

シェルの「2025エネルギーセキュリティシナリオ:エネルギーとAI」

概要

2025年2月、シェルはグローバルエネルギーシナリオ最新版「2025 エネルギーセキュリティシナリオ:エネルギーとAI」を発表した。本シナリオ作品では、前作「2023 エネルギーセキュリティシナリオ」で示された探索的シナリオ「Archipelagos」と規範的シナリオ「Sky 2050」（今作ではHorizonと変名）を継承しつつ、「AI技術の進展は、世界のエネルギーシステムにどのような意味を持つか？」という問いに答えるべく、第3の探索的シナリオ「Surge」が追加された。

「Surge」シナリオでは、AI技術の進展により生産性が向上、結果世界経済は他の2つのシナリオよりも高成長を遂げ、世界のエネルギー需要が増大する。エネルギー需要を満たすためには当初化石燃料が使用されるが、AI活用のため大量のクリーン電力を必要とするテック企業たちがエネルギー生産者側として参入し、再エネ、そして原子力ビジネスを拡大させてゆく。

1. はじめに

1.1 本稿の趣旨

本稿は、シェルの『2025エネルギーセキュリティシナリオ（英：The 2025 Energy Security Scenarios、以下「ESS2025」と表記）』の解説を試みる。

本稿は、英語で書かれた原文を目次どおりに正確に逐語訳をしたものではない。正確性を求める読者は原文を当たりたい^[1]。

筆者はシェルのシナリオ作品の意図を尊重しながらも、あくまで、この作品を読み込んだ筆者側の個人的解釈を含めて紹介する。日本語で語る所以需要あれば意識し、言葉を足した。行論のロジックをはっきりさせたいので恣意的に割愛した部分もある。

筆者2名は共に、かつてシェル本社のシナリオチームでシナリオプランナーとして働いた経験があり、シナリオプランニングの思想や技法を習得している。また、現在もクライアントと協働してシナリオプランニング関連業務に従事しているので、実践者の観点から「ESS2025」を考えることができる。読者諸兄、我々の経験とプロフェッショナルリズムをご信頼いただき、読み進められたい。

1.2 シナリオプランニングとは

シナリオプランニングとは、将来は予測不可能という前提に立って、複数の等しく起こり得る将来展開（シナリオ）を作成し、戦略への示唆を得る未来洞察手法である。シェルは長年専属のシナリオチームを置いてシナリオを実践してきたことで知られる。目的は、組織の意思決定者のマインドセットを上げ、より良いビジネス上の意思決定を助けること。

シナリオスタディはカスタマーの利用目的に沿ってデザインされる。ここではいくつかの類型的な「アプローチ」が開発されている。

大きく2つのアプローチの区分がある。

第1は「規範的アプローチ」と「探索的アプローチ」の区分。規範的アプローチとはシナリオ作品の中にカスタマーにとって望ましい未来社会を明示して書く。探索的アプローチではそうした願望は脇に置き、世の中の多様な変化を、そのままストーリーとして書いてゆく。

第2に「演繹的アプローチ」と「帰納的アプローチ」の区分。演繹的アプローチでは現状分析作業を軽めにして、一挙に遠くの未来に飛ぶ。未来世界の有り様を描きたい

のだが、未来の“現実”を示すデータなど手に入らないので、さまざまな仮定を置いて –もし仮に、将来こういう条件が現れたら社会はこう変化するだろう、もしこの条件がないとどうなるか？ – 統合的な議論を積み重ねてストーリーを書く。すなわち演繹的な思考実験が行われる。

これに対して帰納的アプローチでは、今後、現在から未来に向けて起こりそうなことを時間軸に沿って順を追って書く。そうしてゆくうちに、未来に出現する重大な不確実性、すなわちシナリオの分岐点が見えてくる。分岐点以降は未来の有様が複数想定できてしまうので、別々のストーリーを書き進む。

以上のアプローチの違いから、図1のように4象限の組み合わせが成立する。

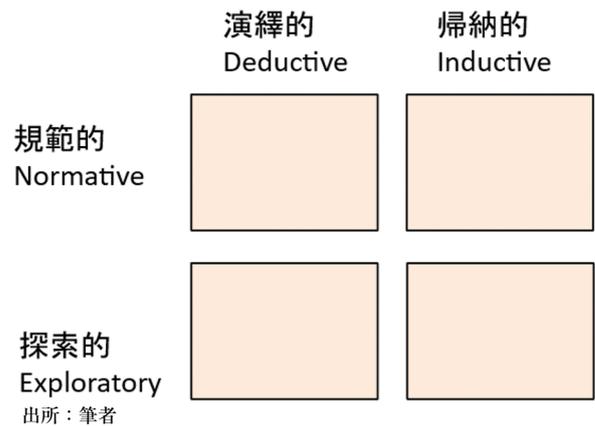


図1 シナリオプランニングの型式（簡単な分類）

2. ESS2025のフレームワーク

「ESS2025」は、『Energy and artificial intelligence』という副題の示唆するとおり、エネルギーセキュリティ問題と将来のAI技術の進展がエネルギーシステムに与える影響について書かれたシナリオ作品である。

この最新シナリオ作品は、2023年3月に発表された『The Energy Security Scenarios』（以下、「ESS2023」

と略称)の改訂版である^[2]。

2.1 ESS2025シナリオの流れ

まずこのシナリオ作品の全体の流れを掴んでいただくため、目次を抄録する。原文に当られる際の参考としていただきたい。

表1 ESS2025 目次

原文（英語）	Page	日本語の意訳
The rise of artificial intelligence	3	AI技術の勃興
Key observations	5	AI技術は今、何を变えようとしているのか？（現状分析）
New directions in the 21st century	7	21世紀に現れた新しい潮流（現状分析）
A mixed global picture	7	多様なシグナル（現状分析）
Technology trends	8	技術とテック企業（現状分析）
National response archetypes	10	エネルギー危機への各国政府の対応の類型化（現状分析）
Three security scenarios	12	3つのシナリオ
Artificial intelligence and economic growth	13	AI技術と経済成長
Three security scenarios: Surge	16	Surgeシナリオ
Three security scenarios: Archipelagos	19	Archipelagosシナリオ
Three security scenarios: Horizon	20	Horizonシナリオ
Changes to the energy system	21	エネルギーシステムの未来変化
Energy demand	23	世界のエネルギー需要
Fuel oil demand	25	世界の液体燃料需要
The future for natural gas	26	天然ガスの未来
LNG in three scenarios	27	3つのシナリオで語るLNGの未来
Low-carbon fuels	28	低炭素液体燃料

The rise of renewables	33	再生可能エネルギー
Electrification in final energy	34	電化が進む最終エネルギー需要
A nuclear renaissance?	35	原発ルネッサンス？
Carbon management and emissions	37	CO ₂ 排出問題
Land-use change	43	気候変動と土地利用変化の課題
Policy, the emissions gap and temperature	45	政策、CO ₂ 排出抑制、地表大気温度
Meeting the Paris goal	47	パリ目標の達成
Final thoughts	49	ESS2025 を振り返る
Technology timelines in the 2025 Energy Security Scenarios	50	ESS2025 に取り込んだ 未来の技術開発・普及年表
References and acknowledgements	51	
Legal disclaimer	56	

出所：ESS2025

特筆すべきは、ESS2025はESS2023と比べると、ボリュームが半減していることだ。前回ESS2023では123ページを費やしたが、今回は53ページとなった。

半減の理由は2点。第1に、ESS2025がESS2023の社会経済分析の内容をおおいに引き継ぎ、その分、説明を簡単にしているからだ。第2に前作ESS2023では、公共セクターに向けた政策提言を、別稿を立ててガッチリ23ページ書いていたのだが、今回は、シナリオ作品の中で政策提言を書いた分量が小さい。

ということで、ESS2025はエネルギー産業の、もっと言えば民間企業たるシェルグループの未来のビジネス環境を探索するシナリオとなった。

次に、ESS2025の内容を概説する。

原文は対外公表用で読みやすく編集されているが、この論文では、シナリオ思考の型式がよく見てとれるように、すこし行論を並べ替えている。

2.2 フレームワークとアプローチ

この節ではESS2025シナリオのフレームワークとアプローチについて、シナリオ理論を援用しながら説明する。読者諸賢がこのシナリオ作品を理解する際の道しるべとなることを期待する。

2.2.1 未来射程と地理的拡がり

ESS2025は世界大で観察する未来の不確実性を扱う。シナリオの射程は、直近2030～2040年までのストーリーが厚い。他方で気候変動問題を扱うために、21世紀末までの地表の大気温度や大気中のCO₂濃度をシミュレーションしている。

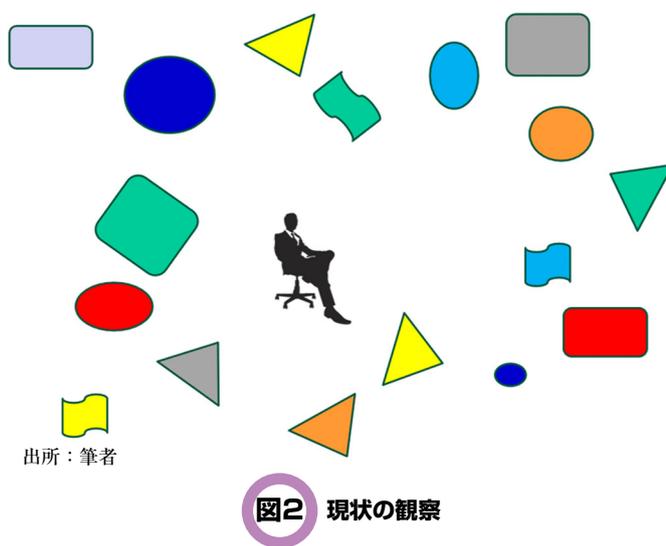
2.2.2 カスタマーの問題関心

シナリオプランニングの仕事では、でき上がったシナリオ作品を誰に役立ててほしいのか、すなわちカスタマーを想定する。シナリオチームは日常的に、世界中の新しいトレンドを観察し、リサーチしているが（図2）、いよいよシナリオプロジェクトを始めると、カスタマーを特定し、カスタマーの視角に立ってリサーチテーマを絞り込んでゆく。

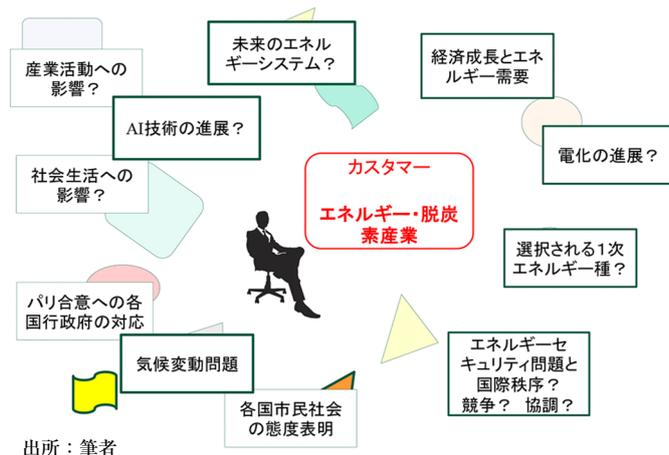
今回のESS2025を通読すると、シェルは主なカスタマーを「エネルギー・脱炭素産業」としたことがわかる。2年前のESS2023では、気候変動問題に特段の関心を寄せる各国政治家や所轄行政府をも、読者（カスタマー）に想定していたのだが、この姿勢からは明らかに退いた。

そうすると、シナリオ分析の入口となる現状分析作業では、「エネルギー・脱炭素産業」の立場から、未来のビジネス環境に関係しそうなテーマを集中的に取り上げる

この世界には、いろいろな兆候が見える



カスタマーの問題関心から リサーチテーマを選定



出所：筆者

図3 リサーチテーマの選定

ことになる(図3)。

そしてエネルギー・脱炭素産業の視角から現状の世界を観察すると、次の事象が見えてくるのである。

2.3 現状分析

2.3.1 現状の観察

- 政治的・社会的に、エネルギーセキュリティ、地球環境問題そして経済成長の3つのテーマの間での緊張が高まっている。
- カリフォルニアは現在、2005年比CO₂排出量を3分の1削減できたが、合衆国連邦レベルでは、気候変動問題についての政治的な変化が見られる。
- ポーランドは石炭発電設備が減っていない。発電量(kWh)の3分の2から2分の1を石炭火力に頼る。ところがポーランドはEUの温暖化排出ガス規制の下にあるのだ。加えてウクライナの隣国なので、軍事支出が急増中。
- ブラジル国内ではほとんどEVが走っていないが、この国には低炭素電源が豊富だ。ブラジルは経済成長を求めている、エネルギーセキュリティを第1に考えている。
- 中国の深圳では公共交通とタクシーはすべてEVになった。市内にはチャージポイントが10万カ所。が、深圳を含む広東省全体の温暖化ガス排出量は増えている。
- 世界規模でのエネルギー需要は増加中。発展途上国で人口が増大し続け、そこの人々は、いよいよクルマを買ったり、初めて飛行機に乗ったり。
- 2021年、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)は、もし21世紀末で地表大気温度1.5℃以下をめざすなら、

今後世界が排出できるCO₂は500ギガトン(Gt:10億トン)である(50% likelihood)、とした。世界は2020年以降2024年末までに、すでに200GtのCO₂を排出している。この5年で平均40Gtの排出ペースだった。残りは300Gtで、500Gtの上限すなわち1.5℃に収まりそうもない。地表温度は遠からず1.5℃を超えるだろう。

- 現在スマートフォンの台数が、世界人口を上回った。
- ChatGPTが、社会に入り始めた。
- 世界的に電化が進んでいる。
- 現在、世界規模のエネルギー供給の80%は石油、天然ガス、石炭が賙っている。
- 2020年代後半は、経済成長力や貿易や軍事面で国家間競争が激しくなっていくように見える。前作ESS2023では、エネルギーセキュリティをめぐる競争が将来のエネルギー転換の原動力となる、という着眼でシナリオを書いたが、ここは2年後の現在でも間違っていない……。

2.3.2 現状分析 問題関心の選別

シェルはエネルギー・脱炭素産業が抱える多様な問題関心を鳥瞰して、重要テーマを選別し、一般化してゆく。ESS2025では、①AI技術の進展とその影響? ②世界規模のエネルギーシステムの将来像? ③気候変動問題の今後? ④未来の国際秩序は国家間や国家ブロック間競争? /国際協調? この4つのテーマを現在の重要テーマと特定した。

2.3.3 現状説明モデルとシナリオクエストの設定

次にこれら問題の現状の姿を、統合的に理解できる説明モデルを試作してみた、と推測される。すなわち重要テーマを含む現状の社会全体をシステムとして理解しようと、テーマの間に因果関係を仮設してみるのだ。

国際関係が緊張していて、エネルギーセキュリティ問題が影響を受けている。国家、あるいは国家ブロック間同士が競争的だ。そこで将来、国内エネルギー需要が伸びるなら、各国はエネルギー供給安全保障が心配になるのだ。

今の世界は保護貿易主義の風が吹いていて、ビジネスは自由貿易経済を前提にできない。

AI技術が進展し普及してゆく。それは経済活動の効率化をもたらし、結果、経済は成長する。

この技術をけん引するテック企業は脱炭素電力を求め。結果、再エネ由来電力への需要が増えてゆくだろう。

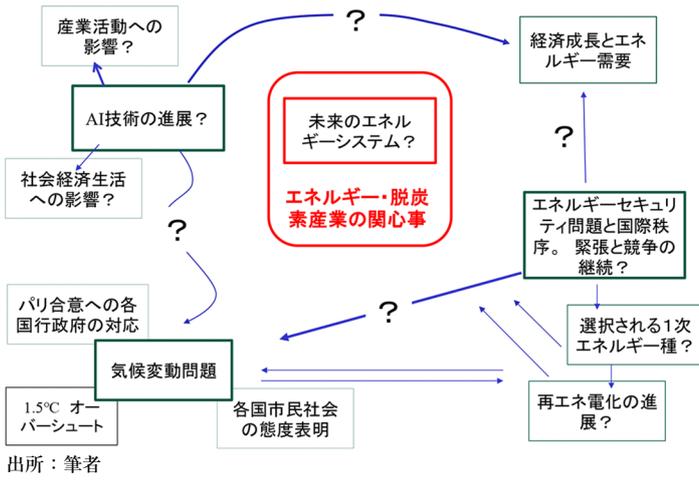


図4 ESS2025における現状説明システム(仮説)

AI技術には別の着眼点がある。この技術は汎用技術なので、現在の産業構造や個社のビジネスモデルを変えてゆくだろう。その結果、世界規模のエネルギーシステムも変わるかもしれない。

緊張と国家ブロック間競争の国際秩序が続いてゆくなれば、AI技術を自国産業に上手く活用できた国の経済が伸びる、ということになる。

気候変動テーマについては、3つの取り扱いが考えられる。一つ目は、競争的・敵対的な国際情勢の影響で気候変動問題への関心が低下する。二つ目は、AI技術による省エネと再エネ電化の進展がこのテーマにプラスに働く。三つ目はパリ合意達成目標の自己目的化。前者2つは、気候変動テーマが各国のエネルギー安全保障、あるいはAI技術の進化普及度合い、という他のテーマに従属する、という説明モデルになる。

以上、もろもろの将来変化を踏まえた結果、そこに立ち現れる未来のエネルギーシステムはどうなっているのだろうか？

テーマ間の因果関係の仮説が、だんだんと浮かび上がってきたようだ。図4はまだまだ作業途上。

試行錯誤を経て、シェルは、ESS2025が扱う全体テーマ(シナリオクエスト)を、「各国は当面、エネルギー安全保障をめざしてさまざまな対策を取る。他方で、AI技術の急速な進展が見られる。エネルギーセキュリティ問題とAI技術は、世界規模のエネルギーシステムをどう変化させるのか？ また21世紀末に向かって、気候変動問題はどうか？」 だいたいこのように設定した^[3]。

2.4 重点課題の現状分析

2.4.1 AI技術の進展とエネルギーシステムへの影響

ESS2025は「エネルギーとAI (Energy and artificial intelligence)」という副題を掲げ、AI技術の現状と将来動向についての記述が厚い。

この技術を観察してみると今後の進歩は確実に、急速で、汎用性がある。すでにAI技術はエネルギーシステムに影響を与え始めている。

クルマの世界にもAI技術が入り込んだ。今、世界の新車生産の4分の1がEVかPHEVで、今後AI技術を利用して製造コストが下がるだろう。クルマの自動運転の試みが始まった。

他方で忘れてはいけない事実として、世界規模のエネルギーシステムの変化にはリードタイムが必要だとい

表2 ESS2025 国家群類型

区分	Innovation Wins	Green Dream	Great Wall of Change	Surfers
国家群	米国や中東湾岸産油国 強い国際競争力	EU 諸国 すでに豊かな国々	中国 経済規模大	新興国と途上国
エネルギー安保	資源大国、供給不安なし エネルギーインフラビジネス への投資	資源賦存少ない 利用効率の向上 再生可能電源開発・利用 家計への補助金	危機耐性強し 国家目標 エネルギー自給 エネルギーインフラ建設	強い関心 資源が賦存せず 供給不安にも、価格の乱高 下にも脆弱
気候変動対策	インセンティブ政策による低 炭素イノベーションの喚起	市民社会からの強い支持	グリーン製造業世界のエネ ルギーシステム変革の主役	
官民関係	民間企業主体 市場メカニズム	規制手段 官民ネゴ	強力な政府支援	自国の経済成長
ビジネス	冒険心、大胆さ 投資資金潤沢	規制の雲に覆われる	自国製造業強い 低炭素化製品市場を席捲	キャッチアップ型経済
巨大 AI テック企業	好環境	逃げ出す	強力な政府支援	

出所：ESS2025

こと。だからここの変化はAI技術の進展スピードに比べて緩慢だ。

2.4.2 国際政治

ESS2025はESS2023の改訂版である。

前作ESS2023は、2021年春のロシアによるウクライナ侵攻に起因したエネルギー危機を契機に製作された。その当時、各国は危機に臨んでそれぞれの対応ぶりを示した。ESS2023では、危機への対応に異なるパターンを見せている4つの国家群がある、と提案した。すなわち Innovation Wins、Green Dream、Great Wall of Change

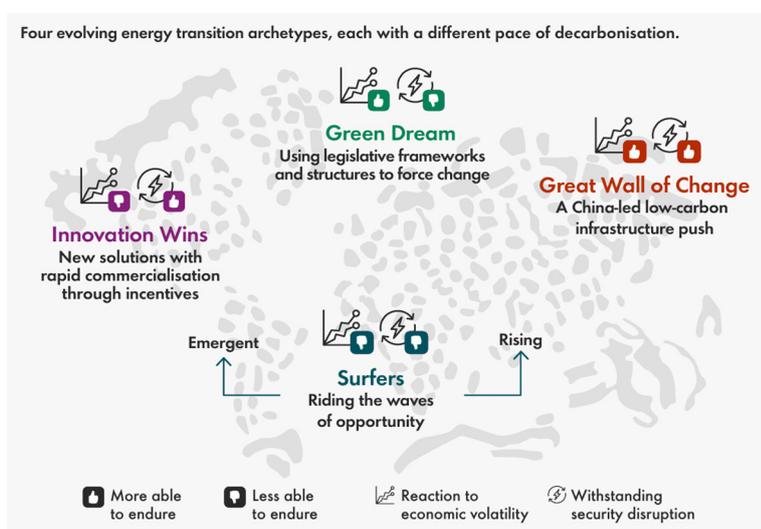
ChangeそしてSurfersの4つである。世界は当面、これら4種の国家群が併存する構造の下にある、と。

今回のESS2025はこの国際政治分析を踏襲した。前ページの表2でセルの見たてた国家群を説明しておく^[4]。ESS2025では、4つの国家群の特徴を図5で説明している。

未来へ……。

ESS2025は、以上の現状分析を土台に据えることができた。

いよいよ、シナリオ分析が始まる。



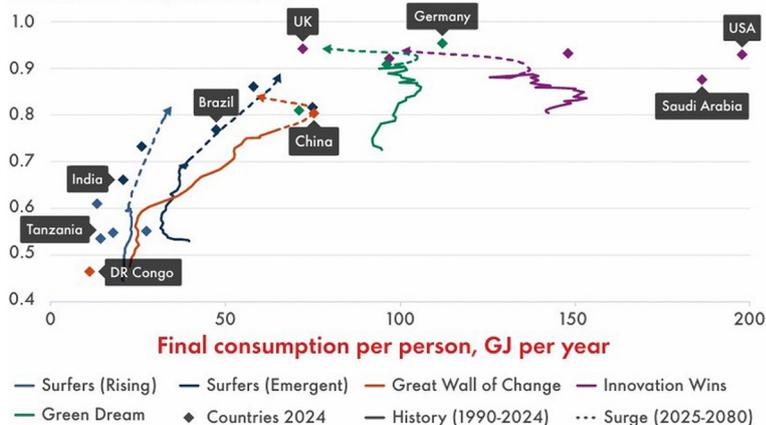
出所：ESS2025

図5 ESS2025 4つの国家群

Energy consumption supports a better life

Electrification and efficiency lower how much energy is needed

Human development index



出所：ESS2025

図6 豊かさとエネルギー消費の関係

2.5 未来展開が読める事象

次のテーマは、2040～2050年頃まで確実に起こるだろう。

2.5.1 エネルギー需要は増加

発展途上国の人々はより豊かな生活を求め、電力供給がそれを叶える。世界規模のエネルギー需要は増加し、電化率が上がってゆく(図6)。

2.5.2 AI技術の進歩はエネルギーシステムに影響を及ぼす

AI技術の進展によって、現状のエネルギーシステムは多様な影響を被るだろう。2045～2055年頃までの射程で考えると；

まず、エネルギー転換/製造設備の製造・建設の工程がますますモジュール化してゆく。AI技術により複雑な加工工程をモジュール化し、完成したモジュールを現場でレゴ(LEGO)みたいに組み立てる。この工法はソーラー発電設備や蓄電池やDAC(直接空気回収)設備等に利用できる。

現在ソーラー発電設備は年間600GWのペースで建設中。このペースが加速するだろう。DACの試験設備が稼働したところだ。DAC設備の製造コストはAI技術を利用して下がってゆくだろう。

EVが大規模普及する。クルマの自動運転化が進みエネルギーシステムの効率が高まる。また、EV車載バッテリーが

電力システムシステムに接続されて電力システムの効率も高まる。

量子コンピューターが実用化されて、材料科学分野や電気化学分野で急速な技術進歩。材料科学やモニタリング技術の進歩によって、小型原発（SMR）のモジュール製造が可能になる。

AIを活用したプロジェクトマネジメントが、大規模インフラ設備建設のエンジニアリングコストを下げる。

ただし、AI技術はエネルギーシステムに入り込んでゆくものの、このシステム全体を大きく変えるにはリードタイムが必要である。

2.5.3 エネルギーシステムの一層の電化は確実

途上国（Surfers）の人々は生活の質の向上を求め、電化が進む。世界は低炭素・脱炭素を志向し、巨大AIテック企業はクリーン電力を求める。その結果、再生可能エネルギーは、早晩、1次エネルギーシステムの主力となり、液体燃料とガス体燃料の地位を奪ってゆく。

2.5.4 遠からず地表温度が1.5℃を超える

気候変動問題は国際政治、国内政治のアジェンダであり続ける。

2.6 未来の分岐の設定、シナリオのフレームワーク

社会経済分析パートのシナリオ分析は、前作ESS2023に引き続き、いささか浅めの感がある。

例えばESS2025は、「現在、自由貿易体制が脅かされているが、原因たる米中の経済覇権競争は、今後数十年にわたっても続くのか？ それとも将来、自由貿易体制

に回帰することがあるのか？」という設問には答えてはくれない。このシナリオ作品は、とりわけ、政治分析の記述が浅い。例えば、「世界のポピュリスト政治家たちは、いつの日か、退場するのか？」「中国では10年後も、習近平体制が続いているのだろうか？」といった設問がない^[5]。

なぜか？

それはこのシナリオ作品が、主なカスタマーを「エネルギー・脱炭素産業」としているからだ。そして「エネルギー・脱炭素産業」の視角から、世界大のエネルギーシステムと世界大のビジネス環境を考えたら、現実政治への関心が薄くなった、ということだろうか。

ところで、このシナリオ作品で使われている未来の分岐点設定の技法は、「what if?」と呼ばれる技法である。

この技法では、現状説明システムを構成しているたくさんの要素の中の、ある特定の要素（Driving forceとも呼ぶ）が、どんどん強まってゆき、もし仮に、未来にこのままずっと加速度的に肥大化し続けたなら、現状説明システムの全体は「とどのつまり」、どんな影響を被り、変化するだろうか？ というアプローチを採ることになる。

ESS2025に戻って、具体的に説明する。

エネルギー・脱炭素産業の視角から現状の世界を眺めたら、①AI技術の進展とその影響？ ②世界規模のエネルギーシステムの将来像？ ③気候変動問題の今後？

④未来の国際秩序は緊張と国家ブロック間競争？それとも国際協調？ この4つのテーマが重要課題であることは前述のとおり。

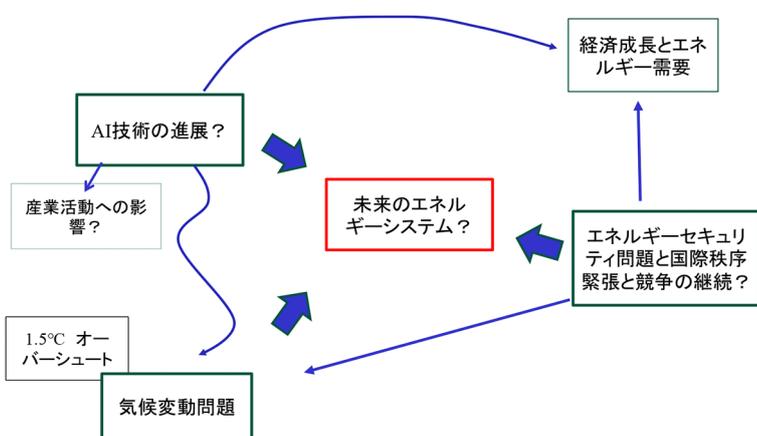
これら4つのテーマのうち、②世界規模のエネルギーシステムの将来像？ というテーマは、他の3テーマの見せる将来変化の影響を被る従属変数として扱ってゆくのだが、この点も既述のとおり（図7）。

シェルはここで「what if?」の技法を使っている。

すなわち、「もし仮に、AI技術がこのまま加速度的に制約なく進歩し、普及し続けたら、そのとき、現状説明システム全体はどんな影響を被っているのだろうか？」という設問を置いてシナリオを作り始める。これがSurgeシナリオである。

同様に、「もし仮に、未来の国際秩序が、現状のように緊張と国家ブロック間競争の状態のまま、ずっと加速度的に緊張し対立し続けたら、そのとき、現状説明システム全体はどんな影響を被っているのだろうか？」

ESS2050シナリオのしくみ
3つのドライバー



出所：筆者

図7 ESS2025におけるシナリオドライバー

か？」これが Archipelagos シナリオ。

また、「もし仮に、地表大気温度が1.5℃を超えてしまひ、これを契機としてパリ合意達成目標の規範化・自己目的化が、国際的に強固なものとなったら、そのとき、現状説明システム全体はどんな影響を被っているのだろうか？」これが Horizon シナリオだ。

すなわち ESS2025 は、この3つの「what if?」の設問に答える3つのシナリオを提案している。

この「what if?」技法は極めて演繹的、すなわち理論的な技法である。この技法では、現状分析はいささか軽く扱われ、一挙に、遠くの未来に飛ばうとする。もし仮に、将来こういう条件が現れたなら、現状のシステムはこう変化するだろう。逆にもし、この条件がないとどうなるか？ このような設問を出発点として、統合的な議論を積み重ね、ストーリーを書いてゆく。すなわち演繹的な思考実験が行われている。

3. 3つのシナリオ

Surge シナリオでは、AI技術の進展が生産性を向上させるため、世界経済は他の2つのシナリオよりも高成長を遂げ、結果、エネルギー需要、とりわけ電力需要が増大する。電力需要を満たすには、当初化石燃料が使われるが、大量のクリーン電力を必要とするテック企業たちがエネルギー供給側に参入し、再エネ供給やSMR原子力発電ビジネスを拡大させてゆく。これらテック企業群はモジュール型のシステム製造に優れ、SMRやDACの拡大をけん引。このシナリオでは21世紀末の気温上昇は+2.0℃となる。

Archipelagos シナリオでは自国優先主義が各国に蔓延し、国家間対立が長引く。セキュリティ懸念から各国政府によるAI規制は強く、その結果企業のAI活用は滞る。それでも国家間競争が原動力となってエネルギー技術は徐々に転換し、21世紀末の気温上昇は+2.2℃に収まる。

Horizon シナリオはパリ協定合意を達成する規範的シナリオ。1.5℃の縛りは一時的にオーバーシュートするが、2040年以降に普及するCO₂除去技術によって気温が下がり21世紀末には+1.2～1.3℃まで低下する。

3.1 Surge シナリオ

Surge シナリオでは世界規模でエネルギー需要が増大してゆく。2050年の最終エネルギー需要は800エクサジュールで、2024年時点から122%増える。AI技術関連の民間ビジネスが、経済成長とエネルギー需要増をけん引する。2050年、AI関連のエネルギーインフラには20エクサジュール (EJ:100京ジュール) が必要だ。これは現在の需要の5倍。その結果電化率が上昇してゆく一方、石油や天然ガスへの電力需要が短期的には衰えない。

途上国 (Surfers) では、ソーラー発電の利用が急伸する。とりわけ赤道付近の途上国では、ソーラー発電の電力が昼間の冷房需要に充当され、また蓄電池と組み合わせて夜間電力をまかなう。赤道付近の地域では電力需要の季節変動も少なく、ソーラー発電の利用に向いている。

AI技術がそれを得意とする国々に生産性の向上による経済成長をもたらし、また電力需要の増大をもたらす。AI技術の社会影響評価に関する国際的な基準や規制の合意形成は、遅れ気味。

米国と中国はAI技術開発分野での覇権を争う。

やがて米国はAI関連の科学技術開発とイノベーションに優れ、中国はエネルギーシステムを支えるインフラの製造拠点に優れるようになる。

AIは生産工程やビジネスモデルを変えてゆき、先進国の生産人口減少傾向を補完する。

AIに因る経済成長を最も享受するのは米国である。国内資本市場が大きく、R&Dのスピードは速く、他国から高度技術人材が入り、労働市場は柔軟で、イノベティブな企業家精神に富んだ国だからである。

中国、スウェーデンあるいは韓国は、デジタルインフラが整っている故、AI技術の活用には有利だろう。

ただしAI技術の急速な活用は、社会の中で、あるいは国際間での経済格差を広げる。

AI技術は分散型の電力グリッドシステムを発達させ、地域のエネルギーマネジメントが族生する。

とりわけAI技術を活用したエネルギー転換/製造設備のモジュール工法が注目される。2040年代になれば、モジュールの製造が3Dプリンターで容易になり、現場で組み立てられる。この工法に向くのはソーラー発電設備、蓄電池、水素製造装置やDAC設備等で、大きな製造コスト低減が起こる。モジュール製造は中小企業でも

可能。アフリカ諸国の政府は自国産業の育成をめざし、自国マーケットの求める品質を満足するモジュールを製造する自国企業を応援している。こうしてSurfersの国々にも中産階級が形成されてゆく。

中国はエネルギーインフラ用のモジュール製造で世界を席卷する。中国はAI技術で米国と競い合い、加えて希少金属を産し、モジュール製造に使われる石化製品も安く作れるからだ。

Surgeシナリオでは、量子コンピューターが実用化され、材料科学分野や電気化学分野で急速な技術進歩が起こる。その結果バッテリーの性能が飛躍的に向上する。

2040年代には小型原発 (SMR) のモジュール製造が可能になる。SMRは25MWクラスから始まって、最終的に200MWクラスにまで到達するかもしれない。SMR設備は大規模な電力需要の近傍に建設される。大規模データセンター、製鉄業の電炉あるいは原子力船。この頃世界初の原子力コンテナ船が中国を出航する。

2030年代後半以降、中東地域ではソーラー発電とDACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage) プロジェクトが進展し、2050年時点では世界で毎年500メガトンのCO₂を除去している。そして2050年代中頃になると世界中のDAC設備では年間1ギガトンを回収している。

Surgeシナリオは科学技術進歩がけん引する経済成長シナリオである。ネットゼロ排出の達成は2080年。21世紀末の地表大気温度は、産業革命の頃と比べて2.0℃上昇している。

エネルギーシステムは企業が主体となってデザインされ、建設され、ビジネスベースで運用されるようになる。各国政府は民間ビジネスがリードするエネルギーシステ

ム変革を、政策面で後押しする役目である。

とりわけ巨大テック企業は、サプライチェーンマネジメントに優れ、その経験を活かして、再生可能エネルギーの生産やグリーン発電や系統ビジネス、さらにCO₂除去分野にも進出してゆく。結果、既存エネルギー企業の地位を圧迫するだろう。

図8にSurgeシナリオのロジックを図示する。

図中の矢印は、矢印の起点のテーマから矢印が向けられたテーマとの間に因果関係があることを表わしている。図中の「+」と「-」は、因果関係のあるテーマ同士の相関関係を表わす。両テーマのつながりに「+」と「+」が記してあれば正の相関、「+」と「-」であれば負の相関を想定している。

このような図示はESS2025のシナリオ作品本文に含まれてはいない。筆者の読み込みから出て来たものである。

3.2 Archipelagosシナリオ

世界はウクライナ危機とエネルギー危機の影響下にあり続ける。ウクライナが欧州に帰属するか、ロシア圏に帰属するか、この帰趨は将来の他の国境紛争に影響する。

米国の孤立主義化が際立つ。各国は自国利益を優先し、貿易紛争は和らぐことがない。各国社会では移民問題が深刻で、豊かな国々では必要な労働力が不足。その結果、世界レベルの経済成長は鈍化している。

米国と中国の経済覇権競争が続く。2040年代、両国ともインド、ラテンアメリカそしてアフリカ市場への進出を競う。

気候変動問題への関心が後退し、エネルギーシステム改革は遅れる。ただし各国政府は、いつの日か、深刻な気候変動災害に晒され、急な対策を求められる。

それでも低炭素エネルギー供給をめざす技術進歩は着実であり、2020年代には温暖化ガスの排出量がピークを迎え、30年代半ばには減衰する。EVの販売価格は、国際競争により安くなってゆく。エネルギーシステム変革は30年代になると、加速してゆくだろう。

Archipelagosの世界では、気候変動問題に国連やWTO等、国際機関の場での国際交渉が頼りにならない。2020年代後半、各国政府は国境炭素税の導入を何とか避けようと、自国企業にさまざまなインセンティブを提案して脱炭素産業を育てようとするのだが、やがて、いくつかの国は国境炭素税を課

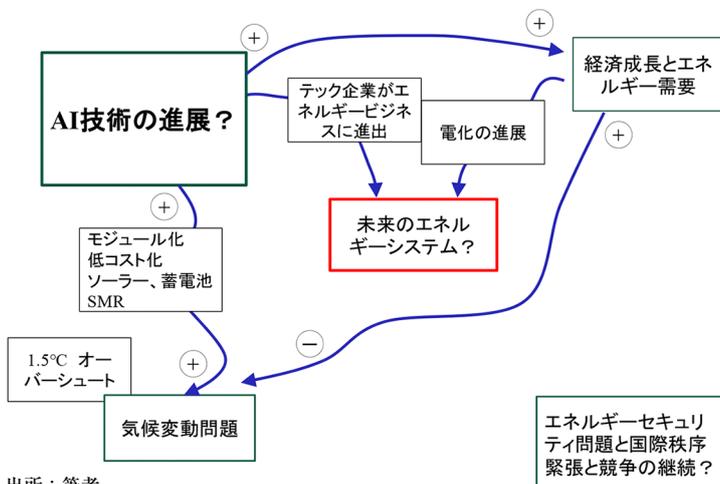
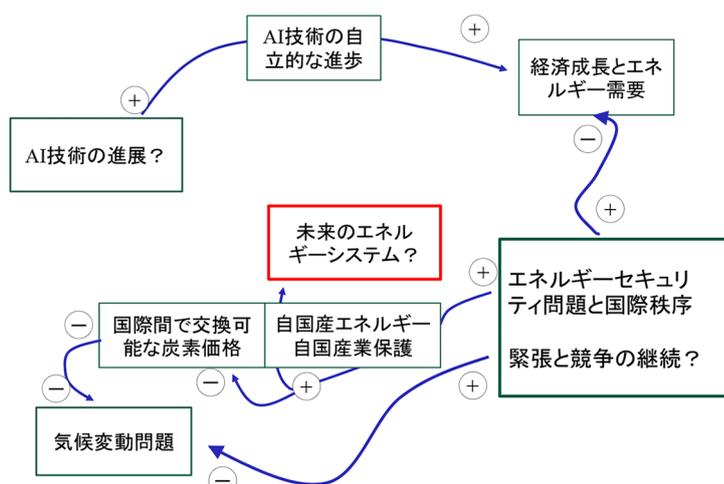


図8 Surgeシナリオの構造



出所：筆者

図9 Archipelagos シナリオの構造

し始める。このような炭素税は国際市場に流通する炭素価格とは別物だ。

このシナリオでは、脱炭素産業の成長が他の2つのシナリオに比べて遅い。セルロース系バイオ燃料は高コストのまま。DACはAI技術によるモジュール製造が期待できず、ビジネス化が進まない。

石炭利用が続く。化石燃料の消費ピークは2050年。つまり石油・天然ガスの埋蔵量追加に必要な投資が将来とも続くのだ。Archipelagosではインフレ気味の世界が続き、これは投資環境としては悪くない。ただし環境アクティビストからの批判は強い。エネルギー企業にはCCS(二酸化炭素回収・貯留技術)投資が必要になる。

21世紀後半に至り、気候変動問題の深刻化に直面して化石燃料の使用制限等の強制措置がとられるかもしれない。Archipelagosでは2100年に至るもネットゼロ排出の達成は困難。21世紀末の地表大気温度は産業革命の頃と比べて2.2℃上昇している。

一般論として、この世界ではAI技術の利用がSurgeシナリオよりも遅れるだろう。各国行政府が国際間データ流通に規制をかけ、巨大AI企業への監視を強化している。AI技術はセキュリティ分野や市民社会の監視に活用されるだろう。

3.3 Horizonシナリオ

このシナリオでは、世界各国の行政府も市民社会も、速やかに気候変動問題に対応してゆく。2030年を越えると、先進国も発展途上国も共に、政府の主導によってエネルギーシステム改革を速やかに実現してゆく。

2020年代初頭、各国はパリ合意目標をめざす行動を

採ることがなかった。エネルギーセキュリティ問題が量と価格両面で厳しかった故である。

しかしながら、各国の市民社会とりわけ若者層は、気候変動問題に喫緊の行動が必要、と政府を突き上げ、低炭素化に有用な新技術の早急な導入と普及を求める。そして政治家が呼応し、各国政府は気候変動問題に真剣に取り組み始めるのだ。

ここでは規制措置やインセンティブが使われる。

化石燃料に関連するビジネスの一部は、市場から強制的に退場させられ、高額な炭素価格が導入されるだろう。エネルギー需要端、すなわち市民社会に向けた規制措置にも厳しいものがある。内燃機関エンジンの購入を

制限し、食生活では、過度な肉食は好ましくならず、と働きかける。風力発電量を増大させるために、周りの景観の劣化に反対する地元の反対を押し切る。

このような世界なので、Horizonでは途上国(Surfers)のエネルギー需要は伸びてゆくものの、途上国政府は、CO2排出量を2020年レベルから下げる政策を採用している。他方、先進国ではエネルギー需要とCO2排出が縮退してゆくので、その結果、21世紀末に至るまで世界大の最終エネルギー需要は伸びない。

Horizonでは、国際的に整合性のとれた炭素価格が成立していて、CO2削減手段が経済的に引き合う。このシナリオの最重要イベントである。パリ協定第6条に定めた排出権クレジットの国際取引が大きく動き出す。ここで、商業的に脱炭素あるいは炭素除去をめざすビジネスが大きく成長する。2030年を待たずして、世界は毎年、1テラワットの新設ソーラー発電を建設している。DACは2040年頃に商業化し、設備規模が急拡大してゆく。

2030年、国連環境計画(UNEP)は、地球規模で2050年時点のネットゼロが見通せる、と発表する。

2060年になると、DACや、バイオ系液体燃料とCCSの抱き合わせ(BECCS)、温暖化ガス抑制効果のある土地利用法や植林等の効果により、地球規模のCO2排出量はネットマイナスになる。なにしろ巨大規模でDAC設備を導入する必要がある。地表大気温度は、徐々にではあるが、下がってゆくだろう。

Horizonシナリオでも大気温度が1.5℃を超える一時期、すなわちオーバーシュートは避けられない。だが、2075年に至り1.5℃に戻り、21世紀末には1.2~1.3℃に収まる。

要約すれば、Horizonシナリオは、「2050年ネット排出ゼロ」および「2100年気温上昇1.5℃以下」目標を達成してゆこうとする規範的シナリオである。Horizonシナリオは各国政府が主導する非常に強いCO₂排出抑制・除去手段を想定している。シェルは、このシナリオは技術面での実施可能性（technical feasibility）には疑問がある、と書き付けている。

最後に…… ESS2025では、3つのシナリオのロジックを図11で総括している。

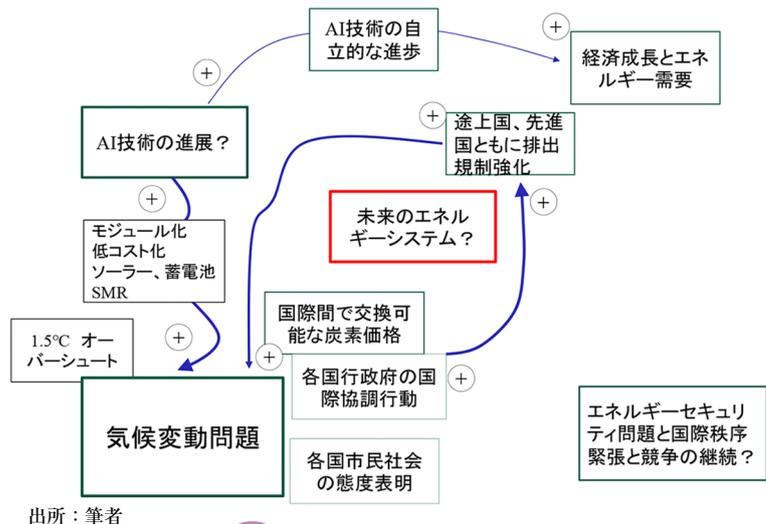
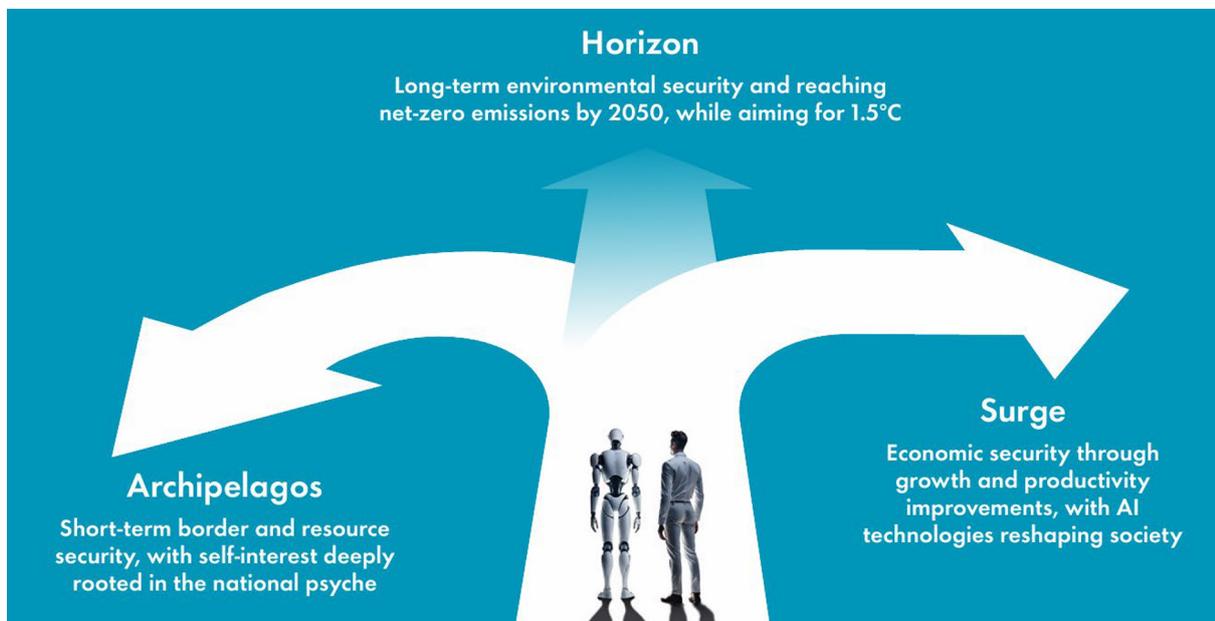


図10 Horizonシナリオの構造



出所：ESS 2025

図11 ESS2025シナリオ総括図

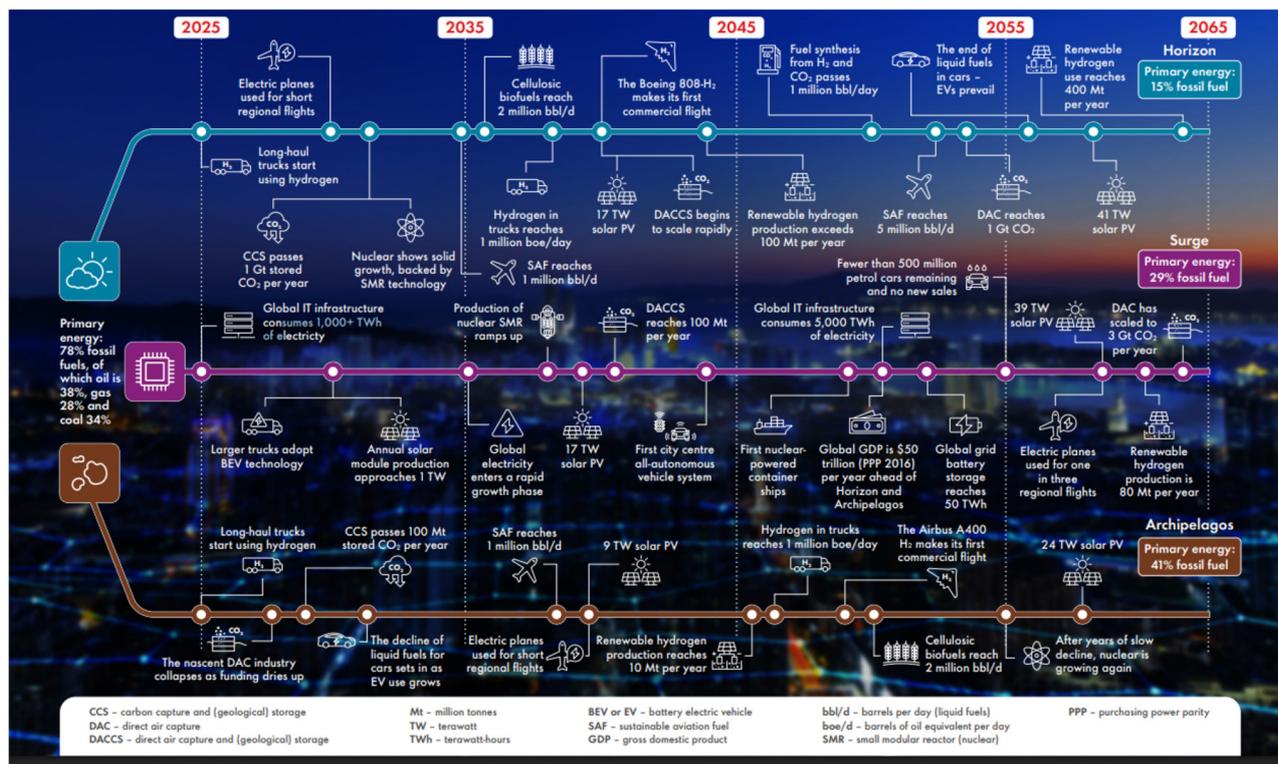
4. 今後40年のシナリオ別エネルギー技術年表

シェルのESS2025特設サイトでは、ESS2025本編の他に、2065年までの「シナリオ別エネルギー技術年表」が単独のPDFファイルとして掲載されている（図12）。本年表が本編から抜き出されて個別掲載されていることから、シェルシナリオチームが重要視する図表であることが窺える。本章ではこの年表を時系列で解説する。前

章で説明したシナリオストーリーを補完するデータとして、お読みいただきたい。

- 2025年現在

世界の1次エネルギー供給は化石燃料が78%。私たちの現代社会を支える経済活動は、化石燃料に依存したエ



出所：ESS 2025

図12 ESS2025 シナリオ別エネルギー技術年表

エネルギーシステムの上に成り立っている。化石燃料の内訳は、石油38%、石炭34%、天然ガス28%であり、石油が最大。

そんな化石燃料依存の現代においても、将来の変化の兆しが見える。

電化が難しい長距離トラック輸送分野で、水素燃料電池を搭載した長距離輸送トラック実証試験が各地で行われている。また、経済活動のデジタル化・AI化によって各国にデータセンターが建設されており、ITインフラの電力消費量は現在1,000テラワットアワー超である。

● 2025～2035年

ここからはシナリオ別に、各技術進展の遅速が分かれる。

(1) Surge

AI技術が世界のIT基盤として普及し、モジュール型技術の利用拡大。2030年にはソーラー発電モジュール生産量が年間1テラワットに到達。バッテリー式電気自動車 (BEV) 技術も進展し、大型トラックにおいてもBEV技術が適用される。

(2) Archipelagos

各国ナショナリズムが昂進し、パリ協定合意は効力を

失っていく。2020年代後半、生まれただであったDAC産業は、資金の枯渇により崩壊。それでも、輸入化石燃料から脱却したいというエネルギーセキュリティ目的での低炭素技術拡大によって、2030年代に入ると、EV (電気自動車) は普及拡大し、自動車用液体燃料需要は減少傾向に転ずる。

(3) Horizon

パリ協定目標を達成する規範的シナリオ。2030年頃には、航行距離が短い地域航空で電動飛行機の運行開始。2030年代前半、世界のCCS量が年間10億CO₂換算トンを超える (Archipelagosの10倍)。SMRが原子力発電の成長をけん引。バイオマス等を原料にしたSAF (持続可能な航空燃料) が2030年代前半から普及し、2035年を迎える頃には消費量が日量100万バレルに。

● 2035～2045年

(1) Surge

2035年を過ぎると、電化速度が上がり電源開発が進む。2030年代後半、SMR生産拡大。Horizonより数年早く2030年代のうちに世界のソーラー発電モジュール生産量が年間17テラワットに到達。DACCS実用化もHorizonよりも早く、DACCSによるCO₂固定量は2040

年代初頭に年間1億トンに到達。2040年代前半には、AI制御された完全自動運転自動車が、初めて市街地中心部でシステム運用開始。

(2) Archipelagos

2030年代終わりから2040年代にかけての脱炭素技術の普及が遅い。SAF消費量が日量100万バレルに達するのは、Horizonから5年ほど遅れ2030年代終わり頃。Horizonで2030年頃に始まった電動飛行機の運行開始は、10年近く遅れて2040年の直前となる。再エネ普及も進むがその速度は遅く、2030年代終わりのソーラー発電モジュール生産量はSurgeの約半分である9テラワット。

(3) Horizon

長距離陸上貨物輸送や長距離航空といった電化が難しい分野で、電化を伴わない脱炭素技術が普及。2035年を過ぎた頃、次世代型セルロース由来バイオ燃料の消費量が日量200万バレルに到達。2030年代後半には、トラック輸送の水素消費量が日量100万石油換算バレルに。2040年になると、新型旅客機ボーイング808-H2が、水素旅客機として初の商業飛行に成功。再エネ普及とCCUS技術も拡大し、2040年には世界のソーラー発電モジュール生産量が年間17テラワットに。2040年代に入ると、グリーン水素生産量が年間1億トン超に成長。

● 2045～2055年

いよいよパリ協定のネットゼロ約束年である2050年を迎える。

(1) Surge

2040年代終わりには世界初の原子力コンテナ船が商業運航開始するなど、脱炭素技術は進むが、2050年ネットゼロは未達。経済は高成長で2050年代初頭、HorizonおよびArchipelagosに先んじて世界のGDPが50兆ドルに到達。同じ頃、世界のITインフラは年間5,000テラワットアワー（2050年未来世界の電力消費の7%）もの電力を消費。2050年代に入ると、各国電力グリッドに設置されたバッテリー型エネルギー貯蔵設備の容量が50テラワットアワーに達し、再エネと需要のバランスに一役買っている。2055年には内燃エンジン型自動車の新車販売はなくなっている。

(2) Archipelagos

トラックや旅客機における水素利用はHorizonより

10年ほど遅れ、2040年代後半の世界のグリーン水素生産量は年間1,000万トンと、Horizon 2040年代初頭の10分の1。Horizonから15年遅れ、2050年ようやくセルロース由来バイオ燃料の消費量が日量200万バレルに達する。脱炭素技術の進展遅れによって、世界のCO₂排出量は2050年ネットゼロを達成できない。

(3) Horizon

2050年、CO₂排出ネットゼロ達成。この頃には、水素を原料とした合成燃料の消費量が日量100万バレルを超えるほどまでに成長。2050年代初めには、SAF消費量は日量500万バレルに到達。2050年のネットゼロを過ぎると、CO₂回収固定によって人為起源CO₂排出量はマイナスに転じる。2050年代初めには、DACによるCO₂回収固定量が急速に成長し、年間10億CO₂換算トンに達する。

● 2055～2065年

ESS2025の技術ロードマップが描かれるのは、ここまでである。

(1) Surge

2060年、世界のソーラー発電モジュール生産量は39テラワット。17テラワットに達するのはHorizonより早かったのだが、その後Horizonのソーラー発電拡大が早い。2060年には地域航空3便に1便が電化。2060年代初頭、グリーン水素の生産量は年間8,000万トン（Horizonの5分の1）。DACCSは年間30億CO₂換算トンまで規模拡大。結果、2065年の1次エネルギーにおける化石燃料比率は29%と、2025年の4割程度まで低下。

(2) Archipelagos

2055年、長年、緩やかに縮小していた原子力産業がようやく再び成長し始める。2050年代終わりのソーラー発電モジュール生産量は24テラワット（Horizonの6割）。2065年の1次エネルギーにおける化石燃料比率は41%と、2025年の半分ほどしか下がらない。

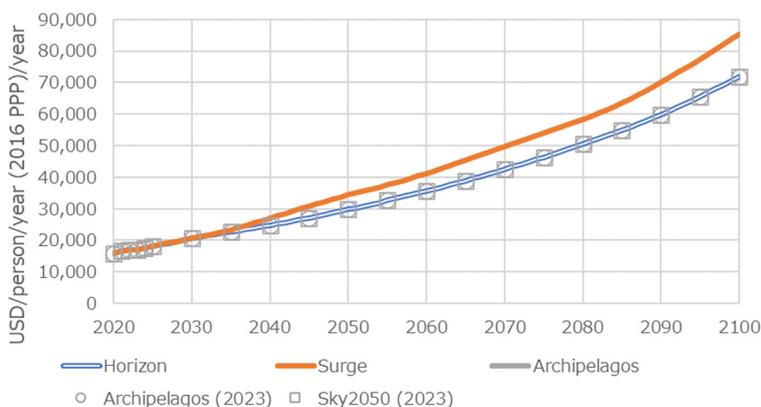
(3) Horizon

2050年代後半、内燃自動車は終焉を告げEVにとって代わられている。2050年代の終わりには、ソーラー発電モジュール生産量は伸び続けて41テラワット。2060年代に入ると、グリーン水素の生産量は年間4億トンにまで成長。2065年の1次エネルギーにおける化石燃料比率は15%と、2025年の2割まで低下。

5. ESS2025におけるエネルギー定量分析

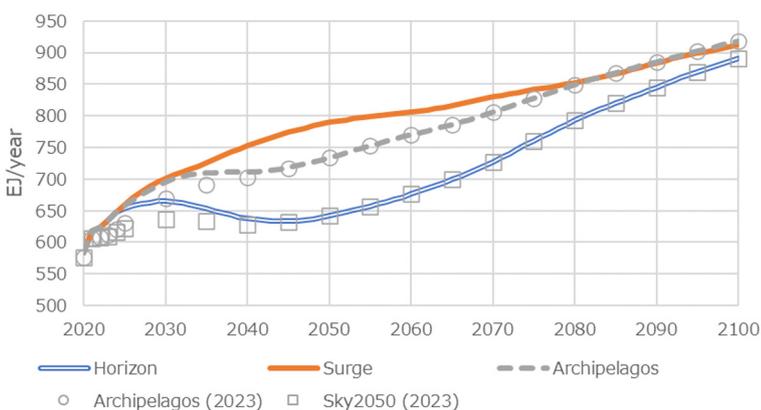
本章では、Shell WEM (World Energy Model) による ESS2025 定量分析結果^[6]を紹介する。WEMとは、シエ

ルシナリオチームが開発した世界のエネルギーシステムをシミュレーションできるツールであり、定性的なシナリオの世界観を数字で表現することに力を発揮する。WEM詳細は筆者らによる既報^[7]をご参照されたい。



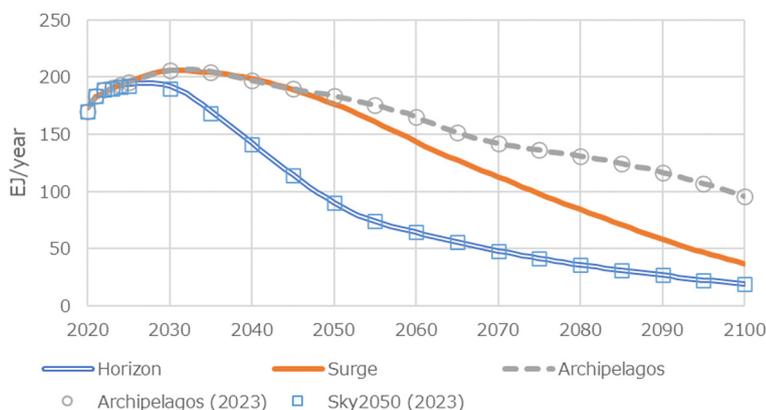
出所：ESS2025

図13 世界の1人あたりGDP



出所：ESS2025

図14 1次エネルギー供給量



出所：ESS2025

図15 1次エネルギー供給量 (石油)

5.1 1次エネルギー供給

将来のエネルギー需要に影響を与えるマクロ経済指標は、人口と1人あたりGDPである。

ESS2025は、各シナリオの世界人口を共通とした。今世紀後半まで世界人口は増加し、2080年代に104億人を超えたあたりでピークを迎える。一方、1人あたりGDPは、Surgeのみ他シナリオよりも高く、2100年には約8万5,000ドルと現在の米国ほどの豊かさを全世界の人々が享受するイメージである(図13)。

1次エネルギー供給量は、大きい順から Surge、Archipelagos、Horizonであり(図14)、2050年断面でSurgeは790エクサジュール/年(2025年の1.2倍)、Archipelagosは730エクサジュール/年(2025年の1.1倍)、Horizonは640エクサジュール/年(2025年より微減)である。シェルシナリオチームのリーダーであるラズロ・バツロがESS2025公開時にポストしたLinkedIn投稿によると、「AI技術が誇大宣伝ではなく、1920年代の電気のような役割を果たしたとしたら、生産性が加速度的に向上するだろう。豊かさは増し、飛行機やエアコン利用が増える。まだ見ぬ新たなビジネスモデルも生まれる。これらによって、2次的にエネルギー需要が増加する。この効果は単なるデータセンターの電力需要よりもずっと大きい」。

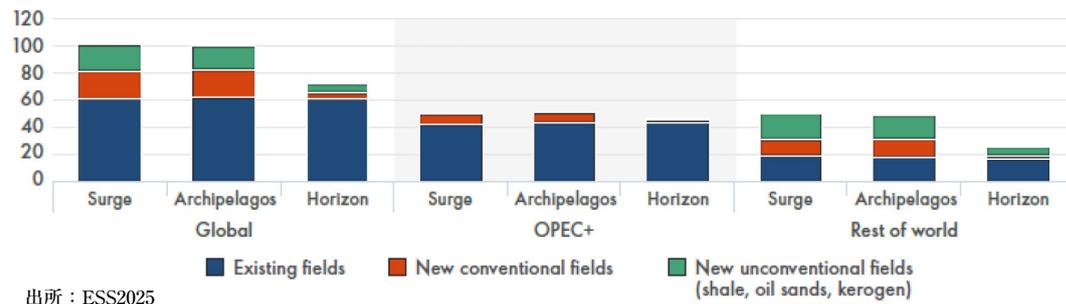
5.2 化石燃料

5.2.1 石油

世界の石油供給量(図15)は、パリ協定の目標を達成する規範的シナリオ Horizonでのみ2030年以降急速に減少し、2050

Oil supply in 2040 and the share of production from new fields

Supply, million barrels per day



出所：ESS2025

図16 2040年におけるOPECおよび非OPEC石油供給量

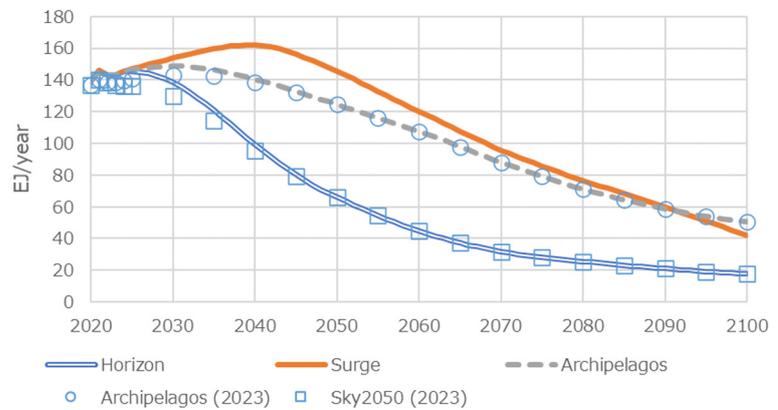
年供給量は今日の半分以下となる。SurgeとArchipelagosでは、2030年代前半に世界の石油需要がピークを迎えるものの急速には減少せず、今後25年間はほぼフラットな需要推移となっている。両シナリオでは2050年であっても今日よりも微減程度の石油需要である。今後25年間の石油製品需要の成長源は、船舶燃料、航空燃料、石油化学とのことである。

今世紀後半になると、シナリオ別の差が大きくなり、石油需要の大きい順からArchipelagos、Surge、Horizonで推移する。Surgeは中間的な経路であるものの、今世紀後半の石油製品需要減少速度は急速で、2100年にはHorizonと遜色ないまでに減少する。

ESS2025は、生産中の油・ガス田は年率5%で生産量が減退するため、全てのシナリオで少なくとも2040年までは新規石油開発が必要だ、と説く。2040年、SurgeとArchipelagosにおける石油生産の4割は新規開発分(図16)。「OPEC+」は既存油田からの生産に依存するが、他の生産国では非在来型、とりわけ米国シェールオイル新規開発が重要。AIを活用した掘削最適化が開発コストを下げ、新規開発を可能にするという。

5.2.2 天然ガス

ESS2025の特徴の一つは、Surgeにおける高い天然ガス需要にある。Archipelagos、Horizonとも前作ESS2023の見通しからほとんど変化はなく、前者では

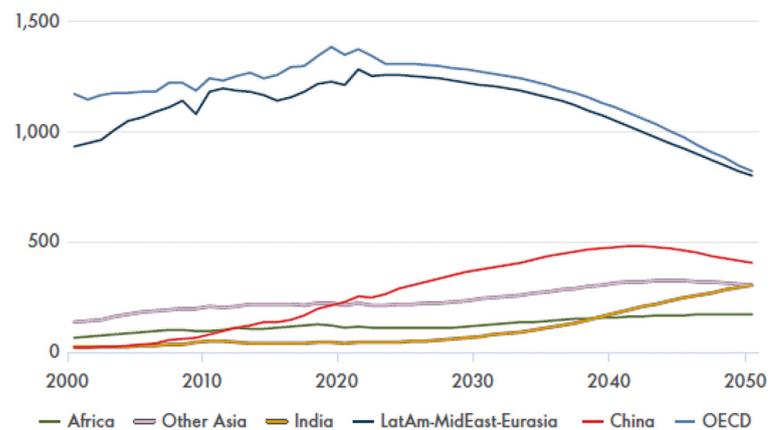


出所：ESS2025

図17 1次エネルギー供給量(天然ガス)

Regional natural gas demand in Surge

Cubic metres per capita



出所：ESS2025

図18 Surgeシナリオにおける地域別天然ガス需要

2040年まで需要横ばい、後者では2030年頃から急速に需要減少、という見立てだが、Surgeでは今後15年にわたり世界の天然ガス需要は増加する(図17)。

Surgeにおける2040年までの需要増加の原動力となるのが、アジアを中心とした電力、産業、化学分野における天然ガス利用である。今日の需要中心地である

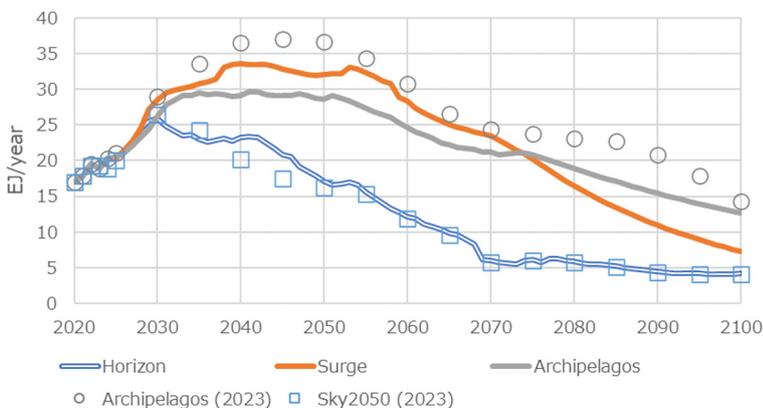
OECD諸国の需要は減少する一方、中国、インドおよびその他アジア地域では、石炭火力の減少を補う形で2045年頃までは天然ガス需要が増加（図18）。

Surgeで本格的に需要が下がるのは、再エネと原子力発電の伸びが天然ガス需要を抑制する2045年頃からとなる。

LNGとパイプラインそれぞれの生産量とも、Surgeが最も高い（図19、図20）。Surgeの2040年LNG生産量は2025年の1.5倍以上増加、パイプラインはほぼ横ばいである。

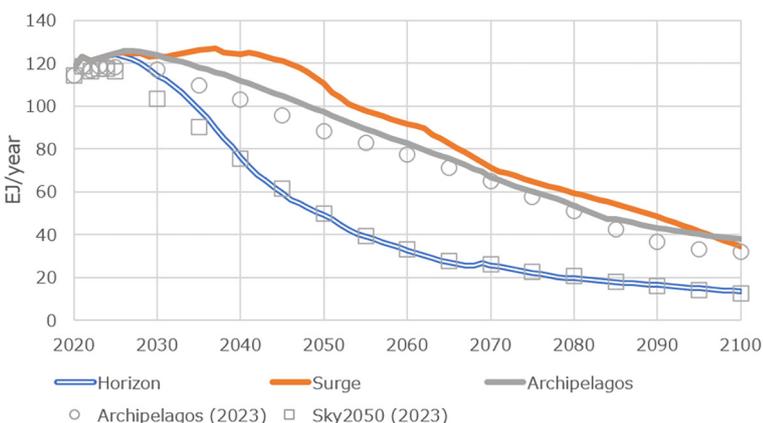
この増加幅からLNG生産量の見立てが強気のように見えるが、実は前作と比較すると前作 Archipelagos 2023の方がLNG生産量は高く、本作で下方修正されている。

ESS2025公開時の各社報道は、シェルが強気のLNG成長やLNGブームを予見という論調が目立った（例：ロイター報道^[8]やOil Price.com^[9]）が、前作と比べてLNG需要が上方に見直されたわけではなく、必ずしも射的を射ているとはいえない。前作よりも増加したのは、Surgeにおけるパイプラインガス生産量であり、高いGDPのためであろうと考えられる。



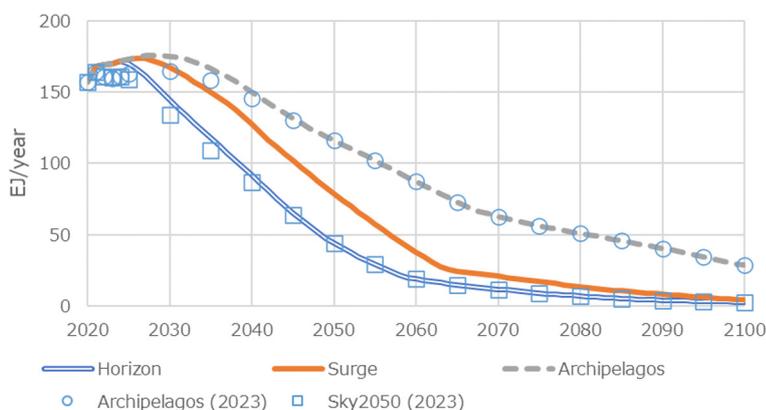
出所：ESS2025

図19 LNG生産量



出所：ESS2025

図20 パイプライン天然ガス生産量



出所：ESS2025

図21 1次エネルギー供給量(石炭)

5.2.3 石炭

石炭需要は大きい順から Archipelagos、Surge、Horizonであり、最も多い Archipelagosでも2029年をピークに下落する（図21）。ESS2025本編中でも石炭に関する言及は限られ、全てのシナリオで2030年前に石炭火力発電の成長は止まる、世界が石炭依存から脱却するために天然ガスは重要な役割を持っているといった程度しか説明されない。

広範な経済活動の活性化によりエネルギー需要が増えるSurgeであっても、集合型の大規模火力発電所よりも、モジュール型のソーラーPVやSMRが増えるというシナリオであるため、石炭火力は増加しないのであろう。

5.3 再エネ

再エネ供給量はHorizon、Surgeがほぼ同等に大きく、Archipelagosが劣後する

が、3シナリオの差にさほどの開きはなく、どのシナリオでも再エネ供給量が大きく増大する（図22）。Archipelagosがやや劣後するのは、今後10年間にわたり貿易制裁によって中国製ソーラーパネルの供給に制限

がかかるためである。変動性再エネのしわ取りのため、グリッド規模のバッテリーエネルギー貯蔵システム（BESS：Battery Energy Storage System）も指数関数的に増加する。

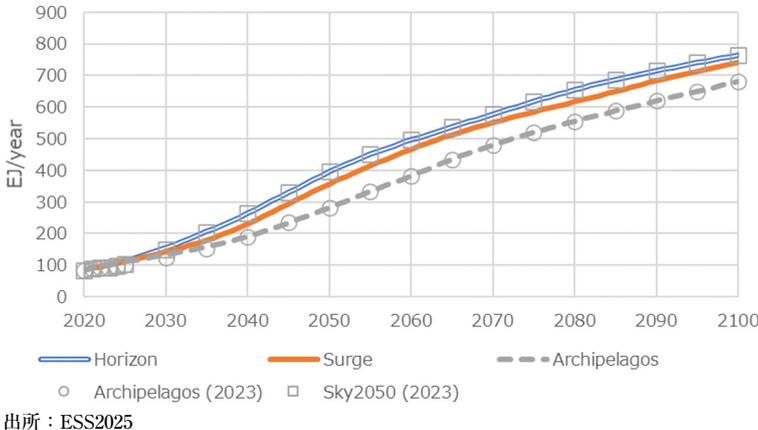


図22 1次エネルギー供給量（再エネ）

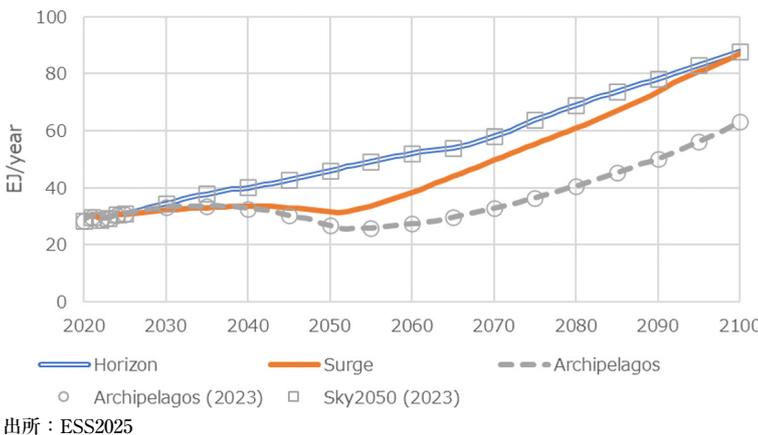


図23 1次エネルギー供給量（原子力）

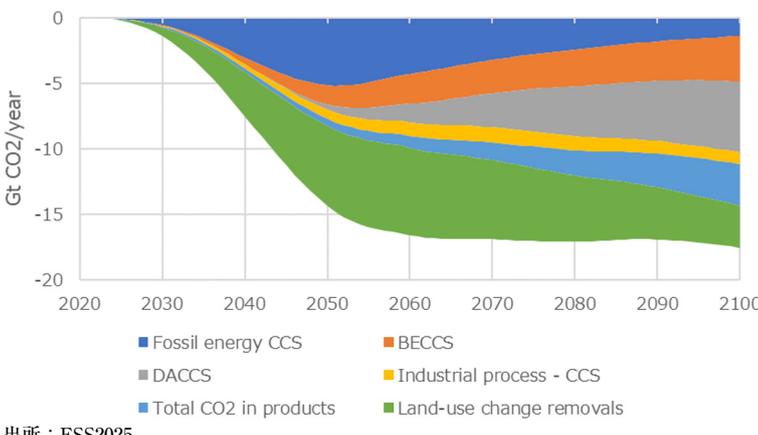


図24 世界のCO₂吸収量（Horizonシナリオ）

5.4 原子力

ESS2025では前作ESS2023より原子力発電への注目度が高く「原発ルネッサンス？」というトピックページも設けられている。特にSurgeでは2040年代にSMRの生産急拡大期に入る、とされる。データセンター、工業用電気炉、商業船舶といった用途にSMRによる原子力発電が活用されるシナリオである。

定量分析結果からは、まず、前作ESS2023と比較して、Horizon、Archipelagosの原子力発電量は全く変わっていない（図23）。原子力発電量は大きい順にHorizon、Surge、Archipelagosであり、最も大きいHorizonが前作のSky2050と全く同じ原子力発電量であるため、本作において原子力発電量の見通しが上方に見直されたという事実はない。

第2にSurgeの原子力発電がArchipelagosよりも多いが、Surgeであっても目に見える変化は2040年代後半から、成長軌道に乗るのは2050年を過ぎてからであり、2050年の世界の原子力発電量は現在とほぼ横ばい。2040年代にSMRの本格商業利用が始まったとしても、世界のエネルギーシステムに目に見える変化をもたらすほどの影響が出るには10年以上かかる、というシナリオチームの見立てである。

5.5 CO₂回収固定技術と気候変動影響

ESS2025では次の5つのCO₂回収固定技術に分類される。

- ①化石燃料 CCS：化石燃料を燃やして生じたCO₂を回収し地中に固定。化石燃料由来のCO₂であるため、大気中からのCO₂除去はない。
- ②バイオエネルギー CCS (BECCS)：バイオ燃料を燃やして生じたCO₂を回収し地中に固定。バイオ燃料原料の植物が成長

する際に大気中からCO₂を吸収するため、CO₂を除去する効果がある。

- ③直接空気回収CCS (DACCS)：大気中のCO₂を直接分離回収して地中に固定するため、CO₂を除去する効果がある。
- ④工業プロセスCCS：工業プロセス（セメント製造等）で発生するCO₂を回収し地中に固定。工業原料由来のCO₂のためCO₂除去はない。
- ⑤土地利用変化による除去：土地利用変化による植物への炭素固定。植物による大気中からのCO₂除去を増進する効果がある。

Horizonでは、今世紀半ばにかけて①と⑤が急拡大し、今世紀後半には毎年160億トン以上（現在の世界のCO₂排出量の4割以上）ものCO₂を固定し続ける。大変な固定量だが、おかげで今世紀後半には世界の気温は低下していく。今世紀後半になると、①は化石燃料使用が減少するため減り、代わりに大気中からCO₂除去できる②、③が増えていく。

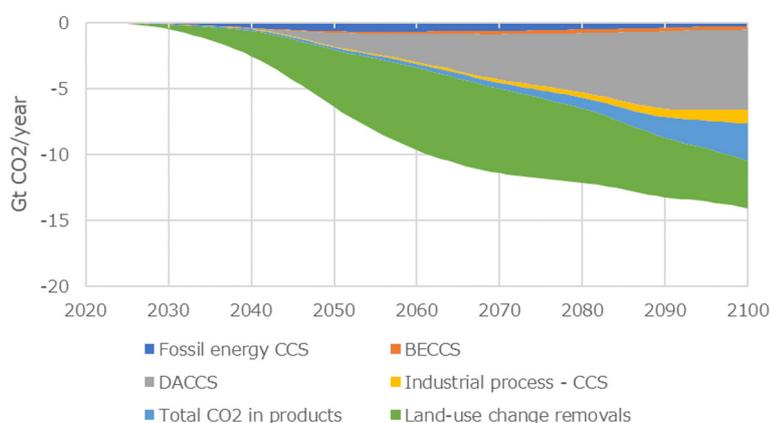
Surgeの特徴は③の普及がHorizonよりも早いことで、2030年代後半には普及し始めて急速に拡大。モジュール型技術が普及するというシナリオ世界観と合致している。ArchipelagosではCCSはほとんど利用拡大しないが、

⑤だけで年間50億トンほどを植物に固定する。⑤に関しては、3シナリオであまり差はない。

CO₂回収固定は、2025年には年間2億トン程度しかない。どのシナリオでも、このCO₂回収固定が今世紀半ばにかけて数十倍に拡大する。特に⑤土地利用変化による吸収がどのシナリオでもあまり差がないということに対して、ESS2025は次のように説明している。

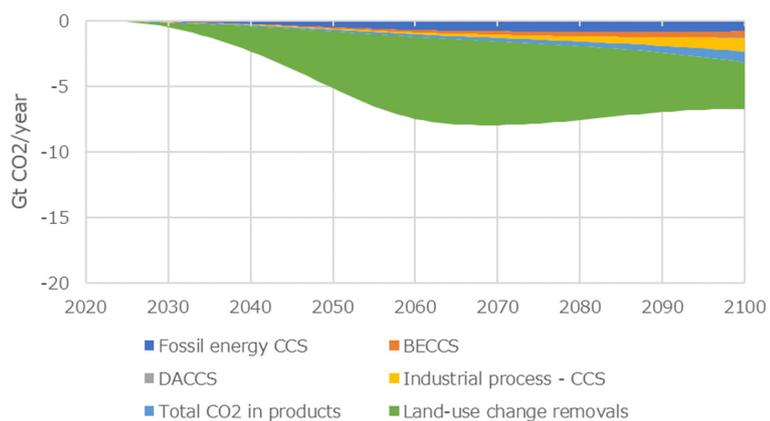
“土地のカーボンを管理する国際協調下での努力がなければ、パリ目標達成は不可能だ。ESS2025では、全てのシナリオで土地管理に対してより大きな努力がはられることを想定している。それは炭素管理のためだけではなく、世界的な生物多様性の悪化を逆転させるために努力がなされるためである”

ところでWEMは気候モデルを含まないため、シナリオ別気候変動影響は、マサチューセッツ工科大学（MIT）に委託し同大学の統合グローバルシステムモデルを使って計算している。その結果を見よう。



出所：ESS2025

図25 世界のCO₂吸収量 (Surge シナリオ)



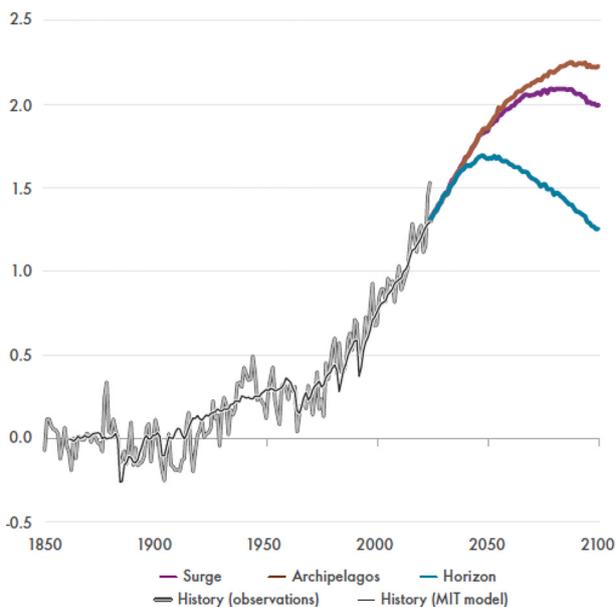
出所：ESS2025

図26 世界のCO₂吸収量 (Archipelagos シナリオ)

MITモデルによると、ここまで示したエネルギー利用とCO₂回収固定の結果、2100年の気温上昇は、Horizon、Surge、Archipelagosの順に+1.26℃、+1.99℃、+2.23℃となる。Horizonのみがパリ協定の目標+1.5℃を満たすが、今世紀半ばに+1.5℃をオーバーシュートして2050年頃に最大で+1.70℃まで上がる。そこで大量のCO₂回収固定によって、今世紀後半に大気温度を下げていく。3つのシナリオいずれでもCO₂回収固定によって、気温上昇は今世紀後半にピークを迎えて下がる、という見立てである。

Global average surface temperature change in three scenarios

Temperature anomaly in °C compared with 1850-1900



History = HadCRUT5 (Jan 2025). Scenarios measured as global mean surface temperature (GMST), modelled by MIT Center for Sustainability Science and Strategy (Jan 2025).

出所：ESS2025

図27 シナリオ別気温上昇

6. IEA「Energy and AI」との比較

ESS2025公表から2カ月後の2025年4月、IEA（国際エネルギー機関）から「Energy and AI」という、ESS2025と全く同じ副題の300頁超にわたるレポートが公開された（以下「IEA AI報告書」^[10]）。前作ESS2023においてもシェルシナリオチームとIEAの共鳴^[11]が見られ、今回もAIとエネルギーというテーマではほぼ同時期に類似のレポートが公開されたことは興味深い。

次に、IEA AI報告書の内容を紹介し、ESS2025との比較を試みる。

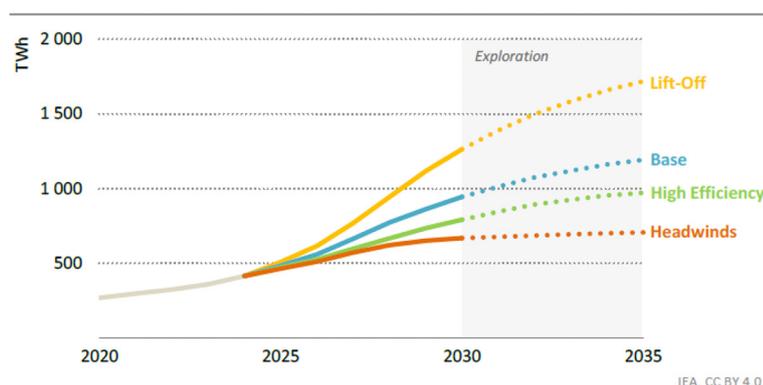
6.1 IEA AI報告書概要

IEA AI報告書によれば、データセンターは世界のエネルギーシステムにおける比較的新しい需要源であり、その電力消費に関する情報は限られている。故に、将来のデータセンター電力消費見通しは不確実性が高い。また電力供給面でも、データセンター電力以外にもすでに、新興国・途上国を中心に経済成長と工業化、冷房の導入等により電力需要の増大が観察されており、データセンター電力が将来も順調に供給されるか、は分からない。

そこでIEAは本報告書において、不確実性の高いデータセンター電力消費の未来に関しシナリオアプローチを採用。2035年までの次の4つのデータセンター電力未来シナリオを作成した。

- ベースケース（Base）：現在の規制状況と業界見通しに基づくデータセンター電力消費。2028年までのサーバー出荷トレンドがその先も継続するという想定。2030年にデータセンター電力消費が945テラワットアワーに増大（2024年の2倍以上）。
- 離陸ケース（Lift-Off）：ベースケースよりもAI普及が早いシナリオ。データセンター建設に対する地域的な制約が少ない。安定した電力が利用可能かつ送電網が混雑していない地域に建設できるため、データセンターの拡大が早い。2030年にデータセンター電力消費1,260テラワットアワー超。
- 高効率ケース（High Efficiency）：普及想定はベースケースと同じだが、データセンターのソフトウェア、ハードウェア両面で省エネ性能が高まるシナリオ。

Figure 2.14 ▶ Global data centre electricity consumption by sensitivity case, 2020-2035



The outlook for data centre electricity demand is highly uncertain, driven by factors including efficiency improvements, AI uptake and potential energy sector bottlenecks

出所：IEA AI 報告書

図28 IEA 報告書の4つのシナリオ

2030年にデータセンター電力消費が800テラワットアワー。

- 逆風ケース (Headwinds)：AI普及が遅くデータセンター拡大も限定的。データセンター建設は主要な市場近傍のクラスターに集中してしまい、送配電網の混雑や電力価格の高騰等の地域的なボトルネックが発生、データセンター拡大が遅延する。2030年にデータセンター電力消費が670テラワットアワー。

6.2 IEA AI報告書とESS2025の比較

(1)シナリオナラティブの有無

シナリオナラティブとは、現在から未来に向かうシナリオの展開を語るストーリーである。IEA AI報告書が提示するシナリオには、シナリオナラティブはない。定量計算するための前提条件が記載されているだけである。例えば高効率ケースシナリオでは、ベースケースシナリオよりハードウェア・ソフトウェア両面でエネルギー効率が改善する、とあるが、なぜ、何が起きたらエネルギー効率が改善するのかは分からない。

一方、ESS2025の3つのシナリオには、それぞれ固有のシナリオナラティブが用意されている。シェルは元々、定性的なシナリオナラティブこそが聞き手に影響を及ぼすこと、この効果は数値表現では得にくい、という発見をベースに、シナリオ手法を発展させてきた。近年でも定性的なシナリオナラティブと定量的なWEMシミュレーション結果をセットで公開するのが通例である。時系列に沿って語られるナラティブがあるからこそ、読み手は、なぜ、何が起きたら現在の延長線上と異なる未来が生じ得るのか、を腹落ちして理解できる。腹落ち

して理解するからこそ、行動変容につながる。IEAはむしろ、定量データやグラフが持つ力を活かして読み手に影響を及ぼそうとする。ここでは、IEAとシェルシナリオの根本的な思想の違いが垣間見える。

(2) AI普及拡大がエネルギーシステムに与える影響

IEA AI報告書は、AI普及拡大がエネルギーシステムに与える影響として、データセンター消費電力にフォーカスしている。IEAによれば、2030年に2倍以上に増大するというデータセンター電力は「電気の時代 (Age of Electricity)」の電力需要増加をけん引するドライバーの一つである。逆に、エネルギーセクターがデータセンター

向けに安定電力を供給できないならば、AI普及拡大のボトルネックとなるという、相互依存の関係にある。

一方シェルのESS2025は、確かにデータセンター消費電力は増加するが、データセンター電力需要そのものよりAIによる広範な経済活性化効果の方がエネルギー需要への影響が大きい、とみる。Surgeでは他シナリオよりもより高い経済成長を見込み、より広範な1次エネルギー需要増加をシナリオに組み込んだ。IEA AI報告書はAIによる影響をデータセンターに狭めて設定しているために、GDPへの影響は考慮されない。

結果、AI普及拡大が気候変動に与え得る影響についても、IEAとシェルで見解が分かれた。IEAは、AI普及が気候変動を悪化させるという言説は誇張、と明言。データセンターCO₂排出量は今日の1億8,000万トンから2035年までに3億～5億トンに増えるが、エネルギー由来排出量の1.5%に過ぎず、AI活用による排出削減効果5% (産業セクターデジタル化による省エネ、陸上貨物輸送運航の最適化、ビルエネルギーマネジメントシステムによる空調最適化等)の方が大きい、として気候変動影響は見込まない。一方、ESS2025 Surgeシナリオでは、AI活用によって分散型の再エネやEV、SMR、DACといった脱炭素技術が進展するが、AIが広範な経済成長につながるために、2030年以降の半世紀にわたりエネルギー需要が増加、再エネだけでなく天然ガス需要も増えるが故に世界は+1.5℃のパリ協定目標を達成できない。

シナリオプランニングでは、スタディ対象となるテーマの現状を取り巻くさまざまな要素を包括的にとらえて分析し、互いに相互関連しあう全体システムとして理解

する。AIとエネルギーという2つの 이슈を取り巻く要素には、データセンターだけではなく、生産性向上による経済活性化があり、結果データセンターとは全く異なる分野におけるエネルギー需要増加があるはずだ、というのがESS2025の考え方だ（図8を参照）。ここは社会経済分析に長けたシェルシナリオチームの面目躍如といえよう。

(3) SMRへの期待

シェルのSurgeでは、テック企業がデータセンター電力供給のためSMRへ投資することで、2030年代にはSMRが使用され始め、2040年代には技術成熟して、原子力船等の他分野にも普及していく。この展開は、テック企業とSMRの関係について予備知識がないと理解しにくいのだが、IEA AI報告書に詳しく解説されている。

第1に、データセンターを運営している主要テック企業（米国GAFAMや中国のテンセント、アリババ、日本のNTTデータ等）は、クライアントの求めに応じて、すでに100%再エネ電源でデータセンターを運営しているか、あるいは2030～2040年には100%にするという目標を掲げている。現状、100%再エネの系統電力はないため、再エネ事業者とのPPA（電力購入契約）や再エネクレジットによって100%化している。再エネクレジットの購入には費用がかかるため、増加するデータセンター電力の供給源としてはできるだけ低炭素な電源が好まれており、天然ガスの価格が低い米国ではガス火力新增設の関心が高まっているだけでなく、CCS付きガス火力も検討されている。

第2に、低炭素・脱炭素電源で増加するデータセンター電力を賄うというテック企業たちの戦略の一環として、これら企業が原子力や次世代地熱といった革新的な低炭素ベースロード電源の技術開発を支援し始めている。例えば、2024年アマゾンX-energy社のSMR開発のため5億ドルを出資。グーグルはFervo Energy社と共同でネバダ州に3.5MWの次世代地熱パイロットを実施。

第3に、これらテック企業は、データセンターから離れた発電所とのPPA電力調達の代替案として、発電所近傍に併設されたデータセンターの利用を開始している。発電所併設では、送配電網を介さずに発電した電力を直接データセンターで使用できるので、送配電網混雑回避や系統接続に要する期間の短縮といったメリットが

ある。既存発電所およびデータセンターの例だが、2024年、アマゾンはTalen Energy社が運転するサスケハナ原発に併設されたデータセンターを同社から買収。同原発から送配電網を介さない300MWの電力供給を契約した。データセンター近傍に併設するにはSMRのように小規模かつ分散型で運用できる電源が適しているということである。

2025年時点でSMRによるデータセンター電力供給計画は公表されているだけで25GWにも上り、その多くは米国である。最初のプロジェクト実現化は2020年代終わり頃と期待されている。IEA AI報告書では、ベースケースシナリオで2030年以降SMRが本格運用。シェルのSurgeでも類似の時間軸で商用化されてゆく。

(4) AI普及がエネルギーシステムに与えるリスク

ESS2025には、AIがもたらすリスクへの言及はない。ここはIEA AI報告書に詳しい。AI普及拡大はエネルギーセキュリティに対してプラス、マイナス双方の面があるとみる。

プラス面としては、エネルギー生産コストが下がる、予知保全が可能になりエネルギー設備の信頼性が向上する等により、エネルギーセキュリティに寄与できる。また、AIを活用することでサイバーセキュリティに対する脅威の特定も可能。

一方、マイナス面は、AIを悪用すればエネルギーシステムをより脆弱にする方向にもなり得る。エネルギーセクターがこれまで以上に電化され、デジタル化され、接続されていくにつれ、サイバーセキュリティの脅威に対する脆弱性が増していく。悪意を持ったアクターによるシステムへの侵入等、エネルギーシステムへのサイバー攻撃はいくつも前例がある。初期の例では2015年にウクライナで発生した停電は22万5,000人に影響。2024年、典型的な電気・ガス企業は週に1,500回以上（2020年の3倍）ものサイバー攻撃にさらされているという。

IEAは、エネルギーシステムはサイバー攻撃に対してより強靱化になる必要がある、と説く。AIはサイバー攻撃の脅威を防ぐ方向にも利用されるし、脅威そのものにもなる。IEAは、より積極的にAIを活用することでサイバーセキュリティ対策を進めることが重要と提言している。

表3 IEA AI 報告書と ESS2025 の比較

項目	IEA “Energy and AI”	シェル “ESS2025”
データセンター (DC) 電力需要	2024年 415TWh (世界電力消費の1.5%) が、2030年 945TWh と2倍以上に	世界のITインフラ電力消費は2025年 1,000TWh 超。[Surge]2050年 5,000TWh。世界の電力消費の8%
電源	データセンター (DC) 電力需要増加は主に再エネとガス火力で賄われる	[ラズロ・バツロ LinkedIn投稿] 太陽光と風力、そして2030年代から原子力が需要増加を支えるが、天然ガスも勝者
原子力	中国、日本、米国でDC向けに活用され2030年頃に初のSMRが実用化	[Surge] 主要AI企業がDC向け電源としてSMR開発投資。2030年代にSMR登場。2040年代に成熟
データセンター消費電力の重要性	「Age of Electricity」における電力需要をけん引するドライバーの一つ。2030年までの電力需要成長の10分の1。工業用モーター、エアコン、電気自動車に次ぐ	AI普及に伴うDC電力需要増そのものよりAIによる広範な経済活性化効果の方がエネルギー需要への影響が大きい
不確実性	AI導入の速さ、AI能力や生産性の改善度合いと速さ、エネルギーセクターのボトルネックが解消されるかどうか、によってベースケース、離陸ケース、逆風ケース、高効率ケースに分かれる。GDPは全シナリオ同じ	気候変動問題、AI技術の進展、エネルギーセキュリティ問題と国際秩序の3つのドライバーのどれが強まるか、によってHorizon、Surge、Archipelagosに分かれる。AIによる経済活性化効果によりシナリオによってGDPが異なる
AI普及効果① 既存エネルギー産業への影響	石油・ガスはAIのアーリーアダプター。電力システムのバランスにもAI活用可。エネルギー産業とテックセクターは、過去になくつながりあっている。コラボレーションがカギ。IEAがコラボを助ける。	エネルギー分野へのモジュール型装置 (ソーラー PV パネル、バッテリー、ヒートポンプ、DAC等) 導入加速。巨大テック企業がエネルギー産業に進出し既存エネルギー企業を圧迫。
AI普及効果② エネルギー需要	産業プロセス最適化により省エネが進み、メキシコの電力消費と同じくらいの節電可能。輸送や建物でも省エネに	[Surge] AI技術により広範な経済成長、エネルギー需要増。石油・ガス生産のレジリエンスを提供
AI普及効果③ 科学技術	科学的な発見を促進。研究者たちが革新技术を試験し商用化することを加速	量子コンピューター実用化により、材料科学や電気化学バイオ技術進展
AI普及効果④ リスク	AI誤用や悪用によるエネルギーセキュリティリスク増大	言及なし
新興国	信頼でき安価な電力供給ができれば新興国は蛙飛びでAIによるコストと時間の節約メリットを得られる	[Surge] アフリカ各地の町や村で中小企業がローカルな製造業への投資を獲得し、栄える。
AI普及と気候変動の関係	AIが気候変動を悪化させるという言説は誇張。データセンター CO ₂ 排出量増加 (エネルギー由来排出量の1.5%) よりAI活用による排出削減 (5%) の方が大	[Surge] AI普及シナリオであるSurgeでは1.5°Cのパリ協定目標を達成できない。が、再エネやEV、DACの普及によって2.0°Cに収まる。

出所：筆者

結語

本稿ではAIとエネルギーをテーマとしたESS2025を、シナリオ専門家の視点から解説を試みた。

ここには、残念ながら我が国日本への言及がない。2年前のESS2023でも、中国がEV製造スーパーハブに成長する過程で日本の自動車メーカーが苦勞するだろう、という程度しか触れられていなかった。

これはシェルが日本でのビジネスに関心がない、ということではない。ESS2025が読み手として想定するカスタマーは「エネルギー・脱炭素産業」である。ESS2025

ではこのカスタマーの未来の重要な関心ごとを「各国は当面、エネルギー安全保障をめざしてさまざまな対策を取る。他方で、AI技術の急速な進展が見られる。エネルギーセキュリティ問題とAI技術は、世界規模のエネルギーシステムをどう変化させるのか？ また21世紀末に向かって、気候変動問題はどうか？」、と措定(そてい)して、分析と思考実験をやってみた。そうしたら我が国の政府やビジネス、技術等の存在感が(米国、中国等諸外国と比較して)薄かった、ということであろう。筆者2名はすこし残念な心持である。

<脚注>

- [1] : Shell (2025) The 2025 Energy Security Scenarios: Energy and artificial intelligence, https://www.shell.com/news-and-insights/scenarios/the-2025-energy-security-scenarios/_jcr_content/root/main/section_1902297548/promo/links/item0.stream/1746784000258/ca7e977082c0ee7f8e60e87fa41556287d3be0cf/the_2025_energy_security_scenarios.pdf
- [2] : 詳細は、角和・木原 (2023) シェルの「エネルギーセキュリティシナリオ2023」、石油・天然ガスレビュー 2023年07月号、https://oilgas-info.jogmec.go.jp/review_reports/1009607/1009851.html を参照ください。

- [3]：原文を引用する。The scenarios explore the difficulties that countries struggle with today to deliver economic growth, preserve their sovereignty and strengthen their borders, while limiting climate change in an era of technological change and the emergence of artificial intelligence.
- [4]：詳しくは、角和・木原(2023)シェルの「エネルギーセキュリティシナリオ2023」、石油・天然ガスレビュー 2023年07月号、https://oilgas-info.iogmec.go.jp/review_reports/1009607/1009851.html
- [5]：ESS2023とESS2025は共に、システム思考で重視されるバランス型フィードバック・ループの考え方を使っていない。バランス型フィードバック・ループでは、一定の状態に収束してゆく回路(ループ)を想定する。本文の文脈を例にとれば、国家ブロック間の覇権争いの結果、世界経済が停滞してしまい、その結果、各国市民社会は自由貿易体制の利点を改めて振り返り、その結果、各国の政治リーダーが経済のブロック化(関税競争!)を終結させ、その結果…… という因果関係の回路を想定するのがバランス型フィードバック・ループだ。シナリオプランニングにおけるシステム思考の重要性については、『シェルに学んだシナリオプランニングの奥義』角和昌浩、2022年、日本経済新聞出版を参照。
- [6]：Shell (2025) The 2025 Energy Security Scenarios, Underlying Data, https://www.shell.com/news-and-insights/scenarios/the-2025-energy-security-scenarios/_jcr_content/root/main/section_1902297548/promo/links/item0.stream/1746784000258/ca7e977082c0ee7f8e60e87fa41556287d3be0cf/the_2025_energy_security_scenarios.pdf
- [7]：角和・木原(2025)「シェルのエネルギーモデル(1)」、『エレクトロヒート』、No. 259 2025、https://www.jeh-center.org/eh_259.html
- [8]：Reuters(2025) Shell sees significant LNG growth in near term under its scenarios, <https://www.reuters.com/business/energy/shell-sees-significant-lng-growth-near-term-under-its-scenarios-2025-02-12/>
- [9]：OilPrice.com (2025) Shell Sees LNG Boom Through 2030, <https://oilprice.com/Energy/Natural-Gas/Shell-Sees-LNG-Boom-Through-2030.html>
- [10]：IEA (2025) Energy and AI, <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- [11]：角和・木原(2023)シェルの「エネルギーセキュリティシナリオ2023」、石油・天然ガスレビュー 2023年07月号、https://oilgas-info.iogmec.go.jp/review_reports/1009607/1009851.html

執筆者紹介

木原 正樹 (きはら まさき)

株式会社フューチャーネス代表兼シナリオプランナー(<https://futureness.jp/>)

2004年東京大学新領域創成科学研究科卒(環境学専攻)。2008年TiasNimbas Business School卒(MBA)。

2004年昭和シェル石油入社(石油精製エンジニア)。2014年シェルシナリオチーム出向(国際政治グループシナリオアナリスト)以降、シナリオに関わり続けている。昭和シェル石油および出光興産経営企画部にてシナリオプランニング担当。2019年に起業し現職、お客様のシナリオプランニング支援中。兼業でアマゾンジャパンのバイヤーとして同社EC商品戦略に従事。趣味は、ペランダ植物および金魚育成とサッカー観戦。



角和 昌浩 (かくわ まさひろ)

1977年、東京大学法学部卒業。同年昭和石油(後の昭和シェル石油)入社。製油所、販売、原油/製品貿易、経営企画、新規事業等の実務に従事。

R.D.Shellグループ本社シナリオプランニングチームに参加し、奥義を極めた。

2003年以降、ビジネスと研究・教育の2束のワラジを履く。

2021年3月末、10年務めた東京大学公共政策大学院の教官を引き、自由の身となった。

趣味は、やきものとイギリス、石油とシナリオプランニング。

最近思うことは、自分は石油が本当に好きなのだなぁ、と。



Global Disclaimer (免責事項)

本稿は独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構(以下「機構」)調査部が信頼できると判断した各種資料に基づいて作成されていますが、機構は本稿に含まれるデータおよび情報の正確性又は完全性を保証するものではありません。また、本稿は読者への一般的な情報提供を目的としたものであり、何らかの投資等に関する特定のアドバイスの提供を目的としたものではありません。したがって、機構は本稿に依拠して行われた投資等の結果については一切責任を負いません。なお、機構が作成した図表類等を引用・転載する場合は、機構資料である旨を明示していただきますようお願い申し上げます。機構以外が作成した図表類等を引用・転載する場合は個別にお問い合わせください。