

## 第II部

# エネルギー転換を巡る不確実性に どう向き合うか



## 7. LNG・天然ガスの役割発揮に向けて

液化天然ガス(LNG)・天然ガスは、化石燃料の中で、エネルギートランジションにおいて一定の役割を果たし続けることが期待されている。本章ではその役割発揮に向けて、課題と対応策についてまとめる。

### 7.1 LNG・天然ガス安定供給に必要な新規投資

#### 将来のLNG役割明確化が必要——LNG役割は時代に応じて進化

エネルギートランジションに向けて、不確実性を解消する現実的なソリューションとして、LNG・天然ガスは重要な役割を果たすことが期待される。LNGは各時代の要請に応じ、役割を拡大、発揮してきた。今後も基幹エネルギー源として、トランジションにおいても、エネルギーセキュリティに貢献する。新興市場の経済成長・成熟市場の安定供給を支え、新エネルギー源との組み合わせにおいても世界のエネルギートランジションに貢献する。LNG・天然ガス自身のクリーン化が前提条件となる。

レファレンスシナリオおよび技術進展シナリオいずれにおいても、東南アジア新興市場を中心に、堅調なLNG・天然ガス需要が見通される。これらのシナリオで想定している省エネルギー改善が実現しない場合には天然ガス・LNG需要がさらに上触れする可能性もある。

東南アジアでは、1970年代以降、LNG輸出プロジェクト開発と並行して、域内天然ガス消費も増加してきた。伝統的ガス生産国(インドネシア、マレーシア、タイ)で今後も天然ガス利用が継続・拡大する。

2011年以降、7か国でLNG輸入を実現、域内での各国間の相互LNG物流に加え、域外からのLNG輸入も増加しつつある。今後、東南アジアの天然ガス消費量中のLNG比重は、現状の全体の6分の1から、2050年までには3分の1程度へと高まる見通しとなる。特に沿岸地域・島嶼地域にLNG利用インフラストラクチャー拡大のポテンシャルが大きい。

特に東南アジア市場において、天然ガスは産業部門の排出削減、電力の需給調整で役割を果たす。転換期の排出削減に経済合理的な燃料となりうる。天然ガス市場安定とそのための供給能力拡大はエネルギー転換コスト低減に貢献する。

近年のLNG市場の動向が、長期的なLNGの役割および市場安定・セキュリティ確保の重要性を示唆している。エネルギー危機に対応する柔軟性をLNGが提供するとともに、需給関係・価格の不安定化が長期的視点での市場安定化対策の重要性を示している。

表7-1 | LNG (天然ガス)の役割の変遷・進化

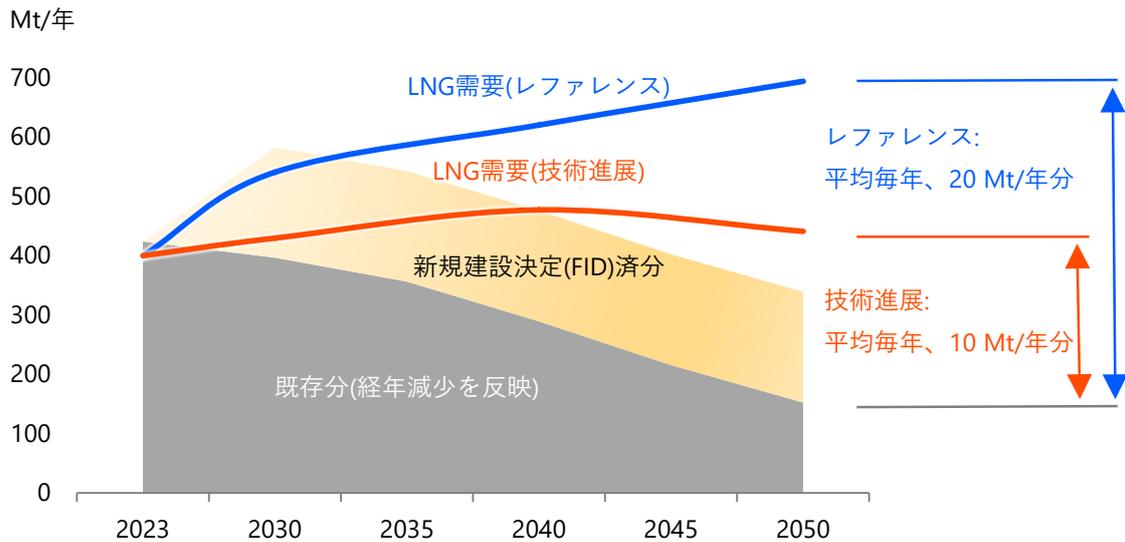
時代と対応事象	LNGの役割発揮振りおよび期待
20世紀後半 石油危機 大気汚染	代替エネルギー源、クリーンエネルギー源として拡大(日本、韓国) パイプラインガスに対する代替ガス供給源(欧州) 一次エネルギー中でシェア拡大し、石油危機影響緩和にも貢献
2010年代 原子力発電停止分補完 エネルギー需要増	ベース電源不足時に迅速対応可能な柔軟性を実証 バリューチェーン各要素での参加企業のすそ野が広がったことにより、液化・海上輸送・気化はロジ上の負担でなくなり、緊急時に柔軟性際立つ
2021-2022年 パンデミック後エネルギー需要増 ロシア戦争・ガス不足	欧州でウクライナ侵攻以前よりロシア産パイプラインガス供給減少分をLNG輸入増加が相殺 ウクライナ侵攻・ドイツ向けパイプライン爆破によるロシア産パイプラインガス輸入減少分を、米国産を中心とするLNG輸入増加で充足
将来に向けて トランジションを巡る 不確実性対応に現実解	エネルギーセキュリティの中核としての供給源 新興市場の経済成長・成熟市場の安定供給を支える 新エネルギー源との組み合わせ・トランジション貢献 LNG自身のクリーン化次第で持続的利用が期待される

## 7.2 LNG・天然ガス安定供給に継続的な投資が必要

LNG生産部門には、2050年までの期間に、1,000万t/年～2,000万t/年分の継続的追加が必要となる。見通し上のLNG需要量と、経年により減少する既存生産容量の差により試算した数字である。これには、①新規プロジェクト投資、②代替供給(バックフィル)ガス田投資、③原料ガス田生産減少分補完、④既存LNG液化等の設備若返り改修が含まれる。

過去3年間の新規建設決定(最終投資決定[FID])状況はこれを上回る。しかし既建設決定分の実現にも不確実性があり、実現しない・遅延などの可能性にも留意すべきである。すなわち、ロシア新規プロジェクトの不確実化、アフリカで政情不安による建設停止状態の継続、米国で設計・調達・建設(EPC)コストアップによるプロジェクトオーナー・コントラクター間の交渉不調による遅延、米国で環境訴訟を契機とする建設許可差し止め判決などが顕在化している遅延要因である。

図7-1 | LNG生産部門の投資必要容量試算



### 7.3 LNG生産プロジェクトの開発課題

#### コスト上昇と技術革新・開発モデル進化が並行

LNG生産プロジェクト開発の課題への対応が長期的利用のカギとなる。

2010年代以降のLNG供給の急拡大は、その焦点地域をカタール、オーストラリア、米国と推移してきた。その中でLNG生産プロジェクト開発コストは上昇傾向にある。一方で浮体LNG生産、小・中規模液化設備、モジュラー方式によるコスト削減努力もなされてきた。

カナダ、メキシコの北米西海岸LNG輸出開始および東アフリカのLNG開発進展は、供給源多様化の観点、またLNG海上輸送面では、アジア市場への輸送距離・経路のボトルネック解消の観点でもゲームチェンジャーとなることが期待される。

米国輸出キャパシティは今後数年間堅調に拡大するが、長期開発が「ポーズ」および規制の不透明状況により不確実化している。2024年以降、米国のFIDが停止状態となっている。さらに進行中案件に法廷リスク、完成リスクも顕在化している。

過去数年間の堅調なFIDには、買主の長期コミットメントがカギとなってきた。こうしたコミットメントは、ポートフォリオプレイヤーによるものが比重拡大しており、日本のLNG買主(都市ガス・電力など)のコミットメントは比重低下している。

表7-2 | LNG生産プロジェクトの開発動向の推移

	各時期の特徴	コストダウンや開発促進取り組み
2010-2014	北東アジアLNG需要急増、豪LNG開発ブーム、建設活動集中にともなう高コスト化	オーストラリアの高コスト傾向が、他地域でのLNG開発を覚醒
2015-2020	LNG生産設備開発の中心地が米国へ LNG原料向けの上流部門、液化部門ともコスト増加は抑制 米国产LNGの原料ガスコストは、絶対的に安価ではないが、長期的安定性を期待	米国LNG輸入設備利用低迷後、LNG輸出設備の開発に転用 米国ガス生産・原料ガス輸送部門が分離 他地域含め、浮体液化(F LNG)方式がオプションとして台頭
2021-	パンデミックによるロジスティックス障害にともない、建設遅延、コスト上昇 戦争影響の制約でコスト上昇 ホスト国政情不安定による建設遅延 コスト上昇の吸収困難な事例も発生 米国で輸出許可、建設許可手続き面での不確実性高まる	小・中規模液化設備技術革新 LNG生産プロジェクトすそ野・全体規模拡大にともなう、モジュラー方式(同一設計の繰り返し適用) ロシア産ガスからのフェーズアウトにより、他地域でのLNG生産プロジェクト開発促進
	鋼材・コンクリート等素材コスト上昇 資金調達コスト上昇 CCS・電化(再生可能エネルギー)コスト	2020年代後半のLNG市場機会を競い合う生産プロジェクト各社は、コストダウンに取り組む

中期的には堅調な生産キャパシティ増加が期待されるものの、建設遅延傾向が常態化している。2030年前後にLNG供給力に余剰が生じるとの見方もあるが、余剰予想に刺激され追加需要が喚起される。この供給側・需要側双方の要因により、「供給過剰」はイリュージョンとなる。

主要LNG輸出地域では、資源ポテンシャルとともに、課題も抱えている。オーストラリアのLNG輸出開発は成熟し、今後ブラウンフィールド開発による安定生産維持が課題となる。カタールでは超大型拡張計画がクリーン対策織り込み進行中で、追加マーケティングが注目点となる。東アフリカは資源ポテンシャル大きい、本格的拡張は足踏み状態にある。ロシアは既存供給が堅調だが、不安要因を抱え、新規開発はいっそう不確実化している。

表7-3 | 主要LNG生産国の現状と課題

	現状・LNG開発の特徴	今後の留意点、課題
オーストラリア	<p>資源輸出大国、ガスは生産の4分の3をLNG輸出</p> <p>世界3大LNG輸出国の一角</p> <p>1989年西オーストラリアよりLNG輸出開始、2014年より東部からもLNG輸出開始</p> <p>LNG輸出はほぼ全量アジア向け輸出</p> <p>Scarborough/Barossaと、準ブラウンフィールド案件開発進行中</p>	<p>2024年発表「長期的ガス戦略」、2050年のGHG排出ネットゼロに向けたエネルギー移行においてオーストラリアの天然ガスが重要な役割を果たすと謳う</p> <p>2015年セーフガード・メカニズム制定、2023年改定、2030年までに排出量を43%削減する国の目標達成のため年4.9%ずつベースラインを下げる等の規制</p> <p>LNGプロジェクト推進はCCUS等のGHG対策を組み込んだ計画が求められてゆく</p>
カタール	<p>世界最大North Fieldガス田に基づき、年間8,000万tのLNGを輸出</p> <p>国有QatarEnergy主導でLNGプロジェクト開発、国際企業に3割程度まで参入させる</p> <p>巨大拡張計画NFE, NFS, NFWより、年間6,400万t分の開発、マーケティング推進</p> <p>QatarEnergyはLNGマーケティング面、LNG生産拠点・上流資源開発でも海外積極進出</p>	<p>進行中拡張プロジェクトの販売方針に注目</p> <p>NFE案件では、中国向けに加え、欧州パートナー企業向けのLNG引き取りに関しても、2050年を越える期間での引き取りコミットメントを確保</p> <p>LNG生産設備動力における再生可能エネルギー活用、大型CCS計画を織り込むことにより、持続的な環境適合性を備えた開発</p>
モザンビーク	<p>Rovuma盆地の生産ポテンシャルは巨大</p> <p>第4鉱区は、FLNGプロジェクトが2022年より稼働開始、陸上プロジェクトもFEED段階</p> <p>第1鉱区は陸上LNG生産プロジェクトに関して、2019年FIDを行ったが、2021年4月より建設工事中断</p>	<p>第1鉱区陸上プロジェクトは2024年末までに工事再開を目指すとしており、治安回復による安定したプロジェクト開発が課題</p>

	現状・LNG開発の特徴	今後の留意点、課題
		中東地域同様、地理的にはアジア・欧州双方にLNGを販売できる距離にある戦略的な位置づけ、特に日本をはじめとするアジア向けには輸送上のボトルネックもない
タンザニア	海洋ガス田のポテンシャルが大きい  2023年、国際企業3社がLNGプロジェクト開発に向け、同国政府と枠組み協定	開発コスト削減とマーケティングが課題
ロシア	サハリン、北極圏からのLNG出荷は継続しているが、中断の不安を抱える  建設中の案件および新規案件の先行きは不透明化、マーケティングの成功は期待されず  Sakhalin 2は、日本企業出資・LNG購入継続  Arctic LNG 2は制裁下ながらLNG出荷を試み	既存プロジェクトからのLNG輸出中断時の備えが常に必要  新規開発には、戦争の終結・紛争解決が前提条件

## 7.4 LNG輸送ボトルネック、生産設備トラブルが市場バランスに影響

### LNG輸送、生産に長期的な影響をもたらす課題が顕在化

LNG市場拡大により、円滑な海上輸送・安定生産確保が長期的課題として、いっそう重要性を増している。

重要航路にボトルネックが発生し、需給ひっ迫時には大きな障碍要因となる可能性が高い。長期的なLNG輸送戦略構築が必要となる。

LNG供給源多様化にともない、輸送経路・距離も供給源・消費地によりさまざまとなっている。2016年パナマ運河拡張完成以降、LNG輸送船舶の通航が可能となり、米国産LNGのアジア向け輸送の利便性が向上した。シェール革命にともない、天然ガスだけでなく増産され

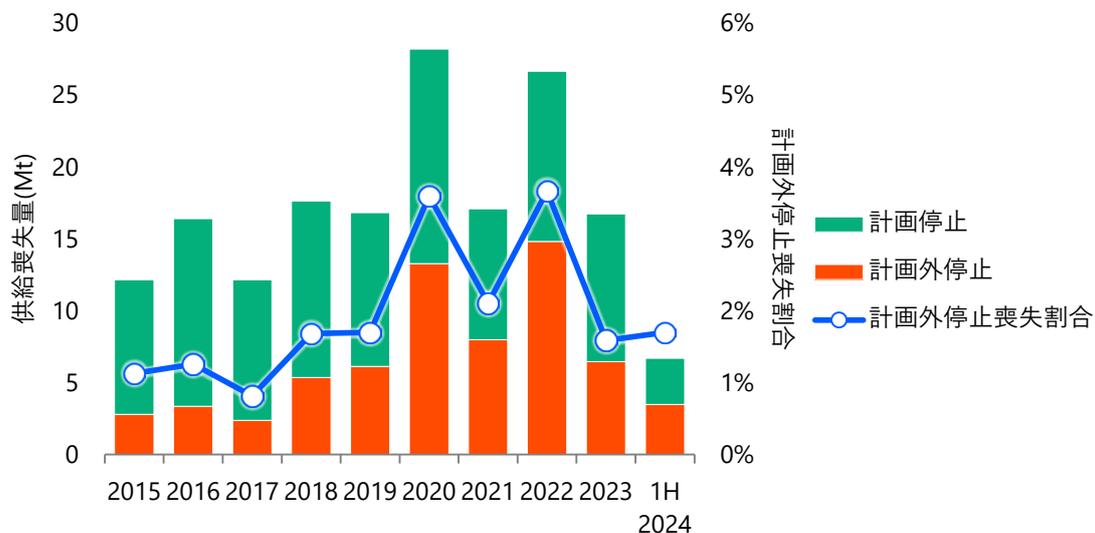
た液化石油ガス(LPG)のアジア向け輸送の増加にもつながっている。輸送量の増加の一方で、待機長時間・あるいは迂回が発生している。これに対応して通航・予約の合理化は進んでいるが、渇水による水位低下、これによる大型船舶通航可能隻数制限も発生している。2024年は米国産LNGの北東アジア向け輸送では、喜望峰周りが常態化している。

さらに中東情勢により紅海・スエズ航路も事実上遮断したことにより、中東産LNGの欧州向け輸送も喜望峰周りが常態化している。LNG輸送に対する制約が高まっている。

他方で、北米西海岸・東アフリカLNG輸出の本格化は、LNG輸送合理化・最適化にとってもゲームチェンジャーとなる。

LNG生産設備の計画外停止が増加し、需給バランスひっ迫時には状況を深刻化する可能性が高い。例として、2022年、米国で大型LNG輸出設備1件につき、火災事故で長期間の停止、他生産諸国でも比較的長期間の計画外停止があった。特に市場バランスが厳しい時期に当たったことから、スポットLNG、ガス価格をさらに押し上げる要因となった。2023年は、市場バランスが比較的安定化したところに、計画外停止による喪失量も前年比で減少した。

図7-2 | LNG生産設備停止にともなう供給喪失量推計



出所: 設備停止日数と該当設備生産容量により推計

## 7.5 LNG市場安定化への長期的課題

### LNG役割明示、国際連携の重要性

エネルギートランジションの不確実性に対応する現実的なソリューションとして、LNGの役割明確化と同時に、その目的に適合するLNGの基準の明確化が必要である。企業レベルでは、メタン・GHG排出対策強化・目標設定および的確・タイムリーな情報公開がカギと

なる。さらに投融資対象としてLNGの経済的優位性、環境面の優越性をアピールする必要がある。G7(主要7か国)など国際舞台で天然ガス・LNGの重要性が認知されたが、エネルギー転換において認められる「Abatedな」LNGの基準確立が重要となる。メタン・GHGの排出測定・実測強化と国際基準化の重要性、排出削減対策における国際協力の重要性が認知されつつある。

企業レベルでは、メタン・GHG排出対策強化・目標設定および的確・タイムリーな情報公開がカギとなる。

さらに投融資対象としてLNGの経済的優位性、環境面の優越性をアピールする必要がある。米国、オーストラリア、カナダ、メキシコなど、LNG生産拡大・維持に向け、規制面の安定・推進を消費国側からも働きかけること、開発への参加と開発への支援が重要になる。

東南アジア新興市場を巻き込む中長期的な需要アグリゲーションおよび市場開発支援がグローバルLNG市場の規模拡大、生産開発の支援につながる。

## 8. エネルギー安全保障のリスクシナリオ

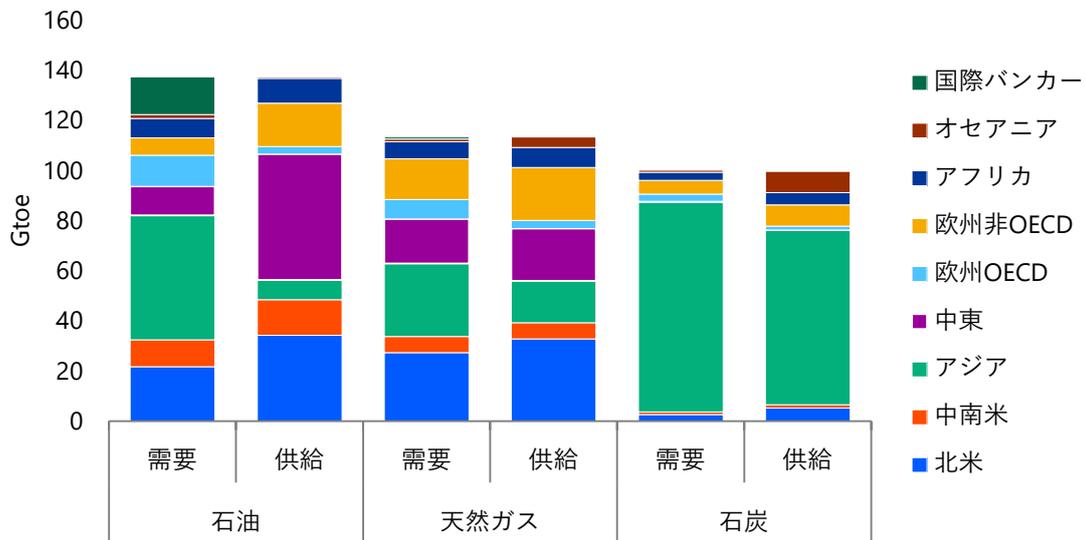
言うまでもなく、必要な量のエネルギーを妥当な価格で確保することは社会や経済に不可欠である。しかし、エネルギーの安定供給はさまざまな要因によって脅かされることは歴史が証明している。そのため我々は、リスクの所在やそれが顕在化した場合の影響を正しく理解し、必要な対策を講じなければならない。ここでは重要度が高いと考えられる5つのリスクを取り上げ、それらの理解を試みる。

### 8.1 化石燃料過少投資のリスク

#### 化石燃料投資の重要性

2022年時点において化石燃料は世界の一次エネルギー消費の81%を占めている。化石燃料のうち石炭の需要はすでにピークに達した可能性があり、レファレンスシナリオの場合、2050年にかけて1.2%/年のペースで減少する。一方、石油および天然ガスの需要は、同じくレファレンスシナリオの場合、2050年まで増加し続ける。その結果、2050年時点でも化石燃料のシェアは73%（石油および天然ガスでは55%）と非常に大きい。地域別に見ると、需要はいずれの化石燃料でもアジアがけん引し、供給では石油・天然ガスは中東や北米、石炭はアジアの存在感が大きい。

図8-1 | 世界の化石燃料需給[レファレンスシナリオ、2022年～2050年累計]

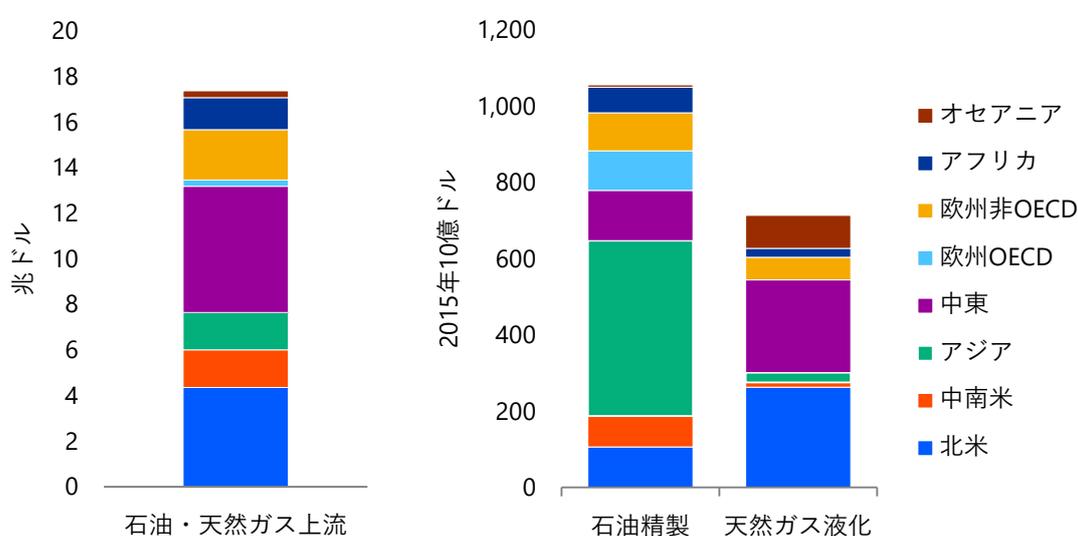


#### 過少投資のリスク

化石燃料の安定供給のためには上流から下流に至るバリューチェーン全体で安定的な投資が必要であることは言うまでもない。レファレンスシナリオの需要を賄うためには、化石燃

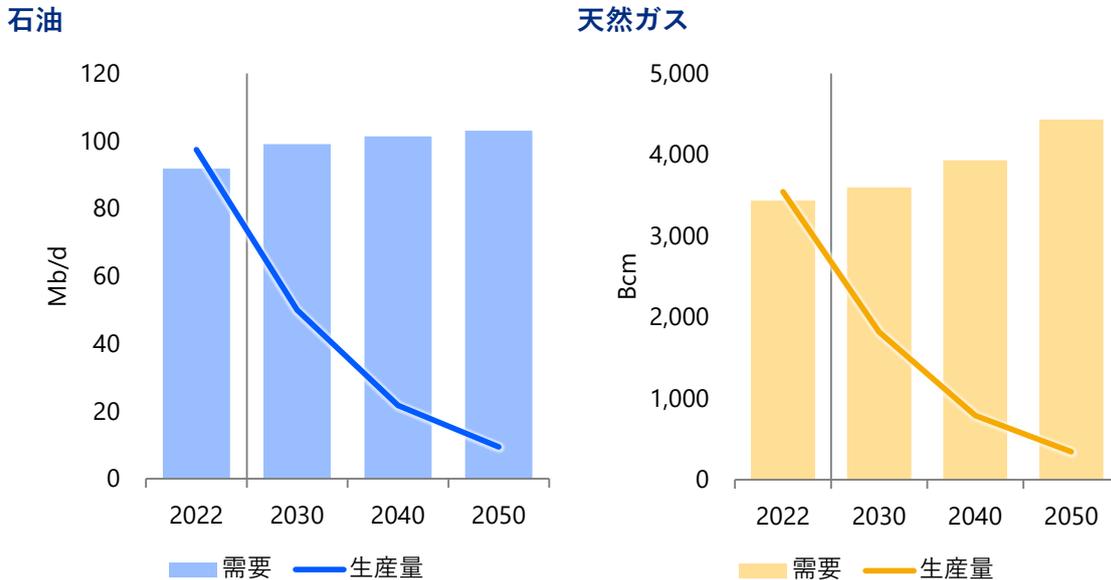
料部門で約22兆ドル(2015年実質価格)の投資が必要となる。特に、2050年まで需要が増加し続ける可能性がある石油と天然ガス、なかでも両燃料の必要投資額の8割～9割を占める上流(探鉱・開発・生産)部門、とりわけ中東や北米といった主要供給地域での安定的な投資が死活的に重要となる。また、特に先進国において精製設備の縮小が見られ、途上国においては製油所プロジェクト投資の遅延も見られる状況では、石油精製部門での投資確保は多くの国にとっての課題である。さらに、今後も堅調な需要が見込まれる液化天然ガス(LNG)に関しては、増産ポテンシャルが大きい中東や北米での天然ガス液化設備への安定的な投資がきわめて重要である。

図8-2 | 主要な石油・天然ガス投資額[レファレンスシナリオ、2022年～2050年累計]



しかし、気候変動対策への社会的な要請が高まる中、化石燃料プロジェクト投資への逆風が強まっている。気候変動対策の一環としての省エネルギーは化石燃料需要抑制効果があるものの、ダイベストメントや規制強化等で投資が進まなければ化石燃料需給がひっ迫する可能性が高い。石油・天然ガス生産量の減衰率を仮に8%とすると、上流部門での追加投資がない場合、2050年時点での生産量は2022年の約10分の1にまで減少し、きわめて大きな需給ギャップが生じることになる。

図8-3 | 追加投資がない場合の世界の石油・天然ガス生産量とレファレンスシナリオでの需要

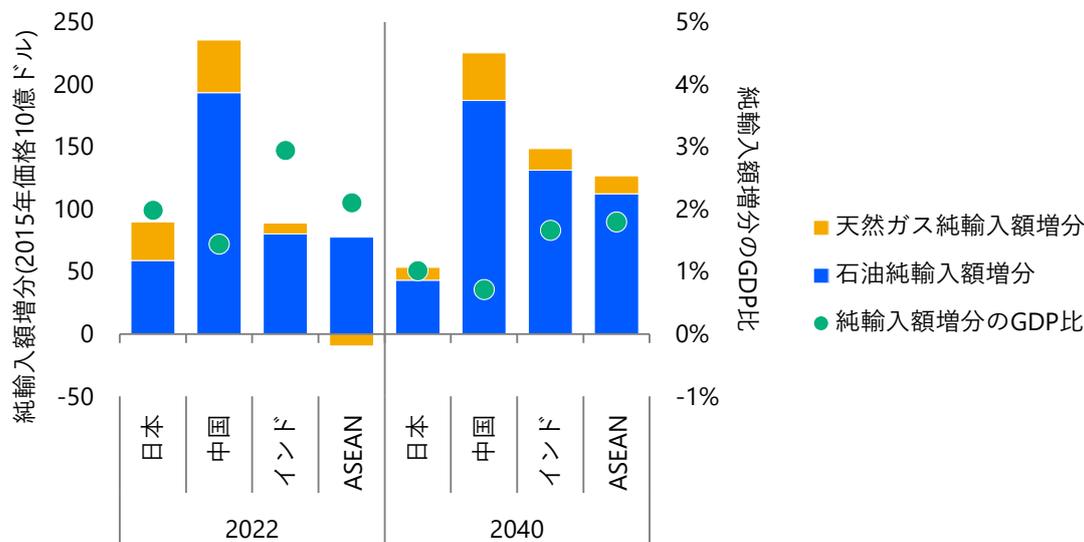


#### マクロ経済への影響

図8-3は思考実験としてレファレンスシナリオでの需要と追加投資がない場合の生産量想定を比較したものであり、このような極端な需給ギャップが実際に生じることは考えられない。しかし、過少投資の影響で石油・天然ガス需給がひっ迫すると価格は上昇する可能性が高い。2021年平均のBrent価格は前年比で7割上昇したが、パンデミック収束による需要回復だけではなくパンデミック期における上流投資不足も価格上昇をもたらしたとされている。

一般的には資源価格の上昇は、輸入国での物価上昇や企業収益圧迫を通じて輸入国のマクロ経済へ悪影響を及ぼす。2022年および2040年の石油・天然ガス輸入価格が、実績あるいは想定値より50%上昇した場合、アジアの主要輸入国・地域での国内総生産(GDP)に占める輸入額のシェアがどのように変化するかを見ると、当該シェアは1%~3%ポイント上昇する。純輸入量が減少する日本やGDPが大幅に拡大する中国では相対的にシェアが低いですが、純輸入量増加が著しいインドや東南アジア諸国連合(ASEAN)ではシェアが相対的に高く、経済への影響がより懸念される。

図8-4 | 石油・天然ガス価格50%上昇がアジアの主要輸入国・地域に及ぼす影響



注: 2040年はレファレンスシナリオ

## 8.2 地政学リスクの顕在化

近年の国際エネルギー市場においては、ロシア・ウクライナ戦争や中東におけるガザ情勢の悪化など、既存の石油天然ガス供給に甚大な影響を及ぼしうる地政学的な事象が深刻化している(図8-5)。その一方で、新たな形の地政学的リスクとして、石油・天然ガスを生産・輸出する先進国において、国内の化石燃料の開発・輸出を制限する政策がとられるという事態も見られる。本項では、そうした深刻度と多様性がともに深まりつつある地政学的リスクについてまとめる。

図8-5 | 日本のエネルギー供給に影響を及ぼしうる主な地政学的リスク



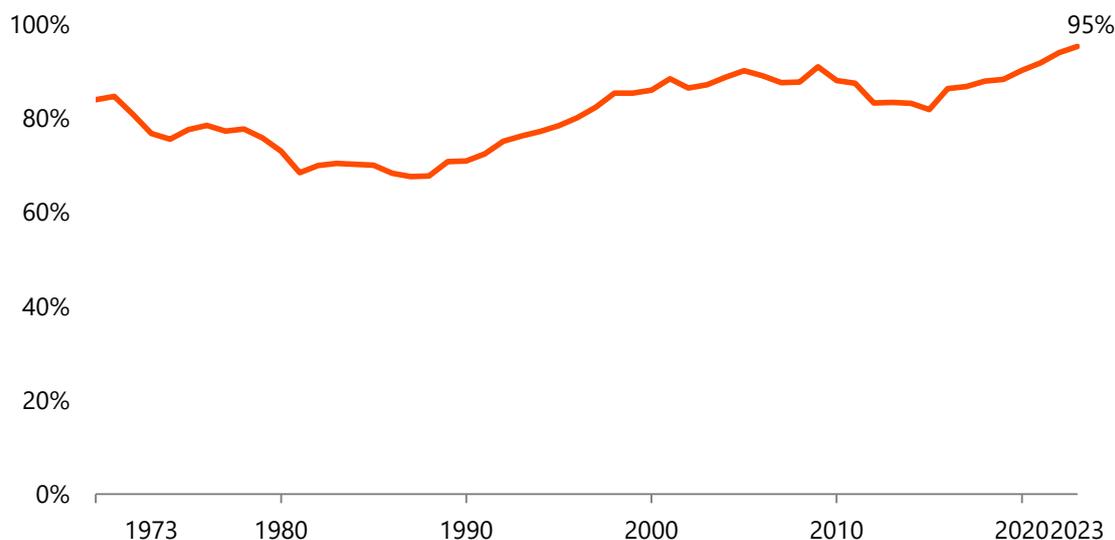
#### 深刻さを増す中東地域における地政学的リスク

中東地域における地政学的リスクは、日本にとっては古くて新しい問題である。1970年代の石油危機以降、中東からのエネルギーへの依存度低減は長らく日本のエネルギー安全保障政策の主要課題の1つであった。その中東依存度であるが、原油の依存度は2023年には95%に達しており(図8-6)、過去に類を見ないほど高くなっている。特に2022年度以降は、ロシアによる本格的なウクライナ侵攻が始まったことを受けて、他の主要7か国(G7)諸国とともにロシア産原油の輸入を停止し、その代替原油を中東から輸入したため依存度の水準がさらに高くなった。このことは、中東地域における政治情勢が日本の石油供給に及ぼす影響度がこれまでになく高まっていることを示唆している。

もともと地政学的リスクが高いとみなされてきた中東地域であるが、その地政学的リスクはこの1年の間にさらに高まった。2023年10月、パレスチナ ガザ地区に拠点を置くイスラム系武装組織ハマスがイスラエルに対する大規模な奇襲攻撃を行ったことに対し、イスラエルがハマスに対し宣戦布告を行い、ガザ地区への侵攻を開始した。今回の武力対立によって失われた人命は、2024年8月時点で4万人に上るとの推定もある<sup>57</sup>。西側諸国や周辺諸国による和平に向けた仲介の動きも出てきてはいるものの、これまでのところ大きな進展は見られず、同地区を巡る情勢は依然として混迷している。

<sup>57</sup> Julia Frankel. (2024). "With Gaza's death toll over 40,000, here's the conflict by numbers," *AP News*. <https://apnews.com/article/israel-hamas-gaza-war-palestinians-statistics-40000-7ebec13101f6d08fe10cedbf5e172dde>. (2024年9月20日アクセス)

図8-6 | 日本の原油輸入における中東依存度の推移



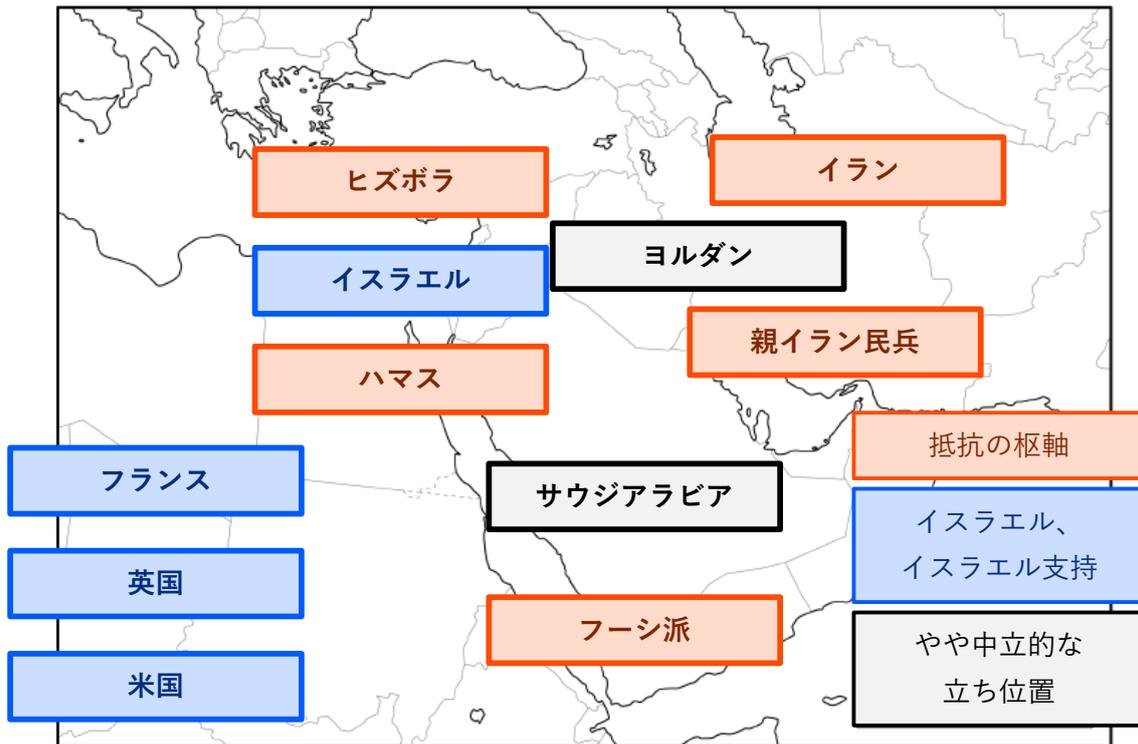
出所: 日本エネルギー経済研究所 EDMC Databank

なお、こうしたパレスチナ情勢が深刻さを増す中で、国際エネルギー価格への影響はこれまでのところ軽微である。国際指標価格であるBrent原油価格は、2023年10月時点で\$90/bbl台を推移していたが、その後ガザ情勢が悪化した同月以降はむしろ下落し始め、同年末には\$70/bbl台にまで低下した。その後、本稿執筆時点に至るまで、国際原油市場において中東情勢を原因とする大きな価格上昇は見られていない。少なくとも現時点では、パレスチナ情勢の深刻化と国際原油市場との間にはギャップが存在しているといえる。

今後懸念されるべきは、今の中東情勢の悪化が、直接的に同地域からの原油やLNGの輸出に対し物理的な影響を及ぼすことで、現在見られるギャップが解消されるシナリオである。中東地域においては、多様な対立構造が存在し、国際原油市場やLNG市場における物理的な供給そのものに影響を及ぼすシナリオはいくつかのパターンが考えられる。その中でも、現時点である程度の蓋然性がありかつそのインパクトが大きいシナリオとして、イランとイスラエルとの間で本格的な武力衝突が起きる、というものが考えられる。実際に、イランとイスラエルはこれまでの政治的に激しく対立してきたが、2024年7月に、イランに滞在中のハマスの最高幹部ハニーヤ氏がイスラエルによるものとされる攻撃によって暗殺されたことで、両国の関係はさらに悪化した。イランはイスラエルに対し何らかの報復を行うことを明言しており、両者の対立はこれまでになく深まっている。特にこの対立は、単純なイランとイスラエルとの2国間の対立だけではなく、「抵抗の枢軸」と呼ばれるイランと密接な関係を有する各武装組織や、イスラエルを支援する欧米も巻き込んだ大規模な地域紛争へと拡大してゆく危険性がある(図8-7)。仮にそうしたシナリオが現実化した場合、イラン自身によ

る原油の輸出量は2023年時点で1.3 Mb/d程度であり<sup>58</sup>、世界の原油貿易量全体(68 Mb/d)に占める割合は必ずしも大きくないものの<sup>59</sup>、現在の中東地域における地政学的対立構造が本格的にペルシャ湾岸諸国にも波及することで、国際原油市場の参加者に大きな心理的インパクトをもたらし、原油価格の高騰に結び付く可能性がある。

図8-7 | イランを中心とする「抵抗の枢軸」とイスラエル



出所: 坂梨祥(2024)「イランによる対イスラエル攻撃の背景と影響」中東研究センター緊急情勢分析報告会資料を元に作成

実際には、中東地域はこれまでもその地政学的リスクの高さが指摘されながら、エネルギー供給自体は安定的に行われてきた。しかし過去がそうであったからと言って今後も中東地域からのエネルギー供給が安定的である保証はない。脱炭素化に関する関心が高まる一方で、日本の化石燃料への依存度やその中東依存度は依然として高水準にある。中東地域における今後の動向については引き続き高い関心度をもって見てゆく必要がある。

<sup>58</sup> Nikkei Asia. (2024, January 31). "Iran's oil exports reach 5-year high, with China as top buyer." <https://asia.nikkei.com/Business/Markets/Commodities/Iran-s-oil-exports-reach-5-year-high-with-China-as-top-buyer>. (2024年9月20日アクセス)

<sup>59</sup> Energy Institute. (2024). Statistical Review of World Energy. <https://www.energyinst.org/statistical-review>. (2024年9月20日アクセス)

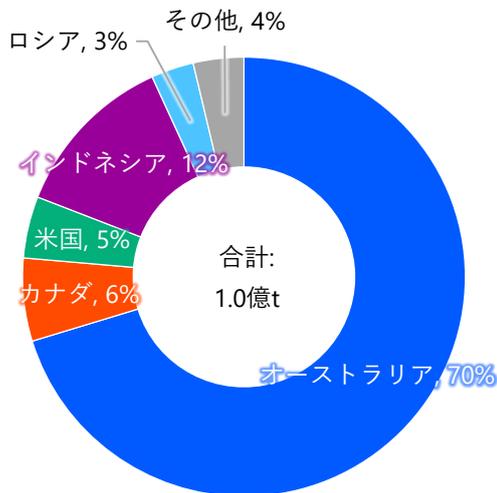
## 先進国の政策変更リスク

エネルギー安全保障における地政学的リスクを「政治的な要因によって実際のエネルギー供給やその価格水準に大きな影響を及ぼすリスク」と定義すれば、そのリスク事象は必ずしも新興国や途上国だけではなく、先進国においても発生しうる。ただ先進国で発生する地政学的リスクは、新興国や途上国で発生するような武力衝突によるものではなく、政府の政策変更、特に過度に脱炭素化策を進めることによるエネルギー資源の生産や輸出への影響という形で表出される可能性がある。

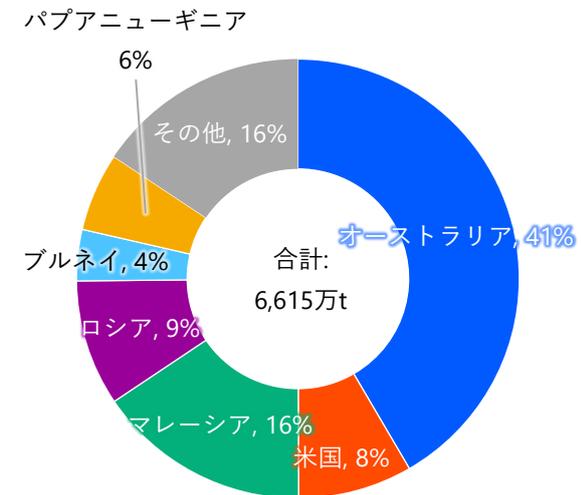
日本がエネルギー資源を輸入している相手は新興国や途上国が中心であると思われるが、例えば石炭は2023年の実績で70%がオーストラリア、6%がカナダ、5%が米国からの輸入である。LNGは、同じく2023年の実績で、42%がオーストラリア、8%が米国となっており、先進国は日本のエネルギー供給源としても非常に重要な位置を占めている(図8-8)。これらの先進国においては、これまで国内の資源開発や輸出に関する政策に大きな方針転換が起きることは少なかった。しかし最近では、国内における気候変動対策やエネルギー安全保障対策への関心が高まることで、国内の資源開発に対しても厳しい目が向けられ、その生産活動やひいては輸出の将来に不確実性を高めかねない政策がとられる事態が実際に起きている。

図8-8 | 日本の一般炭、LNGの輸入源[2023年]

### 石炭(一般炭)



### LNG



出所: 日本エネルギー経済研究所 EDMC Databank

例えば、米国のバイデン政権は、2024年1月、非自由貿易協定(FTA)締結国向けの新規LNG輸出認可申請の審査と承認を一時停止することを発表した<sup>60</sup>。この決定は、バイデン政権が世界的な気候危機への対応策の一環として実施したものであり、バイデン大統領が来るべき11月における大統領選挙に向けて気候変動問題を重視する姿勢を明確にするために導入したと見られている<sup>61</sup>。バイデン政権は、今回の一時停止は日本や欧州など米国の同盟国に対するLNG供給に影響を及ぼすことはないとしている<sup>62</sup>。しかし、今後日本や欧州において、仮に現在計画されているような脱炭素化が進まなかった場合には、その代替エネルギー源として想定以上のLNG需要が追加的に発生する可能性は非常に高い。すでに世界最大のLNG輸出国になった米国における新規輸出許可審査の一時停止は、将来のLNG市場の安定化にとっての課題となることが懸念される。

オーストラリアにおいても、2022年10月、連邦政府は、国内の天然ガス需給を安定的に保つための制度である国内長期ガスセキュリティメカニズム(Australian Domestic Gas Security Mechanism: ADGSM)の改正を行った<sup>63</sup>。この制度は2017年に導入されたもので、あらかじめ国内のガス需給がひっ迫することが予想されるときには、顧客によってコミットされていないガス輸出をオーストラリア政府が制限できるようにしたものである。今回の改正では、政府が需給ひっ迫の可能性をモニタリングする頻度が年1回から四半期に1回へと上げられた。過去、この制度において実際にガスの輸出制限が実行に移されたことはないものの、オーストラリアは日本にとって最大のLNG調達源であり、今後その政策の運用状況については十分な情報収集が必要である。またオーストラリア政府は、2023年7月に、セーフガード・メカニズムと呼ばれる温室効果ガス排出削減制度の改正を行った。この改正では、2050年のネットゼロ実現を目的として、ベースラインと呼ばれる排出上限値を引き下げた。

---

<sup>60</sup> The White House. (2024). "Statement from President Joe Biden on Decision to Pause Pending Approvals of Liquefied Natural Gas Exports." <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2024/01/26/statement-from-president-joe-biden-on-decision-to-pause-pending-approvals-of-liquefied-natural-gas-exports/> (2024年9月20日アクセス)

<sup>61</sup> その後、バイデン大統領は2024年7月、同年11月大統領選挙には出馬しないことを発表し、民主党からの大統領候補は現副大統領のカマラ・ハリス氏となった。

<sup>62</sup> The White House. (2024). "FACT SHEET: Biden-Harris Administration Announces Temporary Pause on Pending Approvals of Liquefied Natural Gas Exports" <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2024/01/26/fact-sheet-biden-harris-administration-announces-temporary-pause-on-pending-approvals-of-liquefied-natural-gas-exports/> (2024年9月20日アクセス)

<sup>63</sup> The Hon Madeleine King MP Minister for Resources and Minister for Northern Australia. (2022). "Improving energy security, reliability and affordability" <https://www.minister.industry.gov.au/ministers/king/media-releases/improving-energy-security-reliability-and-affordability> (2024年9月25日アクセス)

その中ではLNG液化施設や石炭生産施設を含む指定大規模排出源は、温室効果ガス(GHG)排出量を同月から毎年4.9%ずつ削減することを義務付けられている。また新規のLNG液化施設に対しては、操業開始時点からネットゼロ排出での生産活動を行うことが要求されている<sup>64</sup>。この新たな制度も、資源生産事業者にとって追加的な負担となり、日本にとっては調達コストの上昇につながる可能性がある。

また、現時点ではまだ商業的なプロジェクトは存在していないものの、米国やオーストラリアなどでは、低炭素水素やアンモニアを製造し日本に輸入する計画が、多くの日本企業によって検討されている。仮に厳格な気候変動対策の観点から天然ガスを原料とするいわゆるブルー水素のプロジェクトを制限するような政策が導入された場合、日本の低炭素水素を活用した脱炭素化にも影響が及ぶ可能性がある。さらに、今後、日本で発生した二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を回収してこれらの国々に輸送して地下に貯留する二酸化炭素回収・貯留(CCS)プロジェクトが実現した場合でも、プロジェクトの途中でそうした海外からのCO<sub>2</sub>の受け入れに対する政策方針が変わることがあれば、日本のCCS事業にとっても大きな支障が生じる可能性がある。

すでに米国やオーストラリアにおいて見られている上記のような政策変更は、いずれもそれぞれの国において、政策的な必要性に迫られて実施されたものではある。しかし、LNGなどのエネルギー生産プロジェクトや水素・CCSなどの脱炭素化プロジェクトは巨額の資本支出が必要であり、プロジェクトの実施に対する長期的なコミットメントが必要となるため、政府の政策がその時々政権によって変更される可能性は、最終的な投資決定に対しても悪影響を及ぼす。今後先進国において、気候変動政策は、数ある政策アジェンダの中でも主要な政治的争点の1つとして位置づけられる可能性が高く、その時々政権によって国内のエネルギー・気候変動政策が大きく変更されるシナリオも十分考えられる。今後は、そうした先進国における政策変更も、資源調達における不確定要因の1つとして認識しておくべきである。

### 8.3 電力供給不安定化のリスク

#### 電力安定供給の意義

電力安定供給は、現代の生活と企業活動において欠かせない要素となっている。特に、デジタル化と需要の電力化(以下、電化と呼ぶ)が急速に進む現在、社会全体の電力依存度は飛躍

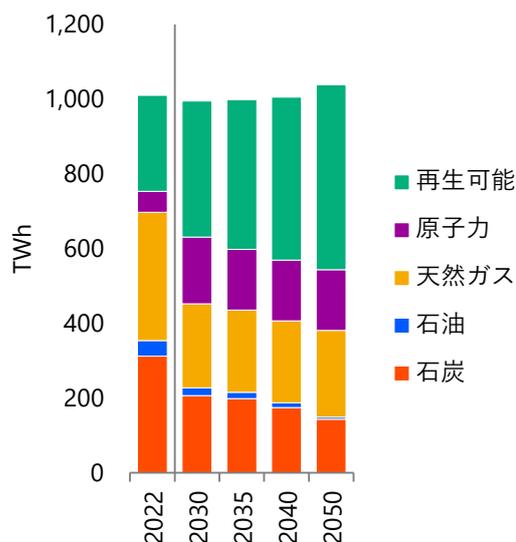
---

<sup>64</sup> Australian Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. (2024). "Safeguard Mechanism." <https://www.dcceew.gov.au/sites/default/files/documents/safeguard-mechanism-reforms-factsheet-2023.pdf> (2024年9月26日アクセス)

的に高まっている。電気自動車の普及、データセンターの拡大など、電化が進む中で、安定した電力供給が確保されなければ、通信や交通、製造業など多岐にわたる分野で大きな混乱を招く。

図8-9 | 日本の電力需給[技術進展シナリオ]

発電電力量



業務部門電力消費

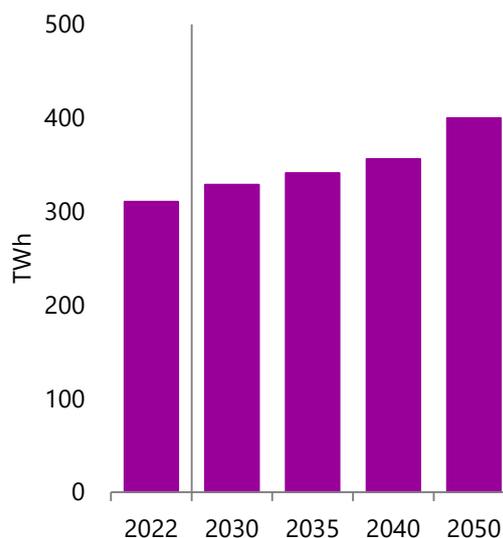
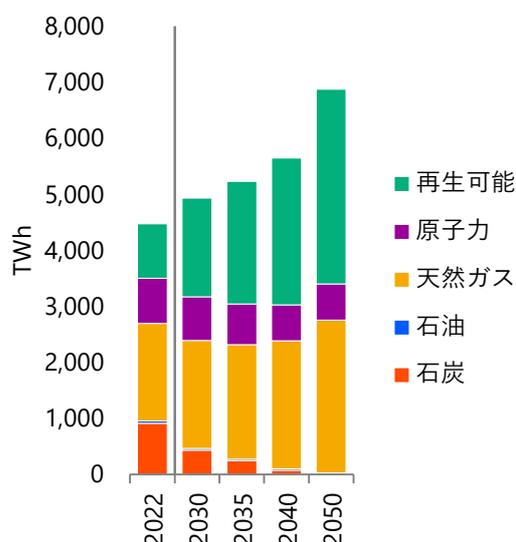
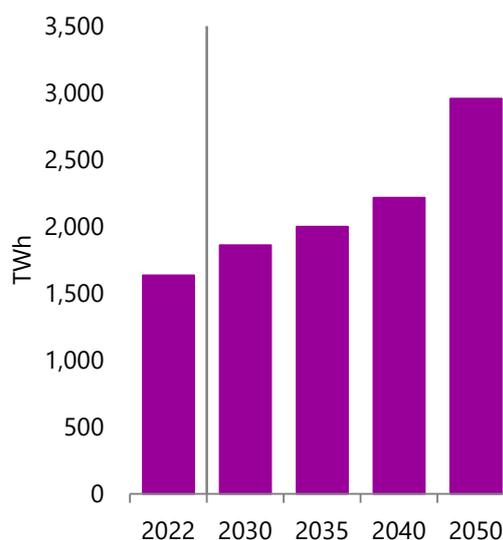


図8-10 | 米国の電力需給[技術進展シナリオ]

発電電力量



業務部門電力消費



さらに、カーボンニュートラルへの移行に向け、再生可能エネルギー電源の導入が進んでいるが、太陽光や風力など自然変動型の再生可能エネルギー電源は、天候や季節によって発電

出力が変動する特性を持つ。このため、再生可能エネルギー電源の拡大にともない、火力電源や原子力電源、蓄電池など、安定供給を支える調整力のある電源の重要性がますます増している。電力供給の信頼性を高めるためには、電源の多様性を確保し、短期的にも長期的にも需要と供給のバランスを取ってゆくことが求められる。

### 電力安定供給に係るリスク

電力安定供給を維持するうえで、さまざまなリスクが存在する。これらのリスクの中には、予測が難しい「ブラックスワン」的な事象も含まれる。例えば、「宇宙天候リスク」「未曾有の自然災害リスク」「電磁パルス障害リスク」などが挙げられる。宇宙天候リスクとは、強力な太陽フレアや磁気嵐が発生した場合、地球の磁場が乱れ、電力系統に深刻な影響を及ぼすリスクである。また、未曾有の自然災害リスクとは、想定外の大規模な自然災害が発生し、複数の電源や送配電系統等が同時に被災するようリスクである。さらに、電磁パルス障害リスクとは、核爆発や電磁パルス攻撃の際に広範囲で電子機器や電力インフラストラクチャーが機能不全に陥るようリスクである。このようなブラックスワン的な事象については、今回は考慮に加えない。ここでは、ある程度予見可能であり、かつ影響が大きいリスクに焦点を当てたい。

まず、「電力供給」に係るリスクとしては、主に、「化石燃料の供給減少リスク」「化石燃料の価格変動リスク」「地政学的リスク」「再生可能エネルギー電源の出力変動リスク」等が考えられる。化石燃料は発電の主要なエネルギー源であるが、供給国における生産減少や国際的な需要増加により、供給がひっ迫し、価格が急騰するリスクが存在する。また、日本のような化石燃料輸入国は、エネルギー資源の大部分を海外に依存しているため、供給国の政治的・政策的不安定や紛争、輸送ルートの遮断が直接的に電力供給に影響を与える可能性が高い。さらに、太陽光や風力発電は天候や季節に依存しており、これにより発電量が不安定になるリスクがある。この変動は需要と無関係に発生するため、電力供給全体に影響を及ぼす可能性がある。

次に、「電力需要」に係るリスクとしては、主に「電力需要の増加リスク」「電力需要施設の偏在化リスク」等が考えられる。社会の電化が進む中、電気自動車の普及やデータセンターの増設などにより、電力需要は増加する可能性が高い。この増加が供給力を上回ると、需給バランスが崩れ、電力不足が発生するリスクがある。特に、都市部や産業集積地域での急激な需要増加は、電力インフラに大きな負担をもたらす。また、特定の地域や特定の時期に需要が集中することで、電力需要施設が偏在化する可能性がある。例えば、夏季や冬季にはエアコンディショナーや暖房機器の使用が集中し、一部地域での需要ピークが極端に高まるこ

とがある。このような偏在化により、特定の地域や時期における電力供給がひっ迫し、全体の電力需給に影響を与えるリスクがある。

#### 電力安定供給に係るリスクへの対応

電力供給に係るリスクに対しては、火力燃料調達やベースロード電源の確保が重要である。短期的には天然ガス火力発電への依存が高まる可能性があり、燃料の安定的な調達が求められる。しかし、我が国は資源が限られていることから天然ガスの輸入依存度が高く、地政学的リスクや供給国の政治状況、輸送インフラの状況による燃料価格の変動や供給途絶のリスクが存在する。このため、需要施設が発電事業者と火力発電を対象とした長期電力購入契約(PPA)を締結する際には、長期的な燃料調達に関する内容をPPAに盛り込むことも一案である。また、燃料調達のリスクを緩和し、カーボンニュートラルを達成する観点から、長期的にはベースロード電源である水力や地熱、バイオマスといったベースロード利用が可能な再生可能エネルギー電源の開発を促進し、最近話題となっている小型モジュール炉(SMR)などの原子力発電の導入も検討することが重要である。加えて、再生可能エネルギー電源の出力変動リスクに対しては、蓄電池や揚水発電などのエネルギー貯蔵技術を導入し、出力変動を平準化する対策が必要である。

電力需要の増加リスクに対しては、電力需要の急増に対応するための供給力の確保が重要である。容量市場は一定の効果が期待されるが、これだけでは十分とは言えない。日本で導入されている長期脱炭素電源オークションのような電源の新設を促進する制度を導入し、また非常時に追加的な供給力を確保する観点から、休止中の電源を予備電源として維持する制度を設けることが必要である。さらに、緊急時や需給ひっ迫時に備え、需要施設がバックアップ電源を所有し、需要反応(DR)リソースとして自主的に活用するためのベストプラクティスを共有し、広く活用を促進することが重要である。また、需要施設が系統接続を行う際に、発電事業者との間で長期電力購入契約(PPA)を締結している場合、優先的に系統接続を許可する措置を検討し、安定した電力供給を確保する体制を構築することも考えられる。

電力需要施設の偏在化リスクに対しては、電力系統の最適化が必要である。需要施設を電源に近接した場所に立地する、または十分な送電容量が存在する場所に立地できるように、送配電事業者と需要施設が調整を進めることが重要である。例えば、送電事業者が送電容量等のデータを適宜公開し、需要施設の設置を推奨するウェルカムゾーンを明示することで、需要の偏在化を防ぐことができる。他方、送電容量が不足している地点への接続においては、系統増強コストを負担するような需要施設が優先的に接続を行う仕組みも考えられる。さらに、系統増強を避けるため、電源から直接電力供給を受ける共立地負荷(Co-located Load)

の促進や、送電容量拡大に向けたダイナミック・ライン・レーティング(気象条件等に応じて送電線容量を動的に最適化)の活用も重要である。

このように、現代社会において、電力安定供給は不可欠であり、デジタル化や電化の進展にともない、その重要性はますます高まっている。電気自動車やデータセンターの拡大により電力需要が増加する一方、再生可能エネルギー電源の導入も進んでいるが、自然変動型の再生可能エネルギー電源は発電出力が不安定である。そのため、火力発電や原子力、蓄電池など安定した電力供給を支える調整力のある電源が必要となる。電力供給のリスクとして、化石燃料の供給減少や輸入依存、再生可能エネルギー電源の出力変動が挙げられ、これに対処するためには、燃料調達の安定確保や地熱・原子力電源の導入が重要である。また、電力需要の急増や偏在化リスクに対応するため、電源の新設や予備電源の活用、系統最適化が求められる。これにより、需給バランスを保ちながら電力安定供給を維持することが可能となる。

表8-1 | 電力安定供給に係るリスクとその課題・対策

リスク	課題	対策
化石燃料の供給減少リスク 化石燃料の価格変動リスク 地政学的リスク	火力燃料調達やベースロード 電源の確保等	発電事業者と需要家との間の PPA締結時の長期燃料調達の 付記
再生可能エネルギー電源の出 力変動リスク		需要施設による原子力や地熱 等の安定電源の調達
電力需要の増加リスク	供給力の確保	電源新設の支援制度の導入 需要施設側でのバックアップ 発電設備の保有
電力需要施設の偏在化リスク	電力系統の最適化	需要施設の電源近接立地 需要施設へのウェルカムゾー ンの公表 送電線のダイナミック・ライ ン・レーティング

## 8.4 重要鉱物供給のリスク

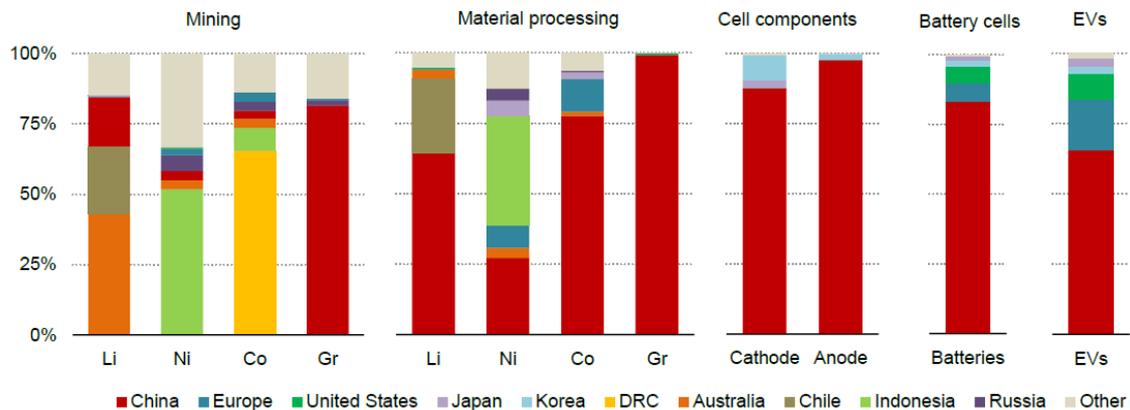
### クリーンエネルギーのリスク

脱炭素の基本戦略は、徹底的な省エネルギーを前提として、需要をなるべく電気に置き換え(電力化)、そのうえで再生可能エネルギーや原子力など脱炭素エネルギーで電力を供給する

ことである。こうした変化は同時に、日本の自給率向上をもたらす。石油危機以降、エネルギー安全保障は日本のエネルギー政策の根幹を成してきた。化石燃料の輸入依存低減は積年の悲願であり、脱炭素はエネルギー安全保障の強化という観点でも絶好の機会といえる。

一方で、近年は新たな安全保障問題が頻繁に議論されるようになってきている。クリーン技術とそれを製造するために必要な鉱物資源(重要鉱物)の地政学リスクである。一例として、図8-11電気自動車用蓄電池のサプライチェーンの国別シェアを示す。リチウムイオン電池の製造には、リチウムの他に正極材としてコバルトやニッケル、負極材としてグラファイトが用いられることが多い。鉱物生産国(Mining)の状況を見ると、オーストラリアやインドネシア、コンゴ民主共和国(DRC)、中国のシェアがおよそ半分かそれ以上あることが分かる。ちなみに原油生産では、世界最大の原油生産国米国でも約20%、それに次ぐサウジアラビアやロシアは約10%でしかない。これと比較すると、蓄電池に必要な鉱物資源の生産国が大きく偏っていることが良く分かるだろう。生産国の集中度がさらに高いのが鉱物の精製や半製品を製造する段階(Material processing)である。特にリチウム、コバルト、グラファイトでは中国のシェアがさらに大きくなっている。精製した鉱物を使って製造する正極(Cathode)や負極(Anode)、蓄電池のセル(Battery cells)ではさらに集中が進み、世界の製造能力の90%前後が中国にある。

図8-11 | 電気自動車用蓄電池サプライチェーンの国別シェア



注: Li = lithium, Ni = nickel, Co = cobalt, Gr = graphite, DRC = Democratic Republic of the Congo

出所: IEA (2024) "Global Critical Minerals Outlook 2024"

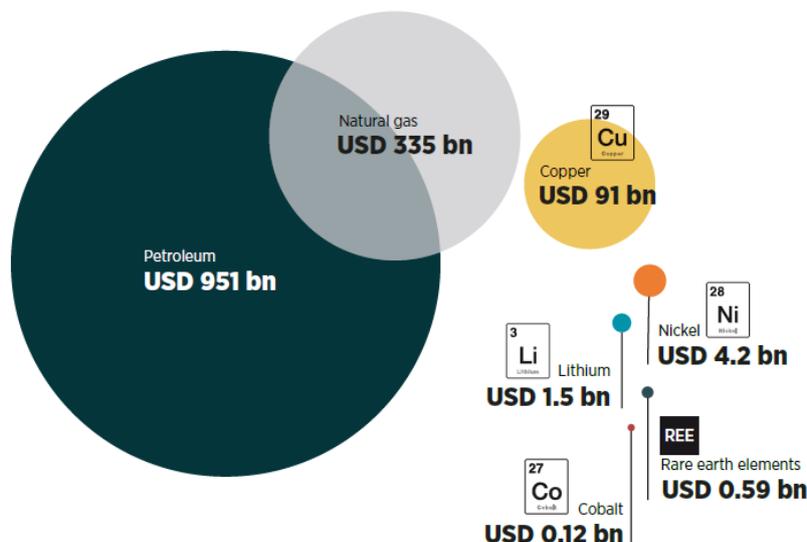
蓄電池のみならず、太陽光発電や風力発電に関連する製造能力も、巨大な国内市場と高い価格競争力を背景として中国がそれぞれおよそ80%と60%を持つ(IEA, 2023)。すなわち、太陽光発電、風力発電、蓄電池、電気自動車に頼った脱炭素化は、特定の国への依存の高まりを意味するのである。輸入相手国の集中がリスクとなることは歴史が証明している。例えば重要鉱物を巡っては、日本は中国との間で苦い経験がある。2011年に尖閣諸島を巡る騒動を契機に、中国は日本向けのレアアース輸出を停止したのである。当時日本はレアアース供給の

およそ80%を中国に頼っていたため、これを必要とする産業では大きな混乱が起きた。また近年は、鉱物資源の重要性を認識した資源国は国家による資源の管理を強化する傾向にある。そして、ひとたび紛争が起これば資源を持つ国はそれを武器として利用する可能性のあることは、石油危機のみならずロシア-ウクライナ戦争からも明らかである。現在のところは幸いにも供給支障に至るような事態は生じていないものの、その危険性があること、そして発生した場合は大きな影響が生じる得ることは認識しておかなければならない。

### 重要鉱物安定供給の課題

こうしたリスクの存在を前に、日本を含む諸国では重要鉱物サプライチェーンの多角化を目指している。鉱物の生産や精製、部品製造の拠点を自国で、それが困難な場合には既存の供給国とは異なる国で構築しようとするものである。しかしサプライチェーンの多角化は容易でない。困難の背景にある第一の要因として、市場の未熟さを挙げることができる。重要鉱物の市場規模はエネルギーのそれと比較して非常に小さい(図8-12)。取引への参加者や取引量が少ないことから取引の機会そのものが少ないことに加え、需給の不一致やそれにとまなう価格の変動が起りやすい環境にある。

図8-12 | 代表的な資源の輸出額[2021年]



Source: (UN COMTRADE database).

Note: Numbers represent trade in raw, unprocessed fuels and ores only.

出所: IRENA (2023) "Geopolitics of energy transition, Critical Minerals"

第二に、先進諸国の開発意欲が急速かつ同時に高まったことで、資源の奪い合いが起りやすい状態になっている。このことが、需給や価格の不安定さを増す要因となる。

第三に、特に精製過程におけるエネルギー多消費と高い環境負荷である。精製では熱や酸による鉱石の熔融や分解、電解による抽出を行うことで必要な鉱物を取り出すが、この過程で

大量のエネルギーを消費する。また、有害物質を含む残渣が発生するため、その処理を誤ると容易に環境破壊や健康被害を起こす。エネルギー多消費であることと高度な環境対策を要することが、特に先進国で鉱物精製を行ううえで大きな経済的障壁となる。

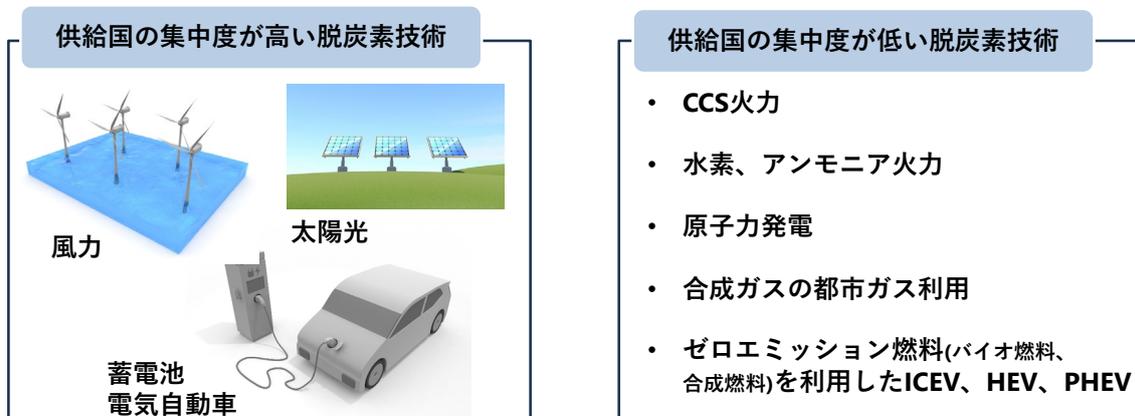
第四に、クリーン技術の将来見通しの不確実性と資源開発の長いリードタイムである。例えば蓄電池の正極材では、ここ5年程度でも材料が大きく変化しており、コバルトやニッケルを使わないものも普及しつつある。さまざまな技術開発が進行中であり、例えば10年程度の時間軸であっても重要鉱物の定義そのものを変えかねない。これに対して鉱物資源の開発には10年か場合によってはそれ以上の長いリードタイムを要し、このことが民間企業による投資決定を難しくしている。

こうした課題を乗り越えて安定供給を実現するには、長期にわたる政策の一貫性と、需要と供給が歩調を合わせて開発を進めることが必要である。長期的な戦略のもとで、売主と買主が双方にコミットしあうことで投資リスクを軽減するのである。

#### リスクを踏まえた技術のミックス

技術のミックスによっても、クリーン技術のリスクを緩和することができる。太陽光や風力、蓄電池、電気自動車は特定の国への依存が高い一方、ボイラーやガスタービン、内燃機関、原子力技術は供給国が相対的に分散しており、むしろ日本企業が高い国際競争力を持っている例も多い。ボイラーやガスタービン、内燃機関は、水素やアンモニア、各種合成燃料・ガス、バイオマスを燃料にすることで脱炭素利用が可能である。また、火力発電や産業用の大型燃焼設備であれば二酸化炭素回収(CCS)を備えることでクリーンに利用することができる。このように、クリーン技術には供給国の集中度が小さいものもあり、これを適切に組み合わせることによって、エネルギーシステム全体として技術供給国寡占のリスクを緩和することができる(図8-13)。

図8-13 | 技術によって異なる供給国の集中度



注: ICEV = internal combustion engine vehicle, HEV = hybrid vehicle, PHEV = plug-in hybrid vehicle

## 8.5 エネルギー転換にともなうサイバー攻撃リスクの増大

エネルギー供給関連施設に対するサイバー攻撃も新たなエネルギー安全保障上のリスクの1つとなっている。エネルギー関連施設に対するサイバー攻撃はこれまでも行われており、実際のエネルギー供給が途絶した事象も起きている。今後エネルギー転換にともなう電化やデジタル化が進んでゆくことによって、エネルギー供給におけるサイバー攻撃の潜在的なリスク要因としての重大性が高まってゆくことが予想される。さらに、サイバー攻撃と地政学リスクとの関りも見逃せず、エネルギー供給への脅威という形での武器化の可能性にも留意する必要がある。本項では、そうしたエネルギー転換とサイバー攻撃との関係や、今後の想定されるサイバー攻撃のパターンについて述べる。

### サイバー攻撃とは

サイバー攻撃とは、一般に外部からのアクセスによってデジタル上の情報や情報システムの秘匿性および利用可能性が損なわれる事象を指し、サイバーセキュリティとは、情報ネットワークやインフラの利用可能性や情報の秘匿性を担保することで、サイバー攻撃を回避したり防御したりする能力を指す<sup>65</sup>。サイバー攻撃は、その実施主体や目的、攻撃対象の範囲が即座には分からないという特徴を持つ。仮に自身の資産がサイバー攻撃の対象になっていることが判明したとしても、攻撃を受ける側からすると、誰が何の目的をもって攻撃を行っているのかが分からないケースが多い。また自社のネットワークへの侵入があったとしても、それがいつ起きたのかも分からず、知らないうちに攻撃の対象が拡大していたというケースも存在する。特に、サイバー攻撃は、いつどのような形で何に対して攻撃を受けるのかを事前に知ることは非常に難しく、サイバー攻撃を完全に防御することはほぼ不可能であるといわれる所以である。

サイバー攻撃には、大きく分けて、ランサムウェアなどを介して、攻撃対象から個人情報などのデータを入手したり、攻撃対象のシステムの稼働を停止させたりすることで、相手から「身代金」を取得することを目的としたものと、攻撃対象の経済活動そのものに損害を及ぼしたり経済活動を停止させたりすることを目的としたものとに分けられる。前者は、主に企業を対象に行われるものであり、日本でも最近は大手メディア企業がその被害にあったことが大きな話題となった。エネルギー安全保障という観点では、そうした「身代金」型の攻撃というよりは、むしろ後者の攻撃対象の経済活動を阻害することを目的として行われる攻撃の方がより重要のように見えるかもしれない。しかし後述するとおり、ランサムウェア攻

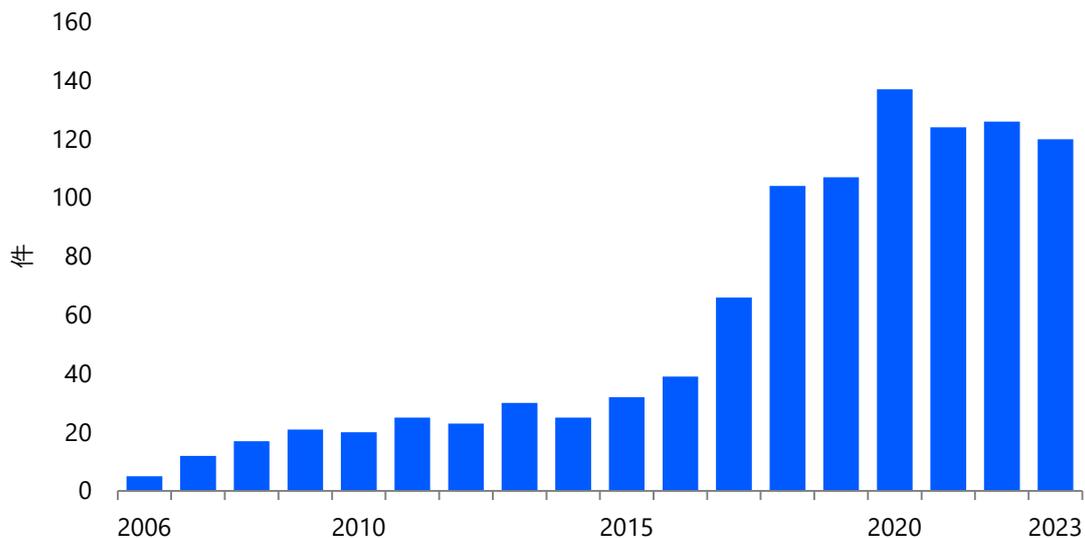
<sup>65</sup> International Energy Agency. (2021). *Enhancing Cyber Resilience in Electricity Systems*. p. 8.

撃を受けたことに対し予防措置的にエネルギー供給インフラの稼働を停止する可能性もあるため、双方のタイプの攻撃ともエネルギー安全保障上の脅威になりうる。

### エネルギー供給施設に対するサイバー攻撃

エネルギー関連資産に対するサイバー攻撃のリスク自体は、すでに述べたとおり、必ずしも新しいリスクではない。しかし2010年代の後半以降、重大なサイバー攻撃の事象が大きく増加し(図8-14)、事例も多く報告されるようになってきている。例えば、2022年4月には、ドイツの風力発電事業者数社がサイバー攻撃を受け、発電施設に対する遠隔操作機能を喪失するという事態が発生している。2022年8月には、イタリアのエネルギー企業(GSE)がサイバー攻撃を受け、社内システムへのアクセスがブロックされ、同社ホームページへのアクセスが1週間停止された。また2024年3月には、インドの政府とエネルギー企業がインド空軍からのメールを模したマルウェアによる攻撃を受けている。エネルギー供給施設への攻撃は、もし成功すればそのもたらす影響が大きいため、サイバー攻撃をしかける側としては、非常に「効率的」であり「価値の高い」攻撃対象とみなされている。

図8-14 | 世界の重大サイバー攻撃事象数



注: 重大なサイバー攻撃事象とは、政府、防衛、ハイテク部門を対象としているか被害額が100万ドルを超える攻撃を指す。

出所: International Energy Agency. (2021). "Cyber Resilience." Center for Strategic and International Studies. (2024)."Significant Cyber Incidents." を元に作成

エネルギー供給施設を対象としたサイバー攻撃の中でもよく知られている最近の事例が、2021年に発生した米国のパイプライン会社であるColonial Pipeline社に対するサイバー攻撃である。同社は、米国のメキシコ湾岸から北東部まで石油製品を輸送するパイプラインを操業しており、その輸送能力は250万バレル/日と非常に大きく、米国東海岸の石油製品需要

の45%に相当する規模を有している。サイバー攻撃は2021年5月7日に、同社のネットワークに侵入した「Darkside」と呼ばれるランサムウェアによって100 GB近いデータが暗号化されたことを受け、同社は被害の特定とさらなる被害の拡大を予防するために自発的にパイプラインの稼働をすべて停止した<sup>66</sup>。この攻撃によって、石油製品の販売ルートが絶たれたメキシコ湾岸の製油所も一部稼働停止を余儀なくされた。その後、パイプラインは5月12日から15日にかけて順次復旧されたものの、局所的には燃料不足に陥るガソリンスタンドが多く出た地域もあり、首都ワシントンDCでは、7割のガソリンスタンドが一時燃料不足に陥った<sup>67</sup>（なお末端の製品価格への影響は、主要製品であるガソリン需要がさほど大きくないシーズンであったこと、比較的早期にパイプラインの操業が再開されたこともあり、限られたものであった<sup>68</sup>）。

もう1つの有名な事例が、2015年に行われたウクライナの電力網に対するサイバー攻撃である。2015年12月23日、ウクライナ西部における配電事業者3社がほぼ同時間帯に大量アクセスによる攻撃を受け、変電所の操業が停止に追い込まれた。これによって、ウクライナ国内22万5,000人に対する電力供給が最大6時間にわたって喪失した。年末の寒冷期におけるサイバー攻撃であったこと、またクリスマス休暇の直前に攻撃が行われたこともあり、ウクライナ市民の生活に非常に大きな影響を及ぼした。なお、ウクライナにおいては、この攻撃だけではなく、2014年のロシアによるクリミア併合以来、ロシアによるものとされるさまざまな種類のサイバー攻撃が断続的になされており、その状況は今日まで続いている<sup>69</sup>。2017年6月には、NotPetyaと呼ばれるマルウェアによってチェルブイリ原子力発電所が攻撃を受け、同発電所や公的機関などのコンピューター13,000基のファイルが破壊され、復旧ができ

---

<sup>66</sup> 実際の攻撃を受けたのは同社の支払請求システムでありパイプラインの操業システムではなかったが、同社は攻撃対象を特定するために予防的にパイプラインの稼働を停止した。

<sup>67</sup> Kevin Schaul, Tim Meko and Dylan Moriarty. (2021). “Map of dry gas stations impacted by cyberattack,” *The Washington Post*. [https://www.washingtonpost.com/business/interactive/2021/map-gas-shortages/?itid=lb\\_colonial-pipeline-hack-what-you-need-to-know\\_8](https://www.washingtonpost.com/business/interactive/2021/map-gas-shortages/?itid=lb_colonial-pipeline-hack-what-you-need-to-know_8). (2024年9月21日アクセス)

<sup>68</sup> 米国東海岸地域(PADD-I)における域内ガソリン価格の平均値は2021年3月3日から同17日にかけて、1ガロン当たり2.86ドルから\$3.02/galへ\$0.16/gal (約6%)の上昇にとどまった。The United States Energy Information Administration. (2024). “Weekly Retail Gasoline and Diesel Prices.” [https://www.eia.gov/dnav/pet/pet\\_pri\\_gnd\\_dcus\\_r10\\_w.htm](https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_gnd_dcus_r10_w.htm) (2024年9月21日アクセス)

<sup>69</sup> Stéphane Duguin and Pavlina Pavlova. (2023). “The role of cyber in the Russian war against Ukraine: Its impact and the consequences for the future of armed conflict.” European Parliament’s Subcommittee on Security and Defence (SEDE). [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/702594/EXPO\\_BRI\(2023\)702594\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/702594/EXPO_BRI(2023)702594_EN.pdf) (2024年9月26日アクセス)

ない状態となった<sup>70</sup>。また、2022年2月24日のロシアによるウクライナ侵攻が始まる1時間前には、ウクライナにおける衛星通信網に対するサイバー攻撃が行われており、軍事的なオペレーションを手助けする目的で、実際の軍事作戦と連動したサイバー攻撃も行われるようになってきている<sup>71</sup>。エネルギー転換にともなうサイバー攻撃リスクの増大

こうしたサイバー攻撃を受けるリスクは、エネルギー転換の進展とともにエネルギーの供給・貯蔵・利用の各部門においてさらに高まってゆく<sup>72</sup>。まず、エネルギーの供給部門においては、エネルギー転換が進むとともに、これまでのような独占的なエネルギー供給事業者が集中的にエネルギー供給を行う体制から、より多様な事業者がエネルギー供給事業に参入する体制へと移行してゆくことが予想される。その結果、サイバー攻撃を受けるおそれのある事業者の数が増えてゆくこととなり、エネルギー供給事業をサイバー攻撃から防御することがより難しくなる。

また、エネルギー供給部門において、施設の操業管理を行うシステムの情報技術 (Information Technologies: IT) 化が進むこともサイバー攻撃のリスクを高めることになる。今後導入される再生可能エネルギーなどの発電施設においては、監視制御・データ収集 (Surveillance Control and Data Aggregation: SCADA) システムと呼ばれるシステムが導入され、インターネットによるネットワークを介して大量のデータを集約し、全体の操業を管理するシステムが採用されてゆく可能性が高い。これは、こうしたシステムを活用することで、例えば変動性の高い再生可能エネルギーによる電力供給を安定的に行うために、天気予報の情報や需要サイドの情報も踏まえながら発電所の操業を最適化してゆくことが可能となるためである。このような従来の操業管理系の技術 (Operational Technologies: OT) が IT

---

<sup>70</sup> European Parliamentary Research Services. (2022). “Briefing: Russia’s war on Ukraine: Timeline of cyber-attacks.”

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/733549/EPRS\\_BRI\(2022\)733549\\_EN.pdf#:~:text=Ukraine%20has%20been%20a%20permanent%20target%20of%20Russian%20cyber-attacks%20since](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/733549/EPRS_BRI(2022)733549_EN.pdf#:~:text=Ukraine%20has%20been%20a%20permanent%20target%20of%20Russian%20cyber-attacks%20since) (2024年9月21日アクセス)

<sup>71</sup> Council of the European Union. (2022). “Russian cyber operations against Ukraine: Declaration by the High Representative on behalf of the European Union.”

<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/05/10/russian-cyber-operations-against-ukraine-declaration-by-the-high-representative-on-behalf-of-the-european-union/#:~:text=The%20EU%20issued%20a%20declaration%20strongly%20condemning%20the%20malicious%20cyber> (2024年9月21日アクセス)

<sup>72</sup> 本項目の記載は次のレポートを参照した。Sneha Dawda, Chamin Herath and Jamie MacColl. (2022). *Securing a Net-Zero Future: Cyber Risks to the Energy Transition*. <https://static.rusi.org/305-EI-Cyber-Risks.pdf> (2024年9月21日アクセス)

と融合することで、運転の効率化や最適化をさらに進めることができるようになる。しかしその一方で、こうしたシステムは、そのシステムの特長上、数多くのパーソナルコンピューター(PC)や計器などとのネットワーク接続に基づいて運用されるため、サイバー攻撃に対する脆弱性を高めるといった側面を持つ。特に今後は、SCADAシステムの下で、運転の自動化技術の導入も進むと見られていることから、仮に何らかのサイバー攻撃を受けた場合、操業面での影響に対する制御がより難しくなっていくおそれがある。またこのようなシステムの運用においては、大量のデータが収集されることになるが、そのデータをオンライン上のクラウドサービスを用いて管理することになれば、そのクラウドへのネットワーク接続もサイバー攻撃の対象となる可能性がある。

エネルギーの貯蔵部門においても、電化と再生可能エネルギーの導入が進むにつれて蓄電池の利用が増えていくことが予想されるが、このこともサイバー攻撃のリスクを高める要因となる。エネルギー供給部門におけるSCADAシステムと同様、今後、蓄電池の充電や放電のオペレーションをリモートで管理するシステム(Battery Management System: BMS)の導入が進むことが予想される。そうした管理システムに対して外部からの侵入を許すことになれば、悪意を持って充放電を操ることができるようになり、安定的な電力供給への支障が生じるおそれが出てくる。

さらに、エネルギー利用部門においても同様のリスクが指摘できる。輸送部門においては、今後バッテリー電気自動車(EV)が普及していくことが確実視されているが、その普及はそのままサイバー攻撃の攻撃ポイントを増やす要因になりかねない。今後、路上を走るEVの多くはネットワークで相互に接続され、多様なサービスを車の中で受けられるようになることが期待されている。そうしたサービスは、人々の移動のあり方を大きく変え、利用者の効用を高める一方で、外部とのインターネット接続の下で実現するサービスでもあり、サイバー攻撃のリスクは増大する。また、ひとたびEV内のシステムへ侵入されると、EVを家庭の電力供給システムに接続して利用している場合には、家庭内のシステムにもそのサイバー攻撃の影響が及ぶ懸念もある。

エネルギーの利用部門においては、スマート住居や建物のモノのインターネット(IoT)化も同様に、サイバー攻撃のポイントを増やす結果となる。今後はエネルギーの効率的な利用を追求するために、住居内の電力使用や温度管理などの多様なデータの収集とエネルギー利用機器の制御を行うシステムが導入された建物が増えていくと見られているが、そうした建物におけるエネルギー管理も、上述のさまざまなシステムと同様に、ネットワークへの接続を前提としたものになると考えられるため、新たなサイバー攻撃の対象となる可能性がある。さらに、家庭部門や業務部門においては、すでに多くの国において普及が進んでいるス

スマートメーターについても、外部との通信機能を有していることから、サイバー攻撃の対象となる可能性がある<sup>73</sup>。

### 想定されるサイバー攻撃のパターン

サイバー攻撃のパターンは多様であり、特定のシナリオを想定することは必ずしも容易ではない。しかし、過去発生したサイバー攻撃の事例を見ると、その攻撃の経路や手法、形態などについては、いくつかの代表的なパターンがあることが分かる。ここでは想定されるサイバー攻撃シナリオとして、そうした代表的なパターンを紹介する

#### パターン① マルウェアを介した遠隔操作

まずマルウェアを介した外部からの遠隔操作が挙げられる。マルウェア(malware)とは、malicious software (悪意を持ったソフトウェア)の略称であり、コンピューターやネットワークに損害を与えることを目的として作られたソフトウェアを指す。この攻撃パターンでは、まず攻撃者が何らかの方法において攻撃対象に対する外部からのアクセスを確立する。一般的に用いられるそうしたアクセスの確立方法は、攻撃対象の従業員などに対し関係者を装ったフィッシングメールを送付し、そのメールを受信した関係者がメールに添付されている特定のファイルを開けることで、攻撃対象のコンピューターを介してネットワークに入りこむというものである。その他には、攻撃対象内に侵入した関係者が、ユニバーサル・シリアル・バス(USB)メモリなどを介して攻撃対象のネットワークにウィルスを持ち込む、というパターンもある。さらには、攻撃対象に納入される機器の中にあらかじめ誤作動を起こすような装置やウィルスを埋め込んでおき、特定の時間が経過した後に時限的に作動させる、という方法もある。そうした方法を用いてアクセス経路を確保した後で、外部からの遠隔操作を行うことで、発電所の施設における計器の誤作動を誘引させたり、攻撃対象の資産の操業を停止させたり、といった攻撃を行う。具体的な事例としては、すでに述べた2015年にウクライナの発電事業者が受けた攻撃や、2022年にドイツの風力発電事業者が受けた攻撃などが挙げられる。なお、こうした攻撃は多様な主体によって行われるが、その目的から、国家主体が関与するサイバー攻撃主体によって行われることが多いとの見方もある。

#### パターン② マルウェアによるシステム機能不全

もう1つの攻撃パターンとしては、同じくマルウェアによって攻撃対象のシステムの機能不全を引き起こすというものが考えられる。これは、マルウェアを対象内部のシステムに送り込むところまでは遠隔操作のパターンと一緒にあるが、その後は単純にそのマルウェアを介

<sup>73</sup> マルク・エルスベルグ(猪股和夫、竹之内悦子 訳)『ブラックアウト』(2012年、角川書店)は、あくまでフィクションではあるが、電力供給ネットワークにおける上流(発電)と下流(メーター)への同時攻撃が行われた場合に起こりうる甚大な被害を描いた小説である。

して相手のシステムの機能を停止させるというものである。このパターンによる攻撃の具体的な事例としては、2022年のイタリアエネルギー庁への攻撃などがある。この事例では社内システムへのアクセスが不可能となり、同庁のホームページが1週間にわたりアクセスができないという事態に陥った。具体的な攻撃主体としては、多様な主体が考えられるが、パターン①と同様、国家主体が関与する組織によって行われることが多いとする見方もある。

#### パターン③ ランサムウェアによるデータ暗号化

三つ目の攻撃パターンとしては、いわゆるランサム(身代金)型といわれるものであり、攻撃側が対象側のシステム内に侵入し、そのシステム内のデータを暗号化させることで、攻撃対象に対し暗号解除と引き換えに身代金を要求するというものである。金銭を要求するのが主な目的であるため、必ずしもエネルギー関連施設の操業そのものに直接的に影響を及ぼすことを意図していない場合があるが、攻撃を受けた側がデータの漏洩を防ぐためにそのシステムの運用を自発的に停止したりする場合には、結果的にその攻撃を受けた事業者によるエネルギー供給に支障が生じることとなる。具体的な事例としては、上述の2020年に実施された米国の石油製品パイプライン会社であるColonial Pipeline社への攻撃がこのパターンに該当する。こうした攻撃を行う主体としては、営利目的の民間のサイバー攻撃集団であることが多い。

#### パターン④ DDoSによるシステムダウン

最後に、上記の3つのパターンは、攻撃対象内部のシステムへの侵入を行うことが前提となっているが、それ以外にもサイバー攻撃を仕掛けることは可能である。その1つが、攻撃対象に対し同時に大量にアクセスすることで、事業者のシステムの機能不全を狙うものである。これは、事業者に対する大量のアクセスを行うことでのシステムの稼働を停止に追い込むパターンもある。このような攻撃は、分散型サービス拒否攻撃(Distributed Denial of Service Attack: DDoS攻撃)と呼ばれ、2022年にリトアニアのエネルギー企業に対してこの攻撃が実施された事例がある。この攻撃は多様な主体によって行われるが、パターン①と②のように国家主体が関与して行われることもあると見られている。

これら4つの攻撃パターンはあくまでこれまで実際にエネルギー供給関連資産に対して行われたものであり、今後新たな攻撃パターンが生まれる可能性もある。また、ウクライナなどにおける状況を鑑みると、今後はサイバー攻撃と地政学的リスクとの関わりも見逃せず、サイバー攻撃が国家間の対立における一種の武器として用いられるケースも増えてくるおそれがある。この先、エネルギー関連資産に対するサイバー攻撃が増加してゆくことはほぼ確実と考えられるため、海外の事例も含めてその最新情勢をフォローしてゆく必要がある。

## サイバー攻撃への対応策

多様なパターンが存在し、その目的や攻撃の対象範囲が即座には分からないサイバー攻撃に対し、完全な防御体制を敷くことは難しい。しかし、仮に攻撃を受けた場合には、その攻撃によるダメージを可能な限り抑制し、できるだけ早期の復旧を図るためにも、下記に述べるような対応策をとる必要がある<sup>74</sup>。

サイバー攻撃への対応は、政府と企業が各々で対応すべきことを進めつつ、相互に連携を取り合いながら進めてゆかなければならない。まず、政府がとるべき対応策としては、制度面の整備が挙げられる。政府省庁、公的機関、民間企業など各主体が果たすべき責任の範囲を明確化し、対応が遅れている主体に対しては、その対応を促すような政策や制度を整える必要がある。また、各関係者が組織の枠を超えて、情報交換を始めとする協力を行えるような枠組みや「場」を提供するのも政府が果たすべき役割の1つであろう。さらに、リスク管理という観点では、自らの情報システムにおけるリスク特定とその管理を行うことはもちろんのこと、民間企業に対し、自社のサプライチェーンにおける脆弱性がどこにあるのか、具体的なサイバー攻撃のリスクとしてはどのようなものが考えられるのかといったリスクの洗い出しを行うことを促し、そうした洗い出しによって特定されたリスクに対し、恒常的にモニタリングを行うことを働きかけるのも政府の重要な役割である。その他には、国家情報部門(インテリジェンス部門)とも連携し、サイバー攻撃に関する情報収集やその対策を進めてゆくことも政府でなければできない対応策である。さらには、何らかのサイバー攻撃を受けることをあらかじめ想定し、公的サービスの提供への影響を最小化するための復旧計画やその手順を整理し、定期的な訓練を行っておくことも必要である。

一方、企業による対応策については、まず自社の事業やサプライチェーンにおけるリスクの洗い出しとその重要性の評価、自社の保有する資産の中でサイバー攻撃を受けうる資産の特定と仮に攻撃を受けた場合の影響度の評価を随時行っておく必要がある。また、いったん特定されたリスクや資産に対しては、その影響を最小化するためのリスク管理の手順や、実際に攻撃を受けた際の対応策に対する優先順位付けを始めとする対応手段について整理しておく必要がある。さらに、リスクの洗い出しの中で特定されたリスクや高い脆弱性を有する資産に対しては、恒常的にモニタリングを続ける必要があり、また実際に攻撃を受けた際に

---

<sup>74</sup> 本項目における記載は以下の資料を参照した。Ecofys. (2018). *Study on the Evaluation of Risks of Cyber-Incidents and on Costs of Preventing Cyber-Incidents in the Energy Sector*; IEA. (2021). *Enhancing Cyber Resilience in Electricity Systems*; World Energy Council (2022). *Cyber Challenges to the Energy Transition*; 経済産業省・独立行政法人情報処理推進機構(IPA) (2022)『サイバーセキュリティ体制構築・人材確保の手引き 第2版』

早期の復旧が可能となるような復旧計画の作成やそれに基づいた定期的な訓練を行っておくことも重要である。

この他、官民の連携の下で進めるべき対応策もある。まず挙げられるのが、サイバーセキュリティに関する認知度の向上である。上述のとおり、これまでエネルギー関連資産に対して行われたサイバー攻撃は、攻撃対象における関係者に対するマルウェアの送付によって引き起こされるケースが多い。マルウェアの送付形態についても、例えば政府組織に対する攻撃であれば、ほかの組織からのメールを模したものとなっているなど、年々巧妙になってきている。特に社会に対し重要な役割を果たすエネルギー供給に関連する組織においてはサイバーセキュリティに対する認知度や危機感を常に高めておく必要がある。また、サイバー攻撃を効果的に予防するために重要なのが情報の共有である。サイバー攻撃については、実際に受けた事業者が情報を開示しないケースもあると見られ、その情報の共有は必ずしも十分に行われているとはいえない。そうした情報には、第三者に共有できない内容が含まれていることがあるのがその理由であるが、可能な限り、サイバー攻撃に関する情報を官民で共有しておくことでその備えを強化することができる。サイバー攻撃に対する強靱性(レジリエンス)確保のための手法の開発も、官民が力を合わせることでさらに効果的にできるようになるし、各組織のサイバーセキュリティ担当者の能力開発も、それぞれが独自に行うよりは、官民が連携して実施することでより有効な対応策が可能となる。その中では、上述した情報の共有とも関連するが、過去の攻撃事例を広く共有し、その攻撃への対処から得られた教訓に基づいた学習や対応策の検討も、官民が力を合わせて実施すべき対応策の1つだろう。