



2023年末に開催されたCOP28において「世界の原子力の3倍化宣言」が合意・採択された。
出典：資源エネルギー庁ウェブサイト https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/cop28_genshiryoku.html

はじめに

2023年2月、岸田文雄内閣において、再生可能エネルギーの導入拡大や安全性確保を大前提とした原子力の最大限活用などにより、化石エネルギー中心の産業構造・社会構造をクリーンエネルギー中心へ転換する「GX（グリーン・トランスフォーメーション）実現に向けた方針」が閣議決定された。

また、2023年12月2日、COP28（国連気候変動枠組条約第28回締約国会議／UAEドバイ）において、日本を含む22カ国が「2050年までに、2020年比で世界全体の原子力発電容量を3倍にする」旨の共同宣言を発表した（翌3日にはアルメニアも賛同し、賛同国は23カ国）。同宣言には、小型モジュール原子炉（SMR）やそのほか先進的な原子炉などの開発・建設を支援することなどが盛り込まれている。

さらに、2025年2月に閣議決定された第7次エネルギー基本計画では、【図1】で示すとおり、新たな安全メカニズムを盛り込んだ次世代革新炉の研究開発を進めるとともに、次世代革新炉への建て替えの具体化を進めていくとしている。

日本は、東京電力福島第一原子力発電所の事故の教訓を生かした次世代革新炉の安全対策などを支援することにより、世界のエネルギー供給や山林伐採の防止など地球環境保全に向けた取り組みを通じて、世界に貢献すべき時がきた。

【図1】



原子力に関する世界の潮流と安全対策 ～原子力の最大限活用で世界に貢献～

東京科学大学 総合研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所 特定教授 ^{な ら ば や し た だ し} 奈良林 直 氏

2025年2月に閣議決定された第7次エネルギー基本計画では、あらためて「S+3E」（安全性、安定供給、経済効率性、環境適合性）を基本的な視点として掲げ、原子力発電については安全性の確保を大前提に、必要な規模を持続的に活用する方針が盛り込まれました。

原子炉工学・原子炉安全工学・エネルギーと環境を専門研究分野とし、内閣府の原子力安全委員会専門委員などを務めてきた著者は、詳細な論拠を示し、日本は今こそ原子力技術で世界に貢献すべき、とメッセージを発信しています。

再エネは不安定で高コスト

2025年2月18日に閣議決定された第7次エネルギー基本計画では従来の「可能な限り原子力依存度を低減する」という文言が削除され、新たな電源開発を進めるために電力会社の投資を促す政策を立てることが明記された。また、原子力の新增設・リプレースが進むように、電力会社が原子力発電所1基を廃炉にした場合、その敷地だけでなく、同じ電力会社の別の原子力発電所の敷地にも次世代革新炉の建て替えを認めることが明記された。

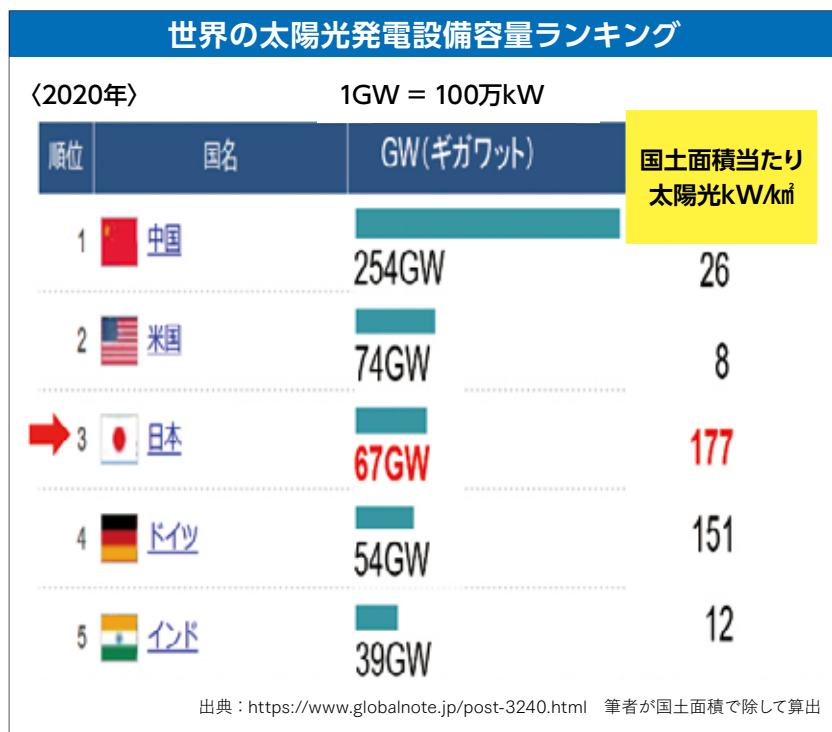
これに先立ち、筆者は2022年2月16日、参議院の資源エネルギーに関する調査会で参考人として招致され、意見陳述とすべての政党の議員の質疑に答弁を行った。

【図2】は、世界の太陽光発電設備容量のランキングである。2020年、日本の太陽光の発電能力は67GWであり、100万kWの原子力発電所67基分に相当する。中国、米国に次いで世界第3位の太陽光発電大国であり、東日本大震災時に運転していた商業用原子力発電所の54基の容量を上回る大規模電源となった。太陽光の発電能力を国土面積で割ると、日本は中国の7倍、米国の22倍の太陽光パネル設置密度になっている。

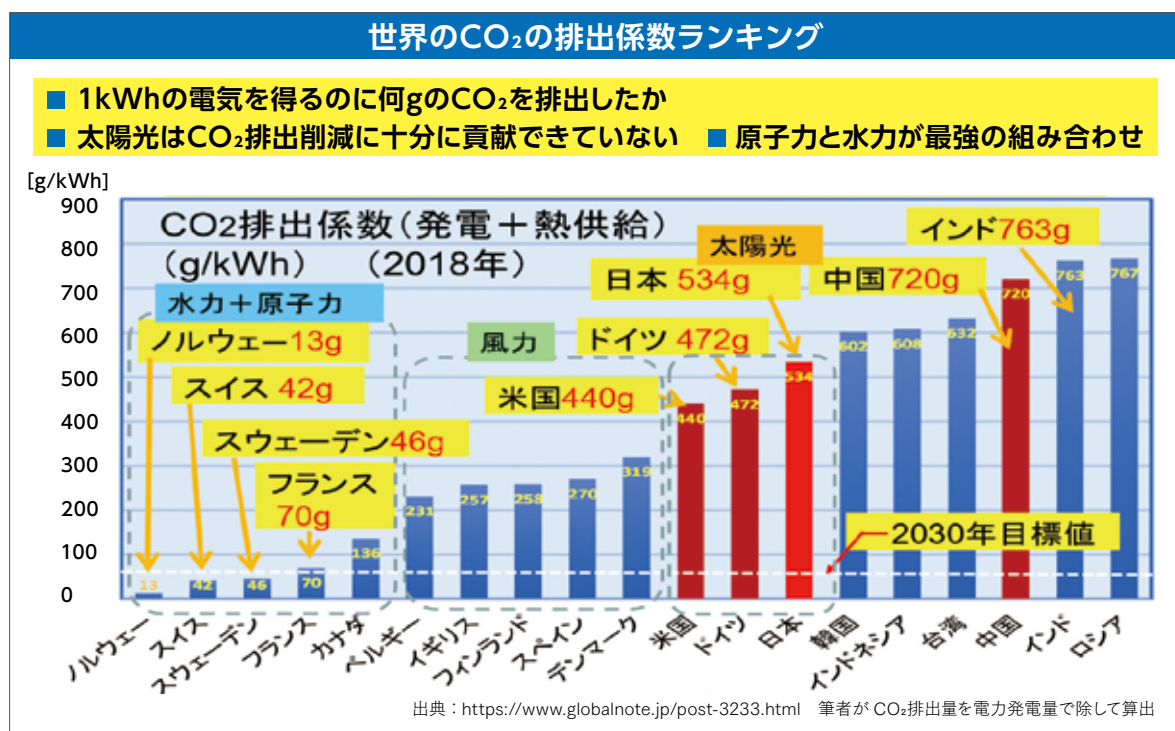
再エネ比率を50%とするためには、太陽光パネルの敷設面積はなんと本州のおよそ1/3を占めることになる。CO₂を吸収して地表を冷やす効果がある森林を伐採して太陽光パネルを敷き詰め、「エコ」の美名のもとに壮大な自然破壊を

行うことになるのだ。2025年の7月、8月は最高気温が40℃を超える地点が出るなど全国で猛暑が続いている。アジアは世界平均のほぼ2倍もの速さで温暖化が進んでいるとの報告もある。日本全体でヒートアイランド化による気温上昇と熱帯のスコールを上回る線状降水帯による集中豪雨が発生し、8月には熊本も能登も深刻な被害を受けた。

【図2】



【図3】

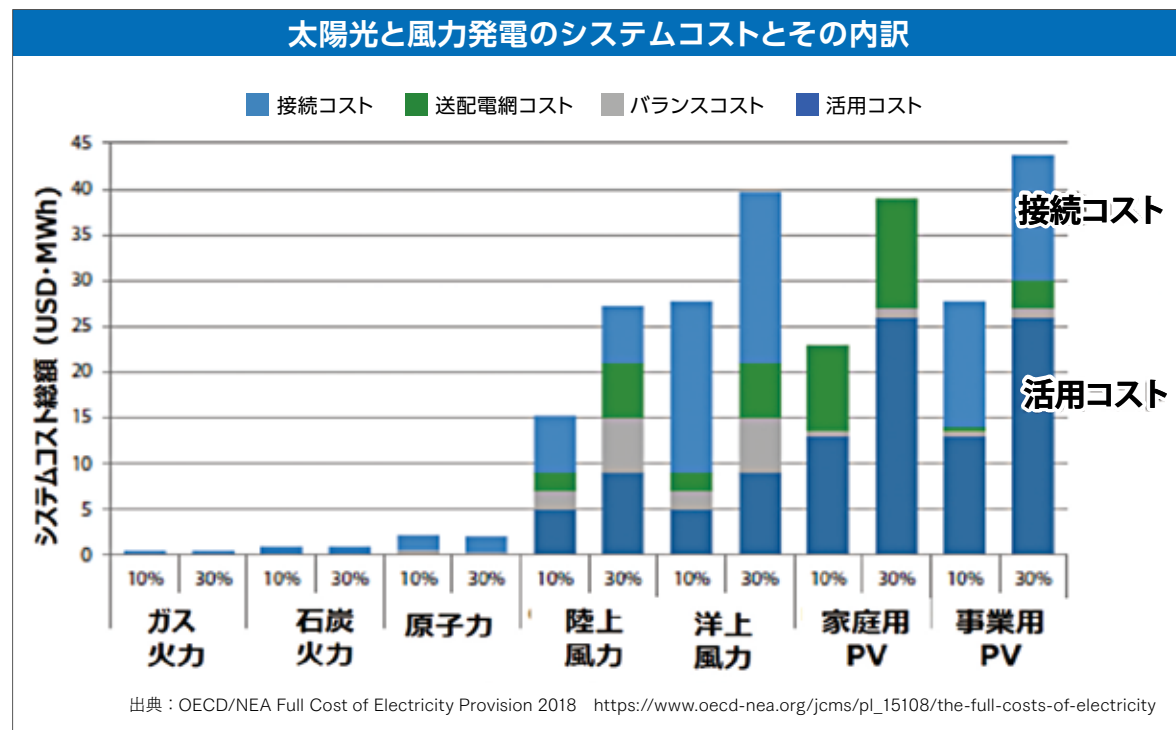


地震で被災した上にさらに集中豪雨が被災地の住民を痛めつけているのだ。最初から砂漠で不毛の地であれば気温は50℃を超える状況だが、これは温暖な気候の日本における「国土の砂漠化」なのだ。農作物の生育にも悪影響が出ており、農産物の生産高も低下している。

さて、大事なのは【図3】に示すCO₂排出係数のランキングだ。排出係数とは1kWhの電気を発電したとき何gのCO₂が発生したかを示す数値だが、このような重要な数値が公表されていないので、筆者が有料データベースの会員になって、その国の年間発電量TWh(1TWh=10億kWh)と年間のCO₂の排出量(億t)のデータを手し、表計算ソフトで計算して少ない順に並び替え、グラフにしたものだ。なぜかデータベースは2、3年前のものしか公表されていない。参議院事務局では、そのデータベースにアクセスし、私と同じ計算のチェックを行い、このグラフを参議院の調査会で意見陳述してよいとお墨付きが得られている。チェックはすべての図に対して行われている。そのオーソライズされたグラフが【図3】なのだ。

ここで【図2】に示した太陽光発電大国の上位5カ国がどの位置にいるかを見ていただきたい。日本は米国以降の下位グループに並んでいる。1kWの湯沸かしポットを1時間使うとペットボトルおよそ1本分の534gのCO₂を排出する国なのだ。つまり、太陽光発電のCO₂排出抑制効果は小さく、それより上位にあるのが風力発電のグループ(ベルギー、イギリス、フィンランド、スペイン、デンマーク)

【図6】

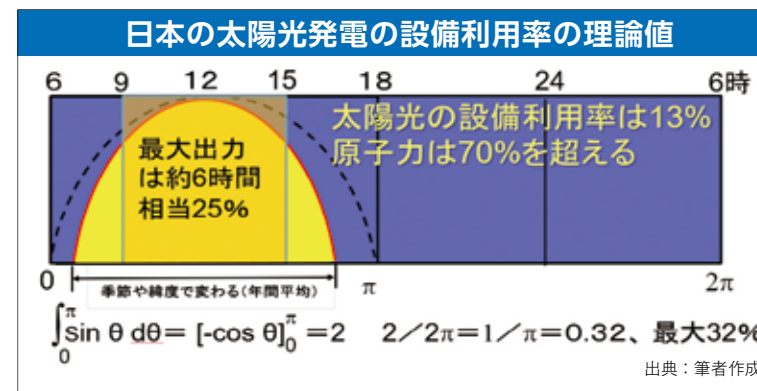


な気候だが晴天率が約50%であることから、設備利用率は16%しかない。これにインバータ回路の電気損失などもあり、水平線に近い場合の太陽では発電できないので、実質的な設備利用率は13%である。ピークカットして波形を台形にして最大で16%が限度である。そして、その低い設備利用率の太陽光で、日本が必要とする全電力を賄おうとすると、【図5】に示すように、国の電力需要の770%もの膨大な設備容量の太陽光パネルが必要となる。

さらに、早朝・夜間や悪天候時などに太陽光だけで電力を賄うためには、バッテリーなどの蓄電、揚水発電、蓄エネ、電気分解による水素製造などの膨大な設備が必要で送電線の増強も考慮すると、ざっと1000兆円の国家予算を投入しなければならない。国家財政は悪化し、破綻は免れない。【図6】に示すシステムコスト(接続コスト、送配電網コスト、バランスコスト、活用コスト)がかさむからである。「太陽光があれば、原発はいらない」という主張は、国家財政的に不可能だ。

また、日本の最終エネルギー消費に占める電力の割合は30%であり、残り70%は産業・民生・運輸部門における熱需要である。これら熱需要すべてを太陽光や風力による水分解で発生した水素で賄うとした場合、膨大な設置面積が必要である。所要面積で比べると、【図7】(10ページ)に示すとおり、次世代革新炉が淡路島程度の面積を必要とするのに対して、太陽光はおよそ300倍の面積(本州全体の1/3程度)を必要とし、洋上風力は1800倍(日本海排

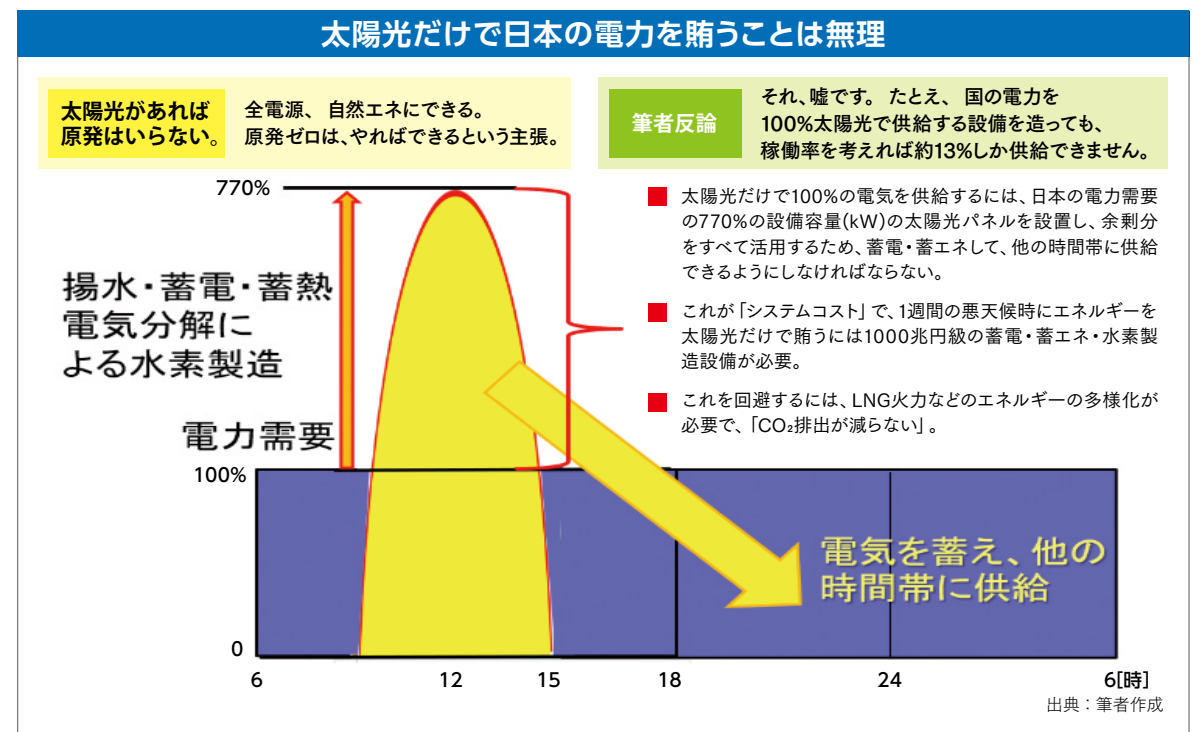
【図4】



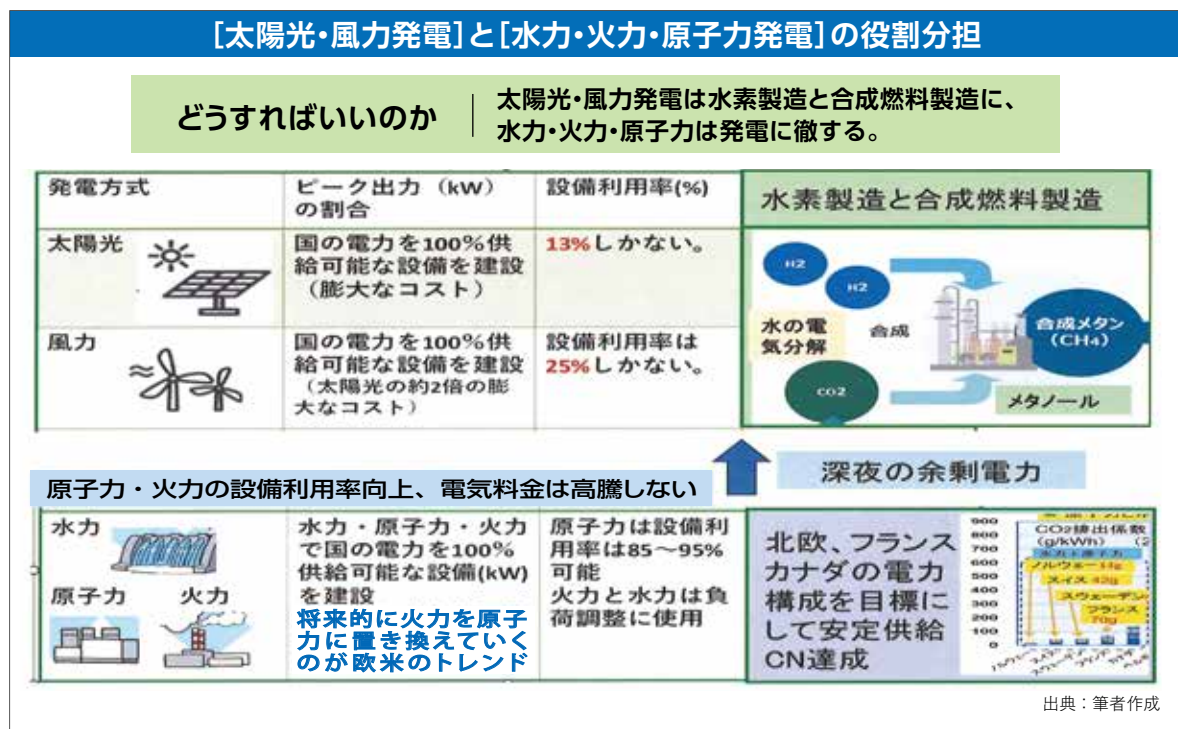
である。そしてさらに、最も排出係数が少ない国々が存在する。ノルウェーは水力がほぼ100%の国。スイス、スウェーデン、フランス、カナダは水力や原子力が主力電源の国々である。これらの国の排出係数は、現在の日本の排出係数534gの約1/10ほどである。つまり、CO₂の排出を劇的に減らしているのは、水力と原子力を主力電源にしている国々なのである。もちろん、原子力発電の最も重要な取り組みは、たゆまぬ安全性向上への取り組みだ。

次に、なぜ太陽光が力不足かを説明する。太陽光発電は【図4】に示すとおり、1日晴天の場合の1日の太陽光の発電出力を解析すると、100%の出力で24時間発電できる原子力発電と比べ、32%の電力量しか得られないことがわかる。これは日本の緯度と地球の自転によって決まる波形であるから、太陽光パネルの効率をいくら高くしても、改善できない。さらに日本は温暖

【図5】



【図8】



【図7】



他の経済水域EEZ以上という膨大な面積を必要とする。これは物理的にも実行不可能なことは一目瞭然である。

では、太陽光・風力発電はどう利用すべきなのか。筆者は【図8】に示すように、太陽光・風力発電は水素製造や合成燃料製造に利用し、水力・火力・原子力はベース電源として活用することが重要と考える。

欧米の原子力の動向

冒頭で述べたように2023年12月、COP28において、日本を含む23カ国が「2050年までに、2020年比で世界全体の原子力発電容量を3倍にする」旨の共同宣言を発表した。日本は、第三国への次世代革新炉の導入支援や同志国と連携したサプライチェーンの強靱化などの取り組みを通じて、世界全体での原子力発電容量の増加に貢献する観点から賛同した(4ページ写真)。

賛同した国々は、UAE、米国、フランス、日本、英国、カナダ、韓国、フィンランド、スウェーデン、ベルギー、ルーマニア、ポーランド、ブルガリア、チェコ、ウクライナ、スロベニア、スロバキア、ガーナ、カザフスタン、モロッコ、モルドバ、オランダ、アルメニアの23カ国である。

12月13日には、COP28において、パリ協定で掲げられた目標達成に向けて、世界全体の進捗状況を評価する最初の「グローバル・ストックテイク(GST)」が行われ、決定文書が採択された。また、原子力が気候変動に対する解決策の一つとして正式に明記された。

COPの合意文書において、原子力が気候変動に対する解決策の一つとして正式に明記されたのは、これが初めてのことだった。

以下にCOP28の「原子力3倍化宣言」の概要と各国の動向を示す。

●COP28「原子力3倍化宣言」の概要

本宣言は、OECD原子力機関、世界原子力協会、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の分析で、21世紀半ばまでに世界全体で温室効果ガス(GHG)排出ネットゼロを達成し、産業革命前と比較して気温上昇を1.5℃に抑えることを射程に入れるためには、地球の自転や気象によって電気出力が変動する太陽光や風力発電をバックアップしている火力発電所を順次原子力発電に置き換えていく必要がある、世界の原子力発電設備容量を2050年までに約3倍に増加させる必要があるとの認識のもと採択されたものである。

●各国の動向

【日本】

2011年3月11日の巨大地震・巨大津波に起因する福島第一原子力発電所の過酷事故を防げなかった日本は、事故原因の究明とその教訓に基づく安全で持続可能なクリーンエネルギー技術の切り札である原子力発電所の安全対策の技術協力や技術輸出を通じて原子力発電の成長に貢献することが求められている。国内メーカーが革新軽水炉の開発に注力する一方、日本機械学会にはIAEAから高速炉や高温ガス炉の規格類、免震技術普及の協力要請が来ている。

【米国】

発電および小型モジュール炉(SMR)を含む次世代革新炉などの革新的技術の推進に取り組んでいる。米連邦エネルギー省(DOE)を中心に、安全で持続可能な強靱なクリーン

【図9】

世界原子力展 EDFの巨大な展示ブース



写真：筆者提供

【図10】

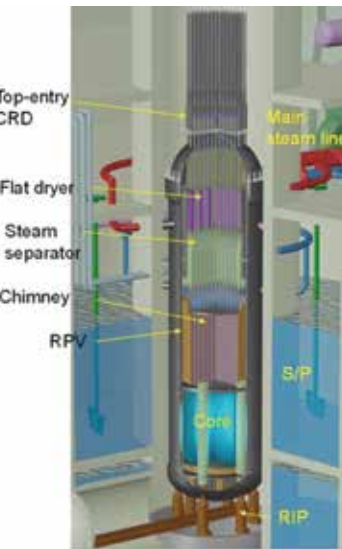
NUVIA社とGX BWR-1000の共同プレゼン



写真：筆者提供

【図11】

GX BWR-1000の原子炉



出典：GX ENERGY GXBWR-1000
https://www.gx-energy.co.jp/
SMR-Development

◎負荷追従は、制御棒やホウ酸水濃度調節で行うのではなく、【図12】(14ページ)に示すABWRで用いる原子炉内蔵型再循環ポンプ(RIP)で行う。

軽水炉のSMRは炉心を自然循環により冷却しているものが大部分である。筆者は、【図11】に示すように、負荷追従運転を可能にする原子炉内蔵型再循環ポンプ(RIP)を原子炉底部に設置し、制御棒駆動機構(CRD)を原子炉上部に移動した。これにより、原子炉の据え付け高さを約10m下げる経済産業省のプロジェクトを実施済みである。

負荷追従型原子炉 GX BWR-1000の基本概念

概念についてプレゼンを行った。【図10】にプレゼンしている写真を示す。

筆者は2023年11月28日から30日まで、パリで開催された世界原子力展(WNE2023)に東京工業大学発ベンチャーGX ENERGY Ltd.として出展展示した。来場者は約

世界原子力展(WNE2023)

2023年10月、現行法(2010年成立)における「既設炉がある敷地以外での新設を禁止」、「運転中の原子炉の数を最大10基に制限」の文言撤廃を決定。2035年までに少なくとも大型炉2基分の原子力発電設備を建設し、2045年までに新たに大型原子炉10基分の設備を追加するロードマップを発表した。

【スウェーデン】
2023年10月、現行法(2010年成立)における「既設炉がある敷地以外での新設を禁止」、「運転中の原子炉の数を最大10基に制限」の文言撤廃を決定。2035年までに少なくとも大型炉2基分の原子力発電設備を建設し、2045年までに新たに大型原子炉10基分の設備を追加するロードマップを発表した。

【イタリア】
チオルノービリ(チェルノブイリ)原子力発電所の事故を受け、1990年に国内すべての原発を閉鎖した。しかし、環境・エネルギー安全保障省は、2023年9月、イタリアにおける原子力エネルギー利用の再開を可能にし、国内の原子力産業を成長させるための政策方針を一定期間に定めるべく、新たな検討プラットフォームを立ち上げる。

【英国】
英国のエネルギー安全保障ネットゼロ省は、2023年7月8月、サイズウェルC原発の建設準備を加速すべく、主要機器の調達や労働力の確保などに向けて、合計5.11億ポンドを拠出することを表明している。

ンエネルギー技術の世界市場を成長させるために、国際的な基準や評価方法の開発を支援している。この10年間で特に日米間の企業を中心に、これらの取り組みが加速している。
連邦エネルギー省や米産業界は、最高水準の国際的な核セキュリティ、核不拡散、安全基準に適合する形で、ルーミア、インドネシア、ガーナなど第三国における既存の協力を増進し、SMR技術の責任ある利用のための基礎インフラ(FIRST)プログラムを含め各国との協力を目指している。

【フランス】

2023年12月2日、岸田文雄総理は、マクロン大統領との間で電話会談を行い、日本とフランスを結ぶ10年間の特別なパートナーシップの枠組みにおいて、二国間協力の新たなロードマップ(2023~2027年)を公表した。
原子力分野においては、同年5月に署名された閣僚間の共同声明に基づき、次世代革新炉開発、サプライチェーンの強化、福島第一原子力発電所の廃炉実施に向けた協力などの民生原子力分野の協力の深化に合意した。

日仏原子力協力が果たす役割として特に革新軽水炉、大型軽水炉および小型モジュール炉(SMR)といった原子炉を開発するため、パートナー国間の強靱な原子力サプライチェーンの確立に対する政策的支援を強化する。両国は、ナトリウム冷却高速炉(SFR)に関する技術の研究開発における協力を強化し、使用済MOX燃料の再処理を含む核燃料サイクルに関する技術協力を推進する。

2万人で、【図9】のように、世界中の大手原子力メーカーやフランス電力(EDF)などの電力会社、オラノ社のような再処理・バックエンド関連の企業も参加していた。日本からは、三菱重工と原子力産業協会と当社のみであった。

※筆者は、2022年12月2日、株式会社GX ENERGYを設立し、GX BWRと名付けた負荷追従可能で長期サイクル運転可能な再エネ共生型のSMR(小型モジュール炉)の開発を行っている。

会場では、EDFの幹部がカナダのOPG社と技術協力のLOI(基本合意書)の契約調印が行われた。

筆者は、2023年11月29日、フランスのNUVIA社と共同で開発中の負荷追従型GX BWR-1000の基本

【図14】

女川原子力発電所は原子力発電所の安全対策「止める」「冷やす」「閉じ込める」をすべて達成



出典：東北電力提供

【図15】

女川原子力発電所の体育館で3カ月の避難生活



出典：東北電力提供

【図16】

再稼働を遂げた女川原子力発電所2号機と発電所全景(防潮堤高さは海拔29m)



出典：東北電力提供

女川原子力発電所の安全対策と再稼働

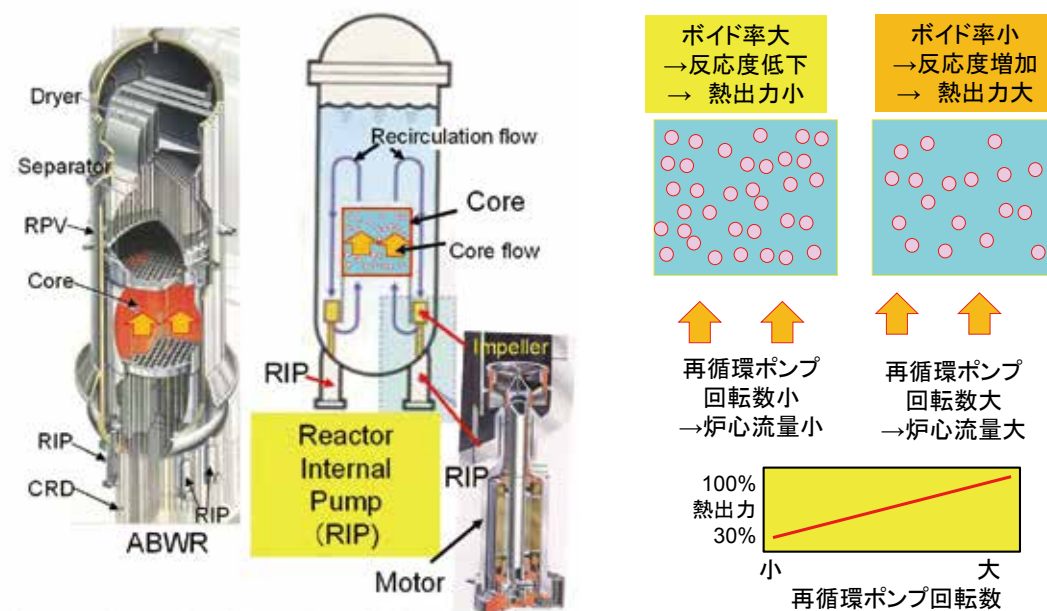
2025年7月9日に開催された岩手県の「北上地区エ

世代革新炉の原子力建屋自体を鋼製の船殻構造とし、格納容器冷却系と免震ゴムを取り付けることで、立地要件の地震や耐震評価を不要とし、原子力発電所の建設コストや建設期間の大幅削減が可能となる。

エネルギー懇談会」において、筆者は昨年12月に営業運転に入った東北電力女川原子力発電所と、事故を起こした東京電力福島第一原子力発電所の比較を行い、敷地高さの約5mの差が、2つの発電所の明暗を分けたことを説明した。東北電力は従来、社内委員会や東北大学の地震と津波の専門家の教授を入れて貞観津波(869年)などの過去の歴史を調べて敷地高さを14.8mに決めていた。【図14】に示すように女川原子力発電所では冷温停止を達成して事故を未然に防いだほか、【図15】に示すように、津

【図12】

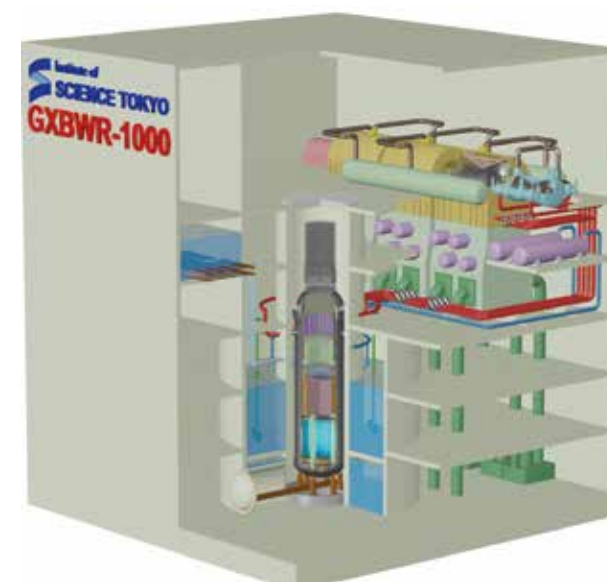
炉内内蔵型ポンプ(RIP)を用いた出力制御



出典：GX ENERGY <https://www.gx-energy.co.jp/CollaborationwithRE>

【図13】

GX BWR-1000の原子炉・タービン一体型建屋



出典：GX ENERGY GXBWR-1000 <https://www.gx-energy.co.jp/SMR-Development>

◎【図12】に示すように、インバータによる回転数制御で、炉心流量で炉内のボイド率と熱出力を変化させ、電気出力が制御できるので負荷追従が容易になる。
◎炉心流量の変化により電気出力を30万kWから100万kWまで可変として負荷追従運転が可能である。
また、【図13】に示すように、小型モジュール炉(SMR)や中型モジュール炉(MMR)に相当する革新軽水炉など、次

波被災者を敷地内の体育館に案内して緊急避難場所とし、3カ月間も食事を提供して、地元との良好な関係を築いた。その女川原子力発電所では2022年12月、2号機の再稼働に向けて地元の人々も加わり安全対策工事完遂のための総決起大会が大漁旗のはためく中で開催されている。原子力発電所の安全性確保と安定運転のためには、地元の人々の全面的な支援が必要なのだ。

総決起大会後、約2年で【図16】(15ページ)に示すように、すべての安全対策工事と総点検、総合負荷性能検査

【図17】

北海道千歳市のラピダス半導体工場の建設現場



画像素材：PIXTA

【図18】

岩手県北上市のキオクシア北上工場



写真提供：キオクシア岩手株式会社

を終え、女川原子力発電所2号機は再稼働を実現した。一方、北海道電力の泊原子力発電所3号機は、2025年7月30日、原子炉設置変更許可申請書が合格となり、2027年のできるだけ早い時期の再稼働を目標に安全対策工事が実施されている。

千歳駅(北海道千歳市)から車で約10分。工業団地「千歳美々ワールド」の巨大なクレーンが稼働するラピダスの半導体工場の建設現場の写真を【図17】に示す。ラピダスは、ここで髪の毛の太さの5万分の1にあたる2ナノm(ナノは10億分の1)の最先端半導体を生産する。スーパーコンピュータやAI向けの需要を見込んでおり、量産は27年中を予定。泊原子力発電所3号機の再稼働が前提である。一方、岩手県北上市のフラッシュメモリを生産するキオクシアの北上工場【図18】には、女川原子力発電所2号機からの電力も安定的に供給される。渡辺友治副社長の「半導体製造に安定電源は必須。原子力もカーボンフリーの電源として非常に期待している」というコメントは新聞報道された。原子力発電所は地元の経済発展に欠かせない。

まとめ

太陽光や風力発電で効果的にCO₂の排出係数を低減できた国は存在しない。変動する再生可能エネルギーの電気出力を火力発電所が補完しているからだ。2050年のカーボンニュートラル達成のためには、火力発電所から、次第に原子力発電所に置き換えていかなければならない。この目的でパッシブ安全系を有するSMRも世界的に開発されている。仮に筆者が提案する負荷追従型BWRであるGX BWR-1000を20基建設すれば、電気出力は600万kWから2000万kWまで変化でき、2022年3月22日の需給ひっ迫時の太陽光における曇天時の急減分1200万kWを十分に吸収できる。

日本の原子力技術は大きな世界貢献の時を迎えており、2050年までのカーボンニュートラル達成と日本の電力網の安定化に大きく貢献すべく、世界のBWRグループに提案と普及を図りたい。

◎参考文献・資料

- (一) Heiki, H., Nakamaru, M., Maruyama, T., Hiraiwa, K., Arai, K., Narabayashi, T., and Aritomi, M., Development of Small Simplified Reactor, ICONET-1-36100, Tokyo, Japan (2003).
- (2) Narabayashi, T., Vien, T., Takahashi, H., and Kikura, H., New useful SMR for load follow with fluctuating renewable energy and enhance facilitates for stable grid control, NTP169NUTHOS-13, (2022).
- (3) Narabayashi, T., Boiling Water Reactors (SME Series in Thermal and Nuclear Power Generation) (2023/1/28), pp. 434-455.
- (4) 資源エネルギー庁、原子力政策に関する直近の動向と今後の取組、資料1(2023年12月9日)
- (5) 参議院 2022年6月16日 資源エネルギーに関する調査会 / YouTube Nihon Keizai Shimbun (2022年6月16日) https://www.youtube.com/watch?v=mJtER6_Zd0
- (6) 京産大が「カーボンフリー」を実現、世界最先端機関(WMO)「日本の気候2024」に貢献 https://www.jma.go.jp/jma/press/250701b/state_of_climate_asia_2024.pdf



東京科学大学 総合研究院
ゼロカーボンエネルギー研究所
特定教授(工学博士)

奈良林 直

◎専門
原子炉工学、原子炉安全工学、気液二相流、エネルギーと環境、保全工学

◎略歴

- 1978年 東京工業大学大学院理工学研究科原子核工学専攻修士課程修了
- 1978年 株式会社東芝入社(原子力技術研究所)
- 2000年 同 電力・社会システム技術開発センター主幹
- 2005年 北海道大学大学院工学研究科エネルギー環境システム専攻助教授
- 2007年 同 教授
- 2010年 同 大学院工学研究科エネルギー環境システム部門長
- 2013年 同 大学工学部機械知能工学科・学科長
- 2016年 同 大学名誉教授・工学研究院特任教授
- 2018年 東京工業大学 先端原子力研究所 特任教授
- 2021年 同 大学ゼロカーボンエネルギー研究所 特任教授
- 2024年 統合により大学名が東京科学大学に変更
- 2025年 東京科学大学 特定教授、現在に至る

◎委員・学会

- 2005年 北海道エネルギー環境教育研究委員会 理事
- 2008年 日本工学アカデミー会員、日本機械学会フェロー
- 2010年 内閣府原子力安全委員会専門委員
- 2011年 経済産業省原子力安全保安院意見聴取会委員
- 2012年 日本原子力学会理事
- 2013年 原子力規制委員会 福島第一原子力発電所事故の分析検討チーム外部有識者
- 2013年 アラブ首長国連邦 王立カリファ大学 原子力教育パネル評価委員
- 2014年 日本保全学会会長、日本原子力学会フェロー
- 2019年 日本保全学会フェロー
- 2024年 米国原子力学会主催 先進原子力国際会議 名誉会長

◎受賞

- 2018年 Outstanding Professor of the Year Award (IAEAとOECD NEAが共同運営する「ISOE」より)
- 2020年 日本機械学会動力エネルギーシステム部門功績賞
- 2023年 日本機械学会動力エネルギーシステム部門貢献表彰
- 「フィルタハント」の国内実装の実現」