

特集

次世代原子力システム
技術の最前線

原子力技術をめぐる国内外の概況

都筑 和泰

1. はじめに

原子力発電は、商用化から60年以上の実績を有する大規模で安定な低炭素電源であり、カーボンニュートラル実現に向けて重要な役割を担うことが期待されている。ここではその開発・導入に係る動向を整理する。

2. 原子力発電をめぐる世界の概況

原子力発電は、1950年代半ばに最初の商業用原子力発電所が運転を開始して以降60年以上にわたり、世界各地に建設され、着実に運転されてきた。2023年5月の時点では、439基が運転中となっており、世界の電力の約10%を供給している¹⁾。建設中の炉は、中国、ロシアを中心に50基程度あり、これらが運転を開始していくことで、当面は発電容量が増加していくことが見込まれる。

原子力の最大の特徴は発電時にCO₂を排出しないことである。このため、近年は、カーボンニュートラル実現に資する技術として、その重要性が再認識されてきている。

炉型としては、現在は軽水炉が主流となっているが、将来を見据えた革新炉の検討も行われている。商用レベルではロシアの高速炉であるBN-800、中国の高温ガス炉であるHTR-PMが稼働中である。設計中・計画中の革新炉としては、小型モジュール炉(SMR)の開発が各国で活発に進められている。SMRについても軽水炉をベースとしたものだけでなく、それ以外の技術(高速炉、高温ガス炉、熔融塩炉)をベースとしたものの開発も進められている。さらに、商用炉としての実用化は2050年までには困難か

も知らないが、核融合炉の開発研究も活発についても、国家プロジェクトとしてだけではなく、民間プロジェクトとして多数行われている。

3. 国内の現状

国内においては、2010年の第3次エネルギー基本計画²⁾においては、2050年までに少なくとも14基の原子力発電所を建設し、国内の電力の約半分を原子力発電にて供給するといった積極的な原子力政策が示されていた。しかし、2011年3月の東北地方太平洋沖地震とその後の福島第一原子力発電所事故を受けて、国内の原子力発電所は一旦全て停止した。その後徐々に再稼働が進んでいるものの、2024年1月時点で、再稼働は12基、再稼働準備中15基(うち、5基は設置変更許可取得済)、廃炉を決めた炉24基など、厳しい状況が続いてきている³⁾。

それでも、2022年の夏頃よりその状況は変わりつつある。2022年8月の第2回GX実行会議の資料においては、「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」という文言が明記された⁴⁾。2023年2月10日に閣議決定された「GX実現に向けた基本方針」において、原子力については「第6次エネルギー基本計画」の範囲内としつつも、「将来にわたって持続的に原子力を活用するため、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。地域の理解確保を大前提に、まずは廃止決定した炉の次世代革新炉への建て替えを対象として、六ヶ所再処理工場の竣工等のバックエンド問題の進展も踏まえつつ具体化を進めていく。」とし、また、「現行制度と同様に、運転期間は40年、延長を認める期間は20年との制限を設けた上で、一定の停止期間に限り、追加的な延長を認めることとする。」としている。また、その参考資料には、「再稼働の先の展開を見据えた対応」として、「次世代革新炉の開発・建設の取組」について、「革新軽水炉」、「小型軽水炉」、「高速炉」、「高温ガス炉」、「核融合」のロードマップが示されている⁵⁾。



Recent Status About Nuclear Technology
for Japan and Other Countries
Kazuhiro TSUZUKI
1997年 総合研究大学院大学 数物化学研究
科 核融合科学専攻(博士)
現在 一般財団法人 エネルギー総合工学
研究所 原子力技術センター 部長
連絡先；〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-
2 新橋SYビル6F
E-mail tsuzuki@iae.or.jp

2024年1月31日受理

4. 原子力の今後の見通し

気候変動に関する国際連合枠組条約の第28回締約国会議（COP28）において、2023年12月2日付けで「原子力エネルギーを3倍にする宣言」が採択された⁶⁾。またIAEAの2023年の見通しでは高ケースで890 GW、低ケースで458 GWという値が提示されている⁷⁾。図1にはケースごとの発電量の推移を示すが、高ケースの発電量は3倍までには達しないものの、2022年の約2.7倍である。

地域別に見ると、高ケースでの導入量が特に大きい（現状+50 GW程度以上）のは、北米、東欧、中央・東アジア、南アジアである。中でも中央・東アジアの導入規模が一番大きい。アフリカ、西アジアも高ケースではそれぞれ20 GW程度とされている。高ケースと低ケースの比較では、全ての地域で概ね2倍前後となっている。すなわち、特定の地域のみ急成長に期待するというよりは、世界全体に原子力が普及していくというシナリオとなっている⁷⁾。このよ

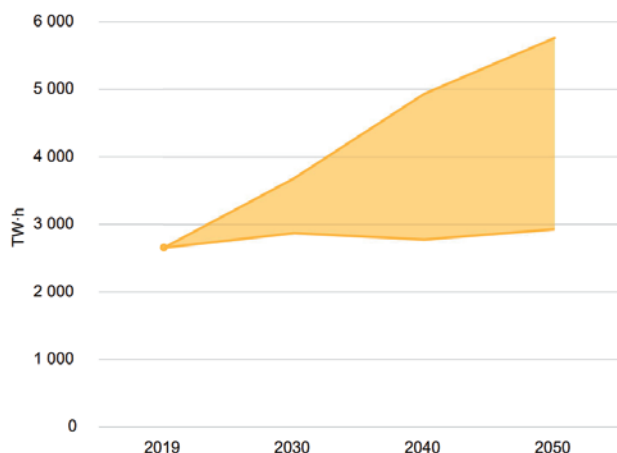


図1 IAEAによる世界の原子力発電量見通し（文献7より引用）

うな原子力高成長シナリオを、既存の発電所の一部が運転停止をしていく中で実現していくためには、2050年に向けて約600 GWの新設が必要という計算になる。単純計算で毎年20 GW（百万kWの原子炉20基分）を建設し続けることが必要であり、かなり野心的な数字と言える。

一方、国内におけるGX会議の検討では、原子力については最大ケースでも再稼働の着実な実施と60年程度以上の運転期間を想定したような数値となっている。この場合、2050年断面では、電力の約20%を供給することになる。図2においては③の原子力活用シナリオのみが20%程度、残りのシナリオではその半分またゼロとなっている⁸⁾。ここで、原子力10%程度のシナリオは2050年までは新規建設なしでも実現可能であるが、多くの原子力発電所がその後数10年程度で運転停止に至るということには注意を要する。すなわち、2050年以降も同程度以上の寄与を原子力に期待するのであれば、原子力発電所の新規建設が必須であるといえる。

5. 革新炉開発の現状

前述のとおり、世界的には原子力を増加させる方向で検討が進められている。このようなシナリオの実現性については不確実な部分も大きいですが、このシナリオを進めるにあたっては、安全性・経済性に優れた新型炉の開発を進めることもまた重要である。海外、特にアメリカ、イギリス、カナダなどにおいて、小型モジュール炉（SMR）を含む革新炉の開発が活発に進められている。SMRの定義はIAEAによると⁹⁾、

- ・小型：通常の原子力発電所の数分の1以下、典型的には電気出力300 MW以下
- ・モジュール：系統・機器を工場で組み立てて、立地地点にユニットとして輸送可能

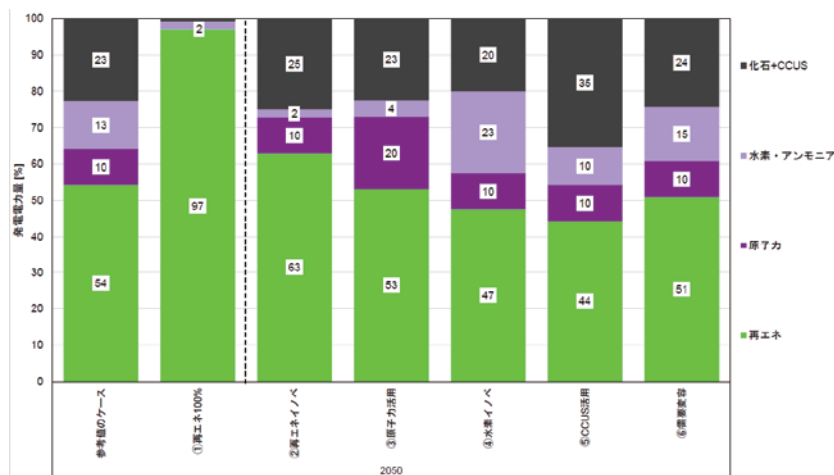


図2 2050年の発電シェアの試算結果例（文献8より引用）

・原子炉：核分裂反応により熱エネルギーを生成するという程度が共通項。開発中の炉型には、高速炉、ガス炉、熔融塩炉といったいわゆる第4世代炉を含む。

である。これは唯一無二の定義ではなく、例えばイギリスにおいては軽水炉ベースの小型炉をSMR、高速炉・高温ガス炉など革新炉ベースの小型炉をAMRと称している。

IAEAの革新炉データベースであるARIS (Advanced Reactor Information System)¹⁰⁾には60~70基の革新炉が登録されている。図3に文献11で取りまとめられている国ごとに開発中の炉型をリストアップしたものを示す。多くの国が多様な炉型の開発を進めているということがわかる。

図には示されていないが、開発中の炉型も以下を含む多様な構成となっている。

- ・軽水炉型 SMR
- ・金属燃料高速炉
- ・高温ガス炉
- ・超小型炉
- ・浮体式原子炉

これらの多くは運転開始目標を2030年前後に掲げている。また本国だけではなく、途上国を含む多くの国において導入に向けたフィジビリティスタディを行うとともに、建設に向けたサプライチェーン構築も着実に進めてきている。

いずれの炉も、主に経済性をPRしている。一般に大型炉をそのままの形で小型化すれば、スケールメリットを失うことで発電単価は割高となるが、SMRにおいては、シンプルな設計と量産効果により、最終的には既存の軽水炉よりも安くすることが可能としている。安全性を損なわずにシンプルな構造を実現する上でキーになるのは、小型であることと、受動安全系、固有の安全性である。また、発電コストを下げるだけでなく、様々な付加価値をつけることで、総合的な競争力を高めるようにしている。例えば以下のような点である。

- ・多目的利用：特に高温熱源や水素製造
- ・プラント規模：グリッドの規模に応じた最適化、小型炉の可能性
- ・安全性：固有の安全性、受動安全など
- ・出力変動対策：再生可能エネルギーとの共存性
- ・核変換：核燃料増殖、プルトニウム利用（プルサーマル）、廃棄物減容

一方、今後既設の炉の建て替えや新設を想定した時に小型の炉を複数作ることと、大型炉一つ作ることでどちらがよいかについては議論が残る。現時点で建設中・計画中の炉の大部分は結局大型軽水炉であるという中、このまま軽水炉導入が進むか、小型革新炉が一定のシェアを確保するか重要な分岐点に来ている。

6. バックエンド関連技術

6.1 再処理

天然ウランには核分裂性物質であるウラン235が0.7%程度であり、残りはウラン238である。軽水炉においてはウラン235の比率を約5%まで高めた状態で炉心に装荷する。ウラン238は直接エネルギー生成に寄与しないが、原子炉内でウラン238からプルトニウムが生成され、これがエネルギー生成に寄与している。

原子炉から取り出された使用済燃料には燃え残ったウラン235と炉内で生成されかつ燃え残ったプルトニウムが、典型的にはそれぞれ1%程度ずつ含まれている。これを再処理により有効利用することで、使用済燃料を再処理せずに直接高レベル放射性廃棄物として処分するよりも、①1~2割の資源有効利用をはかり、②高レベル放射性廃棄物量を1/4に低減し、③高レベル放射性廃棄物の有害度合いが天然ウラン並みまで低減する期間を10万年から8千年に短縮することができる¹²⁾。さらに、高速増殖炉サイクルが確立すれば、ウランの資源量を実質的に約60倍にす

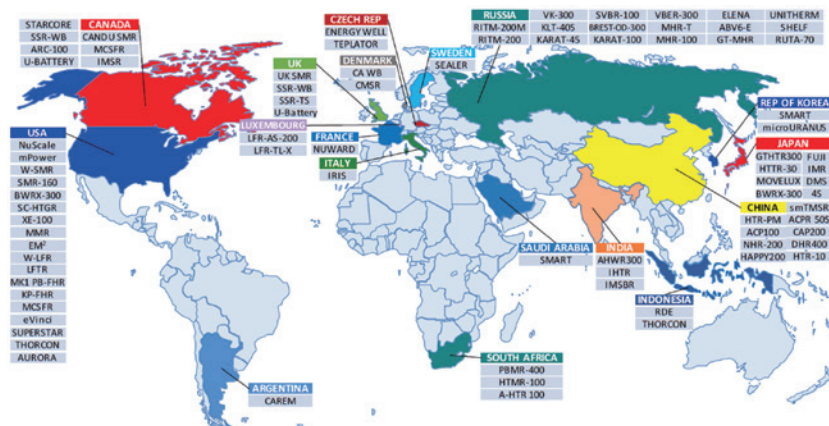


図3 世界におけるSMR開発状況 (文献11より引用)

ることが可能である。

国際的には使用済燃料の再処理を行うことを想定している国は日本の他、フランス、中国、インド、ロシア、イギリスなどそう多くはない。他の国は使用済燃料を直接処分することを想定している。

6.2 放射性廃棄物の処理・処分

原子力発電所などから出る廃棄物のうち、放射性物質を扱っている区域から出るさまざまな廃棄物を「放射性廃棄物」として各施設で管理している。これらの放射性廃棄物は、人間の生活環境に影響がないように、廃棄物の種類と放射性物質の濃度に応じて適切な処分を行う必要がある。

原子力発電所の運転からは紙、布、廃液、金属などが排出されるが、これらは、一般に低レベル廃棄物である。また、解体時にはコンクリート・金属等が大量に排出されるが、これらの約95%は放射性廃棄物でさえなく、また、全体の5%程度を占める放射性廃棄物についても、その大部分は放射線レベルが極めて低いものである。

排出物の中で最も放射線レベルが高いのは使用済燃料、またはそれを再処理した後に排出されるガラス固化体などである。これらについては、地下300 mに埋設すること

を主案として各国が処分場の検討を進めている。

国内では、現在北海道の寿都町及び神恵内村で文献調査が進められている。具体的には、該当地区の、火山・火成活動など、断層活動、隆起・浸食、鉱物資源、未固結堆積物、地形及び地質・地質構造などに関して情報を抽出し、その情報から学術的理解をするために読み解いて、整理を行っている。

参考文献

- 1) IAEA Power Reactor Information System (PRIS)
- 2) 第3次エネルギー基本計画(2010年6月)
- 3) 経済産業省ウェブサイト「原子力発電所の現状」(2024年1月24日時点)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf
- 4) 第2回GX実行会議 資料1「日本のエネルギーの安定供給の再構築」
- 5) GX実行会議報告「GXに向けた基本方針」(2023年2月10日)
- 6) 気候変動に関する国際連合枠組条約の第28回締約国会議 (COP28), "Declaration to Triple Nuclear Energy" (2023.12)
- 7) IAEA Reference Data Series No.1 "Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050" (2023)
- 8) 経産省の基本政策分科会におけるRITE 提出資料「2050年カーボンニュートラルのシナリオ分析(中間報告)」(2021.5)
- 9) IAEA ウェブサイト "Small Modular Reactor", <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>
- 10) IAEA Advanced Reactor Information System (ARIS)
- 11) IAEA, "ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS" (2020)
- 12) 資源エネルギー庁ウェブサイト スペシャルコンテンツ 2020-03-06
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/rokkasho_1.html
- 13) 原子力発電環境整備機構ウェブサイト 文献調査の進捗状況
https://www.numo.or.jp/chisoushobun/ichikarashiritai/pdf/shinchoku_20230221_suitu.pdf