

令和7年度「東京都エネルギー問題アドバイザーボード(第3回)」令和7年11月27日(木)

カーボンニュートラルとエネルギーレジリエンスの両立に向けて

東京大学 大学院工学系研究科附属
レジリエンス工学研究センター 教授
小宮山 涼一

カーボンニュートラルとエネルギーレジリエンスの両立

- 気候変動問題への対応
 - ・ カーボンニュートラル実現、電力供給および燃料供給の脱炭素化
- 自然災害等によるエネルギー供給の不安定化に対する適切な対応（エネルギーレジリエンスの強化）
 - ・ 地震、大雨、洪水、台風、噴火等の自然災害に対する対策の強化

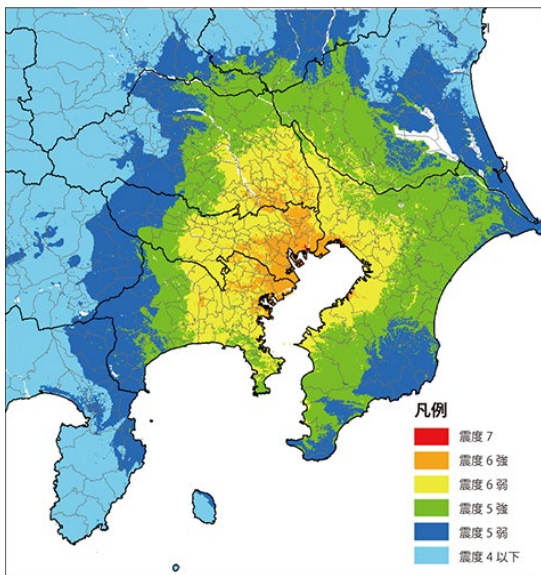
近年のエネルギーを巡る動向

- 再生可能エネルギーや蓄電池など分散型エネルギー資源の普及
 - ・ 太陽光発電、風力発電、蓄電池、電気自動車等の普及と電力安定供給に向けた取組
- 局所的な電力需要の増加
 - ・ AI需要の高まりなど社会のデジタル化、データセンター(DC)立地等に伴う電力需要増加の可能性
- エネルギー価格の上昇
 - ・ 電気料金などエネルギー価格の安定化、持続的な経済成長の維持

自然災害によるエネルギー供給への影響

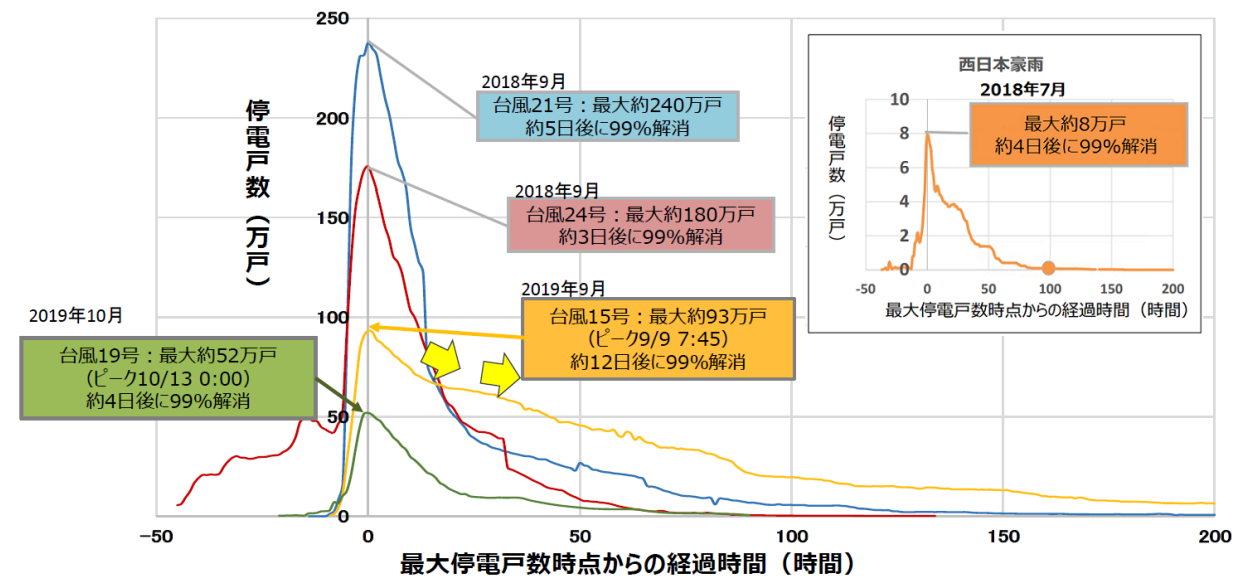
- 東京湾岸は多数の電力、石油、都市ガスインフラが集積する重要なエネルギー供給拠点。首都直下地震によるエネルギーインフラ等への大きな被害が想定されている。
- 自然災害により近年、大規模な停電発生や、停電復旧に要する時間が長期化する傾向もみられる。
 - ・ 台風15号(2019年)：最大瞬間風速57.5m/s(上陸時に過去最強クラス)、停電被害は最大約93万戸、停電の復旧（停電件数がピーク時と比較して99%解消）に要した時間は約280時間(約12日間)で長期間の停電が発生、暴風等により損傷した電柱は約2千本

都心南部直下地震での震度分布、被害の想定



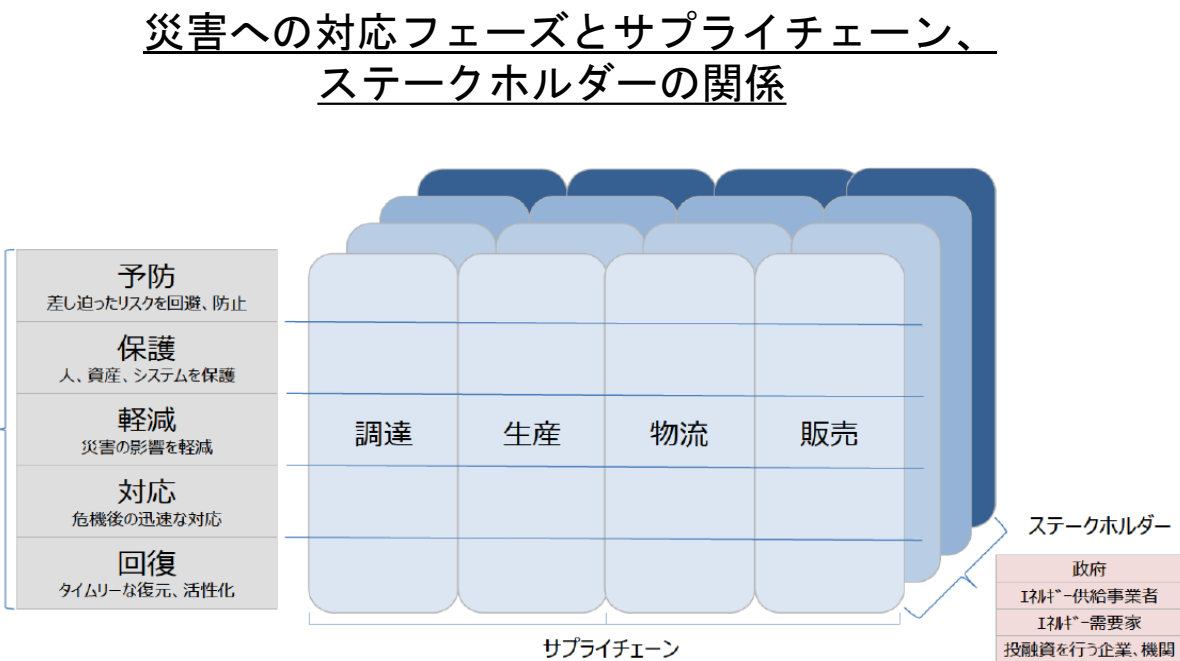
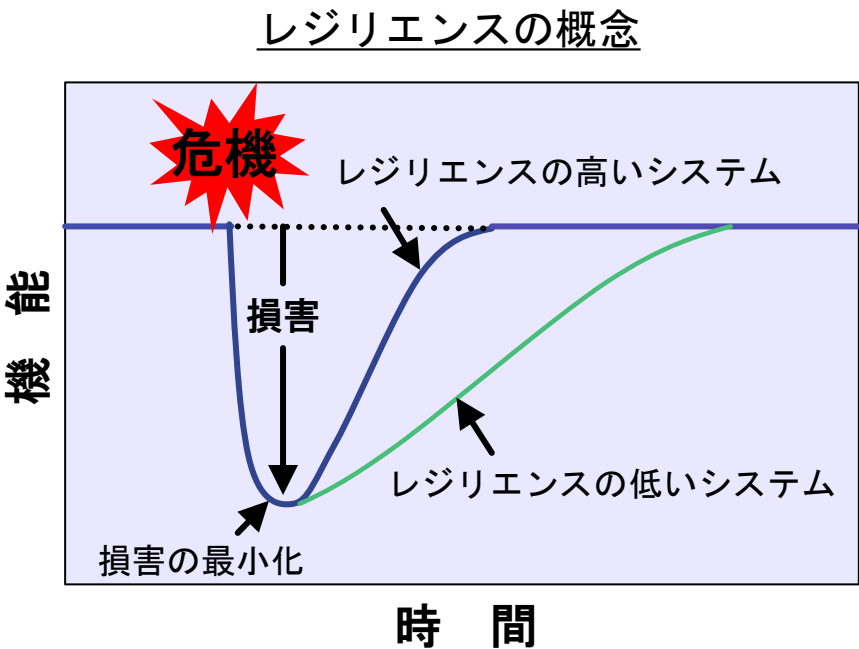
- ・ 電力：発災直後は約5割の地域で停電。1週間以上不安定な状況が続く。
- ・ 通信：固定電話・携帯電話とも、輻輳のため、9割の通話規制が1日以上継続。メールは遅配が生じる可能性。
- ・ 上下水道：都区部で約5割が断水。約1割で下水道の使用ができない。
- ・ 交通：地下鉄は1週間、私鉄・在来線は1か月程度、開通までに時間を要する可能性。
- ・ 主要路線の道路啓開には、少なくとも1～2日を要し、その後、緊急交通路として使用。都区部の一般道はガレキによる狭小、放置車両等の発生で深刻な交通麻痺が発生。
- ・ 港湾：非耐震岸壁では、多くの施設で機能が確保できなくなり、復旧には数か月を要する。
- ・ 燃料：油槽所・製油所において備蓄はあるものの、タンクローリーの不足、深刻な交通渋滞等により、非常用発電用の重油を含め、軽油、ガソリン等の消費者への供給が困難となる。

過去の自然災害での停電戸数の推移



エネルギーレジリエンス

- エネルギー供給障害の発生時、事前対策により損害を最小化し、迅速な復旧を遂行しうる能力
「... レジリエンスは、影響の最小化と迅速な復旧といった一連のプロセスを通じて、想定外の危機にも適応しうる対策のヒントを与える...」
(出典)小宮山涼一「総説：エネルギーレジリエンス」電気学会誌,144巻9号,pp.565-568(2024)
- APECで2020年に合意された「エネルギーレジリエンス原則」
「エネルギーレジリエンスとは、平時には需要家を含む社会に対して所要のエネルギーを安定的に供給するとともに、有事には自然的・人為的災害を始めとした様々なショックがエネルギーの供給支障を生じた場合に、それが人命・資産や経済活動及び社会にもたらす影響を低減するための、災害等の発生前後における、ハード・ソフト面での安全性・堅牢性及び迅速な停止復旧能力である。」

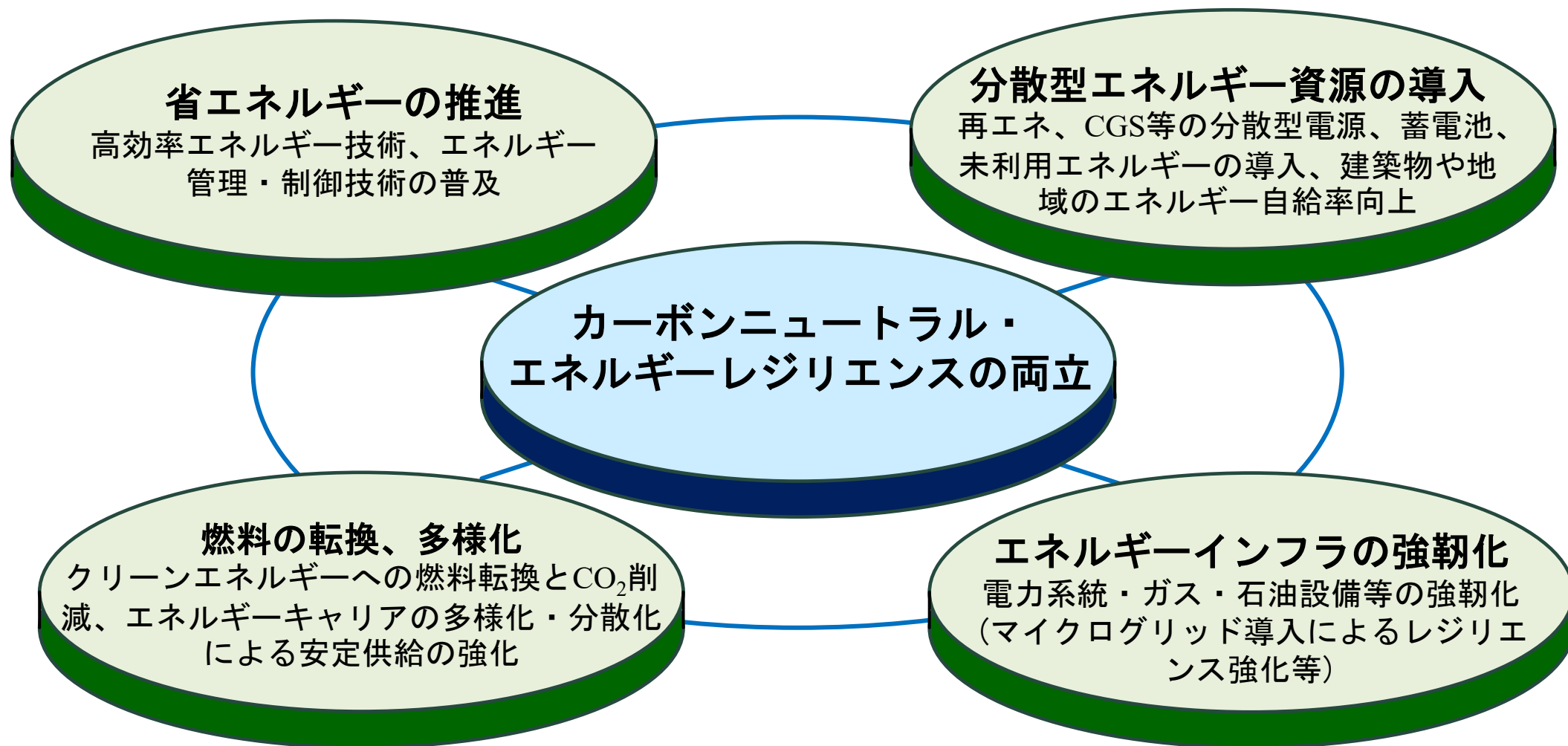


(出典)東京大学大学院工学系研究科緊急工学ビジョン・ワーキンググループ
「震災後の工学は何をめざすのか」(2011年)、を基に一部加筆修正して作成

(出典)経済産業省：エネルギーレジリエンスの定量評価に向けた専門家委員会 資料6 (2020)

カーボンニュートラルとエネルギーレジリエンスの両立

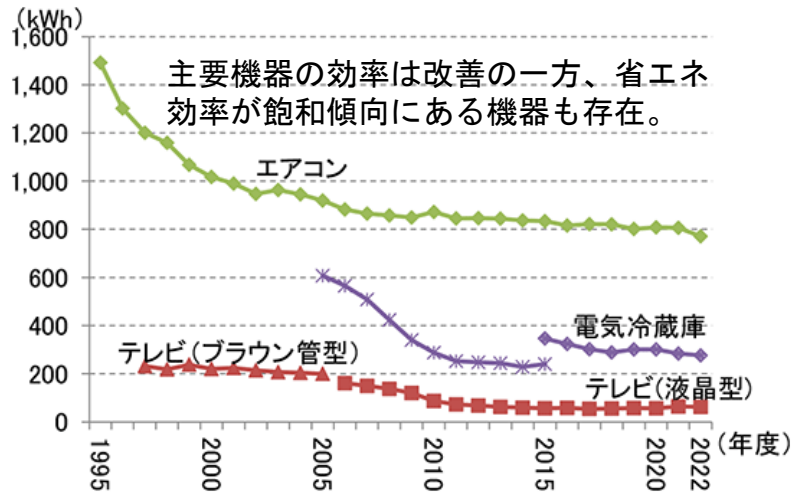
省エネ、分散型エネルギー資源、燃料転換・多様化、エネルギーインフラ強靱化を総合的に推進



省エネルギー

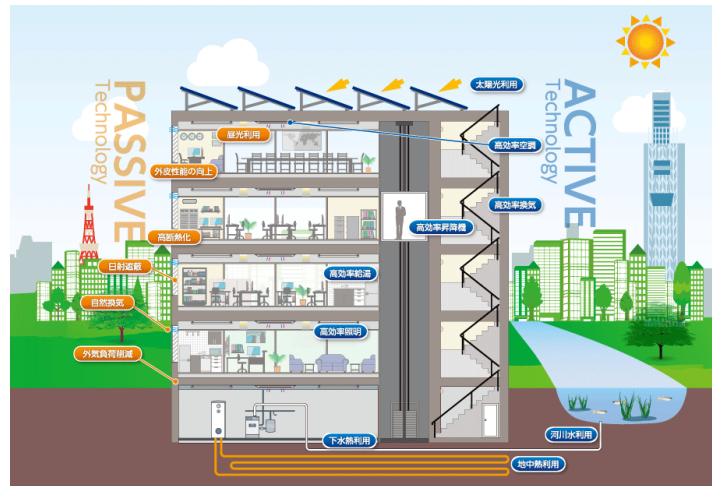
- 省エネは相対的に安価、短期での投資効果、多面的な効用を有し(CO₂削減、燃料消費抑制、レジリエンス、光熱費の節約)、相対的に受容性も高く、国際的にその重要性が共有されている。
 - EU：省エネ第一原則（Energy Efficiency First Principle）
 - 最先端の高効率機器やエネルギー管理技術(技術やシステムの運転を最適に制御)の導入
 - 断熱性能向上と需要側資源（太陽光等の創エネ、蓄電池やEV等の蓄エネ、省エネ）の最適制御により、エネルギー消費量の収支をゼロとした建築物や住宅の導入(ZEBやZEH)

主要家電製品のエネルギー効率の変化



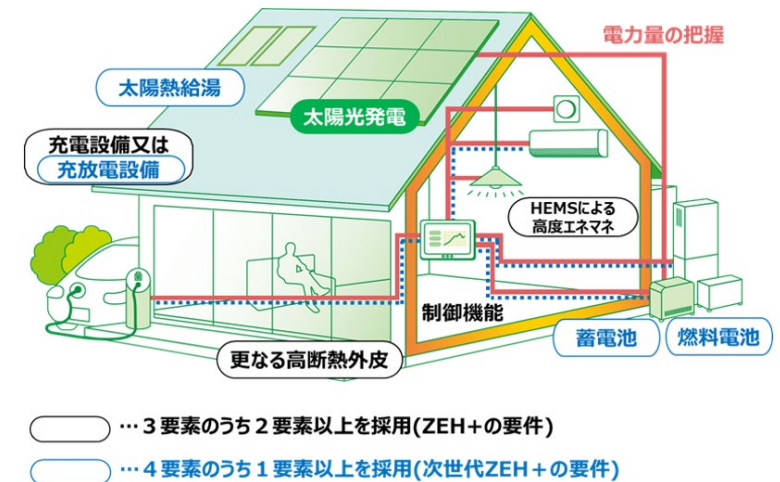
(出典)経済産業省：令和5年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2024)

ネット・ゼロ・エネルギー・ビル(ZEB)



(出典)環境省 ZEB Portal
<https://www.env.go.jp/earth/zeb/detail/01.html>

ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス(ZEH)



(出典)経済産業省
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energykiho/nkeikaku2021_kaisetu02.html

分散型エネルギー資源の導入(分散型電源)

- 分散型エネルギーシステム構築、地域資源活用による脱炭素化、エネルギーレジリエンス向上への貢献(地域のエネルギー自給率向上等)
- 分散型電源の活用
 - ・ 太陽光発電等の再エネ電源：ゼロ・エミッション、低価格化(太陽光等)、災害等での非常用電源としての活用とレジリエンス向上
 - ・ コージェネレーション(CGS)(GE,GT,FC)：優れたエネルギー総合効率と一次エネルギー削減、電力ピーク負荷軽減、災害時の非常用電源(強靱な都市ガス導管の活用)、再エネ拡大に伴う調整力の提供、エネルギー面的利用等での活用
 - ・ 電動車(EV,FCV,PHV,HV)：災害時、移動式の非常用電源での活用により、避難所等への給電が可能

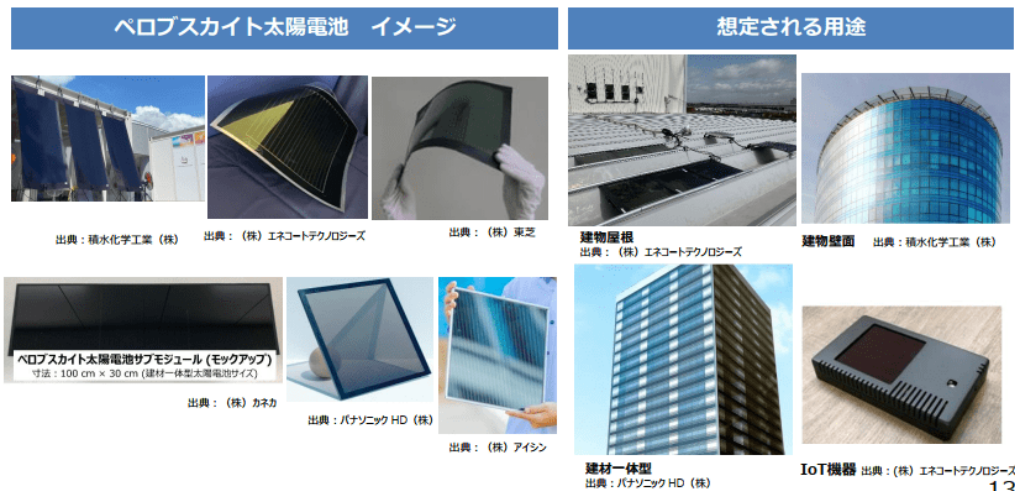
電気自動車の避難所での活用(令和6年能登半島地震時)



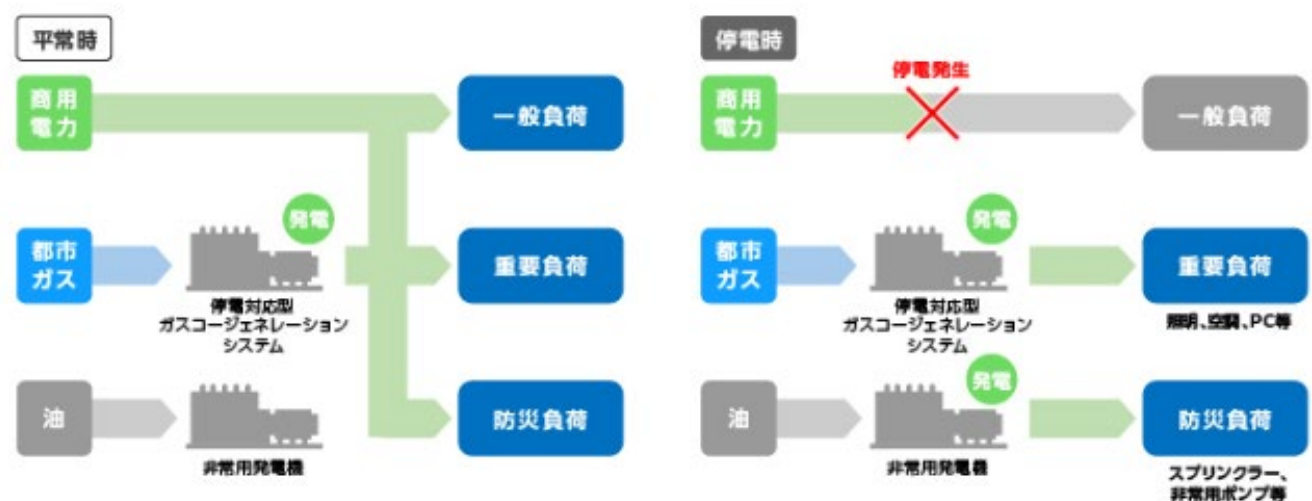
(出典)国土交通省

<<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/kyojinka/activities/05-2/>>

ペロブスカイト太陽電池(Airソーラー)



コージェネレーションシステム(CGS)による停電対応



(出典)経済産業省：次世代型太陽電池戦略、令和6年11月

<https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/perovskite_solar_cell/pdf/20241128_1.pdf#page=13>

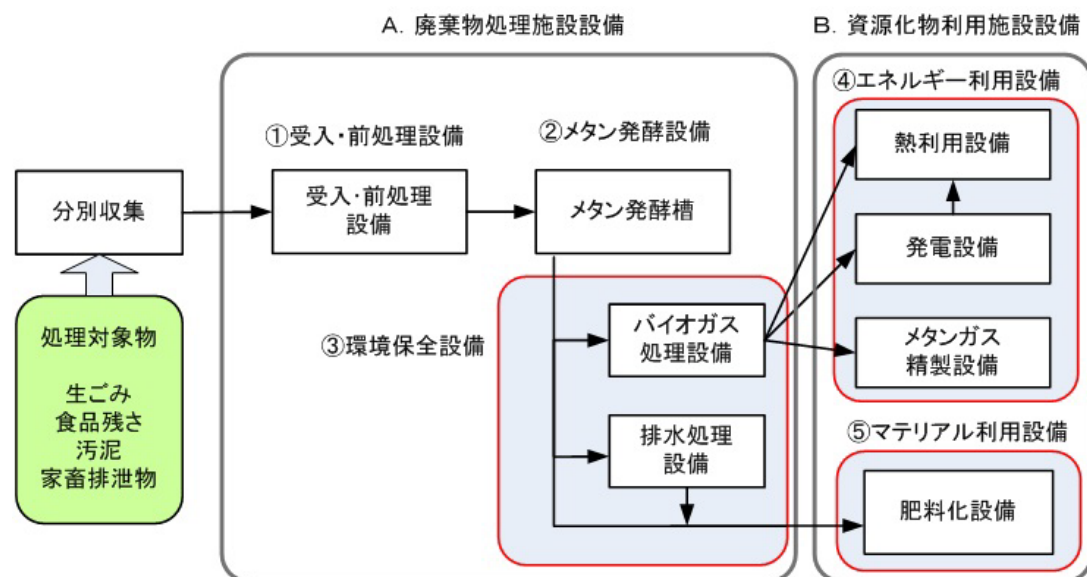
(出典)日本ガス協会<<https://www.gas.or.jp/gas-life/n-cogeneration/>>

分散型エネルギー資源(未利用エネルギー)

■ 未利用エネルギーの活用

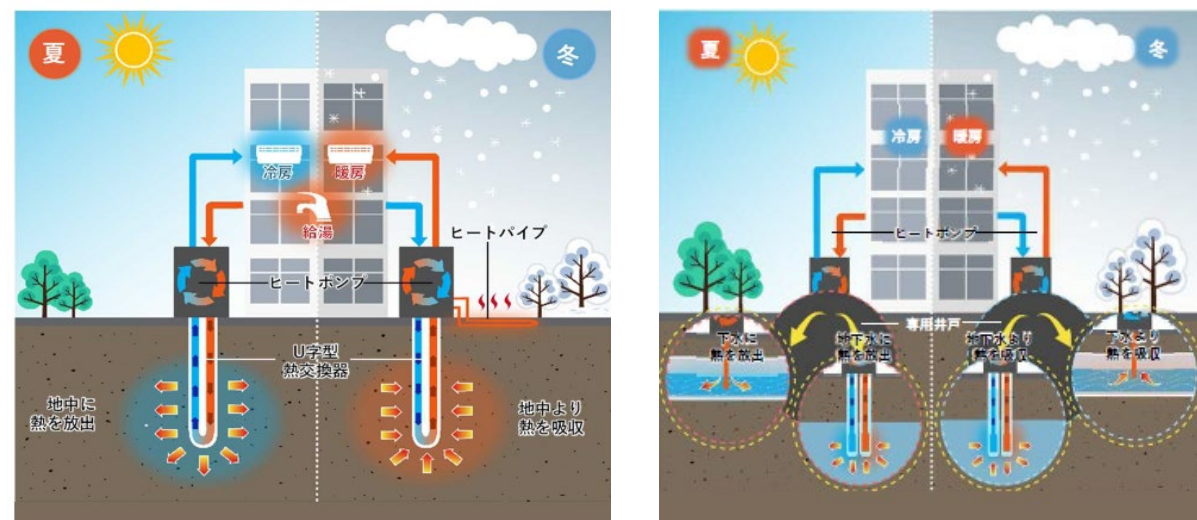
- バイogas(廃棄物系バイオマスのメタンガス化)(清掃工場、浄化センター)：ごみや下水汚泥より発酵過程を経て生産。発電機、都市ガスの燃料などとして有効活用が可能。脱炭素、電気・熱供給のレジリエンス強化に貢献。
- 再生可能エネルギー熱利用：地中熱、温度差エネルギー利用(地下水熱、下水熱)など。地中温度が季節変動が小さくなる特性を活用(夏冷、冬暖)。
 - ・ 地中熱：地中の熱を取り出し(地下200m程度)、空調や給湯等に有効活用
 - ・ 温度差エネルギー利用：地下水、河川水、下水等と外気温との温度差を利用、空調や給湯に有効活用
 - ・ 帯水層蓄熱システム(ATES：Aquifer Thermal Energy Storage)：地下水等の条件の適地において、ヒートポンプ排熱を帯水層に蓄熱し、熱エネルギーとして活用。省エネ、CO₂削減、再エネ調整力の供出等に貢献。

廃棄物系バイオマスのメタンガス化の技術



(出典)環境省 <<https://www.env.go.jp/recycle/waste/biomass/technical.html>>

地中熱利用(クローズドループ) 温度差エネルギー利用(地下水や下水熱利用)

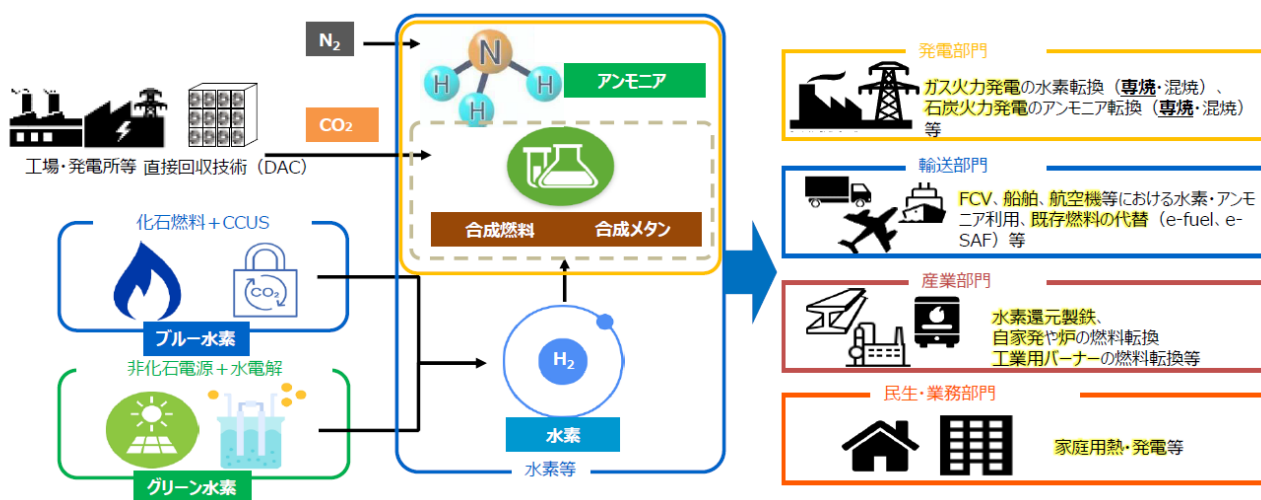


(出典)環境省：再エネ熱利用に関する技術概要(2024)
<<https://www.env.go.jp/content/000220231.pdf>>

燃料の転換、多様化

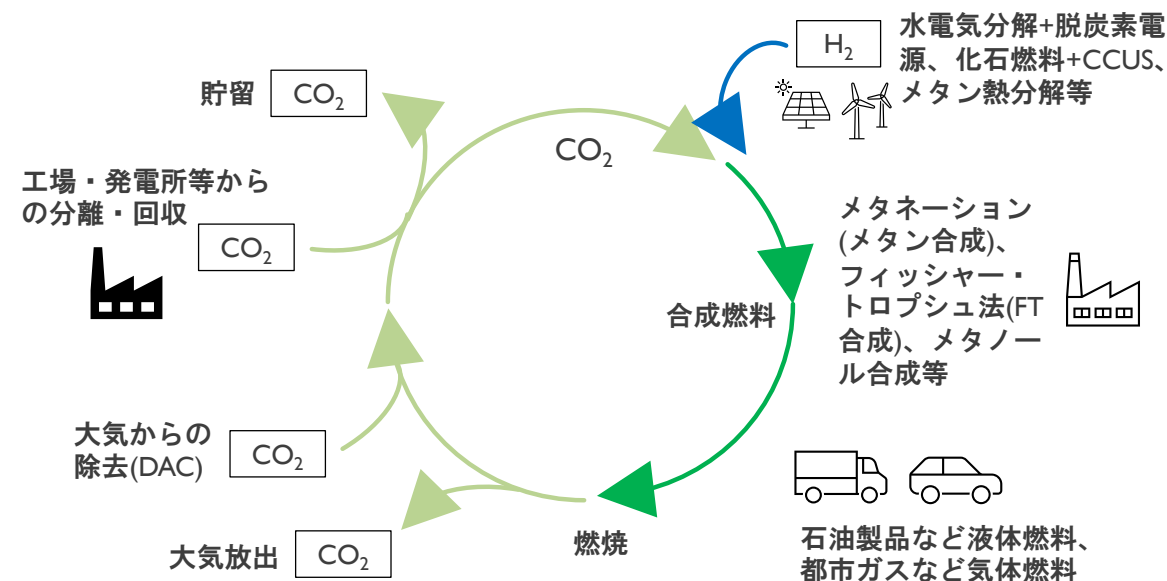
- クリーンエネルギーへの燃料転換による燃料の脱炭素と多様化・分散化によるエネルギーレジリエンスの両立
- 石炭や石油製品から天然ガスや電気、水素(グリーン水素、ブルー水素、ターコイズ水素等)、合成燃料(e-methane、e-fuel等)への燃料転換
- 水素・合成燃料の特徴：脱炭素(エネルギー利用のクリーン化、HTA部門のCO₂削減)、エネルギーレジリエンス強化(エネルギーキャリアの多様化・分散化、強靱なインフラ活用(都市ガス導管等)、燃料貯蔵インフラでの備蓄)、多様な資源より生産可能、様々な原材料にも利用可能
- 合成燃料(e-methane、e-fuel等)の利用は、既設インフラ活用によるコスト抑制、レジリエンス強化への期待(都市ガス高圧・中圧導管、住民拠点SSや災害対応型給油所等の活用)

水素等の供給源及び需要先



(出典)経済産業省<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/suisohou_01.html>

クリーン水素・合成燃料とカーボンリサイクル(イメージ)



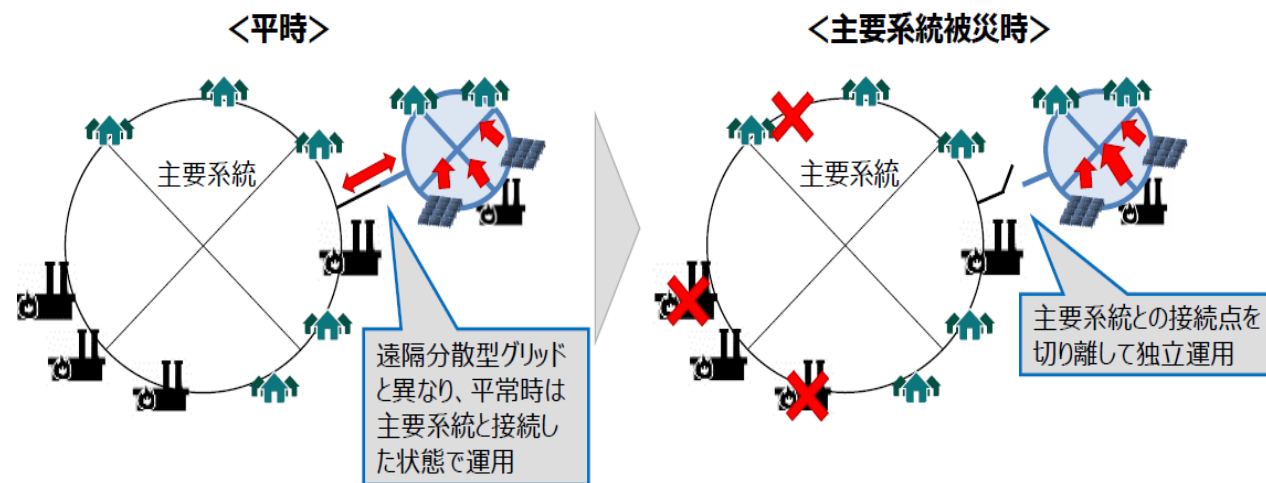
エネルギーインフラの強靱化(マイクログリッド)

- 自然災害に備えたマイクログリッド：再エネ活用による脱炭素とエネルギーレジリエンスの両立
- ・ 災害時の他、送電容量増強による電力系統の混雑緩和や再エネ出力抑制の緩和、地域の未利用資源の活用促進などへ貢献
- ・ 自営線敷設によるマイクログリッドは導入コストが比較的大きいため、企業等が自己投資のみで構築することは容易ではない
- ・ 災害時の防災対応ニーズの高い主体(病院、自治体、BCPニーズの高い企業等)を中心にした導入や、災害時のみならず平時も想定した技術や基盤のマルチユースが有益

地域マイクログリッド



平時・災害時の電力系統運用のイメージ



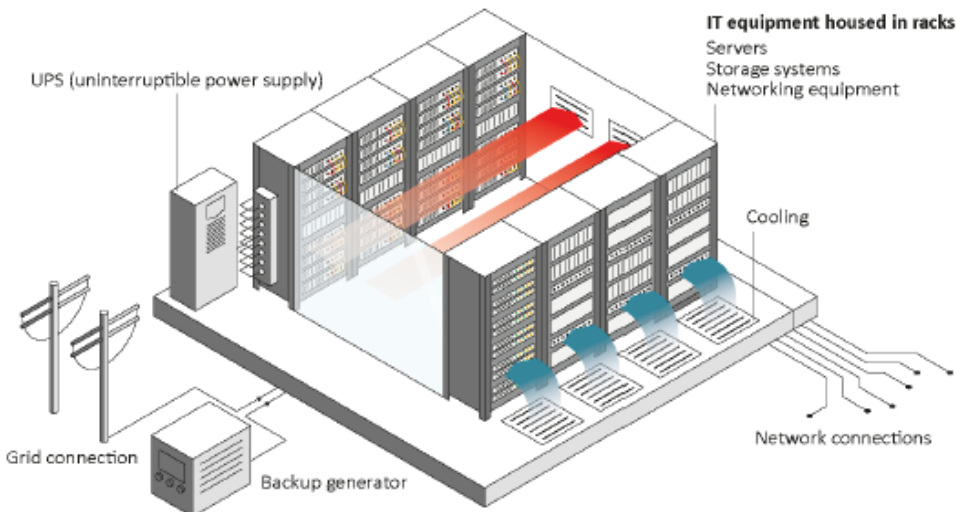
(出典) 経済産業省資源エネルギー庁：電力システムのレジリエンス強化に向けた論点(2019)

(出典) 経済産業省資源エネルギー庁：地域の系統線を活用したエネルギー面的利用システム
(地域マイクログリッド) について(2019)

電力需要増加の可能性

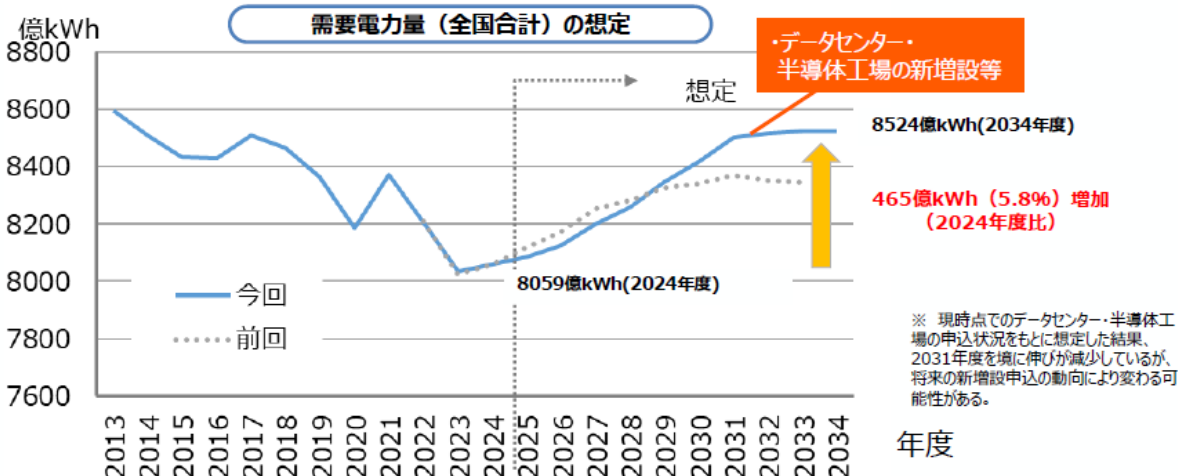
- 情報化社会の進展、AI需要の拡大に伴い、データセンターの電力消費が内外で拡大の見通し
- 日本の今後の電力需要も増加基調に転じる可能性。増加に見合う脱炭素電源投資が重要な課題とされている。
- 日本国内のDCは現状、東京等の大都市部に集中(国際海底ケーブルの陸揚げ拠点の近傍、DC利用ユーザーの集中、電力供給インフラの規模等)
- DC連系による系統混雑緩和への対策も重要な課題(オンサイトでの自家発電(再エネやCGS等)や蓄電池等の導入、需要抑制を前提とした系統接続等)

データセンターの概要



(出典) IEA : Energy and AI, Figure 2.1 (2025) <<https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>>

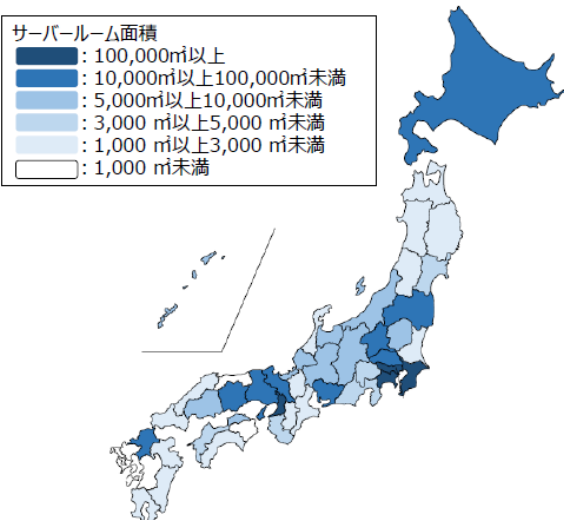
日本の電力需要の見通し



(出典) 経済産業省：資料 6 第85回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会
電力・ガス基本政策小委員会(2025年1月27日)

国内のデータセンターの立地状況

【データセンターの分布図】



【地域別のデータセンター立地状況】

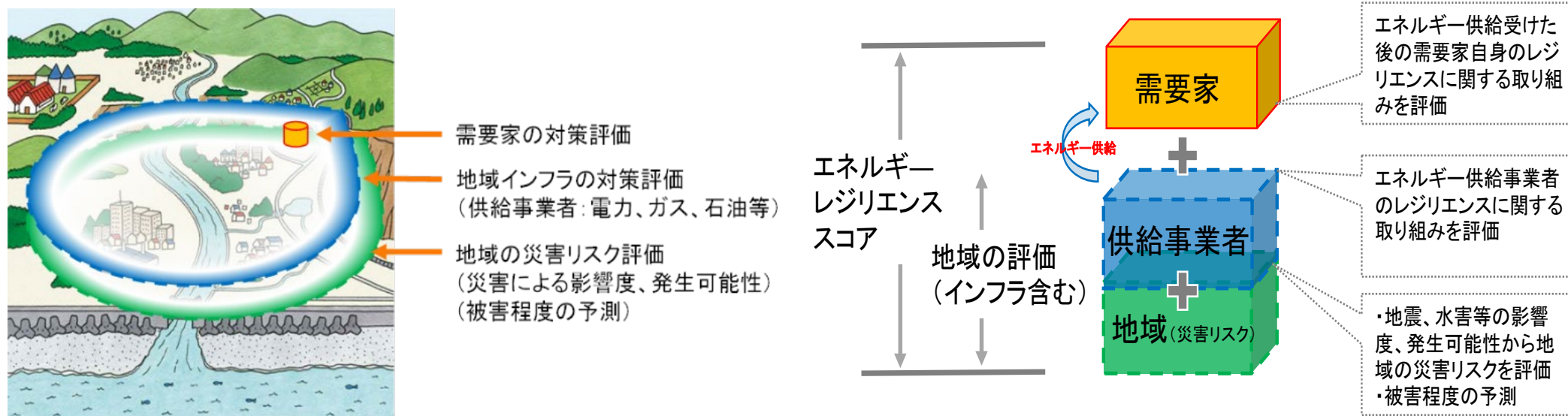
	地域別DC立地面積/棟数 (2023年)			
	面積 (㎡)	割合	棟数 (棟)	割合
北海道	17,290	1%	16	3%
東北	25,590	2%	40	8%
関東	1,070,450	64%	194	38%
中部	69,150	4%	78	15%
関西	411,550	24%	84	16%
中国/四国	37,920	2%	49	10%
九州/沖縄	47,960	3%	49	10%
合計	1,679,910	100%	510	100%

(出典) 総務省・経済産業省：デジタルインフラ（DC等）整備に関する有識者会合
(第7回事務局説明資料) (2024)

エネルギーレジリエンスの定量化の試み(エネルギーレジリエンススコア)

- 背景：エネルギーレジリエンスへの投資は、多額の費用を要するため(インフラ増強や燃料備蓄整備など)、一般にコスト負担が大きく、現状、経済的に容易ではなく、事業者が自律的にエネルギーレジリエンス強化を進めるインセンティブを確保するための支援や枠組みの構築が大切。
- エネルギーレジリエンスの定量化の試み(エネルギーレジリエンススコア)
 - ESG情報のE(環境)はCO₂排出量など数値化が進めやすいが、レジリエンスは数値化が難しい。
 - エネルギーレジリエンスの定量化によるその価値の可視化は、カーボンニュートラルとエネルギーレジリエンスの両立を図りつつ、バランスの取れたエネルギー投資を促進する上でも重要。定量化等を通じて、その効果を明確にすることにより、レジリエンス強化に向けた投資の促進が期待される。

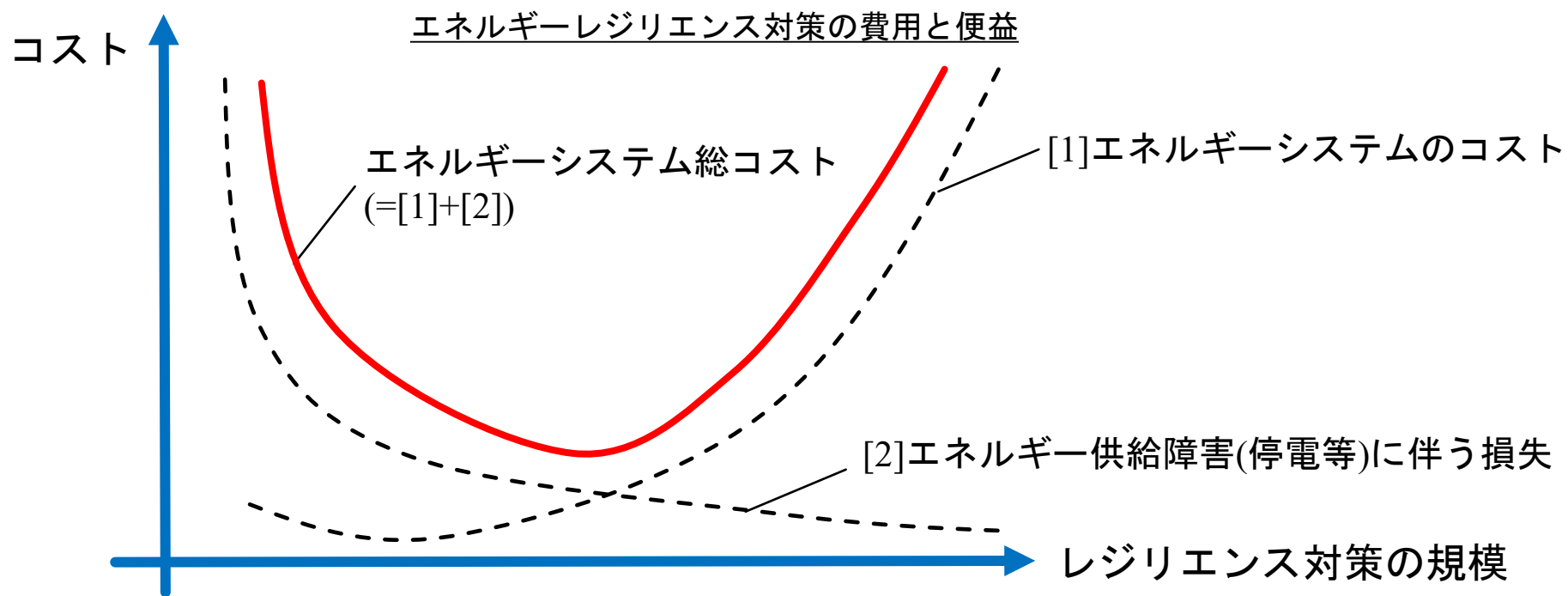
エネルギーレジリエンススコアの考え方



(出典) 経済産業省：令和2年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2021)(2021)<<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/1-3-2.html>>

エネルギーレジリエンス強化に向けた課題

- エネルギーレジリエンス対策が過小の場合、停電等に伴う損失が拡大の一方、レジリエンス対策が過大な場合、エネルギーシステムのコストが上昇。レジリエンス対策の適切な規模の検討、評価が重要。
「...対策を講じることによる「便益」と、対策のための「費用」の両者を総合的に評価することが必要である。」
(出典) (分担執筆) 藤井康正・小宮山涼一：第4章エネルギーシステム、古田一雄編著「レジリエンス工学入門」日科技連出版社 (2017)
- これまで経験のないような予期しえない危機(稀頻度リスク)への対応は、過去の経験も限定的であるため、容易ではない。
- 想定外の危機が発生する可能性を意識し、災害とその影響を可能な限り想定し、事前対策による被害影響の最小化と、適切なリソースを柔軟に活用しながら早期復旧する能力を確保し、想定外の危機にも対応するソフト面、ハード面での取組みが大切。



【参考】炭素排出量の動向

東京都の近年の炭素排出量は(2013年～2022年)、人口や所得が伸長する中でも、省エネや燃料転換を背景に減少傾向にあり、炭素排出量減少において省エネ要因の寄与が相対的に大きい。

■ 茅の恒等式(Kaya identity)

4要因分解の場合

$$CO_2 \equiv \frac{CO_2}{Energy} \times \frac{Energy}{GDP} \times \frac{GDP}{POP} \times POP$$

CO_2 : 炭素排出量

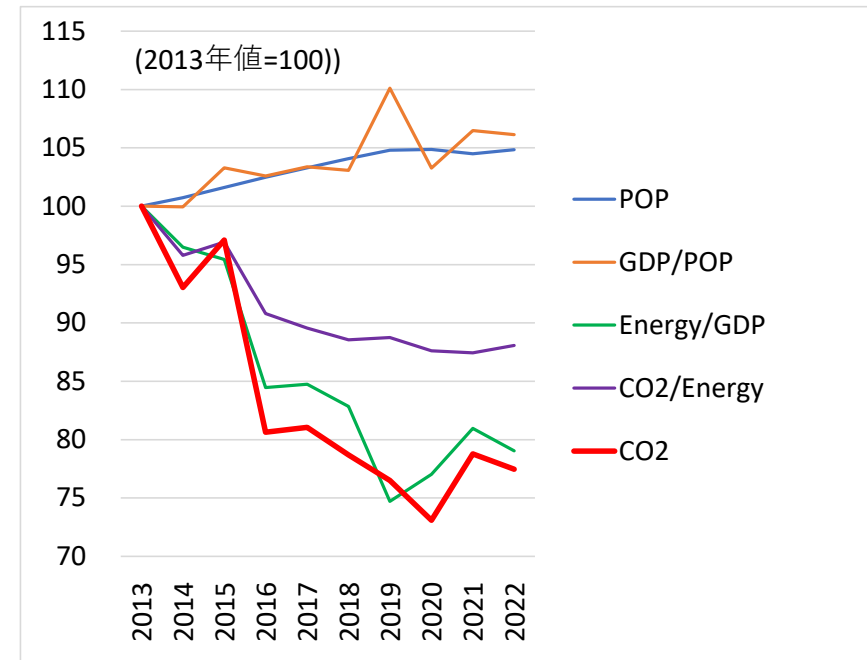
$\frac{CO_2}{Energy}$: エネルギー消費当り炭素排出量(燃料転換)

$\frac{Energy}{GDP}$: 都内総生産当りエネルギー消費量(省エネ)

$\frac{GDP}{POP}$: 一人当り都内総生産

POP : 人口

炭素排出量の動向と要因分解(東京都、2013年～2022年)



(出典) 経済産業省：都道府県別エネルギー消費統計、より作成

各要因の年平均伸び率(東京都)

	1990年～2013年	2013年～2022年
CO ₂	2.4%	▲2.8%
CO ₂ /Energy(燃料転換)	1.1%	▲1.4%
Energy/GDP(省エネ)	0.5%	▲2.6%
GDP/POP(一人当り所得)	0.3%	0.7%
POP(人口)	0.5%	0.5%

【参考】エネルギーレジリエンス定量化評価指標

代替性のあるエネルギー調達、イノベーション・設備投資、流通網の強靱性、非常時の備え

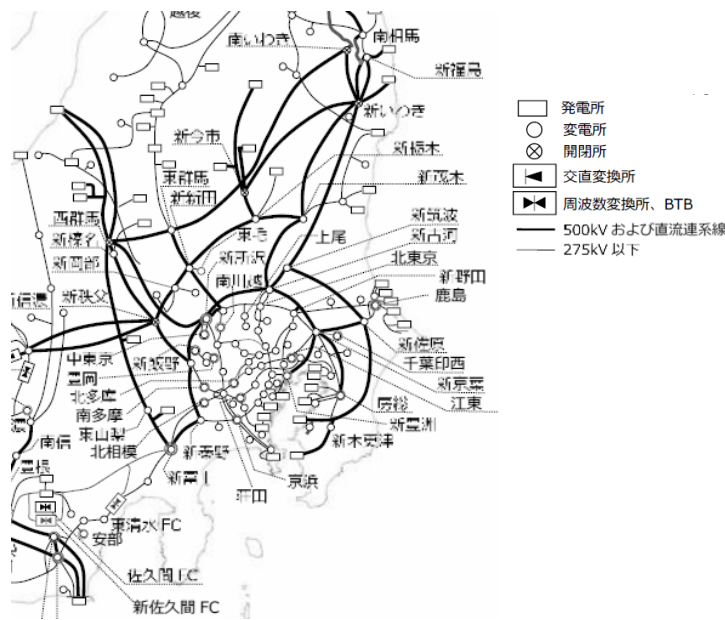
エネルギーレジリエンス定量評価指標のフレームワーク

「平時の予防活動」と「非常時の迅速な停止状態からの復旧」により、持続可能な成長に貢献する			
NO	重要項目（大項目）	重要項目（中項目）	定量評価項目
①	代替性のあるエネルギー調達	エネルギー種別の多様性	エネルギー種別の数
		個別エネルギー源の多様性	燃料調達先の多様性
			備蓄による備え
			供給方法の多様性
②	イノベーション・設備投資	各指標を飛躍的に高めるイノベーション・設備投資	各指標を飛躍的に高めるイノベーションの取組
			需要家における各指標を飛躍的に高めるイノベーションの導入
③	流通網の強靱性	流通網の強靱性	流通網の信頼性
		設備の強靱性	前提となる災害の想定
			自然災害に対応した設備設計
④	非常時の備え	エネルギー途絶時の自立性の確保	非常時の供給方法の多重性
			非常時設備の運転信頼性
		非常時の想定と備蓄	非常時のための備蓄
			非常時を想定した備え
		BCPの策定と着実な運用	実効性のある対策と訓練の実施
			災害時の情報発信
			サイバーセキュリティ

【参考】関東圏のエネルギーインフラ

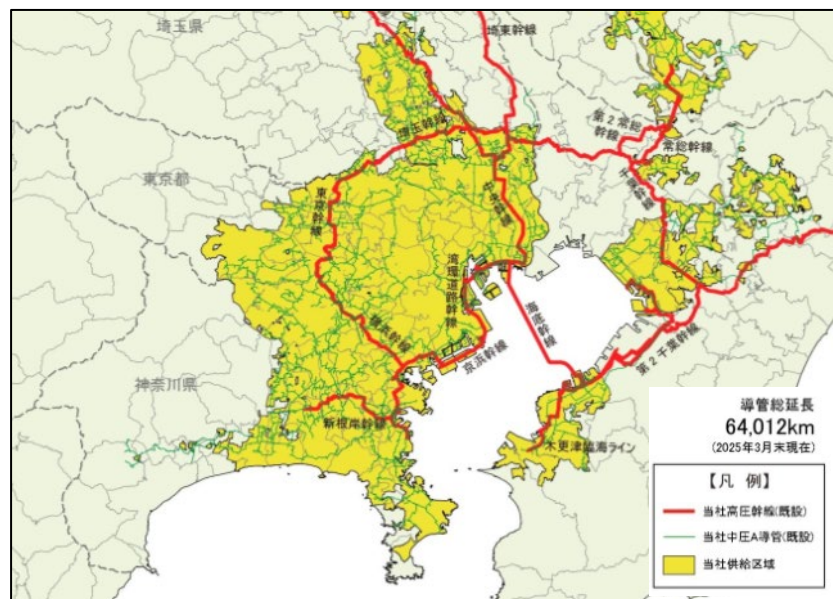
東京湾岸には現在、国内の火力発電設備容量の約4分の1(東京電力管内の最大電力負荷の約6割に相当)に加え、全国のLNG貯蔵容量の約3割、さらに国内製油所の原油処理能力の約3割強が集積

電力系統の状況



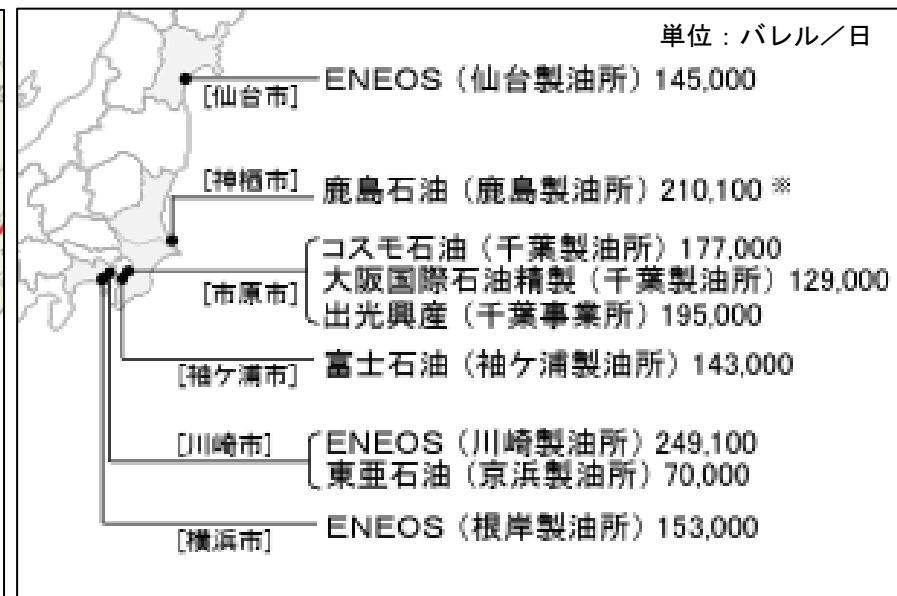
(出典) 電力広域的運営推進機関：2025年度供給計画の取りまとめ、より一部抜粋

都市ガス導管の状況



(出典) 東京ガスWeb<https://www.tokyo-gas.co.jp/network/gas/kyoukyuu_area/index.html>、より一部抜粋

製油所の状況

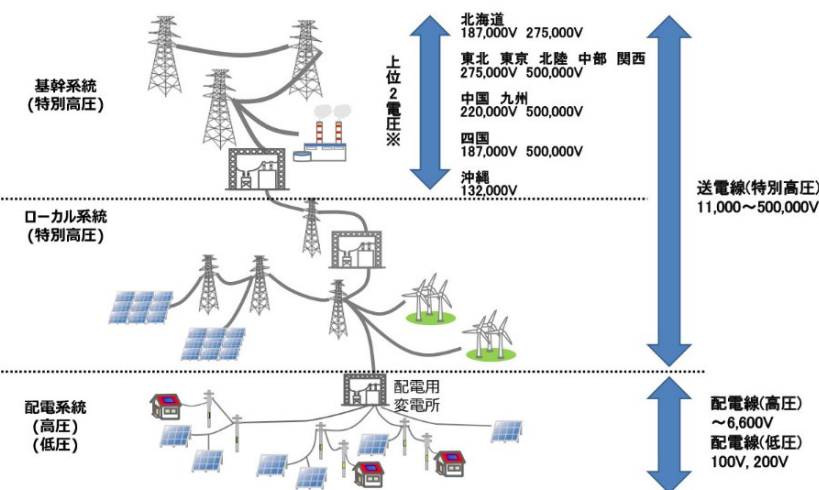


(出典) 石油連盟Web<<https://www.paj.gr.jp/statis/statis>>、より一部抜粋

【参考】エネルギーのサプライチェーン

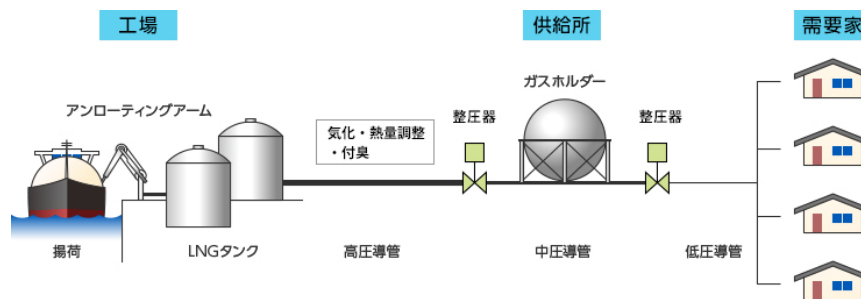
- 災害時に備えたエネルギー供給網(サプライチェーン)のレジリエンス強化が重要
 - 供給インフラ(生産、送配設備等)の災害に対する耐性強化、エネルギー供給余力の確保、災害時における情報発信の強化等

電力事業のサプライチェーン



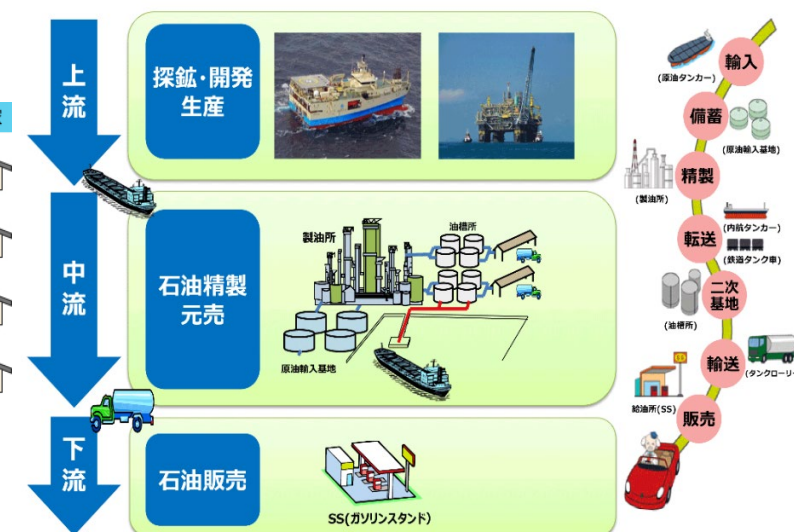
(出典) 電力広域的運営推進機関
<<https://www.occto.or.jp/grid/public/shikumi.html#shikumi>>

都市ガス事業のサプライチェーン



(出典) 日本ガス協会 <<https://www.gas.or.jp/chigai/>>

石油事業のサプライチェーン



(出典) 経済産業省
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/sekiyu_supplychain03.html>