界で、高分子材料や炭素繊維などの原子／分子の構造（中性子散乱）や動き（ラジオグラフィ）などを把握するためのニーズが多い。
- ・電器・自動車産業は、リチウムイオン電池の電極材などの構造や動作に関する観察のニーズや構造材に使う複合材料の応力解析や水素挙動などの構造観察（中性子散乱）へのニーズがある。また、現在のリチウムイオン電池以降はナトリウム電池やマグネシウム電池などの固体化に向かうと予想されるが、しばらくはリチウムイオン電池の開発に重点を置いている。
- ・構造材の軽量化は、自動車や航空機産業において永遠の課題で、これらの開発にも中性子散乱技術の利用は継続するものと思われる。自動車産業は、電気自動車時代に向けた研究開発を実施しており、軽量化を目指した新材料の開発や構造材の健全性の確保のために、中性子散乱を用いた残留応力測定や中性子イメージングによる欠陥・異物検出などにも関心を持っている。
- ・鉄鋼材料については、長時間使用時の水素化の課題があり、この検出にも中性子イメージングが有望であるという認識もある。
- ・また電池材料開発のシミュレーションのための現象解析に、中性子散乱技術を使う場面もある。さらに新技術では、蓄電用フィルムコンデンサーや、バイオセンサー開発なども考えられており、将来ともニーズはあると思われる。
- ・原子力分野での材料の照射は、高経年化対策のための新材料開発には必要であるという認識は学界と同様強くある。また新型炉の開発が進んでくると新材料を使うことも増えるため

に、照射のニーズも増えてくるが、現在国内に照射炉はなく、また約半世紀にわたって利用が多かったハルデン炉も近い将来停止されるために、照射炉やそれに代わる試験研究炉のニーズは強い。

- ・また、臨界実験装置において、炉心設計や燃料設計の検証などへの利用ニーズは、高燃焼度燃料開発、MOX 燃料の軽水炉利用、多様な中小型炉の開発、さらには高速炉の開発を行っていた時代に比べてかなり少なくなっているものの、新型炉心、改良炉心の許認可のための検証には必要という意見はあった。

以上が技術利用分野に特化した産業利用ニーズであるが、図 3-1 に全体を俯瞰した企業における中性子ビームの利用例（訪問調査企業を含む）を示した。

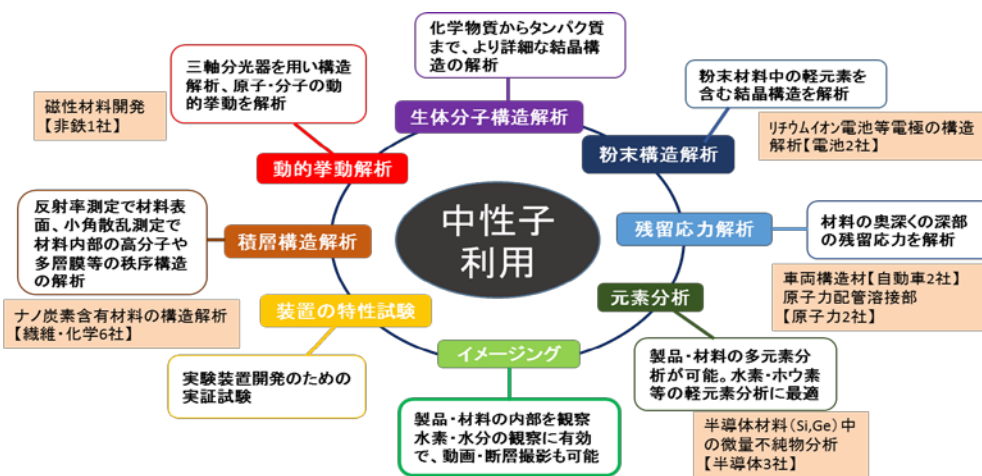


図 3-1 企業における中性子ビームの利用例
(JRR-3 ユーザーズオフィス資料を基に作成)⁽³⁾

また、企業からは試験研究炉の機能や利用・運営上の要望などについても数多く提起されたため、以下にまとめる。

「研究炉機能や能力についての要望」

- ・先端的な材料評価は、J-PARC のような高出力の施設で行う必要がある。一方、製品に反映されるまでの定常的なニーズは中程度の出力で良い。
- ・JRR-3 クラス (20MW) が望ましいが、KUR クラスでも可能なものもある。使いやすいことが必須。
- ・性能だけでなく、使いやすさも重要。ミュンヘン工科大学の FRM-II のビームラインは使いやすく、旅費をかけてでも使いたい施設である。
- ・J-PARC や SPring-8 で 100 点を目指す前に試験的な利用で良い場合がある。
- ・出力はそれほどでなくとも良いがビームラインの数やマシンタイムの割り当てが増えれば良い。
- ・その研究炉でしかできないという特徴があれば企業は使う。
- ・何が見たいかにもよるが、測定法の開発なら J-PARC が良い。

「利用・運営上の要望」

- ・ハードも重要であるが、ソフト面も重要。ワンストップでの装置利用が望まれる。
- ・ユーザーフレンドリーな実験／解析環境が必要。
- ・SPRING-8 や J-PARC は学術利用が中心という印象が強く、あいちシンクロトロンは産業利用に重点が置かれ、コストは高いがサポート体制は良い。
- ・ユーザーフレンドリーにするために、ユーザー対応専任の [テクニシャン] 的な人材が必要、技術者はコーディネータやトラブル対応が専門。
- ・装置とデータの使いやすさは課題、ビームラインごとにサイエンティストがいれば、企業に専門家をおく必要はない。
- ・施設使用申請時に中性子分析の是非について相談できる環境が必要で、その担当は事務的な窓口だけではなく、大学教官等の専門家を配置するのが望ましい。
- ・共同研究の成果を先生方が発表できないとメリットがない。共同研究を進める上では重要な要件。
- ・共同研究はお願いする先生方の魅力度による、優秀な先生を選ぶべき。
- ・散乱などの分析ソフトは重要で、JRR-3 と J-PARC とでソフトが違う。JRR-3 のソフトは大学で経験があったので使いやすかった。
- ・日本で専用ソフトを作成するが無駄、海外例ではどのソフトでも使える例が多い。
- ・測定を自動化すべき。
- ・依頼分析（分析サービス）と参加型の両方が必要。
- ・依頼分析では機密保持に課題がある。
- ・メールインサービスで分析・解析の両方をできるようにして欲しい。
- ・JRR-3 程度の費用（100 千円程度）であれば企業も使いやすいが、J-PARC の百万円/回は高価である。
- ・専用のライン設置費用は利用者負担になっているが、海外では設置者負担。
- ・海外炉と国内炉の利用料金の差はない。ビーム利用時間は日本の場合少なく、照射時の環境の変更にも柔軟性がない。
- ・「あいちシンクロトロン」は当初産業界だけが利用する予定で、独立採算の計画であったが、利用が少なく補助金が必要になった時期もあった。最近は県内産業界の利用が 100% である。コーディネータは産業界出身、研究会や技術交流会も行っている。県内の中小企業はお試し価格で安くしている。
- ・企業が利用するときのタイミングは重要で、コスト、マシンタイムの割り当て、時期等で決めている。
- ・使いたいときに使えることがベスト、放射光に比べ、中性子の場合は利用者が少ないが、利用できる施設が増えれば需要も伸びると思われる。
- ・申込みから実施までの待機期間は 2～3 か月、長くて 3 か月までありがたい。年 2 回の公募だと半年待つことになり長い。
- ・共同研究の成果は内容により公開、測定方法など標準的に扱えるものは積極的に公開してほしい。
- ・周辺のインフラではシャトルバス、宿泊施設、食堂、机や LAN の整備された待機所が必要。

- ・福井までの距離は問題ない。
- ・JRR-3 の棲み分けは必要。SPring-8 などと連携して、関西／中京企業に、中性子と X 線を相互補完的に利用してもらう方策も考えられる。
- ・ユーザーの立場として協力したいので運用開始までのスケジュールを明らかにして欲しい。
- ・10 年先の計画では地元でも待てない。
- ・地元に中性子と X 線利用施設があると良い。
- ・中性子はマイナー、パルス中性子はニーズが少ない。
- ・毎日の測定では地元が良いがロットをまとめる場合は近くである必要はない。
- ・日本は海外に比べ周回遅れ、海外利用に傾く、また研究炉は再稼働にも時間がかかる。
- ・利用は測定したいときに測定できる施設があれば利用する。
- ・国内の放射光や加速器中性子を使っているが、10mm 以上の厚みの試料には中性子以外利用できない。

これらの要望は、計画時に織り込むべきものと、運用に盛り込むものと分類し、今後の検討の参考とする。

(2) その他産業化に関連したニーズ調査

以上に述べた企業ニーズ調査に加えて、海外で産業化に結びついている放射性同位元素の製造やシリコンドーピングの企業ニーズについても検討した。

【放射性同位元素の製造】

放射性同位元素の製造について、これまでの公開資料⁽⁵⁾や関連企業等からの情報に基づいて、利用目的や現状の精査及び今後の国内での目指すべき方向性を検討し、以下にその概要を述べる。

- ・医療用の世界動向では、約 10,000 の病院が放射性同位元素を使っていて全体の 90% は診断用である。
- ・最も多く使われているのは ^{99}Mo で、年間 4 千万件の診断（世界全体の 80%）に使われている。
- ・世界全体の RI 市場は 2016 年で 9.6B\$（約 10 兆円）で、2021 年には 17B\$（約 19 兆円）になると見積もられている。この市場の半分が米国、ヨーロッパは全体の 20% である。
- ・このため、米国では研究炉を利用した ^{99}Mo 製造に二つの大きな動きがある。ミズーリ大学の 10MW の試験研究炉を使って製造し、GA 社の先端的な選択的ガス分離方式 (SGE) によって精製し、販売する計画を進めてきて、2018 年から稼働状態になっていると報告されている。この事業は、カナダのチョークリバー研究所の NRU 研究炉の廃止に伴う処置で、このプロジェクトにはカナダも参加して協力している。またこの動きと並んで、コキユウ医薬社はフロリダ州で ^{99}Mo 製造用の試験研究炉の建設に着手し、建設はアルゼンチンの INVAP が担当することになっていると報告されている。
- ・製造に核物質を使うことによる核拡散の規制上の課題や世界での需給バランスの不安定さ（短寿命のための貯蔵ができず、研究炉の停止による供給停止の影響が大きい）から、加速器を使う方向での動きもあり、 ^{99}Mo 利用者からの心配の声は高いが、稼働中の研究炉が少ない日本では、海外との協力で対応していくしかないというのが現状である。

- ・海外の放射性同位元素の流通のサプライチェーンは、同位体製造（試験研究炉）⇒精製⇒製造⇒供給・販売⇒輸入⇒病院、となっており、生成・供給の企業は、キュリウム社（フランス・米国）、MDS ノルディン社（カナダ）、IRE 社（ヨーロッパ）、NTP 社（南アメリカ）、アイソトピック エヌガー社（ロシア）、及び ANM 社（オーストラリア）である。
- ・医療用の放射性同位元素の市場は、⁹⁹Mo の動きに支配されているが、これ以外の核種も、γナイフ用の ⁶⁰Co、前立腺治療用の ¹⁹²Ir、伝統的に使われている ¹³¹I、¹²⁵I などの需要も大きく、最近では ¹⁷⁷Lu、¹⁸⁸W などの利用も研究が進み、10 年後の医療用の放射性同位元素の需要はかなり変わってくることも考えられる。
- ・国内に目を向けると、海外からの医療用放射性同位元素の輸入に関しては、薬機法に基づき医薬品等の品質、有効性及び安全性を確保するための許認可が必要であり、国内試験研究炉で仮に製造ができたとしても、製造方法の変更となることから、実際に医薬品として認可されるまでは多くの期間を要するなど課題がある。

このような背景の中で、現在の医療用同位元素を輸入、販売している事業者との面談調査では、当面の現実的なニーズの提示はなく、従来の方式の継続の意向が示された。

また、短寿命の核種は病院近接のニーズから、加速器利用が主体になっているが、核種によっては比放射能の問題や精製費用の削減の観点から、海外では試験研究炉を利用するケースもあり、「もんじゅサイト」の試験研究炉への適用については、今後も引き続いて需給動向の調査を継続すべきであると考えている。

一方、産業用の放射性同位元素は、法制度上のハードルは低く、新規参入であっても製造・販売の可能性は高いとの感触は得られた。特に、非破壊検査の専門事業者訪問では、¹⁹²Ir のニーズは今後、社会インフラの老朽化対策や、建設に伴う品質確認の増加のため大きくなる可能性もあるという意見もあった。そのために、注目核種の需給についても今後の詳細な分析が必要で、これらの検討を行うに当たっては、日本国内のサプライチェーンの中核組織の動向や、アジアの近隣諸国の動向などの分析を踏まえることが肝要である。

【シリコンドーピング】

1990 年代に本格的に産業化されたシリコンドーピング技術は、現在でも良質なシリコン半導体の製造プロセスには不可欠な技術になっている。初期の 1980 年代に直径 3 インチ（76.2mm）程度の大きさの合金の照射だったものが、2000 年代に入り、直径 6 インチ（152.4mm）程度のもので照射が可能になり、2015 年頃には 8 インチ（203.2mm）、さらには最近 12 インチ（304.8mm）の合金の照射まで議論されるようになっていく。

原子炉照射によるシリコンの用途は主に、表 3-2 に示すような大電流制御素子として使われ、2000 年代の始めの頃からその需要は高まった。今後はガソリン自動車からハイブリッド車、電気自動車への移行に伴い、世界的にも需要は拡大するといわれている^{(6),(7)}。

表 3-2 大電力半導体の種類と応用先

| 大電力用半導体 | 代表的な応用先 |
|--------------------------|---|
| MOSFET (電界効果トランジスタ) | 電子計算機の電源、TV や音響機器の電源、自動車用半導体制御装置 |
| IGBT (絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ) | エレベーターなどのインバータや制御素子、工業用大電力モーター制御用素子 (反転制御など)、エアコン最適制御素子 |
| 制御素子及び切断用サイリスタ | 電気自動車運転制御素子・インバータ、工業用モーターのインバータ、送電系制御素子、など |

ドーピングの世界市場は、2010年では年間100トン程度で、その費用は、100トン当たり6.5M\$といわれていた。1900年代の終わりには、日本企業3社、ヨーロッパ企業2社がこの技術を取り入れていた。最近ではこの需要は1,000トン余りになっていて、中型試験研究炉でも照射が行われ、オーストラリアのOPAL炉、ドイツのFRM-II炉、韓国のHANARO炉、米国のMITR炉などで行われている。

今後は、電気自動車の増加により、2030年には、毎年2,000トン程度に上昇するという予測もあるが、一方では大電力用素子としては1,200ボルトの耐圧性のあるSiC素子が開発されることや、耐圧性のある物質に結晶体を成長させるエピタキシャル半導体も開発されて、競争状態になる可能性もあるという指摘もある⁽⁸⁾。このような環境の中、現在日本の半導体材料企業は2社存在し、この2社はMITの研究炉で照射を続けていて、MITでは毎年25トン程度の照射をしているとしている(2018年11月の訪問時の情報)。

しかし、将来に向けて、文部科学省はメーカーからの見解についてヒアリングを行い、以下のような見通しを明らかにしている⁽⁹⁾。

- ・国内の半導体需要は拡大傾向にあり、研究炉を活用した中性子照射が最も高品質な半導体の製造手法であることは事実。
- ・この製造法は研究炉の運転に左右されるために供給が不安定であり、かつ大量生産への対応は難しい。
- ・近年、半導体メーカーによる他の半導体製造手法の技術開発が進んだこともあり、中性子照射による半導体製造は下げ止まっている。
- ・国際的にも供給過多の傾向にあり、海外の研究炉からの輸入コストも安くなっている。
- ・半導体製造の観点からは、国内の研究炉は不安定な供給状況をカバーするためにピンチヒッター的には使えると考える。
- ・研究炉を活用した放射化分析に関しては需要がある。スピード重視になるので、国内で迅速に行いたい。

以上の状況より、もんじゅサイトの研究炉でのシリコンドーピングについての日本の半導体企業からのニーズは、各種資料から読み取ったニーズから予測されるレベルに比べるとかなり低く、今後の検討からは除外しても良いと考えられる。

(3) 産業利用ニーズのまとめ

文献調査、訪問調査などから産業界のニーズをまとめると以下ようになる。

- i) 中性子ビーム利用については、国際的な競争を展開して先端を走っている企業が、中性子散乱を利用した多様な新規技術の導入に積極的で、自動車産業のリチウムイオン電池や固体電池などの新規電池開発や高強度を追求する新構造材の開発での利用について長期的なニーズがあることが示された。また、中性子ラジオグラフィや放射化分析についても関心のある企業は多数あった。
- ii) 中性子散乱や放射化分析などについて、福井県の協力により地元の繊維産業や高分子産業などの企業からも関心があることが判明し、今回の調査の大きな収穫であった。地元企業は、研究炉を実際に使った経験が少ないことから、実感としてはまだ不明の部分があると思われ、現行の研究炉による「お試し実験」を希望する企業もあり、枠組みの構築の検討が必要であると思われる。
- iii) 繊維・高分子化学関係企業は、放射光や従来からの X 線との使い分けを考慮しながら、中性子の特性を生かした研究ニーズがある。
- iv) 原子力分野では、材料・燃料の照射利用は、現行発電所の長寿命化や高出力化のために必須であり、強いニーズが示された。新型炉心や改良炉心の許認可取得のための核データ取得や検証実験に必要なとの意見はあったものの、企業自らが利用するという強いニーズはない。
- v) 放射性同位元素の製造のニーズについて、医療で利用する ^{99}Mo は定常的に高いニーズはあるものの、薬機法に基づく医薬品の品質、安全性の確保など国産化までには課題がある。産業で利用するものについては、 ^{60}Co 、 ^{192}Ir は供給体制の不安や価格の高騰など課題はあるものの国産化ニーズがあることが分かった。
- vi) シリコンドーピングは、素材技術の開発動向の見極めが難しく、現行の海外炉利用で当面は特段の問題もないことがわかり、今回の新試験研究炉へのニーズへの反映としては対象外とする。

企業訪問調査の結果、上述のような意見を聞くことができたが、具体的な試験研究炉の利用ニーズに関する意見は少なく、利用面での要望や意見が多かった。

産業利用については、関西／中京地区の自動車、電器の大企業から中性子散乱への利用ニーズはあり、また原子力関係の企業からも燃料・材料などの照射についてのニーズは長期にわたって存在する。

このため、長期的なニーズに応え、技術や情報の入手先を維持・継続するための枠組みの提示と並んで、現存する研究炉や加速器などの利用の促進や支援の一元化（窓口の一本化）などの検討も必要であるとの印象を持った。

3.2 試験研究炉、プラントシミュレータ等による人材育成及び現状と特質の調査

3.2.1 概要

試験研究炉を利用した人材育成のニーズは、試験研究炉設置の当時から種々議論されて、多様なニーズが存在しているが、時間経過とともに大きく変化している。

人材育成はその国や原子力事業の動向によって影響を受け、人材育成の戦略を決めている。

昨年度の調査では、研究炉を活用した広範囲の人材育成の枠組み・制度や連携組織について動向を整理し、参考にすべき点を抽出した。

今年度は、試験研究炉の具体的な活用の視点から人材育成の手法について再度調査を行い、人材育成の需要／供給の動向などを参考にして将来を展望し、並行してもんじゅサイトを利用した試験研究炉に特徴を持たせたニーズについても検討し、素案の構築まで行うこととした。

3.2.2 米国・EU・日本の人材育成の需給動向から見る基本戦略

(1) 米国の動向

米国原子力人材育成の政策は DOE が中心となり種々の枠組みを提示していて、原子力学会 (ANS)、物理学会 (APS)、大学、研究所、企業がこの方針に沿った活動をしている。代表的な試験研究炉を活用した人材育成活動プログラム・制度を以下に示す⁽¹⁰⁾。

- ・ **Nuclear Engineering and Science Education Recruitment Program** : 原子力系大学への学生の進学を増やすために、高等学校のカリキュラムに原子力科学、工学のトピックスを加える活動をする仕組み
- ・ **ISEP (国際原子力交換プログラム)** : 米国の学生を 3~4 か国海外に派遣するプログラムで、ドイツ、フランス、日本に派遣 (原子力学会が交換留学生制度として実施)
- ・ **DOE・企業マッチングファンド** : 大学の施設更新、カリキュラム改善のために、企業と DOE が毎年、6 万ドルを出資する枠組み
- ・ **NERI (原子力エネルギー研究促進制度)** : 基礎研究の促進のため、ピアレビューにより選定されたテーマを大学、研究所、企業が参加して実施
- ・ **NEER Grants (原子力工学教育研究資金)** : 高度なピアレビューに基づいた大学での原子力工学促進プログラム
- ・ **研究炉共同利用** : DOE が仲介して大学同士で試験研究炉を利用しあう制度
- ・ **試験研究炉高度化** : DOE が大学の研究炉の運転や実験機能増強などの支援を行う制度
- ・ **INIE (原子力設備や教育のイノベーションプログラム)** : 大学、研究所、企業が連携して設備計画、人材育成について戦略的に取り組むプログラム

この中の、**INIE プログラム**を有効に機能させるために、全米の試験研究炉などを所有する大学を六つのグループ (コンソーシアム) に分類し、一定の予算を給付して活動をしている。

- ・ **西部原子力科学同盟** : オレゴン大学 (幹事)、カリフォルニア大学デービス校、ワシントン州立大学、カリフォルニア大学バークレー校、アイダホ州立大学、リード大学、カリフォルニア大学アーバイン校、ユタ大学、ネバダ大学ラスベガス校
- ・ **ピック 10 大学研究炉大学コンソーシアム** : ペンシルベニア州立大学 (幹事)、オハイオ州立大学、ウィスコンシン大学マディソン校、イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校、パデュー

ー大学、ミシガン大学、シンシナティ大学

- ・ニューイングランドコンソーシアム：マサチューセッツ工科大学（幹事）、ロードアイランド原子力科学センター、マサチューセッツ大学ローウェル校、レンセラー工科大学
- ・中西部原子力科学工学コンソーシアム：ミズーリ大学コロンビア校（幹事）、ミズーリ大学ローラ校、ミズーリ大学カンザスシティ校、リン州立工学校、プエルトリコ科学大学、カンサス大学
- ・南東部多大学 INIE コンソーシアム：ノースカロライナ大学（幹事）、メリーランド大学、ジョージア州立大学、テネシー大学、フロリダ大学、ノースカロライナ州立大学
- ・南西部研究炉コンソーシアム：テキサス A&M 大学（幹事）、テキサス大学、ニューメキシコ大学

以上のように DOE のフレームワークの基に、人材育成を行っているが、目標とする全米の原子力人材の需要について、米国物理学会は 2007 年に以下のように発表している。

表 3-3 米国原子力人材の需要数の変化⁽¹⁰⁾

| 年代 | 需要人員数（人） |
|--------|------------|
| 2008 年 | 8,000（実人員） |
| 2020 年 | 12,500 |
| 2030 年 | 15,000 |
| 2040 年 | 18,000 |
| 2050 年 | 21,500 |

また、同年に公表された、原子力関係の組織での活動をしている技術者の専門性は表 3-4 のようになっている。

表 3-4 米国内の主要組織の専門別人材⁽¹⁰⁾

| | 博士 | 修士 | 学部 | 総数 |
|----------|-----|-----|-------|-------|
| 原子力 | 187 | 437 | 687 | 1,311 |
| 機械工学 | 125 | 750 | 2,812 | 3,687 |
| 土木工学 | — | 250 | 375 | 625 |
| 化学 | 63 | 63 | 219 | 345 |
| 物理 | 50 | 50 | 63 | 163 |
| 数学／計算機工学 | — | 63 | 185 | 248 |
| その他 | — | 437 | 1,000 | 1,437 |

（米国物理学会のグラフ資料から読み取り図表化、精度は 10%程度）

この表に示すように、約 8,000 人の技術者のうち、約 70%は学士であり、また原子力の専門家は全体のうち約 17%である。原子力の専門家の中では、学士は約半数で技術者の全体平均より少なく、原子力は高学歴技術者が多い。米国の場合は、ここに示すように、専門性や履修レベルを分析し、入社前の非原子力系の学生への教育・訓練にも言及していて、研究炉やその他のインフラの利用による育成が重要だと指摘している。

一方、供給側のデータである、2016 年次までの学生の就学状況は表 3-5 の表のようになっている。

表 3-5 原子力工学系の修了学生の推移⁽¹¹⁾

| 年次 | 学部 | 修士 | 博士 |
|------|-----|-----|-----|
| 2016 | 621 | 355 | 161 |
| 2015 | 652 | 363 | 147 |
| 2014 | 627 | 322 | 169 |
| 2013 | 655 | 362 | 147 |
| 2012 | 610 | 333 | 119 |
| 2011 | 524 | 277 | 113 |
| 2010 | 443 | 303 | 113 |
| 2009 | 395 | 233 | 87 |
| 2008 | 454 | 260 | 127 |
| 2007 | 413 | 227 | 89 |
| 2006 | 346 | 214 | 70 |

これらの履修学生のうち、原子力関係の組織（エンジニアリング企業、電力会社、研究所、規制行政官、海陸空軍など）への就職者は約半分であり、最近の学生数の維持は必須であるとしている。そのこともあって、米国では原子力専門科目の履修生を増やして人材需要に応える努力もしている。

このような原子力専攻の学生や、原子力履修生のための人材育成プログラムの中には、試験研究炉の利用の他、教育用シミュレータや熱流動装置、さらには遠隔地から学習も可能な遠隔教育設備も準備していて EU と同様活発に利用している。この現状を、大学別に、試験研究炉の利用、熱流動装置、シミュレータ、遠隔教育の制度などを表にまとめて付録 3-7 に示す⁽¹²⁾。ここに取り上げた大学の多くは、INIE の加盟と同時に、研究炉等の研究施設を相互に利用し、研究炉の事故や故障時による長期停止時に、研究や人材育成の中断のないような枠組みである DOE の NSUF (Nuclear Science User facilities)⁽¹³⁾にも加盟している。

また学生人員の項では原子力学科の専攻学生に追加して、履修登録生の数をカッコ内に記入したが、この数は非常に多く、MIT の例では、修士課程で約 6 倍、博士課程で 3.5 倍の履修生を抱えていて、種々の講義や演習・実習をしている。このように、直接の専攻生でなくとも、多くの非原子力系学生にも門戸を開いて教育していることは、人材の層を厚くするシステムとして、参考にすべきである。

(2) EU の動向

昨年度の報告書で報告したとおり、EU は 27 加盟国共同で、人材育成の枠組みを構築し連携した人材育成に取り組んでいる。企業専門家育成の EHRON と研究職専門家育成 EN3S の枠組みがあり、大学を含む連携ネットワークである、ENEN が種々のカリキュラムを準備して学生の教育に取り組んでいる。

これらのプラットフォームの活動により、人材育成の戦略を構築し、多くの出版物で公表しており、日本での育成に参考になる点は数多くある。この中では、人材育成モデル⁽¹⁴⁾を図 3-2 のように 3 層にわけて、育成から採用に向けて、EU 各国に共通した意識を共有して取り組んでいる。

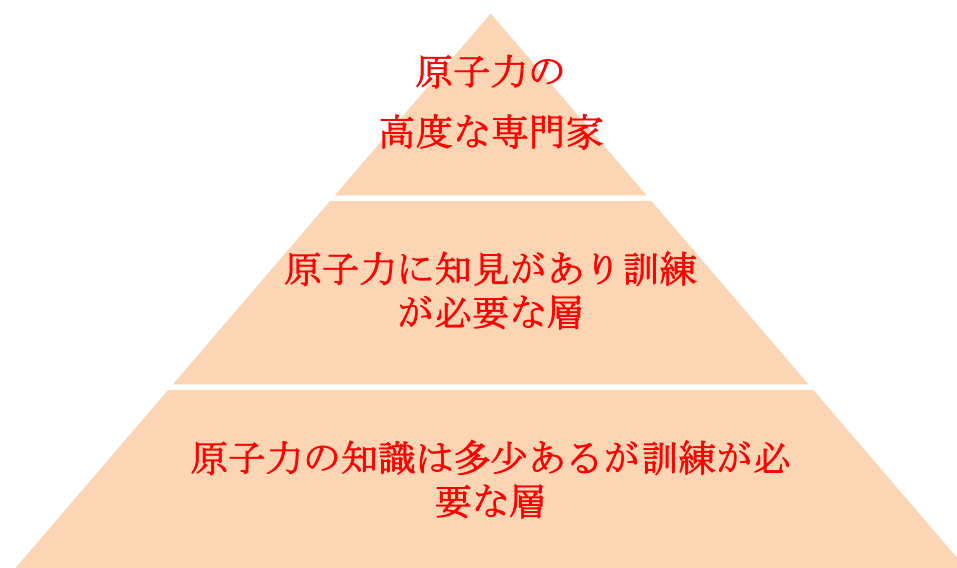


図 3-2 原子力を支える人材の階層化

下段の層は最も人数が多い作業員、技能者の層で、訓練によってスキルを向上させる必要がある層である。中段の層は原子力関係の学科で基本を学習してきたが実務経験がないため、のちに教育訓練をして業務の遂行能力を身に付けさせ、その結果上位に昇進したときにはプロジェクトリーダー並みの地位に就く人材層である。上段の層は原子力について技術・管理ともに高度な知識やスキルを保持した高級技術者や管理者層である。上段の層は学生でいえば、博士課程の卒業生以上であり、修士と学士は中段の層に位置づけて育成する。

人材育成ではこれらの階層ごとに、ニーズに基づいて適切な教育・訓練をさせる仕組みを検討し、戦略を公表している。

EU の学生数である原子力人材⁽¹⁵⁾の規模（供給サイド）は、表 3-6 に示すように、専攻生と履修生を合わせて、2009 年で合計 1,040 名、2014 年は合計 1,800 名で、東京電力福島第一原子力発電所事故の影響は出ていないように見える。

表 3-6 EU の原子力系専攻生と履修生の数の概要

(単位 人)

| 学位 | 区分 | 2009 年 | 2014 年 |
|----|-----|--------|--------|
| 学士 | 専攻生 | 200 | 250 |
| | 履修生 | 220 | 540 |
| 修士 | 専攻生 | 280 | 380 |
| | 履修生 | 300 | 500 |
| 博士 | 専攻生 | 20 | 50 |
| | 履修生 | 20 | 80 |
| 計 | 専攻生 | 500 | 680 |
| | 履修生 | 540 | 1,120 |

一方、人材の需要⁽¹⁶⁾については表 3-7 のように公表されている。

表 3-7 EU での人材需要の内訳

(単位 人)

| | 2015 年 | 2020 年 |
|--------------------|--------|--------|
| 電力会社 | 400 | 1,600 |
| 製造・供給企業 | 40 | 100 |
| 燃料製造業 | 20 | 40 |
| 廃棄物処理・廃止 措置関係企業 | 180 | 350 |
| 設計事業 | 550 | 3,600 |
| コンサルタント | 10 | 30 |
| 規制行政 | 150 | 200 |
| 研究開発 | 190 | 500 |
| 合計 | 1,540 | 6,420 |

この数は、退職者の数と高成長シナリオの建設計画から推定している需要で、2014 年の修了生の数からみて 2015 年には需要はほぼ満たすように見えるが、2020 年の約 4 倍にも膨れ上がる需要をどう満たしていくかは大きな課題であるとしている。

これら、技術者の人材育成については、OECD/NEA のワーキンググループが 2012 年に公表した原子力教育と訓練に関する懸念から実現可能性に関する文献⁽¹⁴⁾によれば、学生から専門技術者や研究者、行政担当者を含めた人材育成に必要なインフラとしては、**試験研究炉 (RR)** や**臨界実験装置 (CA)**、及び**伝熱流動装置**に加えて**PC (計算機) シミュレータ**や**フルスコープシミュレータ**の利用を取り上げている。

この中でも**研究炉**や**伝熱流動装置**は、計測手段などを経由してはいるものの、物理現象に触れることができ、実感の体験ができる反面、機器の寿命や保全 (メンテナンス) が必要であること、

装置の価格が高価であること、複数の炉型やプラント全体の理解をするための情報提供には限界があることなどの欠点も挙げている。一方シミュレータは種々のタイプのシミュレータが開発⁽¹⁷⁾、⁽¹⁸⁾され、比較的安価で、炉型やシステムの変更に柔軟に対応でき、定常運転から事故時までカバーした仮想的な体験ができるが、実プラントや研究炉での実感（手触り感）に欠けるなどの課題がある。

EU のフレームワークプログラム「持続可能性のある原子力技術のプラットフォーム (SNETP)」での「人材育成ワーキンググループ」の 2010 年の報告書⁽¹⁹⁾でも、人材育成のためのこれらのインフラについて以下のように述べている。

- ・ コンピテンス醸成やスキル育成のためには適切な基礎を身に付けるための施設が必要である。
- ・ 従来から使われている大学や研究所の研究炉などの施設は老朽化が進み、その対策のためには費用が必要なために改造や新規建設に取り組む例は少なくなっている。2010 年現在 53 基のうち 25 基の研究炉しか運転されていない。特に PhD プログラムでは大型の施設を利用した質の高い、魅力のある研究の推進をすべきである。
- ・ 一方、学士や修士のための教育には 8 基の研究炉しか利用できず、年間 120 時間の利用である。また博士課程や修士の論文のためのテーマは年間 70 程度である。これに対して電力会社などはこの数を倍に増やしたいとしている。現在 EU で計画している大型の研究炉では不十分である。

このような背景から、EU でも連携して、米国と同様、研究炉などの施設の共同利用や、研究炉以外の熱流動施設、シミュレータなどを使って、育成内容の技術の幅の拡大を図り効率的に人材育成を図っている⁽²⁰⁾。

これらの 3 点セットと並び広域での人材育成に有効な方法として、最新の IT 技術による遠隔教育 (e ラーニング) システムがある。遠隔教育の特長は、「いつでも、どこでも、だれでも、だれとでも、どんなレベルでも学べる」参加型学習ツールで、欧米でも原子力関係の大学や研究組織での導入が増えている。特に IAEA は種々の分野で、遠隔教育の枠組みや支援を行っていて、その制度が活用され、EHORN や ENEN など遠隔教育の経験が報告されている⁽²¹⁾。

ここではそれらを参考にして遠隔教育の概要について述べる。

まず、遠隔教育における情報交換の基本要素を図 3-3 に示す構造と考えると教育内容やカリキュラムに適合する手法を選んでいる。

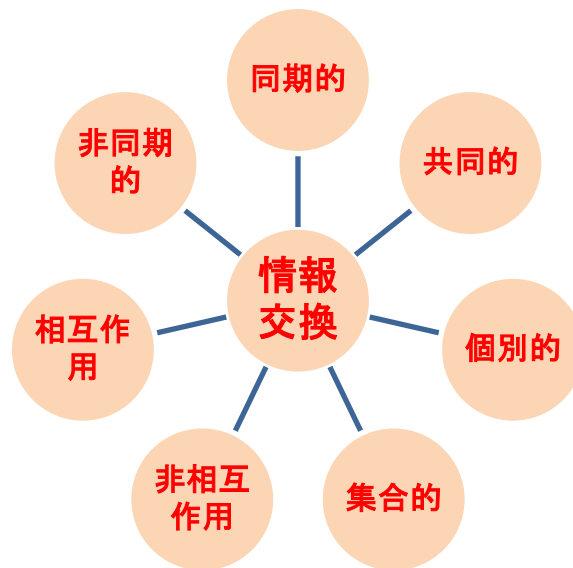


図 3-3 e ラーニングにおける情報交換の基本要素

この手法を具体的に利用して教育を行うためのツールは、**同期的な情報提供**として、テキストベースのチャット、ビデオチャット、バーチャル教室などがあり、**非同期的な情報交換**としては、Wiki、フォーラム、ブログ、ストリーミングのようなモバイルツールで使われているツールが使えるとしている。また**相互作用**ではバーチャル教室を主体として、チャットやブログといったツールを補助的に使うなど具体的に紹介している。また、**集会的あるいは共同の情報のやり取り**として市販のソフトウェアの使用経験も紹介していて、これらを即日にも使用することも可能である。しかし、研究炉や原子力施設の場合には核不拡散上の考慮やサイバー攻撃対策など他の機関と共同して実施する場合には細心の注意が必要であろう。

また、遠隔教育のカリキュラムも ENEN 加盟の大学や研究機関から提示されていて、受講希望者の幅広い要求に応じている。以下に、英国で展開されている遠隔教育の代表的な例を示す。

- Manchester University : Nuclear Safety Case Development
- Manchester University : Critical Safety Management
- Manchester University : Reactor Thermal Hydraulics
- University of Central Lancashire : Construction Management (MSc)
- University of Central Lancashire : Governance of Civil UK Nuclear Ind. (Post. Grad.)
- University of Central Lancashire : Engineering Nuclear
- University of Central Lancashire : Decommissioning Technology and Robotics
- University of Portsmouth B.Eng. : Mechanical and Manufacturing Engineering (3 years)
- University of Portsmouth B.Eng. : Mechanical and Manufacturing Engineering (2 years)
- University of Sheffield : Processing, Storage & Disposal Nuclear Waste

(3) 日本の動向

米国や EU の人材育成の動向に続いて、日本の動向について整理する。日本と欧米の大きな違いは、ロードマップで人材育成の一般的な方向性は示しているものの、将来の人材需給について欧米のように具体的な数値を示している資料が非常に少ないことである。

人材育成の我が国の戦略については、産学官による連携組織である「人材育成ネットワーク」から平成 27 年 4 月に提案され、そこでは「原子力人材育成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－」⁽²²⁾の中で、以下の四つの戦略到達目標を設定している。

- ① 福島復興・再生
- ② 安全運転・安全確保
- ③ 核燃料サイクル・放射性廃棄物処分
- ④ 国際貢献・国際展開

この中で、目標実現のための共通事項として大学などの教育・研究環境の確保を取り上げ、人材育成のロードマップに取り上げるべき事項として以下の項目を提示している。この調査での人材育成のニーズとして参考になる項目が多く含まれているため、以下に引用する。

- ・教授人材の確保（ポスト、処遇、研究）
- ・カリキュラムの国際標準化
- ・基礎・基盤教育の充実
- ・リベラルアーツの重視
- ・大学間連携／単位相互認定
- ・教育・研究用施設の維持／更新／新設
- ・施設の共同利用

なお、太字で強調した項目は、今回のもんじゅサイトの試験研究炉の検討に関する調査に直接関係する課題であり今後とも注目すべき内容であると考えられる。

この人材育成実施例として、図 3-4 に示すように、京都大学の原子力複合科学研究所の臨界実験装置での学部生や大学院生の教育、国際協力などについてまとめている。この図では 1990 年代の後半までは学部学生の実習中心であったものが、大学院生の教育にも使われ出している。東京電力福島第一原子力発電所事故の以前まで、外国人を含んで研修生は年々増加傾向にあり、先々もこのようなニーズは大きいと考えられる。

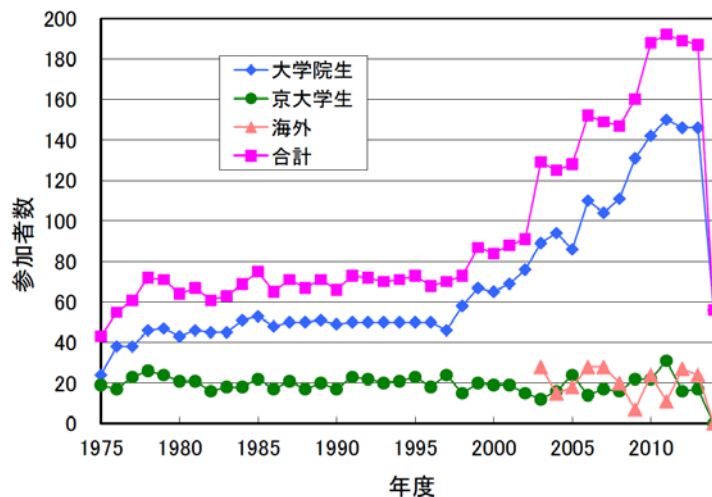
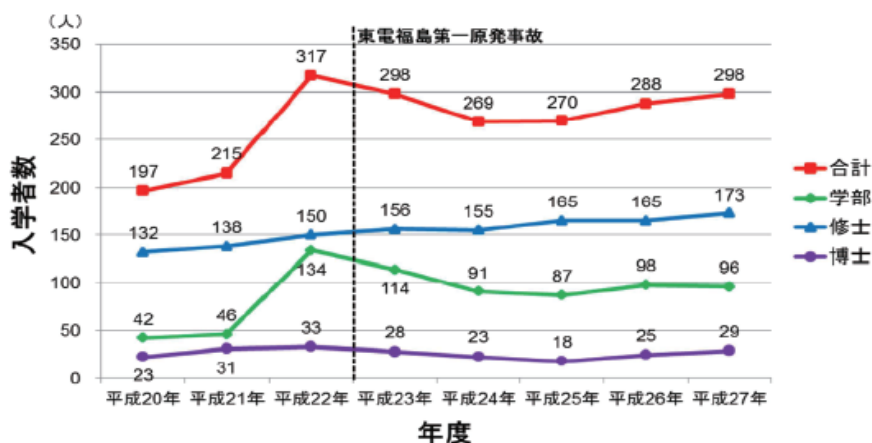


図 3-4 京都大学臨界集合体実験装置（KUCA）を用いた炉物理実験教育の受講学生数⁽²³⁾
 (文部科学省原子力研究開発基盤作業部会（第2回資料）より)

人材育成については定量化された資料が少ないことは前述のとおりである。原子力産業協会から過去に発行された資料もあるが、最近政府機関が整理した資料⁽²⁴⁾を参照して人材育成の需給課題を検討する。

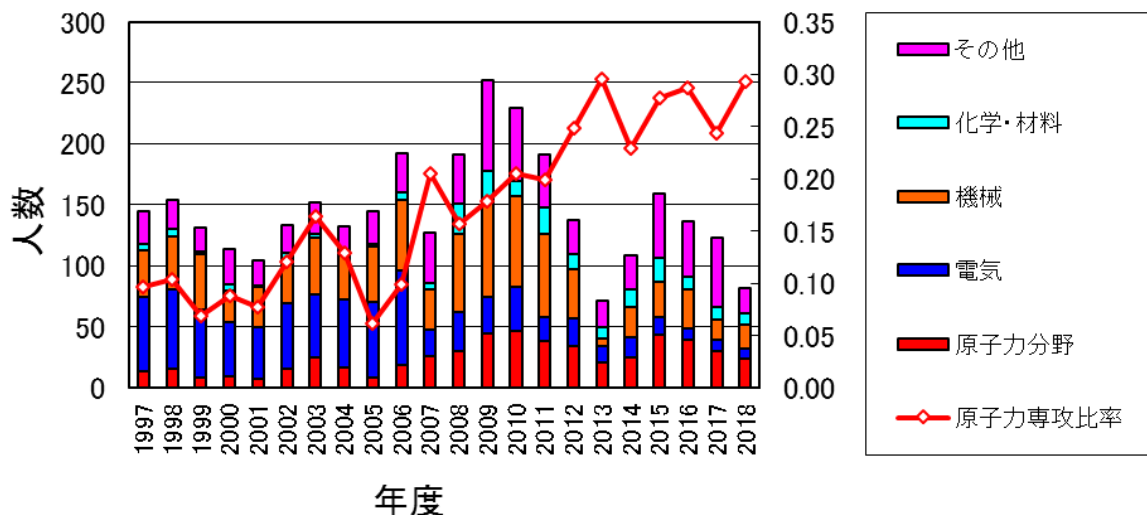


(出典) 原子力人材育成作業部会「中間取りまとめ」(平 28.8.29)

図 3-5 我が国における原子力工学関係の入学者数の推移

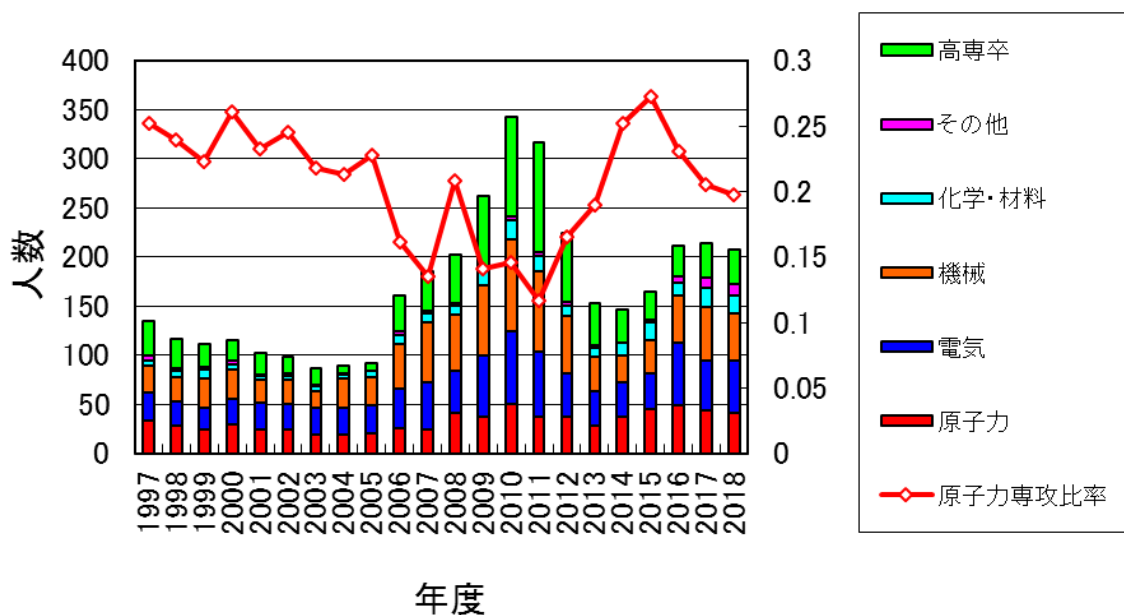
まず原子力人材の将来を担う、原子力関係学科の平成 20 年度から 27 年度入学者数の推移を図 3-5 に示す。この図から、東京電力福島第一原子力発電所事故の影響は、学部学生の入学傾向の増減には見えるが修士や博士課程では一定であることがわかる。入学者の総数は約 300 名で、平成 20 年頃の数に比べて増加していることは次世代の原子力への取り組みにとっては明るい材料である。

次に、これらの学生を受け入れる企業側の人材採用のトレンド（需要傾向）をプラントメーカーと電力会社の大口需要についてみると図 3-6、図 3-7 に示すデータがある。



(出典) (一社) 日本原子力産業協会「PAI 原子力産業セミナー2020 開催報告」
 調査対象：IHI、東芝エネルギーシステムズ、日立GEニュークリア・エナジー、富士電機、
 三菱重工業、三菱電機 の原子力関連主要メーカー6社
 (注) 2018年度は、5月時点の原子力部門配属数(配属予定数を含む)を計上している。

図 3-6 プラントメーカーの採用実績

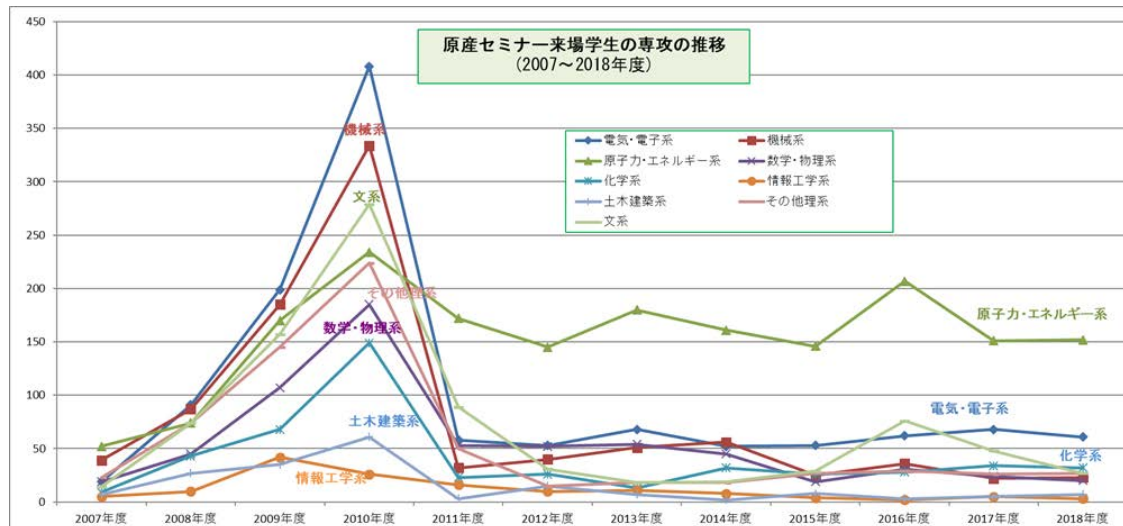


(出典) (一社) 日本原子力産業協会「PAI 原子力産業セミナー2020 開催報告」
 調査対象：北海道電力、東北電力、東京電力、中部電力、北陸電力、関西電力、中国電力、
 四国電力、九州電力、日本原子力発電、電源開発 の電気事業者11社
 (注) 2018年度は、5月時点の原子力部門配属数(配属予定数を含む)を計上している。

図 3-7 電力事業者の採用実績

これらの結果をみて、原子力系の学生のプラントメーカーへの採用は、2000年代に入ると、平均的には10~15%程度の採用割合ではあるが、絶対数では震災前の50名弱の採用数に比べると、ここ数年は半減している。また震災後の機械系や電気系の採用数が復活している傾向に比べ、原子力系学生の採用数が減ったまま横ばいで推移していることは憂慮すべきではないかと考える。

しかし、電力会社はプラントメーカーとは異なり、震災後の全体の採用人員は半減したものの、原子力系学生の採用の数はほぼ一定で、原子力関係事業の長期的な取り組みに備えていることが推察できる。原子力系学生の採用先は、ここで取り上げた以外の企業や研究所もあることにも留意すべきであり、エンジニアリング・コンサルタント系の企業、日本原子力研究開発機構などを中心とした研究機関もあり、今後、学生の進路としては、海外企業も含め幅広く見ていく必要がある。



(出典) (一社) 日本原子力産業協会「PAI 原子力産業セミナー2020 開催報告」

図 3-8 原子力企業合同説明会への参加学生数の推移

一方、プラントメーカーも電力会社も、原子力専攻以外の学生も採用しているが、図 3-8 に示すグラフは、原子力企業の採用説明会への出席動向であり、学生の原子力産業への関心度を示す指標ともいえるもので、非原子力専攻の学生の関心が東日本大震災以降減少したまま推移していることは大きな課題である。この意味で、原子力関係者には国を挙げて「人材育成」という掛け声のもとで相応の対応活動を産官学で実施しているが、非原子力分野からの関心が低下していくことは事業展開のバランスを失うことにもつながる懸念もあるために、新設する研究炉とその周辺地域での技術体験の幅を広げていく枠組みは重要であると思われる。

(4) もんじゅサイトでの試験研究炉を中核とした「先端的原子力人材育成拠点」提案

【提案の目的】

以上、欧米での人材確保の動向や人材育成のためのインフラの複合的な利用、及び国内の原子力系学生の就学や採用状況を述べてきたが、ここでは、学生動向や人材育成のロードマップによるニーズに基づいて人材育成のためのインフラについて検討した。

具体的には、欧米で先行実施しているように、大学や研究機関などは人材育成のために、保有している試験研究炉、熱流動設備、原子炉シミュレータ、遠隔教育機材、その他の施設（ホットラボなど）を単独組織又は共同で利用している。それらを参考にして、もんじゅサイトの研究炉の検討と並行して、人材育成に効果的な技術の幅を広げ、かつ原子力の導入途上の国々を含めた国際協力も視野に入れ、地域の人々とも共生できる人材育成の拠点の形成に役立つシステムを目指す検討を行うこととした。

【拠点の目的と基本構成】

もんじゅサイトに建設する試験研究炉の規模にかかわらず、人材育成の中核は「試験研究炉」であり、それを活用して、地元大学や近隣大学及び近隣のアジア諸国の学生が原子力の基礎現象や基盤技術の一部を体験することを第一の目標として設定する。しかし、試験研究炉では原子核に関連した技術は体験できるものの、巨大システムといわれる原子炉に内在する多様な熱や流体などの現象の複雑な把握が難しいため、熱流動装置を利用して種々の現象や事故のシミュレーションを行い原子炉の特性を理解する。また、巨大システムの状況を教室でも作動状況が把握できる「プラントシミュレータ」によりプラント全体の動作や多くの機器やサブシステムの特性や過酷事故などの異常時の現象を学ぶことが可能である。さらに「保全モックアップ」により機器の動作原理や保全の重要性などを体験学習し、これらの機器単体からプラント全体にわたる設計・製造・建設・運転・保全などの管理サイクルの技術継承の手法を学びとることを可能にする体験をほぼ1か所に集中して教育／訓練する仕組みである。

また、遠隔地や就業／学業のためこの拠点での学習が困難な人々のために、欧米でも行っている遠隔教育システムも導入し、国内はもとより海外の学生や技術者の日常的な学習のツールを準備し、中核地点でのスクーリングなどを開催し学習機会の提供もできるよう枠組みを考える。以上のような構想イメージを図 3-9 に示す。

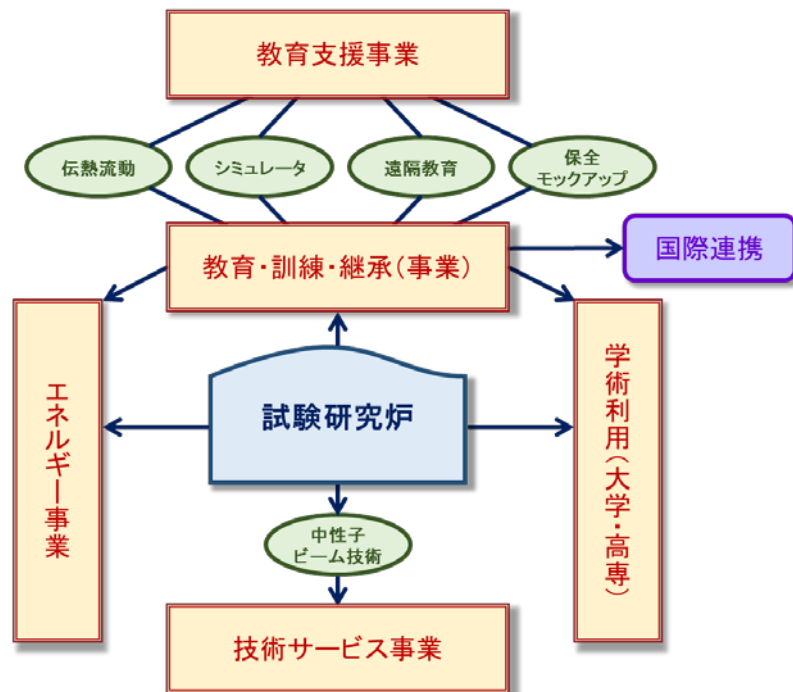


図 3-9 人材育成の中核拠点の基本機能図

この図では、教育訓練を軸とした教育支援事業を中心として、学術や中性子ビーム技術による地域に関係した技術サービス事業や原子力発電に関連したエネルギー事業にも貢献でき、さらにはこれらのツールを活用した国際連携も視野に入れたものである。

以下にこの概念の基本的な要目を整理する。

【人材育成の対象者と育成内容】

- ・原子力専攻学生の原子炉工学基礎教育カリキュラムによる教育
- ・理工系学生、医学系の原子力の基礎についての体験学習（可能ならば認定まで）
- ・メーカー・電力原子力関係技術者の継続教育（CPD カリキュラム）
- ・原子力行政官・規制担当官の導入時教育
- ・原子力・エネルギー技術継承プログラム教育（新規提案）
- ・海外原子力技術者導入教育と資格認定教育

【具備する育成ツールの仕様概要】

- ・「**試験研究炉**」：原子炉の起動停止・定常運転に伴う原子炉の動特性などを把握し、パラメータの監視・制御の可能なシステムを有し、非常停止の条件などを起動するメカニズムの理解、原子炉の安全（温度・環境放射能などの監視による確認を含む）運転の体験、核物質管理の基本体験、法定資格取得のための教育ツールの具備
- ・「**熱流動設備**」：冷却材の加温システム、流動ポンプや熱制御システム、ループ監視・制御系、事故模擬設備、作業安全確保システム、非常時注水系モデル、必要に応じて配管破断模擬装置
- ・「**シミュレータ**」：研究炉炉心シミュレータ、PWR/BWR などの現行運転中の発電プラントシミュレータ、炉心制御シミュレータ、燃料事故シミュレータ、過酷事故シミュレータ
- ・「**保全モックアップ**」 原子炉一次系主要機器（ポンプ、バルブ、気水分離機、制御棒駆動装置、加圧器、流体制御装置（ダミー燃料など）、非常用冷却システム（事故時注入系）、2次系機器（蒸気発生器、他）、必要に応じて原子炉容器、炉心部、発電機、開閉器など
- ・「**遠隔教育システム**」：テレビ会議システム、遠隔撮像システム、ソーシャルメディアシステム操作機器、大容量記憶装置
- ・「**スクリーニング関係設備**」：遠隔での学習の仕上げ確認のための集合教育的なスクリーニングや、もんじゅサイトの近隣で稼働中の原子力発電所、関連した運転訓練センターや補修訓練センターの見学に備えた、LAN 設備のある学習用教室・準備室、資料室、移動システム

【人材育成中核拠点創成による効果】

ここで検討した拠点創成による効果は数多く挙げることができるが、ここでは次の3点を強調しておく。

① 巨大システムの総合的な理解促進拠点

原子力発電やサイクルシステムは、巨大システムといわれるように、プラントを構成する機器／部品の数や計測のための機材は他の例を見ないほど多く、また原子燃料を使って発電に至るまでのプロセスは、核反応→発熱→熱移動→回転動力→発電→送電と原理原則が異なるステップを踏むために多くの物理／化学的な現象が絡んでいる。そのために直感的な理解が難しい。この全容を効率的に理解できるツールである研究炉を始め種々の最先端技術を駆使した装置により実際に物に触れて学ぶことができる拠点である。

② 地元への貢献

教育拠点創成による地元への貢献効果は以下のものがあると考えられる。

- i) 原子力関係機材設計・製作事業の発展と人材育成（前例はノルウェー ハルデン炉、日立市や東海村）
：研究炉の部品製作、研究炉実験装置・熱流動装置などの小型機器類の設計／製作、試験研究炉／熱流動装置などの計測装置の設計／製作／開発、シミュレータ・遠隔教育用電子機器部品の設計製作などの現地での調達品製造、補修事業への発展や人材育成
- ii) 拠点での学習者参加による集客効果：宿泊、移動、日用品販売など
- iii) 中等／高等教育プログラムによる若年層の理科学習機会の向上
- iv) 国際交流による国際的な町づくり（異文化交流を含む）

③ 国際貢献

- i) 遠隔地／現地学生の交流と国際化人材育成
- ii) 国際的なブランド製品の支援
- iii) アジア地区の原子力技術のリーダーシップの拠点化

3.3 海外の試験研究炉のニーズに係る現状調査

3.3.1 米国現地調査先と調査項目

外部有識者委員会において、海外の試験研究炉のニーズ等に係る現状調査先として欧州案と米国案の検討をした結果、米国には様々な規模の試験研究炉が運転中で最近では試験研究炉の再稼働や新規の試験研究炉の建設計画情報などがあったことから米国を訪問することとなった。訪問先として、アイダホ国立研究所（INL）、マサチューセッツ工科大学（MIT）、そして GE-HITACHI 社の 3 組織を選定した。

そこでの調査項目は以下のとおりである。

- ① 試験研究炉の研究開発利用と研究開発のニーズ
- ② 試験研究炉を安全かつ効率的に利用するための管理運営
- ③ 試験研究炉の産業向け利用
- ④ 試験研究炉を利用した人材育成
- ⑤ 新規の試験研究炉の計画
- ⑥ 試験研究炉に関連した新規研究への取り組み

3.3.2 調査の成果概要

(1) 試験研究炉の研究開発利用と研究開発のニーズ

米国の試験研究炉を利用した研究開発での最大の枠組みは、DOE による NSUF（Nuclear Science User Facilities）で、試験研究炉などの大型研究施設をもった大学や国立研究所、さらに企業も参加して研究開発を効果的に行うことを目的にしたプラットフォームである。

これらの研究開発の財源は、国（DOE、NRC、DOD など）からのもので、企業からの出資も一部含まれている。代表的な研究テーマは以下のとおりである。

- ・原子炉燃料・材料の研究開発：現行の原子炉から第4世代の原子炉で使われる燃料・材料の照射効果のデータベース・モデル化、新材料・燃料の開発など
- ・新型計測制御装置：炉内で使用する検出器や高信頼デジタル制御系の開発
- ・中性子ビーム利用研究：散乱現象などを活用した研究開発
- ・先端的な原子炉開発：中小型炉、更に小型化を目指したマイクロ原子炉の開発など、新概念創出研究のための基礎研究
- ・原子炉過渡事象：専用の研究炉を用いた事象把握とシミュレーション化の研究開発
- ・モデル化・シミュレーション技術：燃料材料や動特性のモデル化を含め、多岐にわたる現象のモデル化とシミュレーションの研究開発
- ・照射試料の検査技術：ラジオグラフィやγスキャンなどの検査手法開発

(2) 試験研究炉を安全かつ効率的に利用するための管理運営

規制は、国立研究所は DOE が、大学や民間の試験研究炉は NRC が担当している。

1) MIT での管理体制

試験研究炉は、出力 2MW 以上では許認可や検査の基準は一段と厳しくなり、対応管理組織は学長を頂点とする階層化組織にし、NRC との対話も各階層別で行う。管理任務としては、運転・保守管理と放射線管理に分け、いずれも大学職員による組織である。また学生も NRC による運転員資格を取得して、運転班長の任務をこなしていることは、人材育成視点と合わせ注目される。

東京電力福島第一原子力発電所事故対応として、監視制御系のデジタル化を求められ、新規の機器を併設し運転している。また現在準備している燃料が 2025 年に消費されるために、それ以降の継続計画は明確になっていない。

2) INL での管理体制

INL は、研究所全体の運営及び試験研究炉や施設の管理は伝統的に外部に委託している。約 4,200 名を擁する INL は民間団体の組合（国立研究所の管理実績のある、「ベクテル事業組合」）が現在は施設、諸管理を請け負っている。研究炉の老朽化対策として、ATR を 2040 年まで運転することを検討している。このため、PSR に SAPHIA コードによるリスク評価の実施を計画している。現在保全計画にこの PSA を取り入れていて、新規の試験研究炉建設や改造時の評価にグレーデットアプローチをツールとして利用できるとの意見もあった。

また、過渡事象を実験的に確認、モデル化するためのデータを採取するための試験研究炉、TREAT 炉を 2017 年に運転開始した。

(3) 試験研究炉の産業向け利用

- ・INL の ATR 炉では、数年前から、ORNL からがん治療に使われる γ ナイフ用 ^{60}Co の製造を引き継いで、国内の医療用 RI 販売ルートにより販売し外部収入源になっている。
- ・MIT では、日本や中国からの依頼で、Si ドーピングを年間 200 トン以上行っていて、外部資金の大きな柱になっている。この照射サービスの中断に備え、米国内の大学の研究炉やオーストラリアの研究炉とも連携して、停止時には相互利用が可能となるように協定を結んでい

る。

- ・プラントメーカーの燃料・材料の照射評価には INL ATR や MIT の試験研究炉の利用はあるが、照射ができないこともしばしばあるために（ATR は DOD の利用などによる制約、MIT 炉も他の研究との競合もある）、ベルギーの軽水試験研究炉やロシアの高速試験研究炉での照射を行っている。
- ・MIT で京大の KUR と並んで 1990 年代の終わりころから実施してきた、BNCT（ボロン中性子照射がん治療法）は、かなり効率を上げて、治療ができるようになったが、種々の規制問題から現在は実施していない。また今後もほぼ実施する見込みはない。

(4) 試験研究炉を利用した人材育成

- ・INL と ORNL は、昨年 11 月 IAEA との間で、ICERR（国際協力研究炉による人材育成枠組み）の契約をした。この枠組みは 2015 年に、フランスの ORISIS や JHR を中心とした契約を手始めに、ロシア高速研究炉を中心にした契約に続いて、ベルギーとともに昨年契約をしたものである。
- ・INL では NRC 職員が頻繁に訪問し、OJT による訓練をしている。この訓練は DOE 規制メンバーとの交流にも役立っている。
- ・MIT でも座学の他に、学生に法定資格を取らせて、OJT により運転員としての育成をしている。
- ・GE-HITACHI 社の人材育成では OJT を基本としていて、試験研究炉の利用はほとんどない。しかし、シミュレータを利用する訓練は実施している。

(5) 新規の試験研究炉の計画

米国でも久しく試験研究炉の新設はなかったが、今年 2 月に議会の決定により、多目的利用高速実験炉 VTR（Versatile Testing Reactor）の建設が決まり、このプロジェクトの担当に、INL と GE-HITACHI が選定された。この実験炉は 200~300MW の出力で、2026 年には運転を開始するもので、建設予算は約 2B USD である。

この設計検討には、国立研究所の協力や、大学などからの公募による研究設備や研究内容の提案を受けて、多種多様な組織が参加して推進する。

(6) 試験研究炉に関連した新規研究への取り組み

INL では、現在多くの企業が取り組んでいる中小型炉の次世代型として、「マイクロ原子炉」の検討を始めている。規模は 1MWe 程度で、工場で最終組み立てと完成検査を終えたプラントをトラック輸送でサイトに運び、据え付けるという概念で、可能な限り早急に実証して商用化しようとしている。

また試験研究炉だけに関連した取り組みではないが、INL では解析・シミュレーションを促進するための計算機センターを新設することを検討している。

この取り組みで見ると、燃料や材料照射から得られた知見のモデル化、プラント保全のための PSA 手続きのための解析、などは今後我が国でも検討すべきインフラの一つでもあると考えられる。

3.3.3 米国現地調査のまとめ

今回の調査は、時間的な制約もあって、国立研究所、大学、企業の代表を訪問しただけであったが、米国の新規原子力発電所の建設に伴い、研究開発も活発化してきていることを試験研究炉の利用という視点から見ることができた。米国内では、NSUF（Nuclear Science Users Facilities）による施設の合理的な活用の枠組みや、研究成果の迅速な商用化を目指した GAIN（Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear）の枠組みによる研究開発の取り組みには参考になる動きが多くある。なお、INL の VTR については、すでに 2.4.4 に詳細な記載をしたとおりである。

【参考文献】

- (1) European Nuclear Society “European Research Reactor Conference”
<http://www.euronuclear.org>
- (2) 日本原子力学会 “日本原子力学会年会・大会予稿 アーカイブ”
<http://www.aesj.or.jp>
- (3) (独) 日本原子力研究開発機構 ユーザーズ オフィス “研究用原子炉 JRR-3 の中性子利用による施設共用促進” (平成 24 年 2 月、平成 23 年 2 月)
- (4) (一財) 放射線利用振興協会 “原子力基盤技術試験研究データ”
- (5) WNA “Radioisotopes in Medicine” (Update June 2018)
- (6) A.ALBERMAN “A Review of Silicon Neutron Transmutation and Its Practice at French and Belgian Research Reactors” (IAEA Utilization Related Design Features of Research Reactors: A Compendium 2007)
- (7) J.Razvi “Transmutation Doping: An Overview” (IAEA Utilization Related Design Features of Research Reactors: A Compendium 2007)
- (8) IAEA TECDOC 1681 “Neutron Transmutation Doping of Silicon at Research Reactor” (IAEA 2012)
- (9) 文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会 科学技術委員会原子力研究開発基礎作業部会 (第 5 回) (平成 30 年 2 月 6 日)
- (10) US APS Panel “Readiness of the US Nuclear Workforce for 21st Century Challenges” (June 2008)
- (11) ORNL “Oak Ridge Institute for Science and Education” (ORNL 2017)
- (12) US DOE AND “Nuclear Science and Engineering Education Sourcebook 2018” (ANS 2018)
- (13) US DOE NSUF (2018)
<https://nsuf.inl.gov/>
- (14) OECD/NEA “Nuclear Education and Training from Concern to Capability” (OECD 2012)
- (15) JRC Policy Reports “Post Fukushima Analysis of HR Supply and Demand” (EUR 27017 2014)
- (16) JRC Science for Policy Report “Top-Down Workforce Demand from Energy Scenarios: Sensitivity Analysis” (EHRON Reports 2016)
- (17) IAEA TECDOC 1836 “Developing a Systematic Education and Training Approach Using Personal Computer Based Simulator for Nuclear Power programs ---Proceedings of a Technical Meeting Held in Vienna, 15-19 May 2017--- IAEA (2018)
- (18) IAEA “Technical Meeting on Utilization of NPP Simulators as Educational Tools” (IAEA 2014)
- (19) EU SNETP “Nuclear Education and Training”
www.SNETP.eu
- (20) EU SNETP “Current and Future Uses of Nuclear Infrastructure in Europe” (Working Group ETKM 2010)
- (21) JRC Scientific and Policy Reports “Distance Learning Courses in Engineering in the EU-27 (EU 2013)
- (22) 原子力人材育成ネットワーク “原子力人材育成ネットワーク戦略ロードマップ” (2014 年)
- (23) 文部科学省原子力研究開発基盤作業部会 第 2 回 資料 (2018 年)
- (24) 参議院常任委員会調査室・特別調査室 谷合まどか “原子力人材の現状と課題” (立法と調査 2017. 10 No393)

【付録 3-1】

国際会議にみる研究炉を利用した最近の学術研究の動向

略号：RR＝試験研究炉、福島事故＝東京電力福島第一原子力発電所事故、
その他試験研究炉の略号は IAEA RRDB を参照のこと

| | テーマ名 | 2018年 | 2017年 | 2016年 | 2015年 | 2014年 |
|------|---|--|--|---|--|--|
| 学術研究 | 核データ収集評価 (炉物理、臨界安全など) 15件 | 核データや燃焼度計算の評価、 ⁹⁹ Mo、 ¹²⁷ Iの微分断面積測定 | | CROCUS (臨界実験装置)の今後の利用 | モデルの検証 (MCNP-MURE、RELAP5-PARC、OSCAR-4)、燃焼度と材料のデータによる原子炉安全評価、微細群断面積データの不確実性 | 核データ採取、炉内流の変化と主ポンプ負荷のシミュレーション |
| | 新型炉開発 (試験用インパイルループを含む) 6件 | 中小型炉の長寿命燃料の最適化 | 高温ガス炉のON-LINE燃料管理 | | 鉛冷却高速炉の開発動向と高温溶融塩炉のMIT炉での材料照射 | JHRの軽水炉、高速炉用インパイルループ構想とRRによる新型炉開発の実験研究 |
| | 中性子ビーム利用研究 (冷中性子発生技術、散乱研究用施設、その他ビーム利用を含む) 23件 | <ul style="list-style-type: none"> 冷中性子発生、PGA装置開発、EB溶接の残留応力評価、溶接部硬度分布 パルス炉によるビーム利用 中性子カメラの高速化 | ⁹⁹ Mo製造用ターゲット、低出力炉の科学利用、取り出し中性子ビームの最適化コード | RRの科学的利用、熱中性子による14MeV中性子の発生、冷中性子用装置の開発：6件 | 強磁場中の散乱実験や分極中性子の性質、RRでの科学利用、冷中性子発生施設 | |
| | ADSと核変換 1件 | アクチノイド化学研究 | | | | |
| | 燃料研究 (新燃料、キャプセル・インパイルループの設計・利用) 16件 | PWR用7%濃縮燃料、UO ₂ 燃料の照射効果(多孔質化と熱伝達)、高密度燃料のトランジエント現象、高速炉用U-Zr燃料の評価(臨界実験装置とインパイルループ、高速中性子照射) | 第4世代炉に向けた燃料の中性子照射 | 次世代発電炉の燃料開発、低出力炉による燃料体照射とFPガス測定 | KAERIにおける将来炉の技術開発利用、JHRの実験能力 | JHRローレライの設計と試験設備 |
| | 材料研究 (キャプセル照射・インパイルループを含む) 12件 | 原子炉SS材料の熱中性子による照射、原子炉材料の高速中性子照射 | | 高照射用キャプセル開発、アルミニウム合金の酸化膜評価やZr材料の模擬照射 | 将来炉原子力材料照射や関連技術開発、JHRの国際連携による材料照射計画 | 新型炉材料評価、LWR材料試験用インパイルループ、炭素鋼の腐食測定 |

| | テーマ名 | 2018年 | 2017年 | 2016年 | 2015年 | 2014年 |
|----------|---------------------------|---|---|---|--|--|
| 学術研究 | 安全性 4件 | 制御棒落下、RIA事故模擬、FBR過酷事故モデル実験とシミュレーション | | | | |
| 事業サービス支援 | 研究支援サービス 事業サービス 17件 | 放射化分析の限界、潤滑油へのn・γ照射、RI製造(Lu) | γ線照射、ラジオグラフィの施設、オランダRIバレー計画 | NAAの繰り返し照射による効率向上 | ⁹⁹ Mo製造への低濃縮ウラン利用、 ⁹⁹ Moの製造の現状と将来、低出力炉での ⁹⁹ Moの製造可能性 | JHRでの医療用RI製造構想、 ⁹⁹ Moの市場動向 |
| | 人材育成支援 13件 | ICERRへのIAEAの寄与、Eラーニングによる放射化分析 | UUTRでの教育用RRシミュレータ、MARIA炉での教育プログラム、ロシアMBIRによるICERRの枠組み | フランスにおけるICERR、東欧研究炉連携での支援、遠隔教育、ゼロ出力炉での学生教育、中出力炉によるカリキュラム | ICERRの枠組み、東欧研究炉利用連携ネットワーク、仏ISIS炉でのインターネット教育 | |
| RR管理・運用 | 新RR建設・改造・大型設備 58件 | パルス炉への改良、新臨界実験装置、研究炉管理へのグレースケールアプローチ、研究炉炉心構成、インパイルループ、多目的利用炉の計画と運転 | 低濃縮燃料化、ドーピング設備、熱外中性子増加、高照射化への改造、大型試料の照射孔、超冷中性子発生装置、RI製造炉の建設、コストパフォーマンス評価や管理体制、新研究炉の炉心構成 | RR用新燃料の照射、RI製造炉のコスト回収、高出力・中出力研究炉の改造、IAEAのRRの運転/保守活動への支援策、TREAT炉の復活、RRのコンカレント設計、各国の新規RR計画 | RR用大型構造物の製造、RRのI&Cの最新鋭化、未臨界実験装置の設計、IAEAによるRRのインフラの評価、RI製造用研究炉の設計、新規運転のための認可 | 新規RRの運転許可、臨界実験装置の建設、中高出力炉の建設、RRの電源喪失時対応 |
| | RRにおける炉工学・炉物理 52件 | <ul style="list-style-type: none"> 材料の放射線損傷(3件)、集合体内の流動実験と計算値の比較、UZ/CN燃料 研究炉シミュレータ開発(3件)、低濃縮臨界実験装置、新Hf制御棒 | <ul style="list-style-type: none"> 制御棒と反射体の特性、反応度係数の改善、研究炉シミュレータ(2件)、0出力炉の炉心構成と臨界条件のモデル化 自己制御性低出力炉、燃焼度評価法 腐食低減策、Be減速材の配置、2次停止系の炉物理的分析、六角格子燃料の臨界特性、高速炉でのバースト実験、炉心中性子安定性 | 流量測定による炉出力評価、正の温度係数測定、RRの炉心設計と炉物理、過渡現象、再臨界時の炉心変形モデル、中性子と流動に関する計算と実験の比較、炉心挙動の計算コード、OSCAR-4コードによる炉心管理、一次系非破壊検査、新I&Cシステム(2件) | 一本ピン流動モデルの検証、モンテカルロ法によるMTR炉心解析、バーンアウト評価、高密度燃料炉心燃料板への熱勾配の影響、板状燃料の複数流路の熱流動解析、高濃縮燃料ベンチマーク、5MWプール型炉の反応度事故解析、確率論的安全評価研究、材料試験の方式、RELAP-5とMCNP5モデルの比較 | <ul style="list-style-type: none"> 中性子計装系のデジタル化、炉内中性子束分布の測定(3件)、炉内流動評価(6件) 炉心部サイフォン現象の数値解析 |

| | テーマ名 | 2018年 | 2017年 | 2016年 | 2015年 | 2014年 |
|-------------|-------------------------------|--|--|---|---|--------------------------|
| RR 管理・運用 | 安全評価・対策 (福島事故対応を含む) 27件 | 運転性能向上、制御ソフトのV&V、中出力炉福島対応(ドイツ、韓国、など)、航空機衝突評価 | RRの長時間運転の安全確保、流量低減対策、緊急時対応 | IAEAの福島事故対応支援、RRのグレーデッドアプローチ、多目的炉の安全、福島対応(ロシア、フランス、韓国、ベルギー) | 福島事故対応(ロシア)、低濃縮化炉での安全確保、新設RRの耐震評価、プールライナーのリーク | タンク型RRでの受動安全性、燃料バースト確率計算 |
| | 使用済燃料管理 (再処理を含む) 26件 | 燃料プール内の微生物による腐食、保管中の燃料体の検査、シリサイド燃料の再処理 | 深いSF用プールの利用、フランスでの管理と再処理、シリサイド燃料の再処理、輸送安全、処分場の評価 | 燃料中の核種同定、SF用キャスク、各国のSF管理 | SFの保管経験、湿式保管、シリサイド燃料再処理、ガラス固化のための再処理の動向、SF輸送 | 使用済燃料再処理、輸送・管理 |
| | 廃棄物管理 8件 | キャスク設計、遮蔽体再利用、コンクリート量の推定、レジン処理 | UUTRでの廃棄物管理 | 原子力発電非保有国のRR処分場、キャスク評価 | RRのバックエンドに関する技術 | |
| | 廃止措置 16件 | ドイツ、日本(JRR-4)の廃止措置 | RRの廃炉事前検討、RI低減化、周辺影響コスト評価、各国の経験(イタリア、英国、フィンランド) | スウェーデンのRRの廃止措置 | ベルギー、イタリア、フィンランド、ロシアなどの廃炉経験と規制 | フィンランドRR炉の廃炉準備とSFの管理 |
| | 保障措置 9件 | EU圏での経験 | タイRRの保障措置 | 韓国 HANAROの経験 | 炉安全と保障措置のガイドと研究炉保有のPu・高濃縮ウラン管理 | 使用済燃料の窃取抵抗性 |
| | 被ばく管理 RR利用の国際連携 5件 | 高出力炉での管理経験 | 被ばく検索システムとEUのRR利用連携 | JHRの国際的な利用とIGOR25年の経過 | | |

【付録 3-2】

放射化分析の技術と適用分野

| 領域 | 産業分野 | 技術分野 | 適用技術内容 |
|----------|--------|----------------|---|
| 無機素材 | 非鉄金属 | 不純物非破壊分析 | 高純度テルル金属中の Se77m などの微量分析 (Te は製鉄触媒、熱電対やセンサー部品用 (Cd・Te) ^{(*)1}) |
| | セラミックス | 窒化シリコン中の不純物 | 高温ガスタービンやエンジンの無酸素被膜、IC の包装材料、等に使われる Si ₄ N ₄ セラミック中の 55 種類の不純物を、0.1ppm から 10ppm の範囲で計測 ^{(*)3} |
| | セラミックス | 触媒の残渣元素分析 | アルミナ (アルミニウムの酸化物)、シリカ (シリコンの酸化物) などに残っている Rh や Te などの不純物検出 ^{(*)3} |
| | 先端材料 | ナノマテリアル | カーボンナノチューブに含まれる極微量の不純物分析 ^{(*)2} |
| 輸送 | 宇宙航空 | Ti 金属中の水素分析 | 宇宙関係に使われるチタン合金中の水素の検出 ^{(*)2} |
| 電機 | 半導体製造 | Si 中の極微量不純物分析 | シリコンウェファー、SiC、グラファイト、コルツ、Si ₄ N ₄ 中の極微量の Fe, Ni, Cr, Mn, Au, Na,K などの自然界に多く存在する極微量元素の検出 ^{(*)2} |
| | 半導体製造 | チップの配線材の拡散 | シリコン半導体チップの組み立て時の配線材 Cu や Co の表面汚染確認 ^{(*)2} |
| | 半導体製造 | n型半導体中の As 分布 | シリコン n 型半導体の As イオン化注入・アニールによる均一化での As の移動 ^{(*)2} |
| | 半導体製造 | P 型半導体中ボロン分布 | ボロンをドーピングした後、その深さ方向の分布を B-10 と熱中性子反応による不純物分析法で分析 ^{(*)2} |
| | 半導体製造 | ソフトエラー防止 | 半導体メモリ中の U,Th によるソフトエラー効果を防止するため、1~5ppb 程度に保つための検出 ^{(*)3} |
| | 半導体製造 | ソフトエラーシミュレーション | 半導体メモリのソフトエラーの評価をメモリーボードに B-10 を添加し、中性子を照射しソフトエラーの CPU への影響評価 ^{(*)6} |
| | 半導体製造 | Si 表面拡散膜の健全性 | シリコン半導体の表面にシランガスで SiH の被膜を付着、この健全性を水素の残量から評価 ^{(*)2} |
| | 太陽電池 | ソーラー用 Si 中不純物 | 太陽光発電用 Si 半導体中の微量金属である「第 3 次金属」添加の効果を調べる手段 ^{(*)5} |
| | 燃料電池 | Pt 触媒の寿命評価 | 燃料電池の寿命は Pt の残量に依存するため挙動と Pt に代わる触媒の開発 ^{(*)5} |
| 有機素材 | 石油化学 | 不純物分析 | プラスチック管、ポリエチレン絶縁物中の不純物 (触媒や防炎剤の残渣) 測定 ^{(*)1} |
| | 石油化学 | ハロゲン系不純物分析 | 高分子中の不純物、特に沃素を高感度で検出。製造工程の各ステップで評価 ^{(*)2} |
| | 写真フィルム | ゼラチン中の不純物 | 写真フィルム用のゼラチン中の微量水銀 (感度に影響) の高感度検出 ^{(*)2} |
| | 高分子 | 不純物分析 | 高分子中のハロゲン系原子や金属原子の検出 ^{(*)2} |
| 木材・製紙・繊維 | 木材成型 | 腐食防止材の浸透測定 | 屋外材の腐食防止を Cr-Cu-As から IPBC に変更し浸透状況の測定 ^{(*)1} |
| | 製紙 | 浸透防止剤の分布 | 木材防腐剤 IPBC (3-Iodo-2 - Propynyl Butylcarbamate) の浸透状況の測定 ^{(*)1} |
| | 製紙 | 包装紙中の元素分析 | 食品などの包装紙の中の Na, K, Cl, Mg, Al, Sc, Ti, Cr, Cu, Zn, Cd, Hg, U, Th, など ppm オーダーで測定、さらに Cr, Zn, Ba など定量測定 ^{(*)2} |
| | 繊維 | 繊維中の不燃剤などの量の測定 | 繊維に加えている不燃剤やカビ防止材に含まれている微量の As や Cd の分析、高級の救護バンドの絡まり防止に含まれる Ag の検出 ^{(*)1} |

| 領域 | 産業分野 | 技術分野 | 適用技術内容 |
|------|--------|---------------|---|
| 環境 | 大気 | 自動車排気ガス | ノッキング防止剤中の Mn、鉛や重金属の分析 ^(*1) |
| | 水質 | 多摩湖の沈殿物 | ダム湖の沈殿物の深さ方向の 40 元素の分析 ^(*1) |
| | 固形廃棄物 | 大型棄物中の元素分析 | 焼却場に運び込まれる植物シュレッダー、電気製品、焼却灰など中に含まれる主要な 40 元素を検出 ^(*3) |
| | 固形廃棄物 | 廃棄物中の Cd や重金属 | オランダで発生する約 40 万トンのプラスチックごみの中に含まれる固形化安定剤や着色顔料中の Cd ^(*3) |
| 鉱業地質 | 探鉱 | レアメタル探査 | 岩石や鉱物中の白金族や希少金属を検出し、レアメタルなどの鉱脈を推定 ^(*1) |
| | 土壌 | 土壌中の諸元素の検出 | モンゴル、チリ、日本などの鉱山周辺や鉱脈の近くを流れる川から採取した試料を分析して、ボロン、重金属の定量化 ^(*4) |
| 医学 | がん検診 | 爪中の無機物分析 | 足の指爪中の極微量の Se の含有量によるがんの発生傾向 ^(*1) |
| | がん検診 | 爪中の無機物分析 | 足の指爪に含まれる極微量の Se によるがん検出と並行して、水銀、クロム鉄、亜鉛などの検出による乳がんや結腸がん、さらには糖尿病の検査への応用に統計量を上げる研究 ^(*3) |
| 法医学 | 残留・付着物 | 建築材の同定 | 法医学で利用される、コンクリート建築構成物の付着した試料から元素分析をして建物の同定を行う手法。土壌や岩石、布などにも適用可 ^(*5) |
| 薬品 | 薬剤効果 | 歯磨きペーストの効率 | 歯磨きペーストの効果を、NAA により付着物の経時変化調査 ^(*5) |
| 考古学 | 遺跡出土物 | 出土品の地域や年代の推定 | 出土品の成分元素を詳細に分析し、それらの構成割合から年代、出土地域、などを決定 ^(*5) |
| 農業 | 醸造 | ワイン中のヒ素分析 | ワイン中に含まれるヒ素 (As) を Br, Cl, Na, K などのバックグラウンドを避け、熱外中性子を利用して 5ppb のヒ素の検出 ^(*3) |
| | 醸造 | ワイン中の亜鉛分析 | ワインの発酵に影響を与える不純物と発酵菌注入時期の関係を調べるために NAA を活用し、亜鉛 (Zn) 量が影響することを見出す ^(*5) |
| | 稲作 | コメ中の元素分析 | 北海道と佐賀県産のコメについて PGA を適用し、C, H, S, B, Cl, K などが測定され、これらの元素比の産地による差の評価 ^(*4) |
| | 耕作地土壌 | 残留農薬の検出 | 有機塩素系農薬の残留している土地から除去するための活性炭の吸収性能を、木質系とヤシがら系の、H,B,Cl などの軽元素について調査し吸着剤による差の検出 ^(*4) |
| | 農作物全般 | カドミウム含有量測定 | 農作物中のカドミウム測定を目指し、大豆と小麦にカドミウムを含ませた試行、誤差が大きい ^(*4) |

上記表に参考にした文献は、以下である。

- (*1) C.Chilian, “Development of Commercial Neutron Activation Analysis Service with a Small Reactor”, IAEA SM 26430 (2004)
- (*2) T.Hossain et.al “Application of Nuclear Analytical Methods for High Tech Industry”, IAEA SM-26430 (2004), “Industrial Applications of Neutron Activation Analysis”, IAEA TECDOC 1215
- (*3) IAEA, “Analytical Applications of Nuclear Techniques”, IAEA (2004)
- (*4) 放射線利用振興協会 「中性子の産業利用ホームページ」(2018年5月)
- (*5) G.Hampel, “Utilization of the Research Reactor TRIGA MAINZ”, IAEA TM 38728 (2010)
- (*6) B.J.Heidrich et.al, “The PENN State BREAZEALE Reactor”, IAEA Publishing:
<https://www-pub.iaea.org/MTCD/USA>

【付録 3-3】

中性子散乱・回折技術の材料関係の適用例

| 領域 | 適用産業分野 | 技術分野 | 適用技術内容 | 利用詳細方式 |
|---------|-----------|---------------------|---|---|
| 工業用素材産業 | 原子力用金属材料 | 構造材料、燃料被覆管材料、残留応力評価 | (2015年までの材料開発や材料評価に有効な、中性子散乱技術の紹介 ^{(*)1}) ・酸化物添加強化鋼材 (ODS) 開発 ・ジルカロイ 4 の水素取り込み、分散状況 ・鉄鋼などの溶接部の残留応力などの測定 ・Ni ベースの超合金のクリープ評価 ・Incoloy 800HT や 304L などの熱影響評価 ・照射材料の中性子回折 | ・紛体回折 ・3・4重回折 ・小角散乱 ・残留応力 ・散乱分光 |
| 電機産業 | 燃料電池 | 電極内の酸素挙動 | ランタン・シリケート・(Fe・Al・Mg) のガラス状結晶状の電極内での酸素の挙動を調べ燃料電池の導通現象を非破壊で把握 ^{(*)2} | 紛体回折 |
| | 燃料電池 | イオン拡散挙動 | 固体酸化物型燃料電池内での酸素拡散挙動を調べ温度上昇に伴う酸素移動経路に異方性が発生し、それに沿って酸素が移動する挙動を測定 ^{(*)2} | 紛体回折 |
| | 燃料電池 | 電解質安定性 | 固体酸化物型燃料電池材質の長時間のアニールの効果について高温での回折による評価で酸素の広がりが小さくなることを解明 ^{(*)3} | 紛体回折 |
| | ニッケル水素電池 | 水素吸着合金 | ニッケル水素電池用水素吸蔵合金に重水素を吸着して結晶構造を調べ、水素を吸着して格子が膨張をしていることが判明 ^{(*)3} | 紛体回折 |
| | リチウムイオン電池 | 電極材評価 | リチウムイオン電池での Li 化合物の構造を明確にし、化合物内の酸素挙動を明確化 ^{(*)3} | 紛体回折 |
| | リチウムイオン電池 | 電極構造 | リチウムイオン電池における正電極材料の構造について、繰り返しの充放電サイクルによる影響を評価 ^{(*)3} | 紛体回折 |
| | リチウムイオン電池 | 電解質中のイオン挙動 | 固体電解質の結晶構造を明らかにし、リチウム原子の位置を確認 ^{(*)3} | 紛体回折 |
| | リチウムイオン電池 | 負電極材料中の Li 分布 | 負電極材であるチタン酸リチウム粉末を未充電と充電した試料について、結晶構造を比較し、充電時には異なる結晶相が出現することを確認 ^{(*)3} | 紛体回折 |
| | 燃料電池 | バイオ燃料電池 | バイオ燃料電池電極として用いる酸化チタン薄膜の界面構造を知るために中性子反射率測定をし、薄膜製造条件の影響についての知見を得た ^{(*)3} | 中性子反射 |
| | 半導体 | 不純物の深さ方向分布測定 | Si マイクロ素子の深さ方向の不純物分布測定について中性子の飛行時間測定法を従来の測定に加え感度を向上させた独特の方法で実現 ^{(*)4} | TOF NDP (深さ方向測定) |
| | 電子材料 | 窒化物蛍光体の構造 | 窒化物蛍光体の構成元素の原子間距離や空間的な専有率、などの算出と発光中心のユーロピウムの存在場所による発光波長やそれらの強度関係について把握できた ^{(*)3} | 粉末回折 |

| 領域 | 適用産業分野 | 技術分野 | 適用技術内容 | 利用詳細方式 |
|--------|----------------|----------------|--|-------------|
| 金属加工 | 金属加工 | 金属膜 | ニッケルベース超合金の金属膜のナノメートルクラスの高温での通過性について、付着・乖離現象を把握 ^{(*)2} | 小角散乱 |
| | 金属溶接 | 鉄鋼溶接部の残留応力測定 | 鉄鋼材料の溶接時の残留応力分布の測定により溶接用電極の最適化を行った ^{(*)2} | 2軸熱中性子散乱 |
| | 非鉄金属製造 | Mg合金の変形メカニズム測定 | 軽量化を目指したMg合金の加圧変形時の内部応力分布をAE(音響放出)と組み合わせて測定して、変形メカニズムを把握 ^{(*)2} | 高分解能2軸中性子散乱 |
| 高分子 | バイモーダル系ポリプロピレン | 結晶性高分子の構造形成 | 熔融延伸した「バイモーダル系ポリプロピレン」の形態の評価を小角散乱法で行った。高分子が伸びきった繊維状である「シン構造」に由来するストリーク散乱(延伸方向と直交する方向に伸びる散乱)を観測 ^{(*)3} | 小角散乱 |
| | プラスチック | PPS樹脂の構造解析 | ポリフェニレンサルファイド(PPS)樹脂は耐熱性、機械特性に優れていてスーパーエンブラとして自動用品として広く使われている。その熱処理による構造の差を小角散乱により確認 ^{(*)3} | 小角散乱 |
| | 高分子溶液の構造 | 高分子溶液の添加量制御 | 剪断力のはたらく環境で高分子溶液の構造変化を小角散乱によって調べ、一定の揺らぎがあることが判明。溶液の添加量の制御方法に参考になる ^{(*)3} | 小角散乱 |
| ソフトマター | ソフトマター(化粧品) | 皮膚角層細胞間脂質 | 皮膚角層細胞間脂質が作る「ラメラ構造」の中の「水層」の分析を行い、ラメラ構造に水が含まれていることが判明 ^{(*)3} | 小角散乱 |
| 磁性材料 | カルシウムフェライト | 結晶構造解析 | 多成分系カルシウムフェライトの結晶構造を粉末回折法により決定 ^{(*)3} | 粉末回折 |
| | 鉄スピネル構造 | 構造変数の決定 | 鉄スピネルの磁気構造を、回折プロファイルを使って、磁気モーメントの方向や構造変数を決定 ^{(*)3} | 粉末回折 |
| | フェライト | フェライト結晶構造 | Y型六方晶フェライト結晶の電磁波吸収の特性を遷移金属の分布状態から把握するための回折実験 ^{(*)3} | 粉末回折 |
| | フェライト | フェライト結晶構造 | Mnの含有比率を上げたフェライト材の構造を中性子回折により評価 ^{(*)3} | 粉末回折 |
| | フェライト | フェライト結晶構造 | 六方晶フェライトの磁気モーメントを回折法により8~300Kで測定 ^{(*)3} | 粉末回折 |
| | 鉄・Co・Ni系 | Fe-Co-Ni合金 | 高飽和磁束密度の軟磁性材料であるFe-Co-Ni合金について鍛造材と冷間圧延により製造し、規則相の割合など製造工程との相関を明らかにした ^{(*)3} | 粉末回折 |
| | 窒化鉄 | 磁気構造解析 | 偏極中性子小角散乱によるナノ窒化鉄磁性粒子の非磁化層の平均厚さ、微粒子内部磁化領域の平均半径、及び純鉄の磁気形状因子を決定 ^{(*)3} | 小角散乱 |

| 領域 | 適用産業分野 | 技術分野 | 適用技術内容 | 利用詳細方式 |
|------|------------|--------------|---|--------|
| 磁性材料 | 磁気ヘッド | 磁気ヘッド膜の磁気構造 | 磁気記憶装置に使う磁気ヘッド膜の反強磁性と強磁性界面の構造について偏極中性子反射率法により評価 ^{(*)3} | 中性子反射率 |
| | 磁気ヘッド | 垂直磁気記録多層膜 | 磁気記録装置に使われる Si 被膜上に C/Pt/Ru と Co-Pt-TiO ₂ の多層薄膜の積層した界面での構造を中性子反射率測定により決定 ^{(*)3} | 中性子反射率 |
| 薄膜 | ダイヤモンド | ダイヤモンド結晶の不純物 | ホウ素をドーピングしたダイヤモンド中のホウ素の量が増加すると格子間隔が広がることを解明 ^{(*)3} | 粉末回折 |
| | シリカ薄膜 | 水熱反応の機構解明 | 電気・光学的分子デバイスとして期待されているメソポーラスシリカ薄膜の水熱反応の機構を時間変化として捉えた ^{(*)3} | 小角散乱 |
| | グルコース薄膜材料 | 単分子層装飾金電極 | 糖尿病診断に用いるグルコースセンサー用電極である、単分子層装飾金電極の模擬試料を作成し中性子鏡面反射率を測定し膜界面での微細な膜構造の形成が見られた ^{(*)3} | 中性子反射 |
| | Bi 系材料 | 光記録材料 | 青色レーザー発振にも使われる Bi 系の高密度光記録材料薄膜の深さ方向の構造の違いを求めめるために、中性子反射法により解析した。その結果保護層の物質の影響を見出し、界面構造の詳しい知見を得た ^{(*)3} | 中性子反射 |
| | NbFeB 薄膜 | 表面磁気構造 | 電気自動車用磁石式回転機に利用するために開発中の NbFeB の焼結体に対して磁気構造を調べる方法として偏極中性子反射法が有効であることを確認 ^{(*)3} | 中性子反射 |
| | ニオブタンタル薄膜材 | コンデンサ用誘電体 | タンタル電界コンデンサの材料であるニオブと、タンタルを陽極化成膜し、熱処理の効果を中性子反射率により測定した。さらに絶縁膜層を形成したのについて界面幅を測定 ^{(*)3} | 中性子反射 |
| | TiN 多層膜 | 鉄窒化物多層膜 | 鉄層と TiN 層を 20 層重ねた多層膜を作成し水素導入の影響を中性子の反射率から評価し、中性子スピンの反転の有無も調べて、新しい鉄鋼材料の水素の影響の評価につなげた ^{(*)3} | 中性子反射 |
| | 樹脂薄膜 | 絶縁用薄膜 | 新方式の絶縁膜のシロキサン樹脂膜について中性子反射法により深さ方向の銅の拡散について調べた ^{(*)3} | 中性子反射 |
| | ガラス界面 | 合わせガラス用薄膜 | 自動車や住宅用として使われる合わせガラスの PVB 樹脂の中間膜とガラス界面の水の分布の測定を中性子反射率から測定 ^{(*)3} | 中性子反射 |
| | DLC | DLC の構造 | 耐摩耗性のある DLC について Si 基板上にダイヤモンド調整原料に Si ガスを添加して CVD 法で作成し中性子散乱密度の変化から表面構造に SiOH 層の増加を確認 ^{(*)3} | 中性子反射 |
| | DLC | DLC 特性 | 水素フリーの DLC 膜は中性子反射率の測定により、高密度になることが確認でき、耐摩耗性の向上方策の手掛かりとなった ^{(*)3} | 中性子反射 |

| 領域 | 適用産業分野 | 技術分野 | 適用技術内容 | 利用詳細方式 |
|--------|------------|----------------|---|--------|
| 薄膜 | DLC | DLCの水分影響 | Siを添加したダイヤモンドライクカーボン薄膜は中性子反射法により水分の影響を受けないが経時変化のあることを検証 ^{(*)3} | 中性子反射 |
| コンクリート | セメント製造 | セメント結晶構造 | ひび割れ界面に生成されたセメント結晶（非晶質）の成分分析が可能であることが判明 ^{(*)3} | 粉末回折 |
| | コンクリート | コンクリート中応力 | 鉄筋コンクリート中の応力を増加した場合の応力を測定 ^{(*)3} | 残留応力測定 |
| | コンクリート | コンクリート中応力 | ひび割れ付近の鉄筋コンクリート中の鉄筋の応力測定 ^{(*)3} | 残留応力測定 |
| ゴム材料 | ゴムの構造 | 分子鎖の広がり | バルクゴム中の分子鎖の広がりを調べることを目指して代表的なゴムに重水／軽水比を変えて添加し小角散乱法により1分子鎖1本の慣性広がりを確認 ^{(*)3} | 小角散乱 |
| | ゴムの構造不均一性 | 架橋構造 | カーボンブラック充填硫黄架橋ゴムの構造の不均一性について調べるためにカーボンブラック凝集体の表面の吸着層の厚みを測定し凝縮構造も明らかにした ^{(*)3} | 小角散乱 |
| | 熱可塑性エラストマー | 架橋ゴムの粒径測定 | オレフィン系の熱可塑性エラストマー（TPV）試料の粒径を小角散乱により測定するために乾燥法やDトルエン膨潤法の比較をし、膨潤法でも粒子の分散度合いが同程度であることが判明 ^{(*)3} | 小角散乱 |
| その他 | 光学 | 光ファイバーの変形と構造変化 | 耐熱性のある結晶性フッ素樹脂透明ファイバーの変形に伴う構造変化を中性子散乱強度の変化により求めた。延伸による透明度の変化による散乱強度が変化 ^{(*)3} | 小角散乱 |
| | 複合材料 | 構造決定 | 有機物と金属の化合物である Organoclay の構造を小角散乱によって決定する手法を開発 ^{(*)3} | 小角散乱 |

この表に使用した参考文献は以下である。

- (*1) IAEA, “Use of Neutron Beams for Materials Research Prevalent to the Nuclear Energy Sector” (IAEA TECDOC-1773, 2015)
- (*2) P. Mikula, P. Strunz, “Effective Utilization of the REZ’s Research Reactor LVR-15 in Basic, Interdisciplinary and Applied Research” RRFM 2016
- (*3) (一財)放射線利用振興協会「JRR-3を利用した産業化事例集」
<http://www.rada.or.jp/neutron/index.html>
- (*4) B.J.Heidrich “The PENN State BREAZEAL Reactor” IAEA (2017 Nov.)
<http://www-pub.iaea.org.MTCD /Pub>

【付録 3-4】

研究炉による中性子ラジオグラフィ（イメージング）技術

| 領域 | 適用産業分野 | 技術分野 | 適用技術内容 |
|----|--------|---|---|
| 工業 | 宇宙・航空機 | 航空機構造材、タービンエンジンブレード ^(*) 、ハニカム ^(*) 、Ti 合金、などの非破壊欠陥検査 | マグネシウム合金溶接部の検査 ^(*) 、小型翼部のハニカム構造部の非破壊検査 ^(*) 、構造物 Ti-6Al-4V 合金プロトタイプ欠陥検出 ^(*) 、ヘリコプターシャフト欠陥検出 ^(*) 、液体ロケット再生冷却燃焼器の構造検査 ^(*) |
| | | 航空機伝熱系機器などの非破壊検査 | 電磁バルブ用シールの変形検査（ゴム、テフロン） ^(*) |
| | | 航空機ガスタービン内部動作観察 ^(*) | タービンブレードの冷却材のチャンネル間の閉塞観察 ^(*) 、ガスタービンノズル部のカーボン付着観察 ^(*) |
| | | ヒートパイプなどの内部動作観察 | ループヒートパイプの動作時の現象観察 ^(*) 、ヒドラジン内封細管（0.2mm）内の高温時の観察 ^(*) |
| | 自動車 | エンジン内部動作状況観察 | エンジン燃焼室への燃料噴出ノズルの噴霧状況観察 ^(*) |
| | | 車載エアコン動作観察 | カーエアコンの軽量化を目指した微細管内の冷媒の挙動を非破壊で把握 ^(*) 、車載用エアコン冷媒循環制御のためのコンプレッサーの動作観察 ^(*) |
| | 製鉄・製鋼 | 材料内部欠陥検出 | 鋼材酸化膜表皮下の欠陥観察 ^(*) |
| | | | 鋳鋼材中の欠陥検出 ^(*) |
| | 電機機器 | 原子炉材料非破壊観察 | 天然ボロンを使用した中性子フィルター材の特性観察 ^(*) |
| | | 原子力燃料非破壊観察 | 被覆管内に封入されたペレットの位置関係、水素脆化の評価のためのジルカロイ合金中の水素挙動の可視化などの燃料構造の非破壊観察 ^(*) |
| | | 原子力、伝熱機器非破壊 3D 観察 | 燃料集合体内部のボイド挙動の観察 ^(*) |
| | | 燃料電池、水素貯蔵非破壊 3D 観察 | 水素貯蔵合金中の水素吸収・放出現象の可視化 ^(*) 、電池内水輸送現象可視化、積層電池の断層写真撮影による内部の水分の時間変化と出力変化の観察 ^(*) |
| | | 画像複製装置動作非破壊観察 | 電子写真現像器内の粉体流動の可視化 ^(*) |
| | | 電線絶縁体非破壊観察 | ポリエチレン絶縁体の水トリー観察 ^(*) |
| | 建設 | 建設、建設機材 | 非破壊観察 |
| 医学 | 小動物治療 | 小動物の映像化非破壊観察 | マウスなどの小動物などの臓器観察 ^(*) |
| | 医学検証 | 摘出臓器の観察 | ヒトの顎骨、脊柱、歯、胆石などの観察 ^(*) |
| | 歯学利用 | 歯科材料の非破壊観察 | 義歯の組み立て後の材料の分布や一定時間経過後の観察 ^(*) |

| 領域 | 適用産業分野 | 技術分野 | 適用技術内容 |
|-----|-----------------|--------------------|--|
| 医学 | BNCT | ボロン移行観察による 薬剤評価 | マウスを用いて注入されたボロンを、中性子照射 —オートラジオグラフィにより可視化 ^(*2) |
| 考古学 | 工芸品の鑑定 | 非破壊 3D 観察 | ドイツ南部で発見された中世の剣の装飾品の観 察 ^(*2) |
| | 古代・近代出土品の観 察 | 非破壊可視化 | 古墳からの出土品や寺社に奉納された金属容器に 収納された経典などの内容物確認、仏像内部、賢瓶 内部構造などの観察 ^(*2) |
| 農業 | 植物の根の機能 | 水分移動可視化観察 | 土中に植えた状態での植物の根の中での水分の挙 動観察 ^(*2) 、大豆における土壌中の水分やバナジウ ムの影響の可視化観察 ^(*2) |
| | 穀物 | 非破壊 3D 観察 | トウモロコシの実の配列や個別の実の中心部の観 察 ^(*2) |
| | 酒米の吸水パターン | 非破壊観察 | 茨城県の酒米 3 種について水分分布の時間経過の 比較により特徴付けた ^(*2) |
| | 果実の成長調節物質 | 非破壊観察 | なしの「みつ症」発生のしやすい種類とし難い種類 について幼果、収穫適期前、適期、についてスライ ス資料の中性子透過写真撮影により特長を比較 し、中性子透過法の有効性を確認 ^(*1) |
| | リンゴ炭の組織観察 | 非破壊観察 | リンゴ炭の断面写真について、品種、乾燥程度によ る組織の差が出ることを確認 ^(*1) |
| | 果樹樹木の水分分布 | 非破壊観察 | かんきつ、キウイフルーツ、かんきつ接ぎ木、など の中性子透過写真から接ぎ木の健全性検査などに 有効であることが判明 ^(*1) |
| | 朝鮮人参の成長観察 | 非破壊観察 | 朝鮮人参の成長過程を、根の伸長も含めて長期間 観察 ^(*2) |
| 林業 | 杉苗木の病変観察 | 非破壊観察 | 杉苗木の病変や傷などの検出とそれらの存在によ る影響観察（この手法は木材中の水分観察、ブナ、 松、くり、とうひ、などへの適用も検討） ^(*2) |

ここでは下記の文献を利用した。

- (*1) 放射線利用振興協会ホームページ資料「研究炉中性子の産業利用」
(*2) 中性子イメージング専門委員会「中性子イメージング技術の基礎と応用」
RADIOISOTOPES, 56 巻 (2007)
(*3) NCSU “PULSTAR Users Guide” (2015)

【付録 3-5】

中性子ビーム科学の展開

この表には、主要な放射性同位元素の種類について、主要な利用目的、国内外の試験研究炉での製造の動向、さらに特記事項として、国内外の放射性同位元素の市場などで大きな話題になっている核種については「黄色」、利用動向や海外文献で取り上げられて注目されている核種については「青色」、そして「もんじゅサイト」で検討している試験研究炉でも製造可能性のある核種について「肌色」に着色して示してある。白色は大きなニーズがなかったことから、特に注目すべき必要のない核種を示した。

| 放射性同位元素名 | 利用 | 1kW未満 | 1kW～1MW未満 | 1MW～10MW | 10.5MW以上 | 特記事項 |
|-------------------|--------------------------------------|-------|-----------|-------------------|----------|--------------------------------------|
| ⁵¹ Cr | (医療)赤血球ラベル診断 | | | ○2基 | ○2基 | |
| ¹³¹ I | (医療)腎臓画像検査 | | | ○10基 | ○8基 | 国内試験研究炉で製造実績 |
| ⁹⁹ Mo | (医療)心臓、腎臓、脳障害などの画像診断 | | | ○12基 | ○20基 | 国内試験研究炉又は加速器で製造(開発段階)国内安定供給のため国産化が急務 |
| ¹³³ Xe | (医療)肺画像検査 | | | ○1基 | ○ | |
| ⁶⁰ Co | (医療)全身照射 (産業)計測機器、滅菌用線源 | | | ○6基 | ○6基 | 国内試験研究炉で製造(現在はコンテナ船で輸入) |
| ⁶⁴ Cu | (医療)銅摂取による遺伝病研究 | | | ○1基 | | |
| ¹⁶⁹ Er | (医療)関節痛緩和 | | | | ○1基 | |
| ¹⁹⁸ Au | (医療)脳、頸部、舌、口腔がんなどの治療 | ○1基 | ○1基 | ○3基 PULSTAR | ○1基 | 国内試験研究炉製造実績あり |
| ¹⁶⁶ Ho | (医療)肝臓がん治療 | | | ○6基 PULSTAR(米) | ○1基 | |
| ¹²⁵ I | (医療)甲状腺、肺、脳、肝臓がん、前立腺治療 | | | ○2基 | ○6基 | |
| ¹⁹² Ir | (医療)子宮頸がんを始めとする多種類のがん治療 (産業)非破壊検査 | | | ○8基 | ○11基 | 国内試験研究炉で製造実績あり。利用の需要は多い |
| ¹⁷⁷ Lu | (医療)卵巣、皮膚、固形体がんなどの治療 | | | ○6基 | ○2基 | β核種で先進的がん治療医薬品として開発中。研究のため国産化が必要 |
| ³⁵ S | (医療)赤血球繁殖治療 | | | ○1基 | ○1基 | |
| ¹⁸⁶ Re | (医療)骨がん転移痛や関節痛緩和 | | | ○2基 | ○2基 | 研究のため国産化が必要 |

| 放射性同位元素名 | 利用 | 1kW未満 | 1kW～1MW未満 | 1MW～10MW | 10.5MW以上 | 特記事項 |
|--|-------------------------|-------|-----------|----------------|----------|-------------------------------|
| ¹⁵³ Sm | (医療)骨がん転移痛緩和と骨がん治療研究 | | | ○9基 | ○5基 | 日本での実績はない |
| ⁸⁹ Sr | (医療)肝臓がん治療、関節痛や骨がん転移痛緩和 | | | | ○1基 | 国内試験研究炉で製造実績あり(利用度高い) |
| ⁹⁰ Y | | | | ○2基 | ○1基 | 国内試験研究炉で製造(β核種)先進的ながん治療医薬品開発中 |
| ⁸² Br | | ○1基 | ○1基 | ○3基 PULSTAR | ○2基 | PETでも使う? |
| ²⁴ Na | | | ○3基 | ○2基 PULSTAR | ○1基 | もんじゅサイト試験研究炉でも有望 |
| ⁴² K | | | | ○1基 PULSTAR | | |
| ¹²⁴ Sb | | | | ○3基 PULSTAR | | |
| ⁵⁶ Mn | (学術)トレーサー | ○1基 | ○1基 | ○1基 PULSTAR | | もんじゅサイト試験研究炉でも有望 |
| ²¹³ Bi | | | | ○1基 | | 加速器による製造(α核種)先進的ながん治療医薬品開発 |
| ³² P | (医療)血球過剰治療 | | | ○4基 | ○6基 | |
| ³³ P | (学術)トレーサー | | | ○1基 | ○3基 | |
| ¹⁴ C | (学術)トレーサー | | | | ○3基 | |
| ²⁰¹ Tl | | | | ○1基 | | 供給元は国内加速器(短半減期) |
| ⁴¹ Ar | | | ○3基 | ○3基 | | |
| ³⁷ Ar | | | | ○1基 | | |
| ¹⁴⁰ La | | ○1基 | ○1基 | ○1基 | | 海外では研究中 もんじゅサイト試験研究炉でも有望 |
| ⁶⁴ Cu | | | | ○1基 | | |
| ⁶⁷ Cu | Cuの毒素に関する研究 | | | | ○1基 | |
| ⁵⁹ Fe | 学術 | | | | ○1基 | |
| ²⁵² Cf | (産業)原子炉起動用、非破壊検査 | | | | ○2基 | |
| ⁵⁵ Fe | | | | | ○1基 | |
| ⁶³ Ni | | | | | ○1基 | |
| ⁷⁵ Se | (産業)非破壊検査 | | | | ○1基 | |
| ¹¹³ Sn | | | | | ○1基 | |
| ¹⁸⁸ W- ¹⁸⁸ Re | (医療)がん診断、治療用 | | | | ○1基 | 研究のため国産化が必要 |
| ¹⁵³ Gd | | | | | ○1基 | |
| ²⁰³ Hg | | | | ○1基 | | |
| ²³⁸ Pu | (産業)宇宙衛星熱源 | | | | ○1基 | |

| 放射性同位元素名 | 利用 | 1kW未満 | 1kW～1MW未満 | 1MW～10MW | 10.5MW以上 | 特記事項 |
|-------------------|----------------|-------|-----------|----------|----------|---------------------------|
| ²⁴⁹ Bk | (基礎研究)超重新元素探査 | | | | ○1基 | |
| ⁶³ Ni | (防犯)空港爆発物、麻薬検査 | | | | ○1基 | |
| ¹⁰³ Pd | | | | | ○1基 | |
| ¹¹³ In | | | ○1基 | | | |
| ¹⁶⁵ Dy | | ○1基 | | | | |
| ⁴⁶ Sc | | | ○1基 | | | |
| ²³³ Pa | | | ○1基 | | | |
| ¹⁸ F | | ○ | ○ | | | 加速器(短半減期)もんじゅサイト試験研究炉でも有望 |

【付録 3-6】

中性子ビーム科学の展開

【概要】

中性子科学研究といわれる分野は、中性子の特質を生かした利用方法に関する課題に取り組む学究活動で、その中には「放射性同位元素製造」、「中性子の核反応を利用した核変換技術」、「放射化分析」、「中性子散乱技術」や「中性子イメージング技術」などがある。「放射性同位元素製造」では、医療用、工業用などに使われる種々の核種の実用化、「核変換技術」では「Si ドーピング技術」の実用化などを行っている。「放射化分析」は非破壊で試料中の微量元素の計測が行えて、かつ軽元素や特殊な元素の検出に有効な方法である。「中性子イメージング技術」は、中性子が電氣的に中性で、物質中の透過能力が高いことから、軽元素の検出が行えるという利点を活かした技術で、検出技術の研究や、高度な撮像装置としても研究開発が行われている。

「中性子散乱技術」は 1900 年代の後半から脚光を浴びている技術で、結晶や非結晶、高分子、液体、などほぼ全ての材料の原子や分子の構造を見極め、材料開発や改善に役立てるために使われる技術である。国内では、現在、試験研究炉は日本原子力機構の JRR-3 炉と京大 KUR が使われ、研究開発が行われてきたが、現在は新規規制基準対応の問題から JRR-3 は使用できない状況になっていて、一部の研究者は海外の試験研究炉を利用して研究を行っている。

【散乱技術を中心とした研究開発】⁽¹⁾

中性子ビーム科学の学術研究の中では、最近注目を浴びている散乱技術の動向を中心にニーズを調査した。散乱技術の中には、以下に示すような多くの方式があり、多くの分野で活用が期待されている。

| |
|-------------------------------------|
| 粉末回折：磁気構造や結晶構造を調べる手法 |
| 4 軸回転回折：結晶体の正確な原子・磁気構造解析手法 |
| 3 軸分光：単結晶の原子／分子の励起状態の解析手法 |
| 準ラウエ回折：単結晶の原子・磁気構造の解析手法 |
| 小角散乱（ピンホール、超小角散乱）：高分子や多層膜の構造解析の手法 |
| 散乱法：表面や境界面の構造解析手法 |
| 背面散乱法：原子・分子の励起状態などの観測手法 |
| スピンエコー法：ソフトマターなどの拡散・励起状態などの観測手法 |
| TOF（飛行時間法）：高分子中の原子・分子などの励起状態などの観測手法 |

学術研究や産業利用ではこれらの手法を単独あるいは組み合わせて利用し、種々の課題に対応している。このため IAEA は散乱技術の活用での必要な中性子のエネルギー帯（スペクトル）や最低限の中性子束などについてガイドラインとなる数値を参考文献に示すように提案している。

また、このような広い技術の研究開発の成果は以下に示すような多くの事業分野で、多岐にわたる製品開発やその評価手法として活用されている。

| |
|--|
| * 先端電池：リチウムイオン電池、燃料電池、太陽電池 |
| * 新規材料：高温超電導、超強磁性体、マルチフェロイクス（強磁性・強誘電性、高弾性などの性質を持っている新規電子材料）、高密度メモリなど |

*省エネ材料：しなやかなタフポリマー、高吸水性樹脂、アクチュエーター、センサーなど
 *バイオ・医学・薬学：蛋白質構造解析、医学応用（治療機器、再生医療材料）

（出典：東京大学物性研究所 柴山充弘“JRR-3 中性子ビーム利用の現状と将来” 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 原子力研究開発基盤作業部会（第4回資料）H29.11.22）

このため、世界各国では、散乱技術について、基礎研究から応用研究にまで精力的に取り組んでおり、国内では JRR-3 や J-PARC が研究開発の中核として活動している。

この中の典型例として多くの研究機関で取り組まれている「小角散乱」の研究開発の結果について、最近の論文の数を、2018年9月10日に報告された“Web of Science”による統計で調べてみると、過去5年間で6,262件あり、研究対象の試料の状態と研究内容についての報告をまとめると表1のようになっている。

表1 小角散乱技術に関する研究動向⁽²⁾

| 項目 | 論文発表 統計データ |
|---------|---|
| 研究対象の状態 | 溶液：1,349、高分子：1,004、蛋白質：815、コロイド・ミセル：765、結晶：435、ゲル：413、その他脂質、電解質など：1,481 |
| 研究内容 | 構造解析：2,354、原子・分子動的挙動：1,073、相互作用：967、形態：480、その他相移転・分離、緩和現象など：1,388 |

（データ提供：東京大学物性研究所 柴山教授）

このように中性子散乱の中の一項目である「小角散乱」だけでも、世界全体で、溶液から結晶体まで幅広い範囲の材料についての研究結果が毎年平均で約1,200件の論文として発行されている（なお、日本での JRR-3 での平成23年度の研究実績報告⁽⁷⁾では小角散乱は全体の20%で取り組みの多い課題である）。

このことから、稼働していた平成23年度の JRR-3 での散乱研究は約300課題あり、研究利用者は6,000人・日で、それらの成果を報告した論文発表は年間100件あった。この中で、小角散乱の研究の割合を20%とすれば、20件/年である。これは、世界の論文平均の1,200件中日本の論文は約20件で、約1.7%もの寄与をしていたことになる（算出根拠は、上記柴山教授の資料による）。

また海外での中性子散乱研究は、ドイツ FRM-II（ミュンヘン工科大学）、米国 HFIR（オークリッジ国立研究所）、フランス ILL（グルノーブル研究所）、オーストラリア OPAL（ANSTO）、韓国 HANARO（KAERI）など、主に高出力炉（20MW以上）で取り組み中であり、JRR-3の再稼働の遅れにより、東京大学はこれらの海外の試験研究炉を利用して研究に取り組んでいる。

また、1~2MW程度の低出力の試験研究炉での取り組みも報告されていて、今回の炉出力の検討でも参考になる例もあり、その事例を以下に紹介する。

米国：ノースカロライナ大：PULSTAR 炉⁽³⁾ 1MW 軽水減速 低濃縮燃料
 +直径6インチの粉体回折用装置 NPDF（3mm×50mmサイズの試料の分析可能）：リチウムイオン電池金属電極の構造解析
 +超冷中性子発生システム（300neV、3mK温度）での中性子の基礎物理研究や表面分析用で中性子束は6~16×10⁶nvの能力
 オランダ：デルフト大：OYSTER 炉⁽⁴⁾ 2MW 軽水減速 低濃縮燃料
 +小角散乱システム（SANS）：1nm~100nmの範囲で原子、分子の構造の決定

- + 中性子散乱システム (ROG) : 中性子回折による金属の水素膜形成や蛋白質の液体空気接触反応、金属表面への水素吸着、磁気フィルムの記憶・読み出し現象の解析などの研究
- + 粉体回折 (PEARL) : 電池に使われる金属結晶の構造分析研究
- + スピンエコー設備 (SESANS) : スピンエコー機能の SANS への追加システム
- + 中性子深部探査 (NDP) : リチウムイオン電池などの軽元素の挙動解析
- + コールド中性子発生システム (CNS) の新設 : 韓国の原子力研究所と HYUNDAIF に発注、2018 年末に完成
- ロシア : デュブナ : IBR-2M⁽⁵⁾ : 2MW パルス炉 平均出力 2MW、パルス出力 1,850MW、5Hz 200 μ sec 幅、高速炉心 Na 冷却 中性子束 平均出力時 10^{13} nv、パルス運転時 10^{16} nv
- + 中性子回折 : 結晶構造解析
- + 小角散乱 : 微粒子や界面構造解析
- + 中性子反射率 : 薄膜、多層構造、表面・界面構造と性質
- + 非弾性散乱 (中性子分光) 結晶の動的な構造と性質 (原子・分子の動き)

また、散乱研究の他「中性子ラジオグラフィの高度化研究」では、特に三次元画像化や動画画像化などの研究が国内外で行われ、また新しい技術である「陽電子消滅法による結晶内の格子欠陥評価法の研究」、「即発 γ 線法放射化分析」なども、一部の研究機関で取り組みが見られ、今後の実用化につながる技術として、国内外の研究機関で取り組みを継続している。

【参考文献】

- (1) (独) 日本原子力研究開発機構 ユーザーズオフィス「研究用原子炉 JRR-3 の中性子利用に関する施設共用促進」(平成 24 年 2 月、平成 23 年 2 月)
- (2) 東京大学物性研究所 柴山教授 提供資料、“Web of Science”
<http://www.lib.meiji.ac.jp/db/exdb/login/wos.html>
- (3) A.I.Hawari “Multidisciplinary Engagement at Research Reactors: The NCSU PULSTAR”
(18th IGORR Conference and IAEA Workshop Dec 2017)
- (4) TU Delft “2017 OYSTER Annual Report” (Delft Univ.2017)
- (5) A.V.Belushkin Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR, Dubna, Russia
“Neutron scattering at IBR-2 in Dubna: some history, present status and future perspectives” (2018)

【付録 3-7】

米国の主要大学の人材育成のためのツール

| 大学名 | 学生数（履修登録数） | 研究炉 | 熱流動 | シミュレータ | eラーニング | 主要教育 |
|-----------------------|-------------------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------|------------|--|
| カリフォルニア大学 バークレー校 | B : 9 M : 8 (20) D : 17 (75) | 自前の RR はなし | ・格納容器冷却 ・混合流体対流 | 核/熱流動モデル化、解析 | — | ・放射線計測 ・材料基礎 ・陽電子消滅 |
| コロラド鉱山大学 | B : 0 M : 4 (13) D : 2 (14) | TRIGA 炉 (1MW) (地質調査所と共同運用) | 2相流実験用 (中性子、レーザーによる可視化) | 核/流動モデル化 | — | ・炉工学 ・地質調査 ・イメージング |
| フロリダ大学 | B : 24 M : 16 (19) D : 6 (24) | UFTR (100kW) | 2相流実験 (中性子、レーザー測定) | 放射線線量分布シミュレータ | — | ・イメージング ・放射線検出器 ・先端燃料・材料 |
| ジョージア工科大学 | B : 21 M : 8 (37) D : 9 (36) | 未臨界実験装置 (グラファイト減速、天然ウラン) | — | — | 原子力工学コース認定 | ・SFの核変換 ・粒子加速器による核物理 |
| アイダホ州立大学 (NSUF, CAES) | B : 8 M : 13 (31) D : 2 (23) | AGN-201 研究炉 (5W) | — | — | — | ・リスク分析 ・学際領域 ・核物理 |
| イリノイ大学 | B : 36 M : 18 (25) D : 7 (69) | — | 非平衡流動試験装置 (各種ソフトマターと液体) | 3D 仮想原子炉 | — | ・高温材料 ・新燃料 ・熱現象解析 |
| カンザス州立大学 | B : 12 M : 0 (7) D : 2 (10) | TRIGA 炉 (250kW) | — | — | 原子力工学コース認定 | ・放射線計測機器 ・物質と放射線の相互作用 |
| メリーランド大学 | B : 0 M : 5 (6) D : 1 (2) | TRIGA 炉 (250kW) | — | — | 原子力工学コース認定 | ・高分子化学研究 ・生物物理 |
| マサチューセッツ工科大学 (NSU 幹事) | B : 17 M : 9 (62) D : 14 (49) | MITR (6MW) | — | — | — | ・中性子散乱 ・事故耐性材料 ・燃料 ・計測制御 ・運転管理 |
| マサチューセッツ大学 ローウェル校 | B : 12 M : 14 (30) D : 6 (41) | 研究炉 (1MW) | 2 相流試験 (計測機器の開発も含む) | — | 原子力工学コース認定 | ・宇宙シミュレーション ・炉物理/炉工学 ・耐放射線材料 |

| 大学名 | 学生数（履修登録数） | 研究炉 | 熱流動 | シミュレータ | eラーニング | 主要教育 |
|------------------|---------------------------------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---------------|---|
| ミシガン大学 | B : 25 M : 29 (26) D : 24 (110) | — | 2 相流実験 (流動モデル構築) | 原子炉シミュレーション開発プログラムに参画(熱流動と中性子輸送) | — | ・照射材評価 ・高温腐食研究 ・ナノ物質 ・中性子基礎研究 ・放射線イメージング ・生物影響 |
| ミズーリ大学 コロンビア校 | B : 15 M : 11 (33) D : 0 (36) | 研究炉 (10MW) | — | — | 原子力工学コース認定 | ・超高温原子炉燃料 ・粒子挙動 ・炉工学 |
| ミズーリ科学技術大学 | B : 37 M : 11 (37) D : 0 (36) | UMRR (200kW) | — | — | — | ・炉工学 ・材料 ・放射線計測技術 ・イメージング |
| 米国海兵学校 | B : 29 M : 0 D : 0 | — | — | — | — | ・炉工学 ・放射線計測 ・材料工学 |
| ネバダ大学 ラスベガス校 | B : 0 M : 0 (4) D : 4 (3) | — | — | — | — | ・熔融塩炉 ・廃棄物処理 ・地質学 |
| ニューメキシコ大学 | B : 16 M : 10 (30) D : 1 (20) | AGN-201M (5W) | — | — | 原子力工学コース認定 | ・炉物理/炉工学 ・計測制御 ・材料工学 ・分析技術 |
| ノースカロライナ大学 | B : 39 M : 13 (36) D : 9 (88) | PULSTAR 炉 (1MW) | — | シミュレーションコンソーシアムのハブ | 原子力工学コースと資格取得 | ・中性子散乱 ・陽電子消滅 ・イメージング ・数値解析 |
| オハイオ州立大学 | B : 0 M : 11 (4) D : 7 (19) | ・ OSURR (500kW) ・ 未臨界実験装置 | — | — | — | ・材料工学 ・炉物理 ・I&C ・核セキュリティ ・計算機科学 |
| オレゴン州立大学 | B : 37 M : 21 (?) D : 9 (?) | TRIGA 炉 (1.1MW) | ・APEX(先端的熱流動施設) ・HTTF 高温試験施設 ・燃料熱水力試験装置 | — | 原子力工学コース | ・核/熱研究 ・イメージング ・放射線スペクトル分析施設 ・熱ルミネッセンス線量率測定 |
| ペンシルバニア州立大学 | B : 63 M : 21 (41) D : 6 (27) | TRIGA 炉 (1MW) 炉心移動型 | 多種流動モデル実験装置 | 多物理パラメータ実物大熱流動モデル | 原子力工学コース | ・核物理 ・熱流動試験 ・材料開発 |

| 大学名 | 学生数（履修登録数） | 研究炉 | 熱流動 | シミュレータ | eラーニング | 主要教育 |
|-------------------|---------------------------------------|---|--|--|----------|--|
| ピッツバーグ大学 | B : 0 M : 2 (5) D : 0 | — | — | — | 原子力工学コース | <ul style="list-style-type: none"> 材料工学 中性子散乱研究 計測・制御関係 |
| パデュー大学 | B : 22 M : 6 (17) D : 4 (31) | 研究炉 (1kW) | <ul style="list-style-type: none"> 熱流動基礎試験 (2相流、振動、対流など) PUMA (SBWR、ESBWR) PWR型 SMR 試験用 | — | — | <ul style="list-style-type: none"> 熱流動実験 核物理 物質移動シミュレーション |
| レンセラー大学 | B : 33 M : 8 (6) D : 5 (27) | 臨界実験装置 | 2相流実験設備 | 三次元熱流動シミュレーション | — | <ul style="list-style-type: none"> 核物理 2相流実験とシミュレーション 被ばくモデル化 |
| サウスカロライナ大学 | B : 0 M : 7 (19) D : 0 (14) | — | 汎用熱流動施設 | <ul style="list-style-type: none"> 燃料サイクルシミュレーション 材料シミュレーション | 原子力工学コース | <ul style="list-style-type: none"> 材料研究 コード開発 計算機科学 熱流動評価 |
| テネシー大学 ノックスビル校 | B : 38 M : 18 (26) D : 14 (116) | — | — | — | — | <ul style="list-style-type: none"> 計測技術 材料工学 次世代炉 |
| テキサス A&M 大学 | B : 48 M : 23 (57) D : 17 (91) | <ul style="list-style-type: none"> TRIGA 炉 (1MW) AGN-201 炉 (5W) | <ul style="list-style-type: none"> 軽水炉伝熱ループ ガス炉用伝熱ループ | 大規模教育用科学シミュレータ | — | <ul style="list-style-type: none"> 核物理、炉工学 核セキュリティ 中性子物理 社会人訓練 |
| テキサス大学 オースティン校 | B : 0 M : 6 (24) D : 6 (23) | TRIGA 炉 (1.1MW) | — | — | 原子力工学コース | <ul style="list-style-type: none"> 自動化技術 材料工学 計測制御 計算機科学 |
| ユタ大学 | B : 0 M : 3 (5) D : 3 (12) | TRIGA 炉 (100kW) | — | — | — | <ul style="list-style-type: none"> 材料シミュレーション 材料工学 炉物理 |
| バージニア工学 州立大学 | B : 0 M : 2 (4) D : 0 (12) | — | 熱流動施設と先端計測 | <ul style="list-style-type: none"> 先端原子炉シミュレーション 熱流動シミュレーション | 原子力工学コース | <ul style="list-style-type: none"> 材料工学 熱流動 計算機科学 炉物理、炉工学 |

| 大学名 | 学生数（履修登録数） | 研究炉 | 熱流動 | シミュレータ | eラーニング | 主要教育 |
|---------------------|--------------------------------------|------------------|---|------------|--------|--|
| ウィスコンシン大学 マディソン校 | B : 28 M : 29 (23) D : 10 (75) | TRIGA 炉 (1MW) | <ul style="list-style-type: none"> ・汎用熱伝達装置 ・空気水系熱除去試験施設 ・Na 流動試験 ・対流試験施設 ・高温熔融塩試験施設 | 流動シミュレーション | — | <ul style="list-style-type: none"> ・材料、燃料 ・熱流動 ・機械構造 ・炉工学、核物理 ・計算科学 ・計測、制御 |

【付録 3-8】

人材育成に効果的なインフラストラクチャ調査

—研究炉・シミュレータ・熱流動施設などの利用—

1. 国際機関などから指摘されている人材育成に必要なインフラストラクチャ

①OECD/NEA のワーキンググループが 2012 年に公表した“原子力教育と訓練に関する懸念から実現可能性に関する文献” (Nuclear Education and Training: From Concern to Capability⁽¹⁾) によれば、学生、専門技術者、研究者、行政担当者を含めた人材育成に必要なインフラストラクチャとしては、**研究炉 (RR)** や**臨界実験装置 (CA)**、及び**伝熱流動装置**に加えて**PC (計算機)** シミュレータや**フルスコープシミュレータ**の利用を取り上げている。

研究炉や**伝熱流動装置**は、計測手段などを経由し、物理現象にかなり接近して実感の体験ができる反面、機器の寿命や保全 (メンテナンス) が必要であること、装置の価格が高価であること、複数の炉形やプラント全体の理解をするための情報提供には限界があることなどを挙げている。

一方、**シミュレータ**は、比較的安価で、炉型やシステムの変更に柔軟に対応でき、定常運転から事故時までカバーできるが、実プラントや研究炉での実感 (手触り感) に欠けるなどの課題があると指摘している。

②EU の原子力国際機関である URATOM から発行されている「持続可能性のある原子力技術のプラットフォーム (SNETP)」⁽²⁾ 枠組みの一つである「ヨーロッパの持続可能性のある戦略的取り組みの要点」の中の「人材育成ワーキンググループ」の 2010 年の報告書でも、人材育成のためのインフラストラクチャについて触れていて、その要点をまとめると以下のようになる。

- ・コンピテンス醸成やスキル育成のためには適切な基礎を身に付けるための施設が必要である。
- ・従来から使われている大学や研究所の研究炉などの施設は老朽化が進み、その対策の費用が必要のために改造や新規建設に取り組む例は少なくなっている。2010 年現在 53 基のうち 25 基の**研究炉**しか運転されていない。特に PhD プログラムでは大型の施設を利用した質の高い、魅力のある研究の推進をすべきである。
- ・一方、学士や修士のための教育には 8 基の研究炉しか利用できず、年間 120 時間の利用である。また博士課程や修士の論文のためのテーマは年間 70 程度である。これに対して電力会社などはこの数を倍に増やしたいとしている。現在 EU で計画している**大型の研究炉**では不十分である。
- ・**伝熱流動装置**は過酷事故対応のインフラとして研究炉よりは最近増えてきている。しかし、**研究炉と重複**している機関は非常に少ない (フランスのカダラッシュとスイス PSI 程度、日本は JAEA 常陽と Na 流動施設)。
- ・人材育成には**大出力研究炉**より**小出力研究炉**が多く使われるためにこれらの研究炉への改造投資は必要である。
- ・大学においては、原子力の研究の拡大から、**研究炉**や**熱流動施設**のシステム的な利用を考えた取り組みをすべきである。
- ・**シミュレータ**は発電炉の定常運転や事故時対応などの企業での実用的な人材育成に使われているが、教育・訓練にはまだ利用頻度は少ない。
- ・**燃料サイクルに関連した教育・訓練の教育施設の枠組み**が少ない。これに関係する高度な人材育成の施設も必要である (英国の NNL のホットセル、消滅処理をする MYRRAH などはあるが

世界的にも非常に少ない)。

- ・人材育成用のインフラは欧州横断的に利用できる仕組みが望ましい。
- ・**先端的な計算機科学**を利用した施設は高い品質の技術者を育てる上で必要である。ヨーロッパの**先端的シミュレータ**や**eラーニング**のような目に見える施設は重要である。これらの透明性あるいは開放型のソフトウェアは次世代の学生への大きな動機付けになる。

2. IAEA の会議資料に見るシミュレータの利用動向概要^{(3),(4)}

IAEA は 1997 年から教育・訓練用に PC ベースのシミュレータの拡大に関する活動をしてきていて、技術関係会議や多くのワークショップを行ってきている。2014 年、2017 年とウィーンでの国際会議が開かれ、21 か国から 32 名の専門家による情報交換が行われ、その報告書も今年になって発行されている。

この 2017 年の会議で取り上げられているシミュレータは、発電所の運転・保守に関わる技術者、電力供給に関わる人々、原子力研究者や技術者、規制行政に取り組む人々に有効な訓練ができる PC ベースのもので、もちろん学生や教官にとっても理論から実践までを学ぶことができるツールである。

これに対して、発電のために広く電力会社などで使われているのは「フルスコープシミュレータ」で、これはプラント運転のための中央制御室に設置されている制御盤のシミュレータで、通常運転時の運転手順や異常時に備えた対応手順について訓練ができるようになっている。

PC ベースのシミュレータは、比較的短時間で複雑な内容の原子力についての技術と基本的な物理の結合などを通して全体の俯瞰ができ、何をなすべきかを考えることを可能にするツールである。

IAEA は主にこの PC ベースのシミュレータによる経験を集め、教育のコストパフォーマンスや教育の有効性について、この国際会議で情報を交換して更なる高度化を目指している。

この国際会議で議論されたテーマを集約すると以下の 3 点になる。

- i) 体系的な人材育成：各国の原子力政策に沿って選択された炉型やシミュレータに盛り込む主要技術、などについて整理する。
- ii) 基本原理に沿ったシミュレータによる学生向けの原子力教育に関する手法などを議論する。
- iii) プラント運転用のフルスコープシミュレータとソフトウェアの利用例についてそれらの効果を議論する。

3. 主要国の教育用シミュレータ利用の概要⁽³⁾

IAEA の国際会議で提供された情報の中で、主に**学生の教育**に向けて利用又は開発されているシミュレータについての概要をまとめて表-1 に示す。

表-1 主要国のシミュレータを用いた学生教育の概要

| 国名 | 報告機関名 | 利用対象 | 主要な機能 | 利用上の特長やコメント |
|--------|---------------------|---|---|---|
| 米国 | EDFエナジー (旧AREVA) | 学生 | <ul style="list-style-type: none"> • 現行のPWRと計画中のガス炉のPCベースのシミュレータ • 実プラントで使用される、プラントシステム作動、プラント制御、プラントデータ表示、訓練シナリオなどを実装し、教育用に簡略化 • 利用した学生からは、入門的な内容だけでなく、プラント異常や事故時対応、パラメータ変更に伴う主要機器の応答性、などの追加機能の要望 | <p>米国内で利用している大学(カッコ内は保有研究炉や関係設備)</p> <ul style="list-style-type: none"> • North Carolina State University (1MW RR) : PWR • Chattanooga State University : ガス炉 • Augusta Technical College : ガス炉、PWR機器 • Texas A&M University (5W CA, 1MW RR) : PWR • Virginia Polytechnic Institute and State University (RMSVL: 放射線計測、シミュレーション、可視化研究所) : PWR • Augusta Technical College : PWR |
| スペイン | テクナトム | <ul style="list-style-type: none"> • 学生 • 導入検討国規制/推進行政担当者、電力などの企業の技術者 | <ul style="list-style-type: none"> • プラントのプロセス系統図の提示 • 運転パラメータのトレンド表示 • 主要機器の3D表示 • 以上を44の図表で表示し、10の概要図と34の操作図面 • 訓練用テスト機能搭載 | <ul style="list-style-type: none"> • デモモードと運転モードの2方式 • スペインの運転中の発電所をモデルにして、過酷事故対応、対話、意思決定、認知スキル向上機能を追加 • 企業からも好評 • ツールや手法へのあくなき改善は必須 |
| アルゼンチン | 原子力研究所 CNEA | <ul style="list-style-type: none"> • 学生 • 行政官 • 発電所技術者 | <ul style="list-style-type: none"> • 研究炉RA-0をモデル化(炉心動特性パラメータの利用) • TIC利用による計測制御系の最新化 • 表示にはカリキュラムに沿った展開をし、インタラクティブな操作を可能にする | <ul style="list-style-type: none"> • 教師の振る舞いのVTR記録と分析によるシミュレータの利用についての理論構築を指向 • 研究炉と実プラント用シミュレータとの対比した教育 |
| 南アフリカ | 原子力省 | <ul style="list-style-type: none"> • 学生 • 行政官、研究機関、発電所専門家など | <ul style="list-style-type: none"> • ウェブベースの教育訓練用シミュレータを中心(基礎から実プラントまでカバー) • 原子力エネルギーと粒子加速器を含む放射線防護の教育用シミュレータ | <ul style="list-style-type: none"> • 対象は学生だけでなく、エネルギー省、研究機関、発電所専門家向けにソフトウェアを変更して利用 • シミュレーションプログラムは現状と将来の発電所を想定 |

| 国名 | 報告機関名 | 利用対象 | 主要な機能 | 利用上の特長やコメント |
|--------|----------------|--|---|---|
| タイ | OEP（原子力平和利用部門） | <ul style="list-style-type: none"> 学生（学士、修士、博士コース） タイの原子力専門家 | <ul style="list-style-type: none"> PCベースの教育訓練用シミュレータ チュランコン大学の学部生、修士・博士課程の院生を対象としたプログラムと連動 IAEAの初期の段階から現在の先端的なシミュレータを積極的に導入 教育の経験からIAEAやシミュレータ開発者への将来の機能への要望も整理 | <ul style="list-style-type: none"> 1970年代の原子力の経験と将来の原子力導入に向けたプログラム 3段階のシミュレータ <ul style="list-style-type: none"> 1段階：原子力の入門と原子炉の基礎的な動作原理の教育 2段階：先端技術を付加した教育用 3段階：タイの原子力専門家向け これらの3段階アプローチではシラバス、クラス編成、シミュレータ方式の長短所の比較、学生へのフィードバックなどの枠組みを構築 |
| インドネシア | バタン研究所 | <ul style="list-style-type: none"> 専門家の教育 学生 | <ul style="list-style-type: none"> 熱流動の運動積分方式を取り入れたHTGRのプロジェクトの一環として準備 従来のPWR、研究炉などのシミュレータを下敷きにして、市販計算機コード、そしてユニークな熱流動モデルも組み込む | <ul style="list-style-type: none"> インドネシアの将来のHTGRの研究開発に手掛かりを与えるためのシミュレータ PWRのシミュレータは学生や専門家対象だけでなく、技術や物理も分かりやすく表現して社会受容にも貢献している |
| 日本 | 原子力エンジニアリング（株） | <ul style="list-style-type: none"> 学生 その他 | <ul style="list-style-type: none"> ミニシミュレータ PCベースの教育用シミュレータ 基本的な炉物理、臨界安全、動特性制御、プロセス制御、などの基本を体験する機能 現行発電プラントや次世代プラントの模擬も可能（原理の差異、システムの代表的な特徴をピックアップ） | <ul style="list-style-type: none"> 名古屋大、福井大、大阪大、などと共同評価 韓国でも評価研究を実施 |

4. シミュレータによる人材育成のまとめ

以上、国際機関からの情報をもとに現在展開されている活動を見てきたが、研究炉の利用による人材育成のスキームとはかなり異なっていることが見て取れる。

その中の主要な論点を整理すると以下ようになる。

- ①シミュレータは先端的な ITC を活用しているためにスマホ世代といわれる「若手」の取り組みの障壁は大変小さい。
- ②シミュレータへの期待や利用は個人の経歴、能力、志向などに影響されて、千差万別で、そのためには、教育カリキュラムを含め標準化が必要である。
- ③米国大学での教育用のシミュレータへの期待を、文献などを参考にして整理すると以下のようになりにかなり広い範囲での体験が期待されている。
 - ・基礎的な原子炉の原理（炉物理）の理解・体験
 - ・物理の理論が実現されている現象の把握（制御棒操作による出力変化など）
 - ・出力変化をさせるパラメータ変更に伴う主要機器の動作変化（出力設定の変化に伴う、循環系流量、ポンプ駆動状況、SGの温度分布、発電機回転数変化、など）の知見と理解
 - ・電力系統への投入や需要変化のフィードバックの影響などの理解

- ・原子炉の異常状態（アラーム点灯時）の主要機器の状態と対応操作によるプラント・サブシステム・機器レベルの応答性
- ・事故時の運転対応や自動起動の安全系動作の状態
- ・過酷事故での諸現象（SBO、洪水による影響や外部飛来物など）や対応
- ・事故時の発電所内外の放射性物質の移行
- ・事故時の近隣などへの影響

これらに対応したシミュレータの開発には、発電所の機密情報の管理などの関係で直ちに対応はできないであろう。

④EUの項でも述べたが、シミュレータでは、物理現象の実感が出ないため、研究炉や熱流動施設等に比べ教育効果が少ないという意見もある。しかし、米国でも、今回の報告では研究炉を保有している大学も保有していない大学もシミュレータの利用の効果を報告している。

5. ヨーロッパ諸国の熱流動装置⁽⁵⁾

原子力教育に利用される施設には、研究炉、シミュレータ、熱流動装置等がある。これらは主に、原子炉事故時の模擬を、冷却材の挙動を通して研究するものでその規模や冷却材なども多種多様である。

2010年のEUSNETPのETKM（人材育成）のワーキンググループが公表した、熱流動装置が設置されている研究機関と研究炉の有無などを国別にまとめて表-2に示す。

ヨーロッパでは、研究炉の共同利用と同様に、伝熱流動装置も大学や研究機関で連携して活用するケースも多い。

次世代炉として取り組んでいる、ADSのための基礎的なデータ取得のためのTALLの鉛—ビスマス冷却装置が、スウェーデン、ベルギーなどに設置されている。また同様な目的で、スペインやイタリアでも多くの装置が設置されて、研究と教育の目的に使われている。

また、フィンランドを始め軽水炉の導入国では、原子炉安全系の評価のための数々の実験に使われている。チェコ、ハンガリー、フランスなどは、これらの目的のものも多い。またフランスでは、現在建設が進められているJHRの支援のための施設もあり、研究炉と共同あるいは使い分けをして稼働させている。

表-2 EU 諸国における熱流動装置の設置状況

| 国名 | 機関名 | 熱流動設備名 | 熱流動設備の特長 | 利用研究炉名 |
|----------|-----------|--------------|----------|--------------------------|
| スウェーデン | KTH (大学) | TALL | 金属冷却材 | 国外炉 |
| フィンランド | LUT (大学) | PACTEL | 超大型施設 | FiR-1 |
| | | PWRPACTEL | — | |
| | | PPOOLEX | — | |
| | | VEERA | — | |
| ベルギー | SCK/CEN | 多数 | — | BR-1 |
| | UCL (大学) | 水流動施設 | — | |
| オランダ | Delft 大 | CENESIS | 特殊水流動 | HOR、 DELPHI |
| | | DELIGHT | — | |
| | | CIRCUS | 特殊水流動 | |
| フランス | CEA | POSEIDON | — | ISIS、 MINERVE AZUR |
| | | AMETHYST | — | |
| | | SAPHYR | — | |
| | | MISTRA | — | |
| | | GAMELAN | — | |
| | | PLINUS | — | |
| ドイツ | TUM | TOPFLOW | 超大型施設 | FRM-2 |
| | | ROCOM | 超大型施設 | |
| | シュシュトガルト大 | DEBRIS | | SUR100 |
| | KIT | ガラスモデル | | — |
| スイス | PSI | PANDA | 超大型施設 | PROTEUS |
| | FPS | | | CROCAS |
| スペイン | CIEMAT | GIRS | 重金属冷却 | シミュレータ 国外炉 |
| | | RECA | 重金属冷却 | |
| | | PECA | 重金属冷却 | |
| イタリア | トリノ大 | ADS | — | — |
| | | ローマ大 | STAF | — |
| | ピサ大 | VASIV | — | — |
| | | ANGIE | — | — |
| | | CONAN | 重金属冷却 | — |
| | | CVE | — | — |
| | ENEA | CIRCE | — | TAPIRO TRIGA |
| | | CHEOPE | 重金属冷却 | |
| | | LIFUS | — | |
| | | NACIE | — | |
| STARDUST | | — | | |
| チェコ | NRI | 建設中 (2010 年) | — | LVR-1 |
| ハンガリー | BUT | CODEX | — | BRR |
| | AEKI | PIV | — | |
| | | PMK2 | — | |
| | BME NTI | RIV/LIF | — | |
| | | TRATEL | — | |

EUと同様に、日本でも JAEA が研究炉と熱流動装置の両者を組み合わせた研究開発を進めながら人材育成をするといった枠組みはできていたが、もんじゅの廃止措置、研究炉 JRR-3 や常陽の長期停止などから、施設の効率的な連携使用は十分行われてはいない。

6. 人材育成のインフラの選択

以上に述べたように、熱流動装置やシミュレータなどの利用動向を研究炉の利用と関連付けて見てきたが、それぞれの施設には固有の目的があり、人材育成という幅広い目的に対して一つだけを絞り込むことは簡単ではない。

理想的には、EU の戦略の項目にあるように、それぞれの施設を戦略的に組み合わせて使うことで、教育効果を高める方法はあるが、調達可能な資金には限界があり、相応の選択手段を考えておくことも計画立案時には重要な要素であると考えられる。

このために、海外動向も含め、明確な方向性を示している例はないと思われるが、多くの定量的な政策あるいは経営評価の中の一つに、「教育用インフラ投資」と「教育の効果」を比較した投資効果による意思決定手法である「ROI による教育評価法」の提示⁽⁶⁾もあり、このような手法の利用の検討も今後は考える必要がある。ここに紹介されている方法以外では、以前から行政評価法⁽⁷⁾として提案されている、「仮想市場法」、「ヘドニック評価法」あるいは「トラベルコスト法」などもあるがここでは詳細の説明は省略する。

【参考文献】

- (1) OECD/NEA, “Nuclear Education and Training: From Concern to Capability”, OECD 2012 (ISBN978-92-64-17637-9)
- (2) EU SNETP, “Nuclear Education and Training” ETKM Working Group (2010)
- (3) IAEA TECDOC 1836, “Developing a Systematic Education and Training Approach Using Personal Computer Based Simulator for Nuclear Power Programs”, ---Proceedings of a Technical Meeting Held in Vienna, 15-19 May 2017--- IAEA (2018)
- (4) IAEA, “Technical Meeting on Utilization of NPP Simulators as Educational Tools” (IAEA 2014)
- (5) EU SNETP “Current and Future Uses of Nuclear Infrastructure in Europe” (Working Group ETKM 2010)
- (6) A.Barambones et.al, “Assessing the Return on Investment (ROI) of Training in the Spanish Nuclear Industry”, (Proc. NESTET 2016)
- (7) 野村総研 教育改革推進のための総合的調査研究—教育投資の費用対効果についての先導的分析— (平成 21 年 3 月)

4 試験研究炉の運営体制の検討

4.1 想定される運営主体や利用者組織からの意見聴取

新たな試験研究炉の運営体制の検討に際し、想定される運営主体や利用者組織などから、以下のような項目に基づき意見聴取を行った。

<大学、研究機関>

- (1) 試験研究炉の運営主体を構築する場合、重要な視点は何か
留意点は何か。また、その具体化と背景・理由などは何か
- (2) 運営主体が担うべき機能のコアと考えるものは何か。必要な要件は何か
- (3) これまでの運営経験、在り方での課題は何か
- (4) これまでの運営経験で参考となる点は何か
- (5) 運営主体に参画が可能か
 - ・参画する場合の役割と要員規模ほどの程度か、参画条件は何か
 - ・参画できない場合の理由、ハードルは何か

各大学、研究機関からの意見聴取をもとに、今後の運営体制の在り方検討を進めるため、運営体制の構築における重要な視点、コンソーシアム参加・形成に関する条件や連携上の課題、新たな試験研究炉を利用する場合の意見の三つの観点に基づき、論点やポイントを整理した。

運営体制の構築に当たっては、運営段階のみの機能や業務体系を見据えるのではなく、概念検討や設計・建設といった本プロジェクトの初期段階における関係者の位置づけや役割、機能や関係性を踏まえる時間軸のアプローチが不可欠である。

さらに、プロジェクトの各段階における主体的役割と連携なども踏まえた検討を行う必要がある。

4.1.1 運営体制の構築における重要な視点

< A大学 >

- ・運営体制への参加は、技術者・研究者（個人又は組織）が基本。
- ・協定を結ぶ方法なども視野にある。
- ・計画立案、建設への参加は可能。概念検討のアイデアは大学で行うことができるが、炉心設計は企業である。
- ・省力化・無人化は設計段階からの検討が重要（通常時のビッグデータによる異常検出、定検の洗い出し等）。

< B大学 >

- ・研究炉の設計は難しく、対応できる大学は京大と近大のみ。
- ・JRR-3 と東大物性研のように専門、完全独立が望ましい。

< C大学 >

- ・施設運営を JAEA、利用運営を大学＋ユーザーが望ましい。産業界の参画が重要である。
- ・概念設計（検討）は、京大＋研究機関＋メーカー（オブザーバー）が望ましい。
- ・本学が中心になる場合、国・研究機関や連携する大学から専門家を配置してもらうなどの措置が必要になる。

< D大学 >

- ・もんじゅと試験研究炉を統合し、地域の活性化、研究者のモチベーションアップにつながるような新たな組織に生まれ変わるのが良いのではないかと。

< A研究機関 >

- ・効果的・合理的運営のため、設計・建設、維持管理・運営を束ね、運営・利用を全体的にマネジメントする体制づくりが不可欠。
- ・概念検討から設計、建設、運用等各段階に適した体制はそれぞれ異なる。
基本計画ではニーズ利用者が、設計は炉物理の専門家が、建設・加工は現場が主体である。
- ・施設を長期間維持管理していくために安定した経営基盤の確保が必要である。
- ・施設管理側と外部の施設利用研究者をつなぐコーディネータ人材・組織が不足。
- ・概念検討から設計・建設、運営までの各フェーズに適した体制、フェーズ移行で固有の設計思想、知識、技術等の継承が重要である。
- ・施設の安全性を確保しつつ、利用者への技術的価値の高い照射データの提供が可能な技術体制の確立が必要である。
- ・中性子利用炉である以上、研究分野の求心力を有する研究集団が、コアとなる運営主体に所属すべきである。
- ・施設運営費の確保のためのビジネスモデルの構築が必要。

4.1.2 コンソーシアム参加・形成に関する条件や連携上の課題

<A大学>

- ・本学をはじめ大学には原子力分野の技術者が少なく、安全管理を研究者が兼務している。
- ・敦賀に設置する場合、分室という想定になる。そのため、現施設ともんじゅとの位置づけの整理・明確化が必要である。
- ・学術会議、学会で方向性について意思表示をしっかりと行ってもらう必要がある。

<B大学>

- ・ユーザー窓口を地元大学、維持管理を研究機関が担う等を想定。アルゴンヌ大学の事例（国が運営し大学研究者が一体化）が参考になる。
- ・規制対応（発電所並み）が一番難しい。施設の管理＋研究組織の運営を大学だけで実施するのは困難である。

<C大学>

- ・ユーザーの申請内容を理解し、判断できるコーディネータが不可欠で、外部の支援が必要。
- ・分室＋本学でノウハウを共有し、一緒に運営することが望ましい。
- ・原子力科学系大学研究所等連携協議会に本学も参加し、今後も協力連携を図る予定。
- ・研究炉の利用は、研究開発、人材育成、産業利用の3本柱である。

<D大学>

- ・JAEAの一部と放射線医学総合研究所とが統合し国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構となった事例が参考になる。
- ・もんじゅサイトへの参加は、本学としては原子力技術応用工学科があり原子力への理解はあるが、経営判断が必要になる。

<A研究機関>

- ・研究炉での挑戦的な試験に対する柔軟な規制対応が必要である。
- ・試験研究炉に対する規制の適正化（試験研究炉への理解促進、グレーデッドアプローチの活用等）が重要である。
- ・研究炉設置に際し、規制に関してグレーデッドアプローチによるガイドラインの策定が望まれる。その場合、米国と同様に、設計段階から規制メンバーの参画により設置許認可申請の合理化が図れる。
- ・規制メンバーの参加・理解を得るには、事前にある程度の設計が整理されていると円滑に進められる。

4.1.3 新たな試験研究炉を利用する場合の意見

< B大学 >

- ・低出力炉は、人材育成が主目的なため、最近の成果主義では評価が難しい。

< C大学 >

- ・本学の教員に関しては、燃材料、炉物理、熱流動の研究者は存在しており、研究炉の利用経験がある者もいるが、炉の設計・製作を経験した者はない。

< D大学 >

- ・先生方の参加については、企業との共同研究の形が考えられる。今後は若い先生を積極的に登用すること等を考えている。
- ・交通費や宿泊費等は研修者側で負担する必要がある、参加者の経費軽減につながる施策が必要である。
- ・もんじゅサイトに臨界実験装置や研究炉があると、地元の大学は利便性の観点からも利用しやすい。

< A研究機関 >

- ・利用者・ニーズ対応として、利用者の参画による運営・利用に関する委員会設置等、利用者の要求が的確に反映される透明性を持った運営体制作りが不可欠である。

4.2 建設／運転時の運営体制の検討

4.2.1 事業手法における基本的役割分担と連携可能性

運営体制の検討では、プロジェクトの段階及び主体が担う必要がある個別の機能や役割分担（リスク分担）を体系化した最適事業手法を明確化する必要がある。

そのため、まず、今回のプロジェクトへの適用が想定される適正な事業手法を抽出・整理し、その中で、運営主体として想定される機関・組織を想定し整理する。

さらに、前章の想定される運営主体などからの意見聴取の結果も踏まえつつ、連携の位置づけや可能性について、整理を行う。

公設公営による従来方式や、運営を民間に委託する公設民営方式といった従来手法に対し、近年、設計・施工を一体として民間に委ねる方式：設計施工一括発注方式（DB方式）や、資金調達や事業運営を経営的な視点から民間に委ねる PFI 方式などの官民連携方式（PPP：Public Private Partnerships）が推進されている。

その中で、施設所有を公共（本事業では国あるいは研究機関）の前提とし、計画策定から設計・施工、維持管理、運営を包括的に民間委託する DB 方式あるいは PFI-BTO 方式（設計・施工後、所有権が公共となる方式）が事業手法として考えられ、原子力特有の安全規制・許認可対応が可能な選択となる。

さらに、本事業では、運営実務や運営段階における資金調達には、公共と民間の連携による効果的な展開が期待されるものであり、最近事例でも同様の取り組みが進んでいる。

表 4-1 本事業適用の最適手法と役割分担及び連携可能性

| 事業方式 | 施設所有 | 資金調達 | 基本計画 | 設計 | 建設施工 | 維持管理 | 運営 |
|---------------------------------------|------|--------------------|--------------|----|------|--------------|----|
| 従来方式(公設公営) | 公共 | 公共 | 公共 | 公共 | 公共 | 公共 | 公共 |
| 運営委託方式(公設民営) | 公共 | 公共 | 公共 | 公共 | 公共 | 民間 | |
| DB方式 (Design Build) | 公共 | 公共 | 公共 (民間委託) | | | 公共 (民間委託) | 連携 |
| PFI-BTO方式 (Build Transfer Operate) | 公共 | 整備段階：公共 運営段階：連携 | 公共 (民間委託) | | | 連携 | |
| PFI-BOT方式 (Build Operate Transfer) | 民間 | 整備段階：公共 運営段階：連携 | 公共 (民間委託) | | | 連携 | |

4.2.2 事例研究：東北放射光施設グランドデザインと構想

本事業の検討として、運営体制や事業化の取り組みについて最近の事例を研究することは、今後、最適な運営体制の構築、運用に大いに参考になると思われる。

このため、目下、東北エリアにおいて進行する放射光施設整備に関するプロジェクトを取り上げ、現時点までの経緯や足跡、さらに、今後の在り方などのグランドデザインや構想について、事例研究を行う。

当該事例は、これまでの経緯からも、その特徴として、構想段階から放射光施設単体の整備を目指した取り組みではなく、海外の状況も十分に交え、先導的な位置づけや役割を果たすことを見据えて、国際的な産学共創の拠点構築の戦略や展開を図っていることにある。

とりわけ、研究開発の方向性について、基礎研究から応用技術開発、製品化へのサイクル高速化への運営や展開を念頭に置いていること、さらに、放射光施設をコアとして、その周辺地域への産業の集積と一体化のための形成計画を策定し、様々な関係者の幅広い連携を、官民地域パートナーシップとして長期間にわたり誘導していること等が、特徴的であり、かつ大いに参考になる。

(1) これまでの取り組み

東北地方において放射光施設の整備を軸に、その周辺に大学や企業の研究者や研究施設が集積し、さらにそれらの研究成果を製品化する生産機能も集約して産学が一体的に展開するという大型リサーチコンプレックスの形成を目標とした「東北放射光施設構想」を掲げ、取り組みが進んでいる。

構想の実現を目指し、まず、東北地区の7国立大学（弘前大学、岩手大学、東北大学、宮城教育大学、秋田大学、山形大学、福島大学）により「東北放射光施設推進会議」（平成24年6月、事務局は東北大学）が設立され、学術面を中心にした施設の在り方検討や各種要望、利用に関するセミナー等の機運醸成などの活動を展開してきた。

次に、この活動状況を受け、東北の各県、産業界を交え「東北放射光施設推進協議会」（平成26年7月、事務局は宮城県）を設立し、更なる機運醸成と施設利用の理解促進の様々な活動を展開してきた。

表 4-2 東北放射光施設推進協議会の概要

| | |
|----------------|--|
| 目的 | 次世代放射光施設設置による効果が東北全体へ波及するよう、関係機関と連携による施設理解及び産業利用の促進 |
| 共同代表等 | 共同代表 宮城県知事 共同代表 仙台市長 共同代表 東北大学総長 共同代表 東北経済連合会会長 顧問 衆議院議員 |
| 構成団体 | <官> 7 県市 青森県、岩手県、宮城県、秋田県、山形県、福島県、仙台市 <学> 7 国立大学法人 弘前大学、岩手大学、東北大学、宮城教育大学、秋田大学、山形大学、福島大学 <産> 14 団体 一般社団法人東北経済連合会、東北六県商工会議所連合会、青森県商工会議所連合会、岩手県商工会議所連合会、宮城県商工会議所連合会、秋田県商工会議所連合会、山形県商工会議所連合会、福島県商工会議所連合会、一般社団法人青森県工業会、一般社団法人岩手県工業クラブ、一般社団法人みやぎ工業会、あきた工業会、山形県工業会、福島県電子機械工業会 |
| 事業内容 事務局担当課 | ◇機運醸成 ・普及啓発を目的としたシンポジウム等の開催 ・関係機関への要望活動 ・ホームページ等による情報発信やサポーターへの情報提供 ◇産業利用の理解促進 ・産業利用に関する調査研究 ・セミナーや勉強会等の開催 事務局担当課：宮城県 経済商工観光部 新産業振興課 |

この間、放射光施設の候補地検討や、施設計画の策定、施設運営のコンセプト検討などいわゆるグランドデザインの具体化が進行し、整備に向けた取り組みが進んだ。

その成果蓄積や実現への機運確保に従い、設計・建設の事業化段階として、官民地域パートナーシップによって、様々な関係者の連携による施設整備や各種関連機能施設の整備に向かうには、事業化に係る具体的な個別事業の発注手続きが伴う。このため、地域の推進を先導する主体として、産学官が一体となった「一般財団法人光科学イノベーションセンター」(平成28年12月)が設立され、民間資金の積極導入や広範な利用推進等の活動が展開されている。

平成30年1月、国は、官民パートナーシップによる次世代放射光施設の具体化推進に向け、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構を同施設の整備・運用の検討を進める国の主体と位置づけ、さらに、次世代放射光官民パートナーシップ具体化のためのパートナーの募集を開始した。

これに対し、東北地域の産学官連携体制より(1)パートナーが整備する主要設備、(2)産学官の集積状況とリサーチコンプレックスの形成加速、(3)財源負担に関する官民地域の役割分担のいずれも具体的かつ意欲的な提案がなされ、同年7月に一般財団法人光科学イノベーションセンターを代表機関とし、宮城県、仙台市、東北大学及び一般社団法人東北経済連合会とした共同体が、パートナーとして選定されている。

直近では、一般財団法人光科学イノベーションセンターが発注主体となり、「次世代放射光施設建設工事のうち基本建屋設計業務(平成30年9月公募開始)」や、「次世代放射光施設建設工事のうち敷地造成工事(平成30年12月入札公告)」などの検討、整備が着実に進行している状況にある。

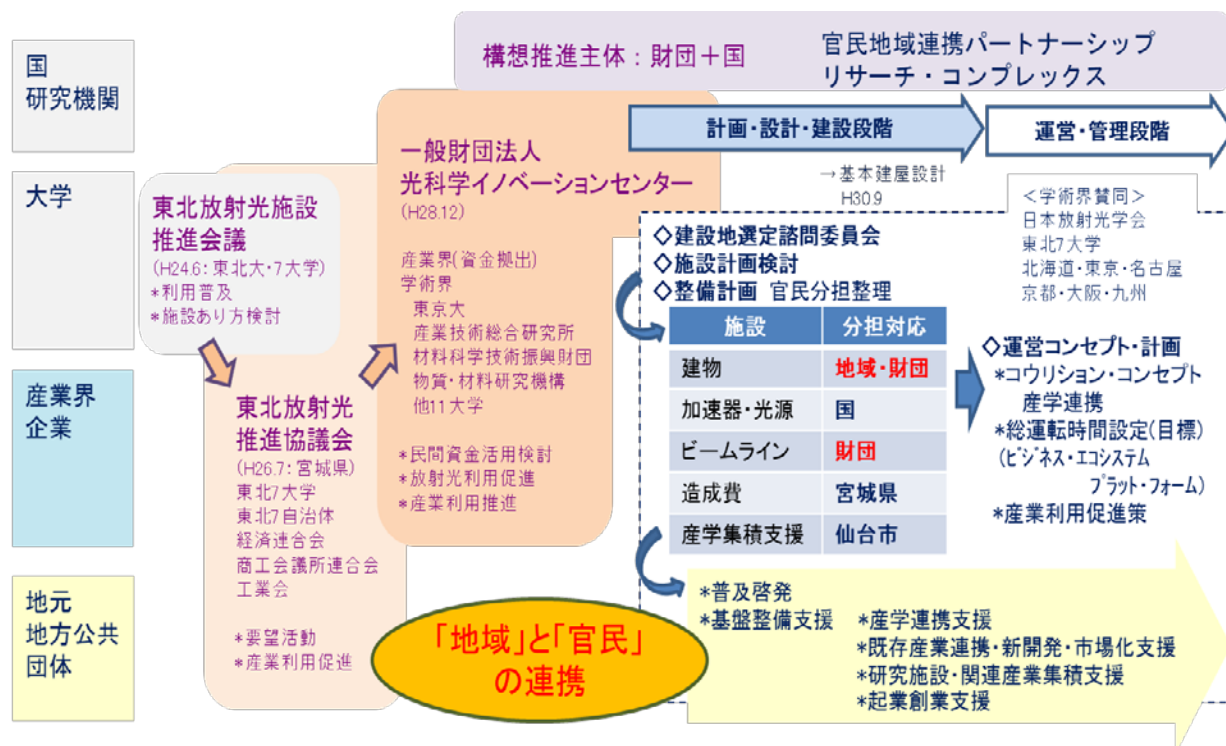


図 4-1 東北放射光施設グランドデザイン及び地域構想による推進の流れ

(2) 施設運営のコンセプト

施設運営の基本的な考え方は、国際的な競争力を確保する点を考慮し、さらに、地域の研究開発から産業利用までの地域・産学官連携を効果的に取り扱う観点から、とりわけ、産業利用支援、ビームラインの管理やアップグレード業務等については、前述した（一財）光科学イノベーションセンターが担うこととして位置づけられている。

このように牽引役を位置づけるとともに、関係機関の役割分担や展開方策の具体化に関し、以下のような観点で、戦略的な運営の在り方が整理されている。

◇産業利用関連の運用方法

- * 産業利用の促進体制の構築：コウリション・コンセプト
- * 産業利用の特色を活かす配慮：成果利用の最大化の仕組み
- * 安定した年間 6,000 時間の利用運転：目標設定とビジネス・エコシステム

◇共同利用に関する運用方法

(3) 放射光施設をコアとしたリサーチコンプレックスの形成

海外先行事例研究からも、

- * トップサイエンスの大学との地理的な近接性、交通の利便性
- * 産業界、行政（地域）も巻き込んだ戦略的なマネジメント

が成功ポイントとして明示されており、本構想においても、これを踏まえ、以下のような観点からの具体的な推進・展開を図るものとしている。

◇研究機関等の集積状況及び産業連携

- * 建設候補地の東北大学内に国際級の関連する学術的な研究開発環境が存在
(例：東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター)
- * 産学連携による自律的な運営による国際的に有力な研究開発拠点が立地
(例：東北大学と東京エレクトロン社等による分野コンソーシアム構築・展開)

◇仙台市の優れた都市・交通基盤の活用

- * 地下鉄等による高いアクセス性
- * 市内宿泊施設（149 施設、約 32,000 名収容）の都市機能が充実

◇地域が持つ高いポテンシャル

- * ITER BA（青森県）、重粒子線がん治療（山形県）、南東北 BNCT（福島県）等集積
- * 加速器関連要素技術（機械加工、制御機器、電機部品等）企業等：約 650 か所
- * 宮城県下約 30 か所の工業団地立地、仙台北部中核工業団地群への集積期待
- * (株) 東北インテリジェント・コスモス研究機構（ICR）、県産業技術総合センター等連携可能性

(4) 官民地域パートナーシップの実現

本プロジェクトは、国の専門委員会（量子ビーム利用推進委員会）から、「官民地域連携」が重要な観点の一つとして挙げられ、当初から地域かつ官民での様々な連携による取り組みが進んできた。

概念検討や構想策定といった初期段階を経て、計画実現段階に移行する中で、様々な関係主体の連携や共同を戦略的かつ効果的に展開するため、より具体的なロードマップ作成、運用・展開を図ることが必要不可欠となり、対応策を調べている。

さらに、国による施設の整備・管理・運営に伴い、国は、当該地域固有の推進主体をパートナーとして選定し連携して取り組む方法を採用したことから、地域かつ官民連携の中心的な役割を担う法人組織（一般財団法人光科学イノベーションセンター）が、地元産業界を設立者とする形で設置された。

なお、当法人は一般財団法人であり、設立に際しての留意点や手続きに特別な配慮や措置がなされたものではなく、一般的な流れを経ている。産業界の参画及び学术界の賛同を得て、財団法人設立発起人会（平成 28 年 12 月 15 日）開催を経て、一般財団法人として設立（平成 28 年 12 月 26 日）に至っている。概要を以下に示す。

表 4-3 地域の推進主体の設立に関する取り組み

<発起人>

| | |
|-----|---|
| 産業界 | IHI、NEC トーキン、協立化学産業、シエンタオミクロン、JFE スチール、住友金属鉱山、住友ゴム工業、創薬産業構造解析コンソーシアム、TDK、東芝、東北特殊鋼、トヤマ、DOWA HD、日立製作所、日立造船、福田結晶技術研究所、三菱重工業、みやぎ工業会、村田製作所、リガク（五十音順） |
| 学术界 | 東京大学 産業技術総合研究所、材料科学技術振興財団、物質・材料研究機構（賛同）北海道大学、京都大学、名古屋大学、大阪大学、九州大学、秋田大学、岩手大学、弘前大学、宮城教育大学、山形大学、福島大学 |

<一般財団法人光科学イノベーションセンター 概要>

| | |
|---------|--|
| 名称、設立者等 | 一般財団法人光科学イノベーションセンター 設立者：（一社）東北経済連合会、所在地：仙台市青葉区中央 |
| 活動目的 | *放射光施設等の整備事業 *放射光施設等の管理運営及び国内外の研究者等への供用 *放射光施設等の利用に関する技術支援、関連分析・解析 等 |

◇構想推進主体

* 構想推進主体は、官民の役割分担による戦略的な展開を想定している。

| 基盤・施設 | 産学官役割分担 | 備考 |
|--------|--------------|-------------------------------|
| 建物・建屋 | 地域 一般財団法人 | 基本的に地域で準備、特に稼働時に必要なものは財団準備を想定 |
| 加速器・光源 | 国 研究機関 | 重要施設であり、建設・運営面において高度の技術力が必要 |
| ビームライン | 一般財団法人 | 建設は財団で実施、運営は国・研究機関との調整を想定 |
| 造成 | 宮城県 | 基盤整備の一環として想定 |
| 産学集積支援 | 仙台市 | 研究開発施設や企業立地、集積に向けた各種制度設計、支援 |

◇産業界の参画

* 資金拠出

◇学界からの賛同

* 日本放射光学会及び発起人賛同 11 大学

◇行政からの支援

* 基盤整備支援

* 普及啓発

* 産学連携支援

* 既存産業との連携による新たな研究開発・市場化への支援

* 研究施設・関連産業の集積支援

* 起業創業支援

4.2.3 運営体制の検討における想定条件

試験研究炉の運営体制に関する検討を進めるため、前述した本事業に適用可能な最適手法の枠組みを固め、関係主体の役割分担や連携可能性、さらに東北事例等を踏まえ、想定条件を整理する。本事業の広範な関係主体を前提とし、事業化の各段階における推進主体の位置づけや役割を考慮し、次のような条件設定を行った。

施設整備及び所有は、高度な技術力の発揮や国際的な展開を見据え、関連予算の確保による研究機関（国）が担うことを基本とする。このため、所有主体となる研究機関（国）が維持管理も担い、機関発注による包括的な民間委託により効率的・効果的な対応が可能となる。これにより、設計、施工、維持管理をまとまった形で取り扱うことが可能となる様々な官民連携手法適用が想定される。

一方、運営段階は、研究開発と利用者との連携のバランスを取りつつ、挑戦的かつ成果の最大化を図るため、官民の適切なリスク分担での連携による運営を基本とする。このため、運営費用についても、利用者の使用料収入と運営費負担を組み合わせで扱い、収入安定化の工夫についても官民連携による具体策の活用を図るものとする。

表 4-4 運営体制検討における想定条件

| プロジェクト 段階・機能 | 想定条件・備考 |
|-----------------|--|
| 施設整備 | 研究機関（国）による整備主体 |
| 施設所有 | 研究機関（国）による施設所有 |
| 運営段階 運営資金 | 官民連携（官民リスク分担）による運営 「使用料収入」＋「運営費負担」の組み合わせ * 運営費は使用料収入と研究機関及び大学の予算で対応 * 使用料収入安定化のため、研究機関、大学、民間と複合連携 |
| 安全管理 | 研究機関（国）による基本対応と大学との連携（共有） * 安全管理の技術継承・教育訓練、水準と体系を共有・展開 |
| 維持管理 | 整備・所有主体である研究機関（国）発注による民間委託 |
| 契約形態 | 研究機関（国）と民間による長期契約を基本 * 設計・建設、維持管理に官民連携手法（PPP）を積極導入 * 公共（研究機関）の中期計画期間を超える長期契約を前提 |

4.2.4 試験研究炉プロジェクトの運営段階における必要機能

試験研究炉の運營業務には、学術研究や研究開発といった基本機能の他に、連携促進や利用調整などの外部利用者とのコーディネート機能が不可欠である。運営主体等の意見聴取でも、運営・利用を全体的にマネジメントする機能・体制や、施設安全性を確保し、利用者へ技術的価値の高いデータ提供が可能な体制の必要性が提起されており、今後の運営の重要な機能として捉え、具体策を検討する必要がある。

さらに、関係者からの意見から、規制に関してグレーデッドアプローチによるガイドラインの作成や、設計段階からの規制当局参画等の工夫が提案されるなど、規制に適合した安全性を十分に確保できる運営実務を展開するため、安全管理の観点からの機能や業務の充実、効果的な仕組みや体制づくりを重要視する必要があるといえる。

| | | | | |
|----|------------------------------|--|---|--|
| 運営 | 学術研究 研究開発 人材育成 産業利用 | 戦略立案・目標 計画・工程策定 研究・開発実務 予算・実施管理 組織編成・運用 成果評価・検証 | <基本機能> *研究開発計画 *研究実施 *成果評価・課題整理 *進行管理・検証改善 *日常点検・補修等 | <関連業務> *燃料調達 *燃料管理 *廃棄物管理 |
| | 連携促進 利用調整 | 研究開発支援 リレーション管理 利用調整 連携促進 | *関係者情報把握 *利用ニーズ市場分析 *申請評価採択 *事務手続対応 *実務進行管理 | *連携計画・方策策定 *連携支援 *アウトリーチ(広報、普及啓発) *地域共生・連携プロモーション |
| | 安全管理 | 規制法基準 (マネジメント) 管理計画・実施 レビュー(検証) | *運転計画策定・運転 *品質保証計画・運用 *原子炉施設保安 *進行管理・検証改善 | *安全協定締結・運用管理 *核物質使用施設保安 *核物質運搬・計量管理 |
| 管理 | 維持管理 | 目標・計画策定 発注・委託契約 実施・進行管理 履行評価・検証 | ・保守点検 ・経常修繕 ・外構管理 ・保安警備 等 | <計画修繕>・修繕計画 ・設計発注 ・各種申請 ・大規模修繕 |

図 4-2 試験研究炉の運営段階における必要機能と関連業務

とりわけ、現在研究炉の運営実績を有する関係者からは、安全管理業務に関して、グレードアップアプローチに基づく基本的な対応だけでなく、安全面全般に関する広報や意識醸成、教育訓練・人材育成、さらに地域共生やプロモーション等といった連携推進や利用調整の業務との連動・整合を積極的に図る点も指摘されており、更なる運営の詳細化が望まれる。

4.2.5 規模別・機能別の連携の在り方(案)

前述した運営段階における必要機能や役割を基に、連携の在り方について、そのバリエーションを整理する。運営における必要機能の想定は、研究炉の規模や機能に応じて異なることから、本検討では、設計やその規模感が異なってくると想定される 2MW 以上の研究炉での連携について基本的な整理を行うものとする。

なお、連携の在り方は、管理や運営の主体として、基本機能や業務に対応する前提での整理の他に、利用者の立場から、連携に参画するパターンも想定されることから、機能別に想定される連携メニューについて、次のように整理する。

表 4-5 規模別・機能別の連携の在り方（案）

利用者としての立場
利用者へ提供する機能や立場

| | 臨界実験装置 | 低出力炉 (2 MW未満) | 中出力的炉 (2 MW以上20MW未満) | 高出力の炉 (20MW以上) |
|--|------------------------|---|---|-------------------|
| 学術研究 研究開発 マネジメント 人材育成 産業利用 | 大学 * 基礎研究 * 教育訓練 | 大学 * 個別プログラム (研究+育成) * 共同プログラム (大学連携) (産学連携) | 研究機関+大学：基礎研究（共同、個別利用） 教育訓練・人材交流、高度専門化 企業+大学：研究開発（共同、個別利用） 連携、教育訓練・人材交流 | |
| 連携促進 利用調整 | — | 大学 * 調整窓口 * 実施管理 | 研究機関+大学：調整窓口、実施管理、教育訓練 企業+大学：連携利用費負担 企業+研究機関 同上 | |
| 安全管理 | 大学 | 研究機関 | 研究機関+大学：高度専門化・人材交流 +企業：アトリチ連携（広報・普及啓発） 地域共生・連携プロモーション | |
| 維持管理 | 民間委託 | 民間（業務受託） | | |

一例として学術研究について述べる。

<学術研究>

研究業務分野は、個別の研究活動が基本業務であることから、連携可能なパターンとして、主に研究活動の中心的な役割を担う大学との関わり方から二つに大別する。具体的に、大学は、研究機関及び企業との連携が想定されるが、研究機関は施設所有・管理運営主体の前提であるため、共同研究としての連携としては研究を主導する側の研究計画に基づくものとなる。

このため、ここでは利用者としての立場の観点から共同研究を実施する場合の連携パターンや機能・業務について整理する。

研究機関+大学：基礎研究領域で先導的な連携体制を取ることが期待される

想定目的) 先導的研究（高度専門特化）、教育訓練・人材交流等

企業+大学：研究開発領域で分析解析、開発・応用の広範な展開が期待される

想定目的) 共同開発、実用化、教育訓練・人材交流等

<連携促進・利用調整>

連携促進や利用調整については、関係者ヒアリングにおいても、ユーザーの申請内容を理解し判断できるコーディネータの役割、さらに施設管理側と施設利用を行う研究者をつなぐ調整等が望まれ、重要な機能を果たすことになる。従来の共用法によれば、この機能の実現は新法人設置が必要となるが、本事業では連携の仕組みを考察する。

研究開発領域の高度かつ広範な専門性への対応や、後述する安全管理業務との整合性の観点から、以下のように、利用者へ提供する立場と利用者の立場で適切な役割分担（リスク分担）を図ることにより、効果的かつ合理的な業務対応が可能になる。

◇利用者へ提供する機能や役割・立場（具体機能は表 4-5 参照）：

研究機関＋大学：コーディネート、進行管理、教育訓練（ニーズ市場分析等）

アウトリーチ（広報、利用促進）や地域共生・連携プロモーションは安全管理業務と共同実施

◇利用者としての立場：

企業＋大学：連携利用に関する費用負担

企業＋研究機関：連携利用に関する費用負担

共同研究や連携による利用においては費用負担を原則とする。利用形態や利用内容による在り方は、利便性や利用度の向上を見据え詳細検討が必要である。

<安全管理>

安全管理業務は、研究炉の適正な運転の安定的持続のための基本業務と位置づけられるが、技術ノウハウや管理水準、広報・地域共生等全般にわたり、グレーデッドアプローチを踏まえた体系化・合理化が今後期待される。

このため、安全性担保に不可欠な技術、知識等の普遍化、教育訓練・育成などを関係者全体の基本的役割として醸成し、継続的に基盤投資を行う体制と仕組みの確立が望ましい。ここでは、利用者へ提供する機能や役割・立場として整理する。

研究機関＋大学：管理ノウハウ・水準や技術、知識等の基盤化、教育訓練・育成

＋企業：管理水準の基盤化、アウトリーチ（広報、普及啓発・理解促進）
地域共生・連携プロモーション活動支援 等

4.3 運営体制を整備する際の留意事項、手続き等の調査

4.3.1 コンソーシアムによるプロジェクト推進ロードマップ

前述までの研究炉の運営段階での必要機能や連携の在り方・メニューに関する検討を踏まえ、本事業に係る体制を含む今後の進め方のイメージ（ロードマップ案）について提案整理を行う。

まず、初期段階においては、利用に関するニーズやシーズを把握し、試験研究炉による研究・開発のビジョンを明らかにする中で多面的な議論を深めていく必要がある。

この段階では、調査・検討として当該分野・領域に深く関わる位置づけにある研究機関や大学群による会議体：推進会議を形成して、本件推進の起点・立ち上がりとなる体制を形成する。

本会議の活動に従い、さらに、立地（候補）地域において、研究炉設置による波及効果を狙う具体策の作成と地域における活動の充実を図る役割として、地域の産学官の関係主体をベースにした 推進協議会 が形成され、当該地域の発展、充実に向けた地域構想の発展的展開を担う。推進協議会による機運醸成や具体的な推進主体の意思表示等により、構想や体制構築の段階を経て、事業実現の本格化の段階に移行する。

設計・建設段階では、整備主体である研究機関と利用主体である大学群及び企業・産業を構成とし、それまでの任意の連合体（コンソーシアム）から、具体的な事業の一部発注も担うことが可能な法人格を確保する。以下の研究機関との役割分担に基づき、整備・運営の一部を担う主体は、「研究」と「多層連携」の牽引役として、例えば一般財団法人のような公益法人が相応しい。

表 4-6 整備計画・推進の役割分担（想定案）

| 施設 | 役割分担（案） | 備考 |
|--------------------------|------------------|-------------------------------|
| 造成・建屋 | 研究機関（大学等の研究者を含む） | もんじゅサイトでの整備を前提 |
| 研究炉（本体） | 研究機関（大学等研究者を含む） | 高度な技術力を必要とされ、整備・所有、安全管理を担う |
| 実験施設・ビームライン 周辺基盤・産学集積 | 地域 構想推進主体 | 中心となる整備主体として公益法人（例：一般財団法人）を想定 |

運転及び連携運営の段階は、もんじゅサイトの研究炉を中心した拠点地区及び周辺地域での産業集積による既存や新規の産業創出による展開、広範にわたる連携ネットワークの浸透が進行する。

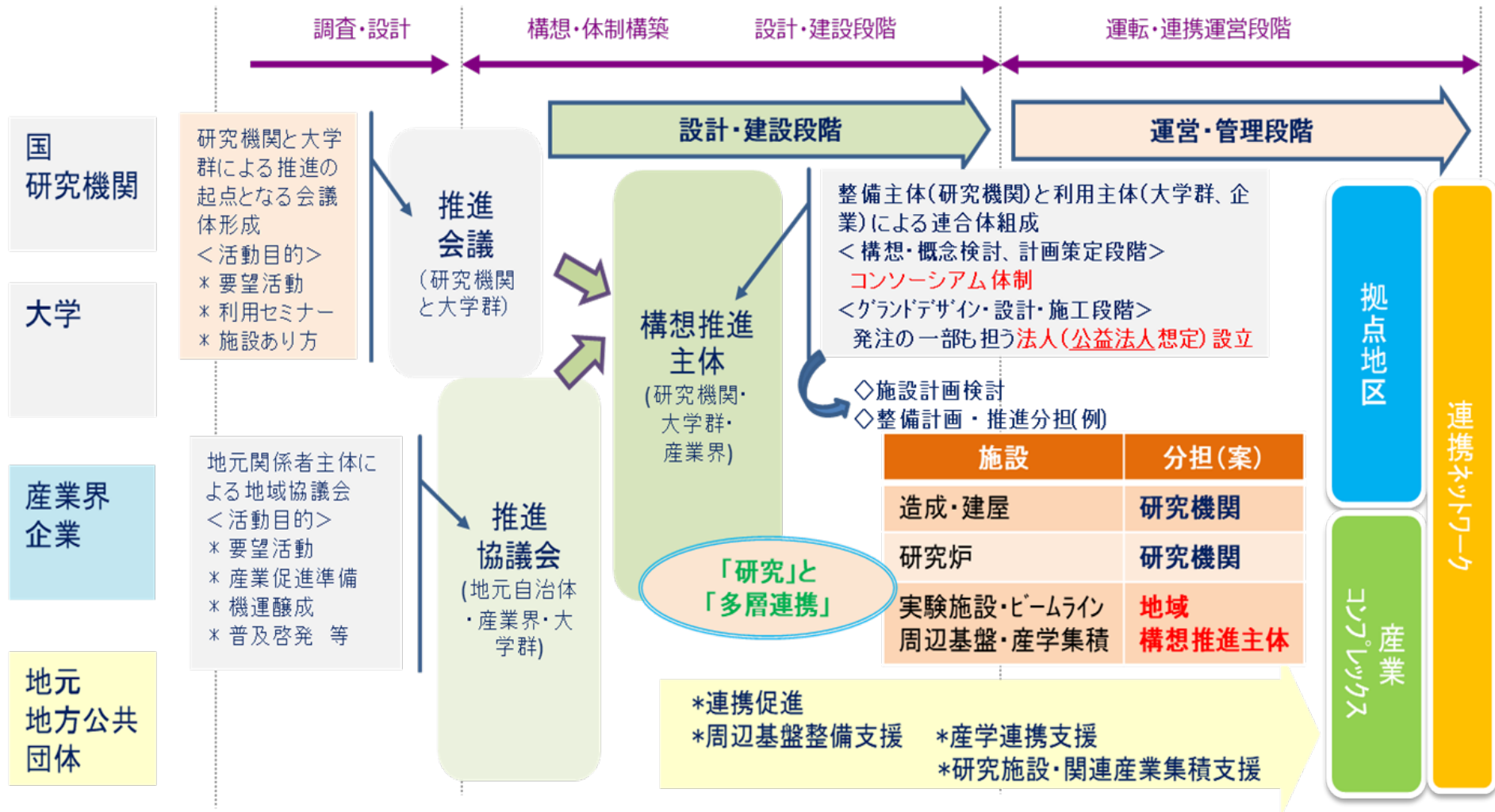


図 4-3 コンソーシアムによる今後の進め方のイメージ (ロードマップ (案))

4.3.2 初期段階におけるコンソーシアム・第1段階

<推進会議（研究機関と大学群）>

研究炉に関するニーズ・シーズの十分な把握による概念検討や、対象とする分野・領域の検討、関係者の枠組みや実施体制など、ビジョン検討といった初期段階における推進体制として、研究機関と主な大学群で構成される推進会議が想定される。

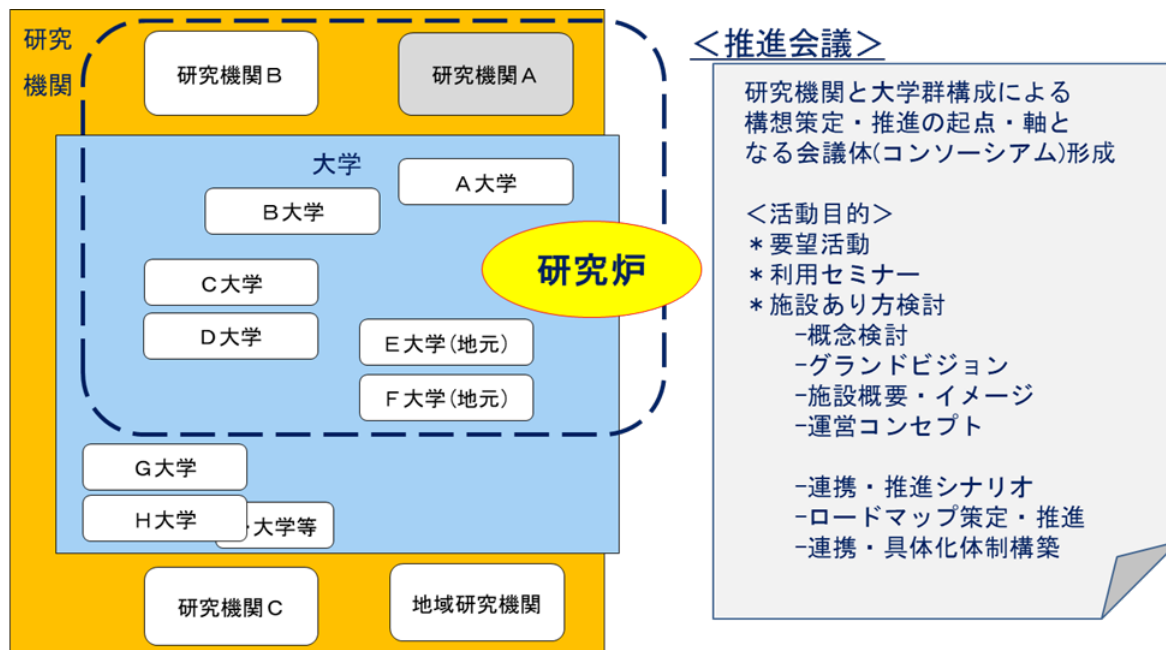


図 4-4 第1段階：推進会議（研究機関と大学群）イメージ

この体制は基本的に任意の会議体であるため設置等の手続き等に特段の配慮は必要ない。構成は、本研究炉の施設整備・所有・研究開発を担う研究機関、基礎研究のコアと位置づけられる大学や、企業・産業との共同研究や地元企業との連携により中心的な研究開発活動を担う大学等により組成されるが、本プロジェクトの起点であり軸となる先導的な立場が複数集約するため、牽引役が不可欠となる。

主な取り組み事項としては、プロジェクト関係者への要望や利用に関する理解促進・利用促進等の機運醸成とともに、ビジョン、施設概要・イメージ、立地想定、運営コンセプトなどの予備的検討等、基本的な活動である。さらに、本事業の特徴的な在り方を明確化する連携や推進シナリオ、ロードマップ策定などにより、具体化や実現に向けた活動につなげる展開も視野に入れ、取り組むこととなる。

4.3.3 初期段階におけるコンソーシアム・第2段階

<推進協議会（地元連合：地域産学官連携コンソーシアム）>

研究炉の検討の起点となる推進会議の活動の進行により、立地（候補）地域において、研究炉をコアとした地域振興や産業創出等の地域による受け入れと活動の充実を図る役割として、地域の産学官の関係主体をベースに推進協議会が形成され、当該地域の発展、充実に向けた地域構想の発展的展開を担う。

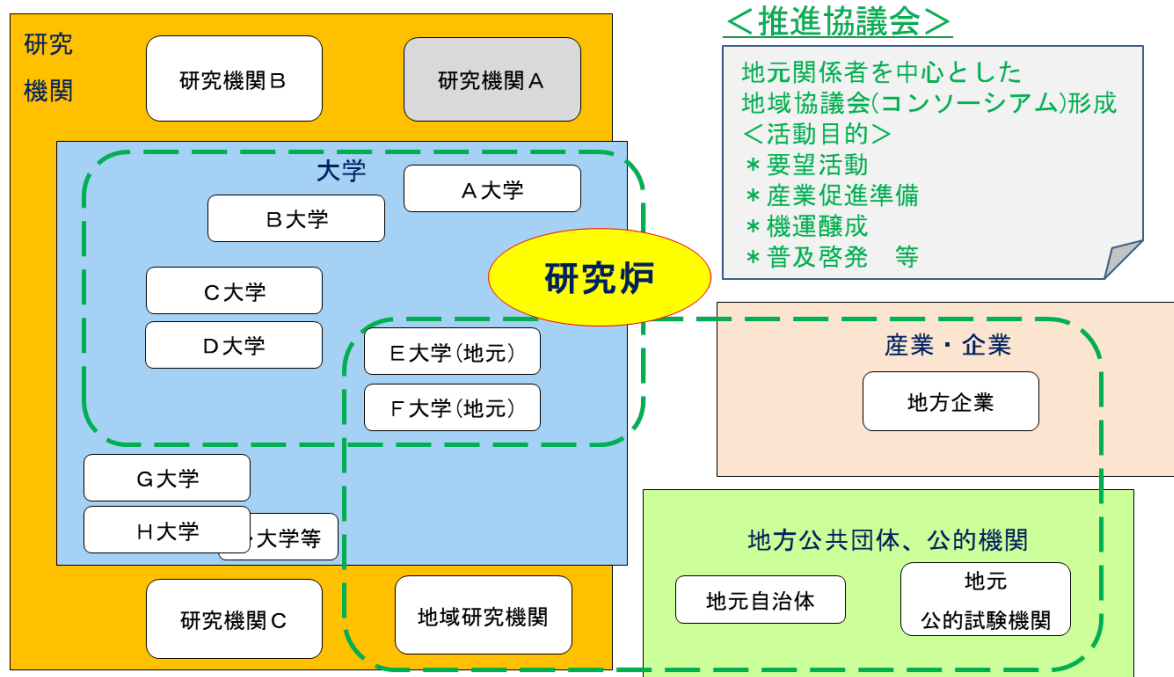


図 4-5 第2段階：推進協議会（地元連合：地元産学官連携コンソ）イメージ

推進協議会は、要望活動や産業促進の準備などを中心に、地元の産業界や行政が中心となって活動することが望ましい。協議会による立地（候補）地域の機運醸成や具体的な推進主体の意思表示等が進行することにより、事業実現の本格化の段階に移行する。

4.3.4 設計・建設段階におけるコンソーシアム・第3段階

<構想推進主体（研究機関+大学群+産業・企業）>

設計・建設段階に移行すると、整備主体である研究機関と利用主体である大学群及び企業・産業を構成とし、それまでの任意の連合体（コンソーシアム）から、具体的な事業の一部発注も担うことが可能となる法人格を有した組織の形成が必要となる。

整備・運営の一部を担う主体は、「研究」と「多層連携」の牽引役であり、構想推進主体として、例えば一般財団法人のような公益法人が相応しい（後述参照）。

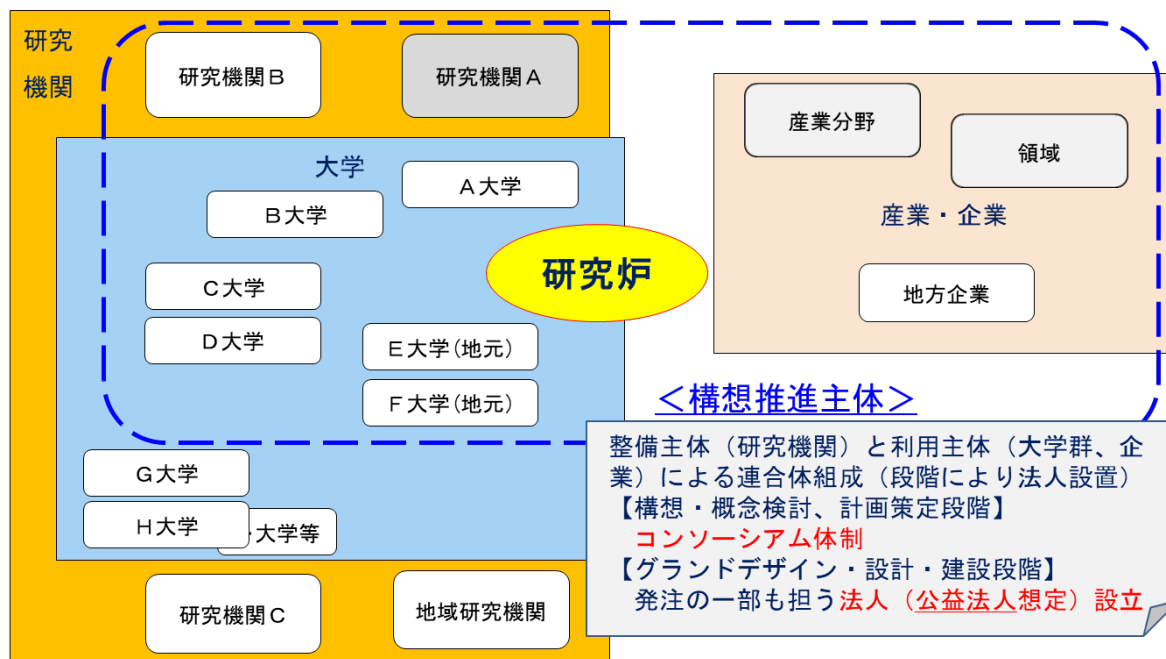


図 4-6 第3段階：構想推進主体（研究機関+大学群+産業・企業）イメージ

研究機関と構想推進主体は、グランドデザイン作成から、設計・施工段階での各種発注などを連携して実施する。施設整備等は、以下のような役割分担案を想定するが、整備後の維持管理や運営の主体・連携による展開についても十分な検討・準備と配置を早期から進め、スムーズな立ち上がりに移行を進めることが望ましい。

<整備対象と担い手>

◇造成・建屋、研究炉 → 研究機関

◇実験施設・ビームライン、周辺基盤・産業集積 → 地域、構想推進主体

参考) 一般財団法人設立に関する手続きや留意点について

本事業のグランドデザイン策定から、設計・建設段階を担う構想推進主体について、公益法人、例えば一般財団法人を想定した。下記の参考図が示す研究開発事業の在り方の整理からも、目的や位置づけとして妥当であり、さらに設立手続き等も煩雑にならない法人格として、一般社団や一般財団の分類が相応しいといえる。

これは、東北放射光事例においても、一般財団法人光科学イノベーションセンターに相当するが、設立者が 一般社団法人の東北経済連合会であり、連携する研究機関として 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構であることから、バランスのとれた体制構築がなされているといえる。

一般財団法人の法人格を活用した取り組み主体による体制の構築は、法人設立の手続きが平易なだけでなく、公共、民間の様々な関係者が共同で、新たな主体となる法人設置を行う際の各者の意志決定に応じた取扱いが可能となるなどのメリットがある。一方で、通常の民間の企業活動と同様に、法人としての経営計画や事業計画の策定、実施等のマネジメント、検証・改善といった経営管理サイクル及び合理的な実施体制を確保して取り組むことが求められる点に留意が必要である。

参考図 法人形態の類型化 (平成 29 年度調査報告書から参考抜粋)

| | 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 | 研究開発法人 /国立大学法人 |
|--|--|---|---|---|
| 根拠 目的 | 会社法・営利 営利の追求 | 会社法・営利 営利の追求 | 一般社団・一般財団に関する法律 (公益系は認定法適用) 非営利 | 個別根拠法： 非営利 →研究開発法人、理化学研究所等 国立大学法人： 非営利 →法改正により大学資産を第三者に 貸し付けが可能 |
| 研究 開発 事業 での あり方 | <ul style="list-style-type: none"> * 研究開発の実用化目線を重視 ⇒研究開発の将来価値を評価 * 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、さらに移管が期待 * 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可(参考：海外参考事例後掲) * 営利要件の付与による運営の自立性や遂行力を重視 | <ul style="list-style-type: none"> * 基本フレームは株式会社形態と同じ * コンパクトな展開に有利 * 議決権や剰余金分配は内部で決めるため、地域活動にも適用可能 * 営利目的のための運営の自立性や遂行力を重視 | <ul style="list-style-type: none"> * 非営利性や公共性が重視され、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された。 * 研究開発の位置づけや事業性、将来性、R&Dのねらい・目標設定を、新たなスキームで検討することも可能。 * 運営主体とステークホルダーの構造化と、事業・PJの構造化により、運営主体などの選択肢の幅を拡げる検討が必要。 | <ul style="list-style-type: none"> * 公的法人改革により独立行政法人化を試行錯誤により構築進行中。 ①研究位置づけ(基礎～実用化)により「ねらい・目的」の設定・判断 ②運営段階における適切な進行管理機能・能力の確保・担保 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、運営上の機能最適化および統治(ガバナンス)の在り方から、法人フレームの開発・運用を試行中。 |
| <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">法人改革・組織再編：民間の経営手法や体制構築を導入</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">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</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">資産価値活用・管理：価値認識化と活用・管理の判断・実施</div> | | | | |