



原発の気候変動脆弱性研究会報告書
原発は気候危機に耐えられるか

はじめに

近年、気候変動対策を名目に、原発の利用をすすめようとする動きが一部で活発化している。原発は稼働中、CO₂を排出しない電源とされているからだ。しかし、CO₂を出さないというだけであれば、他にも多くの選択肢が存在する。

原発は計画から運転開始までおよそ20年。日本では60年、米国では80年の運転が許可されたものも出ている。廃炉には30年程度を要する。つまり、場合によっては130年後のこともある程度想定しておく必要がある電源であると言える。さらに使用済み核燃料の管理も含めると十万年単位の考慮が必要となる。

気候変動の深刻化とともに、気候変動の長期に渡る影響もある程度見えてきた。そして、気候変動による異常気象が原発に与える影響についても、多くの学術論文が発表されるようになってきた。だが日本では、原発のCO₂排出量の低さには着目されるものの、気候変動が原発に与える影響についてはほぼ関心もたれていない。そこで、NPO法人原子力資料情報室は、原発の気候変動脆弱性研究会を立ち上げ、気候変動対策として原発が本当に使えるシステムなのかを検討するため、原発の気候変動脆弱性に関して、現時点の状況の取りまとめを行った。

※本研究は一般社団法人アクト・ビヨンド・トラストの2022年度企画助成事業を受けて実施しました。

原発の気候変動脆弱性研究会

鮎川ゆりか（千葉商科大学名誉教授、CUC エネルギー株式会社 取締役）

大島堅一（龍谷大学 政策学部 教授）

蓮井誠一郎（茨城大学 人文社会科学部 現代社会学科 教授）

川井康郎（プラント技術者の会）

松久保 肇（原子力資料情報室事務局長）

オブザーバー

山口 幸夫（原子力資料情報室共同代表）

NPO 法人原子力資料情報室について

1975年設立。原子力に関係した産業界から独立した市民の立場で、原子力利用の危険性に関するいろいろな資料を集め、調査・研究を行い、そこから得られた情報を、世界中の市民の活動に役立つようにさまざまな形で提供している。



目次

1 原発への気候変動の影響—本報告書の概観—	1
2 原発は気候変動対策に効果的な選択肢か —経済性の観点から—	6
3 原発の安全性を脅かす気候危機の影響	12
コラム 原発と二つの冷却方式	24
4 新規制基準における気候変動	25
5 気候安全保障と原発 —その論理と対策としての原発の有効性の検討—	28
6 結論	41

1 原発への気候変動の影響

— 本報告書の概観 —

松久保肇

1.1 前提 原発からのCO₂排出量

日本では、原発のCO₂排出量は他電源に比べて低いとされている。これは電力中央研究所の研究結果¹に基づいている。この論文は一定の前提のもとに電源別のCO₂排出量のライフサイクルアセスメントを行っている。類似の研究は他国でも行われている。そこで、日本のものと他国の研究結果を示した(表1-1)。Sovacool (2008)²と Warner and Heath (2012)³はレビュー論文であり様々な推計値の中央値、最小値、最大値を、Pomponi and Hart (2021)⁴は英国における原発のCO₂排出量推定を示している。

原発のCO₂排出は、燃料の製造に関するフロントエンドでの排出、原発の建設時の排出、発電時の排出、使用済み核燃料の処分や再処理などに関するバックエンドでの排出、設備解体時の排出に大別できる。中でもフロントエンド、特に燃料製造時の電力消費に伴うCO₂排出が排出量全体に大きく寄与している。つまり、電力消費に伴うCO₂排出量は原発のライフサイクルCO₂排出量に大きく影響する。また、推計

表 1-1 原子力発電所から排出されるCO₂排出量

	電力中央研究所, 2015				Sovacool, 2008		
	BWR	PWR	BWR/プルス ーナル 1 回	PWR/プルス ーナル 1 回	各種推計の中央 値	最小	最大
フロントエンド	10.93	13.92	9.18	11.00	25.09	0.58	118
原発建設	1.64	1.64	1.64	1.64	8.2	0.27	35
発電	4.45	4.45	4.45	4.45	11.58	0.1	40
バックエンド	1.68	1.69	2.93	2.95	9.2	0.4	40.75
設備解体	0.92	0.93	0.37	0.37	12.01	0.01	54.5
合計	19.62	22.61	18.63	20.43	66.08	1.36	288.25

(g-CO₂/kWh)

	Warner and Heath, 2012			Pomponi and Hart, 2021	
	各種推計の中央値	最小	最大	最小	最大
フロントエンド					
原発建設					
発電					
バックエンド					
設備解体					
合計	17	12	110	24.61	32.74

表 1-2 再生可能エネルギーと原発の CO₂ 排出量比較

(g-CO ₂ /kWh)			
	電力中央研究所, 2015	Amponsah et al., 2014 ⁵	IPCC, 2014 ⁶
	最小/最大	最小/最大	最小/中央/最大
陸上風力	23/29	5/24	7/11/56
着床式洋上風力	24/25	8/124	8/12/35
浮体式洋上風力	99/103		
事業用太陽光	58/59	9/300	18/48/180
住宅用太陽光	38		26/41/60
原子力	19/20	/24.2	3.7/12/110

の方法も複数存在しており、これによっても推計値にかなりの変動がみられる。

CO₂ 排出量の電源別比較では、電力中央研究所の試算では原発に優位性があるように見えるが、Amponsah et al. (2014) や IPCC (2014) による様々な文献のレビュー結果によれば、原発の優位性が圧倒的とまでは言えないこともわかる (表 1-2)。すなわち、原発は CO₂ 排出量削減の一選択肢に過ぎない。さらに第二章で後述する通り、CO₂ 排出量の削減コストや削減スピードでも、原発は太陽光や風力といった他の選択肢と比べて、高く、長期間を要する。

一方で、原発は計画から廃炉に至るまで 100 年を超える長期のプロジェクトになる。使用済み核燃料または使用済み核燃料を再処理した後に出るガラス固化体を地層処分することを想定した場合、発熱している使用済み核燃料などが処分できる温度になるまで数十年保管しておく必要もある (使用済み MOX 燃料、または使用済み MOX 燃料の再処理後に出るガラス固化体の場合、発熱量がさらに大きくなるため、保管期間も長期化することが想定される)。

原発を気候変動対策として利用していくとした場合、課題になるのは、今後、気候変動が激化していく中で、原発が利用できる環境は長期的に維持されるのかどうかである。

1.2 気候変動が与える原発への影響

気候変動は様々な経路をたどって環境に影響を与える (図 1-1)。

海水温の上昇は、海水の膨張や、氷河や南極などの氷床の融解を引き起こし、海面上昇をもたらす。気候変動の進んだ世界では強い熱帯低気圧が増加する可能性が指摘されている。高潮は熱帯低気圧によって、海面が上昇する現象だが、気候変動によって海面が上昇したうえ、熱帯低気圧の強大化から高潮の影響も大きくなることが懸念される。

一方で、気候変動によって、降水量の多い地域ではさらに多く、少ない地域ではさらに少なくなる傾向が指摘されている。さらに、雨の降り方についても、降るときは続けて大量に降り、降らないときは長期に降らなくなるという傾向が強まっていくことも指摘されている。ここで懸念されるのが、干ばつ・そして乾燥に伴う山火事だ。また極端な降雨による洪水も懸念される。また、雨は気温が低いと雪になる。つ

まり、雪の降り方も極端化する。

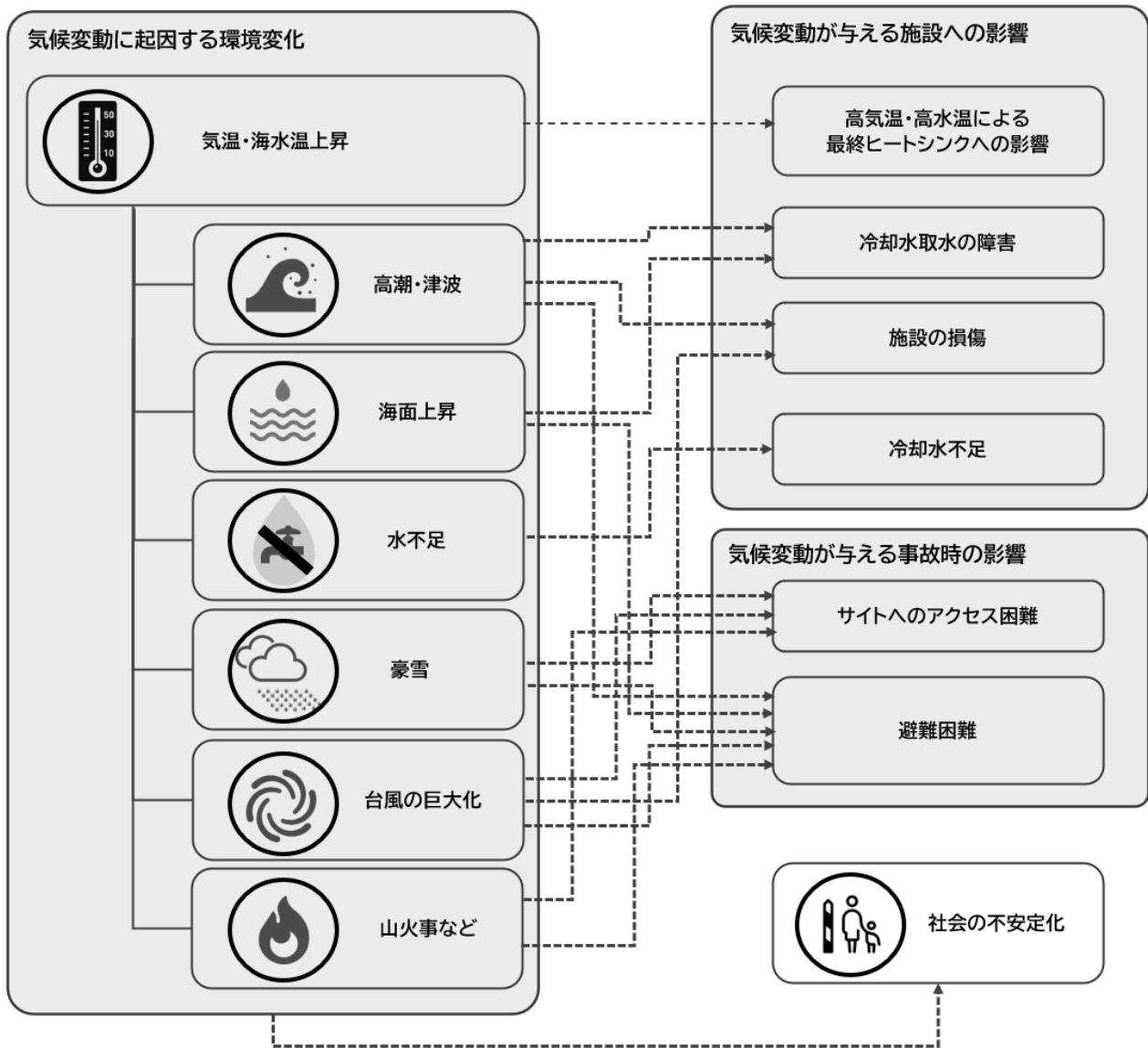


図 1-1 気候変動がもたらす環境変化と原発に与える影響

こうした現象はどのようにして原発に影響を与えるのか。大きく 3 つの経路がある。1 つ目は原発施設への直接の影響、2 つ目は原発事故時の影響の深刻化、3 つ目は原発が存在する社会環境そのものへの影響だ。それぞれ概観しておこう。

原発は究極的には核分裂反応で生み出された熱エネルギーで水を沸かし、蒸気力でタービンを回すことで電気を生産している。しかし、核分裂反応で生じたエネルギーの内 7 割は廃熱として、海や川、大気に放出されている（最終ヒートシンク）。気候変動により気温や海水温が上昇すると、熱効率が低下する結果、発電効率が下がる。また、特に内陸部で河川水を使っている原発の場合、河川水の温度が廃熱

によって上昇しすぎる恐れがあるため、出力を低下させ、場合によっては停止させている。また海水温が上昇しすぎた場合も、安全のために停止する必要がある⁷。また、高潮や津波によって取水できなくなることもあり得る。その場合もやはり、廃熱できなくなるので、原発は停止を余儀なくされる。干ばつで河川水等が取水できなくなった場合も当然ながら冷却水不足になるため、原発は停止する。

気候変動によって気象現象は激化する。例えば台風の激化によって、施設が壊れることもある。2019年には日本原子力研究開発機構が保有する材料試験炉の二次冷却システムの冷却塔が台風の強風により倒壊した⁸。米国でも強風により施設が損傷した事例がある。また干ばつによって、乾燥した地域で山火事が発生すると、送電網が破壊されることや、原発へのアクセスが困難になることも想定できる。

気候変動は事故時の影響も増幅させる。多くの原発は海沿いに建設されており、周辺の市街地等も海拔の低い平地に集中している。今後予想される海面上昇によって、場合によっては水没する地域もあり、そうでなくとも、高潮や津波の影響も受けやすくなる。原発で事故が発生した際の避難が極めて困難になることが予想される。事故時に豪雪や台風が発生していた場合も同様だ。原発事故では初動が極めて重要だ

が、高潮・津波・豪雪・台風などで原発へのアクセス、原発サイト内での作業が困難になることも考えうる。

また、全体としての気候変動の深刻化とともに、さまざまな経路を介して、社会の不安定化が進む可能性が指摘されている。

原発導入を検討・計画・開始した国々のリストを表 1-3 に示した。これによれば、中東やアフリカなど、気候変動の影響をより多く受ける地域やアゼルバイジャンやスーダンのような紛争当事国が原発の導入を検討していることがわかる。

2022年に始まったロシア

のウクライナ侵攻では原発や原子力関連施設が攻撃・占拠された。幸い、これまで大量の放射性物質が放出されるような事態には至っていないが、これからの原子力利用を考えるにあたっては、紛争時や気象災害時の原発の安全性はどのように担保するのか、本当に安全が確保できるのか、という問題は、避けては通れない課題だといえよう。

表 1-3 原発導入を検討・計画・開始した国々

出典：World Nuclear Association(2022)⁹

ヨーロッパ	アルバニア、セルビア、クロアチア、ポルトガル、ノルウェー、ポーランド、エストニア、ラトビア、リトアニア、アイルランド、トルコ
中東・北・東アフリカ	湾岸諸国（サウジアラビア、カタール、クウェート、イラク）、イエメン、イスラエル、シリア、ヨルダン、エジプト、チュニジア、リビア、アルジェリア、モロッコ、スーダン
西・中央・南アフリカ	ナイジェリア、ガーナ、セネガル、ケニア、ウガンダ、タンザニア、ザンビア、ナミビア、ルワンダ、エチオピア
中央・南アジア	アゼルバイジャン、ジョージア、カザフスタン、モンゴル、バングラデシュ、スリランカ、ウズベキスタン
東南アジア・オセアニア	インドネシア、フィリピン、ベトナム、タイ、ラオス、カンボジア、マレーシア、シンガポール、ミャンマー、オーストラリア
東アジア	北朝鮮

1.3 本報告書の構成

本報告書は原発が気候変動対策として適切な電源であるか検討するものである。

第二章では、経済的な観点から原発が気候変動対策に効果的な選択肢かどうかを検討した。気候変動対策に取りうる選択肢は複数存在し、原発はその中の 1 オプションに過ぎない。気候変動対策が喫緊の課題である以上、費用対効果の観点は非常に重要である。原発はコストが高く、時間がかかりすぎ、気候変動対策たり得ない。さらに原発が将来も合理的な脱炭素電源たり得るかを検証した。ウラン資源の枯渇とともに CO₂ 排出量は増加する可能性がある。

第三章では、原発の安全性に関する気候変動の影響の検討を行った。多くの文献レビューで浮かび上がってくることは、気候変動が原発に及ぼすきわめて深刻な影響と危険性である。

第四章では、2011 年の東京電力福島第一原発事故を踏まえて策定された新規規制基準が気候変動とどのように向き合っているのかを検討した。現在の規制基準は設計時点における最大外部衝撃予測値に対して安全機能が損なわれない設備を求めているだけのものであり、気候変動による将来的なリスクは、現時点での設計余裕を除いては考慮されていない。激化する気象現象に対して、安全を担保する仕組みとして心もとないものと言わざるを得ない。

第五章では、気候安全保障の観点から原発の有効性を検討した。原発が気候変動対策として機能し得るためには原発が安全かつ安定的に稼働するという大前提が横たわっている。今後、気候変動による影響が大きくなるにつれ、その前提は損なわれていく可能性は高い。気候変動対策は喫緊の課題であり、かつ非常に長期にわたる課題でもある。目前の電力不足だけを見て対応すれば、長い将来にわたるリスクを背負うこととなる。

2 原発は気候変動対策に効果的な選択肢か —経済性の観点から—

松久保肇

2023年8月9日、WMO（世界気象機関）とEUが組織するCopernicus Climate Change Serviceは2023年7月が世界の平均気温が観測史上最高になったと発表した¹⁰。7月の平均気温は、産業革命前の気温と比べて約1.5°Cの上昇だった。もはや気候危機は将来の問題ではなく、今、ここにある危機である。

WMOの試算¹¹によれば、1970年から2019年までの50年間の累計で、異常気象による災害が12,000件近く発生し、経済的損失は3兆6,400億ドル（2022年年間平均レートで約565兆円）に達した。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は『第6次評価報告書 統合報告書（AR6）』¹²で、「人為的な気候変動は、すでに世界中のあらゆる地域で、多くの気象や気候に極端な影響を及ぼしている。これは、自然や人々に対する広範な悪影響や関連する損失や損害につながっている（確信度が高い）」としている。またIPCCは2018年発表の『1.5°C特別報告書（SR1.5）』¹³で「気候変動の影響による世界全体の経済成長に対するリスクは、今世紀末までに、2°Cの場合よりも1.5°Cの場合の方が低いと予測される（信頼度は中程度）」とも報告している。すなわち、気候危機の深刻化に伴い、異常気象の頻度は高まり、経済的な損失が増加、さらに経済成長自体も鈍化することになる。

一方で、CO₂排出の削減効果のある電源は複数存在し、原発はその一つに過ぎない。時間が限られ、予算的な制約もある中、気候危機への対策は即効性が高く、費用対効果の高いものから効率的におこなう必要がある。その方が早期かつ大きな量の温室効果ガス排出量削減が実現するからだ。

2.1 稼働までの期間

原発の特徴は、計画から建設、運転開始までの期間が他電源に比べて長いことにある。内閣府が作成した2011年の資料によれば、原発は計画から運転開始まで20年を要するとされ、他の非化石電源と比べて長期間を要していることがわかる（図2-1）¹⁴。つまり、時間的観点から原発の新規建設は他の脱炭素電源に比べて劣っている。また、

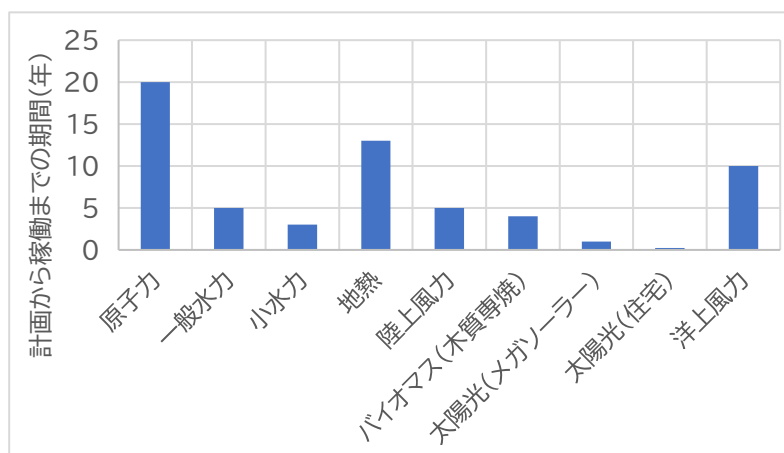


図 2-1 非化石電源ごとの計画から稼働までの期間

出典：内閣府(2011)

電源開発（株）が建設中の大間原発を除く日本のすべての原発は 1970 年以前に計画されたものである。仮に脱炭素電源として原発を選択するとしても、新たな地点に原発新設を計画することは、運転開始まで何十年かかるかわからず極めて非現実的だといえる。

次に、現在立地している場所での増設・リプレースについてみてみよう。仮に増設・リプレースに関して立地地元の理解が得られていたとしても建設期間の長期化が懸念される。IAEA のデータベース¹⁵によると 2001 年から 2022 年

までの各国の原発建設期間は、順調に建設ができていた中国・韓国や原発の海外輸出を積極的に進めていたロシアにおいてさえ建設期間の長期化がみられるからだ（図 2-2）。福島第一原発事故を経て、規制が強化された日本で新設炉を建設する場合、立地のみならず建設においても相当の長期化が予想される。

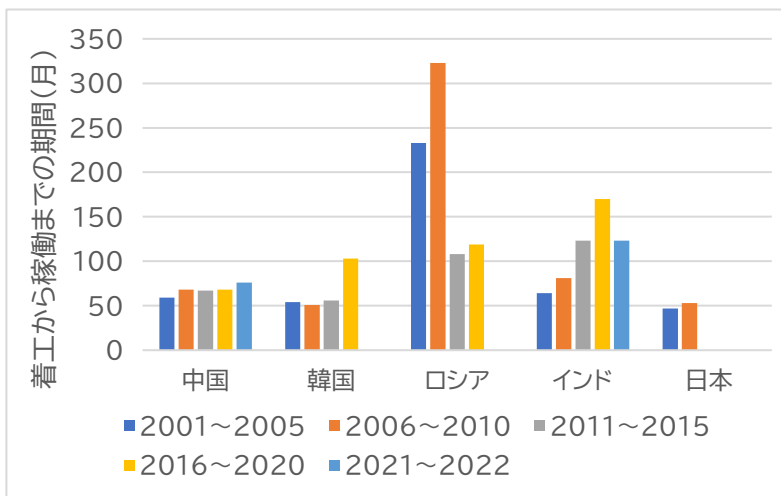


図 2-2 原発の着工から稼働までの期間（2001～2022）

出典：IAEA 資料より筆者作成

2.2 CO₂削減効果

原発は CO₂ 排出量の面でも再生可能エネルギーに劣っている。Jacobson(2019)¹⁶によれば、原発を選択した場合、新設または既設電源の改修を待つ間、CO₂ 排出の多い既存電源の電力に依存するため、100 年間でみると 78~178g-CO₂e/kWh を排出するという。一方、建設期間の短い電源を選んだ場合、速やかに CO₂ 排出を削減できることから、風力発電の CO₂ 排出量は 100 年間で 4.8~14.8 g-CO₂e/kWh、太陽光発電は 0.8~26.9 g-CO₂e/kWh になると推計されている。CO₂ 排出量削減の観点からみても、圧倒的に風力発電や太陽光発電が優位に立つことがわかる。

2.3 コスト

次にコストの観点から確認しよう。

発電コストの面で見ると、投資銀行 Lazard が行った推計¹⁷によれば、新設電源の発電コストは図 2-3 の通りとなっている。2023 年時点で最もコストが高い電源は原発である一方、風力は最安、

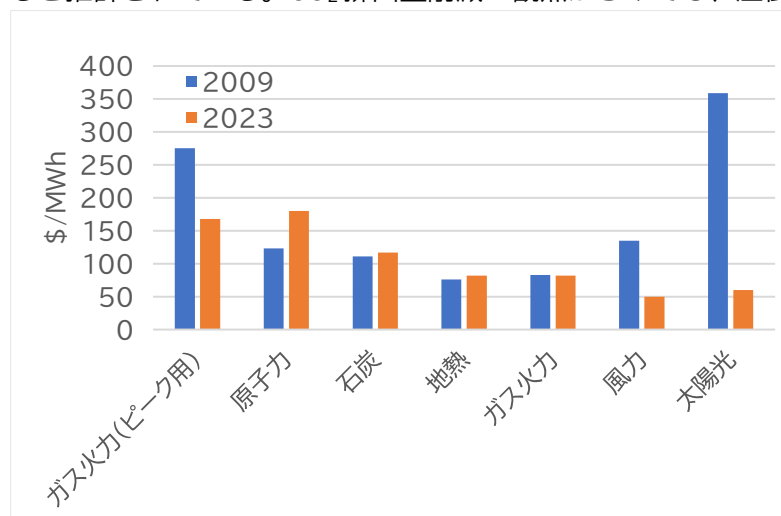


図 2-3 電源別発電コスト

出典：Lazard(2023)

2009 年時点で最高値だった太陽光発電は 2023 年時点では風力に次いで 2 番目に安い電源だ。

また、CO₂ 排出削減コストの観点から見た場合も原発は再生可能エネルギーに劣っている。国際エネルギー機関 (IEA) の分析¹⁸によると、CO₂1 トン当たりの削減費用は原発新設の場合で 56.2 ドル、既設原発の運転期間延長の場合は 17 ドルである。一方、再生可能エネルギーは安価で、事業用太陽光は 2.9 ドル、水力の改修は 2.2 ドルである(図 2-4)。

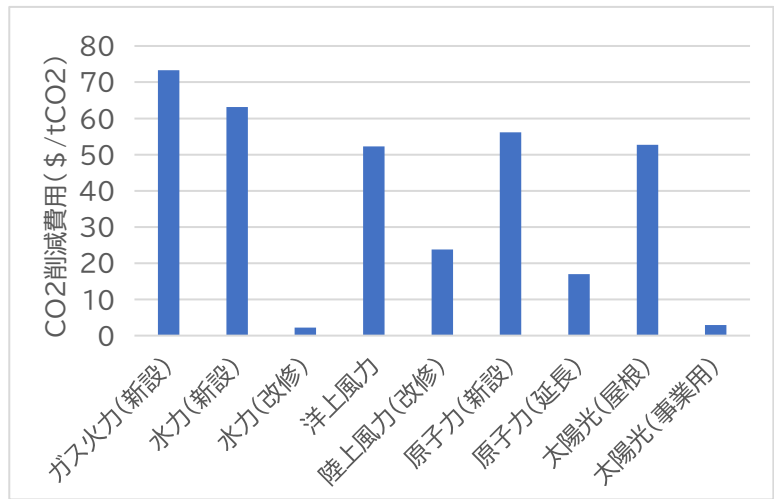


図 2-4 電源別 CO₂ 削減費用

出典：IEA(2020)

2.4 削減ポテンシャル

IPCC の第 6 次評価報告書第 3 作業部会報告書¹⁹は次のように述べている。まず第 1 に、100 米ドル/tCO₂-eq 以下のコストの対策をとれば、2030 年までに、2019 年の排出量の半分にまで CO₂ 排出量を減らすことができる。また、第 2 に、その対策のうち 20 ドル未満の安価な対策が半分以上を占め、大半が再生可能エネルギー (太陽光、風力)、省エネ、自然生態系の保護、メタン削減 (炭鉱、石油・ガス、廃棄物での対策) である。

IPCC が示すポテンシャルを見ると、原子力で削減できる量はおよそ 1GtCO₂-eq/年である。その半分程度は 20 ドル/tCO₂ 以上のコストを要すると推定されている。一方、太陽光は約 4.5Gt CO₂-eq/年の削減ポテンシャルを持ち、うち 3Gt CO₂-eq/年超が 20 ドル/tCO₂ 未満で対処可能、風力についても約 4Gt

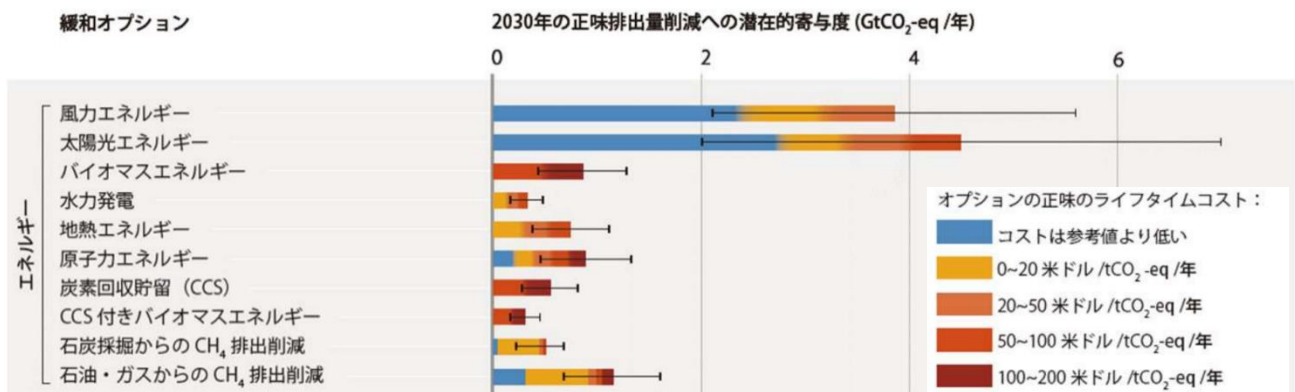


図 2-5 緩和オプションの概要と、2030 年におけるコストと可能性の推定範囲

出典：IPCC AR6 WG3 Figure SPM.7 より抜粋 (環境省記)

不確実性の範囲は、排出削減への潜在的な寄与の合計に適用される。個々のコスト範囲も不確実性を伴う。

CO₂-eq/年の削減ポテンシャル、うち 3Gt CO₂-eq/年超が 20 ドル/tCO₂ 未満で対処可能とされている (図 2-5)。すなわち、原発の大半はコスト高で、削減ポテンシャルはあまり大きくない一方、風力・太陽光には大きな削減ポテンシャルがあるということだ。

2.5 脱炭素電源としての原発

ここまで原発が脱炭素電源であることを前提として検討してきた。1章で示した通り、原発のライフサイクル CO₂ 排出量は石炭や LNG 火力発電に比べて少ない。ただし、今後も低いままかどうかは別問題である。

図 2-6 に電力中央研究所が試算した PWR (加圧水型) 原発のステージ別 CO₂ 排出量を示した。これによれば、燃料製造段階であるフロントエンドでの排出量が最も多い。フロントエンドはさらに採掘・粗製錬 (1.65 g-CO₂/kWh)、弗化 (0.27 g-CO₂/kWh)、ウラン濃縮 (10.59 g-CO₂/kWh)、再転換・ウラン燃料加工 (0.85 g-CO₂/kWh)、核燃料輸送 (0.06 g-CO₂/kWh) に分けられる。なお BWR (沸騰水型) 原発もほとんど変わらない。

ここで問題になるのが採掘されたウラン鉱に含まれるウランの割合 (ウラン品位) だ。採掘されたウラン鉱石にはそれほど多くのウランが含まれていないからだ。採掘されたウランはまず粗製錬が行われる。粗製錬とは鉱石の粗砕・粉砕、ウラン溶出、鉱さいとウラン溶出液の分離、ウラン精製などの工程を経てイエローケーキとよばれるウラン精鉱を生産するまでの総称だ。その過程で CO₂ が排出される。

IAEA の資料²⁰によれば、既知のウラン資源の大半はウラン含有率 0.5% 以下となっている (表 2-1)。WNA (世界原子力協会) は現在のウラン価格の 3 倍以内で採掘可能なウラン資源量が現存する原発を少なくとも 90 年運転するのに十分な量であるとしている²¹。しかし、ここで問題なのはウランの採掘・粗製錬工程での CO₂ 排出量だ。ウラン品位の低下とともに、粗製錬の作業量が増加し、その結果、CO₂ 排出量は増加するのだ。

Storm (2019)²² の分析によれば、品位の低下に伴い、CO₂ 排出量は激増する (図 2-7)。原発の運転に伴い、低

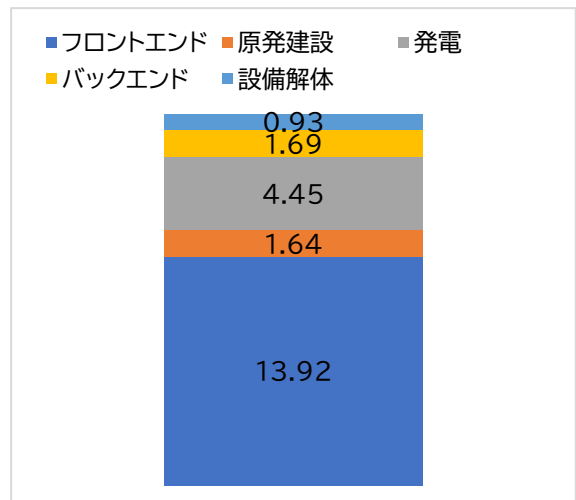


図 2-6 PWR 型原発のステージ別 CO₂ 排出量 (g-CO₂/kWh)

出典：電力中央研究所(2015)

表 2-1 既知のウラン埋蔵量のウラン含有率別割合

出典：IAEA(2016)

ウラン含有率(%)	既知のウラン埋蔵量に占める割合 (%)
>5	0.22
1-5	1.99
0.50-1.00	2.6
0.20-0.50	14.11
0.10-0.20	24.74
0.05-0.10	24.46
0.01-0.05	26.95
<0.01	4.15
不明	0.78

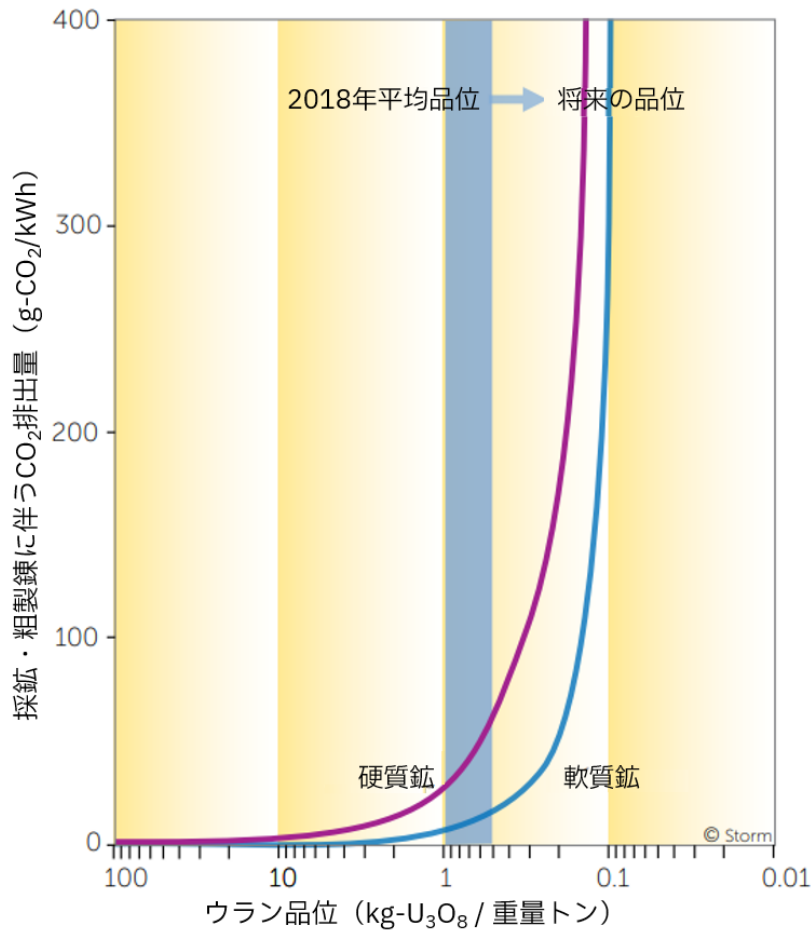


図 2-7 ウラン採鉱・製錬に伴うウラン品位別 CO₂ 排出量 出典：Storm(2019)

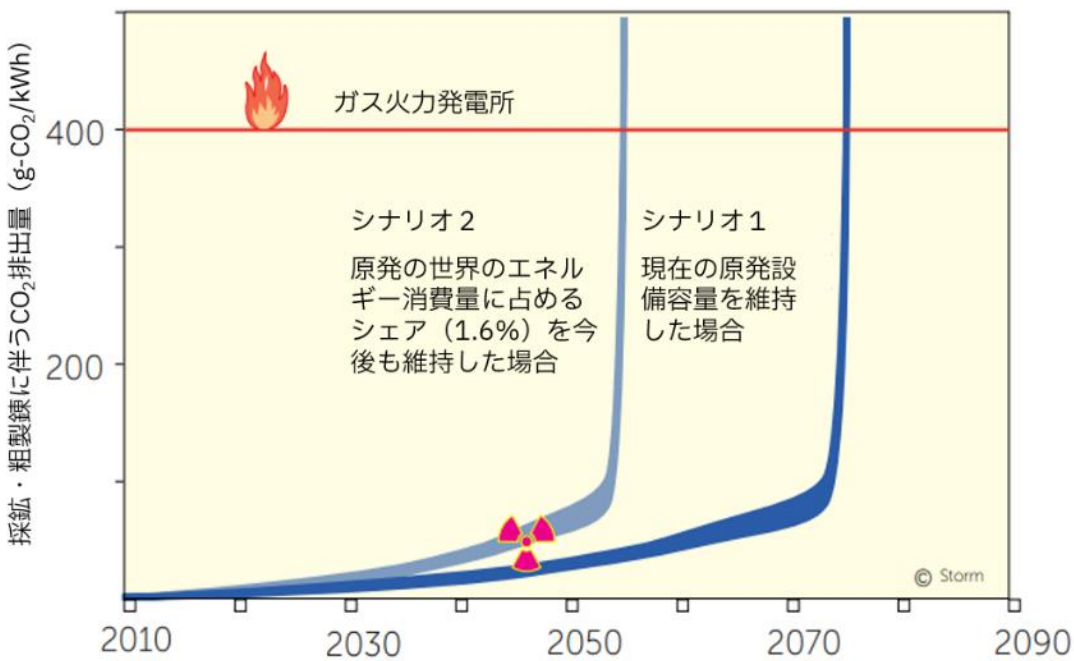


図 2-8 ウラン採鉱・製錬に伴う将来の CO₂ 排出量推計 出典：Storm(2019)

表 2-2 世界の原発設備容量推計

出典：IAEA(2022)

	2021	2030		2050	
		低位予測	高位予測	低位予測	高位予測
全電源の合計設備容量 (GW)	8208	10079	10079	16590	16590
原発設備容量 (GW)	390	381	479	404	873
原発シェア	4.8%	3.8%	4.8%	2.4%	5.3%

品位なウランを採掘せざるを得なくなるため、ウラン採掘・粗製錬工程での CO₂ 排出量は、現状の設備容量が維持された場合で 2070 年代半ば（シナリオ 1）、またエネルギー需要に占める原発寄与度が現状と同等（1.6%）

になるよう原発が増加した場合で 2050 年代半ば（シナリオ 2）に、LNG 火力からの CO₂ 排出量と同等または上回る事となる（図 2-8）。IAEA によれば、世界の全電源設備容量に占める原発のシェアは 2021 年現在 4.8%（390GW）である。これが 2050 年時点では、高位予測の場合は 5.3%（873GW）、低位予測で 2.4%（404GW）になるという（表 2-2）²³。つまり、既知のウラン資源量・品位のままであれば、高位予測の場合はシナリオ 2 より早い段階で、低位予測でもシナリオ 1 より早い段階で、CO₂ 排出量は LNG 火力を上回る。

2.6 まとめ

本章では、経済的な観点から原発が気候変動対策に効果的な選択肢かどうかを検討した。気候変動対策に取りうる選択肢は複数存在し、原発はその中の 1 つのオプションに過ぎない。気候変動対策が喫緊の課題である以上、費用対効果の観点は非常に重要である。原発はコストが高く、時間がかかりすぎ、気候変動対策たり得ない。また、原発のライフサイクル CO₂ 排出量は現時点では低く評価されているが、将来も低いかどうかは疑問である。特にフロントエンドにおける CO₂ 排出量は将来、ウラン品位の低下に伴い大幅に増加する可能性が高い。

3 原発の安全性を脅かす気候危機の影響

鮎川ゆりか

3.1 世界は東日本大震災をどう見たか

3.1.1 はじめに

2011年3月に起きた東日本大震災と福島原発事故。大津波によって流される自動車、トラック、家屋。次々と炉心が溶融し爆発する福島原発。世界の人々はその時、この映像をどう見たか。筆者は気候変動に関する活動をしていた世界のNGO、研究者、研究機関などが入っているメーリングリストで、「気候変動の影響として将来起こりうるリアルな姿」とする発信が多く、衝撃を受けた。

科学技術コラムニストのクリストファー・ミムスは、「気候変動のもたらす災害がどのような形をとるかを見ることは難しいが、東日本大震災の映像は、気候変動の影響で巨大化した暴風雨が海面上昇した状況でどのような姿を見せるかを示している」と書いた²⁴。

また英国ヨーク大学のナタリー・コピトコは、「この事故の重要な教訓の一つが見落とされている」とし、それは「原子力は気候変動の解決策とされてきたが、むしろ問題解決よりも原子力が気候変動に対して非常に脆弱性を持っている、ということを福島原発事故が警告している、という点だ」と述べている²⁵。

3.1.2 求められる原発の気候変動脆弱性に関する安全対策の国際基準

マサチューセッツ工科大学（MIT）の研究者グループは2019年に報告書「世界の原子力発電所の気候変動に対する脆弱性」²⁶をまとめている。ここでも Fukushima がしばしば出てくる。

気候変動関連異常気象による原発の受けた影響として、2018年のヨーロッパにおける熱波でフランスの4基の原発が運転停止し、2014年には米国カリフォルニア州の森林火災により、原発作業員が身の安全のために避難し、そのために運転停止を余儀なくされたことや、異常気象や暴風雨などにより運転停止する事例を、福島原発事故のように海岸沿いにある原発の危険性として指摘している。そして気候変動関連の異常気象が福島原発事故級の災害をもたらす可能性は「否定できない」としている。

また原発は大量の冷却用の水を必要とするが、これらの水が干ばつなどで不足したり、気温上昇の影響で水温が高まったりすると、運転の効率性、経済性に大きな影響をもたらす。特に2003年のヨーロッパでの熱波は30基以上の原発の閉鎖、または発電量の抑制措置が取られたことを記している。こうしたことから、ヨーロッパの原発の発電量は大気気温上昇幅が1℃上昇するごとに、2%減少するのでは、とする研究報告²⁷を紹介している。

さらに健康への被害にも言及し、福島原発事故による放射能汚染が魚介類や飲料水を汚染したことや、

原発の立地する周辺の住民の健康を守る必要があることにも言及している。

この MIT の 2019 年報告書で強調しているのは、気候変動の悪影響から原発を守るためには、国際的な協調が必要で、国際原子力機関（IAEA）などが音頭を取り、気候変動からくる極端な自然事象への理解を進め、原発を守る国際的基準をつくることだとしている。しかし現存する原発は 1970 年代などに作られたものが多く、老朽化しており、これらを運転している事業者は新たな基準を作ることは消極的だ。その場合は国家が責任をもって気候変動の影響を評価し、リスク軽減のための行動を取るべきとしている。それでも気候変動に関連する影響から起こる原発のリスクは、国境を越える。よって原発および送電網の気候変動に対する脆弱性に特化した議論を行う必要があるとしている。さらに IAEA がその音頭を取れないとしたら、IPCC がその仕事を請け負うべきだとも言っている。つまり、そのくらい、気候変動に対する原発の脆弱性を評価し、対策をとることは国際的に重要で必然と言っているのだ。

一方 IAEA は、2000 年以降毎年「気候変動と原子力」を発行しており、その 2022 年版²⁸には、IPCC や IEA のデータやシナリオを引用しながら、気候変動のリスクと原子力が果たせる役割について述べている。リスクとしては気候変動による嵐、熱帯性サイクロン、海面上昇により、海岸沿いにある原発の発電・送電・配電網インフラがかなり影響を受けるとしている。特に海面上昇は米国の東海岸にある原発は巨大化したサイクロンや暴風雨により大きな影響を受けるとしている。しかし脱炭素のための原子力の役割は多大で、エネルギー安全保障と気候変動のバランスをとることは必要だとしている。

3.1.3 気候変動の影響で運転停止に追い込まれる原発

Ahmed(2021)²⁹は 2021 年に出され、過去 30 年で気候変動関連事象による原発の運転停止数を見たものである。その割合は 1990 年代には 1 炉年あたり 0.2 回だったのが、2010 年代には 1.5 回と、約 8 倍に増えたとしている。原子炉 1 基が 1 年稼働した場合「1 炉年」という。

運転停止の要因を、「ハリケーンや台風など」「巨大暴風雨」「温度」「水」「その他」に分け、それらによりどのくらい停止していたか、それによる供給電力の損失量を分析している。

「その他」を除くと、いずれのケースも停止日数が最も多いのが「水」関係である。「水」は干ばつによる水不足や川や湖の水位低下で冷却水が取れなくなる、または水温が高くなり、冷却水として使えなくなるなどのケースだが、ここには水温が高くなり稼働レベルを下げても部分的に運転し続けるというケースは省いている。だが「水」関係の運転停止が最も長期にわたって続くため、供給電力ロスも多くなり、電力供給サービスとしては最も支障をきたす要因である。それに比べると、ハリケーンや巨大嵐などは期間も短いため、エネルギーロスも少ない。

これは平均気温上昇幅が 1°C 前後の期間のことで、今後の「2°C」上昇は次の未知の段階である。IPCC 第 6 次評価報告書(2021)³⁰によると、世界の平均気温は、1900 年前に比べ、1.07°C 上昇している。これは上限とされる「1.5°C 上昇」に限りなく近づいている。「2°C 上昇」は 2050 年前に達してしまう可能性もある。

IPCC の RCP8.5 シナリオ（最も排出量が多いケース）だと 2046-2065 年には気候変動関連による原

発の運転停止によるエネルギーロスは 0.8-1.4%になり、2100 年までには 1.4%～2.4%と見込まれる。

この論文は各種メディアで報道された。2021 年 7 月 24 日には Ars Technica が「原子力の信頼性は、異常気象の増大により落ちている」³¹、7 月 27 日には、Nuclear Newswire が「異常気象が原子力発電の信頼性に影響を及ぼしている」³²などで報道されている。気候変動が原発の運転稼働率にどのくらい影響を及ぼしているかという観点からの分析だからだ。

3.1.4 高まる気候変動による異常気象の中で、原発の経済性は？

Ahmed はその後、その他 3 人とともに、上記の研究をベースにして 2023 年 2 月に出された Utilities Policy の記事として、“A stormy future? Financial impact of climate change-related disruptions on nuclear power plant owners”³³を書いた。これは運転停止による原発の効率性、信頼性だけでなく、発電量当たりどのくらいの損失になるかという経済性の観点からまとめられている。

既に 2003 年に MIT は「原子力発電は経済的に競合できる選択肢ではなくなった」と発表した。その当時は石炭火力や LNG との競合だったが、20 年後の今日、経済的に見合う原発以外の非化石燃料、低炭素電力が現れている。それは事業規模の風力や太陽光発電などの再生可能エネルギーであり、電力事業者は新たな原発建設には積極的ではない。2020 年 8 月に米国アイオワ州のデュアンアーノルド原発がデレチョと呼ばれる竜巻のような暴風により、スクラムして自動的に運転停止した。冷却塔がかなりの損傷をうけた。同原発は 2034 年まで運転を許可されていたが、運転する電力会社はこの原発を閉鎖することにした。それは風力発電に替える方がずっと安価で、顧客にとってもメリットになると考えたからだ。

原子力発電は大量の電気をつくりだすため、1 基でも運転を停止すると、送電網への影響などから大きな損害をもたらす。実際 2017 年や 2018 年にフィンランドやドイツなどの原発が、河川水の水温上昇や河川水量が低下したことで出力を落とした運転を行ったり、2020 年にもフランスの原発 2 基は同じ理由で運転停止をせざるを得なくなっている。

もう一つの問題として、巨大化した嵐により原発の外部電源がやられるケースがある。原発は燃料の冷却のため、外部電源に頼っているのだが、これがダメになることを、ステーションブラックアウト (SBO) と呼び、原発を非常に危険な状況に陥れる。同じように送電線や配電線がやられても同様の危機を招く。こうした状況が暴風雨などでもたらされると、たとえこうした送電・配電網設備が原発から離れていたとしても、危機的状況になる。

さらに森林火災や大洪水の場合は、従業員の安全を確保するために、原発を停止させ、避難を優先せざるを得ない。

以上、福島原発事故を契機として、気候変動による極端な気象事象に原発は耐え得るのか、という研究があらゆる分野で行われていることがわかる。それに比べて日本は、気候変動への危機意識があまりにも低いと言えるのではないかと。特に原発の安全性に関しては、地震と津波が主要関心事である。日本は島国で、海に囲まれていることから、海面上昇などには、もっと関心を持ってもらいたいのではと思われる。次に海面上昇、水温上昇、そしてその影響としての冬の豪雪について、原発の安全性の観点からみていく。

3.2 海面上昇

3.2.1 IPCC の警告

海面上昇に関して、IPCC（気候変動政府間パネル）の第6次評価報告書（2021）では、図3-1を示し、気候変動の影響で、海水温が上昇し、それに加えて海面上昇が起こることを示している。図の(a)(b)(d)(e)を見てほしい³⁴。

(a)はいろいろなシナリオにより、どのくらい世界の平均気温が1900年比で高くなるかを示していて、最悪シナリオでは、2100年くらいまでに5°C上昇。

(b)は北極海の海氷面積が1950年（第二次世界大戦後）からどのくらい減っているかを示している。最悪シナリオを含むシナリオの3つが「実質的に氷がない」状態を示している。北極海の氷が解けると、氷の中に閉じ込められている温室効果ガス（CO₂やメタン）が大量に出てきて、気候変動が爆発的に加速する。

(d)は1900年を基準とした世界平均海面水位の変化で、最悪シナリオでは2100年時点で1mほどの上昇だが、点々になっているところに注目してほしい。「氷床に関する不安定なプロセスを含む、可能性が低くとも影響の大きいストーリーライン」とある。つまり最悪シナリオよりも最悪の場合は、この点線になり、2100年には1.8mにもなる。

海面上昇がさらに懸念材料とされるのは、今すぐに温室効果ガスの排出量が削減され、大気中温室効果ガス濃度が安定化し、さらなる気候変動を喰い止めることができたとしても、海面上昇はその後も続き、数千年も続くという点である。これはIPCCの第3次評価報告書（2001年）で示された。

さらに(e)を見ると、2300年までシミュレーションしている。「1900年を基準とした2300年の世界平均海面水位の変化」であり、「高排出の場合には15mを越える海面水位上昇の可能性も排除できない」とある。

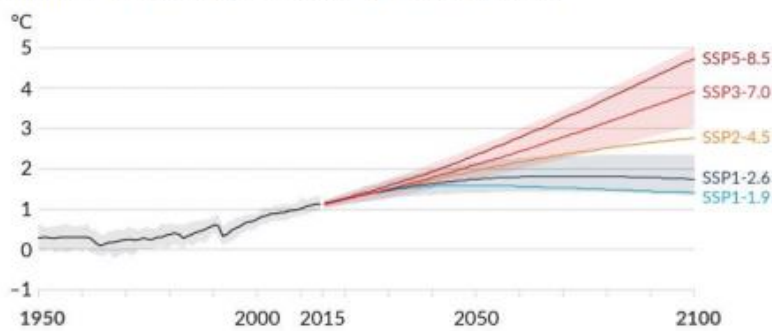
2300年まで考える必要があるのか、と思われるかもしれないが、原発の寿命を考えてみよう。ナタリー・コピトコは福島原発爆発事故前の2010年にすでに「気候変動、原子力、適応と緩和のジレンマ」という論文³⁵を学会誌「Energy Policy」に発表していた。コピトコも、その検証で、①原子炉の閉鎖時期、②原子炉の寿命期間、③100年、④150年の四つのシナリオを用いていた。

実際、原発の運転期間を「60年」とすると、その後の廃炉措置に要する期間は20～30年以上とされており³⁶、また使用済み核燃料の保管、高・中・低レベル放射性廃棄物の保管・最終処分などを考慮すると、100年はすぐに来てしまう。また放射性廃棄物の安全な保管は、プルトニウム-239の半減期が2万4000年であることを考えても、100年単位では短すぎる。よって原発にとって2300年はあっという間に来てしまう時期である。

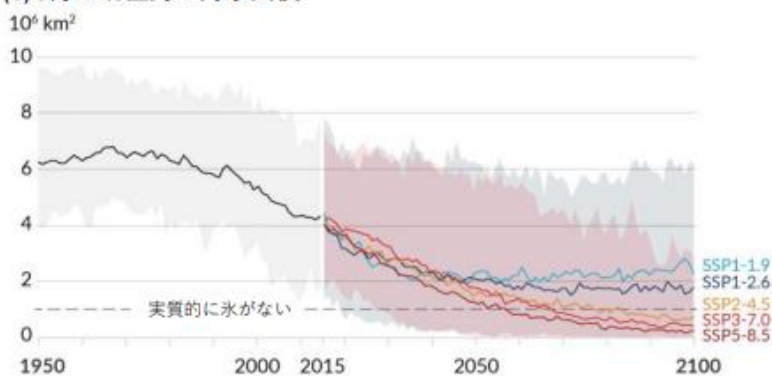
3.2.2 米国国防総省（DOD）は2010年から気候変動リスク分析・対策強化を行っていた

米国国防総省は、2010年以来、気候変動を軍事行動や軍事施設へ大きなリスクをもたらすものと位置

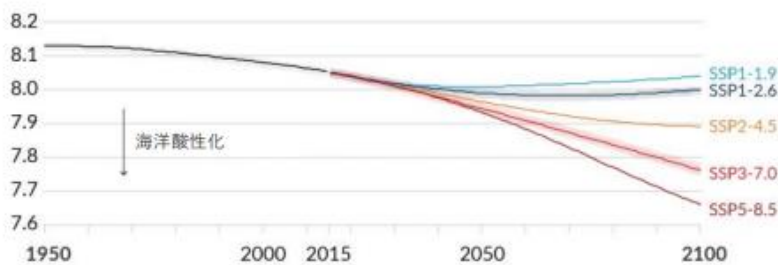
(a) 1850～1900年を基準とした世界平均気温の変化



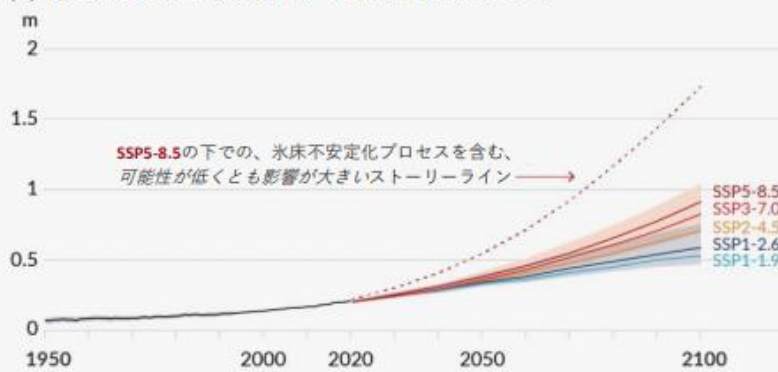
(b) 9月の北極海の海氷面積



(c) 世界全体の海面付近のpH（酸性度の尺度）



(d) 1900年を基準とした世界平均海面水位の変化



(e) 1900年を基準とした2300年の世界平均海面水位の変化



図 3-1 IPCC 第 6 次評価報告書で使用される 5 つの例示的なシナリオの下での地球規模の気候変動に関する主な指標
出典：IPCC AR6 WG1 Figure SPM8(気象庁訳)

づけ、特に海面上昇の影響を大きく受けるとしていた³⁷。

DOD は世界中に 1700 カ所におよぶ軍事施設を、海岸沿いに持っていて、海面上昇の影響を受けやすい。米議会調査局の 2013 年の議会調査報告によると、1900 年以降の海面上昇は 7~8 インチ (18~20 cm) ほどだが、1993 年からは 3 インチ (7.6 cm) も上昇している³⁸。

また 2016 年の米議会調査報告³⁹によると、米国では 1 億人の人々が海岸沿いに住み、米国領土の海岸沿いに住む人は 290 万人もいる。こうした人々が海面上昇による洪水、巨大化したハリケーンや極端気象の被害を免れるよう政府は指導、避難・適応計画立案などを支援し、損害費用を軽減するよう努力している。

つまり米国政府にとって気候変動による「海面上昇」を防ぐのは重要な安全保障政策の一つといえる。DOD の戦略的環境研究開発プログラム (SERDP) は太平洋諸島のサンゴ礁などでは、海面上昇幅が 0.4m 以上になると、海水が浸水し、飲料水が飲めなくなると結論した。2014 年の「気候変動適応ロードマップ」⁴⁰では、当時世界最大の軍事施設が集中しているヴァージニア州にあるハンプトンロード軍事基地が最もリスクにさらされるとした。2016 年には DOD 管轄内の施設などは計画段階で、気候変動の影響を考慮するよう DOD 指令⁴¹を出した。

一方米国議会は、DOD の軍事施設建設政策の中に、設計段階から、海面上昇の影響を評価し、防災対策を施すことを 2019 年に法令化した。それによると、軍事施設は FEMA (連邦緊急事態管理庁) の対象範囲内に入っているか、100 年先の洪水対策として、洪水の高さよりも 2~3 フィート (61 cm~91 cm) 高く建設するよう求めている。

また議会は、DOD の施設が極端な異常気象やハリケーン、高潮と重なる大洪水などに耐え得るかどうか、施設ごとに評価し、それらに耐えうるものとするを求めた。さらにアクセス道路や施設周辺の道など、施設外のインフラも、海面上昇や繰り返される大洪水などに耐えうるようにすることを求めている。

3.2.3 原発と海面上昇

すべての原発や大型火力発電施設は冷却水を必要とし、そのため海岸沿いや河川沿いに建てられている。

米国の NPO 「憂慮する科学者連合 (Union of Concerned Scientists)」は、2015 年研究報告「停電？巨大化する嵐、ブラックアウトに対し、いかにクリーンエネルギーが助けとなるか」⁴²を発表した。特に河川沿いや海岸沿いにある発電所や送電網を地域ごとに、2030 年、2050 年、2070 年にどのくらい、洪水や浸水、大規模ハリケーンの影響を受け、停電やブラックアウトが起きる可能性があるかを分析した。

またナショナルジオグラフィック誌は同じく 2015 年に「海面上昇を受け、沿岸の原発は備えているか」の中で、気温上昇幅が「2°C」の場合、「4°C」の場合に、東海岸沿いにあるどの原発がどのように影響を受けるかを、地図上で示した⁴³。

2020年9月、新古里1、2号機と古里3、4号機が、台風9号（メイサーク）により、3日夜から4日未明にかけて自動停止した。7日午前には台風「ハイシェン」の影響により、月城2、3号機が停止した。原発を運営する韓国水力原子力によれば、強風で飛ばされてきた塩分により、電力設備が故障したためという⁴⁴。IPCC第6次評価報告書は地球温暖化の進行に伴い非常に強い熱帯低気圧の割合とピーク時の風速が今後強まると予測している。海面上昇とともに、熱帯低気圧の吹き寄せ効果によって、海沿いに立地する原発への塩害リスクも高まっていくと考えられる。

3.2.4 使用済み核燃料プールは海面上昇でどのような影響を受けるか

米国の原子力規制庁（NRC）は福島原発事故後、同事故から学べる教訓をまとめるよう指示し、National Academy of Science が報告書をまとめた。その第2弾は2016年にまとめられ、主に使用済み核燃料プールへの脅威がテーマとなっている⁴⁵。

福島原発事故が起きた当初から米国は福島第一原発4号機の使用済み核燃料プールのことを第一に心配していた。使用済み核燃料が大量に保管されているため、ここには、最も多くの高レベル放射性物質が集められている。この使用済み核燃料プールは原子炉の4階にある。米国政府は4号機が爆発して使用済み核燃料プールが壊れる、あるいはプールの冷却水面レベルが使用済み核燃料の上から1mのところまで下がった場合や、核燃料の半分が露出した場合、大量の放射能が放出されると考えていた。特に懸念されたのは、4号機のプールに貯蔵されていた使用済み核燃料には原子炉から出したばかりのものがあり、熱量が原子炉内と同等に近く、水の供給がないとあっという間に水を蒸発させ、水面レベルを下げる可能性があるからだった。その危険性を重大事項とした米国政府は、在日米国民に対し福島原発から半径80km圏から出るように指示を出した。当時日本政府は20km圏に対し避難指示を出していたので、その差に筆者は驚いた。この報告書の第2章はその話になっている。

福島第一原発4号機は津波のため電源を失い、その後、隣の3号機の水素爆発に伴い、4号機も爆発し、使用済み核燃料プールは、冷却システムが壊れ、水面レベルや水温をモニターする装置も壊れた。しかしヘリコプターで水をかけたり、消防車が海水を汲んでかけたりし、ようやくヘリコプターからプールを覗いた時に、青い水面が見え、みんな安堵したことを覚えている。その水が保たれたのは、偶然に原子炉ウェルから水が使用済み核燃料プールに漏れ出ていたことによる。原子炉ウェルに水があったこと自体、定期点検中だった4号機で、不手際によって工事が遅延したためだった。つまり、順調に工事が行われていれば、原子炉ウェルに水はなく、使用済み核燃料プールは干上がっていた可能性が高い。そうした偶然が幸いし、プールの水面レベルが保たれ、大きな危機を免れたことが書かれている。

使用済み核燃料の危険性については、Alvarez 等が、2019年に論文を書いている⁴⁶。使用済み核燃料プールに関しては、原子炉ほどの安全対策が施されていない。これは中間貯蔵としての位置づけであるからで、再処理工場または最終処分場へ運ばれるまでのものである。しかし使用済み核燃料を含む高レベル放射性廃棄物の最終処分は米国でも進んでおらず、先送りされている。その間に、気候変動がさらに進展し、さまざまな自然災害がもたらされるとなると、原子炉以上に危険となりうる。

すでに海岸線は海面上昇の影響を受けているが、海岸に立地されている使用済み核燃料貯蔵所にどのような影響があるのか、包括的な影響評価を行った研究を、著者たちは見たことがないとしている。これは今も、そして日本でも同様のことが言えるのではないか。

福島原発事故は気候変動関連事象の結果として起こったものではないが、原発が海岸沿いに建てられていることと、不十分なリスク・環境影響管理によるものだ。そして現在の使用済み核燃料の管理は、起こる可能性が少ない事態に対しても適切か、あるいはもっと長期にわたり、気候変動がさらに進展し、今では予測のつかない不測の事態が起こるとしても安全か、という問題を突き付けた。

気候変動の進展に伴い、長期にわたる洪水、海面上昇が起こりうるが、こうしたことは使用済み核燃料を冷却し続けることに支障を来し、安全上の問題を突き付ける。さらに全電源喪失という福島原発事故で起こったことは、気候変動の影響でも起こりうる。福島原発事故の 4 号機のケースはまさにその事例であった。使用済み核燃料が冷却不能になった時にも火災を引き起こさないよう、使用済み核燃料貯蔵施設の安全性を保つ必要がある。

現在、プール貯蔵の代替案としてドライキャスクが提案されているが、実はこれも問題となっている。カリフォルニアにあるサンオノフレ原発はドライキャスクに使用済み核燃料を移管していたが、トラブルによって 2018 年にはこの作業が止められた。地元の議会議員はこの事態を「フクシマが起きるのを待っている状況」と述べたとロスアンジェルス・タイムスが報じたとのことだ。

そもそも使用済み核燃料には、膨大な量の放射能が溜まっており、それが大量に一カ所にまとめて貯蔵されていること自体が極めて危険であることに、もっと注意を払う必要がある。

3.3 水温上昇の影響

次に気温上昇とともに起きている河川、湖、海水の水温上昇について考える。

IPCC 第 6 次評価報告書によると、陸上の平均気温は産業革命前に比べて 1.07°C の上昇だが、海面の水温はそれより低く、0.88°C 上昇とされている。

しかし陸上の河川や湖などの温度は海水より高い。それにより、原発は大いなる影響を受けていることは、すでに述べた。

WMO（世界気象機関）は、2023 年 1 月 12 日に「2015 年からの 8 年間は史上最も暑い年だった」と発表し⁴⁷、そのうち 2016 年が最高で、2019 年、2020 年がトップ 3 である。2022 年も暑かったがエルニーニョ現象で多少気温が低めになった。

しかしヨーロッパでは 2022 年夏が史上最も暑い夏であったと EU の地球観測機関コペルニクス気候変動サービスが伝えている⁴⁸。春の後半と夏に気温が高くなると同時に、雨が降らず、土壌が乾き、ヨーロッパ南部、中央部は干ばつに見舞われ、飲料水が配給される事態となった。

夏、特に 8 月にかけて、気温が 40°C になる日々が長期間続く熱波に 4 度も見舞われた。年間を通して観測史上 2 番目に暖かい年であった。

そのため、フランスでは深刻な電力不足に陥った。フランスは電力の 7 割ほどを原発に頼っている。

2022 年夏は 56 基の原発のうち、32 基が修理点検や熱波による水温上昇で、出力抑制や稼働停止の状態に陥った⁴⁹。また河川が干ばつで干上がり、13 基ある水力発電も発電不能になった⁵⁰。

フランスの原発の 4 分の 1 が立地しているローヌ川やガロンヌ川、ロワール川の水温が高くなり、通常だと、温排水の水温制限がある。これは河川の生物多様性保護のためと、原発の安全性を保つためだが、これについては、コラム(p.26)に詳しい。その制限を緩和させ、熱い温排水を河川に流したりしながらも、低出力で稼働を続けた原発もあった。また、複数の原発で見つかった配管の応力腐食割れや、運転期間延長に備えた改修工事なども相まって、原発からの発電電力量は 2021 年の 360TWh（テラワット時＝10 億キロワット時）から 2022 年には 279 TWh に大きく減少した。ピークだった 2005 年の 430TWh と比べると 35%の減少だ。なお、2023 年も原発からの発電電力量は 290～320 TWh にとどまると見込まれている。原発の発電電力量が大幅に低下した 2022 年、通常は電力輸出国であるフランスが年間で初めて電力の輸入国となり、ドイツなどの隣国から電力を輸入せざるを得なかった⁵¹。

そのドイツでもライン川が干上がり、冷却水として使えないだけでなく、船の航行も難しくなり、石炭火力発電所へ石炭を運び込めなくなった。ドイツは水の消費量の半分が原発や化石燃料の火力発電の冷却水に使われている。また水位が低くなった水力発電所も発電ができなくなった。

2022 年だけでもこれだけの影響があったが、ヨーロッパの原発は、2003 年の熱波以来、毎年、河川水の温度上昇に伴い、出力制御や運転停止をせざるを得なくなっている。その状況は、原発に頼るフランスで最も多い。

一方、原発から再生可能エネルギーに替えているスウェーデン（水力、風力など）やドイツ（太陽光発電、風力など）は逆にフランスに電力を輸出することになった⁵²、とエネルギー経済財政分析研究所（IEEFA）のフランク・バス氏は記事で書いている。氏は「フランスの原発トラブルは、再生可能エネルギーを多様に持つことの必要性を示している」と書き、原子力が今後頼れる電源ではないこと、多様な再生可能エネルギーの組み合わせを持つことの必要性を説いている。

先に紹介した Ahmed(2021)で、気候変動関連事象による原発停止の要因は「水関係」が最も多く、期間も長く続くので、エネルギー供給産業としては大いに支障をきたす問題だ、との結論は、既に立証されていると言えよう。

3.4 冬の豪雪と原発

気温上昇に伴い、空気中の水蒸気は増える。それは気温上昇により河川や海水の温度が上がり、それらが水蒸気になって大気中に含まれることになるからである。大気は気温が高いほど水蒸気を大量に含むことができる。それが夏だと大雨をもたらし、台風やハリケーンの際の降雨量を増やし、気温が氷点下になると雪となる。そのため日本だと日本海、米国では五大湖、メキシコ湾が関係して、巨大ハリケーンや豪雪をもたらしている。

近年冬の嵐がひどくなり、アメリカ南部のテキサス州では 2021 年 2 月に、一帯の発電所が原発や風力発電も含めすべて停止し、全面ブラックアウトが 2 月 15 日から 18 日まで続いた。もともと暖かい地

域で、雪が降るなど想定されていなかったため、冬の嵐 Uri が来た時、暖房需要が突然大きくなり、送電・配電網会社は、計画停電をしなくてはならなくなった。しかし予定の15～45分ではすまずに、もっと長時間に及んだ。天然ガス採掘所では天然ガスとともに地表に流れてくる水やその他の液体が凍ったため、天然ガスが採掘不能になり燃料を発電所に届けられなくなった。石炭火力発電も燃料不足で停止した。風力発電はタービン全体が凍って動かなくなった。太陽光発電も発電しなかった。人々は3～4日間も停電にさらされ、少なくとも246人が死亡し、被害額は1300億ドルにもおよぶ⁵³。

原発は、サウステキサスプロジェクトが動いていたが、そのうち1号機が2月15日午前5時37分に緊急停止した。原因は排水ポンプの圧力検知ラインが寒さのために故障、誤作動して間違った信号を出し、排水ポンプが停止したためだった。2号機は正常に動いており、1号機は2月17日の午後9時7分に運転再開し、18日には36%まで稼働率を上げた⁵⁴。

米国では冬の嵐により、大雪、ドカ雪や雪嵐、低温で、生活に支障をきたす事例が毎年起きているが、このテキサス州が全域、冬場にエネルギー不足に陥ったことは史上初で、かなり衝撃的な事件であった。そのためその年の夏⁵⁵、1年後^{56、57}、2年後の今日でも、この事態がなぜ起きたかの分析や検証、今後の方針などに関する記事や研究がたくさん見つかる。

日本の冬は「大陸から強い冬型の気圧配置になり、日本海側では大雪となり、太平洋側では乾燥した晴天」の場合が多い。冬型の気圧配置の時に吹く北風は冷たく乾燥している。大陸でできた空気はほとんど水蒸気を含んでいないからだ。これを「大陸性寒気団」と呼ぶ。この「大陸性寒気団」が日本海を渡ってくるとき、暖かくなった日本海から多量の水蒸気と熱をもらい湿った空気になる。大陸から日本海を通過することで、大陸性寒気団の性質が変わることを「気団変質」と呼ぶ。気団変質した空気は日本海上で雲を作りながら日本へやってくる。これが本州を縦断する「脊梁山脈」にぶつかると、雪雲に変わり、日本海側に大量の雪をもたらす。

最近よく聞くようになったJPCZ（日本海寒帯気団収束帯）は、大陸から吹く冷たい北西の風が朝鮮半島にある山を迂回して二手に分かれ日本海で合流することでできる。これに風が合わさると、雪雲が発生するため、陸地にかかる沿岸部でも降雪が強まる。これがしばらく停滞すると、「ドカ雪」になり、クルマの立往生など、生活に支障を来す状況をもたらす。

気候変動が進むとこれらの大雪は増えるのだろうか。気象庁気象研究所の川瀬宏明氏によると、一冬に降る雪の全体量は減るが、北海道や北陸地域で、短時間に大量の雪が降る「ドカ雪」は増えるかもしれない、とのことだ⁵⁸。温暖化によって気温が上昇してもJPCZはなくなる。さらに日本海の水温がますます高くなり、今よりも多くの水蒸気が大気に供給される。そこでより多くの雲が発生し、気候変動で気温上昇していれば、大雨が降り、気温が氷点下であれば、雪になり、これが大雪になるのだ。気温、水溫が高くなればなるほど、大雪が降る可能性は増える。日本海の水溫と大気の気温の差は初冬期に大きいので、豪雪は冬の始めに起こりやすい。その後、何回もJPCZが日本海を通過することで徐々に日本海を冷やし、水溫と気温の差が平均化してくるので、日本海の水溫が最も低くなるのは3月頃。よってこの頃から大雪が降る可能性が少なくなる、とのことだ。つまり、これから気候変動が進行し、大気中の気温が高くなっても、氷点下の空気が流れてくる限り、大雨や大雪はあるということで、いっぺんに大量の雪

が降る「ドカ雪」はありうる。

この「ドカ雪」は近年、毎年起きていて、記憶に新しいところでは、新潟県での記録的大雪により、2022年12月19日から長岡市などの国道8号と17号が通行不能の立往生になった。これは21日午前8時に渋滞が解消し、通行止めが解除されるまで26時間程続き、現場から5人が病院に搬送された⁵⁹。

ここで懸念されるのは、こうした事態のもと、新潟県柏崎市・刈羽村にある柏崎刈羽原子力発電所に何かあったときに、誰も避難もできず、また発電所を救出するために発電所へ向かうことすらできないのではないかと、ということである。

全国版ニュースではほとんど取り上げられていないが、新潟日報や主要紙の地元版がその問題を取り上げている。

- 2022年12月27日 産経新聞「原発周辺国道の大雪立ち往生 『大事な避難路』新潟知事指摘」⁶⁰
- 2023年1月8日 読売新聞「雪の国道で立ち往生、新潟・柏崎市長『再稼働に影響与える』…避難経路通行止めに懸念」⁶¹

ここで県知事や柏崎市長が求めているのは、こうした道路の「立往生」が起きないように高速道路の事前閉鎖はしないでほしい、ということだ。柏崎市長は、「この事態が見過ごされると再稼働に影響を与える」と述べた。

一方新潟日報の方は、立ち往生で通行止めになった国道8号や北陸自動車道は、原発事故の際の住民の避難路であることから、避難できないだけでなく、立ち往生になった場合は、被曝のリスクが高まると報じている⁶²。

柏崎刈羽地域では、2015年に県、柏崎市、刈羽村、内閣府、経済産業省、自衛隊などと「原子力防災協議会作業部会」を立ち上げ、毎年1～3回は会議を開いてきた。2021年12月の会議では、豪雪時は避難が指示されても、除雪で安全に非難できるまで屋内退避を継続するという考え方が合意され、その後、会議は開かれていないとのことだ。住民は大雪との複合災害時の避難を懸念しているが、対策は見えてない⁶³。

2023年2月7日に新潟県内30市町村で構成される「原子力安全対策に関する研究会」が開かれ、それぞれが大雪時の移動や情報伝達に強い懸念を示し、国や県に実効性ある避難方針を求めた⁶⁴。長岡市長は、「立往生で大雪時には避難できないと思い知らされた」と語っている。

「ドカ雪」による道路の立往生は今回が初めてではない。2017年～2018年にかけての冬の新潟・北陸地域には、「平成30年豪雪」⁶⁵があり、2018年2月4日から13日まで大雪が降り、国道8号で車約1500台が60時間以上立ち往生し、通行止めは38.5kmに及んだ。

2020年には12月14日～20日まで上越と中越地方で統計開始以来の大雪が降った⁶⁶。52時間もの「関越道大規模立ち往生」が起きた⁶⁷。

2021年1月上旬には、北陸地方で豪雪になり、北陸自動車道では最大1600台の車が約66時間立ち

往生し、国道 8 号も渋滞に陥った⁶⁸。その他、除雪中の事故、停電、渋滞事故などにより死者、けが人が多数出た⁶⁹。

今後気候変動の進行とともに、日本海の水温はより高くなり、こうした「ドカ雪」が一冬の回数は減っても、必ず起きるとい状況になる可能性はある。

日本海側には新潟県の柏崎刈羽原発（100 万 kW 以上 7 基）を始め、石川県には志賀原発 2 基、福井県にはかつて「原発銀座」と呼ばれた若狭湾沿岸に美浜 3 号、大飯 3-4 号、高浜 1-4 号、敦賀 2 号機の合計 8 基があり、さらに廃止措置中の原発が、高速増殖炉もんじゅを含め 7 基ある⁷⁰。島根県には島根 1-2 号機があり、総勢 26 基もある⁷¹。

迫りくる気候変動による極端現象で豪雪が発生した中、電源喪失などにより原発事故が起きた場合に、避難路がなくなることは、非常に不安な事態と言えよう。

これは避難の話だけではない。福島原発事故の時も、必要なディーゼル発電機やバッテリーなどを届けたくても、地震の影響で道路が陥没したり、津波の影響で道路がなくなったり、さらには原発が爆発したため、30 キロ圏内に入ることができなくなったりしたため、必要なモノを届けられなかった、ということも事故を拡大させてしまった大きな要因であったことを忘れてはならない。

3.5 結論：日本の原発は気候変動の影響を考慮せず、安全性を保つ適応策を取っていない

日本の原発の安全規制は 2011 年の福島原発事故を受け、安全対策が強化されたが、気候変動のもたらしうる異常気象の増大、強大化など、IPCC のシナリオや IEA の想定などをもとにした将来のシミュレーションは行っていない（4 章参照）。

福島原発事故を受けて、世界の研究者・原発事業者は、原発の安全性・経済性を巡ってさまざまな研究論文を書き、出版している。そうした事態を踏まえると、日本は福島原発事故の「教訓」から学んでいるとは言えない。まして、気候変動による様々な影響に対処する方向性は、まったく見えないと言えるのではないだろうか。10 年後、50 年後、100 年後を考えると実に恐ろしい事態である。

コラム 原発と二つの冷却方式

川井康郎

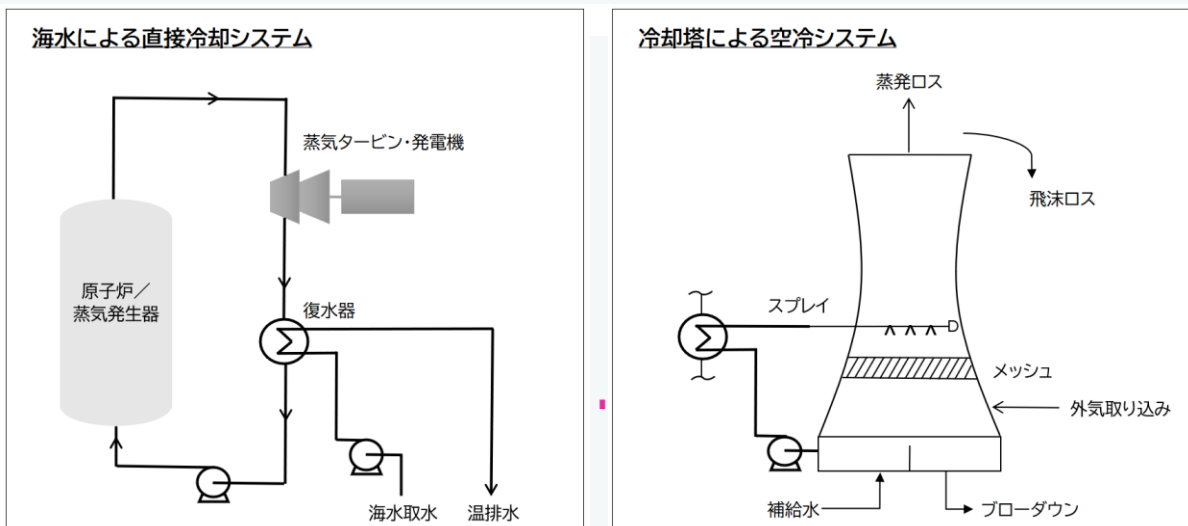
欧米の内陸部に設置された原子力発電所では写真のような巨大な冷却塔をよく見かける。これは余剰熱の逃し場所（最終ヒートシンク）を大気とするもの（空冷型）で、日本のように海沿いに設置され、海洋が最終ヒートシンクとされる方式（水冷型）とは原理が基本的に異なる。



下に両ケースのスキームを並べてみた。左側が海水による直接冷却システム、右側が冷却塔による空冷システムである。原子炉と蒸気タービン、復水器周りは同一であり、最終的な熱除去の方式が異なるだけである。

直接冷却システムでは海水を冷却水として大量に取り込み（1.0 GW 発電所の場合、毎時約 25 万トン）、約 7°C（季節によって変動）に上昇した温排水が海洋に放出される。異常気象や温暖化により海水温度が設計基準温度よりも上昇した場合は、復水器性能が低下して発電量が下落する。

一方、空冷システムは、循環水の一部を蒸発させてその潜熱により冷却する原理である。ほぼ外気温（湿球温度）に近い低温水を得ることが出来る。空気は下部より採り入れられ、暖められた後、自然通風により上部に放出される。循環水の損失として、蒸発ロス、飛沫ロス、不純物の濃縮を防ぐためのブローダウンがあり、それらの損失を補うため補給水が河川から供給される^a。そのため異常気象や温暖化により気温が上昇した場合には循環水温も併せて上昇して発電量が減少する。更に、河川の水量低下や枯渇に伴う汲み上げの禁止や制限によっても原発の出力は大きく影響を受ける。



^a 補給水量の例（目安）：循環冷却水量が毎時 35 万トン（温度差 5°C）の場合、蒸発ロス（約 1%）+ 飛沫ロス（約 0.05%）+ ブローダウン（約 0.4%）を合計して、補給水量（計 1.45%）は毎時約 5 千トンとなる。なお、ブローダウンとは汚れや不純物などを含んだ循環水を常時一定量を抜き出すことで濃縮を避け、水質を一定の水準に保つための手段

4 新規制基準における気候変動

川井康郎

4.1 対象となる自然現象

実用発電用原子炉に係る新規制基準^bには将来の気候変動への対策を義務付けるような規定はない。但し、設備に損傷を与える可能性のある外部事象として地震（第四条）、津波（第五条）、その他の外部からの衝撃（第六条）を考慮すべきとしている。更に第六条では、想定される自然現象として「洪水」「風（台風）」「竜巻」「凍結」「降水」「積雪」「落雷」「地滑り」「火山の影響」「生物学的事象」「森林火災」等が挙げられている。そして、これら事象の発生時においても施設の安全機能が損なわれてはならないとされている。

また、想定されるべき外部事象の規模として、原子力施設毎にそれぞれ「基準地震動」（第四条）と「基準津波」（第五条）が設定されると共に、第六条に挙げられた自然現象については「過去の記録、現地調査の結果及び最新知見等を踏まえて、適切に予想される」ものとしている。

4.2 温暖化に関連する自然現象の現状想定と対策

4.2.1 津波と高潮

津波の発生要因として、地震のほか、地すべり、斜面崩壊その他の要因、及びこれらの組合せによるものを複数選定し、不確かさを考慮して原子力施設毎に基準津波の位置と高さを策定している。更に、潮汐ならびに高潮による重畳を考慮して、防護の対象となるべき施設付近における最大遡上高さを策定している。例えば大飯 3、4 号機の場合、取水路奥の遡上想定高さ 6.9m に対して敷地高さは 9.7m 以上あり、また、ポンプ室前の想定遡上高さ 6.3m に対してポンプ位置は 2.5m と低い場所に設置されているが、8.0m の防護止水壁を設置しており、いずれの場合も一定の余裕をもって設備は保護されているとしている。尚、高潮については、至近 43 年間の潮位観測記録に基づいたハザード評価により再現期間 100 年の最大高さを試算している。

東日本大震災以後、現時点では遡上津波が設備敷地内を襲う可能性に対して、防護壁の強化、水際設備の水密化、施設内逸水対策強化など一定程度の対策は施されている。しかし、将来的には温暖化のいっそうの進行による海水面の上昇、異常気象による想定外の高さの高潮の襲来、更には、地盤沈下、防護壁の

^b ここで新規制基準とは「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（2023 年 9 月 26 日改正）」及び「その解釈」を言う。

老朽化に伴う強度劣化などによる浸水リスク増大の懸念は拭い去れない。

4.2.2 強風と竜巻

国内の原発においては、過去に発生した最大竜巻 F（藤田）スケール 3（風速 70～92 m/s）の最大値に余裕を加えた 100 m/s を設計竜巻荷重とし、原子力規制委員会が 2013 年 6 月に策定した「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」に従い風圧力荷重、気圧差荷重、飛来物衝撃荷重を評価している。台風による強風対策は竜巻対策に包絡される。

なお、米国では 2013 年オクラホマ州のムーア竜巻（最大 94 m/s）、など F スケール 4（93～ 116 m/s）に相当する巨大竜巻が度々襲っている。米原子力規制委員会（NRC）による竜巻ガイド⁷²では、年間の襲来確率 10^{-7} 以下を想定し、設計風速を中部では 103 m/s、東海岸では 89 m/s などと地域ごとに設定している。

気候変動の進行と共に、台風や竜巻の風速が増していくことも予測されるが、現状の規制の中では考慮されていない。

4.2.3 その他の自然事象に対する考慮

その他の異常気象による外部事象に対しても安全機能が損なわれることのない設計が求められている。

- 降水に対しては、近隣の気象観測所にて観測された 1 時間あたりの最大降水量を上回る構内排水処理設備と海域への放出設備
- 落雷に対しては、避雷設備と雷害対策（雷サージ防護等）
- 生物学的事象に対しては、クラゲや貝等の異常発生を考慮した取水設備への防塵装置
- 凍結に対しては、近隣の気象観測所にて観測された最低気温を考慮した保温ならびに凍結防止対策
- 積雪に対しては、過去の記録を調査し、考えられる最大の積雪荷重に応じた建屋や設備の強度を有する
- 洪水や地滑りに対しては、規制基準上での規定はないが、堰堤の設置など立地条件に応じた措置をそれぞれ講じる

4.3 まとめ

以上より、現行の規制や設計の基準は、設計時点における最大外部衝撃予測値に対して安全機能が損なわれない設備を求めているだけのものであり、温暖化や異常気象による将来的なリスクは、設計余裕を除いては考慮されていない。

将来リスクとしては以下のような事象が考えられる。

- 想定を超える強風、遡上津波高さ、豪雪といった外部事象の襲来

- 設備の老朽化に伴う強度劣化、機能劣化による対策の不全化
- 地盤沈下による相対的な海面上昇
- 海水温度上昇による受容範囲を超えた発電効率の低下
- 発電設備周辺における障害の発生。例えば、避難ルート、資材・人員の輸送ルート、外部電源設備（送電線、変電所など）、等々
- 地震、ならびにこれら事象の重畳

5 気候安全保障と原発

—その論理と対策としての原発の有効性の検討—

蓮井誠一郎

5.1 背景としての気候変動予測の研究結果

気候変動が「気候危機」として喧伝され始めて久しい。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は第6次評価報告書（AR6）で「人間の影響が大気、海洋、及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない。大気、海洋、雪氷圏、及び生物圏において、広範かつ急速な変化が現れている」⁷³として、気候変動における人為性について自信を深めた。その背景には、図 5-1 にあるように、気候科学の深化により観測値とシミュレーション結果の一致度が高まり、計算モデルの正確さに確信がより深まったことがある。

またそれに基づく自然起源の要因のみの結果と人為起源と自然起源の要因を考慮したシミュレーション結果の差がこれまでよりも明確に開いたことがある。ここから、共有社会経済経路（SSP）シナリオと代表濃度経路（RCP）シナリオとを組み合わせた将来予測についても、確信度を高めてきた。この気候変動に関する物語が国際的に共有され、危機感の高まりと、カーボンニュートラルなどの緩和策の推進の必要性が政策決定者たちの間でより強く認識されるようになってきた。

(b) 観測あるいは人為起源と自然起源の要因又は自然起源の要因のみを考慮してシミュレーションされた世界平均気温（年平均）の変化（いずれも1850～2020年）

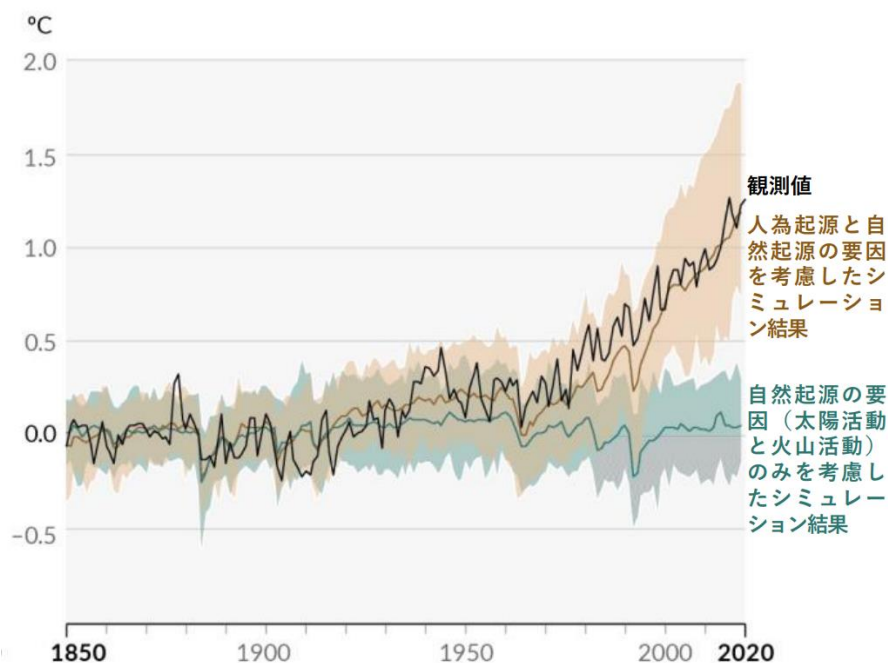


図 5-1 世界平均気温の変化の歴史と最近の温暖化の要因

出典：IPCC AR6 WG1 Figure SPM.1 より抜粋（気象庁訳）

5.2 気候安全保障という考え方

気候変動が世界的に注目を浴び、その影響が広く認識されるようになると、「気候安全保障(climate security)」という表現が 2005 年頃から国際政治を含む様々な場面で用いられるようになってきた。ただしここでの「安全保障(security)」は伝統的な考え方である軍事的な国家安全保障(national security)よりも広い含意をもつ。その意味で、気候安全保障は 80 年代の安全保障の再定義の議論がもたらした「新しい安全保障論」あるいは「批判的安全保障論^c」のひとつだといえる。

気候変動が安全保障上の脅威と認識される背景には、問題を安全保障化(securitization)することによって政治的に注目を集めたり、予算や資源を獲得したり、2005 年当時は気候変動対策に後ろ向きだったアメリカを動かそうという思惑が働いた面もあったと考えられる。だが何よりも重要なのは、気候変動が安全保障上の脅威の要素である「人為性」「能力」「意図」について、その要件が揃ってきたことにある。

「人為性」については、前述の通り IPCC の評価報告書が「疑う余地がない」としたことが重要である。また「能力」についても同じ IPCC の評価報告書（とくに第 2 作業部会 (WGII)）が広範で深刻な影響、即ち加害能力を詳細に描き出している。「意図」については「未必の故意」が成立することで認められる。

「未必の故意」とは、それを確定的な結果として認識あるいは求めてはいないが、その発生の蓋然性を認識しながらも、原因となる行為を行うことである。現在では、IPCC などの努力で気候科学が進歩したことにより、GHG の排出は気候変動につながるということが世界的に明らかになった。そこでたとえ気候変動を望まずとも、排出を続けたり増やしたりすることは、その主体が気候変動という結果発生を予測しながらも許容していることを示す。それは法的には故意に気候を変動させようと意図しているのと同じ責任が成立すると考えられる。これらのことから、GHG 排出による気候変動は、軍事的侵略と同様に安全保障上の脅威としての要件が備わったことになる⁷⁴。

議論が始まって間もない 2007 年段階では、その含意は次の 3 つに整理されていた。第一の含意は、気候の安全保障(security of climate)であり、それは気候変動の緩和策とほぼ同義で、大気的成分を変化から守ることを意味した。ここからは、緩和策の推進や、政府機関としては大きな温室効果ガス(GHG)排出割合を占める軍隊の排出量の削減などが論じられた⁷⁵。第二の含意は、気候変動を通じた安全保障(security through climate change)についての議論で、主にイギリスやドイツなど欧州諸国から提示され、気候変動が国際政治の構造や力関係に新たな変化をもたらすことで安全保障の根幹に関わる問題となる、という考え方^dである。当時、蟹江はこれを「構造的気候安全保障」と呼んだ⁷⁶。第三の含意は、気候変動による安全保障上の脅威 (climate change as a security threat) という考え方で、気候変動がもたらす影響が人命や財産を損なったり、武力紛争の原因となったり、軍隊の活動に影響を与えるという考え方で、当時の蟹江はこれを「軍事的気候安全保障」と呼んだ⁷⁷。

いずれにしても、気候安全保障の概念そのものは、90 年代に地球環境問題の注目と同時に流行した環

^c さしあたり、日本語文献として次を参照。前田幸男・蓮井誠一郎、2022「環境と批判的安全保障—気候の危機からジオ・パワーへ—」南山淳・前田幸男編『批判的安全保障論』（法律文化社）98-120 頁。

^d 一例として、German Advisory Council on Global Change(WBGU), 2007, *World in transition: Climate change as a security risk*. German Advisory Council on Global Change, Berlin.

境安全保障(environmental security)の議論の延長線上にある。環境安全保障は、様々なレベルの環境問題が地域に社会経済的な悪影響をもたらし、それが政治的な対立や紛争にまでつながることで国家だけでなく様々な主体にとっての安全保障上の脅威となるという考え方で、その問題意識も上記の第一から第三の含意までに大別できる⁷⁸。

気候安全保障の概念自体は、その後も世界で研究が続き、亀山・小野によると 2020 年段階の論文では様々な文献で提示された気候安全保障概念の定義から、次の表 5-1 のように整理できるとされている⁷⁹。この中で、上記の第一の含意は「長期的かつ不可逆的な地球規模変化」に含まれ、第三の含意は「個人への短期的かつ突発的なリスク」「紛争や暴力の根源的要因」「軍事力や防衛力への影響」に含まれていると考えられる。第二の含意が含まれる部分は直接的には見当たらないが、これらに国際社会が対応するために必然となる行動と言えるであろう。

このような気候安全保障の文脈に原発を積極的に位置づけるならば、第一の含意では、消費される電力に対する CO₂ 排出量の削減に貢献し、全体的な CO₂ 排出量を削減する可能性が考えられる。また、第二の含意においては、原発とその開発や輸出、核物質の管理などに伴う国際秩序の変容が指摘でき、それはいわゆる「エネルギー安全保障」や「核セキュリティ(nuclear security)」の新秩序構築の必要性とそれによる国際協調の進展の可能性として考えることができる。第三の含意においては、原発は気候変動を緩和し、それがもたらす悪影響を縮減することで、社会経済状況の悪化を回避し、政治的対立や紛争をも防ぐ可能性があると考えられる。だが、これらの積極的な側面はすべてがそのまま正しく、単純に気候安全保障の観点から原発の導入や再稼働を推進することが積極的に支持されるのだろうか。たとえばコストだけをとってみても、原発の発電コストと再エネの発電コストには大きな開きがあり、投資額が同じなら、発電量も CO₂ 削減量も原発は小さくなる。また国際秩序の変容は、現状で各国の対立が深まる中で、「エネルギー安全保障」「核セキュリティ」を高める方向にうまく展開できるか疑問が残る。そ

表 5-1 気候安全保障の 4 種類の定義

出典：国立環境研究所, 2020

定義の分類	何を脅威としているか	何を脅威から守ろうとしているか	安全保障のための手段
長期的かつ不可逆的な地球規模変化	温暖化や気候変動等の地球規模の変化	地球、人類、生態系	温室効果ガス排出量の削減（緩和策）
個人への短期的かつ突発的なリスク	地域あるいは個人レベルでの異常気象やそれに付随する様々な損失・損害	人々の日常生活や、その前提となる食料やエネルギー等基本的な物資の安定供給	適応策、レジリエンス構築
紛争や暴力の根源的要因	人々の移住等、人の対立の原因となるもの	民族等、人の基本的まとまり	社会不安につながる諸要素の除外
軍事力や防衛力への影響	海面上昇等の長期的変化、および、異常気象等突発的事象	国土、軍事施設、防衛施設	防衛その他軍事的体制分野での適応策

して原発が世界各地の社会経済状況悪化や政治対立を回避し紛争を予防できるほどのインパクトを持ちうるのだろうか。もし持たせようとするれば、そのためのコストは、再エネに比べてずっと高いものになる。ここは慎重な検討を要する部分であろう。

5.3 安全保障上の脅威としての気候リスクの考え方

気候変動を安全保障上のリスクとして捉える見方は国連などの場において定着しつつある。最近の例では、2021年12月に国連安保理で気候変動関連の安全保障リスクについてのデータと紛争予防のためのデジタル・インフラとデータ処理能力の開発とを求めた決議案(S/2021/990)が常任理事国の英米を含む113カ国から提案された。ただ審議投票の結果、賛成12、反対2(印、露)、棄権1(中)でロシアの拒否権のため採択されなかった。2023年2月14日には国連事務総長が安保理に対して、気候変動による海面上昇が、世界の数百万人に直接的な安全保障上の脅威となっていると報告し、会合では海岸線の消滅、絶滅危惧種、強制移住、天然資源をめぐる競争などを警告する発言が数多くみられた(S/PV.9260)。

国連は「気候安全保障メカニズム(CSM)」を2018年に設立している。CSMは、国連政治・平和構築局(DPPA)、国連開発計画(UNDP)、国連環境計画(UNEP)による共同イニシアチブである。気候変動が平和と安全に及ぼす悪影響を分析してより体系的に対処するために国連システムの能力を強化することを目的として設立された。

CSMでの気候変動影響がもたらす安全保障リスクの考え方は、①気候ストレス要因やショック、②曝露、③脆弱性と対処能力の3つで評価され、図5-2はそれらを示した図である⁸⁰。これはIPCCの第5次評価報告書で示された気候リスクの考え方を援用したものと考えられる⁸¹。中央の「気候に関連した安全保障リスク」を検討する際には上部の「どの気候ストレス要因やショックが最も関係が深いのか」、左下の「誰が、何がどこでいつ曝露されるか」、右下の

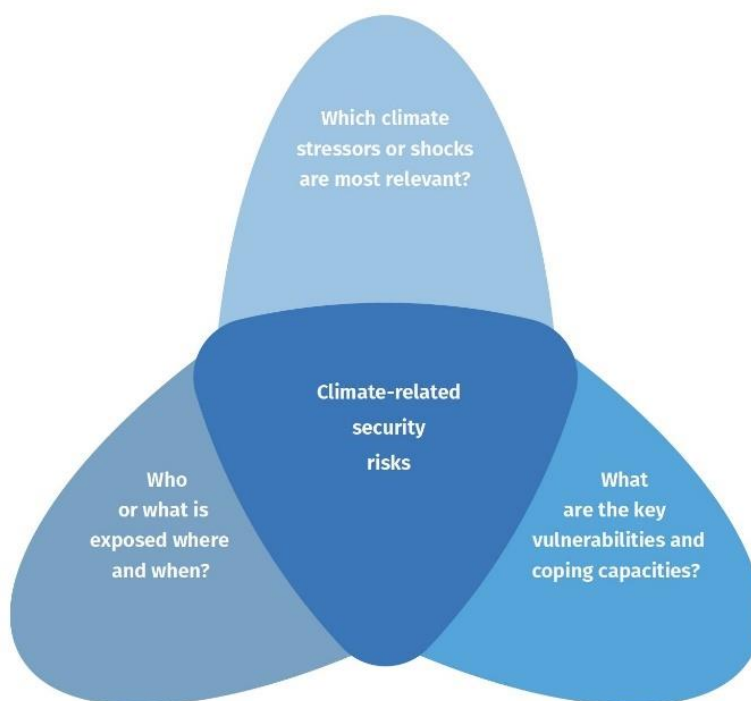


図5-2 CSMの統合された気候安全保障リスク評価のアプローチ

出典：United Nations Climate Security Mechanism, 2021

「何が鍵となる脆弱性または対処能力か」を総合的に勘案し、これら三要素が重なった場合に、リスクが高まると考える。たとえば、①ある地域への気候ストレスが高く、②そこに多くの人びとやインフラ設備、貴重な財産や資源が存在していて、③それらが守られておらず脆弱なままで社会の対処能力も低い場合に、リスクが高いと判断する。これらの検討や判断には、①から③までのすべてについて、正確な情報と評価が必要となる。いずれが不正確でも、正しい判断ができず、リスクを見逃す可能性がある。

5.4 気候変動緩和策としての原発の有効性

上記 CSM の考え方を援用し、原発を活用していく場合の気候安全保障の観点からみたリスクを検討してみる。

①の気候ストレス要因やショックについて、AR6 の第一作業部会（WGI）の報告書によると東アジアでは、全域でより極端な平均気温上昇や暑熱、寒波や降霜・降雪減少、内水氾濫の増加が予想され、地域によって平均降水量増加、火災の発生しやすい気象条件増加が予想されている⁸²。即ち、ここ何年かで日本が各地で経験してきた豪雨豪雪、洪水、山火事などの災害は増加が見込まれている。IAEA の報告書で

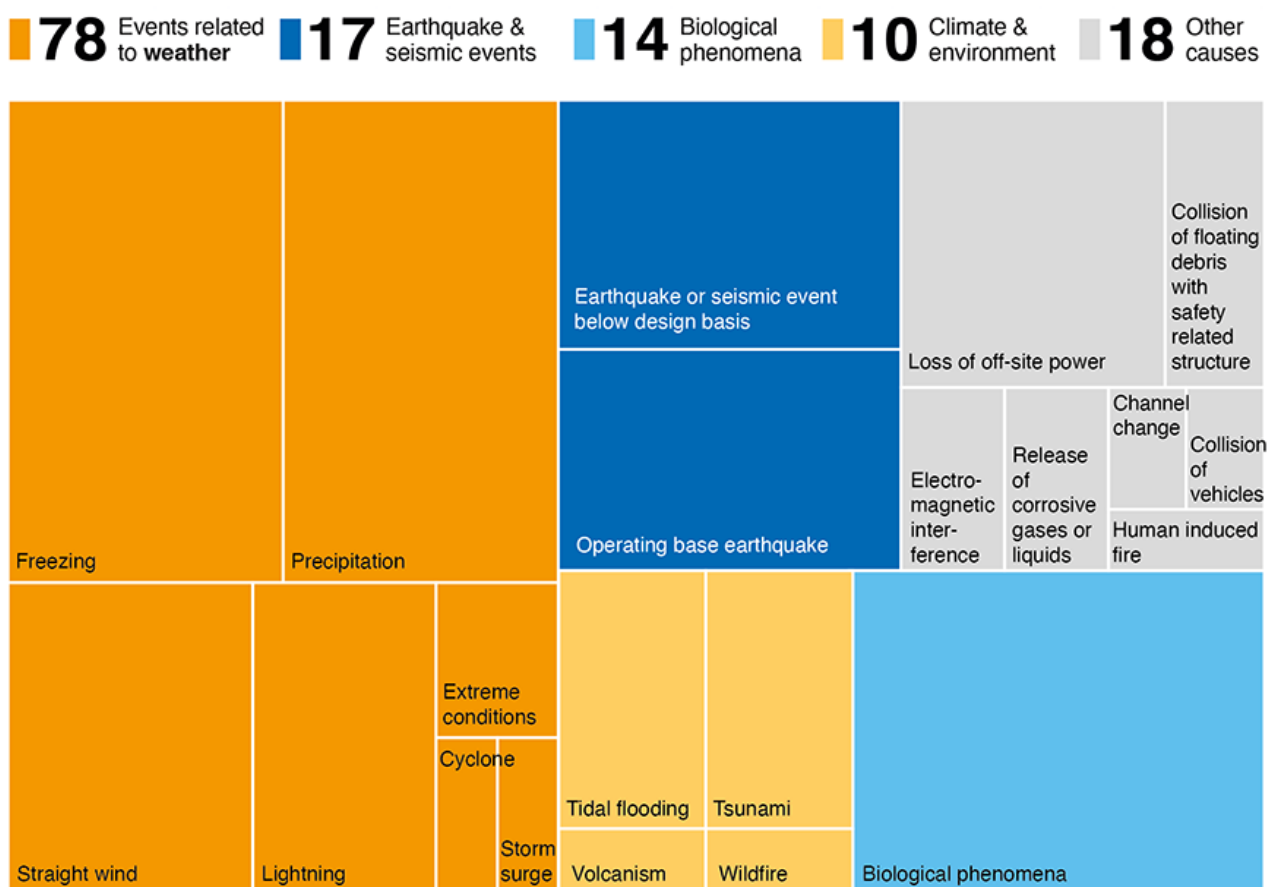


図 5-3 2000 年以後に原子力施設に影響した出来事

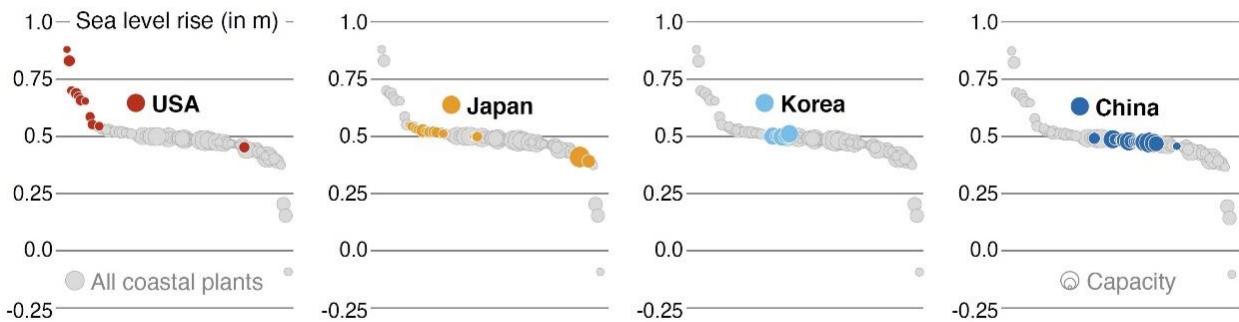
出典：IAEA, 2022

も、2000 年以後に世界の原子力施設での事故の 137 件中、78 件が天候関連事象、10 件が気候・環境関連で、事故原因の過半数を占めている（図 5-3 のオレンジ・黄色部分）⁸³。

他方で IPCC は AR6 で「地域平均の相対的海面水位の上昇は、21 世紀を通して続く可能性が非常に高いしほぼ確実（中略）。相対的海面水位の上昇により、近年には百年に 1 度の頻度で発生した極端な海面水位が、2100 年までには全潮位計設置場所の半数以上で少なくとも毎年発生すると予測される（確信度が高い）⁸⁴」と指摘している。これにより過去 10 年や 100 年に一度の高潮の頻度が数十年後から急激に増大すると予測される。これらはある意味では前提条件となる。というのは、海面上昇は過去の排出分も影響するので、ゆっくりだが何千年も続くからである。たとえ地球温暖化を+2°C程度に抑えることに成功した場合のシナリオ SSP1-2.6 でも西暦 2300 年には約 0.5m~3m 超の上昇、（現在ではあまり現実的ではないが）高排出高成長シナリオの SSP5-8.5^eでは 2m 弱から 7m 近く、最大で 15m 超の上昇も予測されている。ただ 2100 年で見れば、IPCC 報告をふまえた IAEA 報告書によると、その上昇は日本に限れば 0.5m 程度である（図 5-4）⁸⁵。

だがたとえ「平均」0.5mでも安心はできない。前述の通り、IPCC 評価報告書によると 100 年に 1 度の高潮が増加しており、同じ IAEA 報告書では、日本の原発についてはアメリカ東海岸同様、海面上昇と強風の複合影響を受ける可能性が大きいことが示されている（図 5-5）⁸⁶。平均海面の上昇に沿って、その偏差も大きくなり、高潮はより高くなる傾向がある。大潮に加え強風による吹き寄せで浸水した例では、2004 年の台風 16 号で、通常は波の穏やかな瀬戸内海に面した香川県で計 2 万戸超、岡山県で 1 万戸超、広島県で 7 千戸超の床上床下浸水の被害を記録したことがある。この時の高松港の潮位は最大約 2.5mに達した⁸⁷。これに高波や津波などが重なれば、予測も対応も困難な高さの波を想定せねばならな

Figure 25: Projected change in sea level at coastal nuclear plant sites from near (2021–2040) to long term (2081–2100) by country.



Source: based on climate data from IPCC (2021) and nuclear data from the IAEA (2021b).

図 5-4 国ごとの近い期間（2021-2040 年）から長期（2081-2100 年）における沿岸部の原発サイトでの予測される海面の変化

出典：IPCC, 2022

^e SSP5-8.5 シナリオは、何も対策を講じない場合のシナリオであり、「エネルギーセクターの動向に照らせば、実現可能性は低いと考えられている」という WGI の記述もある。IPCC, 2021, *Climate Change 2021*, p.238-239 (Sec 1.6. 1.4).

い。

Figure 26: Global overview of the most significant environmental changes around selected nuclear site locations.

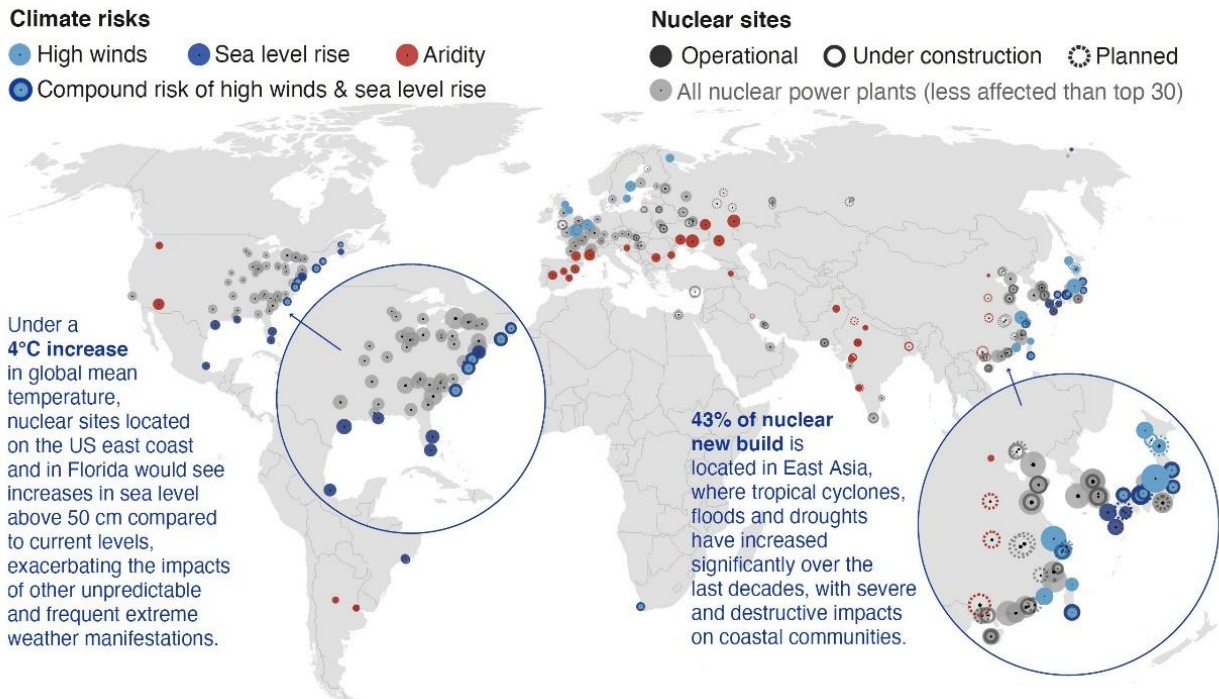


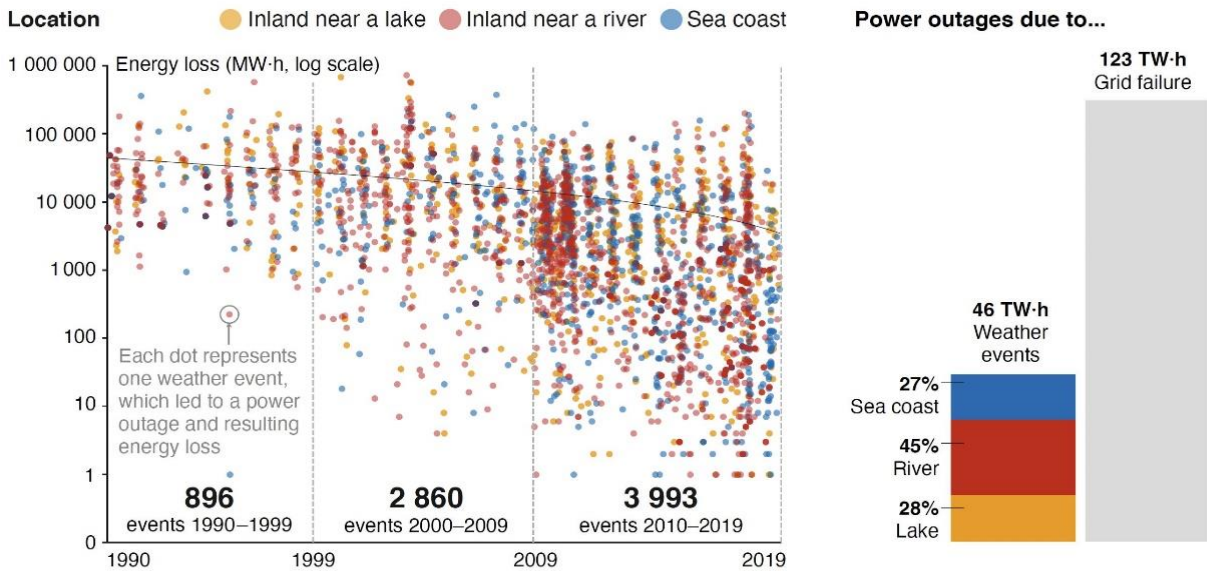
図 5-5 いくつかの原子力施設の所在地周辺への最も重要な環境変化についての全球的な概観

出典：IAEA, 2022

それでも報告書は「IPCC の気候モデリングと原子力発電所の位置を重ね合わせると、(中略) 中国東部、朝鮮半島、日本列島の原子力発電所は将来的に比較的少ない異常気象に直面するかもしれない⁸⁸」と日本周辺については楽観的ともとれる。これらの IAEA の図の前提となった SSP3-7.0 シナリオは、地域対立的な発展のもとで気候政策を導入しないというやや悲観的なものだが、ウクライナ侵攻以後の地域対立の国際情勢に鑑みれば現実的とも言える面があるのも事実であろう。

②の曝露については、日本の原発の全てが海岸沿いに立地しており、海面からは一定以上の高さをもって建設されているものの、仮にこれから長く原発を稼働させていくなれば、廃炉完了もそれだけ先のこととなり、建設時には基準津波として想定できなかったレベルの津波に稼働中の原発や廃止措置作業中の現場が曝される可能性は高くなる。①の増大・拡大は曝露範囲も拡大させる。豪雨による洪水や地滑り、豪雪などに施設や施設外の外部電源システムなどが曝される可能性も高まる。IAEA の調査 (図 5-6) によれば、2009 年以降、気象現象による電力供給の停止は世界で急増しており、海沿いの原発がそこで 27% を占めている。送電網自体の障害による停止に比べれば約 1/3 ではあるが、明らかに停止件数は増加傾向であり、21 世紀に入ってから問題視される極端な気象現象の増加と相関関係にある。しかし報告書は楽観的なトーンで、「原子力発電の運転を中断させる悪天候は、この 30 年間で約 5 倍に増加し、

Figure 16: Reported nuclear power outages due to weather events, by plant location.



Source: based on data from the IAEA (2021b).

図 5-6 気象現象による原発の停止状況（プラント所在地別）

出典：IAEA, 2022

2009 年以降は顕著に加速している。より頻繁に発生しているにもかかわらず、発生した損失は小幅に留まっている⁸⁹⁾（図中の細い黒線グラフ）、としている。停止あたりの発電量損失だけで見れば正しい評価だが、再エネと違って「安定したベースロード電源」として原発を気候変動対策の切り札として位置づけている日本にとってはあまり好ましいことではない。このような気候現象に曝される原発や関連施設、事故の際に対応が必要な周辺自治体が増えてくると、その対策も複雑になって対応が困難になってくる。

③の脆弱性と対処能力については、原発の安全基準に定められた各種基準や深層防護の考え方などがどれだけ最新の気候変動影響の知見に沿った想定で考えられていて、実際にそれらが実施されて脆弱性を低減できているか、という点がまず課題になる。次に災害時には事故リスクが高まるだけでなく、事故に際しての原発職員の対応作業や近隣自治体の避難に対してより大きな困難をもたらすので、これらへの対処能力（避難計画）が課題となる。

これらについては数多くの先行調査・研究があり^{f)}、詳細はそちらに譲る。ここでは気候変動に関連する自然現象について述べることにする。原子力規制委員会の「実用発電用原子炉に係る新規規制基準の考え

^{f)} 例えば、岩井ほか、2022、『気候変動対策と原発・再エネ—CO2 削減と電力安定供給をどう両立させるか？』あけび書房。鮎川ゆりか、2019、「原発は温暖化する地球の『時限爆弾』である」岩波書店『世界』2019 年 7 月号、150-159 頁。避難計画については、例えば、荒木真一ほか、2019、「解説：原子力防災の現状と課題」『日本原子力学会誌』Vol.6 1、No.6, pp. 23-27.や保母武彦、2017、「原発避難計画問題総論」岩波書店『環境と公害』47(2), pp. 3-8.を参照されたい。

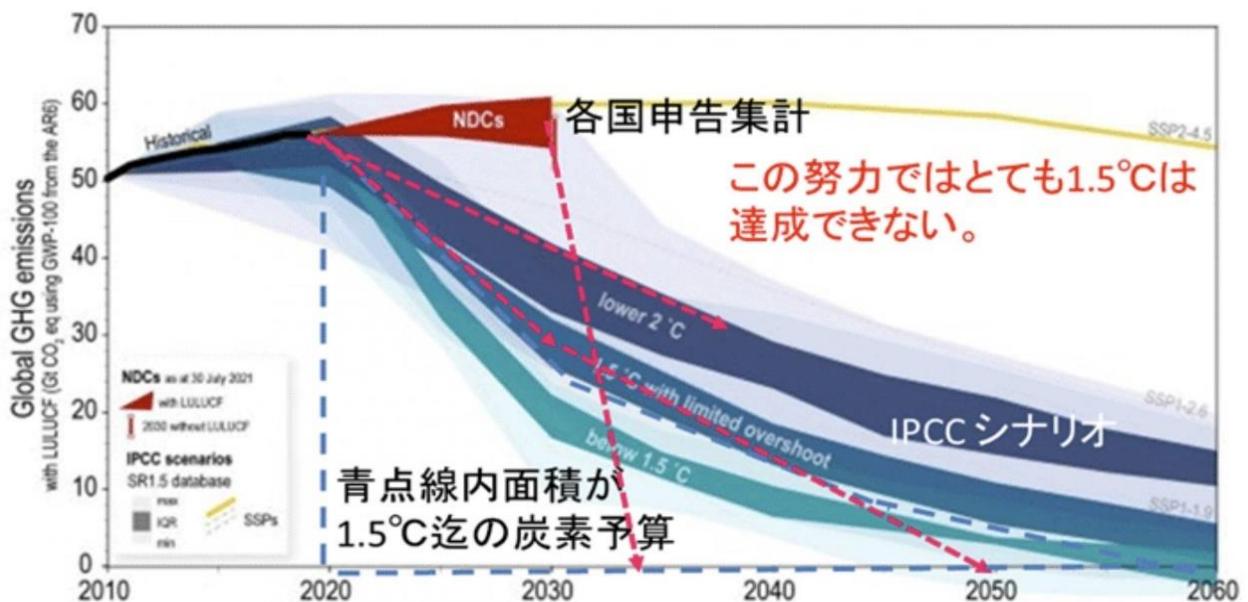
方について」⁹⁰によれば、「自然現象に対する発電用原子炉施設の防護については、発電用原子炉施設を設置する位置における各種の自然現象が当該発電用原子炉施設に与える影響を、科学技術的知見に基づく合理的な手法で評価した上で、設計を行うことが必要⁹¹」としている。また設置許可基準規則（実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則）の第6条1項にて安全施設（兼用キャスクを除く）は「想定される自然現象」が発生しても安全機能を損なわないものでなければならないと定め、2項で重要安全施設は、当該重要安全施設に大きな影響を及ぼすおそれがあると想定される自然現象も適切に考慮せねばならないと定める。同規則の解釈では「想定される自然現象」とは、「敷地の自然環境を基に、洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、生物学的事象又は森林火災等から適用されるものをいう⁹²」とされているが、自然現象の範囲を示したのみで、程度については原発立地環境が異なるためと考えられるが一律には明示していない。また同条4項で兼用キャスクについて「合理的な竜巻として原子力規制委員会が別に定めるもの」「想定される森林火災」が起こっても安全機能を損なわないことと定められており、これも含めて施設全体に適用される「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」が別に定められている。

しかし、これらのガイドだけでは上記の自然現象の範囲を全てカバーしておらず、かつ実際の影響評価は立地場所の気象条件によって異なる。これだけの広範囲の影響を、それぞれの立地に応じて、最新の気候変動影響の知見を立地地域周辺のデータとして取り出して活用しながら将来の可能性の幅を予測し、適切に施設の設計や配置や建築に反映させ、さらに新たな知見に対応していくのは、たいへんなコストと手間と能力を要する作業であり、そのような複雑な作業には、常に人為的な誤認や錯誤、誤謬の可能性が排除できない。「安定したベースロード電源」としての原発の抱える気候脆弱性はこのあたりにもあると考えられる。

このように日本の原発は①強い気候ストレスが将来待ち受けており、それには海面上昇のように超長期にわたるものも含まれる。②曝露される範囲は広がっており、様々な自然現象に対処していく必要性が増している。③新規基準の枠組みに沿っても、原発の気候変動対策の実施には非常に複雑な作業が必要で、困難を極めることから、原発の気候リスクはこれから増大する傾向にあるとみるべきであろう。その結果、停止のリスク、事故のリスク、労働者や公衆被ばくのリスク、環境汚染のリスクは増大していき、地域、ひいては国家レベルでかえって安全保障上のリスクをもたらすこととなる。

このような気候安全保障リスクを緩和するには、気候変動そのものを緩和することが有効であるが、このままではそれは極めて難しいことは、IPCC 評価報告書などから日本の国立環境研究所が作成した図 5-7 からも明白である⁹³。ここには、削減量について現状の各国が決定した貢献（NDCs）だけでは今世紀末に+3°C前後の温度上昇を見込む SSP2-4.5 シナリオに沿ったものでしかないことが描かれている。パリ協定で定められた+2°C以内に抑えるには、現在の排出ペースを一気に下げ、2050年頃までに半分以下にする必要がある。2030年まで現状の動きのままだと、そこから+2°C目標を達成するには、図 5-7 の NDC からほぼ真下に伸びる矢印のような激変を要することになる。時間がたつほど必要な排出削減量は

⁹³ 国立環境研究所地球環境研究センターニュース 2022年5月号（URL：<https://cger.nies.go.jp/cgernews/202205/378001.html>）（2023/03/25 アクセス）より図 1 を引用。注釈のない原図は UNFCCC/PA/CMA/2021/8 の Figure 9。



- 113ヶ国2010から2030年へ12%増加、191ヶ国全部では16%増
- 16%の増加は、科学の警告とはとても相いれない。
 - IPCC指摘:1.5°Cへは2030年 CO₂排出45%削減が必要
 - 2.0°Cへは 25%
- 70ヶ国が今世紀半ばあたりの炭素中立達成を目論む。この時2030年には26%減を目指すことになる。
- 今すぐの減少がなければ、21世紀終わりには2.7°Cの上昇

図 5-7 1.5°C脱炭素世界に向かっているだろうか

出典：国立環境研究所, 2022

大きくなっていく。気候安全保障の概念が 2005 年頃から出始めていること背景には、すでにグローバル・サウス各地での格差や不満は高まってきていたことがある。世界各地でこの大変化を公平にマネジメントしながら実現することはこれまでも重要課題であった。これに失敗すると格差や不満を招き、社会不安や政治的不安定につながるからである。まさにこれまで以上に国連や各国政府や企業、そして市民による「トランジション・マネジメント」が必要不可欠で、気候リスクへの対応に付随するこの移行リスクをいかにしてコントロールしていくかが過去から現在を通じて未来に至るも最重要課題であるのは間違いない。

原発は、この図 5-7 に描かれる急勾配の排出量削減を実現するためには「送電までの全てが想定通りにうまくいき、事故の発生もなければ」一定の貢献をする能力があるだろう。また一定の雇用を生み、特定地域に経済的利益をもたらすかもしれない。それはある意味で非現実的なシナリオである。だがたとえそれが実現したとしても、すでに本報告書前段で指摘されたとおり、原発は急激な排出量の削減は難しい。また過去の経験から予想可能な地域間の経済格差拡大、事故による農業・漁業への風評被害を含めた

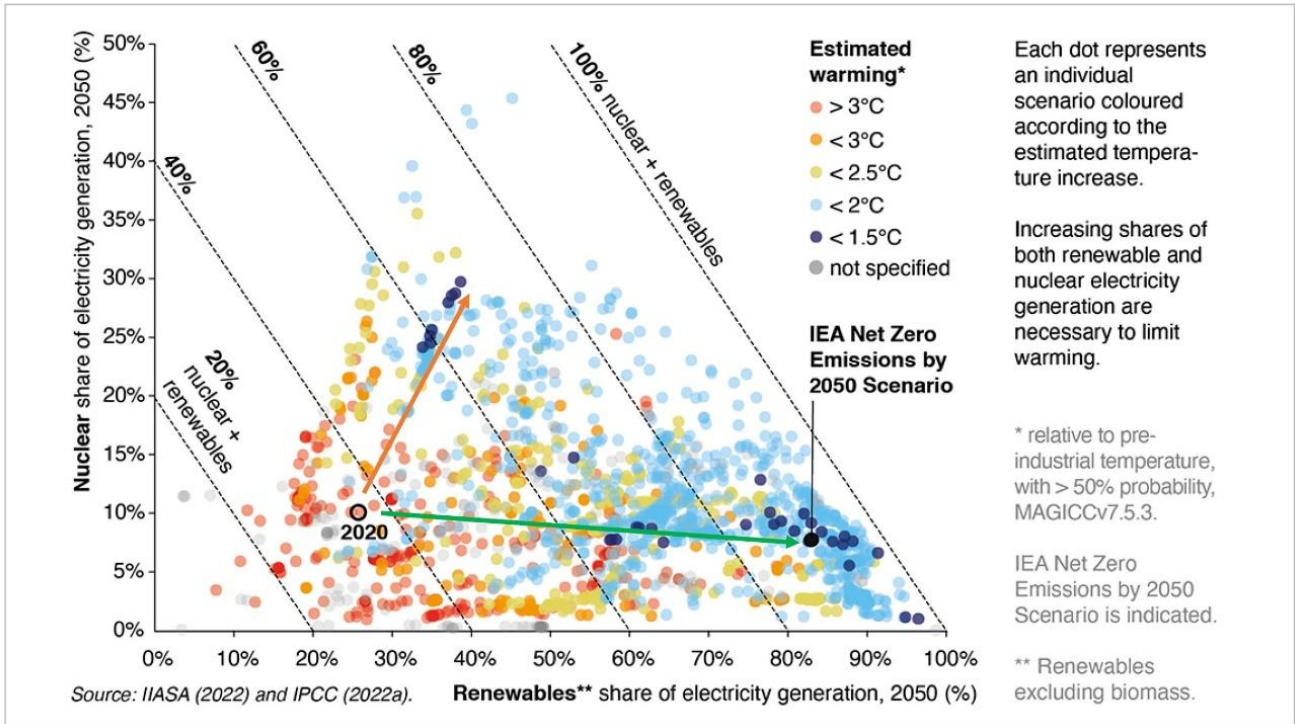


図 5-8 原子力と再生可能エネルギーの発電ミックスにおけるシェアと IPCC AR6 を通じて対応するシナリオ

出典：IAEA, 2022

懸念、リスク感情の広域化（原発から遠くともリスクを感じる人びとの増加）、比較的新しい原発の立地決定過程への不満、稼働への賛否による地域の分断などは人口減少や少子高齢化、地場産業の衰退などで疲弊した地方に一層大きな負荷を広くかけることになる点には十分な注意が必要であろう。

IAEA は、報告書で再エネと原子力発電の割合の変化で、どの程度の温暖化に抑えられるかを検証した図を作成した（図 5-8）⁹³。これによると、国際エネルギー機関（IEA）が発表したネットゼロ排出シナリオでは、+1.5°C未満の紺色の地点は90%程度のエネルギーを原発と再エネで構成し、再エネはほぼ90%の電力を生産し、原子力が8%としている。図では、ここへの緑矢印（筆者追加）の途上にも+1.5°C未満の点があるが、注目すべきはオレンジの矢印（筆者追加）であり、こちらにも+1.5°C未満の点があることが示されている。IEAのネットゼロ排出シナリオとはまったく異なる道筋を描いており、どちらを選ぶかは世界の人びとの政治的な意思にかかっているが、経済合理性という意味でみれば、原発のシェアが低い方がより低コストで1.5°C未満を達成する可能性が多い（図の出典となった資料のシナリオでは基本的にはコストは最小という条件がある）。原発の気候変動脆弱性は本稿で扱ったよりもかなり多様であり、地域によって程度にもばらつきがある。原発を検討する場合には、気候変動という人類の将来における前提条件を念頭に、長期的な視点に立った賢明な判断を積み上げていく必要があるだろう。

5.5 新たな原発へのリスクとしての戦闘行為

気候変動対策として原発が注目される中で、安全保障上、強い懸念をもって考慮せねばならない事態がウクライナで発生した。ロシアのウクライナ侵攻に際して起こった原発の軍事的占拠である。ウクライナにはチョルノービリ（チェルノブイリ）を含めると、5 箇所の原発があり、開戦時チョルノービリ以外の4 箇所が稼働中であった。2022 年 2 月 24 日の侵攻開始後、すぐに事故で全機が停止中のチョルノービリ原発は占拠され、ロシア軍は周辺に地雷を埋設し、汚染土を掘り返し、陣地を構築した。高レベル放射性物質を盗んだという報道⁹⁴もあり、自身にも大量被ばくをもたらしたであろう兵士たちの無謀な行動に世界は驚いた。

ロシアの戦略はインフラ設備への攻撃であったことは後の戦闘の進展から明らかであるが、原発はその優先目標だったと考えられる。ウクライナは侵攻を受ける前は原子力が電力の55%を発電していた⁹⁵とされる。南部のザポリージャ原発では3月4日に戦闘があり火災が発生した後、ロシア軍に占領された。また同時期、ロシア軍は南ウクライナ原発も狙っていたようでもある。アメリカの戦争研究所(ISW)によれば、3月3日には近隣のボズネセンスク辺りまで進軍したとみられており、その後停滞し、3月18日には撤退している^h。南ウクライナ原発までは地図上で約11kmの距離であった(図5-9)。

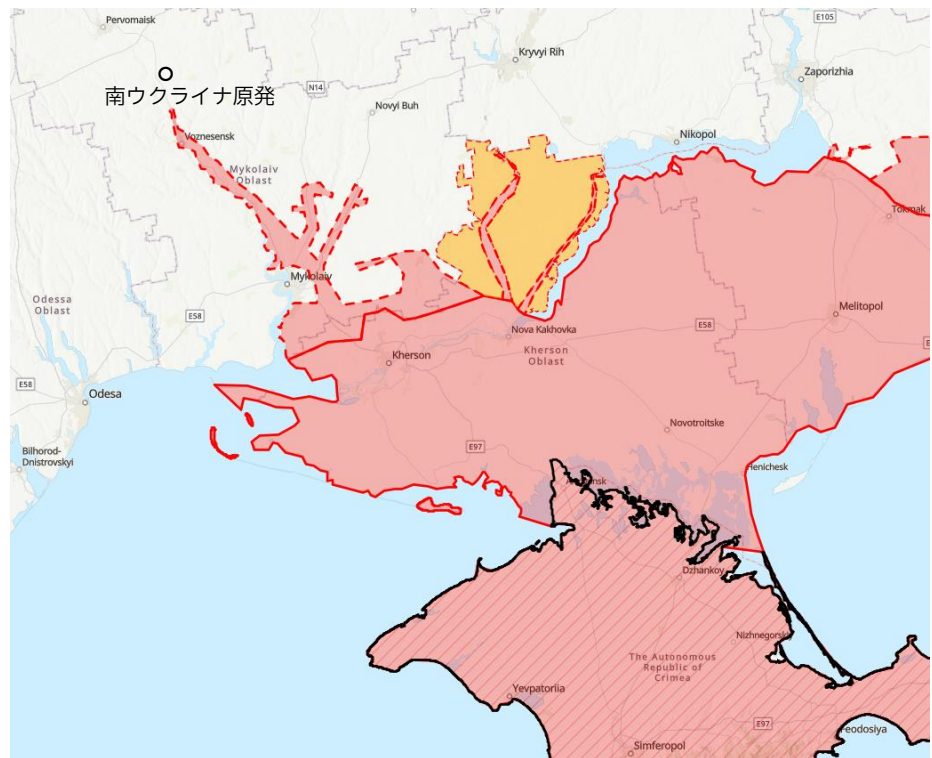


図5-9 南ウクライナ原発を狙うロシア軍の進路(2022年3月17日時点)

出典：ISW, 2022

占領したザポリージャ原発でも戦闘が散発的に続き、たびたび外部電源喪失を起こし、IAEAや国連は強い懸念をもって、ロシア軍の撤退や、原発周辺を安全地帯にするべきなどと8~9月にかけて国連安保理で議論を繰り返した(S/PV.9109、S/PV.9114、S/PV.9124)が、状況は現在も好転していない。

^h 戦争研究所 (ISW) ウェブサイトより。(URL: <https://www.understandingwar.org/>)

このような原発への軍事的攻撃は、舘野によると「自然災害よりも人間による攻撃の方が的確に安全機器を破壊してしまうと推測されます⁹⁶」と指摘している。確かに、軍隊は破壊能力が高いため、あとは意思と知識があれば、安全施設や重要安全施設の識別と破壊は容易であろう。もちろん、戦闘になれば、その意思がなくても流れ弾や火災などで安全機器が破壊され、重大事故につながるリスクは高くなる。過去にもイスラエル軍によるイラクのオシラク原発空爆など、原発に武力が行使された例はあるⁱ。日本外務省も、過去に原発への攻撃についての調査を行ったことがある⁹⁷。しかし、稼働中の民間原発を攻撃するという暴挙は、今回が史上初であろう。

原子力発電を使うためには、その社会に様々な前提条件が必要となる。本稿は其中でも気候変動を中心に広義の安全保障の視点から扱った。しかし、狭義の安全保障が担保されない中で原発を稼働し増設しそこに依存していくということは、その国にとっての脆弱性を高めることになる。ウクライナでは開戦後も、各種発電所へのロシア軍の攻撃は続き、多くのウクライナ国民が電力不足と冬の寒さに苦しんだ。

気候変動対策は喫緊の課題であり、かつ非常に長期にわたる課題でもある。目前の電力不足だけを見て対応すれば、長い将来にわたるリスクを背負うこととなる。IPCCのAR6の統合報告書（SYR）の警告を最後に示す。

C.1 気候変動は、人類のウェルビーイングと惑星の健康（プラネタリー・ヘルス）を脅かすものである（確信度が非常に高い）。すべての人にとって住みやすく持続可能な未来を担保するための機会の窓は急速に狭まっている（確信度が非常に高い）。気候変動にレジリエントな開発は、万人のための持続可能な開発を進めるための適応と緩和の統合、また特に脆弱な地域、セクター、グループに対する適切な財源へのアクセス改善を含む国際協力の増進、そして包括的ガバナンスと協調した政策によって可能となる（確信度が高い）。この10年間に実施される選択と行動は、現在および数千年にわたり影響を与えるだろう（確信度が高い）⁹⁸。

ⁱ その他の攻撃例として、CNIC プレスリリース、2023年3月4日「【原子力資料情報室声明】原子力利用は安全保障上の脅威 —ザポリージャ原発攻撃から1年」（URL：<https://cnic.jp/46489>）を参照のこと。

6 結論

2023年2月10日、岸田内閣は「GX実現に向けた基本方針」（GX基本方針）を閣議決定、関連する「脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律案」（GX推進法）と原発積極活用などを含む「脱炭素社会の実現に向けた電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正する法律案」（GX電源法）を国会に提出、いずれも第211回国会会期中に自民・公明・維新・国民などの賛成多数により成立した。

GXとは、グリーントランスフォーメーションの略で、「産業革命以来の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」ことを意味している。GX基本方針では、エネルギー安定供給を前提とした脱炭素を実現するための構造転換方針が示された。

政府はGX基本方針において原子力を「CO₂を排出せず、出力が安定的であり自律性が高いという特徴を有する」と位置づけ、「安定供給とカーボンニュートラルの実現の両立に向け（中略）再稼働を進める」こと、さらに「次世代革新炉の開発・建設に取り組む」⁹⁹こととしている。

政府は原子力の利点にばかり目を向けているが、本報告書で確認してきた通り、複数ある脱炭素電源の一つとされる原発は、コストが高く、時間がかかる。さらに、気候変動の激化とともに、原発の利用環境、ひいては安全性も損なわれていく。また、将来的にはウラン資源に依存する原子力のCO₂排出量が増加する可能性もある。つまり、現実には、原子力の利点とされているものは幻想にすぎない。

電源開発には比較的短時間で運転開始できる太陽光発電でさえ、ある程度の時間を要する。政府は原発再稼働と原発新設を推進する方針だが、原発再稼働には10年超、数千億円の間とコストを要する。原発新設には1基あたり1兆~2兆円のコストと20年の時間を要する。それだけのコストと時間をかけて運転開始した時には原発の発電に伴うCO₂排出量が非常に多くなっていた、となってしまうも取り返しがつかない。

原発には多くのリスクが存在しており、巨額の資金と時間を投じて原発を推進することは温暖化対策として合理的ではない。他に相対的に安価かつ短期間で導入できる脱炭素電源がある中、原発を推進することは、他の対策を遅らせることにもつながり、カーボンニュートラルの実現を困難にする。少なくとも、原発を推進する前に、本報告書が指摘した多くの論点を検証するべきである。

参考文献

- ¹ 電力中央研究所 (2016) 「日本における発電技術のライフサイクル CO2 排出量総合評価」
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=Y06> (アクセス：2023 年 2 月 23 日)
- ² Benjamin K. Sovacool (2008) “Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey”
Energy Policy, Vol. 36, Issue 8, August 2008, pp2950-2963
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421508001997> (アクセス：2023 年 2 月 23 日)
- ³ Ethan S. Warner, Garvin A. Heath (2012) “Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Electricity Generation”
Journal of Industrial Ecology, Volume16, Issues1 ppS73-S92
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1530-9290.2012.00472.x> (アクセス：2023 年 2 月 23 日)
- ⁴ Francesco Pomponi (2021) “The greenhouse gas emissions of nuclear energy – Life cycle assessment of a European pressurised reactor”
Applied Energy, Volume 290
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261921002555> (アクセス：2023 年 2 月 23 日)
- ⁵ Nana Yaw Amponsah, Mads Troldborg, Bethany Kington, Inge Aalders, Rupert Lloyd Hough (2014) “Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations”
Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 39, pp 461-475
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114005395> (アクセス：2023 年 2 月 23 日)
- ⁶ IPCC (2014) “Mitigation of Climate Change, Annex III: Technology - specific cost and performance parameters - Table A.III.2 (Emissions of selected electricity supply technologies (gCO₂ eq/kWh))” p. 1335.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf (アクセス：2023 年 2 月 23 日)
- ⁷ B.K. Kim, Y.H. Jeong (2013) “High cooling water temperature effects on design and operational safety of NPPs in the gulf region”
Nuclear Engineering and Technology Volume 45, Issue 7, pp. 961-968
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573315300814>
- ⁸ 日本原子力研究開発機構 (2019) 「材料試験炉 (JMTR) 二次冷却システムの冷却塔倒壊について」
<https://www.jaea.go.jp/02/press2019/p19090901/> (アクセス：2023 年 2 月 20 日)
- ⁹ World Nuclear Association (2022) “Emerging Nuclear Energy Countries” <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/emerging-nuclear-energy-countries.aspx> (アクセス：2023 年 2 月 20 日)
- ¹⁰ Copernicus Climate Change Service (2023) “July 2023, the warmest month in Earth’s recent history”
<https://climate.copernicus.eu/july-2023-warmest-month-earths-recent-history>(アクセス：2023 年 8 月 21 日)
- ¹¹ World Meteorological Organization (2023)“Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water-related Hazards” <https://public.wmo.int/en/resources/atlas-of-mortality>(アクセス：2023 年 8 月 21 日)
- ¹² IPCC(2023) “CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report Summary for Policymakers”
https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf(アクセス：2023 年 8 月 21 日)
- ¹³ IPCC(2018)“SPECIAL REPORT: GLOBAL WARMING OF 1.5 °C Summary for Policymakers”
<https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>(アクセス：2023 年 8 月 21 日)
- ¹⁴ 内閣府(2011) 「計画から稼働までの期間について」
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20111125/siry06-1.pdf>(アクセス：2023 年 8 月 21 日)、洋上風力のみは経済産業省(2015) 「風力発電の導入状況等について」
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene/shinene/shin_energy/pdf/009_04_00.pdf(アクセス：2023 年 8 月 21 日)

-
- ¹⁵ IAEA の”Nuclear Power Reactors in the World” (<https://www.iaea.org/publications/15211/nuclear-power-reactors-in-the-world>) の各年版を用いて整理した。
- ¹⁶ Mark Z. Jacobson(2019) ”Evaluation of Nuclear Power as a Proposed Solution to Global Warming, Air Pollution, and Energy Security” <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/NuclearVsWWS.pdf>(アクセス：2023年8月21日)
- ¹⁷ Lazard(2023) ”LCOE” <https://www.lazard.com/media/typdtxmm/lazards-lcoeplus-april-2023.pdf>(アクセス：2023年8月21日)
- ¹⁸ IEA(2020) ”Job creation per million dollars of capital investment in power generation technologies and average CO2 abatement costs” <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/job-creation-per-million-dollars-of-capital-investment-in-power-generation-technologies-and-average-co2-abatement-costs>(アクセス：2023年8月21日)
- ¹⁹ IPCC(2023) 「IPCC 第6次評価報告書 第3作業部会報告書 気候変動 2022：気候変動の緩和 政策決定者向け要約 (SPM)」
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/global2/about_ipcc/202302IPCCWG3SPMsecondversion.pdf(アクセス：2023年8月21日)
- ²⁰ IAEA(2016) ”World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO) 2016 Edition” https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1843_web.pdf(アクセス：2023年8月21日)
- ²¹ World Nuclear Association(2023) ”Supply of Uranium” <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium.aspx>(アクセス：2023年8月21日)
- ²² Jan Willem Storm van Leeuwen (2019) ”Uranium mining + milling”
<https://www.stormsmith.nl/Resources/m26U-m%2Bm20190826F.pdf>(アクセス：2023年8月21日)
- ²³ IAEA (2022) ”Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050 (2022 Edition)”
<https://www.iaea.org/publications/15268/energy-electricity-and-nuclear-power-estimates-for-the-period-up-to-2050> (アクセス：2023年8月21日)
- ²⁴ Christopher Mims (2011) ”Does climate change mean more tsunamis?” (2011年3月22日、3月12日に Grist)
<https://grist.org/climate-change/2011-03-11-todays-tsunami-this-is-what-climate-change-looks-like/> (アクセス：2023年2月20日)
- ²⁵ Natalie Kopytko (2011) ”The climate change threat to nuclear power” (2011年5月18日、New Scientist)
<https://www.newscientist.com/article/mg21028138-200-the-climate-change-threat-to-nuclear-power/> (アクセス：2023年2月20日)
- ²⁶ Jordaan, S.M., Siddiqi, A., Kakenmaster, W., & Hill, A.C. (2019). The Climate Vulnerabilities of Global Nuclear Power. *Global Environmental Politics* 2019; 19 (4): 3–13. https://doi.org/10.1162/glep_a_00527 (アクセス：2023年2月26日)
- ²⁷ Linnerud, K., Mideksa, T. K., & Eskeland, G. S. (2011). The Impact of Climate Change on Nuclear Power Supply. *The Energy Journal*, 32(1), 149–168. <http://www.jstor.org/stable/413233> (アクセス：2023年9月29日)
- ²⁸ IAEA(2022) ”Climate Change and Nuclear Power 2022” <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-and-climate-change/climate-change-and-nuclear-power-2022> (アクセス：2023年2月23日)
- ²⁹ Ali Ahmad (2021) ”Increase in frequency of nuclear power outages due to changing climate” *Nature Energy*, Vol.6, July 2021, pp755-762 <https://www.nature.com/articles/s41560-021-00849-y> (アクセス：2023年2月26日)
- ³⁰ IPCC (2021) 気候変動政府間パネル第6次評価報告書「政策決定者要約」P5 (気象庁暫定訳)

https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar6/IPCC_AR6_WGI_SPM_JP.pdf (アクセス：2023年2月23日)

³¹ K.E.D.Coan (2021) “Nuclear power’s reliability is dropping as extreme weather increase” *Ars Technica*, July 24, 2021 <https://arstechnica.com/science/2021/07/climate-events-are-the-leading-cause-of-nuclear-power-outages/> (アクセス：2023年2月26日)

³² ANS (2021) “Report: Extreme weather is affecting nuclear power’s reliability” *Nuclear Newswire*, July 27, 2021 <https://www.ans.org/news/article-3102/extreme-weather-is-affecting-nuclear-powers-reliability/> (アクセス：2023年2月26日)

³³ Ahmad, A. Covatariu, M.V.Ramana (2023) “A stormy future? Financial impact of climate change-related disruptions on nuclear power plant owners” *Utilities Policy*, 81(2023年2月8日), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957178722001485> (アクセス：2023年2月27日)

³⁴ IPCC (2021) 気候変動政府間パネル第6次評価報告書「政策決定者要約」P22 (気象庁訳) https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar6/IPCC_AR6_WGI_SPM_JP.pdf (アクセス：2023年2月20日)

³⁵ N. Kopytko, John Perkins (2010) “Climate change, nuclear power, and the adaptation-mitigation dilemma” *Energy Policy* 39 (2011) p.318-333 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421510007329> (アクセス：2023年2月20日)

³⁶ 大島堅一 (2021) 『「廃炉時代」がやってきた—原子力発電の後始末』(『住民と自治』2021年9月号より、自治体問題研究所、2021年12月2日) <https://www.jichiken.jp/article/0253/> (アクセス：2023年2月21日)

³⁷ 米国国防総省 (2010) “2010 Quadrennial Defense Review” https://dod.defense.gov/Portals/1/features/defenseReviews/QDR/QDR_as_of_29JAN10_1600.pdf (アクセス：2023年2月21日)

³⁸ Jane A. Leggett (2013) “Climate Change Science: Key Points”, Congressional Research Service 2013年9月10日 *Climate Change Science: Key Points*, Congressional Research Service, 2013年9月10日 <https://sgp.fas.org/crs/misc/R43229.pdf> (アクセス：2023年2月21日)

³⁹ Peter Folger and Nicole T. Carter,(2016) “Sea-level rise and US Coasts: Science and Policy Considerations, Congressional Research Service, 2016年9月12日 <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF10468/2> (アクセス：2023年2月21日)

⁴⁰ 米国国防総省 (2014) “2014 Climate Change Adaptation Roadmap” https://www.acq.osd.mil/eie/downloads/CCARprint_wForward_e.pdf (アクセス：2023年2月21日)

⁴¹ 米国国防総省 (2018) DOD Directive 4715.21, Climate Change Adaptation and Resilience (updated in 2018) <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc949835/m1/7/> (アクセス：2023年2月21日)

⁴² Union of Concerned Scientists (2015) “Lights Out? Storm Surge, Blackouts, and How Clean Energy Can Help” <https://www.ucsusa.org/sites/default/files/attach/2015/10/lights-out-full-report.pdf> (アクセス：2023年2月21日)

⁴³ National Geographic (2015) “As Sea Levels Rise, Are Coastal Nuclear Plants Ready?” <https://www.nationalgeographic.com/science/article/151215-as-sea-levels-rise-are-coastal-nuclear-plants-ready> (アクセス：2023年2月21日)

⁴⁴ ハンギョレ新聞(2020) 「台風に運ばれてきた塩分で原発停止」…不安増幅」2020年9月11日 <http://japan.hani.co.kr/arti/politics/37724.html> (アクセス：2023年3月23日)

⁴⁵ National Academy of Sciences (2016)“Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving Safety and Security of U.S. Nuclear Plants:Phase 2” <https://nap.nationalacademies.org/catalog/21874/lessons->

learned-from-the-fukushima-nuclear-accident-for-improving-safety-and-security-of-us-nuclear-plants (アクセス : 2023 年 2 月 26 日)

⁴⁶ L.M.Jenkins, R. Alvarez, S.M. Jordaan (2020) “Unmanaged climate risks to spent fuel from U.S. nuclear power plants: The case of sea-level rise” *Energy Policy* 137 (2020) 111106
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421519306937> (アクセス : 2023 年 3 月 3 日)

⁴⁷ WMO「世界気象機関」(2023) “Past eight years confirmed to be the eight warmest on record” 2023 年 1 月 23 日発表プレスリリース <https://public.wmo.int/en/media/press-release/past-eight-years-confirmed-be-eight-warmest-record> (アクセス : 2023 年 2 月 27 日)

⁴⁸ Copernicus Climate Change Service (2023) “2022 saw record temperatures in Europe and across the world” 2023 年 1 月 9 日 <https://climate.copernicus.eu/2022-saw-record-temperatures-europe-and-across-world> (アクセス : 2023 年 2 月 27 日)

⁴⁹ 毎日新聞(2022)「フランスで電気料金高騰 約半数の原発停止、熱波で出力引き下げも」2022 年 8 月 26 日 <https://mainichi.jp/articles/20220826/k00/00m/030/189000c> (アクセス : 2023 年 2 月 27 日)

⁵⁰ NHK(2022)「猛暑で原発が出力低下? 深刻な”電力危機“に直面するフランス」2022 年 8 月 18 日 <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20220818/k10013776631000.html> (アクセス : 2023 年 2 月 27 日)

⁵¹ Lars Paulsson(2022) “EDF to curb nuclear output as French energy crisis worsens” Bloomberg, 2022 年 8 月 3 日 <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-08-03/edf-to-curb-nuclear-output-as-french-energy-crisis-worsens> (アクセス : 2023 年 2 月 27 日)、Reuters(2022) “France tweaks rules to keep nuclear plants running during heatwave” 2022 年 8 月 8 日 <https://www.reuters.com/world/europe/frances-asn-nuclear-regulator-adapts-hot-water-discharge-rules-light-heatwave-2022-08-08/> (アクセス : 2023 年 2 月 27 日)、“France’s river Loire sets new lows as drought dries up its tributaries” 2022 年 8 月 17 日 <https://www.reuters.com/world/europe/frances-river-loire-sets-new-lows-drought-dries-up-its-tributaries-2022-08-17/> (アクセス : 2023 年 2 月 27 日)、グローサー理恵 (2022)「フランス：酷暑と旱魃と冷却水不足に苛まれる原子力大国」ちきゅう座 2022 年 8 月 25 日 <http://chikyuzo.net/archives/121454> (アクセス : 2023 年 2 月 27 日)、Wired (2022)「猛暑で原子炉を冷やせない! 地球気候変動の影響が原発の稼働にも及び始めた」2022 年 7 月 31 日 <https://wired.jp/article/nuclear-power-plants-struggling-to-stay-cool/> (アクセス : 2023 年 2 月 27 日)、ASN(2022) インフォメーションノート 2022 年 8 月 8 日 <https://www.asn.fr/l-asn-informe/actualites/modification-temporaire-des-prescriptions-encadrant-les-rejets-thermiques-de-5-centrales-nucleaires> (アクセス : 2023 年 2 月 25 日)

⁵² Frank Bass (2022) “Nuclear reactor problems in France show need for diversified mix of renewables”, 2022 年 8 月 30 日 <https://ieefa.org/resources/nuclear-reactor-problems-france-show-need-diversified-mix-renewables> (アクセス : 2023 年 2 月 27 日)

⁵³ Michael Webber (2023) “Two years after its historic deep freeze, Texas is increasingly vulnerable to cold snaps – and there are more solutions than just building power plants” *The Conversation*, 2023 年 2 月 10 日 <https://theconversation.com/two-years-after-its-historic-deep-freeze-texas-is-increasingly-vulnerable-to-cold-snaps-and-there-are-more-solutions-than-just-building-power-plants-198494> (アクセス : 2023 年 2 月 28 日)

⁵⁴ Rod Adams(2021) “South Texas Project Unit 1 tripped at 0537 on Feb.15, 2021” *Atomic Insights* 2021 年 2 月 15 日~2 月 18 日、<https://atomicinsights.com/south-texas-project-unit-1-tripped-at-0537-on-feb-15-2021/> (アクセス : 2023 年 2 月 28 日)

⁵⁵ University of Texas Austin (2021), “The Timeline and Events of the February 2021 Texas Electric Grid Blackouts” テキサス大学オースティン、エネルギー研究所 2021 年 7 月 <https://energy.utexas.edu/sites/default/files/UTAustin%20%282021%29%20EventsFebruary2021TexasBlackout%2020210714.pdf> (アクセス : 2023 年 3 月 1 日)

-
- 56 Michael A. Rawlins (2022) “Why a warming climate can bring bigger storms” The Conversation 2022年2月2日 <https://theconversation.com/why-a-warming-climate-can-bring-bigger-snowstorms-176201> (アクセス：2023年3月1日)
- 57 John McFarland (2022) “Winter Storm Uri: The causes of the massive Texas power failure detailed in UT report” Oil and Gas Lawyer Blog 2022年2月11日 <https://www.oilandgaslawyerblog.com/winter-storm-uri-the-causes-of-the-massive-texas-power-failure-detailed-in-ut-report/> (アクセス：2023年3月1日)
- 58 川瀬宏明 (2019) 『地球気候変動で雪は減るのか増えるのか問題』(ベレ出版、2019年12月25日)
- 59 NHK 2022年12月21日「大雪 新潟 県内の国道 通行止めすべて解除 【21日正午現在】」 <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20221219/k10013927941000.html> (アクセス：2023年3月1日)
- 60 サンケイ新聞 2022年12月27日「原発周辺国道の大雪立ち往生 「大事な避難路」新潟知事指摘」 <https://www.sankei.com/article/20221227-3SFT7LCYBVJGFDMFFHW4OBQZNA/> (アクセス：2023年3月1日)
- 61 読売新聞 2023年1月8日「雪の国道で立ち往生、新潟・柏崎市長「再稼働に影響与える」…避難経路通行止めに懸念」 <https://www.yomiuri.co.jp/national/20230105-OYT1T50254/> (アクセス：2023年3月1日)
- 62 新潟日報 2023年1月20日「原発事故と大雪が重なったら…避難経路に募る不安 新潟柏崎市・国道8号と北陸道の通行止めから1か月」 <https://www.niigata-nippo.co.jp/articles/-/165266> (アクセス：2023年3月1日)
- 63 朝日新聞 2023年1月17日「豪雪時の原発事故どう避難？策定進まぬ柏崎刈羽の『緊急時対応』」 <https://digital.asahi.com/articles/ASR1J7KC1R1FU0HB001.html> (アクセス：2023年3月1日)
- 64 新潟日報 2023年2月8日「豪雪時の避難計画に強い懸念、新潟県内30市町村で構成『原子力安全研』 柏崎刈羽原発の審査書類流用にも批判続出」 <https://www.niigata-nippo.co.jp/articles/-/173319> (アクセス：2023年3月1日)
- 65 Wikipedia 「平成30年の大雪」 <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B9%B3%E6%88%9030%E5%B9%B4%E3%81%AE%E5%A4%A7%E9%9B%AA> (アクセス：2023年3月2日)
- 66 新潟地方気象台「新潟県に災害をもたらした気象事例」 https://www.jma-net.go.jp/niigata/menu/saigai_NI.html (アクセス：2023年3月2日)
- 67 佐滝剛弘、2022「高速道路の『大雪対策』がここ数年で変わった訳」東洋経済 2022年2月8日 <https://toyokeizai.net/articles/-/509946> (アクセス：2023年3月2日)
- 68 日経新聞 2021年1月31日「北陸豪雪で車立ち往生 情報共有や発信が後手に」 <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOJB203WU0Q1A120C2000000/> (アクセス：2023年3月1日)
- 69 中日新聞 2021年1月11日「大雪 県内3人死亡、23人重軽傷 北陸道 一時1500台立ち往生」 <https://www.chunichi.co.jp/article/183627> (アクセス：2023年3月1日)
- 70 福井県原子力安全対策課(2023)「原子力発電所の運転および廃止措置状況」2023年3月1日現在 <http://www.atom.pref.fukui.jp/getsurei/r05/g02.pdf> (アクセス：2023年3月6日)
- 71 一般社団法人原子力安全推進協会(2023)「2023年3月2日時点の『本日の運転状況』」 <https://www.genanshin.jp/db/fm/plantstatusN.php?x=d> (アクセス：2023年3月4日)
- 72 U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (2007) “Regulatory Guide 1.76” <https://www.nrc.gov/docs/ML0703/ML070360253.pdf> (アクセス：2023年3月23日)
- 73 IPCC, 2021, “Summary for Policymakers”. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-

Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 4, doi:10.1017/9781009157896.001.

⁷⁴ Hasui, Seiichiro, 2011, “Climate security and its implications for integrating paradigms of development and security”. In S. Iai, S. Takamitsu, S. Ikkatai (Eds.), *Achieving global sustainability: Policy recommendations*. pp. 279–321. United Nations University Press.

⁷⁵ 朝日新聞（2008年12月6日）『『気候安保』、相次ぎ議論に』

⁷⁶ 蟹江憲史、2007「気候安全保障をめぐる国際秩序形成へ：ハイポリティクス化する環境政治の真相」現代思想 2007年10月号 Vol.35-12、pp.210-221。

⁷⁷ 同上。

⁷⁸ Hasui, Seiichiro, 2011.

⁷⁹ 国立環境研究所プレスリリース（2020年10月1日）（URL：<https://www.nies.go.jp/whatsnew/20201001/20201001.html>）

⁸⁰ United Nations Climate Security Mechanism, 2021, “Progress Report May 2021”.（URL：<https://www.unep.org/explore-topics/disasters-conflicts/what-we-do/disaster-risk-reduction/climate-security-mechanism>）

⁸¹ IPCC, 2014, “Summary for policymakers”. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 3.

⁸² IPCC, 2021, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, p.130.

⁸³ IAEA, 2022, *Climate Change and Nuclear Power 2022: Securing Clean Energy for Climate Resilience*, p.62. (URL: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-and-climate-change/climate-change-and-nuclear-power-2022>)

⁸⁴ IPCC, 2021, “Summary for Policymakers”, In *Climate Change 2021*, p.25. (C.2.5.)

⁸⁵ IAEA, 2022, p.53.

⁸⁶ *Ibid.*, p.54.

⁸⁷ 気象庁ウェブサイト（URL：https://www.jma.go.jp/jma/kishou/kuon/ame_chuui/ame_chuui_p6.html）

⁸⁸ *Ibid.*, p. 6.

⁸⁹ IAEA, 2022, *Climate Change and Nuclear Power 2022: Securing Clean Energy for Climate Resilience*, p.45. (URL: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-and-climate-change/climate-change-and-nuclear-power-2022>)

⁹⁰ 原子力規制委員会、2020、「実用発電用原子炉に係る新規規制基準の考え方について」（NREP-0002）（URL：<https://www.nra.go.jp/data/000155788.pdf>）

⁹¹ 同上、213頁。

⁹² 原子力規制委員会、2013、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

(URL : <https://www.nra.go.jp/data/000382455.pdf>)

⁹³ IAEA, 2022, p.15.

⁹⁴ 時事通信 2022 年 4 月 10 日「ロシア軍、チェルノブイリから放射性物質盗む ウクライナ」

⁹⁵ 日本原子力産業協会情報・コミュニケーション部、2023、「ウクライナの原子力—基本情報—」
(URL : https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2023/02/ukraine.pdf)

⁹⁶ 館野淳、2022「原発は適合性検査で安全になったのか？—「ベント被曝」はないのか」岩井ほか『気候変動対策と原発・再エネ』61 頁。

⁹⁷ 日本国際問題研究所、1984、「原子力施設に対する攻撃の影響に関する一考察」(URL : <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000160057.pdf>)

⁹⁸ IPCC, 2023, Summary for Policymakers: Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report(AR6). (URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>)

⁹⁹ GX 実行会議 (2023)「GX 実現に向けた基本方針」
<https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/20230210002.html>(アクセス : 2023 年 8 月 21 日)



〒164-0011 東京都中野区中央 2-48-4 小倉ビル 1 階

TEL.03-6821-3211 FAX.03-5358-9791

URL: <https://cnic.jp/>

<https://cnic.jp/english/>

2023 年10月初版