

2.1.2 原子力発電

(1) 研究開発領域の定義

原子力を利用した発電に関する新しい切り口からの研究アプローチや、新しい手法・技術の導入等に係る動向を含む領域である。以下の4領域を対象とする。

- ①新型原子炉：第4世代原子炉、将来の原子力エネルギーシステムや核燃料技術など
- ②核融合炉：核融合炉工学に関する材料、機器、システム設計、国際熱核融合実験炉プロジェクトの動向など
- ③原子力安全：制度面を含めて安全上の研究開発を幅広く対象とし、検査制度、安全性向上、リスク評価/安全評価、事故時の影響低減、シビアアクシデント対応、緊急時対応、ヒューマンファクターなど。
- ④使用済燃料等の処理・廃止措置：使用済燃料・放射性廃棄物の再処理・リサイクル技術、廃止措置および安全評価など

(2) キーワード

■新型原子炉

第4世代原子炉、ナトリウム冷却高速炉、高温ガス炉、小型炉、受動的固有安全

■核融合炉

プラズマ、核融合反応、磁場閉じ込め、慣性閉じ込め、三重水素（トリチウム）、ブランケット、高エネルギー粒子、非線形多体運動、ITER、中心点火、高速点火、高エネルギー密度科学

■原子力安全

リスク評価、シビアアクシデント、アクシデントマネジメント、原子力防災、福島第一原子力発電所事故、総合的な安全性向上届出制度、検査制度、外的事象、深層防護

■再処理

核燃料サイクル、再処理、使用済燃料、MOX燃料再処理、分離変換技術、放射性廃棄物、廃止措置

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

世界的なカーボンニュートラルの推進が各国のエネルギー政策の要となる中、化石燃料の価格上昇や地政学的な不安定に伴うエネルギーセキュリティ問題の顕在化を反映して、原子力発電への取組は様々に変化している¹⁾。

日本は2050年にカーボンニュートラルの達成を目指すことを宣言し、2021年の第6次エネルギー基本計画において、原子力については、国民からの信頼確保に努め、安全性の確保を大前提に、必要な規模を持続的に活用していくこと、核融合を長期的視野にたって着実に推進することが記載されている。2022年のGX実行会議²⁾では2030年度電源構成に占める原子力比率20～22%の確実な達成に向けて、安全最優先で再稼働を進めること、安全性の確保を大前提に、新たな安全メカニズムを組み込んだ次世代革新炉の開発・建設に取り組むことなどが示されている。

2021年末において世界で運転中の原子力発電所は431基あり62基が建設中である。2021年中に営業運転を開始したものは7基、新規着工が10基ある³⁾。特に中国では3基が営業運転を開始し、6基が着工されており、突出している。核融合炉については官民のファンドが集まり開発が進められている。

■新型原子炉

日本や世界のエネルギー供給安定性、地球温暖化防止、環境負荷低減等を図るために、放射性廃棄物の

減容化・潜在的有害度低減に貢献できる高速炉、水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ固有安全性も有する高温ガス炉などの第4世代原子炉、ならびに将来の原子力エネルギーシステムに関わる研究の進展及び技術の確立を図ることの意義はきわめて大きい。

■核融合炉

核融合炉は、核分裂炉と比べて中性子増倍反応に伴う再臨界の可能性がなく、核融合炉内を外部から超高温に加熱しない限り核融合反応が起こらない固有のシステム安全性を有する。核融合炉内の主な可動性の放射性物質は、燃料の1つとしてブランケット部で中性子とリチウム原子核との核反応で生産する三重水素であるが、そのハザードポテンシャルは、1-131換算値で軽水炉より3桁小さいという特徴を有する。長期的第一次エネルギー資源のより先進的な獲得手段として、核融合開発は意義がある。

■原子力安全

原子力安全の目的は、国際的に「人と環境を、原子力の施設と活動に起因する放射線の有害な影響から防護することである」とされている。原子力安全の研究は、この目的を達成するため、原子力施設のライフサイクル（計画・設計・建設・運転・廃止）にわたり、政府・研究機関・規制機関・原子力事業者・地方自治体を含む公共団体・学術組織などにより実施される。

福島第一原子力発電所事故で顕在化したように、原子力施設でひとたび重大な事故が発生すると、その影響は空間的・時間的に非常に広い範囲に及び、甚大なものとなりえる。そのため、原子力施設の安全性を確保することは、社会的に重要なミッションである。科学技術分野を含め、一般的にゼロリスクは現実的に達成不可能であるが、社会通念上、許容されるレベルまで原子力施設のリスクを抑制する取り組みを行う必要がある。

■再処理

原子炉から取り出される使用済燃料には、再び燃料として使用できるプルトニウム、ウランが含まれており、これらを再処理により分離・回収し、燃料に再加工して原子炉にリサイクルすること、即ち輪の閉じた核燃料サイクルを成立させることが、資源の乏しい日本における基本方針となっている¹⁾。本分野は、このための研究開発領域である。将来的には高速炉燃料サイクルによるウラン資源の高度な有効利用が望まれるが、当面は、軽水炉へのプルトニウムリサイクル（プルサーマル）が進められる。また、プルトニウム、ウラン以外のアクチノイド元素（マイナーアクチノイド）や長寿命あるいは発熱性の核分裂生成物の分離と新型炉などによる核変換を組み合わせた分離変換技術は、地層処分の負担を軽減する可能性があり、実現に向けた努力がなされている。

[研究開発の動向]

■新型原子炉

第4世代炉は、高い安全性・信頼性の実現などを開発目標とした革新的原子炉であり、2002年にナトリウム冷却高速炉、ガス冷却高速炉、鉛冷却高速炉、超高温ガス冷却炉、超臨界圧水冷却炉、熔融塩炉の6炉型が選定された⁴⁾。低コスト化を狙った小型モジュール炉（Small Modular Reactor：SMR）は軽水炉を中心に開発が進められているが、最近では、第4世代炉もSMRを志向し始めている。

ナトリウム冷却高速炉の開発の歴史は長く商業的にも電力供給運転をしており、400炉年（原子炉数×稼働年）の軽水炉に次ぐ運転経験を有している原子炉である。高速炉は高速中性子を燃えないウラン238に吸収させ燃えるプルトニウム239に変えることによって燃料を増殖させることが可能である⁵⁾。また、放射性毒性が強く寿命の長いマイナーアクチノイド（Minor Actinoid）の核変換ができ、高レベル放射性廃棄物を減量させることができる特徴を有しており⁶⁾、その重要性はエネルギー基本計画でも記述されている。この炉は、

ナトリウムの優れた特徴により、原子炉を低圧にできることや、高沸点のため単相ナトリウムで炉心冷却ができ、電気駆動が不要な自然循環による崩壊熱除去が可能であるという利点がある。一方、ナトリウムは水や空気と接触すると急激に反応する特性などの留意点もある。最近では、シビアアクシデントに対する防止対策と影響緩和対策に関する研究が盛んである。

高温ガス炉の開発の歴史は古く英国、米国、ドイツで先行したが、トラブルにより欧米では開発が衰退状態に陥っていた。日本では高温工学試験研究炉 (High Temperature engineering Test Reactor : HTTR) が建設され2004年に950°Cで定格運転を達成した。高温ガス炉は熱電併給の役割を担う場合が多く、製鉄などの産業熱源に加え、水素製造や石炭液化などの利用が期待される。HTTRは黒鉛減速ヘリウム冷却熱中性子炉であり、セラミックスで被覆した粒子状燃料を用いることが特徴的で、1600°Cの高温状態においても被覆材の閉じ込め機能は損なわれないことが実験的に示されている。ヘリウムガスは100気圧以下に加圧するが、ヘリウムの漏洩事故が生じて黒鉛減速材の熱容量が大きい燃料温度は急激に上昇しない固有の安全特性を備えている⁷⁾。

経済産業省は、原子力イノベーション創出のため、2019年から安全性向上及び多様な革新的原子炉開発に関する民間事業の資金補助を開始した (NEXIP事業)。国内民間事業者により、ナトリウム冷却高速炉、高温ガス炉のほか、軽水冷却SMR、超小型炉、熔融塩炉の技術開発が進められている。

■核融合炉

核融合反応を連続的に起こすために、原子核を加熱し、高密度に閉じ込めることが必要であり、その方式として、磁場閉じ込め方式 (トカマク型やヘリカル型など) と慣性閉じ込め方式 (レーザー核融合など) がある。

• 磁場閉じ込め方式核融合

原子力委員会が1992年に策定した第三段階基本計画では、臨界プラズマ条件が達成された状況で、「自己点火条件の達成及び長時間燃焼の実現並びに原型炉の開発に必要な炉工学技術の基礎の形成を主要な目標として実施する。これを達成するための研究開発の中核を担う装置としてトカマク型の実験炉を開発する。これらの研究開発により第四段階以降の研究開発に十分な見通しを得る事を目標とする」と定められた⁸⁾。現在の日本の核融合炉技術開発は、核融合エネルギーの「科学的・技術的実現性」を示す事を目的にしたこの第三段階にある。続く第四段階では、「技術的実証・経済的実現性」を目的にした原型炉計画を中核とする具体的な方針が示されている。

2005年「今後の核融合研究開発の推進方策」(推進方策報告書) を原子力委員会核融合専門部会が策定し、核融合原型炉の開発に必要な戦略、などについて議論され、2013年には原型炉開発のために必要な技術基盤構築の中核的役割を担うチームが発足した。2017年には、これまでの検討を参考にし、現在の研究開発状況とITER計画を始めとした国内外の取り巻く状況を踏まえ、核融合科学技術委員会で「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」が決定され、それに付随して、「原型炉開発に向けたアクションプラン」⁹⁾ と「チェック・アンド・レビュー項目」にまとめられ、公開されている。また、2018年に核融合科学技術委員会は、このアクションプランに示された開発課題のうち、限られたリソースの中で、とりわけ早期に優先的に実施すべき課題の抽出が必要として、特に、①開発の重要度と緊急性、②国際協力の2つの観点に基づいて、「原型炉研究開発ロードマップについて (一次まとめ)」として整理されている。核融合科学技術委員会は、上記の文書等において段階的に研究開発の進捗状況を分析することとしており、2022年には、「核融合原型炉研究開発に関する第一回中間チェック・アンド・レビュー報告書」がまとめられている。

一方、日本独自のアイデアに基づくヘリカル方式による高温プラズマの閉じ込め研究、ミラー方式をはじめとする直線型装置を用いたダイバータプラズマ研究が、核融合科学研究所 (NIFS) と大学で進められている。NIFSでは、1998年より世界最大級の大型ヘリカル装置 (LHD, Large Helical Device) を用いて閉じ込め研究を推進しており、現在10年計画で進行中の「大規模学術フロンティア促進事業」は、重水素実験における当初目標を達成し、2022年度に終了する。これを受けてNIFSは、NIFS・大学における今後の核融

合研究と所内の研究体制について検討を進めており、コミュニティとの議論も経て、2023年度より新たな体制で、核融合科学に関する学術研究を展開する予定とされている。

• 慣性閉じ込め方式核融合

レーザー核融合に関して、国内では、大阪大学が燃料容器に重水素と三重水素混合ガスを充填しレーザー照射をおこない、1983年に核融合点火に必要な温度を達成した。1986年には固体密度の600倍の圧縮にも成功している。これらの結果と米国でのその後の検証結果を基に、2009年にレーザー核融合国立点火施設 (National Ignition Facility : NIF) が米国リバモア研究所に建設された。このレーザーは1.8 MJのエネルギーを192本のレーザービームでターゲットに照射するもので、間接照射の中心点火方式で点火燃焼を目指すものである。2021年に人類史上初めて実験室での自律的核融合燃焼によるエネルギー増幅を実証し、2022年には核融合点火を達成した。熱核融合反応により、2.05 MJの投入レーザーエネルギーに対して3.15 MJ核融合エネルギー出力エネルギー出力を得たとしている¹⁰⁾。同規模のレーザー核融合研究施設がフランス (Laser Mega Joule : LMJ) と中国 (神光 III) でも建設中であり、一部稼働を開始している。また米国ロチェスター大学では、NIFの1/70のエネルギーのレーザーで直接照射の中心点火方式が研究され、爆縮されたコアの性能としてはNIFの結果に匹敵する結果が得られるとともに、機械学習を活用し、さらに3倍の性能向上を予測している。日本では大阪大学において、高速点火方式により米国ロチェスター大学の1/10のエネルギーで同等の爆縮プラズマ生成に成功している¹¹⁾。

■原子力安全

原子力の安全性確保の考え方は、主要な原子力事故を節目に研究や取り組みのあり方が変化してきたといえる。以下では、主要な原子力関連の事故と、原子力安全に関する研究について概要を述べる¹²⁾。

• スリーマイルアイランド原子力発電所2号機事故

1979年に発生した事故であり、人的ミスを含む多重故障に起因する原子炉水位の低下から炉心の大部分が溶融に至ったものである。この事故は、電源系統や格納容器をはじめ発電所の設備は基本的に健全であり、放射性物質の放出は限定的であったが、マンマシンインターフェース、ヒューマンエラーの防止、シビアアクシデント対策の重要性を認識するきっかけになった。また、確率論的リスク評価の有用性が再認識され、安全性向上に利用する動きが広まった。

• チョルノービリ (チェルノブイリ) 原子力発電所4号機事故

1986年に発生した事故であり、原子炉の出力暴走に伴い、原子炉および建屋が爆発的に破壊されたものであり、付随して発生した火災と相まって大量の放射性物質が放出され周辺の土地を大規模に汚染し、世界中で放射性物質が観測された。この事故では、安全文化、固有の安全性及び格納容器の重要性が注目された。シビアアクシデント時に格納容器内の圧力を下げるために使用されるフィルタードベントは、本事故の後に欧州などで導入が進められた。

• 福島第一原子力発電所事故

2011年に東京電力福島第一原子力発電所1-3号機で津波に起因して発生したシビアアクシデントである。この事故を受けて、原子力基本法、原子炉等規制法などが改正され、原子力規制委員会が新たに発足するとともに、動力炉、核燃料サイクル施設、研究炉などに対して規制基準が大幅に見直され、多くの施設に対しシビアアクシデント対策が義務付けられた。この事故では、特に外的事象に対する原子力施設の安全性や深層防護の重要性が焦点となっている。事故発生から10年以上が経過し、見直された規制基準の下で原子力規制委員会による規制基準への適合性審査が実施され、加圧水型軽水炉については10基が再稼働に至っている。一方、沸騰水型軽水炉は、適合性審査を終了したプラントはあるが、再稼働したプラントはまだない。福島第一原子力発電所事故を受け、特にシビアアクシデント時の種々の物理現象やアクシデントマネジメント策、確率論的リスク評価手法 (外的事象も含む)、安全性を大幅に向上した次世代型原子炉に関する研究などの取り組みが増えている。

■再処理

軽水炉の使用済ウラン酸化物燃料の再処理については、基本的に確立された技術であり、日本原燃の六ヶ所再処理工場が竣工間近の状態にある。六ヶ所再処理工場では、東日本大震災前に顕在化した高レベル放射性廃液のガラス固化工程の運転不安定性の問題に対する解決策を見出し¹³⁾、震災後の新規規制基準への対応を進めているところである。2022年度上期が竣工時期となっていたが計画が変更され現在はしゅん工時期未定となっている¹⁴⁾。再処理で回収したプルトニウムを混合酸化物（MOX）に加工するための工場が、同じく六ヶ所に建設中であり、このMOX燃料工場の竣工時期は2024年度上期とされている¹⁵⁾。

高速炉燃料の再処理技術開発として、高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCTプロジェクト）において、晶析法や新規装置を適用した先進湿式法再処理技術の開発¹⁶⁾が進められていたが、震災後に中断された形になっている。また、六ヶ所再処理工場でも適用されているPUREX法をベースとし、プルトニウムを単離しない（常にウランを共存させる）コプロセッシング法¹⁷⁾や新しい抽出剤としてモノアミドを用いる再処理¹⁸⁾の研究開発も続けられており、既に実廃液を用いた実証試験を実施している。一方、金属燃料を用いた高速炉の燃料再処理のため熔融塩を用いる高温冶金法などの乾式再処理に関する検討も進められており、革新炉の検討とともに重要性を増している。

ウラン、プルトニウムを分離した後の高レベル放射性廃液はガラス固化され、中間貯蔵の後、地層処分されることとなっているが、第5次エネルギー基本計画において「将来の幅広い選択肢を確保するため、放射性廃棄物の減容化・有害度低減などの技術開発」として、マイナーアクチノイド（ネプツニウム、アメリシウム、キュリウム）などの長寿命放射性核種の分離変換技術の研究開発も進められている。分離技術は既に高レベル放射性廃液の実液を用いて実証され、高速炉や加速器駆動システムを用いる核変換技術とともに、工学規模試験の一手前にいる。原子力機構の東海再処理施設は、使用済燃料約1,140トン再処理した日本で初の本格的な再処理施設であるが、廃止措置されることとなり、2018年6月に廃止措置計画が認可されている。廃止措置の完了までには約70年を要する見通しで、長期的対応が必要である。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

■新型原子炉

• ナトリウム冷却高速炉

日本では、炉心溶融防止のための受動的炉停止機構と損傷炉心の再臨界防止と事象を原子炉容器内で終息させるための方策、ナトリウムの化学反応抑制対策としてナノ粒子分散型ナトリウム、過大地震に対する3次元免震システムといった安全性向上技術を開発している¹⁹⁾。高速実験炉「常陽」は新規規制基準適合性審査を実施中である。

フランスでは、内部ブランケットと上部プレナム（原子炉の炉心周り冷却材が充満している空間）を設けたゼロボイド炉心が設計され、炉停止失敗時のナトリウム沸騰開始後の炉心溶融を回避する技術を開発されていた。しかし、フランス政府は2019年にナトリウム冷却炉については研究開発に専念することとなり、2020年から日本と燃料・材料、熱流動、安全評価などの協力が開始された。米国では、テラパワー社が2020年から熔融塩蓄熱システムを組み合わせたナトリウム冷却高速炉Natrium炉の開発を進め、2022年1月に燃料交換機や破損燃料検出系等のナトリウム冷却炉特有技術について日本と協力することとなった。

• 高温ガス炉

日本はポーランドで展開する高温ガス炉技術に協力を行うため、2019年に、「高温ガス炉技術分野における研究開発協力のための実施取決め」を締結し、炉設計、燃料・材料、安全評価などの協力を進めている。HTTRは新規規制基準適合性に関わる原子炉設置変更許可を2020年に取得し、2021年7月に再稼働した。2022年4月にHTTRによる水素製造実証事業を開始した。

• NEXIP事業 (原子カイノベーション)

事故時耐性燃料、シビアアクシデント時の水素処理システム、3次元積層造形技術、ビッグデータを活用した故障予兆監視システム、浮体免震技術、変動性再生可能エネルギーと共生するための技術といった様々な新技術が開発されている。また、ナトリウム冷却高速炉では粒子状金属燃料や固有安全向上技術、高温ガス炉では水素製造や蓄熱システムといった新技術の開発が行われている²⁰⁾。

■核融合炉

• 磁場閉じ込め方式核融合

文部科学省核融合科学技術委員会の磁場閉じ込め方式核融合のアクションプランに広い範囲でチェックアンドレビュー (C&R) の項目が挙げられている。この目的は、原型炉段階への移行に向けての技術の成熟度を確保することであり、第1回の中間C&R (CR1) が実施されて2022年1月に報告書がまとめられている。CR1段階における達成目標として、原型炉全体目標の策定や原型炉概念設計の基本設計、ITER技術目標達成計画の作成、ITER支援研究と定常高ベータ化準備研究の遂行とJT-60SA (ITER計画と並行して日本と欧州が共同で実施するプロジェクト) による研究の開始、ITER超伝導コイルなど主要機器の製作技術の確立、JT-60SAの建設による統合化技術基盤の確立、低放射化フェライト鋼の80dpaレベルまでの原子炉照射データによる核融合類似の中性子照射下環境における試験に供する材料の確定、核融合中性子源概念設計の完了、コールド試験施設によるブランケット設計に必要なデータの取得、ダイバーター開発指針の作成、超伝導コイル要素技術等原型炉に向けて早期着手を必要とする炉工学開発計画の作成などと整理されている。報告書では、核融合科学技術委員会の傘下にある原型炉開発総合戦略タスクフォースによる進捗状況調査結果を確認し、最大の目標である原型炉概念設計の基本設計が完了していることなどを踏まえ、委員会として「CR1までの目標は達成されている」と判断した、と結論されている。

一方で、第2回中間C&R (CR2: 2025年頃から数年程度を想定) に向けた課題も列挙されている。主な課題は、1) 将来の原型炉開発に生かすため、ITERイーター向けに日本が調達責任を負う機器の開発加速が急務、2) 原型炉、すなわち核融合発電を実現するために不可欠な基幹技術の確保に速やかに取り組むべき、3) 核融合発電の実現時期の前倒しが可能か検討を深めること。前倒しを行う場合、CR2時点での達成目標や、原型炉研究開発の優先順位を再検討すること (CR1の実施後、内外の情勢を見極めながら1年程度をかけて慎重に検討)、4) 核融合に必要な技術開発から学術研究まで幅広く取り組み、核融合に必要な広範な人材を育成・確保するとともに、丁寧に社会の理解を得ながら、着実に歩を進めていくこと、5) 核融合の重要性に対する関心喚起による産業界の連携を促進し、産学官のステークホルダーが結集して取り組むことが重要、6) 立地や安全について議論を深めていくこと、と整理されている。

「ヘリオトロン」と呼ばれる磁場配位を採用した、ヘリカル型環状プラズマ閉じ込め装置LHDを用いた高温プラズマ実験が、NIFSで行われている。これまでに、ヘリカル型の特徴を生かした約50分間の連続運転に成功するなど多くの成果を挙げてきた。2017年には重水素実験が開始され、水素同位体間の閉じ込め性能比較が可能となったことで、重水素プラズマの方が軽水素プラズマより高い閉じ込め性能が得られる「同位体効果」が、トカマク装置と同様にヘリカル装置でも出現することが初めて実証された。また重水素プラズマで、核融合条件の1つである、イオン温度1億2,000万度を達成した。近年は、高い時間・空間分解能を有する種々の高性能計測器を駆使して、プラズマ中の乱流が閉じ込め性能に与える影響を解明する研究に注力しており、多くの成果が得られている。

• 慣性閉じ込め方式核融合

レーザー核融合に関して、2021年、米国で人類史上初めて実験室において自律的核融合燃焼によるエネルギー増幅を実証し世界に大きなインパクトを与えた。さらに米国では、Focused Energy社が核融合エネルギー実現に向けたスタートアップとして活動を開始している。一方、フランス (LMJ) やイギリスを中心とした欧州では、流体力学的不安定性の影響が少ない手法として衝撃波点火方式の研究が進められている。ま

たドイツのベンチャー企業である Marvel Fusion 社やオーストラリアのベンチャー企業である HB11Energy 社らが民間から多額の融資を受け、高速点火方式で中性子を発生しない陽子-ボロン核融合の実現を目指した事業を開始している。中国では2020年1月より新たに高速点火方式の大型プロジェクトが、中国科学院上海光学精密機械研究所 (SIOM)、同中国物理学研究所 (IOP) ならびに上海交通大学の3機関の連携で立ち上がった。これにより、SIOMのレーザー装置の大幅なアップグレードが行われようとしている。国内では、大阪大学を中心に、高速点火方式の加熱物理を解明し、米国ロチェスター大学の中心点火方式の1/10のエネルギーで同等の核融合プラズマを生成することに成功している。さらに高速点火方式で初めて可能な流体力学的不安定性のない中実燃料球を使った新しい爆縮方式の有効性が実験ならびにシミュレーションで示された。加えて、レーザー核融合エネルギー実現へ向けたベンチャー企業である EX Fusion 社が日本でも設立されるなど新たな動きが出てきている。

■原子力安全

• 原子力発電所・研究炉の再稼働と廃止措置²¹⁾

福島第一原子力発電所事故後、現行規制基準に適合した加圧水型原子力発電所（九州電力川内1, 2号機、玄海3, 4号機、四国電力伊方3号機、関西電力高浜3, 4号機、大飯3, 4号機、美浜3号機）が再稼働した。沸騰水型軽水炉については、東京電力柏崎刈羽6, 7号機、日本原子力発電東海第二発電所、東北電力女川原子力発電所2号機、中国電力島根2号機が原子力規制委員会から規制基準（設置変更）適合性の確認を受けた。核燃料サイクル施設としては、日本原燃の六ヶ所再処理施設が規制基準（設置変更）適合性の確認を受けた。また、近畿大学や京都大学の研究用原子炉も規制基準に適合し、運転を再開している。日本原子力研究開発機構（JAEA）の高温工学試験研究炉（高温ガス炉、HTTR）は2021年7月に運転を再開した。今後、多目的の熱利用の研究が進捗することが期待される。一方、再稼働せず、廃止措置を選択する原子力発電所、研究炉の数も増えている。

• 新検査制度の試行及び本格運用²²⁾

原子力事業者が自らの責任で施設の検査を行い、規制組織がその検査内容を監視・評価する新しい検査制度について検討が進み、2018年下半年よりテスト的な導入が開始され、2020年4月より本格運用が始まっている。新検査制度は、米国の原子炉監督プロセス（reactor oversight process, ROP）を参考としつつも、日本ではより幅広く核燃料サイクル施設や研究炉を対象としていることが一つの特徴とされている。本制度の特徴である「リスクインフォームド・パフォーマンスベースト」の考え方にに基づき、安全上重要度の高い検査項目により多くのリソースを割り当てる取り組みがなされている。また、原子力事業者が自らの気づきなどをもとに施設の安全性向上に取り組む corrective action program (CAP) が効果を上げつつある。CAPにおいては、トラブルに至る前のマイナーな事象も含め、condition report (CR) として情報を集積し、CRを分析することで安全上必要な対応を実施する体制を整えている。これが、トラブル見落としの減少、マイプラント意識の向上など、事業者が自主的に安全性を向上するための強い動機付けになっているとされている。

• セーフティーとセキュリティのインターフェース^{23), 24)}

2021年3月に原子力規制委員会は、「東京電力ホールディングス柏崎刈羽原子力発電所における核物質防護設備の機能の一部喪失事案」について、安全重要度「赤」の検査指摘事項という判定を行った。安全重要度「赤」は、「核物質防護機能又は性能への影響が大きい水準」である。この事案の背景には、原子力安全（セーフティー）と核物質防護（セキュリティ）にまたがる検討が不十分であったことなどが指摘されている。セーフティーとセキュリティは、放射線・放射性物質による負の影響から人と環境を護るという目的は同じである。例えば外部からの脅威に対しては建屋の頑健性を向上させることで、同時に自然災害に対する耐性を上げることが出来るなど、相補性を有するが、一方でセキュリティ向上のために出入り管理を厳しくすると、事故時の迅速な対応の障害になるなどの相反する点もある。これらの相補性と相反性を関係者で十分に共有することが必要となる。

• 革新炉・次期炉等に関する議論^{25), 26)}

福島第一原子力発電所事故の教訓などを取り入れ、安全性を向上させた革新炉や次期炉に関する検討がなされている。これらの議論においては、社会から求められる要件から出発し、それを実現するための技術的要件やプラントの設計のありかた、あるいは2050年カーボンニュートラル実現に向けて、選択肢の一つである原子力発電の新たな社会的価値を再定義し、日本の炉型開発に関わる道筋を示すための検討がなされている。

■再処理

日本原燃は、六ヶ所再処理工場の竣工時期を2022年度上期から竣工時期を未定に変更した。プルトニウムを軽水炉で使用するプルサーマルから発生する使用済MOX燃料の再処理の技術的課題に関して研究されている。また、MOX使用済燃料から回収されたプルトニウムを再度利用するマルチリサイクルについても、その有効性について検討が進められている。軽水炉におけるプルトニウムマルチリサイクルは、プルトニウムの高次化によって再利用の回数に限界があることが明らかであることから、高速炉の導入までのつなぎの技術と考えられている。MOX燃料の再処理で発生する高レベル廃棄物は、ウラン燃料再処理の場合と比べてマイナーアクチノイドの発生量が多いため発熱量が大きく、ガラス固化体の本数増加、処分場面積の増大を招く。これを解決するためには、マイナーアクチノイドの分離変換技術の早期の実用化が求められ、マイナーアクチノイドを分離して高速炉等による核変換が可能となるまで一時貯蔵する案も考えられている。また、高速炉をはじめとする革新炉の使用済燃料の再処理についても検討が求められている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■新型原子炉

• 国内の高速炉

文部科学省「原子力分野における革新的な技術開発によるカーボンニュートラルへの貢献」としての「高速炉研究開発」(令和4年度予算68億円)では、高速炉安全性強化や高レベル放射性廃棄物の減容・有害度低減に資する研究開発等を推進するとともに、高速炉技術開発の基盤となる高速実験炉「常陽」の運転再開に向けた準備が進められている²⁷⁾。

経済産業省「高速炉に係る共通基盤のための技術開発委託事業」(令和2～6年度事業、令和4年度予算43.5億円)では、規格基準用試験を含む高速炉等の共通課題に向けた基盤整備、試験装置整備を含む安全性向上に関わる要素技術開発、枢要技術の確立、試験研究施設の整備、および将来の核燃料サイクルの検討に資する使用済MOX燃料に関する開発を進めるとされている。多目的高速試験炉等のナトリウム冷却高速炉に関する日米間協力や日仏間高速炉協力も活用し、基盤整備の効率化を目指している。

• 国内の高温ガス炉

文部科学省「原子力分野における革新的な技術開発によるカーボンニュートラルへの貢献」としての「高温ガス炉に係る研究開発の推進」(令和4年度予算16億円)では、HTTRによる安全性の実証と高熱を用いたカーボンフリー水素製造に必要な技術開発に取り組まれている。

経済産業省「超高温を利用した水素大量製造技術実証事業」(令和4～12年度事業、令和4年度予算7億円)では、2030年までに、800℃以上の高温を利用したカーボンフリーな水素製造法(IS法やメタン熱分解法、高温水蒸気電解等)の実現可能性調査を実施しつつ、800℃以上の脱炭素高温熱源とまずは商用化済みのメタン水蒸気改質法による水素製造技術を用いて高い安全性を実現する接続技術・評価手法の確立を目指している。その際、水素製造量評価技術を開発するため、高温熱源として世界最高温度950℃を実現した高温ガス炉試験炉HTTRを活用して水素製造試験を実施。加えて、将来的な実証規模のカーボンフリーな水素製造施設との接続を見据え、接続に関する機器の大型化の実現性及び成立性を確認するため、機器の概念設計を行うこととされている。

• NEXIP イニシアチブ (原子力イノベーション)

経済産業省資源エネルギー庁、文部科学省などの政策として、NEXIP (Nuclear Energy × Innovation Promotion) イニシアチブが開始され、さらなる安全性向上を追求した様々なタイプの革新炉の研究開発が進められている。「社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」(令和元～9年度事業、令和4年度予算12.0億円)では、軽水型SMR、高速炉、高温ガス炉の開発に係る民間事業を支援するとともに、民間企業等がイノベーションを進めるのに必要となる共通基盤技術(熱貯蔵・熱利用を含む革新的システムの安全性評価技術、革新的原子力技術の戦略・安全基準案の作成、等)の開発を行っている。

• 原子力システム研究開発事業

文部科学省「原子力システム研究開発事業」では、イノベーション創出につながる新たな知見獲得や課題解決を目指し、基盤チーム型(4年以内、1億円以下/年)、ボトルネック課題解決型(3年以内、3千万円以下/年)、新発想型(2年以内、2千万円以下/年)を令和2年度から開始している。同事業の「令和4年度進行課題」の総数32件のうち半数程度が新型炉関連研究となっている。

• ロシアの高速炉開発計画

Proryv (ブレイクスルー) プロジェクトを2011年に立ち上げ、ナトリウム冷却高速炉については、実証炉BN800(スヴェルドロフスク州ザレーチヌイのベロヤルスク原子力発電所に設置)が2016年10月から商業運転に入った。実用炉BN1200が設計中で2025年に建設着工、2035年までに建設完了する見込みであり、世界で最も実用段階に近い。同プロジェクトは高速炉とクローズ燃料サイクル施設を開発することを目標としており、混合窒化物燃料、燃料製造・再処理・廃棄物処理、鉛冷却高速炉BREST-OD-300、ナトリウム冷却高速炉BN1200を開発する計画である。

• 中国の高速炉開発計画

ナトリウム冷却高速炉については、中国高速実験炉CEFR(2万kWe、北京郊外のCIAEに設置)が2014年12月に100%出力運転を達成した。霞浦高速炉パイロットプロジェクトとして、実証炉CFR600(福建省霞浦県に設置)が2017年12月に建設開始され2023年に完成予定である。

• ロシアの多目的試験炉(MBIR)開発計画

冷却材として液体ナトリウムを、燃料にはウラン・プルトニウム混合酸化物(MOX)燃料か窒化物燃料を使用するが、鉛や鉛ビスマスといった異なる冷却材環境での照射試験が可能である多目的高速中性子研究炉MBIR(熱出力150MW、ウリヤノフスク州ディミトロフグラードに設置)は2015年に建設開始、2027年に建設終了、2028年研究利用開始の見込みである。MBIRの国際的な利用を促進するため協議を行っている。

• 米国の多目的試験炉(VTR)開発計画

様々な燃料や冷却材を試験するための多目的試験原子炉VTR(熱出力300 MW)プロジェクトを2018年に立ち上げ、GE日立のPRISM炉をベースとした概念検討が終わり、2021年度から詳細設計を行っている。INLサイトを特定し、環境影響声明書の最終版を2022年5月に発表した。2023年から最終設計と建設着工、2026年末までに運転開始の計画である。

• 米国の先進型原子炉実証プロジェクト(ARDP)

2019年1月に「原子力技術革新・規制最新化法(NEIMA)案」が成立し、新型炉の審査プロセスを2年以内に策定することを原子力規制委員会(Nuclear Regulatory Commission: NRC)に指示するとともに、熔融塩炉や液体金属冷却炉、高温ガス炉といった新型原子炉設計の開発者が利用可能になるよう、技術的側面を包括した許認可の枠組を2027年までに完成することを求めた。エネルギー省は2020年5月には「先進型原子炉実証プロジェクト(Advanced Reactor Demonstration Program: ARDP)」を開始し、①5～7年以内に実証可能な先進型原子炉、②10～14年後に実用化される技術として将来の実証リスク低減を目的とした技術・運転・規制課題解決、③2030年代半ばに実用化が期待される革新的先進型原子炉コンセプト、の3つのカテゴリーで選ばれたプロジェクトに対して資金援助を実施している。①では、2020年10月に、TerraPower社Natrium(ナトリウム冷却高速炉)とX-energy社Xe-100(高温ガス炉)を選定し、

それぞれ2020年度予算から8千万ドル（約84億円）ずつ支援されることになった。②では、2020年12月に、Kairos Power社 Hernes（溶融塩炉）、Westinghouse社 eVinci（ヒートパイプ型マイクロ炉）、BWXT社 BANR（TRISO燃料マイクロ炉）、Holtech社 SMR-160（小型軽水炉）、Southern Company Services社 MCRE（溶融塩炉）を選定し、2020年度予算から5社総額で3千万ドル（約31億円）が支援されることになった。③では、2020年12月に、ARC社 ARC-100（ナトリウム冷却高速炉）、General Atomics社 FMR（ヘリウム冷却高速炉）、MITのMIGHR（高温ガス炉）を選定し、2020年度予算から3社総額で2千万ドル（約21億円）が支援されることになった。

・カナダのSMR開発計画

政府が2018年11月にSMR開発のロードマップ、2020年12月にSMR開発で国家行動計画を発表した。カナダでは数年前から既設炉より建設費が安く安全性が向上するだけでなく、北部の遠隔地域でのエネルギー源として、SMRの適合性がクローズアップされ、官民挙げて開発が進められている。

原子力研究所（CNL）はSMR実証施設建設・運転プロジェクト2018年に立ち上げ、同サイト内に2026年までに実証炉を建設する計画で、2019年に4社（溶融塩炉と高温ガス炉）を選定した。2021年5月、CNLのチョークリバーサイトに高温ガス炉MMRの設置を進めるサイト準備許可申請（2019年3月申請）が、技術審査に移行したと発表した。

州政府によりSMR開発に支持が表明され、BWRX-300、ARC-100、SSR-Wが選定された。SMR開発が非常に活発になっており、連邦政府は、2020年10月に溶融塩炉IMSRに2千万カナダドル（約16億円）、2022年3月にマイクロ炉eVinciに2,720万カナダドル（約25億円）を支援すると発表した。ニューブランズウィック州はポイントルプロー原子力発電所に設置を検討している2炉型に対して、2021年2月に高速炉ARC-100に2千万ドル（約17億円）、2021年3月に溶融塩炉SSR-Wに5千万カナダドル（約43億円）を支援すると発表した。

・英国の先進モジュール（AMR）開発計画

2018年から先進モジュール炉（AMR）実行可能性調査・開発プロジェクトを立ち上げ、2020年7月に3社（核融合炉、鉛冷却高速炉、高温ガス炉）を選定し、全体で最大4千万ポンド（約54億円）の資金提供を行うこととした。2021年7月、AMR研究開発・実証（RD&D）プログラムを発表し、高温の熱利用が可能な高温ガス炉を実証炉初号機に選定し、1.7億ポンド（約260億円）の予算で2030年代初頭までに完成されると発表した。

AMRにとどまらず、既存技術を活用し、より実現可能性が高いとも言えるSMR開発も支援する方針を採っており、Rolls-Royce社のPWR型SMR（470 kWe）開発に2019年に1.8千万ポンド（約25億円）を支援する発表した。

・フランスの新投資計画「France 2030」

2030年に向けた国家投資計画として、6つの分野で10の目標を掲げ、2022年から総額300億ユーロ（約3.9兆円）のうち、原子力分野では軽水型SMRと廃棄物管理向上のために2030年までに10億ユーロ（約1,300億円）を投資すると2021年10月に発表した。

・ポーランドの高温ガス炉開発

2019年から3年間の高温ガス炉研究開発プロジェクト（Gospostrateg）を立ち上げ、ポーランドは日本と実施取決めを2019年9月に締結し、多くの日本企業が参画して官民一体となって鋭意協力を進めている。高温ガス炉は化学産業などの産業用熱供給減として使われる可能性が高い。研究炉（熱出力1万kW、ワルシャワの東南30kmのシフィエルクに位置するNCBJに設置）は設計中であり、2020年代後半までに建設する計画である。初号機（熱出力16.5万kW）は2030年ごろに建設する計画であり、基本設計と立地点としての建設条件を3年以内にまとめると2021年5月に発表した。

・中国の高温ガス炉開発

2006年に国家重大特別プロジェクト（2006～2020）に選定されたHTR-PMプロジェクトは、2基接続

した実証炉HTR-PM210 (山東省威海市石島湾に設置) の1基目が2021年9月に初臨界、2基目が2021年11月に初臨界、2021年12月に送電網へ接続された。実用化を目指して6基接続したHTR-PM600の概念設計は2014年に終了して、サイト評価を実施している。

■核融合炉

• 磁場閉じ込め方式核融合

ITER計画が、核融合エネルギーの科学技術的成立性の実証のため、日本、欧州連合、米国、ロシア、中国、韓国、インドの7極の国際協力プロジェクトとして実施されている。その実験施設は、フランスのサン=ポール=レ=デュランス市に建設が進められており2020年にITER装置本体の組立が開始され、2022年5月時点でプラズマ点火までの77%の建設が達成されている。今後、2025年にプラズマ点火、2035年に重水素-三重水素 (DT) 燃焼を実証し、自己点火条件の達成と核融合炉プラズマの高温加熱に必要なエネルギー供給と実際に発生する核融合エネルギーの比であるエネルギー増倍率Qが10以上となることを実証する。また、ITERの技術目標達成を支援し、原型炉に向けたITERの補完研究を実施するため、日本と欧州が共同で実施する幅広いアプローチ (BA) 活動の一環としてJT-60SA計画 (ITERに次ぐ世界最大級の核融合超伝導トカマク型実験装置) がITER計画と並行して推進されており、2020年3月に装置組み立てが完了した。その後、12月末までに超伝導コイルの絶縁強化など改修を完了し統合試運転の再開を準備しており、早期に運用を開始し、高ベータ非誘導電流駆動運転を達成することを目指している。

ITERに代表されるトカマク型装置では定常運転が大きな課題であるが、原理的に閉じ込め磁場の定常維持が可能なヘリカル型装置であるLHDにより、長時間運転に関する研究が進められている。定常運転下の燃料粒子の制御やダイバーターの機能維持などの解決がもためられている。NIFSのLHDでは長時間運転時の燃料粒子制御や高熱流束制御、同位体効果、プラズマ中の乱流特性の解明等、物理から工学まで幅広い学術研究が進められている。最近では、機械学習を用いた高密度プラズマの定常維持に関する研究も行っている。海外では、2015年に運転を開始したモジュラー型ヘリカル装置Wendelstein 7-X (W7-X, ドイツ) や、現在建設中のChinese First Quasi-axisymmetric Stellarator (CFQS, 日中共同プロジェクト) を用いた実験研究とともに、小型ヘリカル装置の建設 (コスタリカ) や、新しい閉じ込め磁場配位の物理設計研究も鋭意進められている。W7-Xでは、グラファイトタイルによる高温プラズマからの保護が図られ、現在までに短時間ながら 6×10^{26} Ks/m³の核融合3重積の値が達成され、将来的には長時間運転も計画されている。

• 慣性閉じ込め核融合

レーザー核融合に関して、米国リバモア研究所における核融合燃焼実験とともに同研究所やロチェスター大学でAI技術を取り入れたレーザー照射やターゲット条件の最適化が進められている。これらの実績をもとに核融合エネルギー実現に向けた検討ワーキングが米国DOEの下で開催されたり、ベンチャー企業による核融合エネルギー実現に向けたスタートアップ事業が動き出したり新たな展開を見せている。また、ドイツやオーストラリアのベンチャー企業への融資により高速点火方式で中性子を発生しない陽子-ボロン核融合の実現を目指した事業が開始されている。中国では、高速点火方式の大型プロジェクトが、上海光学精密機械研究所、中国物理学研究所、上海交通大学の3機関の連携で進められている。

一方、日本では、大阪大学を中心に高速点火方式の加熱物理が解明されるとともに流体力学的不安定性のない新しい爆縮方式の研究が進められている。また日米科学技術協力協定のもとNIFにおける核融合燃焼物理の研究を含めた学術協定がリバモア研究所と大阪大学レーザー科学研究所間で締結され連携協力が進められようとしている。さらに平均出力MWの実現へ向けた高繰り返し大型レーザー技術の開発 (J-EPOCH: Japan establishment for Power-laser community Harvest計画) が大阪大学で進められている。これらを用いた未臨界レーザー核融合発電炉²⁸⁾ を実現する計画 (L-Suprieme: Laser-fusion Subcritical Power Reactor Engineering Method計画) やさらに核融合熱エネルギーによる高効率水素製造計画 (HYPERION: Hydrogen-production Plant with Energy Reactor of Inertial-fusion計画) が提案され

実現へ向けた研究開発が進められている。

■原子力安全

• 原子力施設の安全性向上対策^{29), 30)}

安全性を自主的に向上させ、また、規制基準に適合させるため、様々な安全性向上対策が原子力事業者にて検討・実施されている。原子力発電所の場合、地震・津波・竜巻などの外的事象に対する施設の防護、電源の強化、冷却系・注水系の追加、柔軟な事故対応を可能とする可搬型設備の配備などが行われている。

• FACEプロジェクト

Nuclear Energy Agency (NEA) が主催するプロジェクトとして、2022年からFACE (Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident Information Collection and Evaluation)³¹⁾ プロジェクトが開始された。本プロジェクトは、福島第一原子力発電所の原子炉建屋および格納容器内情報の分析に関するARC-F (Analysis of Information from Reactor Buildings and Containment Vessels of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station)、燃料デブリの分析の準備に関するPreADES (Preparatory Study on Fuel Debris Analysis)³²⁾、福島第一原子力発電所事故の事故進展解析に関するBSAF (Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station) の後継プロジェクトとなる。FACEプロジェクトは、福島第一の現地調査などに基づき、事故進展シナリオの緻密化、事故時の対応の有効性確認、過酷事故進展解析の改善、デブリの分析手法の改善などを目的とされている。

• 福島第一原子力発電所事故調査・分析^{33), 34)}

福島第一原子力発電所事故から10年以上が経過し、放射性物質の減衰と除染が進んだことから原子炉建屋内の線量が低下し、原子炉建屋内部の調査が部分的に可能となってきた。原子力規制委員会/原子力規制庁は、福島第一原子力発電所事故の事故進展分析を継続的に実施しており、格納容器上部のシールドプラグへの大量のCsの付着、3号機原子炉建屋の水素爆発のメカニズム、過酷事故条件での逃し安全弁の挙動などについて検討が進められた。これらの知見は、既設の原子力発電所の安全性向上に活用されることが期待される。東京電力は、1号機の格納容器内部調査を進め、原子炉容器を支える鉄筋コンクリート製ペDESTAL壁の一部が炉心溶融デブリによって損傷していることなどが明らかにされている。

■再処理

高速炉及びプルサーマルのMOX使用済燃料に対応した再処理法であるコプロセッシング法の開発が原子力機構において着実に進められている。これは、Puを単離することなく、Pu富化度の高いMOX燃料の再処理が可能な再処理プロセスである。従来のPUREX法再処理で採用されているTBP抽出剤を利用することで実現性が高く、マイナーアクチノイドであるネプツニウム (Np) も同時に回収可能な構成となっている。国の革新的研究開発プログラムImPACTにおいて「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」の研究開発が、分離変換技術開発の一環として、2014年度より2018年度まで実施された。対象は長寿命核分裂生成物であり、湿式電解法によるPd回収とレーザーによるPd同位体の偶奇分離、Zrの新規な抽出剤を用いた溶媒抽出法による回収、に関して有効な成果を達成した。マイナーアクチノイドの分離では、原子力機構が開発した溶媒抽出法によるSELECTプロセスについて、高レベル放射性廃液の実液を用いた試験を実施し、マイナーアクチノイドの分離回収を達成し、技術実証された。

(5) 科学技術的課題

■新型原子炉

• 安全基準

炉型共通の課題として、炉型に依存しない安全基準がSMRを対象に欧米や国際機関 (IAEAやOECD/NEA) により検討されている。特に、IAEAはSMR規制者フォーラムを立ち上げ、規制上の課題 (例えば、

グレーデッド・アプローチ、深層防護、緊急時計画区域に対する考え方)を抽出するとともに、炉型共通の安全基準の抽出作業を行っており、技術報告書が作成されている。

ロシアのウクライナ侵攻を受けて、外部ハザードに対するセキュリティリスクへの対応も求められていくとみられている。

• 再生可能エネルギーとの協調や熱エネルギー利用

最近では、太陽光や風力といった変動性再生可能エネルギーとの協調や発電以外の熱エネルギー利用を目指した活動が欧米や国際機関で盛んになってきている。負荷追従、エネルギー貯蔵技術、水素製造技術といった技術開発が新型炉の新たな価値として注目されている。日本でも、日本機械学会動力エネルギーシステム部門「原子力・再生可能エネルギー調和型エネルギーシステム研究会」(2019年4月～2021年3月)と「カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会」(2021年10月～2023年3月)等で検討が進められている。

• ナトリウム冷却高速炉

ナトリウム冷却高速炉については、安全性と信頼性を向上させる技術開発、コスト低減のための技術開発、放射性廃棄物核変換技術の開発が課題として残っている。特に、燃料・材料、安全性向上技術とシビアアクシデント研究は他の新型炉についても共通の課題である。今後は、機器の性能や設計の妥当性・裕度を確保する重要な段階であり、データの蓄積が求められている。

• 高温ガス炉

高温ガス炉については、HTTRを用いた技術実証やタービン発電による発電効率向上、併設水素製造などの技術開発に加えて、新たな燃料開発などの燃料の超長期安定性などの技術的課題があげられる。今後は、高温ガス炉特有のセラミックス被覆燃料の安全性、空気侵入時における黒鉛酸化挙動、負荷変動対応運転の更なる検証などの研究テーマが挙げられる。

熔融塩炉、鉛冷却高速炉、SMRなど革新的原子炉については、外国では盛んに開発されているが、材料開発、燃料開発に加え、静的安全系や自然対流冷却及び機器一体型構造の検討など、取り組みが求められる研究テーマは多方面にわたる。

• 軽水型 SMR

軽水炉では、ATFの開発が進められており、2018年から米国にて実炉で照射用集合体(仏フラマトム製)が装荷され、2021年2月に1運転サイクル(18か月)を完了後、2021年11月には米メリーランド州のカルバートクリフ原子力発電所に先行集合体が装荷されており、実用化が近い。他社も追従しており、今後、更なる照射データ取得、製作性向上などが求められる。

• 医療分野への貢献

原子力の非エネルギー分野への貢献可能性として、核医学検査でがん転移の発見等に利用されるモリブデン⁹⁹Mo-99やがん治療に使えるアクチニウムAc-225といった放射性同位体の製造に活用することが可能であり、新型炉の新たな価値として注目される。

■ 核融合炉

• 磁場閉じ込め方式核融合

発電実証に向けて必要となる技術課題が整理されている。そのうち、ボトルネックとなる課題は、炉内に設置されるダイバーターの粒子制御と受熱を担う機器であり、その技術的制約が核融合炉の出力規模の決定要因になっている。ダイバーターは、原型炉で想定される運転条件と現在の科学的理解および技術的成熟度の乖離が大きい。この課題の解決のためには、JT-60SAなどを用いた実機運転、ITERの運転で蓄積される経験値、小型装置による基礎研究、数値モデルの高度化と実験検証、革新概念の原理実証と性能向上という幅広い切り口からアプローチして、問題解決を図ることが求められる。また、燃料(三重水素)生産や発電のためのエネルギー回収を担うブランケットについても、ITERに設置するテストブランケット(TBM)計画を

含めたシステム開発が重要である。日本のブランケットが水冷却を主案としていることから、特に高温高圧水の安全取扱にかかる技術検証が重要である。構造材料や機能材料に係るデータベースや、熱流動、三重水素を含めた統合システムとしての知見を速やかに纏め、規制対応を含めITER計画に遅滞なく適用・遂行する必要がある。さらに、原型炉に向けて核融合中性子源の整備・活用も重要であり、2021年の概念設計の完了を踏まえて、工学設計の進展が鍵とされている。

• 慣性閉じ込め核融合

米国では、ほぼ核融合点火燃焼を実現し、今後、再現性やより高いターゲット利得を目指した核融合燃焼制御が課題となっている。また核融合燃焼の実績を受け、DOEのもとで、核融合エネルギー実現へ向けた技術課題の検討も開始されている。日本で進めているレーザー核融合高速点火方式は、加熱物理が解明され、核融合プラズマ生成効率も米国などで実証されている中心点火方式に比べ10倍高いことが実証されている。また燃料爆縮に関しても流体力学的不安定性のない新しい爆縮方式が発明され、効率的な点火燃焼へ向けた学術研究が進められている。今後、実験炉、商業炉を目指した、より効率的かつロバスタなレーザー核融合炉を実現するための要素技術開発が課題とされている。例えば、より効率的な加熱を実現するための加熱用超高強度レーザーの高繰り返し化技術や短波長化技術、繰り返し動作に対応できる核融合燃料ペレットの大量生産技術、ならびに供給技術・繰り返しレーザー照射技術であり、現在の基礎研究から開発研究への移行が課題とされている。

■原子力安全^{29), 30), 35)}

• 過酷事故進展解析・過酷事故対応

福島第一事故の調査・分析で得られた知見、個々の物理現象に対して実験などによる検証データ等に基づき、過酷事故（シビアアクシデント）に関連する解析モデルの開発を進めることが望まれている。福島第一原子力発電所事故の事故進展においては、原子炉容器内及び格納容器内における燃料デブリの挙動についてまだ未解明の点が多い。燃料デブリの粘性と言った基礎的な物性値、燃料デブリの移動形態、移動経路などについて、廃止措置に伴い得られる情報を取り込みながら、計算モデルを高度化することが必要とされている。また、過酷事故対応については、様々な情報を加味しながら意思決定を行うために、リスク情報を活用した統合的な意思決定（Integrated Risk Informed Decision Making, IRIDM）の活用などの検討が必要とされている。

• リスク評価

様々な外的事象に対する評価手法の開発、ハザードカーブの設定、標準の策定、複数ハザード・マルチユニット・マルチサイトに対するリスク評価、リスク評価手法の高度化、新知見取り込み時の意思決定方法の確立、新検査制度の重要度決定プロセス（Significant Determination Process：SDP）での活用、リスク情報を活用した統合的な意思決定（Integrated Risk Informed Decision Making, IRIDM）の実践、等が挙げられる。

• 新型燃料の導入による安全余裕の拡大と定量化

既に欧米で採用されている新型燃料の導入、事故時耐性燃料の導入、最新の解析手法の導入などと併せて、新しい解析コードや評価手法の認証方法の確立が必要とされている。

• シミュレーション手法の高度化

様々な外的事象に対するシミュレーション手法の開発が必要とされている。

■再処理

放射性廃棄物で、福島第一原子力発電所事故で発生した燃料デブリの管理・処分方法は引き続き検討を重ねる必要が指摘されている。また、高レベル廃棄物の地層処分の長期安全性評価手法の高度化、分離変換及びプルトニウムのマネジメント技術などが挙げられている。フランスでは、ラ・アーグ再処理工場におい

てプルサーマルMOX燃料の再処理を一部実施している。また、プルトニウムの軽水炉によるマルチリサイクルの検討を行っている。MOX燃料の再処理法についても、湿式法によるプロセスを開発し実廃液を用いた試験により実証されている。

第4世代炉、小型モジュール炉等の検討が進められていることから、その使用済燃料の処理についての検討が強く求められている。

(6) その他の課題

■新型原子炉

ナトリウム冷却高速炉、高温ガス化炉などの第4世代炉は、原子燃料サイクルとの整合性を考慮の上、国際協力を活用して、長期的視野に立って人材維持を図りながら重要な基盤研究を進め、技術基盤を維持することが重要とされている。昨今の地政学リスクや経済安全保障を考慮すれば、安定電源である原子力導入を加速する必要があるとの意見がある。日本では既存炉の再稼働が優先されるが、既存炉の寿命を考えれば、新設をそろそろ考え始めなければならない。その場合、実用化に近いものに優先的に資金・リソースを投入して官民一体となって開発を促進するなど戦略的な対応が求められる。また、原子力サプライチェーン脆弱化が深刻になっており、産業基盤の強靱化は早急な対策が必要とされている。

世界では、投資リスクを考慮してSMRが指向され、欧米では、民間主導の開発が活発である。日本でも再生可能エネルギーとの共存を可能とする、経済合理性のあるミドル電源としてのSMRの開発には検討の余地があるとみられている。ただし社会的ニーズを明確化した上で、開発段階からSMRの特徴を踏まえた審査基準を確立し、仕様の最適化・合理化、投資リスク低減といった課題の解決を図るなど、慎重な検討が求められている。また、諸外国の政府支援規模は大きく、政府による財政支援は重要である。

原子力イノベーションの促進には他分野との連携や国際連携、官民の協力関係が重要であり、研究段階から社会実装までの産学官連携の仕組みが必要となる。特に、炉心燃料や材料の技術開発では、国際協力による実炉照射データ蓄積や安全審査基準の構築が望まれている。

■核融合炉

核融合装置は、大規模プロジェクトであるため、設計から建設完了までに10～20年程度かかり、その運転による技術開発にはさらなる年月を要する。従って、先行プロジェクトで蓄積した技術を次期プロジェクトに継承するとともに、経験のある人材の有効活用も重要になる。政策的にこれらのプロジェクト間のつながりを考慮した開発戦略を練り、技術の断絶や人材の谷間ができないような研究基盤体制の構築が求められている。2018年に、原型炉開発に向けたアクションプランやロードマップで示された研究開発の完遂のため、「核融合エネルギー開発の推進に向けた人材の育成・確保について」³⁶⁾が纏められている。また、社会連携としてのアウトリーチ活動が重要であり、核融合炉の技術の産業応用を進め、着実に核融合技術が社会に貢献できることを広く認識してもらう努力が求められている。

• 磁場閉じ込め型核融合

ITERが国際共同事業として進められていることから、今後は、材料、製作、検査法、安全性等に関して国際標準化が進むと考えられ、関連する国際協力で戦略的に取り組むことが求められている。一方で、日本の資源は限られており、核融合炉材料の資源確保には国策としての取組の必要性も指摘されている。

• 慣性閉じ込め核融合

これまで、レーザー核融合の繰り返し動作に対する技術課題における高繰り返し高出力レーザー技術の開発が、炉工学の進展を制限していた。近年のレーザー加工やレーザー加速器研究開発などに伴い、繰り返し高出力レーザー技術が急速に進展したことで、核融合反応を繰り返し動作させる実験炉が視野に入ってきた。繰り返し高出力レーザー技術は、高エネルギー密度科学という幅広い応用が期待でき、日本学術会議からもその重要性和整備の必要性が提言されており³⁷⁾、一層の進展が期待されている。一方で、核融合実験炉に特

有な、燃料ペレットインジェクション技術やレーザー照射のためのトラッキング技術、さらに炉材料など繰り返し動作に必要な要素技術開発に関しては、地上照射型レーザー宇宙デブリ除去など要素技術の他分野への応用展開も視野に入れた産業界との連携が求められている。

■原子力安全

• 新検査制度の定着と効果的な運用^{22), 38)}

新検査制度は2020年4月から本格運用が始まっているが、SDPの実施やパフォーマンス指標(Performance Indicator、PI)の検討等を含め経験を積み重ね、よりよい制度とするための継続的な努力が望まれている。新検査制度は、再稼働の有無にかかわらず全ての原子力発電所に適用されているが、再稼働した原子力発電所と再稼働に至っていない原子力発電所は、着目すべきリスクに違いがある。従って、再稼働に至っていない原子力発電所における検査のあり方については、さらに検討の余地がある。また、核燃料サイクル施設に対する新検査制度の適用などについても、実践と改善が必要とされている。

• 安全目標の設定と活用

原子力の利用に関し、「社会に受容されるリスクレベル」に関するコンセンサスを作る一つの方策が、安全目標の設定であり、安全目標を誰がどのように使っていくかも重要な課題とされている。原子力規制委員会の原子炉安全専門審査会・核燃料安全専門審査会などで議論が進められていたが、まだ議論の途上である。

• リスク情報の活用とリスク情報に基づく統合的意思決定

リスク情報を活用した安全性向上の実践を積み重ねるとともに、不確かさの取り扱いも含めた統合的意思決定プロセスの構築への取り組みが必要とされている。

• 原子力防災

現在、緊急時対応については、原子力規制委員会は放射性物質の拡散予測を用いず、緊急時モニタリングの結果により実施するとされている。一方、立地地域からは、緊急時対応の際に放射性物質の拡散予測を参考にしたいとの声があり、例えば、不確かさの大きな事故の進展と大気放出量の推移(ソースターム)の事故時の予測にどのように対応していくかが課題である。また、福島第一原子力発電所事故がそうであったように、自然災害により広域に被害が発生している場合の対応については、より広い関係組織の連携が必要になり、検討を深めていく必要があるとされている。

• 原子力人材³⁹⁾

福島第一原子力発電所事故の後、原子力分野を指向する学生数が減っており、将来にわたる人材供給が懸念されている。文部科学省を中心として、国際原子力人材育成イニシアチブが実施されており、原子力教育に関する全国大の「未来社会に向けた先進的原子力教育コンソーシアム、ANEC」が設立され、全国の多くの関係機関が連携した活動が進められている。

■再処理

再処理を中心とする核燃料サイクルは、実用化を目指すにあたっては安全性と経済性の両立・確保が必要である。そのためには基盤的研究の段階から意識されることが重要であり、アカデミアと産業界の連携が必要になる。日本の放射性物質、核燃料物質を取り扱う核燃料サイクル関連試験設備の多くが老朽化の問題を抱え、廃止措置も検討されている。日本全体としての必要性を検討した上で、研究開発活動の基盤となる設備については計画的な更新が求められる。

六カ所再処理工場の次の再処理工場の具体的な建設計画はないが、将来的な高速炉の導入による持続可能なエネルギー利用を確立するためには再処理技術は不可欠であり、原子力産業活動が続く限りは再処理を中心とする核燃料サイクルに関する研究や技術基盤の維持・発展は必要となる。また、福島第一原子力発電所の燃料デブリの処理、廃炉処置で出る放射性廃棄物の処理などの対応で、分離変換・再処理は、原子力関連技術の中でも最後まで必要とされる技術である。長期的視野に立った人材の育成・確保、研究・技術者

のレベル維持が課題となる。このような中で、「将来の幅広い選択肢を確保するため」と位置付けられている分離変換技術、およびSMRの開発と一体化した革新的燃料サイクル技術の研究開発は、上記課題に対応していくものとして期待されている。

(7) 国際比較

■新型原子炉

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●福島第一原子力発電所事故の教訓、知見を踏まえ、炉心溶融を伴うシビアアクシデントの現象解明や解析コード開発などが進められている。 ●ナトリウム冷却高速炉や高温ガス炉などについては材料・熱流動・核特性に関する研究が進められている。 ●ナトリウム冷却高速炉「常陽」は再稼動のために新規基準に対応中。 ●高温ガス炉 HTTR は 2020 年 6 月に設置変更許可を取得し、2021 年 7 月に 10 年ぶりに再稼働した。2022 年 4 月に HTTR による水素製造実証事業を開始。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●ナトリウム冷却高速炉について、2019 年 12 月に日仏高速炉開発に関する実施取決めを締結するとともに、2022 年 1 月にテラパワー社との協力覚書を締結し、仏米を中心に国際協力で技術開発を維持している。また、第 4 世代原子力システム国際フォーラム (GIF) において国際的に調和する安全基準を作成し、IAEA 等の他機関との協議を経て、2017 年に安全要件、2022 年安全ガイドを公開した。 ●高温ガス炉については、ポーランドと 2019 年に実施取決めを締結し、日本の技術でポーランドに研究炉及び実用炉を建設すべく協力関係を強めている。2020 年 10 月には英国とも取決めを締結した。また、GIF や IAEA において安全基準を作成している。 ●高速炉戦略ロードマップ (2018 年 12 月発表) に沿って、原子力イノベーション促進 (NEXIP) 事業にて、2019～2023 年度 (ステップ 1) に革新的原子炉に関する開発を推進し、2023 年度に絞り込みが行われる予定。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●シビアアクシデント耐性燃料などの新型材料開発、積極的にシミュレーション技術を活用する計算技術開発などの研究が活発である。 ●DOE は、2018 年に様々な燃料や冷却材を試験するための多目的試験原子炉 (VTR) プロジェクトを立ち上げた。INL サイトを決定し、環境影響声明書を 2022 年 3 月に発表した。 ●エネルギー省は、2020 年 6 月に、民間の新型炉実用化加速するための試験や評価を支援するため、INL に国立原子炉イノベーションセンターを設置した。 ●INL に MARVEL マイクロ原子炉 (冷却材にナトリウムとカリウムを使用) の実物大プロトタイプを完成したと 2022 年 2 月に発表した。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●民間投資が盛んになり、小型モジュール炉やマイクロ炉の開発が活発である。 ●NuScale 炉 (PWR) は 2020 年に NRC の設計認証取得。INL サイトで 2025 年に建設開始し、2029 年に運転開始予定。2021 年に日揮 HD と IHI、2022 年に JBIC が出資表明。 ●GEH 社 BWRX-300 は NRC の選考審査実施中。カナダ OPG 社により選定。2022 年に TVA 社がクリンチリバーサイトでの建設を念頭ににした協力協定を締結。 ●Oklo 社の Aurora (ヒートパイプ型超小型高速炉) は建設運転一括認可申請を 2020 年に提出したが、2022 年 1 月に NRC により申請却下となった。 ●TVA 社は SMR 建設のため 2019 年に NRC による早期立地許可を承認。

2.1 電力のゼロエミ化・安定化

			<ul style="list-style-type: none"> ●エネルギー省は、2020年から先進原子炉設計実証プログラム(ARDP)を開始し、5～7年以内に実現可能な先進原子炉として、TerraPower社 Natrium (ナトリウム冷却高速炉)とX-energy社 Xe-100 (高温ガス炉)を選定した。10～14年後に実用化される技術として、Kairos Power社 Hernes(熔融塩炉)、Westinghouse社 eVinci(ヒートパイプ型マイクロ炉)、BWXT社 BANR (TRISO燃料マイクロ炉)、Holtech社 SMR-160 (小型軽水炉)、Southern Company Services社 MCRE (熔融塩炉)を選定した。2030年半ばを目指した革新炉概念として、ARC社 ARC-100 (ナトリウム冷却高速炉)、GeneralAtomics社 FMR (ヘリウム冷却高速炉)、MITのMIGHR (高温ガス炉)を選定した。 ●TerraPower社 Natrium 炉はワイオミング州の石炭火力跡地に建設予定。2023年に建設許可、2026年に運転許可をNRCに申請予定。2022年1月にJAEAと三菱は協力覚書を締結。熔融塩蓄熱システムを有しており、再エネとの協調を狙っている。 ●X-energy社 Xe-100はEnergy Northwest社のワシントン州に建設予定。 ●Southern Company社はMCREをINLで設計・建設・運転するための協力協定を2021年11月に締結。 ●NRCはカナダ規制機関CNSCと2019年から開始した統合型熔融塩炉(Terrestrial Energy社)の共同技術審査を2022年6月に完了したと発表。 ●NRCは、SMR及び非軽水炉を含む新型炉にリスク情報や性能に基づいて緊急時計画区域(EPZ)を決定するアプローチを含む新しい緊急事態対策要件を適用する規則を2024年までに完了させるために公聴会を実施中。 ●国防総省は、2021年3月に、今後の軍事作戦に使用する先進的な可動式超小型炉の原型炉建設と実証に向けて、BWXT社とX-energy社の2社を選定した。また、2021年4月に、宇宙用原子力推進システムの技術支援のため、USNC社を選定した。 	
欧州	基礎研究	○	↗	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●プロジェクト(例：ナトリウム冷却高速炉はESFR-SMART、熔融塩炉はSAMOFAR)として欧州全体で共同して着実に研究を進めている。 ●MYRRHA炉は、ベルギーのSCK・CENが中心となって開発を進めている多目的の加速器駆動核変換システム(ADS)の原型炉と位置づけられており、欧州内ではナトリウム炉に次いで優先度が高い。 ●ガス冷却高速炉ALLEGROはスロバキアを、鉛冷却高速炉ALFREDはルーマニアを建設予定地に選定し、中欧を中心として研究開発を継続している。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●2021年9月に設立された新興企業Newcleoは小型鉛冷却高速炉開発のための協力協定をイタリアENEAと2022年3月に締結した。 <p>【ポーランド】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●2020年代後半までに1万kW研究用高温ガス炉を原子力研究センターNCBJに建設する計画があり、JAEAの協力を得て高温ガス炉の研究を進めている。2021年5月に研究炉の基本設計を進めるための確認書に調印した。 <p>【ベルギー】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●鉛やNaなどの液体金属SMR研究のため、SCK・CENに1億ユーロ(4年)を拠出すると2022年5月に表明。
	応用研究・開発	◎	↗	<p>【欧州】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ナトリウム炉、ガス炉、その他の炉型についても欧州計画の中で設計研究が行われている。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●ナトリウム冷却高速炉ASTRIDは概念設計段階であったが、2020年から研究開発を主体とすることし、実用化時期を21世紀後半に先延ばしして実用化に至る道筋を検討している。

				<p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●先進モジュール炉（AMR）実施可能性・開発計画において、2018年から実施可能性調査を行い、2020年7月に3社（Tokamak energy社：核融合炉、Westinghouse EC UK社：鉛冷却高速炉、U-battery developments社：高温ガス炉）を選定した後、2021年7月にAMR実証炉として高温ガス炉を選定し、2030年代初頭に実証を目指す計画。 ●ロールスロイス社の軽水型SMRの設計認証審査を2022年3月にBEIS（産業省）から規制当局へ要請。 <p>【ポーランド】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●2020年にMMR（ガス炉）の実施可能性調査に着手。NuScaleとBWR-300を計画し、規制当局が予備審査を2022年6月に開始。 <p>【スウェーデン】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●エネルギー庁は、2030年までに建設予定の鉛冷却SMR実証炉SEALERのプロトタイプ（2024年までに1/56スケール電気加熱式）装置費用を助成すると2022年2月に発表。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●第4世代炉研究の一環として、ナトリウム冷却炉、鉛冷却炉、高温ガス炉、超臨界圧軽水炉や溶融塩炉の研究を精力的に実施している。 ●鉛ビスマス冷却高速炉の試験研究炉は2019年10月に初臨界を達成。 ●トリウム溶融塩炉の試験研究炉TMST-LF1は2018年に建設着工、2021年に建設完了、その後試験開始。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●ナトリウム冷却高速炉は、PWRに次ぐ最重要炉型と位置づけ、中国原子能科学研究院（CIAE）により実験炉CEFRが2011年に初送電を達成し、性能試験を実施している。原型炉は建設せず、実証炉CFR600の1基目が2017年に建設開始され2023年に完成予定である。2基目が2020年12月に建設開始した。ロシアの協力により燃料を共有し実証炉の導入による早期実用化を目指す方針である。実用炉CFR1000/CFR1200は国産技術で2035年ごろに運転開始の計画である。 ●ガス炉は、自国で知的財産権を持つことを目的に、精華大学の実験炉HTR-10の知見を踏まえて、実証炉HTR-PM210（2基）の1基目が2021年9月に初臨界、2基目が2021年11月に初臨界、2021年12月に送電網へ接続された。実用化を目指して6基接続したHTR-PM600の概念設計は2014年に終了して、サイト評価を実施している。 ●国産PWR型SMR実証炉ACP100は2021年7月に建設開始。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●ガス炉ではTRISO燃料を多目的照射炉HANAROで照射実験を行い、基礎研究が進められている。 ●鉛ビスマス冷却高速炉URANUS-40や核変換炉PEACER-300を設計しており、HELIOSループで熱流動試験が実施されている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●ナトリウム冷却高速炉はPGSFRを設計中であったが、2017年の政府方針により、2020年までは自然循環試験ループを製作するなどして研究開発を推進している。 ●ガス炉は600 MWtの原子力水素開発実証（NHDD）計画が設計段階だが進められている。2020年8月にUSNC社MMRの開発協力を発表。 ●軽水炉SMRプロジェクトSMARTはサウジアラビアとも協力すると2020年1月に報じられた。
カナダ	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●カナダ原子力研究所（CNL）は、2019年に原子力研究イニシアチブの候補企業4社：モルテックス社（ピン型溶融塩炉SSR）、Kairos社（フッ化物溶融塩炉KP-FHR）、USNC社（高温ガス炉MMR）、テレストリアル社（溶融塩炉IMSR）を選定した。USNC社はMMRをCNLチョークリバーサイトで2026年までに完成させる計画。

	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●オンタリオ州、ニューブランズウィック州、およびサスカチュワン州は、2019年12月に、SMR開発・建設のための協力覚書を締結し、2021年4月にアルバータ州も参加し、2022年3月にSMR戦略的開発建設計画を策定。Terrestrial Energy社IMSR（溶融塩炉）、GEH社BWRX-300、X-energy社Xe-100のうちオンタリオ州は2021年12月に、サスカチュワン州は2022年6月にBWRX-300を選定した。ニューブランズウィック州はARC社ARC-100（ナトリウム冷却高速炉）とMoltex Energy社SSR-W（溶融塩炉）を選定した。これらは2030年ごろに運転開始を計画している。 ●カナダ規制機関（CNSC）は、ベンダーに対する原子炉設計の事前審査（Pre-Licensing Vendor Design Review）を実施。現在、SMRの設計12件（高温ガス炉4、軽水炉3、溶融塩炉2、Na冷却高速炉1、鉛冷却高速炉1、ヒートパイプ炉1）が申請され、半数は審査が終了し、5件（高温ガス炉1、軽水炉2、溶融塩炉2）の評価を実施中。
ロシア	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●鉛冷却高速炉BREST-DO-300（2026年運転開始予定）、鉛ビスマス冷却高速炉SVBR100の建設計画があり、幅広い基盤技術の開発が目標とされている。小型の熱利用コジェネ炉や浮揚型原子炉の研究開発も実施されているBREST300は2021年2月に建設許可、2021年6月に着工、2021年11月に基礎コンクリート打設完了、2022年5月にデジタルツインが導入されると発表。 ●第4世代炉研究の一環として、超臨界圧水軽水炉や溶融塩炉の研究も実施している。 ●多目的研究用であるナトリウム高速炉MBIRを2015年に建設開始、2027年に建設終了、2028年研究利用開始の見込みと2022年1月に発表された。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●ナトリウム冷却高速炉は堅実に開発を維持しており、実験炉BOR60、原型炉BN600に次いで、実証炉BN800が2015年に送電を開始した。BN800は2022年2月にMOX燃料を60%まで装荷して稼働中であり、2022年夏にはフルMOX燃料に切り替える予定と2022年1月に報じた。 ●実用炉であるBN1200も開発中であり、安全性については第4世代原子カシステム国際フォーラム（GIF）で定めた安全設計基準を採用する。連邦特別プログラムで高速炉サイクル技術を最優先に開発することを決定し予算化している。2025年に建設開始し、2035年までに建設終了の見込みと2022年1月に発表された。 ●世界初の海上浮揚式原子力発電所（FNPP）「アカデミック・ロモノソフ号」（3.5万kWe×2）が極東地域北東部のチュクチ自治区管内、ペベクの隔絶された送電網に送電を開始した。2026年までにさらに4つの浮揚式発電所建設を目指すとして2021年8月に発表。 ●最初の陸上型SMRをサハ共和国ヤクーツクで2028年に運転開始予定と2022年1月に発表。
インド	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●大学や研究所で軽水炉を中心に研究が進められている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●ナトリウム冷却高速炉では実験炉FBTRが1985年から運転中。運転開始から35年以上を経て設計出力40 MWtに到達と2022年3月に発表。原型炉PFBR（500 MWe）が2022年10月に運転開始の見込みから遅れている。また、同型の実用炉（600 MWe）をツインプラントとして建設する計画である。 ●当面は酸化燃料、プルトニウム燃料サイクルとするが、将来はトリウム燃料サイクルとする。

■核融合炉

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●文科省核融合科学技術委員会で原型炉開発総合戦略タスクフォースを組織し、原型炉開発に向けたチェック・アンド・レビュー (C&R) とアクションプランを策定。また、これらに基づくロードマップを策定。第一回C&R完了。 ●量子科学技術研究開発機構 (QST) 六ヶ所研究所で欧州と展開している幅広いアプローチ (Broader Approach : BA) 活動により、ITER後の原型炉に向けた設計検討、工学研究開発、シミュレーション研究、遠隔実験研究が展開。第1期の活動を成功裏に完了し、2020年より第2期の活動を展開。 ●自然科学研究機構核融合科学研究所 (NIFS) の大型ヘリカル装置 (LHD) による重水素実験が実施され、炉閉じ込め条件の改善、10keV加熱に成功した。FFHR (Force-Free Helical Reactor) の DEMO 炉概念設計が進み、原型炉設計に反映する。 ●レーザー核融合では、大阪大学レーザー科学研究所を中心に、高速点火方式の加熱物理が解明されるとともに流体力学的不安定性のない新しい爆縮方式の研究が進められている。 ●日米科学技術協力協定のもと、米国 NIF による核融合燃焼物理実験に関する共同研究が計画されている。 ●光産業創成大学院大学 / 浜松ホトニクスで繰り返しレーザーを用いた核融合物理実験 (CANDY) が実施されている。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●ITER建設のため、高度技術を要する機器調達を担い、産業界の技術蓄積、人材育成が着実に行われている。2020年7月末より本格的にITER本体の組立が開始され、2022年5月時点で、初プラズマまでの77%の建設が達成された。 ●QST 那珂研究所に、欧州と展開している BA 活動と国内計画を合わせてサテライトトカマク JT60-SA 装置を建設。2020年に組立完了し、統合試運転開始。日欧共同プロジェクトにより運用。国内各大学のオンサイトラボ設置。QST 六ヶ所核研究所で欧州と展開している BA 活動 (IFMIF 工学設計工学実証) の一環として、原型加速器の開発を継続、定格電圧の80% (105 kV) の入射電力において RF の定常入射 (CW) に成功した。核融合中性子源 (A-FNS) 研究では、工学設計活動報告書を纏め、工学設計を開始。 ●国内初の核融合ベンチャー企業：京都フュージョンアリング社の設立後、EX Fusion 社 Helical Fusion 社や Helical Fusion 社 EX Fusion 社が設立し、投資を集めるなど活発な活動が見られる。 ●レーザー宇宙物理学・惑星物理学、超高压物質材料科学、レーザープロセス工学など核融合研究にもつながる高エネルギー密度科学の研究を幅広く進めている。 ●加工や加速器用レーザーとして有望な高繰り返し高出力セラミックレーザーの研究開発が進められている。 ●日本学術会議提言によりパワーレーザーと核融合を含めた高エネルギー密度科学の推進の重要性が示された。
米国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●プラズマ物理、核融合炉材料、トリチウム安全性等の研究で最先端にある。基礎研究の計画、人的資源活用の面でも、一定の水準が維持されている。民間企業 (Tri Alpha Energy Inc. など) による核融合研究も進められている。 ●引き続き ITER プロジェクトに参加し、一時期停止していた資金拠出を再開する ●国立点火施設 (NIF) では、人類史上初めて実験室での自律的核融合燃焼によるエネルギー増幅を実証した。 ●ロチェスター大のオメガレーザーと機械学習など AI 技術を取り入れた中心点火の核融合研究が進められている。

2.1 電力のゼロエミ化・安定化

	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● ITER初期から中心的役割を果たしてきた。 ● 米国エネルギー省の核融合エネルギー科学諮問委員会が、「核融合エネルギーとプラズマ科学に関する10年間の国家戦略計画」を発表(2021年2月)。2040年代までに核融合パイロットプラントを建設するための準備を整えると記載。全米科学アカデミーは2028年までに実施判断し、2035-2040年に発電を目指す」と提言(2021年2月)。原子力安全規制委員会を中心に検討を開始している。 ● 米国最大の核融合ベンチャー：Commonwealth Fusion System社が2050億円以上の追加投資を獲得(2021年10月)し、2025年に核融合実験炉の稼働を目指す。 ● NIF施設の高エネルギー密度科学に関する公募研究が実施され、日本との共同研究も積極的に進められている。 ● ロチェスター大学の施設を含めた全米パワーレーザー施設連携(LaserNetUS)事業が進められている。
欧州	基礎研究	○	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 欧州内の協力体制 EUROfusion の下で、各研究所の研究を組織化し、研究開発を展開し、ロードマップを策定。 ● Tokamak Energy Ltd. など民間企業による核融合研究も進められている。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● フランスでLMJの建設が進められ(2022年以降)建設完了、2017年に8ビーム短パルス運転開始。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 大型融資を受けた独国ベンチャー企業による高速点火レーザー核融合研究が開始。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● ITERホスト極として相当規模の資金(建設費の約半分)を投入し、ITER建設を推進している。 ● ITERと並行し、原型炉に向けて日本とBA活動を展開。 ● EUROfusionが策定した、「核融合エネルギー実現に向けた欧州研究ロードマップ」(2018年)において、22世紀に世界で1テラワット(100万kW発電所1000基分)の核融合発電所が必要と記載。「欧州グリーンディール」政策の下で、2050年頃に発電を行う核融合原型炉を建設すべきと評価。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 「英国政府の核融合戦略」(2021年10月)において2040年までに「商用利用可能な核融合発電炉」の建設を目指す」と明記。発電炉の立地地域を募集し15地域の応募を受けて5つの候補地を公表(2021年10月)。政府が核融合規制に関する討議資料を公表(2021年10月)し、意見募集を実施。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● マックスプランクプラズマ研究所に建設されたモジュラーヘリカル型の磁場閉じ込め装置ヴェンデルシュタイン7-X(W7-X)が運転開始され、高プラズマ閉じ込め実験が進行している。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● LMJの一部ビームの共同研究が公募・実施中。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● ITER参加極の一つで、資金を出しITER建設に寄与するとともに、合肥にて超伝導トカマク装置EASTを運転中、高い加熱温度、プラズマ閉じ込めを達成。 ● 中国初のヘリカル型プラズマ閉じ込め装置として、西南交通大学が、日本の核融合科学研究所(NIFS)との共同プロジェクトとして設計研究を進めた準軸対称ヘリカル装置CFQSの建設開始。 ● 中国工程物理研究院により、神光(Shen Guang)IIIレーザーを使った間接照射による基礎研究が実施中。(綿陽) ● 中国科学院により、神光(Shen Guang)IIのアップグレードと高速点火方式の研究開始。(上海)
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 国産の核融合発電実現に向け、ITERと並行して、ITERと同規模の中国核融合工学実験炉(CFETR)を1基建設した後、2030年代までに発電炉(原型炉)に改造する計画。 ● 中国科学院上海光機所にて高エネルギー密度科学の研究を実施

韓国	基礎研究	○	→	●KAISTでターゲット照射の基礎実験が行われているが、主流は磁場核融合である。
	応用研究・開発	◎	↗	●ITER参加極の一つとして資金を供出し、ITER建設に寄与するとともに、超伝導トカマクK-STARを運転し、技術力、特に超伝導に関する技術を持つ。 ●第4次核融合エネルギー開発振興基本計画(2022-26)において2050年代に核融合電力生産実証炉による発電実証を行うという目標を設定。発電実証に必要な8つのコア技術(コイル、ブランケット、ダイバータなど)を明示し、ITERやK-STARで確保すると記載。

■原子力安全

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	●原子力安全に関する公募研究が実施されており、リスク評価、安全評価技術、事故耐性燃料、モニタリング技術、原子力防災など、幅広い分野での取り組みが進められている ²⁵⁾ 。大学・研究機関においても、基礎的な研究が実施されている。
	応用研究・開発	◎	↗	●原子力施設の安全性向上対策として、解析手法、設備、マネジメントシステム改善など、様々な取り組みがなされている。
米国	基礎研究	◎	→	●1970年代から確率論的リスク評価に対する取り組みがなされ、広い範囲で基礎研究が行われている。外的事象に対する包絡的なリスク評価も1990年代に実施されている。
	応用研究・開発	◎	↗	●1979年のスリーマイル島2号機事故を契機として、本格的にリスク情報を活用した規制が行われている。すべての規制上の意思決定において、確率論的リスク評価を活用する方針がとられている。 ●過酷事故に関しては、サンディア国立研究所で総合解析コードMELCOR、ISS社でRELAP/SCDAPSIMの開発を進めている。 ●手順書類FLEXなど、安全確保のためのマネジメントについて取り組みが進んでいる
欧州	基礎研究	◎	→	【EU】 ●高経年化評価に対する検討が進んでおり、リスク評価の導入に積極的な国が多い。 ●過酷事故に関する種々の課題を整理するSARPR(Severe Accident Research Priority Ranking)プロジェクトが実施されている。 【フランス】 ●原子力発電所を多数有するフランスでは、1990年代初頭から確率論的リスク評価が実施されている。
	応用研究・開発	◎	→	【EU】 ●欧州においては西欧原子力規制者協会(WENRA:Western European Nuclear Regulators' Association)が、原子力発電所をより安全にするための活動を積極的に実施し、その中で保全活動の最適化が進められている。 ●過酷事故解析コードであるASTECが仏IRSNと独GRSの共同で開発されている。 ●防災については、NERISプラットフォームを中心に、さまざまなプロジェクト支援、共同研究が進められている。
中国	基礎研究	○	↗	●新規プラント建設や新型炉設計が積極的に進められており、原子力安全に関しても積極的な研究開発が進んでいる。 ●過酷事故に関しては、上海交通大学、西安交通大学などで基礎的な研究が実施されている。また、各種解析コードの開発が国の予算などで進められている。

	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●リスクやシビアアクシデントマネジメントなどに関する研究に、国家として積極的に投資している。 ●上海交通大学、上海核工程研究設計院などで応用を目指した比較的大規模な熱流動実験が実施されている。 ●近年の原子力発電所の増設計画に沿って、法的整備も進み、緊急時対応計画はIAEA基準に沿って整備されている。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●ソウル大学、KAIST、浦項工科大学校 (UNIST)、韓国原子力研究所 (KAERI) などで基礎的な研究が実施されている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●保安、防災においては、米国型の対応が整備されている。 ●韓国原子力研究所などで応用を目指した格納容器健全性、コアキャッチャーなどに比較的大規模な実験が実施されている。

■再処理

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●将来の再処理技術、分離変換技術に関する基礎的研究は継続されている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●再処理の安全性、事故時影響等に関する研究が実施されている。 ●MOX燃料再処理の課題等に関する研究が進められている。 ●プルトニウムマルチリサイクルに関する検討が進められている。 ●高速炉燃料サイクルに関する研究開発は震災後中断されている。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●マイナーアクチノイド分離技術などに関する基礎研究は常に一定の活動がある。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●再処理を行わない戦略をとっているため、応用研究は限定的である。
欧州	基礎研究	○	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●EU内研究協力で、核燃料サイクル路線をとらない国においても大学等での基礎的研究は一定水準が保たれている。 ●EUの共同の研究所では、アクチノイド試料を用いた実験が可能であり、レベルの高い研究が実施されている <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●再処理等への応用のための基礎研究は継続されている。分離変換技術におけるマイナーアクチノイド分離の技術開発については、所定の成果を得たとの判断がなされ、プロジェクトは中断された。現在低いレベルで活動が維持されている。
	応用研究・開発	○	→	<p>【EU】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●応用研究は国別の対応が基本となっていると考えられる。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●再処理は基本的に確立された技術であるとの認識であると考えられるが、なお、高度化、改良などのための研究開発が行われている。 ●MOX再処理については、プロセス開発を行い実廃液試験による実証まで進め、プロジェクトを収束させた。 ●軽水炉によるPuのマルチリサイクルの研究開発が進められている。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●国を挙げて、核燃料サイクル、再処理、分離変換技術に関する研究開発を推進している。分離変換技術では、加速器による核変換の研究開発など、かなりの予算、人員をと移入して推進している。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●国を挙げて、核燃料サイクル、再処理、分離変換技術に関する研究開発を推進している。新施設を建設し、ホット試験を開始するなど活動はさらに活発化している。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●使用済燃料の乾式処理に関する基礎研究は引き続き実施されている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●使用済燃料の乾式処理による再処理の実用化に関する研究開発は、国際的立場などなどの事情により、限定される。

2.1 電力のゼロエミ化・安定化

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・水素・アンモニア（環境・エネ分野 2.2.2）
- ・破壊力学（環境・エネ分野 2.6.3）
- ・物質・材料シミュレーション（ナノテク・材料分野 2.6.3）

参考・引用文献

- 1) 原子力委員会「令和3年度版原子力白書（令和4年7月）」内閣府原子力委員会, <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2022/zentai.pdf>, (2023年1月29日アクセス) .
- 2) GX 実行会議「GX実現に向けた基本方針（案）～今後10年を見据えたロードマップ～」内閣官房, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/dai5/siryu1.pdf, (2023年1月29日アクセス) .
- 3) 一般社団法人日本原子力産業協会（JAIF）『世界の原子力発電の動向2022年版』（東京：JAIF, 2022）.
- 4) The Generation IV International Forum, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public, (2023年1月29日アクセス) .
- 5) World Nuclear Association, “Fast Neutron Reactors”, <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors.aspx>, (2023年1月29日アクセス) .
- 6) 原子力科学技術委員会 もんじゅ研究計画作業部会「もんじゅ研究計画」文部科学省, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/061/houkoku/1344598.htm, (2023年1月29日アクセス) .
- 7) 岡本孝司「高温ガス炉の課題（2013年9月4日）」一般財団法人エネルギー総合工学研究所, https://www.iae.or.jp/htgr/pdf/02_result/infomation/02result_20130903_04.pdf, (2023年1月29日アクセス) .
- 8) 原子力委員会「第三段階研究開発基本計画（平成4年6月9日）」内閣府原子力委員会, http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/kakuyugo2/siryu/kakuyugo05/siryu2_3.pdf, (2023年1月29日アクセス) .
- 9) 岡野邦彦, 飛田健次「核融合原型炉開発の動向：アクションプランと核融合工学研究の進展」『日本原子力学会誌ATOMOS』60 巻 10 号 (2018) : 637-641., https://doi.org/10.3327/jaesjb.60.10_637.
- 10) Breanna Bishop, “National Ignition Facility achieves fusion ignition”, Lawrence Livermore National Laboratory, <https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-achieves-fusion-ignition>, (2023年1月29日アクセス) .
- 11) Kazuki Matsuo, et al., “Petapascal Pressure Driven by Fast Isochoric Heating with a Multipicosecond Intense Laser Pulse”, *Physical Review Letters* 124, no. 3 (2020) : 035001.,

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.035001>.

- 12) Lee McCormick『原子力発電システムのリスク評価と安全解析』西原英晃 監訳, 杉本純, 村松健 訳 (東京: 丸善出版, 2013).
- 13) 大久保哲朗, 兼平憲男「六ヶ所再処理工場のガラス固化試験と新型炉開発: 核燃料サイクル施設におけるガラス固化技術の確立への取り組み」『日本原子力学会誌ATOMO Σ』57 巻 8 号 (2015) : 511-516., https://doi.org/10.3327/jaesjb.57.8_511.
- 14) 日本原燃株式会社「再処理施設および廃棄物管理施設のしゅん工時期見直しに伴う工事計画の変更届出について」<https://www.jnfl.co.jp/ja/release/press/2022/detail/20221006-1.html>, (2023年1月29日アクセス) .
- 15) 日本原燃株式会社「MOX燃料加工施設の工事計画の変更届出について」<https://www.jnfl.co.jp/ja/release/press/2020/detail/20201216-1.html>, (2023年1月29日アクセス) .
- 16) 次世代原子力システム研究開発部門, 日本原子力発電株式会社「高速増殖炉サイクル実用化研究開発 (FaCTプロジェクト); フェーズI報告書」日本原子力研究開発機構 (JAEA), <https://doi.org/10.11484/jaea-evaluation-2011-003>.
- 17) K. Yamamoto, et al., “Development of U and Pu Co-Recovery Process (Co-Processing) for Future Reprocessing”, U.S. Department of Energy, <https://www.osti.gov/biblio/22257834>, (2023年1月29日アクセス) .
- 18) Yasutoshi Ban, et al., “Uranium and Plutonium Extraction from Nitric Acid by N,N-Di (2-Ethylhexyl) -2,2-Dimethylpropanamide (DEHMPA) and N,N-Di (2-Ethylhexyl) Butanamide (DEHBA) using Mixer-Settler Extractors”, *Solvent Extraction and Ion Exchange* 32, no. 4 (2014) : 348-364., <https://doi.org/10.1080/07366299.2013.866850>.
- 19) 一般社団法人日本原子力学会 新型炉部会「資料集: 2020/09/23: 新型炉部会主催のセッション「SFR安全標準炉に求められる技術開発の状況」」<http://www.aesj.or.jp/division/ard/Material.html>, (2023年1月29日アクセス) .
- 20) 経済産業省 資源エネルギー庁「社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業について (令和3年11月12日)」公益財団法人原子力安全研究協会, https://www.nsystemkoubo.jp/application/documents/r4kouboWS_4.pdf, (2023年1月29日アクセス) .
- 21) 原子力規制委員会「適合性審査」<https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/index.html>, (2023年1月29日アクセス) .
- 22) 原子力規制庁 長官官房制度改正審議室「新検査制度見直しについての説明」原子力規制委員会, <https://www.da.nsr.go.jp/file/NR000039062/000182920.pdf>, (2023年1月29日アクセス) .
- 23) 東京電力ホールディングス株式会社「柏崎刈羽原子力発電所のIDカード不正使用および核物質防護設備の機能の一部喪失に関わる改善措置報告について」https://www.tepco.co.jp/press/release/2021/1642625_8711.html, (2023年1月29日アクセス) .
- 24) 一般社団法人日本原子力学会 原子力安全部会「検討ペーパー: 核セキュリティコーナーストーン評価の在り方とそこから見えてきた検査制度の課題 (2021年5月31日)」一般社団法人日本原子力学会, http://www.aesj.or.jp/~safety/pdf/other/SecurityCS_Paper2021__v1.0.pdf, (2023年1月29日アクセス) .
- 25) 一般社団法人日本原子力学会 原子力発電部会「次期軽水炉の技術要件について: 「次期軽水炉の技術要件」ワーキンググループ報告書 (2020年6月)」http://www.aesj.or.jp/~hatsuden/katsudou/04_jikiroWG/jikiroWG_report_20200716.pdf, (2023年1月29日アクセス) .
- 26) 経済産業省「革新炉ワーキンググループ」https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/index.html, (2023年1月29日アクセス) .

- 27) 文部科学省「令和4年度予算のポイント」https://www.mext.go.jp/content/20211223-mxt_kouhou02-000017672_1.pdf, (2023年1月29日アクセス) .
- 28) Akifumi Iwamoto and R. Kodama, “Core size effects of laser fusion subcritical research reactor for fusion engineering research”, *Nuclear Fusion* 61, no. 11 (2021) : 116075., <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac2992>.
- 29) 一般社団法人日本原子力学会「軽水炉安全技術・人材ロードマップ高度活用」https://www.aesj.net/sp_committee/com_lwrroadmap, (2023年1月29日アクセス) .
- 30) 一般社団法人日本原子力学会 熱流動部会「熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ検討」ワーキンググループ：2020年度版」<https://thd.aesj.net/index.php/committees>, (2023年1月29日アクセス) .
- 31) Nuclear Energy Agency (NEA), “Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident Information Collection and Evaluation (FACE) Project”, https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_70741/fukushima-daiichi-nuclear-power-station-accident-information-collection-and-evaluation-face-project, (2023年1月29日アクセス) .
- 32) Nuclear Energy Agency (NEA), “Preparatory Study on Analysis of Fuel Debris (PreADES) Project”, https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_25169/preparatory-study-on-analysis-of-fuel-debris-preades-project, (2023年1月29日アクセス) .
- 33) 原子力規制委員会「東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会」https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/jiko_bunseki01/index.html, (2023年1月29日アクセス) .
- 34) 東京電力ホールディングス株式会社「廃炉プロジェクトとは」<https://www.tepco.co.jp/decommission/>, (2023年1月29日アクセス) .
- 35) 原子力規制委員会「原子力規制委員会における安全研究の基本方針（平成28年7月6日）」<https://www.nsr.go.jp/data/000271464.pdf>, (2023年1月29日アクセス) .
- 36) 核融合科学技術委員会「核融合エネルギー開発の推進に向けた人材の育成・確保について」文部科学省, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1407701.htm, (2023年1月29日アクセス) .
- 37) 日本学術会議 総合工学委員会 エネルギーと科学技術に関する分科会「提言：パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の量子的飛躍と産業創成（令和2年（2020年）6月16日）」日本学術会議, <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t291-2.pdf>, (2023年1月29日アクセス) .
- 38) 一般社団法人日本原子力学会 原子力安全部会 新検査制度の効果的な実施に関する検討ワーキンググループ「新検査制度の効果的な実施に関する検討 2020年度報告書：変革と進展の多寡“IS IT A LITTLE OR LITTLE?”」一般社団法人日本原子力学会, http://www.aesj.or.jp/~safety/pdf/other/Report_FY2020_v1.0.pdf, (2023年1月29日アクセス) .
- 39) 公益財団法人原子力安全研究協会「国際原子力人材育成イニシアチブ事業」<https://jinzai-initiative.jp/works/index.html>, (2023年1月29日アクセス) .