

2.1.3 原子力発電

（1）研究開発領域の定義

原子力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：リスク評価、ヒューマンマシンシステム、シビアアクシデント対応、緊急時における影響低減技術など
- 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、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、新検査制度、外的ハザード、深層防護

■再処理

核燃料サイクル、再処理、使用済燃料、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]

■新型原子炉

我が国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。加えて、炉内に燃料を注入し核燃焼させ、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される放射性物質のトリチウム（燃料の1つ）のハザードポテンシャルが、I-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・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。制度面を踏めて原子力施設のライフサイクルに関わる安全上の研究開発を幅広く対象としており、リスク評価、シビアアクシデント対応、事故時の影響低減、安全評価、ヒューマンファクターなどを含む。

■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、資源の乏しい我が国の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²⁾。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）の軽水炉に注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³⁾。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⁴⁾、その重要性はエネルギー基本計画⁵⁾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、原子炉を低圧にすることができる。また、高沸点のため単相ナトリウムで炉心冷却ができ、電気駆動を不要とする自然循環による崩壊熱除去が可能である。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がある。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。我が国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℃で定格運転を達成した⁶⁾。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℃の高温状態においても被覆材の閉じ込め機能は損なわ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ため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⁾。

2018年に発表されたエネルギー基本計画⁵⁾では、人材・技術・産業基盤の強化に直ちに着手し、安全性・経済性・機動性に優れた炉を追求すると記述され、「原子力イノベーション」を促進する観点が必要とされた。

また、国は長期的な開発ビジョンを掲げ、民間は創意工夫や知恵を活かしながら、多様な技術間競争と国内外の市場による選択を行うなど、戦略的柔軟性を確保して進めると記述された。これを受けて、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。

■核融合炉

(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⁸⁾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⁹⁾。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、原型炉に求められる基本技術と技術開発の進め方、原型炉段階への移行に向けた考え方などについて議論されて検討が進められた。2013年に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、2017年これまでの検討を参考にし、かつ現在までの研究開発状況と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¹⁰⁾、それに付随して、「原型炉開発に向けたアクションプラン」^{11)・12)}と「项目的解説」¹³⁾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を抽出することが必要であるとして、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が検討され、一次まとめとして整理されている¹⁴⁾。

一方、我が国独自のアイデアに基づくヘリカル方式などの研究が核融合科学研究所(NIFS)の大型ヘリカル装置(Large Helical Device:LHD)および大学の装置を用いて進められている。LHDでは2017年に重水素実験を開始し、プラズマの閉じ込め性能が大幅に向上している。ドイツではLHDとほぼ同サイズのモジュラー型ヘリカル装置W7-Xの実験が2015年に開始され、中国では新しいヘリカル型実験装置CFQSの建設が開始されている。

(慣性閉じ込め核融合)

レーザー核融合に関して、国内では、大阪大学が燃料容器に重水素とトリチウム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。これら結果と、米国でのその後検証結果を基に、2009年、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1.8MJ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った。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。

NIFでは、核融合による α 粒子の自己加熱による燃焼が起こり、プラズマの持つエネルギーの6倍の核融合エネルギーが観測されている¹⁵⁾。さらに、核融合燃焼に関する詳細な実験が行われるとともに深層学習による最適化が進められている¹⁶⁾。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¹⁷⁾。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¹⁸⁾。

■原子力安全

原子力の安全性は、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¹⁹⁾。

スリーマイルアイランド原子力発電所2号機事故は、1979年に発生した事故であり、人的ミスなど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、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。

チェルノブイリ原子力発電所4号機事故は、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る。この事故では、安全文化及び固有の安全性の重要性が注目された。過酷事故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んだ。

福島第一原子力発電所事故は、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。事故発生から約10年が経過し、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、再稼働に至ったプラントもある。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、確率論的リスク評価手法、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²⁰⁾、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る²¹⁾。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2022年度上期とされている²¹⁾。

一方、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が進められていた²²⁾が、震災後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²³⁾や新しい抽出剤としてモノアミドを用いる再処理²⁴⁾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。

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、「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」²⁵⁾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

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トンを再処理した我が国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については、我が国では、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。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を設計し、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していた。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にし、我が国と2020年から燃料・材料、熱流動、安全評価などの協力を開始した。高速実験炉「常陽」は新規制基準適合性審査を実施中である。

高温ガス炉については、我が国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、再稼働に向けて準備を進めている。

原子カイノベーションの創出として、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、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国内外で開発されている。

■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。このうち、第1回のレビューは、現在実施中のアクションであり、2020年-2021年頃に各進捗状況が確認される。具体的な達成目標として、ITER技術目標達成計画の作成、定常高ベータ化準備研究推進、ITER超伝導コイル等の主要機器の製作技術の確立、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）研究開始、JT-60SA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原子炉照射データを80dpaレベルまで取得し核融合類似の中性子照射下環境の試験に供する材料を確定、核融合中性子源概念設計の完了、コールド試験施設でのブランケット設計データ取得、ダイバーター開発指針の作成、超伝導コイル要素技術等炉工学開発計画作成、原型炉全体目標の策定や原型炉概念設計の基本設計などがある。続いて、ITERの運用開始が予定されている2025年頃から数年以内に実施される第2回C&R項目がまとめられている。その内容として、JT-60SAによる高 β 非誘導電流駆動運転達成、ITER運転開始、低放射下フェライト鋼の80dpaまでの重照射データの検証、ブランケット及びダイバーター機能材料の初期照射挙動の評価やリチウム確保技術の原理実証、核融合中性子源の建設開始及び材料照射データの取得計画作成、各種炉工学技術のスケール

規模開発計画と施設概念の設計、発電ブランケットの基盤技術整備並びにITER-TBMの1号機製作と安全性確認試験の完了、原型炉の概念設計の完了などが挙げられる。最終的にITERのDT燃焼実現の確認後に行われる原型炉建設への移行判断までに実施完了すべき項目として、ITERによるQ=10程度以上（数100秒程度以上）の維持と燃焼制御、ITER非誘導電流駆動プラズマの実現、JT-60SAによる安定な高 β 定常運転領域の実証、運転保守を通じた統合化技術の確立、リチウム確保技術の確立、核融合中性子源によるブランケットとダイバーター機能材料の初期照射データ取得、原型炉工学設計を裏付ける炉工学技術の確立、ITERによるトリチウム回収、社会受容性と実用化段階における経済性の見通しを得ての原型炉工学設計の完了、安全規制法令規制の方針策定などが挙げられる。

ヘリカル型の磁場閉じ込め形式の炉をめざした実験が、日本では核融合科学研究所（NIFS）の大型ヘリカル装置（LHD）を使って行われている。約50分の連続運転などヘリカル型の特徴を生かした実験が進められてきた。2017年より重水素実験が行われ、重水素を用いると軽水素に比べて閉じ込め性能が向上する「同位体効果」をヘリカル型で初めて実証するとともに、イオン温度1億2千万度（10 keV）までの加熱に成功している。海外ではモジュラータイプのヘリカル核融合装置（W7-X）がドイツのマックスプランク研究所で2015年に完成し、運転が始められている。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。

（慣性閉じ込め方式核融合）

レーザー核融合に関して、米国で機械学習や深層学習などAI技術を取り入れた最適化が進められている。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マーベルフュージョン社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。

■原子力安全

新検査制度については、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年下半年期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²⁶⁾。新検査制度は、米国の原子炉監督プロセス（reactor oversight process）に基づくものであるが、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である。

原子力発電所・研究炉の再稼働と廃止措置については²⁷⁾、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）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

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分

適合し、運転を再開している。一方、再稼働せず、廃止措置を選択する原子力発電所、研究炉の数も増えた。

■再処理

日本原燃は、六ヶ所再処理工場の竣工時期を2021年度上期から2022年度上期に1年間延長した。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■新型原子炉

ナトリウム冷却高速炉については、ロシアでは、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2030年に建設が着工する見込みであり、世界で最も実用段階に近い。中国では、中国高速実験炉（CEFR）が2014年12月に100%出力運転を達成し、実証炉CFR600が2017年12月に建設開始され2023年に完成予定である。米国では、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年度から最終設計フェーズに入り、2025年までに建設する計画がある。

高温ガス炉については、中国では実証炉が建設され、2018年に運転開始され、2020年に2基目と接続された。インドネシアでは、小型炉の詳細設計が2018年に開始した。ポーランドは我が国と実施取決めに2019年に締結し、官民一体となって鋭意協力を進めている。

米国では、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、5～7年以内に実証可能な先進型原子炉、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、2030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する公募を行った。多くのプロジェクトを立ち上げ、商業原子力技術における国際的リーダーシップの再構築を狙っている。2020年7月には「原子力エネルギーリーダーシップ法案（Nuclear Energy Leadership Act：NELA）」を盛り込んだ予算法案が上院で可決された。

カナダでは、政府が2018年11月に小型モジュール炉（SMR）開発のロードマップを発表した。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。原子力研究所内に2026年までに実証炉を建設する計画で、2019年に4社（熔融塩炉と高温ガス炉）を選定した。地方自治体によりSMR開発に支持が表明され、規制機関において12件もの設計審査が申請されている状況であり、SMR開発が非常に活発になっている。

英国では、2018年から先進モジュール炉（AMR）の実行可能性調査を行い、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、気候変動対策のために原子力発電を活用していくという方針を堅持している。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分

■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。その実験施設が、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た。今後、2025年にプラズマ点火、2035年に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化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BA活動の一環としてJT-60SA計画をITER計画と並行して推進、2020年にプラズマ点火を達成して運用開始し、高ベータ非誘導電流駆動運転の達成を目指している。

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が解決すべき課題である。

（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。欧州においては、ドイツのベンチャー企業への大型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。また中国では、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、中国物理研究所、上海交通大学の3機関の連携で立ち上がった。

一方、我が国では、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実験へ参加と連携協力が進められている。さらに高繰り返し大型レーザー技術の開発が大阪大学や浜松ホトニクスなどで進み、10年以内に未臨界レーザー核融合発電炉²⁸⁾を実現する計画とともに実証炉を目指したロードマップが作成されている。

■原子力安全

・ NEXIP イニシアチブ（原子力イノベーション）²⁹⁾

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革新炉の研究開発が進められている。

・ 原子力施設の安全性向上対策^{30), 31)}

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・竜巻などの外部ハザード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。

・ ARC-Fプロジェクト³²⁾

原子力研究開発機構（JAEA）が提案した国際研究協力プロジェクトとして、OECD/NEAの主催により、「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（Analysis of Information from Reactor Buildings and Containment Vessels of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, : ARC-F）」プロジェクトが実施されている。このプロジェクトでは、過酷事故解析コードによる1F事故進展、放射性物質移行挙動のより詳細な推定、原子炉建屋・格納容器内部調査から得られたデータ・情報の集

約・管理、今後取り組むべき課題の明確化などを目指している。なお、このプロジェクトは、2018年までOECD/NEAで実施されていたBSAFプロジェクトの後継となる。

■再処理

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、技術実証した。

(5) 科学技術的課題

■新型原子炉

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、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る。

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。

溶融塩炉、鉛冷却高速炉、小型モジュール炉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、取り組むべき研究テーマは多方面にわたる。

軽水炉では、ATFの開発が進められており、2018年から実炉で照射用集合体が装荷され、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。3次元積層造形技術については、2020年5月に初めて商用原子炉に設置され、今後も試験データ拡充や規格基準化が必要となる。

■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（トリチウム）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計画を含めたシステム開発が重要である。構造材料や機能材料に係るデータベースや、熱流動、トリチウム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。また、原型炉に向けた核融合中性子源の活用も重要である。

（慣性閉じ込め核融合）

米国を中心に行われているレーザー核融合中心点火方式では、爆縮全体を通した流体力学的不安定性の抑制が課題である。ターゲット製作、供給方式、レーザー照射条件などの最適化が重要であり、AI技術を取り入れた最適化が行われている。

我が国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ト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である。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である。

■原子力安全^{30), 31), 33)}

過酷事故進展解析・過酷事故対応については、個々の物理現象に対して実験などによる検証データの取得を進めるとともに、機構論的な解析モデルの開発を進めることが望まれる。また、過酷事故発生時の効果的な意思決定方法などについて検討する必要がある。

リスク評価に関する研究テーマとして、包絡的外的ハザード評価手法の開発、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、などが挙げられる。

安全余裕の拡大と定量化については、新型被覆管の導入、最新の解析手法の導入などを進める必要がある。また、これと併せて、新しい解析コードや評価手法の認証方法を確立する必要がある。

シミュレーション手法の高度化については、様々な外的事象に対するシミュレーション手法の開発に取り組む必要がある。

原子力防災については、オンサイト・オフサイトの連携技術の開発が挙げられる。

■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ある。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必要な基盤研究を進め、技術基盤を維持することが重要になる。多様な革新的原子炉の開発は将来の不確実性に備えた選択肢となる。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。

世界では、投資リスクを考慮して小型モジュール炉が指向されている。欧米では、民間主導の開発が発達している。我が国でも、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小型モジュール炉の開発には検討の余地がある。ただし社会的ニーズを明確化した上で、開発段階から小

型モジュール炉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、投資リスク低減を図るなど、慎重な検討が求められる。

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、ATFや新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。政策的課題としては、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を構築することが求められている。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る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」³⁴⁾が纏められている。

磁場閉じ込め型核融合においては、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、関連する国際協力に戦略的に取り組むことが求められる。

慣性閉じ込め型核融合においては、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りつつある。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（2020年6月）されており³⁵⁾、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、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今後の課題である。

■原子力安全^{26), 36), 37)}

・新検査制度の定着と効果的な運用

2020年4月から新検査制度の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）の検討など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。

原子力の利用に係る取組みとしては、「社会に受容されるリスクレベル」に関するコンセンサス作りの一つの方策として安全目標の設定があり、これについての議論が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進められているところである。同時に、今後は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、不確実さの取り扱いも含めた統合的意思決定プロセスの構築に取り組んでいく必要がある。

過酷事故進展解析・過酷事故対応については、福島第一原子力発電所事故を踏まえ、シビアアクシデント研究を中心とする安全研究基盤の充実強化が図られつつあるが、継続してこの取り組みを行う必要がある。

原子力防災については、現在、原子力規制委員会は緊急時対応に関し、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している。一方、立地地域からは、緊急時対応の際、放射性物質の拡散予測を参考にしたいとの声があり、どのように対応していくかが課題となっている。

原子力人材については、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に懸念が生じている。どのように安全を確保する人材を確保していくかが課題である。

■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。

我が国の放射性物質、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。我が国全体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建設計画はないが、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	△	→	●福島第一原子力発電所事故の教訓、知見を踏まえ、炉心熔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。
	応用研究・開発	△	→	●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、再稼働の準備中。 ●ナトリウム冷却高速炉の開発は縮小化されているが、日仏・日米を中心に国際協力で技術開発を維持しつつ、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等の他機関と協議して見直している。 ●高温ガス炉については、ポーランドと2019年に実施取決めに締結し、我が国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。また、IAEAにおいて安全基準を作成した。 ●高速炉開発会議戦略ワーキンググループは、高速炉戦略ロードマップを2017～2018年で検討してきたが、2018年12月に、ロードマップの骨子を発表。今後、以下の3つのステップで推進する。①競争を促し、様々なアイデアを試すステップ（当面5年間程度）、②絞り込み、支援を重点化するステップ、③今後の開発課題及び工程について検討するステップ。これを踏まえて、原子力イノベーション促進（NEXIP）プログラムが2019年から開始された。 ●NEXIPでは、民間の創意工夫による原子力イノベーションを創出するため、安全性向上と革新的原子炉に関する開発を推進している。

米国	基礎研究	△	→	●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。 ●大統領の諮問委員会であるブルーリボン委員会での結論（2012）に基づき、基礎・基盤研究に特化して着実に研究開発を実施している。 ●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。
	応用研究・開発	○	↗	●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2019年にNRCの設計認証第4フェーズを終了し、INLサイトに建設し、2026年に運転開始予定。 ●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、INLサイトで2020年代半ばに建設予定。 ●X-energy社Xe-100（高温ガス炉）は2030年までに建設予定。 ●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。 ●エネルギー省は、5～7年以内に実現可能な先進原子炉2件を選択するため、先進原子炉設計実証プログラム（ARDP）を2020年に公募。 ●エネルギー省は、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、資金援助を含めて積極的に開発を推進。 ●NRCはカナダ規制機関CNSCと統合型溶融塩炉（Terrestrial Energy社）の共同技術審査を2019年から開始。 ●NRCは2019年12月、SMR及び非軽水炉を含む新型炉に、SMR及び新型炉の安全性や性能に基づいて、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提案。 ●国防総省は、2020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、ウェスチングハウス（WH）社、BWXTテクノロジーズ（BWXT）社、X-エナジー社の3チームを選定し、それぞれが開発中の小型炉で設計を開始する契約を締結した。
欧州	基礎研究	△	→	【EU】 ●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。 【ポーランド】 ●日本の技術を導入して高温ガス炉を導入しようとしている。
	応用研究・開発	○	→	【欧州】 ●計画として、ガス冷却高速炉ALLEGROはスロバキアを、鉛冷却高速炉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。また、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。 【フランス】 ●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することとし、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。 【英国】 ●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。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

中国	基礎研究	○	↗	●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。
	応用研究・開発	◎	↗	●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が2017年に建設開始され2023年に完成予定である。ロシアの協力により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、精華大学により実験炉HTR-10の知見を踏まえて、実証炉HTR-PM210が2018年に運転開始し、2020年3月に2基目が接続された。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。 ●軽水炉SMR実証プロジェクトに着手すると2019年7月に発表された。
韓国	基礎研究	△	→	●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	△	↘	●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実証炉のNHDD計画が設計段階だが進められている。 ●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	△	→	●カナダ原子力研究所（CNL）は、2017年4月に公表した今後10年間の「長期戦略」の中で、2026年までにCNLのサイト内で少なくとも1基、実証炉を建設するという目標を明示した。2017年中にSMRの開発企業から19件の関心表明を受けており、2018年4月に開始した全4段階の審査を進めている。2019年11月に候補企業4社（モルテックス社：ピン型溶融塩炉、Kairos社：フッ化物溶融塩炉KP-FHR、USNC社：高温ガス炉、テレストリアル社：一体型溶融塩炉IMSR）を選定した。
	応用研究・開発	○	↗	●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。同月に、ニューブランズウィック州は、ARC-100（ナトリウム冷却高速炉）を支持すると表明。 ●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、8件（高温ガス炉1、軽水炉3、溶融塩炉2、Na冷却高速炉1、鉛冷却高速炉1）の評価を実施中。
ロシア	基礎研究	○	→	●鉛冷却高速炉BREST300（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、幅広く基盤技術を開発すること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している。 ●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、2025年に運転開始予定である。

	応用研究・開発	◎	↗	●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。 ●実用炉である BN1200 も開発中であり、安全性については第 4 世代原子力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、2032 年に完成する見込みであったが、建設開始が 2030 年に遅れる見通しであることが 2019 年 8 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 kW_e × 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。
インド	基礎研究	△	→	●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	△	→	●ナトリウム冷却高速炉では実験炉 FBTR が 1985 年から運転中、原型炉 PFBR (500 MWe) が 2015 年に完成しており、2020 年に臨界を予定している。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	○	→	●文科省核融合科学技術委員会が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。 ●量子科学技術研究開発機構 (QST) 六ヶ所核融合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 DD 実験が実施され、炉閉じ込め条件の改善、10 keV 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	◎	→	●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た。 ●QST 那珂核融合研究所に、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 年より運転開始。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 六ヶ所核融合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し、核融合中性子源研究を推進、A-FNS 概念報告書を纏めた。 ●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。

2.1
俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

				●加工や加速器用レーザーとして有望な高繰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	○	↘	●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、核融合燃焼に関する詳細な実験が行われるとともに深層学習による実験の最適化が進められている。 ●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。
	応用研究・開発	◎	→	●ITER初期から中心的役割を果たしてきた。近年、米国エネルギー省は、核融合をエネルギー研究ではなく、科学研究と位置づけして核融合研究を進めているが、徐々にエネルギー研究としての位置付けが復活してきている。 ●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	○	→	【EU】 ●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する。 ●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。 【フランス】 ●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。 【ドイツ】 ●大型融資を受けた独逸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	◎	↗	●ITERホスト国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と並行して、原型炉に向けて日本とBA活動を展開している。 【ドイツ】 ●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。 【フランス】 ●LMJの一部ビームの共同研究が公募・実施中。
中国	基礎研究	○	↗	●ITER参加国の一つで、資金を出しITER建設に寄与するとともに、合肥に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 の建設が開始。 ●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に研究が開始。（上海）

	応用研究・開発	◎	↗	●ITERの次の実験炉国内計画として、トリチウム燃料サイクルを含む中国核融合工学実験炉CFETRを計画 ●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。

■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³⁴⁾。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、原子力災害に対する危機管理のための欧州プラットフォーム (NERIS) 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。

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

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、原子力保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	◎	↗	●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	○	→	●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	◎	↗	●保全、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	○	→	●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	○	↘	●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。 ●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	○	→	●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	△	→	●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	○	→	【EU】 ●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 【フランス】 ●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	△～○	→	【EU】 △→ ●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。 【フランス】 ○→ ●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。 ●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	○	↗	●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	○	↗	●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	○	→	●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	△	→	●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。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：特に顕著な活動・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) テレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・破壊力学（環境・エネ分野 2.1.17）
- ・計算工学（環境・エネ分野 2.1.18）

参考・引用文献

- 1) 原子力委員会, 「平成29年度版原子力白書」(2018), <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/hakusho2018/zentai.pdf> (2021年2月12日アクセス)
- 2) The Generation IV International Forum, https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9260/public (2021年2月12日アクセス)
- 3) The World Nuclear Association, “Fast Neutron Reactors”, <http://www.worldnuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors.aspx> (2021年2月12日アクセス)
- 4) 文部科学省, 「もんじゅ研究計画」(2013), http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/061/houkoku/1344598.htm (2021年2月12日アクセス)
- 5) 経済産業省資源エネルギー庁, 「エネルギー基本計画」, <http://www.meti.go.jp/press/2018/07/20180703001/20180703001.html> (2021年2月12日アクセス)
- 6) 一般財団法人エネルギー総合工学研究所 高温ガス炉プラント研究会, 「高温ガス炉の概要」, http://www.iae.or.jp/htgr/pdf/00_summary01/00_1.pdf (2021年2月12日アクセス)
- 7) 岡本孝司, 一般財団法人エネルギー総合工学研究所, 「高温ガス炉の課題」(2013), http://www.iae.or.jp/htgr/pdf/02_result/information/02result_20130903_04.pdf (2021年2月12日アクセス)
- 8) 核融合研究運営会議, 「第一段階研究開発と評価」, <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/ugoki/geppou/V20/N07/197525V20N07.html> (2021年2月12日アクセス)
- 9) 原子力委員会, 「第三段階研究開発基本計画」, http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/kakuyugo2/siryo/kakuyugo05/siryo2_3.pdf (2021年2月12日アクセス)

- 10) 核融合科学技術委員会, 「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」,
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1400117.htm (2021年2月12日アクセス)
- 11) 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、部会トピックス」 60巻10号 (2018) : 637-641, https://doi.org/10.3327/jaesjb.60.10_637
- 12) 核融合科学技術委員会資料, 「原型炉開発に向けたアクションプラン」,
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/shiryo/_icsFiles/afielddfile/2017/12/28/1399735_003.pdf (2021年2月12日アクセス)
- 13) 核融合科学技術委員会資料, 「チェック&レビュー項目」,
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1400117.htm (2021年2月12日アクセス)
- 14) 核融合科学技術委員会資料, 「原型炉研究開発ロードマップについて (一次まとめ)」,
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1408259.htm (2021年2月12日アクセス)
- 15) S. Le Pape, et al., “Fusion Energy Output Greater than the Kinetic Energy of an Imploding Shell at the National Ignition Facility”, *Phys. Rev. Lett.* 120 (2018) : 245003, DOI : <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.245003> (2021年2月12日アクセス)
- 16) Rushil Anirudh, et al., “Improved surrogates in inertial confinement fusion with manifold and cycle consistencies”, *PNAS* 117, no. 18 (2020) : 9741-9746, <https://www.pnas.org/content/117/18/9741> (2021年2月12日アクセス)
- 17) V. Gopalaswamy et al., “Tripled yield in direct-drive laser fusion through statistical modelling”, *Nature* 565, No. 7741 (2019) : 581-586, doi : 10.1038/s41586-019-0877-0
- 18) K Matsuo, et al., “Petapascal Pressure Driven by Fast Isochoric Heating with a Multipicosecond Intense Laser Pulse”, *Phys. Rev. Lett.* 124, (2020) : 035001, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.035001>
- 19) Lee McCormick (著), 西原 英晃, 杉本 純, 村松 健(訳), 「原子力発電システムのリスク評価と安全解析」 (丸善出版, 2013) , <https://www.amazon.co.jp/%E5%8E%9F%E5%AD%90%E5%8A%9B%E7%99%BA%E9%9B%BB%E3%82%B7%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%A0%E3%81%AE%E3%83%AA%E3%82%B9%E3%82%AF%E8%A9%95%E4%BE%A1%E3%81%A8%E5%AE%89%E5%85%A8%E8%A7%A3%E6%9E%90-LEE-McCORMICK/dp/4621086316> (2021年2月12日アクセス)
- 20) 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』 57巻8号 (2015) : 511-516, https://doi.org/10.3327/jaesjb.57.8_511
- 21) 日本原燃株式会社, 「再処理施設の工事計画および使用計画の変更届出について」 (2020) , <https://www.jnfl.co.jp/ja/release/press/2020/detail/20200821-1.html> (2021年2月12日アクセス)
- 22) 日本原子力研究開発機構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研究開発室, 「研究開発室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-」『JAEA-

- Evaluation』3巻(2011), <https://www.jaea.go.jp/04/fbr/publish/files/archives/JAEA-Evaluation-2011-003.pdf> (2021年2月12日アクセス)
- 23) Yamamoto, et al., “Development of U and Pu Co-Recovery Process (Co-Processing) for Future Reprocessing”, *Proceedings of International Nuclear Fuel Cycle Conference (GLOBAL 2013)*, Salt Lake City, USA, (2013) : 7797
- 24) Y. Ban, et al., “Uranium and plutonium extraction from nitric acid by N,N-di (2-ethylhexyl) -2,2-dimethylpropanamide (DEHDMPA) and N,N-di (2-ethylhexyl) - butanamide (DEHBA) using mixer-settler extractors”, *Solvent Extr. Ion Exch.* 32 (2014) : 348-364, <https://doi.org/10.1080/07366299.2013.866850> (2021年2月12日アクセス)
- 25) 「エネルギー基本計画、平成30年7月3日閣議決定」, http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf (2021年2月12日アクセス)
- 26) 原子力規制庁, 「新検査制度見直しについての説明」, <https://www.nsr.go.jp/data/000191200.pdf> (2021年2月12日アクセス)
- 27) 原子力規制委員会, 「規制基準適合性審査の状況」, <https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/index.html> (2021年2月12日アクセス)
- 28) A. Iwamoto and R. Kodama, “Conceptual design of a subcritical research reactor for inertial fusion energy with the J-EPoCH facility”, *High Energy Density Physics* 36, 100842 (2020) : 1-8, (2021年2月12日アクセス不能)
- 29) 資源エネルギー庁・文部科学省, 「原子力イノベーションの追求について」, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/020_03_00.pdf (2021年2月12日アクセス)
- 30) 電気事業連合会, 「電気事業者の原子力安全研究への取り組み」, http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/anken_wg/pdf/009_01_02.pdf (2021年2月12日アクセス)
- 31) 日本原子力学会熱流動部会, 「熱水力安全評価基盤技術高度化戦略マップ 2017 (熱水力 RM 2017) 28年度報告書」, http://www.aesj.or.jp/~thd/committee/TH-RM/TH-RM_r.pdf (2021年2月12日アクセス)
- 32) 日本原子力研究開発機構, 「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 (ARC-F)」, <https://www.jaea.go.jp/02/press2018/p19012401/> (2021年2月12日アクセス)
- 33) 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」, <https://www.nsr.go.jp/data/000271464.pdf> (2021年2月12日アクセス)
- 34) 核融合科学技術委員会資料, 「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」, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/1407701.htm (2021年2月12日アクセス)
- 35) 日本学術会議提言, 「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6月16日, <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t291-2.pdf> (2021年2月12日アクセス)
- 36) 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 (2019年度報告書)」,

http://www.aesj.or.jp/~safety/2019_KensaWG_Report_v1.0.pdf（2021年2月12日アクセス）
37) 文部科学省,「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」, <https://www.kenkyu.jp/nuclear/index.html>（2021年2月12日アクセス）

2.1

俯瞰区分と研究開発領域 エネルギー区分