

第II部

理想と現実の狭間で不確実性が深まる エネルギー転換の課題

7. 道路交通分野におけるグローバルサウスの多様な道筋

—— バッテリー電気自動車とバイオ燃料の普及に向けた取り組みと課題 ——

バッテリー電気自動車(BEV)が道路交通分野の脱炭素化に大きな役割を果たすとともに、大気汚染の低減、原油輸入の減少によるエネルギー安全保障の向上といった副次的な便益ももたらすことは論を待たない。また、多くの国・地域が、その生産面でも将来の産業競争力強化に向けて政策を強化している。ただし、脱炭素化に向けた道筋は国・地域の実情に応じ多様であり、これは道路交通分野も例外ではない。かかる観点から、IEEJ Outlook 2025³⁰では、ライフサイクルアセスメント(LCA)の温室効果ガス(GHG)排出量や使用費用(Total Cost of Ownership, TCO)の比較をパワートレイン(内燃機関車[ICV]、ハイブリッド車[HEV]、プラグインハイブリッド車[PHEV]、BEV)毎・地域(欧州先進国、ブラジル、東南アジア諸国連合[ASEAN]、インド)毎に行い、脱炭素化に向けた最適なパワートレインは国・地域の実情に応じて異なることを示した。

IEEJ Outlook 2026では、道路交通分野の脱炭素化のあり方をより総合的に考察するため、グローバルサウスの雄とも言えるインドネシア、ブラジル、インドが進む多様な道筋に着目する。具体的には、インドネシアのケーススタディーを通じて、BEVの生産・使用に伴う環境負荷、BEV普及に必要なインフラストラクチャー整備、重要鉱物の需給に及ぼす影響など、BEVの普及に向けたさまざまな社会的課題を分析するとともに、ブラジルとインドのケーススタディーを通じて、燃料の脱炭素化の選択肢として有望なバイオ燃料の副次的な政策効果、ポテンシャルや課題を評価する。

7.1 インドネシアにおけるBEVの国内生産拡大・普及への取り組み

インドネシア政府の政策

インドネシアは、東南アジア諸国連合(ASEAN)ではタイに次ぐ自動車生産国(2024年の生産台数119万7,000台)であり、新車販売台数(同年86万6,000台)はASEANで最大である³¹。さらに、インドネシアは、バッテリー電気自動車(BEV)のバッテリーに必要なニッケルの生産量では世界の51%を占めており(2023年)、BEV生産の世界のハブになることを目指している。

³⁰ <https://eneken.ieej.or.jp/data/12092.pdf>

³¹ 日本貿易振興会(2025) 主要国・地域の自動車生産・販売動向

https://www.jetro.go.jp/ext_images/_Reports/01/6f831adb699b3451/20250016.pdf

具体的には、インドネシア政府は、2020年に設定した低炭素排出車(BEV、プラグインハイブリッド車[PHEV]、ハイブリッド車[HEV]、燃料電池車[FCEV])の国内生産台数目標を2022年に撤回し、新たにBEVのみの国内生産台数目標として、2035年100万台の目標を導入した(表7-1)。

表7-1 | インドネシアのBEV国内生産台数の実績と目標

(1,000台)

	2024年実績	2025年目標	2030年目標	2035年目標
BEV生産台数	42	400	600	1,000
【参考】旧目標				
国内総生産台数	1,197	2,000	3,000	4,000
うち低炭素排出車(LCEV)	112	400	750	1,200

注: LCEVは低炭素排出車(BEV、PHEV、HEV、FCEV)

出所: BEV目標は2022年、生産総数とLCEVの目標は2020年のインドネシア工業省規則、実績はAssociation of Indonesia Automotive Industries (GAIKINDO)

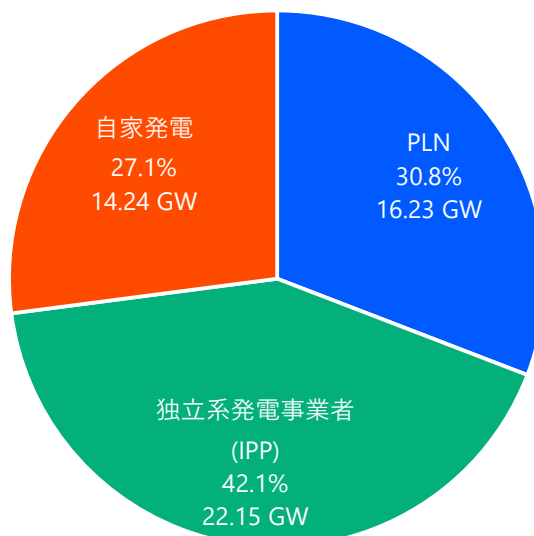
また、国内のBEV保有台数としては2030年に四輪車(乗用車と商用車) 200万台(2024年末では7万6,000台程度)、二輪車1万3,000台との目標を掲げている。国内の既存の産業基盤とともに、重要鉱物の賦存資源を活用した野心的な産業政策と言えるであろう。

環境面での評価

このようにインドネシアは豊富なニッケル資源を活用したBEV普及、国内生産化を進めているが、ニッケル製錬プロセスにおけるエネルギー消費の大部分を石炭(熱源)および自家発石炭火力に依存しており、これが二酸化炭素(CO₂)排出の増大につながっているとの指摘がある。インドネシア政府は2021年、「2023年以降、新規石炭火力建設停止」を表明したが、例外規定を設け、ニッケル製錬や産業団地向けの自家発石炭火力については引き続き新設を許可している。自家発石炭火力については、日本も参加する「公正なエネルギー移行パートナーシップ」(JETP)による石炭火力の早期退役支援の対象にもなっていない。実際のところ、インドネシアにおける稼働中石炭火力の設備容量で自家発の占める割合は3割であるが、建設・計画中の設備容量では3分の2を占める(図7-1、表7-2)。

さらにインドネシアでのニッケル製錬では、採掘による森林伐採や海洋生態系への影響が現実のものとなっているほか、ニッケルの硫化鉱石からニッケル硫酸塩を精製する過程で二酸化硫黄(SO₂)が排出されるため、適切な排出規制が導入されなければ地域的な大気汚染も懸念される。

図7-1 | インドネシアの稼働中石炭火力の供給者別構成[2025年7月]



注: PLNの数値にはPLN 100%子会社による発電所を含む

出所: Global Coal Plant Tracker、電力供給事業計画(RUPTL) (2025–2034)より作成

表7-2 | インドネシアの石炭火力の供給者別の特徴

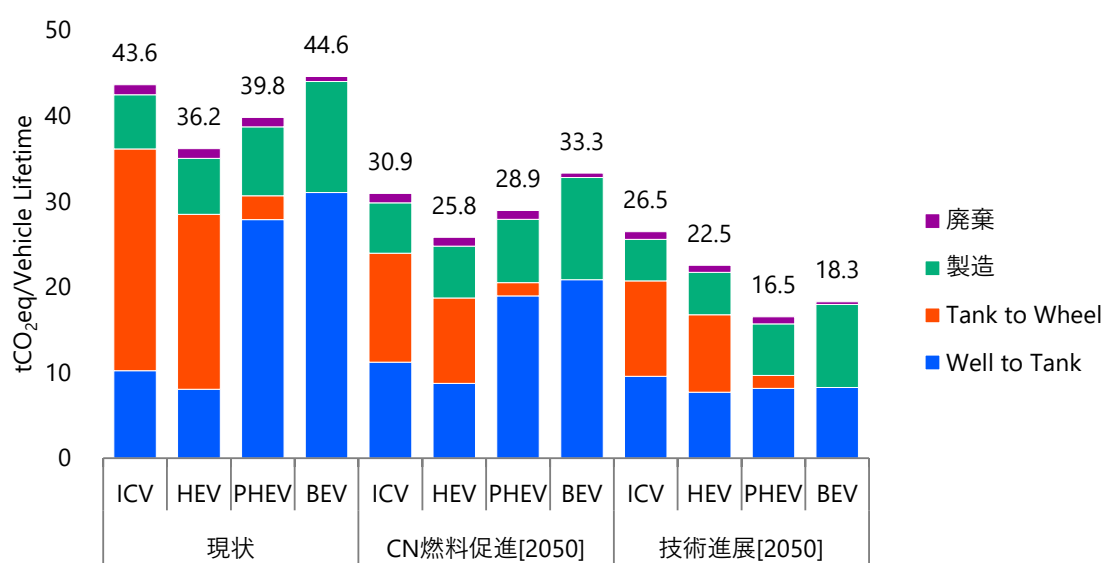
	PLN	独立系発電事業者(IPP)	自家発電
稼働中(GW)	16.2	22.1	14.2
建設・計画中(GW)	1.7	4.2	11.7
中止(2021年以降) (GW)	7.0	12.0	4.1
用途	一般向け供給	PLNへ売電	産業内電力 (製錬、鉄鋼等)
所有・運営主体	国有	国内事業者、 国外電力企業等	現地製錬事業者、 中国資本が中心
政策・規制対象	JETPによる早期廃止、 新規建設凍結の対象	JETPによる早期廃止、 新規建設凍結の対象	JETP対象外 ⇒新規建設が可能

これらの背景には中国資本による影響が大きいと言われている。インドネシア政府は、従前よりニッケル鉱石の輸出を制限し、国内での製錬を促進する政策を推進してきた。その結果、中国資本を中心に多くの製錬所が稼働・計画され、インドネシアにおけるニッケル製錬の4分の3は中国資本によるものと言われている。これらは、製錬所と小規模・低効率な石炭火力を離島にセットで建設している。また、中国政府は、2021年、「国外での新規石炭火力支援停止」を表明したが、一帯一路関連の工業団地の自家発は例外としている。本来であれば気候変動問題や大気汚染への対処となるBEVだが、その生産のために、しかも中国資本のた

めに、CO₂排出量が増え、その他の環境負荷がもたらされるようになれば本末転倒であろう。サプライチェーンも含め、環境負荷を総合的に考える必要がある。

また、そもそもインドネシアにおいて、BEVのLCAで見たGHG排出量は他のパワートレインより小さいのであろうか。2023年においてインドネシアの電源の3分の2は石炭火力であり、電力の排出係数は829 gCO₂/kWhと、世界平均の575 gCO₂/kWhの1.4倍となっている。このため現状では、BEVのLCAで見た排出量はICVより高く、将来(2050年)も電源の脱炭素化が技術進展シナリオ程度まで進まなければ、この傾向は変わらない(図7-2)。

図7-2 | インドネシアにおけるLCAで見た自動車からのGHG排出量



注: CN (カーボンニュートラル)燃料促進はレファレンスシナリオに技術進展シナリオのCN燃料比率を組み合わせたシナリオ

ジョコ前政権は第1期に35 GWプロジェクトと呼ばれる発電能力の拡大を経済成長の基盤として実施し、主に石炭火力発電を大幅に拡大してきた。電力需要拡大のペースが想定を下回ったため、インドネシアでは足元では石炭火力の供給能力が過剰気味と言われている³²。上述の電力の排出係数は全日の全電源平均であるが、BEVの普及により余剰石炭火力の稼働増となればCO₂排出量がさらに増える可能性がある。

また、BEVの導入による影響は、地域の電源構成、および充電行動に大きく依存する(表7-3)。

³² <https://www.transitionzero.org/insights/indonesia-net-zero-curve>

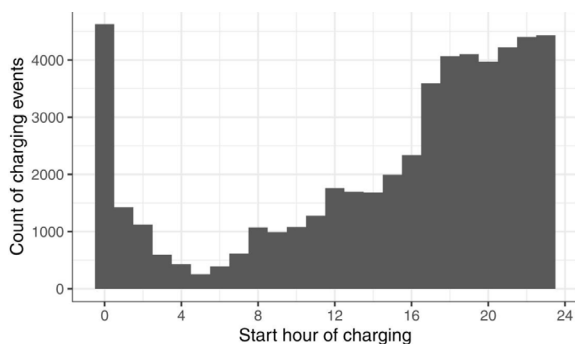
表7-3 | BEVの充電時間パターンと年間需要曲線への影響

BEVの充電パターン	影響(年間需要曲線)	系統・電源への含意
22時以降の夜間充電が主流	冬季・夏季の夜間需要の谷間部分が上昇	風力やベースロード電源の活用が向上。不足時は火力による追加的な発電が必要
17時以降の帰宅直後に一斉充電	夏季・冬季の夕方ピークがさらに上昇	余剰火力の稼働増により、系統負荷が増大
昼間充電	春～秋の昼間需要が上昇	太陽光の吸収に有利

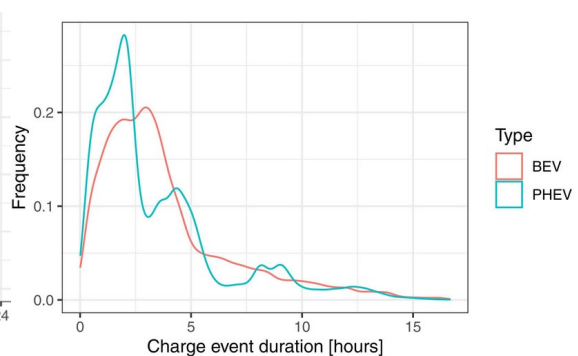
例えば、世界でBEV普及が最も進んでいるノルウェーでは、BEVによる電力需要の増加は見られるものの、水力発電が電源構成の90%以上を占めているため、ベースロード電源の有効活用が進んでいる。一方、BEV導入が急速に進んでいる米国カリフォルニア州では、充電の多くが帰宅後の17時以降に開始され、2～3時間程度を要するため、需要の夜間ピークに重なる傾向がある(図7-3)。加えて、同州の電源構成は太陽光発電に依存しており、日中に過剰電力が発生しう一方、夜間の追加需要は火力発電による賄われるため、CO₂排出量の増加が懸念される。

図7-3 | 米国カリフォルニア州における充電パターンと充電時間

充電パターン



充電時間



出所 :Alan J., Jake H., (2022) Distribution grid impacts of electric vehicles: A California case study, iScience 25 1-16.

インドネシアにおいても将来的に電源の脱炭素化が進めば、太陽光が主力電源になることが期待される。しかし、仮に全日の全電源の平均排出係数が低減したとしても、充電が17時以降に集中すれば、マージナル電源として依然として安価な石炭火力が稼働し、排出削減効果が限定される可能性がある。その結果、図7-2に示すBEVのWell-to-Tankの排出量は現状比で1.3倍、2050年には1.6倍～3.8倍に達する可能性がある。そのため、まずは石炭火力の脱炭素化、および再生可能エネルギーの導入が急務であろう。さらに、再生可能エネルギー

の特性と、BEV充電タイミングとの整合性を考慮して、太陽光発電が利用可能な昼間や需要の少ない深夜に充電を誘導することが望ましい。具体的には、時間別料金制による充電シフト、スマート充電技術の普及など適切な政策設計が不可欠である。逆にこれらが実現すれば、BEVは排出増加要因ではなく、柔軟な系統調整資源として活用できる可能性も有している。

インフラストラクチャーコストの評価

BEVの普及に当たっては、電力需要の増大に対応するための、電源確保および送電網の強化が不可欠である。特に急速充電器の普及は、利用者の利便性を向上させる一方で、ピーク需要を大幅に押し上げ、さらに都市部への需要集中により送電網への負荷を増大させることが想定される。仮にインドネシア政府が掲げる2030年のBEV普及目標(四輪車200万台)が達成され、その後も普及が加速して2040年に1,000万台に達した場合、これらのBEVの半数が16時から22時の時間帯に充電すると、15 GW以上の追加電力需要が発生する可能性がある。インドネシア政府は、発電設備容量を2025年の106 GWから2040年に242 GW程度まで拡大する計画を示しているが、15 GWの追加需要は決して小さくない規模と考えられる。さらに、地域や季節によって電力供給に余裕がない場合、蓄電池を含む発電設備や送電インフラストラクチャーの増強が必要となる可能性が高い。スマート充電が普及しなければ、巨額の追加的インフラストラクチャー投資を招くことになりかねない。

さらに、充電インフラストラクチャーの整備にも国家予算が必要となる。インドネシアの場合、2030年にBEV 15台につき1基の充電器を整備しようとしており、現状では中速充電基が3,202基であるところ、2030年までに計62,918基の充電設備(中速30,796台、高速19,538台、超高速12,584台)を整備することを目標としている。このために必要な予算を推計すると、今後6年間で計約23兆ルピア(約2,000億円)が必要となり、国家補助率50%の場合、1年間当たりではインドネシアの国家予算の0.05%となる。日本でも同様に2030年までに30万基の充電器を設置する目標があるが、同様の推計をすると年間国家予算比では0.03%であり、BEV充電器のコストが世界どこでも大差ないことを踏まえれば、当然ながら途上国のほうが相対的にコスト負担は大きくなる。

BEVの導入には当然ながら、インフラストラクチャー以外にも一定の政策コストがかかる。この政策コストには、

1. BEV購入者に対するインセンティブ(インドネシアの場合、付加価値税の軽減(11%から1%に、国産化率40%以上のモデルに限る)、奢侈税(15%程度)の免除)
2. BEV保有者に対する使用コストの軽減(インドネシアの場合、BEV保有者に対する午後10時～午前5時の電力料金の30%軽減)

3. BEV生産者に対するインセンティブ(インドネシアの場合、BEVまたはBEV用バッテリー、モーター等の生産者に対する法人税減税)

などがある。正確な財政負担の評価は困難であるが、上記1.および2.により足元で年間5兆～6兆ルピア(430億～520億円)程度の国家予算が必要と推定される。

その他

熱帯地域の国々では、高温におけるBEV使用によりバッテリーの性能が低下することにも留意すべきであろう。3万台のBEVの実測から、理想的な条件に比して100°C (37.8°F)では、走行距離が平均で17%～18%減少するとの調査結果や³³、経年劣化も温暖地域と高温地域では4年間の使用でバッテリー残容量に5%～6%の差が生じたとの調査結果もある³⁴。また、使用上の注意として、多くの委託者ブランド名製造者(OEM)は、高温下かつ満充電状態での駐車や高温・低温下での充電を避けるよう推奨している。

さらに、BEV全般の課題として重要鉱物の使用量が多く、BEVの大量普及により重要鉱物の需給バランスに支障を来し、BEVの車体価格が高まるリスクがある。加えて、重要鉱物製品の供給は中国への依存がきわめて高く、輸出規制などによる供給途絶のリスクにもさらされている。BEVの重要鉱物の使用量は、ICVの5倍、HEVの3倍、PHEVの2倍と評価される(図7-4)。IEEEJ Outlook 2024³⁵の分析と比較すると、リン酸鉄リチウムイオン(LFP)バッテリーの普及もあり、BEVと他のパワートレインとの差は縮小したものの、引き続きBEV普及による影響は注視する必要がある。

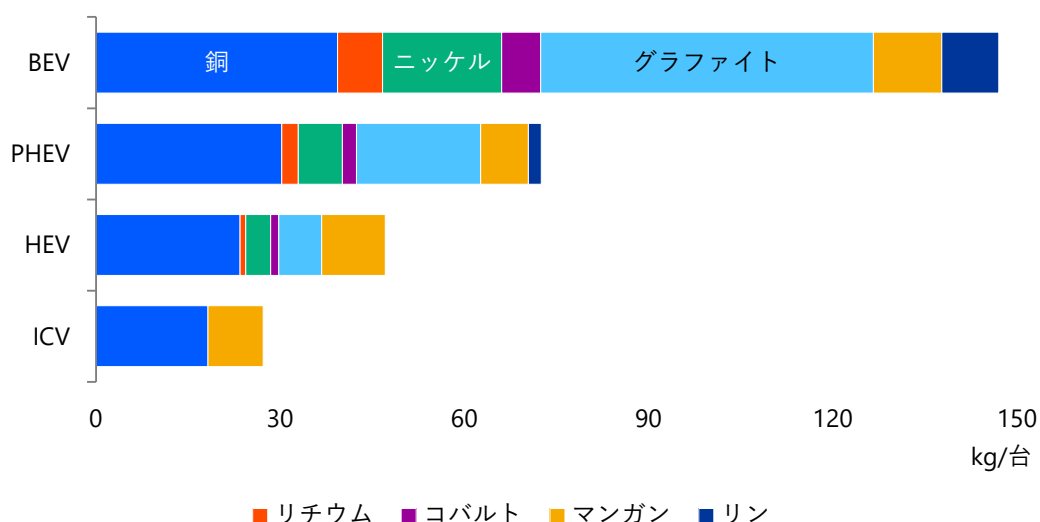
BEVの普及に伴い、各国で課題となっているのが、ガソリン税収の減少への対応である。例えば、米国では「1つの大きな美しい法案」(OBBBA)の下院通過案には、BEV所有者に年間\$250の課徴金を課す内容が盛り込まれていた。これは、最終的にはOBBBAにおいて削除されたが、米国の州レベルではBEV保有に対し年間\$100～\$200程度の課徴金を課す州がすでに多くみられる。日本を含め、今後各国で議論が行われるであろう。

³³ Blake Hough and Liz Najman, How Hot Summer Weather Affects EV Range, Recurrent, June 2025.
<https://www.recurrentauto.com/research/what-a-c-does-to-your-range>

³⁴ Charlotte Argue, How long do electric car batteries last? What analyzing 10,000 EVs tells us..., GEOTAB, July 2025. <https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/>

³⁵ <https://eneken.ieej.or.jp/data/11380.pdf>

図7-4 | 重要鉱物の乗用車1台当たり使用量



7.2 ブラジルにおけるバイオエタノールの活用

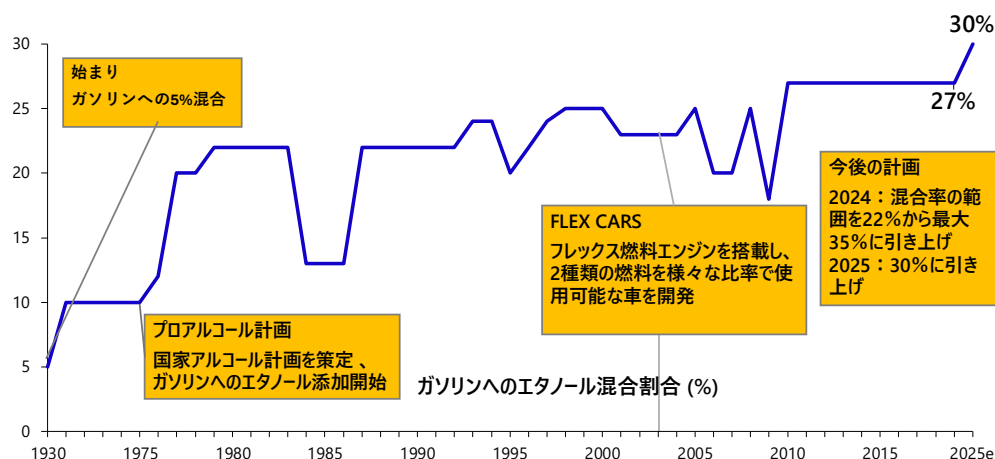
ブラジルはバイオエタノールのガソリンへの混合が世界で最も進んでいる国である。その混合率は27%と世界で最も高かったが、2025年8月にさらに30%にまで引き上げられた。このガソリンへの混合率は規制値だが、実績としては規制値を上回る45%という高い比率を達成している。これは、フレックス車(バイオエタノール0%~100%のいかなる混合率でも走行できる車)の普及(2023年のブラジル国内の新車販売のうち78.4%がフレックス車)、政府によるバイオエタノールへの燃料費補助などに加え、以下の歴史的な要因もあって可能となったと考えられる。

ブラジルにおけるバイオエタノールのガソリン混合は、長い歴史を持ち、約100年前、1931年に5%から始まった。当然ながら、当時は気候変動問題は顕在化しておらず、サトウキビ産業への支援としてバイオエタノールの運輸部門での活用が始まったという。その後、第2次世界大戦時には、原油の節約のため本格的にバイオエタノールの生産が開始され、混合率も10%に高められた。さらに1970年代の石油危機を受けて混合率は20%となり、その後2000年以降にフレックス車の開発・導入が進み、現在に至っている(図7-5)。

図7-5 | ブラジルにおけるバイオエタノール混合の歴史

copersucar

ブラジルのエタノール混合の歴史



出所: Copersucar

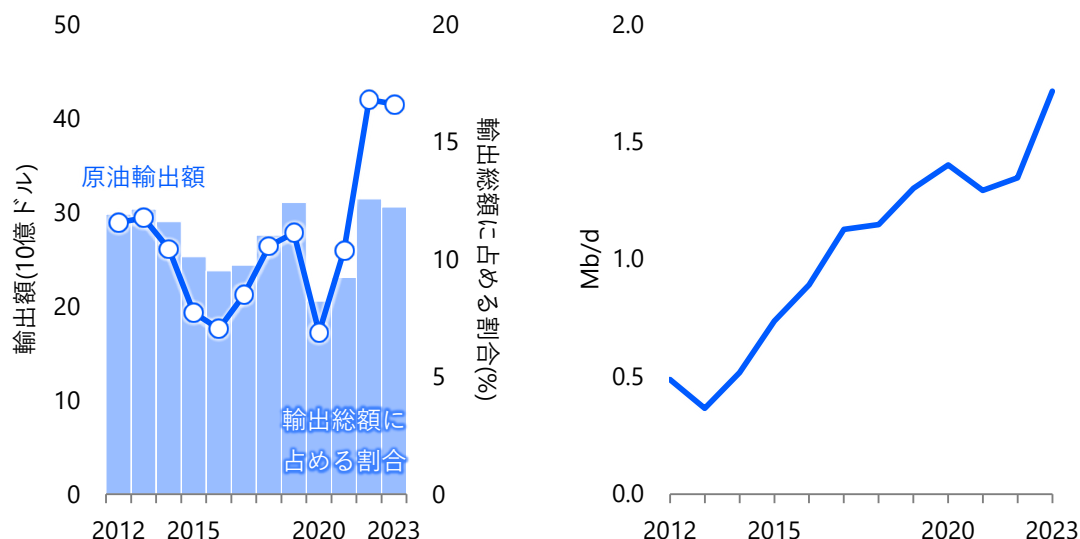
このようにブラジルでのバイオエタノールの生産は、同国のエネルギー安全保障にこれまで大きく貢献している。エネルギー自給率は2023年で116%に達し、エタノール等のバイオ燃料はブラジルの一次エネルギー供給の33%を占めている。ブラジルは産油国でもあるが、バイオエタノールの生産増によりガソリンの国内消費を減らし、原油の輸出量を増やす一助となっている。具体的には、最近10年間でブラジルの原油輸出量は4倍になり、総輸出額の12%～13%を占めるなど、原油輸出による外貨獲得に寄与している(図7-6)。例えば、2023年度の国内エネルギー消費量は470 PJ増加したが、原油で110 PJ、バイオ燃料で320 PJを賄った。当該年では原油輸出が550 PJ(日量25万バレル)増加しているが、これはバイオ燃料の生産増がなければ成しえなかったであろう。

ブラジルのバイオエタノール政策は、自動車分野の産業競争力向上にもつながっている。前述のとおり、ブラジルでは年間新車販売約250万台の8割がフレックス車となっているが、新車販売に占めるブラジル国内生産車の比率も8割～9割で推移しており、フレックス車というブラジル国内市場特有の車両の普及が、自動車の高い国内生産比率の維持にも貢献していると考えられる。また、農業分野におけるサトウキビ生産の従事者の割合は2000年代に4%から8%に増加しており、地域の農業振興・雇用創出にも一役買っている。

図7-6 | ブラジルの原油輸出

原油輸出額と輸出総額に占める割合

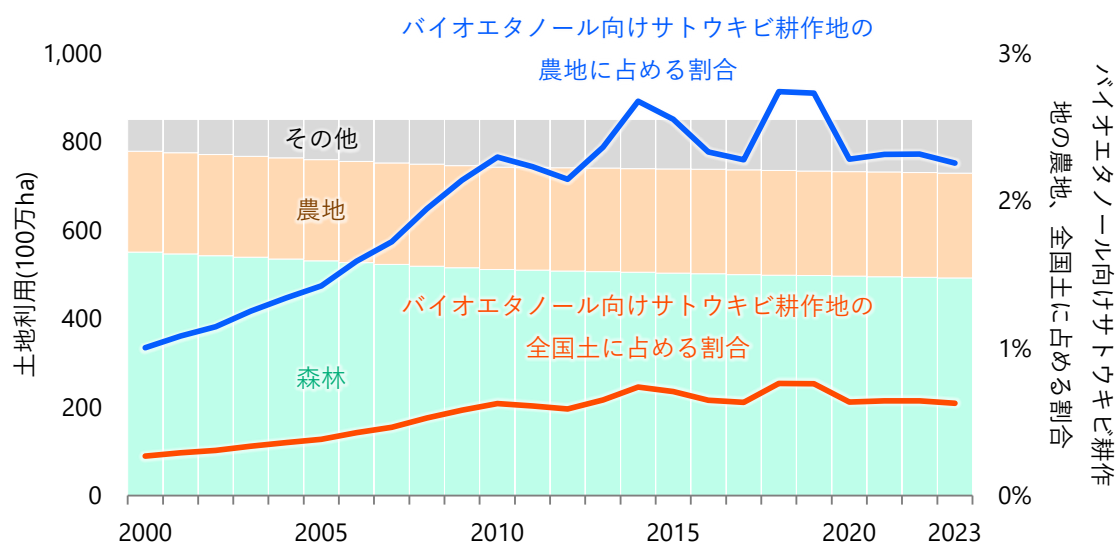
原油輸出量



出所: Trendeconomy、経済協力開発機構(OECD)、米連邦準備制度経済データ(FRED)から作成

他方、ブラジルに限らずどこの国でもバイオエタノールの活用には課題が指摘される。バイオ資源の利用拡大で常に懸念されるのが、耕作地拡大による森林破壊につながりかねない土地利用変化である。ただ、ブラジルについては、その国土面積や農地面積全体に占めるバイオエタノール向けサトウキビ耕作地面積の割合は安定的に推移しており、土地利用変化による影響は少なくとも現状では限定的と見られる(図7-7)。

図7-7 | ブラジルの土地利用、バイオエタノール向けサトウキビ耕作地割合

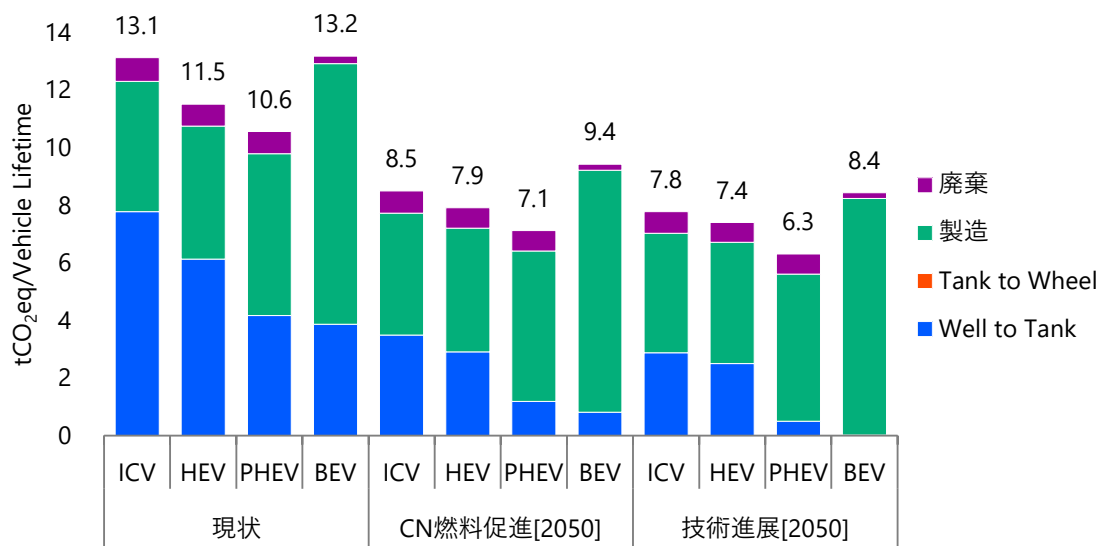


出所: 世界銀行データベースより作成

また、ブラジルのサトウキビ業界は、バイオエタノール生産に当たってのカーボンフットプリント(CFP)低減に取り組んでおり、2024年におけるIEEJの現地調査でも、バイオエタノールの副産物として輸送用トラック用途等のバイオガス生産、肥料用途利用、とうもろこしの二期作による生産、サトウキビの残渣のバガスを発電のみならず第二世代バイオエタノールの生産に利用、さらにはバイオエネルギー炭素回収貯留(BECCS)³⁶の導入検討という先進的な取り組みまで見られた。ブラジルは、バイオエタノールの輸出拡大にも取り組んでいるが、その国際市場での競争力確保にはCFP低減が不可欠と認識している。今後はCFP算出のアカウンタビリティの向上、さらなる技術開発などが課題となろう。

ブラジルにおけるライフサイクルアセスメント(LCA)での温室効果ガス(GHG)排出量を分析すると、バッテリー生産で大幅な二酸化炭素(CO₂)排出増となるバッテリー電気自動車(BEV)に比して、バイオエタノール100%燃料とすれば、足元で内燃機関車(ICV)、ハイブリッド車(HEV)、プラグインハイブリッド車(PHEV)のCFPはBEVより小さく、将来においてもBEVのCFPが最も大きいという傾向は揺るがないとの結果となった(図7-8)。ブラジルの電源構成は水力中心であり、そのCO₂排出係数は79 kgCO₂/kWhと世界平均576 kgCO₂/kWhと比してきわめて低く、BEVに有利であるにもかかわらず、それでもなおバイオエタノールがLCAで見ればより低炭素であることが示された。

図7-8 | ブラジルにおけるLCAで見た自動車からのGHG排出量



注: CN燃料促進はレファレンスシナリオに技術進展シナリオのCN燃料比率を組み合わせたシナリオ

以上示したとおり、ブラジルにおけるバイオエタノールの利用拡大は、その豊富な国内バイオ資源を活用しつつ、気候変動政策とともにエネルギー・経済安全保障政策、自動車や農業

³⁶ バイオマス発電からのCO₂の回収・貯留であり、ネガティブエミッション技術の1つ。

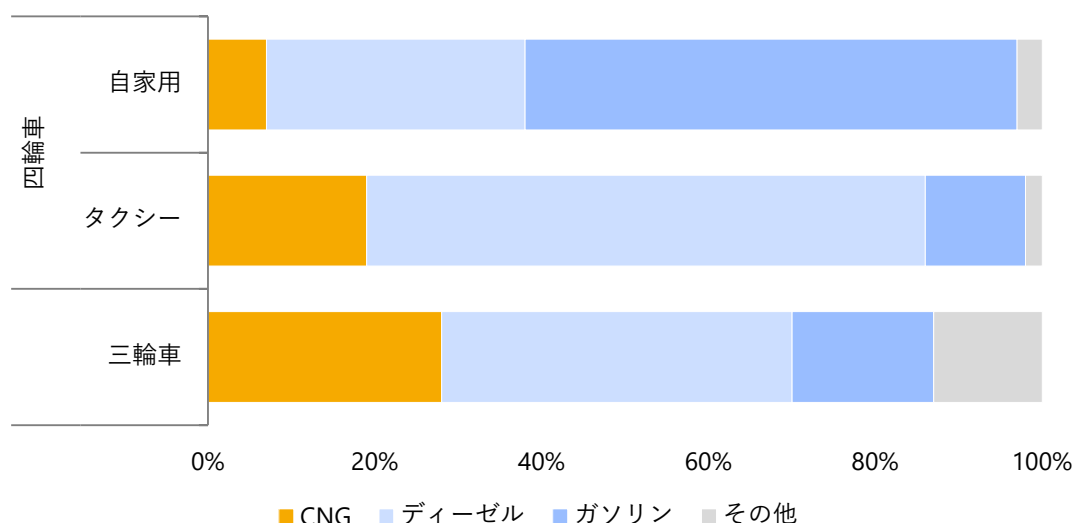
の産業政策といった幅広い観点から進められている。バイオエタノールは、HEVやPHEVと組み合わせればBEVを上回る環境性能を発揮すると考えられ、道路交通分野の脱炭素化に向けた多様な道筋の好例と言えるだろう。

2024年4月、日本・ブラジルの首脳は、バイオ燃料などの持続可能な燃料とHEVのような高性能輸送機器を組み合わせたイニシアティブ、「持続可能な燃料とモビリティのためのイニシアティブ」(ISFM)を立ち上げるとともに、両国は2025年9月に第1回持続可能な燃料閣僚会議を関西で主催した。今後、二国間の協力をどうマルチに広げてゆくか、国際協力の拡大に期待したい。

7.3 インドにおけるバイオガスの活用

インドでも、バイオエタノールの活用を積極的に進めており、2014年にはわずか1.5%だったエタノール混合率が10年余りで20%まで拡大した。他方、より注目されるのは、調査した限りにておいては世界で唯一、運輸用の圧縮天然ガス(CNG)へのバイオガスの混合率を義務化していることである。インドにおいては、大気汚染対策や安価な燃料代を背景にCNG車の普及が進んでおり、三輪車、タクシー、自家用乗用車におけるCNG車の比率はそれぞれ28%、19%、7%と非常に高い(図7-9)。

図7-9 | インドにおける登録車両の燃料種別構成



出所: The Energy and Resource Institute (TERI)より作成

インドでは、こうした車両構成の実情に加え、農業残渣、家畜の糞、廃棄物などの国内バイオ資源が豊富であることを踏まえ、農業・畜産業振興、液化天然ガス(LNG)の輸入抑制、外貨節約、循環経済にも貢献すべく、バイオガスの政策が強化されてきた。具体的には、2018

年に「手ごろな値段の輸送に向けた持続可能な代替スキーム」(SATAT)が立ち上げられ、最初はボランティアな目標として導入されるバイオガスの混合率が、2025年以降は義務化され混合率も徐々に引き上げられることとなった(表7-4)。また、本施策は農業振興策の一環でもある。

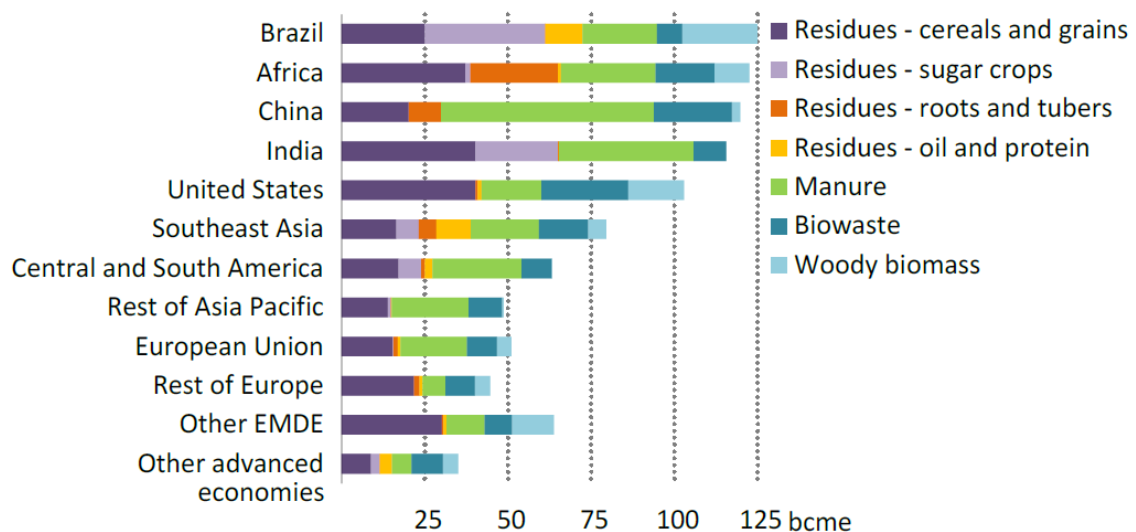
表7-4 | インドにおけるバイオ燃料混合率目標

目標年度		混合割合	目標年度		混合割合
バイオ エタノール	2025	20%	バイオガス	2024まで	任意
				2025より	1%
バイオ ディーゼル	2030	5%		2026より	3%
				2027より	4%
SAF	2028	2%		2028より	5%

出所: Ministry of Petroleum and Natural Gas

国際エネルギー機関(IEA)によれば、インドにおけるバイオガスの生産は、同国の国内総生産(GDP)の18%と雇用の45%以上を担う農業部門に立脚して、100年以上の歴史を持つと言われる。そのバイオガスのポテンシャルはブラジル、中国と並んで世界で最大規模であり(図7-10)、かかる歴史と豊富な国内資源を踏まえた他国に例を見ない政策と言えよう。その政策のタイトルも、持続可能性とともに値段の手頃さを強調していることが興味深い。

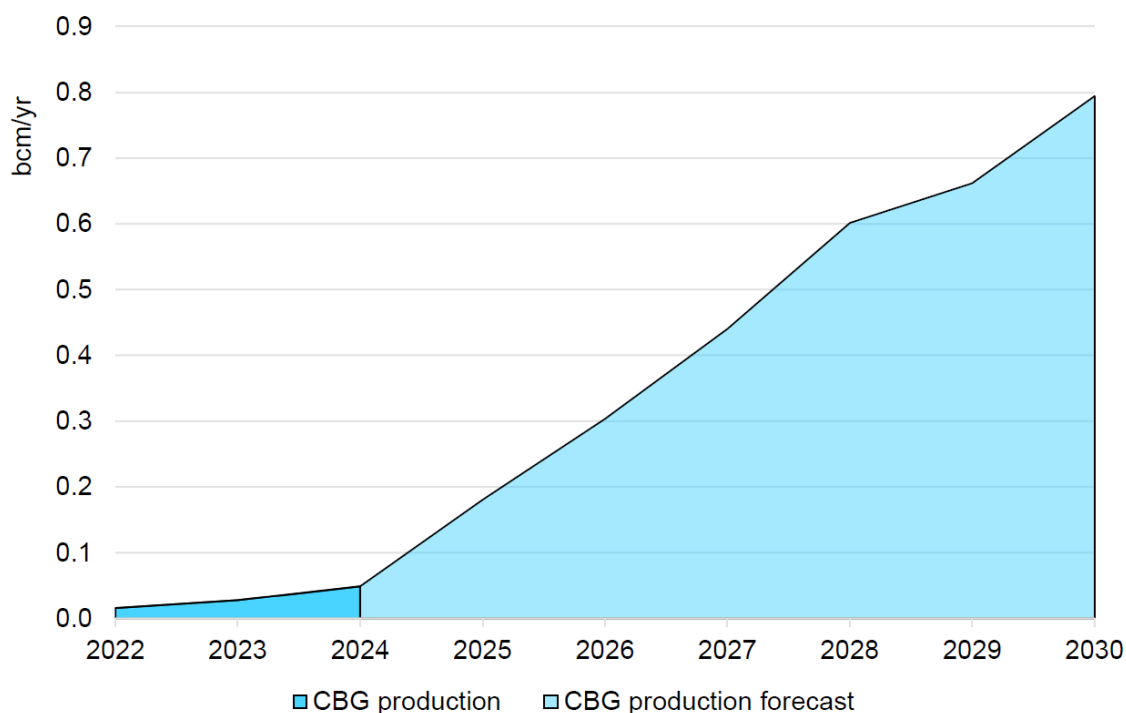
図7-10 | 主要国・地域のバイオガスポテンシャル



出所: IEA "Outlook for Biogas and Biomethane"

IEAによれば、インドにおけるバイオガスのポテンシャルは大きいものの、現状はその5%しか活用されておらず、今後大幅な生産拡大(2024年比で2030年に16倍)が予測されている(図7-11)。

図7-11 | インドにおける2030年に向けた圧縮バイオガスの生産量見通し



出所: IEA "India Gas Market Report Outlook to 2030"

インドネシアのバッテリー電気自動車(BEV)普及、ブラジルのバイオエタノール普及と同様に、インドにおけるバイオガスの利用拡大にも課題はある。まず、バイオ資源の原料の調達に係る課題として、農産物の収穫直後に農業残渣が集中して発生する季節変動に加え、農村部も含めた原料収集に対応する物流インフラストラクチャーの未整備などがある。価格の不透明感による投資判断や資金調達の困難さ、人材や認証制度の整備不足なども指摘されている。このような課題もあって、SATATでは2024年までに5,000か所のバイオガス生産プラントの導入目標を掲げていたが、IEAによれば2024年9月で90か所にとどまっている。

インドのバイオガス活用も、ブラジルのバイオエタノールと同様、カーボンニュートラルへの貢献に加え、輸入LNGへの依存低減、農業振興などの効果もあり、各国の実情を踏まえた道路交通分野の脱炭素化に向けた多様な道筋の1つと考えられる。日本の自動車メーカースズキもグジャラート州において、地元酪農家と協力して、2025年より順次5つのバイオガス生産プラントの設置に向けて取り組んでいる。しかし、インドのバイオガス活用は、インドネシアのニッケル製錬やブラジルのバイオエタノール生産のような民間のビジネスイン

センティブが働いているとは言えない。ムチ(混合率規制)だけでなくアメ(支援策)の充実が必要であろう。気候変動の政府間国際協力では、再生可能エネルギー電源の拡大や石炭火力発電所の早期退役といった画一的なメニューが多いが、こうしたきめ細かな取り組みについても今後は国際的な支援が強化されることが望まれる。日本との関係では、二国間クレジット制度(Joint Crediting Mechanism, JCM)の活用も考えられよう。

7.4 まとめ

グローバルサウスの雄とも言えるインドネシア、ブラジル、インドは、それぞれの地域資源や産業の強みを生かし、気候変動への対策を超えて産業政策やエネルギー安全保障など幅広い観点から、道路交通分野の脱炭素化に取り組んでいる。3か国とも共通して電動化とバイオ燃料の普及に取り組んでいるが、その重点の置き方に大きな違いがある。今回の事例分析からいくつか得られる示唆がある。まず、道路交通の電動化とバッテリー電気自動車(BEV)生産の強化を目指すのであれば、まずは電源の脱炭素化が前提であり、その上で、生産段階も含めた環境負荷の低減、電力需要のピークシフト、社会全体のインフラストラクチャー整備などを進めることが必要である。また、バイオ燃料は、電動化に加え多様な道筋となり、農業振興にも貢献することが可能となる。さらに、既存の燃料にバイオ燃料を混合することにより新たなインフラストラクチャー整備に必要なコストを抑えうることも示唆される。要すれば、各国の実情を踏まえつつ、電動化だけではなく総合的な観点から、道路交通分野の多様な道筋を考えてゆく必要があることをグローバルサウス3か国の事例は如実に示している。

8. 変動性再生可能エネルギー電力の課題と統合コスト

脱炭素化に向けて二酸化炭素を排出しないエネルギー源の大幅な増加が必要となる。特に太陽光発電や風力発電等の変動性再生可能エネルギーは、技術の進歩、量産効果に伴い大幅なコストダウンが進んでおり、最近まで大幅拡大が続いてきた。太陽光発電、風力発電のさらなる拡大継続への期待は高く、IEEJ Outlook 2026ではレファレンスシナリオにおいて足元から2050年にかけてVREによる発電量は約5倍、技術進展シナリオでは約7倍になると見込んでいる。

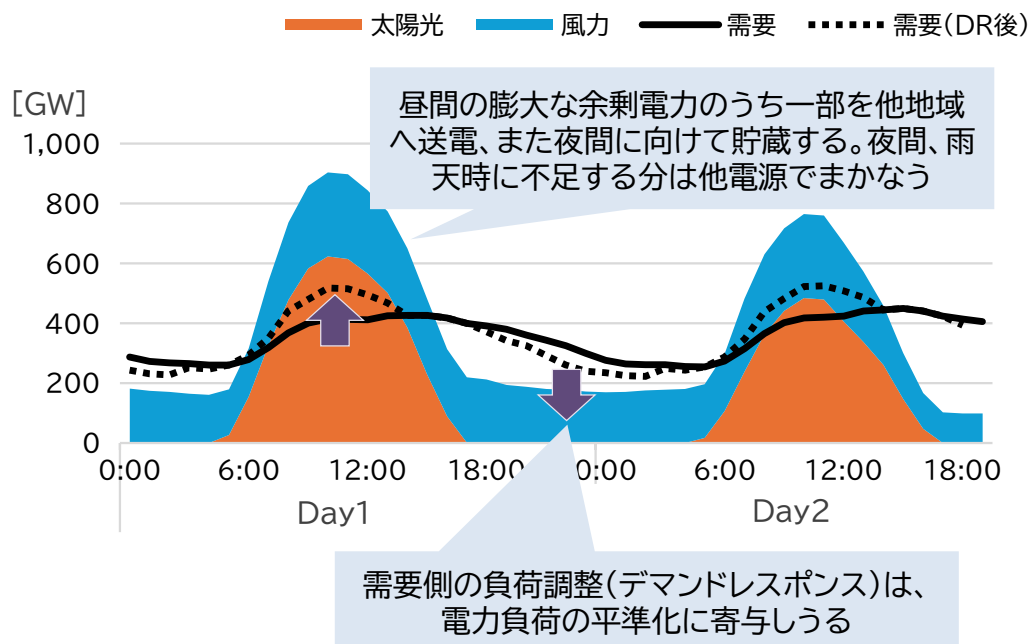
太陽光発電や風力発電は発電出力が自然条件に左右されるため、変動性再生可能エネルギー(VRE)と称されることもある。このVREの拡大に対して、電力システム、エネルギーシステムとして対応してゆく必要が指摘されている。これに要する対策費用は統合コストと呼ばれる。ここではVREの拡大に伴う課題について、統合コストの考え方を整理し、分析例を示す。

8.1 変動性再生可能エネルギーの拡大に伴う課題

出力変動への対応と電力の安定供給

変動性再生可能エネルギー(VRE)は自然条件によって発電出力が変動するため、電力の安定供給のためには瞬時の発電量の変化への対応と発電量の予測が重要になる。例えば、現在でも一部の国や地域(日本では九州地域など)で見られるように、VREからの電力供給によって電力が余剰となる時間帯に一部発電設備の出力を抑制する事例が発生している。また自然条件によってVREの発電量が急減する際、バックアップとしての火力発電が計画外停止するような場合、電力需給ひっ迫が生じる事例も散見されている。このためVREが大量に導入された状況では、電力システムの安定的な運用のために火力発電などの従来型電源の柔軟な運用が求められる。加えて、送電網を活用した他地域との融通、電力の需要側の負荷調整(デマンドレスポンス)などの技術の活用や蓄電池などを用いることで瞬時の電力の需給バランスを確保することが検討されている(図8-1)。

図8-1 | 変動性再生可能エネルギーの大量導入と電力システムの対応のイメージ



出所: IEEJ Outlook 2025

電力システムの柔軟性の不足と電力市場への影響

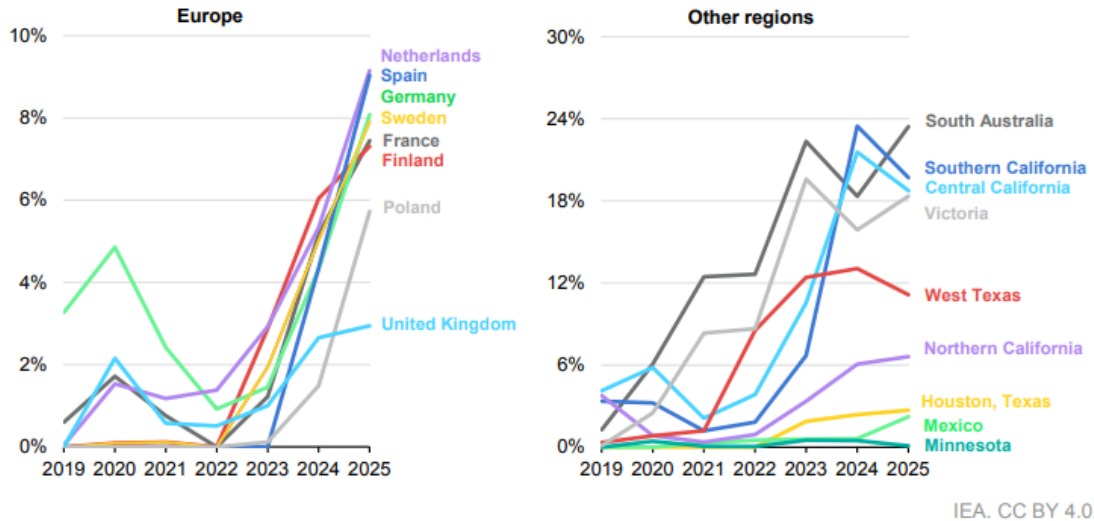
VREの拡大に伴う影響として電力市場への影響がある。例として卸電力市場の価格がマイナスになる（ネガティブプライス）事例が指摘されている。国際エネルギー機関(IEA)（2025）によれば、世界的に見ると多くの電力市場ではまだ卸売価格がマイナスになるケースは現状では比較的珍しいものの、近年では一部の地域で増加している。

例えば、南オーストラリアは2023年の年間のVREシェアは65%程度であり、卸電力市場における年間の取引時間のうち25%程度がネガティブプライスとなっている。同様にテキサスは2023年の年間のVREシェアは33%程度で、年間取引時間の10%程度がネガティブプライスとなっている。市場価格がマイナスになることは電力が余剰となる局面で電力の利用を促して需要側の負荷調整の活用を促進する一方で、市場収益の収益悪化につながるために電源投資への悪影響が指摘されている。

IEA（2025）は、ネガティブプライスについて、柔軟性の欠如が電力の卸価格の変動幅の拡大という形で影響を及ぼしているとしている。また、VREの出力変動に対応するためには、火力発電の運用や需要側の負荷調整等の活用をすることで電力システムの柔軟性を確保することが重要であると指摘している。

図8-2 | 世界の卸電力市場におけるネガティブプライスの事例

Fraction of negative hourly wholesale electricity prices in selected regions in the first six months of the year, 2019-2025



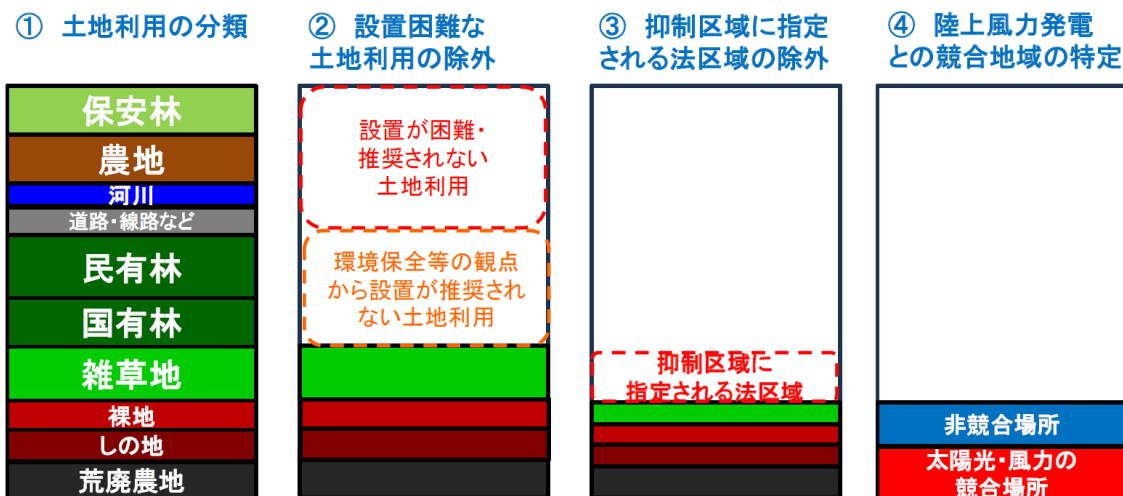
出所: IEA (2025), *Electricity Mid-Year Update 2025*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/electricity-mid-year-update-2025>, Licence: CC BY 4.0

資源開発と土地利用の制約

VREに限らず再生可能エネルギーの利用可能性は自然条件や土地の条件に左右される。これらの条件に恵まれたエネルギーの供給ポテンシャルが大きい地域は、自然の豊かな地域などに偏在していることが多い。例えば、風力発電は山岳地域や沖合地域などが風況に恵まれているため、供給ポテンシャルの多くは都市部などの電力需要地から離れたところにあることが多い。このため、これらの資源の開発には新たな電力システムの整備などが必要になる。

また、ポテンシャルの開発においても自然環境との調和や別の土地利用との競合の可能性もある(図8-3)ため、再生可能エネルギーの持続的な開発のためにはこれらを勘案した供給ポテンシャルの検討が必要となる。一般に、再生可能エネルギー資源の開発は規制の面で相対的に開発しやすい地点から進み、導入が進むほど開発しやすい土地が減少してゆくため、電力の系統の整備や環境保護のための追加的な開発費用は増加してゆくことになる。

図8-3 | 変動性再生可能エネルギーの設置対象場所の評価方法の例



出所: 総合エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会／電力・ガス事業分科会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会(第67回)、資料3 日本エネルギー経済研究所／横浜国立大学 説明資料(2024)

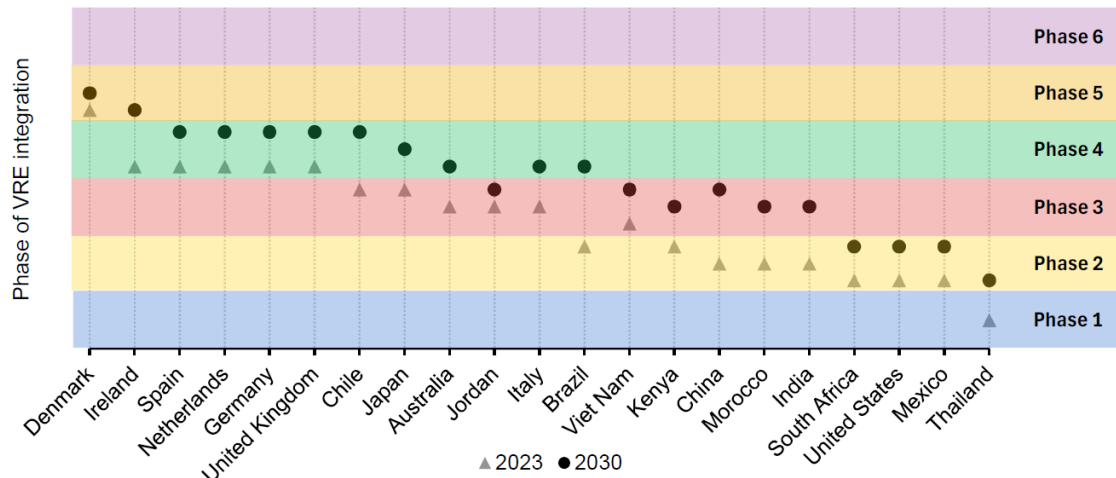
VREの系統統合の課題

再生可能エネルギー、特にVREの段階的な拡大について、IEA（2024）は各国の状況について電力システムの安定供給、市場への影響なども勘案した「フェーズ」という形で分類している。例えば、デンマークであれば年間のほとんどの時間、電力需要をVRE（特に風力発電）で賄うことができるため、VREの導入が進んでいるフェーズ5と分類している。これに対して日本は2023年ではデンマークよりも低いフェーズ3であるが、今後のVREの拡大に伴って2030年にはフェーズ4に移るとしている。

IEAはVREの拡大によって各国ともに段階的にフェーズが上昇することを見込んでおり、フェーズに応じて電力システムとして求められる対策が変わってくることを指摘している。

対策としては技術的なもの、制度的なものに加えて、これらに要する費用が重要となる。ある電源を電力システムへ統合する時に要する費用が重要であり、この費用は統合コストと呼ばれる。VRE導入に向けて電源の特性を考慮した指標として統合コストの把握が経済性の観点から重要であり、この費用負担がVREの拡大の課題として認識されつつある。

図8-4 | 変動性再生可能エネルギーの導入のフェーズ



IEA. CC BY 4.0.

Note: The phase assessments for 2030 are based, among other factors, on VRE forecasts that will be presented in the upcoming Renewables 2024 report.

出所: IEA (2024), *Integrating Solar and Wind*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/integrating-solar-and-wind>,
Licence: CC BY 4.0

8.2 電力システムへの統合にかかるコスト(統合コスト)

電力システムへの統合のための費用

経済協力開発機構(OECD)は³⁷、統合コストについて、電源単体に要する費用に加えて下記の費用が必要になると指摘している。

- **プロフィールコスト**: 発電設備の出力が事前計画から大きく変動するなどにより、需給ミスマッチが発生した際に、ディスパッチ可能な発電所の運用を変更して対応するために必要となる費用。
- **バランシングコスト**: 数秒から数分といった発電量の短期的な予測誤差や短時間での出力変動に対して、ディスパッチ可能な発電所が調整運転を行う際に発生する費用。
- **グリッドコスト**: 発電設備の立地地点と需要地を結ぶ基幹送電網の整備費用、または発電設備と基幹系統を接続する電源線の整備に要する費用。

このコスト分類も踏まえた電力のシステム統合にかかる費用を分析すべく、表8-1に例を示すとおり多数の手法が検討されている。この中では例えば電力システム全体のコストの変化に着目した手法やある電源の市場での価値に着目した手法などがあり、多様な観点で統合コストに関する評価が進められている。

³⁷ OECD/NEA (2018) "The Full Cost of Electricity Provision"

表8-1 | 統合コストに関する指標、分析手法の例

指標	説明	分析例
Integration cost, System cost	電力部門の総費用から均等化発電原価(LCOE)比例分を差し引いたもの。世界各地域を対象に多数の評価事例がある。	
System Value	電力市場における各電源の貢献度を評価する指標である。IEAの報告書「Next Generation Wind and Solar Power」(2016)において、提唱されている。	IEA
Levelized Avoided Cost of Electricity(LACE)	米国エネルギー省(DOE)およびエネルギー情報局(EIA)が提案した指標。LACEは当該電源の導入によって電力システムにおいて代替されるコストを考慮することで、特定の技術が経済的にどの程度有利であるかを示す。	US DOE/EIA, Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 各年版
Enhanced Levelized Cost/ Wider System Impact	従来のLCOEに加えて、電源別の限界費用を考慮することが特徴である。単純なコスト比較ではなく、電力市場への影響を反映した評価が可能となる。	BEIS, Electricity Generation Costs 2020など
System LCOE	電源ごとの限界費用を考慮した指標であり、特に再生可能エネルギーの導入拡大に伴う電力市場の影響を評価する際に有効とされる。各電源の価値単価と需要の価値単価の差をLCOEに加算することで、電力システム全体への影響をより正確に反映する。	Hirth et al., 2016など
Marginal System LCOE	電源別の限界費用を考慮する指標であり、特定の技術間での比較分析に用いられる。特に、2種類の技術系統間に適用される手法であり、相対的な経済性を評価する際に使用される。	Ueckerdt et al., 2013; Reichenberg et al., 2018など
相対限界 System LCOE/平均 System LCOE	電源ごとの限界費用と平均費用を考慮し、電源の統合性や市場での価値を評価する指標。	Matsuo and Komiyama, 2021

出所: 松尾(2021)、電源別発電コスト評価について—OECD/NEA, IEAによる評価報告書を中心に—より作成

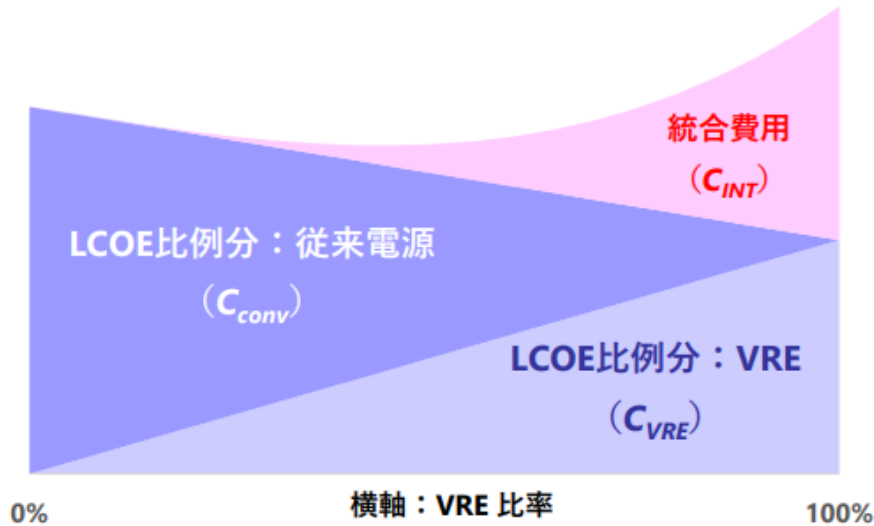
統合コストを考慮した最適な電源構成の検討

将来の電源構成の検討するにあたって経済性を評価するためには、各発電技術単体でのコスト評価に加えて、統合コストを加味したシステム全体としてのコスト評価が重要である。松尾(2025)は、これらの費用を含めて、ある電源を電力システムに統合するための費用を統合

コストとし、これを考慮すると費用面で電源の最適な組み合わせがあることを指摘している(図8-5)。

図8-5 | 発電コスト(LCOE)と統合コスト(統合費用)の概念図

縦軸：電力部門の総費用



出所: 発電コスト検証ワーキンググループ(第1回会合)資料1、資料5 電源別発電コスト評価について(松尾委員提出資料) (2024)

再生可能エネルギーは技術の発展に伴って発電電力量1 kWh当たりのコスト（Levelised cost of electricity [LCOE]）では従来電源の発電コストより低くなってきている。このためコスト競争力の観点で従来電源を置き換える形での導入が期待される。結果、図8-5で C_{conv} が C_{VRE} に置き換わってゆく。他方で、変動性再生可能エネルギー(VRE)の大量導入に伴い蓄電システムの設置、システムの増強などに係る追加的な費用が発生する。このため電源単体の開発に要するコストに加えて、電源の種類によっては追加的な費用(図8-5での C_{INT})が必要となる。

8.3 統合コストを考慮した電源構成

統合コストを考慮した電源構成の検討にあたり

変動性再生可能エネルギー(VRE)の拡大に伴う統合コストに関する分析として、エネルギーシステム全体を分析するモデルを用いて東南アジア諸国連合(ASEAN)においてVREの導入量を変化させたときにASEAN全体でのエネルギーシステムのコストが最小となる電源構成を分析した。

分析には横浜国立大学大槻研究室にて構築したNE_Japanモデルを基に、日本エネルギー経済研究所および大槻研究室にて共同開発した線形計画モデルであるNE_ASEANモデル³⁸を用いた。ASEAN各国が発表している「国が決定する貢献」(NDC)を前提として温室効果ガス(GHG)削減を目指す条件下で、2060年でのVREの導入量と統合コストに関して分析した。

統合コストを考慮した電源構成の分析事例

各国が発表しているNDCに沿ってGHG削減を目指す条件下では脱炭素エネルギーの導入が重要であり、本試算の前提条件の下ではASEANにおいてエネルギーシステムコストが最小となるVREシェアは2060年断面で3割程度と推計される。この結果を基準として、VREの増減に伴うシステムコストの変化結果を示す。

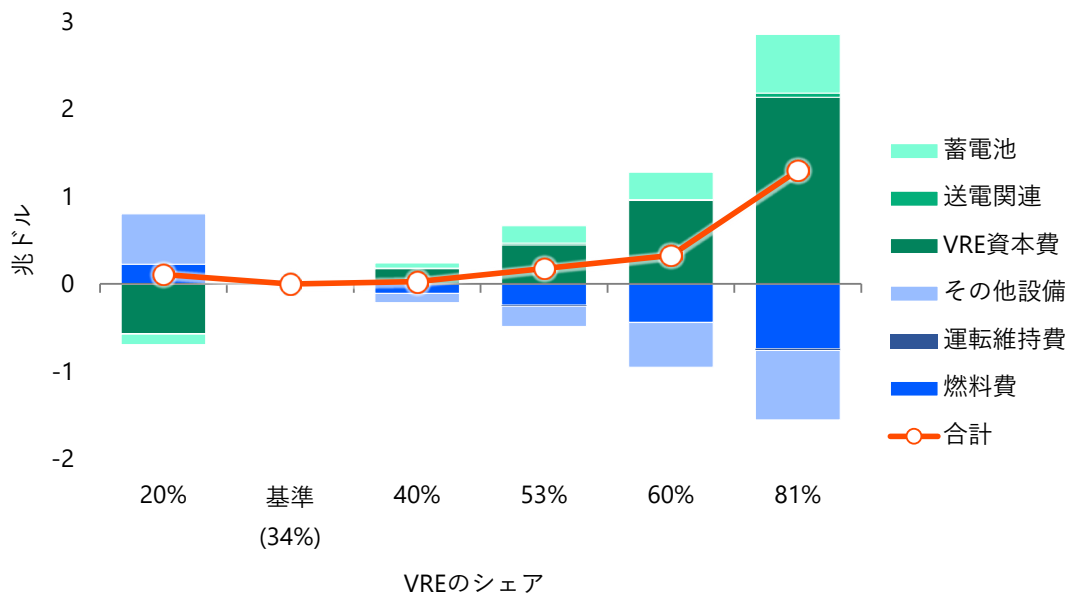
基準からVREを増加させると従来型発電などの設備費用や燃料費が減少する。他方でVRE単体の導入費用が増加するとともに、統合コストとして蓄電池等の対策費用が追加的に増加する(図8-6)。例えば、ASEAN全体でVREシェアを6割に引き上げると基準から2030年～2060年の累積で3,000億ドルのコスト増になるが、8割とVREのシェアを大きく高める場合は1.3兆ドルのコスト増となり増加のペースが加速する。

ASEANにおける脱炭素化に向けたエネルギー転換推進においては、各国での取り組み強化とともに、ASEAN大での連携・協力が欠かせない。他方で、追加的コストが各国で大きく異なりうる点に留意が必要である。その背景には、地理的および自然条件やインフラストラクチャーの整備状況に差異があるため、VREの追加余地がASEAN各国で大きく異なることなどがある(図8-7)。特に人口、経済規模が大きいインドネシア、ベトナム、タイではVREの増加に伴うコストの増加のインパクトが大きい。

ここではVREの導入量と統合コストに関する分析例を示した。ASEANでは、国によってはVRE以外の再生可能エネルギーとして水力や地熱の資源も豊富にある。一方で、脱炭素の達成に向けた追加的な費用への負担の能力にも経済状況や国の規模によって差がある。VREを含めた再生可能エネルギーのさらなる活用に向けては、国を越えた協力とともに各国でその国情を踏まえた多様な道筋による脱炭素化が重要である。

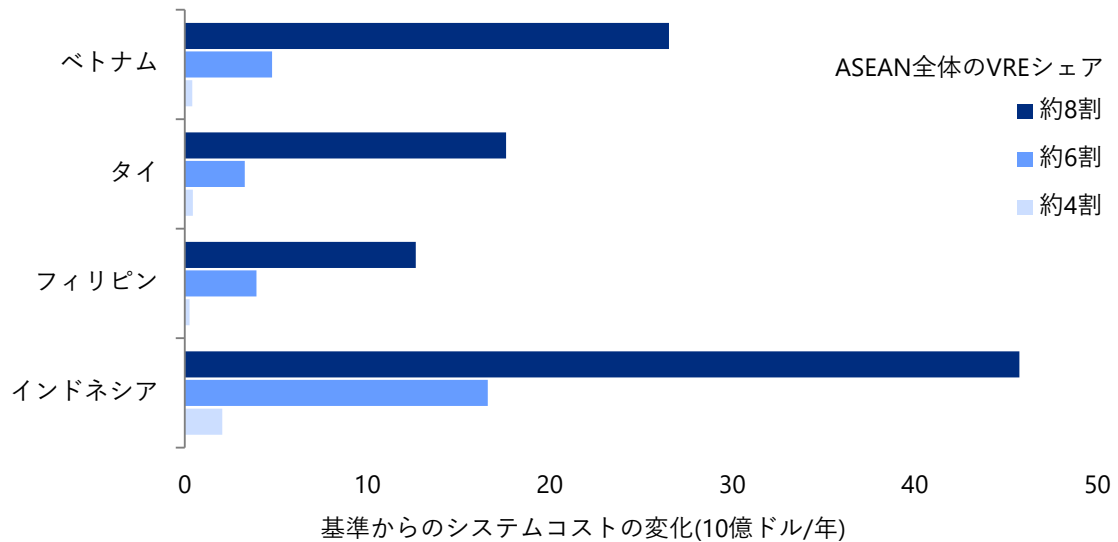
³⁸ IEEJ-NE_ASEANモデルでは発電、蓄電設備を含むエネルギー技術の導入についてエネルギーシステム全体のコストが最小となる組み合わせを分析する。モデルの概要と分析例については下記を参照。IEA (2023), Decarbonisation Pathways for Southeast Asia, IEA, Paris
<https://www.iea.org/reports/decarbonisation-pathways-for-southeast-asia>, Licence: CC BY 4.0

図8-6 | ASEANのVRE導入量とシステムコスト[2030年～2060年累積]



注: 国間含めて主要な連系線についてはASEAN Power Gridで検討されている系統整備を上限とした。数値は実質、2017年価格。

図8-7 | VRE導入量とシステムコスト[2060年]



注: 国間含めて主要な連系線についてはASEAN Power Gridで検討されている系統整備を上限とした。数値は実質、2017年価格。

9. 現実を踏まえた気候変動の目標と適応の重要性

——2°C目標達成の道標としての技術進展シナリオ——

2015年に採択されたパリ協定では、工業化以前からの世界の気温上昇抑制の目標について、2°Cを十分下回ること、1.5°Cを下回る「努力を追求」することと規定されている。すなわち、パリ協定上は2°Cが目標であり1.5°Cは言わば追加的努力目標であるが、その後の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の1.5°C特別報告書(2018年)、2020年頃の主要国の相次ぐネットゼロ宣言を経て、2021年の国連気候変動枠組条約第26回締約国会議(COP26)では、2°Cと1.5°Cの併記ではなく、1.5°Cを下回る努力を追求することを「決意」とし1.5°Cのみを特掲する文言が合意された。現状では、特に日本を含む主要7か国(G7)各国は1.5°C目標を明確にコミットしている(米国トランプ政権は除く)。また、2025年7月には、国際司法裁判所から、パリ協定の締約国は気温上昇を1.5°Cに抑えることのできる「国が決定する貢献」(NDC)を用意する義務があるとの勧告意見が示された。

しかし、現実としては、世界の温室効果ガス(GHG)排出量は増加を続けており、1.5°C目標達成の見通しは厳しさを増している。本章では、1.5°C目標を巡る主要国等の最近の動向を分析するとともに、残されたカーボンバジェットの観点から、もはや1.5°C目標達成は事実上不可能であり、IEEJ Outlook 2026における技術進展シナリオがこれに替わる2°C目標達成の道標となることを示す。また、2°C目標を目指す上で、適応の重要性が増すことをあわせて論ずる。

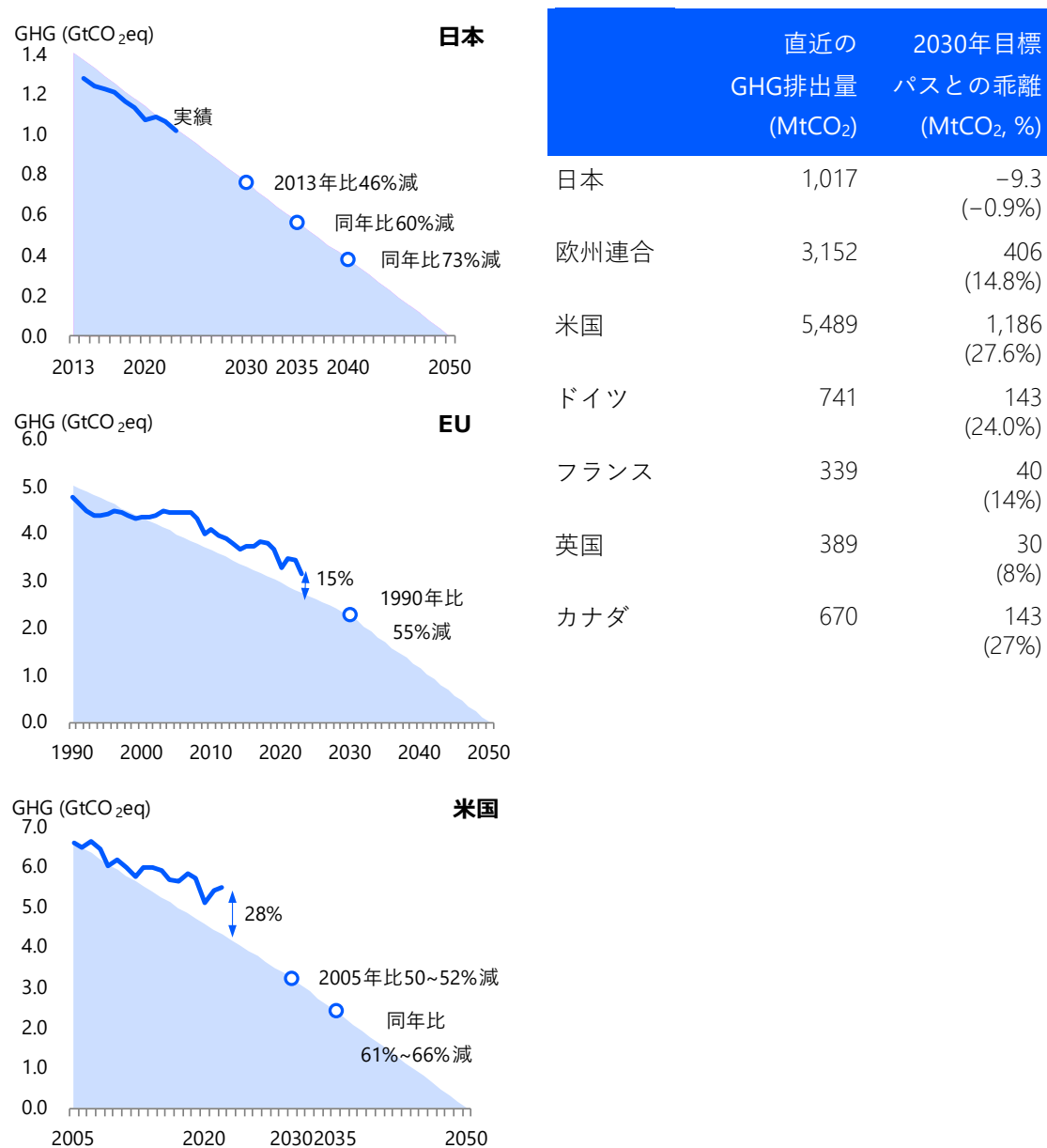
9.1 1.5°C目標を巡る最近の動向

先進国の動向

上述のとおり先進国、特に主要7か国(G7)各国(米国は除く、米国の情勢については5.1 を参照)は1.5°C目標にコミットするものの、日本を除き、足元の温室効果ガス(GHG)排出量は2030年の目標達成に向けた排出パスにオントラックとなっておらず、上回っているのが現状である(図9-1)³⁹。各国とも、2050年ネットゼロに向け排出削減のための施策を強化する必要があるが、気候変動への対応が政策のトッププライオリティーであった2020年頃と異なり、昨今はエネルギー安全保障、低廉なエネルギーの供給の重要性が大きく増している。このような中、G7各国における政策の舵取りはより困難なものとなっている。

³⁹ イタリアについては、自国の削減目標を掲げていないため、厳密な比較はできないが、EU全体の目標と比較するとやはりオントラックとなっていない。

図9-1 | G7各国の目標達成に向けた排出削減パスと実績



また、パリ協定上、締約国は2035年を目標年とする「国が決定する貢献」(NDC)を2025年2月までに提出することとなっていたが、2025年9月末現在で提出済みは52か国にとどまっており、うち先進国は9か国となっている。2035年目標のNDCでは、国連気候変動枠組条約第28回締約国会議(COP28)(2023年)のグローバルストックテイク(GST)において、1.5°C目標に向け、2019年比で2035年に60%減とすることが懸望されていたが、これに沿った目標となっている現政権の先進国は、現在のところ英国など欧州連合(EU)以外のヨーロッパの一部の国とオーストラリアのみとなっている(表9-1)。先進国の多くは、1.5°C目標に引き続きコミットしつつも、2035年目標は現実を見据えた対応をしていると見るべきであろう。

表9-1 | 先進国の新たなNDCにおける2035年目標

	2030年	2035年
日本	2013年比46%減	2013年比60%減 (2019年比では54%減)
欧州連合	1990年比55%減	1990年比66.25%～72.5%減 ^{※1} (2019年比では54%～62%減)
英国	1990年比68%減	1990年比81%減 (2019年比では66%減)
スイス	1990年比50%減	1990年比65%減 (2019年比では60%減)
米国 (バイデン前政権)	2005年比50%～52%減	2005年比61%～66%減 (2019年比では55%～61%減)
カナダ	2005年比40%～45%減	2005年比45%～50%減 (2019年比では44%～49%減)
ニュージーランド	2005年比50%減	2005年比51%～55%減 (2019年比では50%～54%減)
ノルウェー	1990年比55%減	1990年比70%～75%減 (2019年比では70%～75%減)
オーストラリア	2005年比43%減	2005年比62%～70%減 (2019年比では53%～63%減)
アイスランド	2005年比41%減	2005年比50%～55%減 (2019年比では48%～53%減)
ロシア	1990年比30%減	1990年比33%～35%減 (2019年比では39%～44%増)

※1: 執筆時点で次期NDCは発表されていないが、2025年9月18日発表の“State of Intent”に基づき記載

このような中、英国保守党党首ケミ・バデノッチ議員は、2025年3月に「2050年までにネットゼロは不可能です。私は喜んでそう言っているわけではありません。私は、子供たちのために、より良い未来とより良い環境を望んでいます。しかし、現実を見据えなければなりません。」と発言したことは注目される。保守党はCOP26を英国がホストしたとき政権与党であった。その党首が、世界のネットゼロではなく英国のネットゼロが不可能と発言したのである。

民間でも1.5℃目標を見直す動きが見られる。Net-Zero Banking Alliance (NZBA)は、COP26において、金融機関の投融資先のGHG排出量を1.5℃目標に整合させることを目標

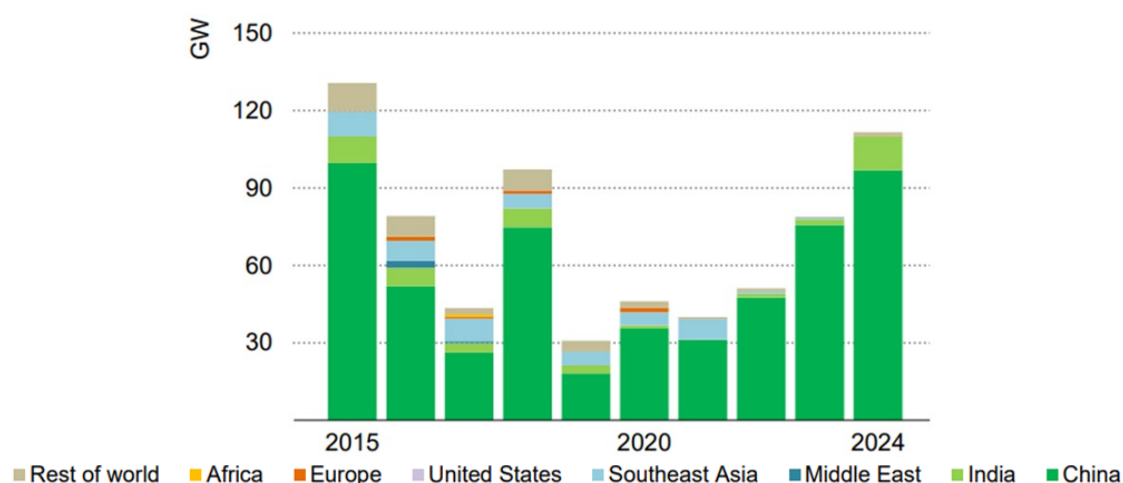
に立ち上げられた。しかし、2024年末の米国主要6行の脱退、その後の邦銀の脱退等を受け、2025年4月には2°C目標も許容することに方針を変更している。

新興国の動向

世界のエネルギー起源の二酸化炭素排出量が増大を続けている理由の1つとして、中国とインドにおける石炭の消費量が伸び続けていることが挙げられる。中国とインドは、2024年において石炭の世界の消費量のそれぞれ56%と15%を占めており、1位、2位となっている。

中国では、国際エネルギー機関(IEA)によれば、2024年だけで100 GWの新たな石炭火力発電所建設の最終投資決定(FID)が行われた(図9-2)。中国における新たな石炭火力発電所建設のFIDは、2019年に30 GW程度まで減少した後に増加傾向に転じ、2024年の100 GWは過去10年で最大規模となる。

図9-2 | 新設石炭火力発電の最終投資決定



出所: IEA "World Energy Investment 2025"

無論、新設と同時に既設の石炭火力発電所のスクラップも行われているが、過去5年間平均のスクラップは4.7 GW/年にとどまっており、中国においては石炭火力発電所の設備容量がネットで大幅に増えている。また、設備容量が大幅に増えているのは再生可能エネルギーも同様であり、2024年に341 GWの太陽光発電設備と80 GWの風力発電設備が新設された。これらの再生可能エネルギー電源の中国における設備利用率を踏まえると、新設される石炭火力発電所の設備利用率が仮に50%程度にとどまったとしても、新設石炭火力発電所の発電量は新設太陽光・風力発電の発電量と同等となってしまう。このように年間100 GWの新たな石炭火力発電所の建設が、中国の二酸化炭素排出量に及ぼす影響は計り知れない。

また、中国の習主席は、2025年9月24日にニューヨークの国連総会のマージンで開催された、気候サミットにおいて、「GHG排出量をピーク時と比較し2035年に7%~10%削減する」と

の次期NDCを発表した。ヨーロッパのシンクタンクは、中国が、1.5°C目標と整合的なGHG排出削減を達成するため2035年に2023年比で少なくとも二酸化炭素(CO₂)排出量を30%削減することができるかと分析しており、今回の中国の2035年目標は不十分との見方が広がっている。

インドでも、同様にIEAによれば、2024年に15 GWの新規石炭火力発電所のFIDが行われ、やはり過去10年で最大規模となった。世界最大の石炭会社であるCoal Indiaは、インドの石炭需要の4分の3を供給しているが、再生可能エネルギーでは増大するエネルギー需要を満たせないとして、2025年6月に、休止石炭鉱山32か所を再開するとともに、5か所の新規石炭鉱山を開発することを発表した。インドでは、石炭火力発電が総発電量に占める割合が現状で7割を超えているが、インド政府によると2031年～2032年において50%と想定されており、将来にわたり石炭依存が続くと見られている。

9.2 技術進展シナリオと2°C目標の比較

気候目標の実現可能性について、カーボンバジェット⁴⁰を用いて定量的に評価を行う。過去のIEEJ Outlook⁴¹でも指摘したように、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第6次評価報告書(AR6)統合報告書(SYR)時点と比べ、50%の確率で世界の気温上昇を1.5°Cに抑えるための残余カーボンバジェットは毎年の排出により急速に減少している。具体的には、IPCC AR6 SYRでは2020年以降500 GtCO₂とされていた。しかし、Indicators of Global Climate Change (IGCC)⁴²による最新の評価値(IGCC 2024)⁴³は2025年以降130 GtCO₂と大きく減少している。この数値は、足元排出の4年分に満たず、直線的に排出を下げる単純な計算では2032年に世界でのネットゼロが必要となる(図9-3)。IGCC 2024によれば、IPCC AR6 SYR時点の500 GtCO₂との差分は、2020年～2024年の排出で200 GtCO₂の減少、冷却効果を持つエアロゾルの減少に伴う温暖化の上方修正で100 GtCO₂強の減少、ここ数年の高温観測による温暖化推定値の上昇により約40 GtCO₂の減少などによる。この評価値を所与とすれば、1.5°C目標はすでに事実上達成不可能であるといえる。従って、パリ協定と整合的な目標と

⁴⁰ カーボンバジェットとは、気温上昇を一定の確率で一定以下に抑えるための人為的な累積正味CO₂排出量の最大値であり、そこから過去、すでに排出された量を差し引いたものを残余カーボンバジェットと呼ぶ。

⁴¹ IEEJ Outlook 2024およびIEEJ Outlook 2025

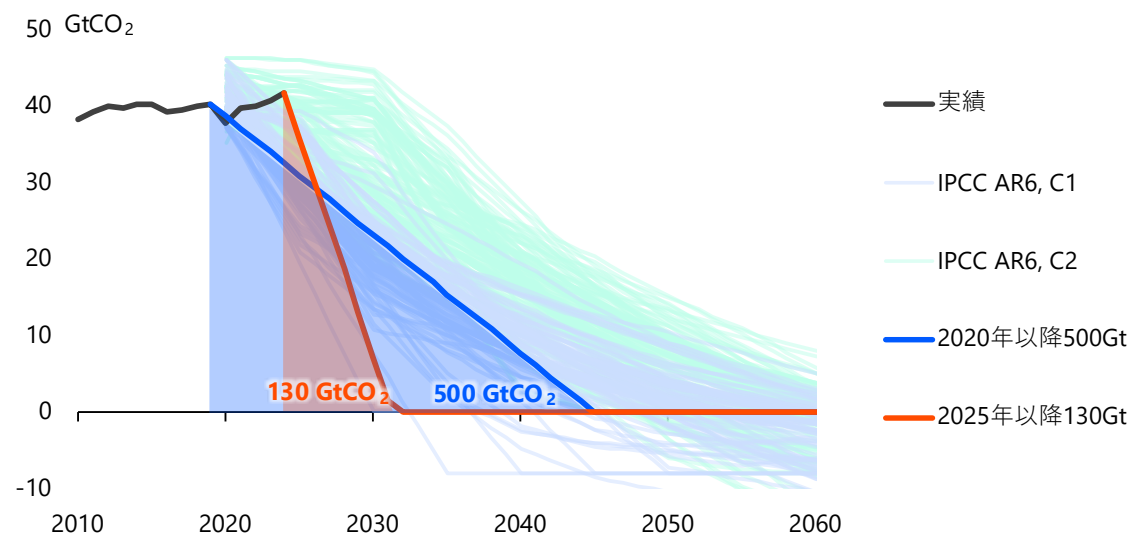
⁴² 国際的な研究プロジェクトであり、毎年残余カーボンバジェットを発表している。同様の取り組みとしてGlobal Carbon Budget (GCB)がある。

⁴³ Forster et al., "Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence", ESSD, 17, 2641–2680, 2025.

<https://essd.copernicus.org/articles/17/2641/2025/>

しては、2°C目標を掲げることが現実的となろう。これは必ずしも後退を意味するものではなく、パリ協定のそもそもの目標に立ち戻るといふことと考えられる。

図9-3 | 1.5°C目標と統合的な二酸化炭素排出パス



注: 「実績」はGlobal Carbon Budget 2024⁴⁴より入手。セメント生産プロセス、フレアリング、土地利用、土地利用変化および林業部門の排出を含む。「IPCC AR6, C1」は「C1: オーバーシュートなしまたは限られたオーバーシュートで温暖化を1.5°C (> 50%)に制限」に該当する97シナリオ、「IPCC AR6 C2」は「高いオーバーシュートの後に1.5°C (> 50%)へ回帰」に該当する131シナリオ⁴⁵。

IEEJ Outlook 2026の技術進展シナリオの二酸化炭素(CO₂)排出パスは2°C目標と統合的かどうか、同様にカーボンバジェットの概念を用いて比較しよう。このためには、技術進展シナリオにおける2050年までのエネルギー起源CO₂⁴⁶排出パスを、エネルギー起源CO₂以外も含む人為起源CO₂がネットゼロに至るまでの排出パスに拡張する必要がある。このため、やや荒い推計ではあるが、2051年以降のエネルギー起源CO₂排出量は、2050年の削減量(-0.61 GtCO₂/年)が継続すると想定し推計した。ただし、ネットゼロ到達後は横ばいと仮定した。次に、エネルギー起源以外のCO₂排出量(土地利用変化、セメント排出、セメント吸収、フレアリング、その他)については、IPCC AR6 第3作業部会(WG3)報告書の例示的緩和経路(Illustrative Mitigation Pathway, IMP)を参照した。IMPはさまざまな緩和強度のパスが想定されているが、エネルギー起源以外のCO₂排出量は若干保守的に見積もることとし、2020年提出の「国が決定する貢献」(NDC)に基づく気候政策に沿うModerate Action

⁴⁴ Global Carbon Budget, “GCB 2024”. <https://globalcarbonbudget.org/gcb-2024/>.

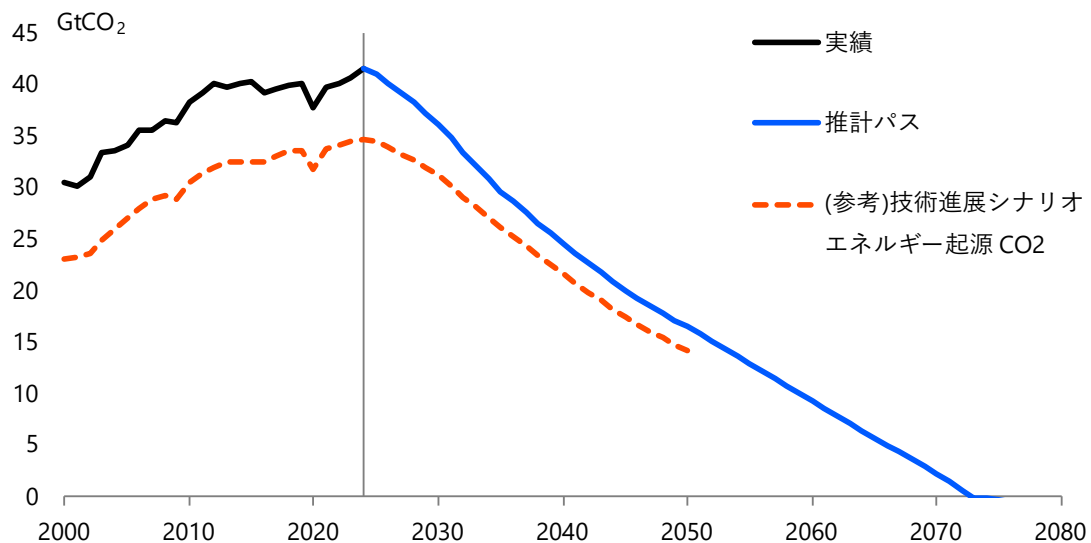
⁴⁵ Byers et al., “AR6 Scenarios Database hosted by IIASA”, International Institute for Applied Systems Analysis, 2022. <https://data.ene.iiasa.ac.at/ar6/#/login?redirect=%2Fworkspaces>.

⁴⁶ 直接大気回収・貯留技術(DACCS)による除去量は考慮済み

(ModAct)を参照した。最後に、エネルギー起源以外のCO₂排出量をエネルギー起源CO₂排出量に追加することで推計パスとした。

推計したCO₂排出パスは図9-4のようになり、2073年にネットゼロとなる。IPCC AR6 WG3 報告書では、2°C(67%確率)のCO₂排出パスは2070年～2080年頃にネットゼロとなっているため⁴⁷、2°C目標とはおおむね整合的に見えるが、厳密には最新の残余カーボンバジェットと比較する必要がある。推計したCO₂排出パスにおける2025年以降からネットゼロ達成までの累積排出量は906 GtCO₂となり、最新の残余カーボンバジェットと比較しても世界の気温上昇を2°C(50%確率)に抑制することは達成可能な水準と言える(表9-2)。ただし、IGCC 2024による2°C(67%確率)の残余カーボンバジェットと比べるとやや超過となる。本分析における2050年以降のエネルギー起源CO₂推計パスや残余カーボンバジェット自体の不確実性を踏まえると、なるべく高い確率で2°C目標を満たすためには、技術進展シナリオを上回る削減可能性を模索・追求することは引き続き重要である。

図9-4 | 技術進展シナリオの2050年までのエネルギー起源CO₂排出パスを拡張して推計したネットゼロ達成年までの人為起源CO₂排出パス



注: 「実績」はGlobal Carbon Budget 2024⁴⁸より入手。「(参考)技術進展シナリオ」は技術進展シナリオのエネルギー起源CO₂排出パス。「推計パス」は技術進展シナリオの2050年までのエネルギー起源CO₂排出パスを拡張して推計したネットゼロ達成年までの人為起源CO₂排出パス。

⁴⁷ IPCC, “Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, 2022, Figure SPM.5.

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf

⁴⁸ Global Carbon Budget, “GCB 2024”. <https://globalcarbonbudget.org/gcb-2024/>.

表9-2 | 推計パスの累積CO₂排出量と残余カーボンバジェットの比較

シナリオ		2025年以降の累積CO ₂ (GtCO ₂)
推計パス(ネットゼロ達成までの累積)		906
2°C (50%確率)	IPCC AR6 SYR (起点調整済)	1,150
	GCB 2024	1,110
	IGCC 2024	1,050
2°C (67%確率)	IPCC AR6 SYR (起点調整済)	950
	GCB 2024	記載なし
	IGCC 2024	870
1.7°C (50%確率)	IGCC 2024	490

注: IPCC AR6 SYRの残余カーボンバジェットは2020年が起点であるため、2020年～2024年の5年分の排出200 GtCO₂を差し引いた値を記載

9.3 適応

適応とは

緩和(削減)行動が、世界平均気温の上昇をパリ協定の長期温度目標内に抑えるのに必要な規模・水準に達しておらず、世界平均気温が産業化前水準から1.5°C超えに急速に近づきつつある。気候影響がこれまでになく頻繁で極端になっていることが、気候影響とそれへの適応がいかに大きな課題になっているかを示している。効果的で適切な適応行動が、これまでよりも緊急に必要なになっている。

気候変動対策は「緩和」と「適応」に大別される。「緩和」は、GHG排出増加が気候変動を悪化させないようGHGの削減、吸収源の拡大を行うことである。一方、「適応」は、気候変動による影響・被害を抑制するための気候変動やその影響に対する調節・対応プロセスである(図9-5)。

まずは緩和で気候変動の影響を軽減するのが本筋であり、それが難しければ適応を組み合わせる(図9-5)ことが重要になる。1.5°C目標が事実上達成不可能な中、今後は適応の重要性がますます増してゆく。

図9-5 | 適応とは



適応資金のギャップはどれくらいか

適応資金への需要について、国連環境計画(UNEP)「適応ギャップ報告書2023」⁴⁹では、適応資金ニーズとモデル推計された適応コストの推計方法とその結果が示されている。適応資金ニーズについては、国家適応計画(NAP)と「国が決定する貢献」(NDC)で提出された適応資金ニーズの評価・分析を行い、それをNAPやNDCを提出していない国を含めてすべての国に外挿推計している。モデル推計された適応コストについては、気候変動の経済的影響を推計し、その影響を削減する適応のコストを評価している。なお、モデル推計されたコストおよび資金ニーズからは、民間インフラストラクチャー、冷房ニーズの増加、気温上昇に伴う労働生産性への影響などの民間セクター適応ニーズは除かれている。

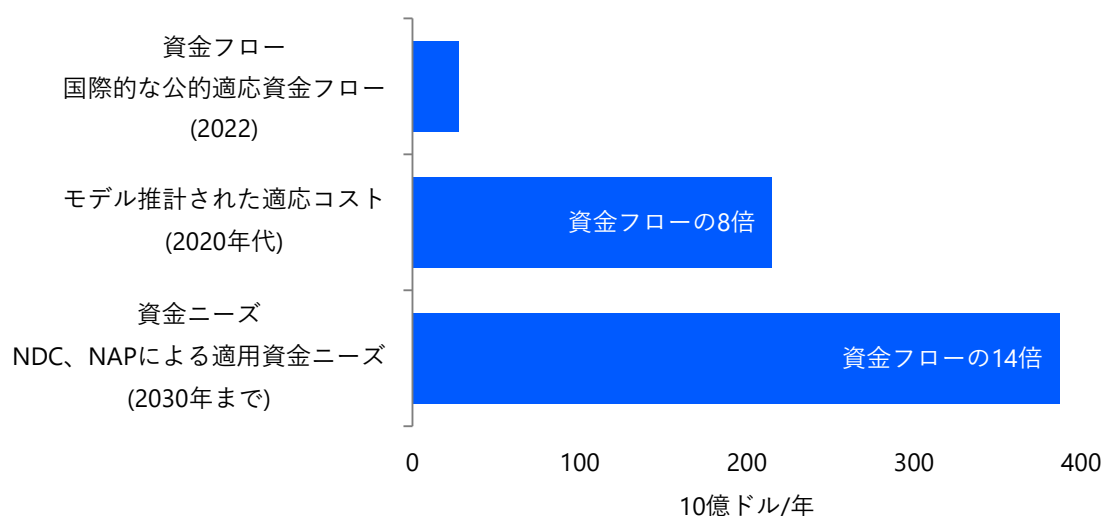
UNEP「適応ギャップ報告書2024」⁵⁰では、推計結果の更新値が示されている。適応ニーズは、モデル推計された適応コストで年間2,150億ドル、資金ニーズで年間3,870億ドルである一方、実際に供給された途上国への国際的な公的適応資金フローは、2022年で280億ドルに過ぎない(図9-6)。適応ニーズと2022年の国際的な公的資金フローを比較すると、非常に大きな適応資金ギャップがまだ存在していることが示される。適応のために必要な資金額と現状の資金供給との間には、8~14倍のギャップが存在する。適応資金ギャップは非常に大きく、このギャップを埋めることが優先事項である。

適応資金と緩和資金について、パリ協定第9条第4項では、「規模を拡大して行われる資金の供与については、適応と緩和との間の『均衡(バランス)』を達成することを目的とすべきである」とされている。これは、適応資金と緩和資金の比率を1対1に近づけることと考えられる。

⁴⁹ <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2023>

⁵⁰ <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2024>

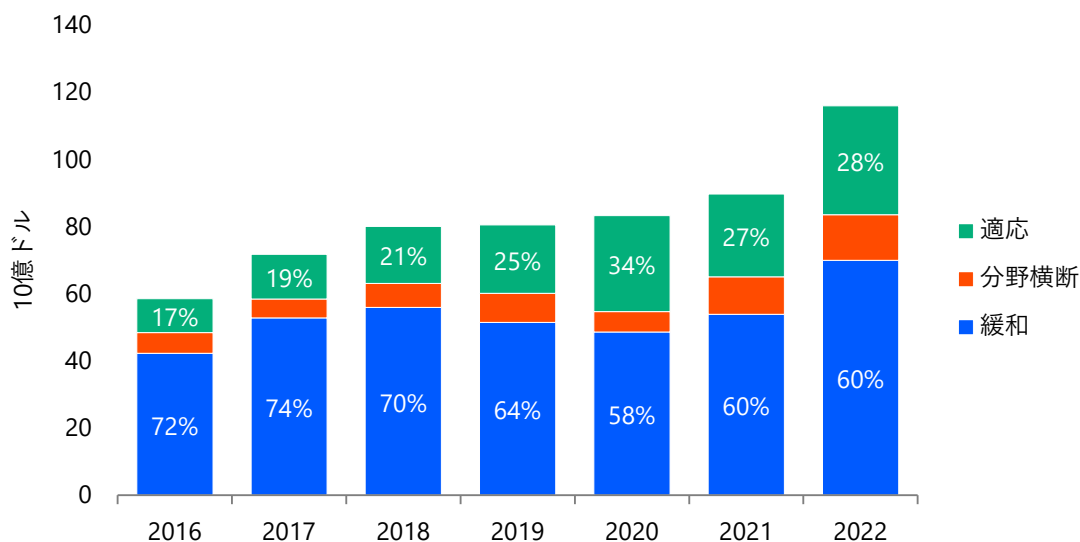
図9-6 | 適応資金ギャップ



出所: UNEP (2024) 「適応ギャップ報告書2024」 から作成

適応と緩和の金額を比較すると、先進国により提供・調達された気候資金の内訳では(図9-7)、緩和のための資金は2016年で全体の72%、2022年では60%を占めている。一方、適応の割合は2016年の17%、2022年の28%と増加してきているが、緩和の資金とのバランスにはまだ遠い。適応資金と緩和資金とのバランスをとってゆく必要がある。

図9-7 | 分野別提供・調達された気候資金(民間含む)



出所: 経済協力開発機構(OECD) (2024) 「2013～2022年に先進国により提供・調達された気候資金」 から作成

適応にはどのような分野があるか

適応の主な分野・セクターについて、UNEP「適応ギャップ報告書」では、「インフラストラクチャー、エネルギーおよび集落」「水および洪水」「農業および漁業」「沿岸・海洋資源」「森林および生態系」「極端気象・災害リスク」「保健」などを挙げている。それぞれの具体的内容は表9-3のとおりである。

表9-3 | 適応が必要な主な分野

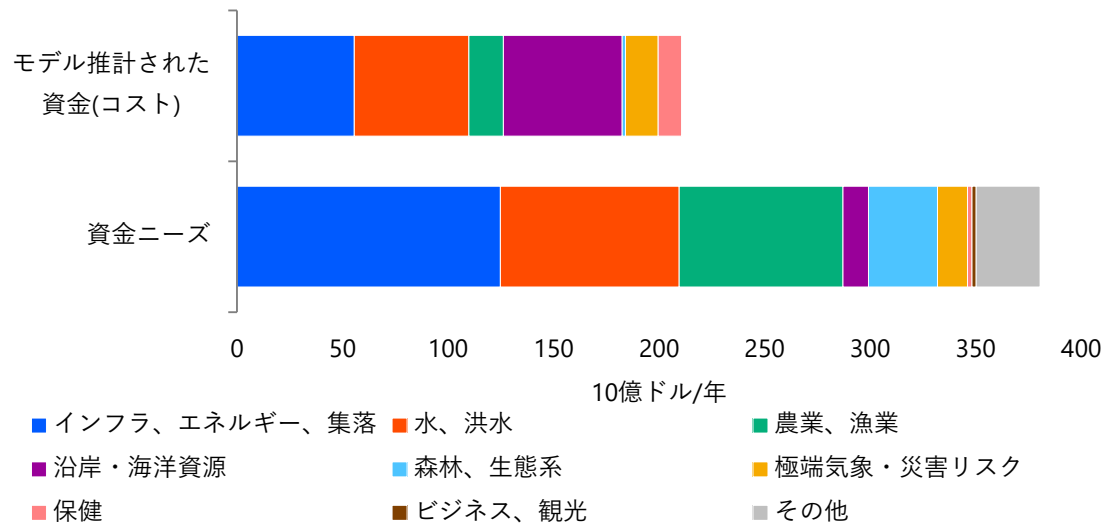
分野・セクター	内容
インフラストラクチャー、エネルギーおよび集落	エネルギー・運輸インフラストラクチャーのレジリエンス強化
水および洪水	河川洪水保護(構造物)
農業および漁業	慢性的飢餓に対応するための農業研究・開発、水管理およびインフラストラクチャー 漁獲ポテンシャル変化への対応、海洋・沿岸生態系(海洋保全地域の拡大)および海での安全の改善(暴風からの危険への対応など)
沿岸・海洋資源	海岸管理(堤防などによる洪水リスク対策)および養浜など(浸食削減)
森林および生態系	保全地域の拡大
極端気象・災害リスク	気象・気候サービス(早期警報システムなど)および社会的保護(気候極端事象反応プログラムへの資金提供)
保健	マラリア、デング熱および下痢性疾患に対する疾病管理、熱関係死亡率の増加に対する熱中症警戒アラートおよび保健セクター対応への支援、疾病調査ならびに将来の水・衛生インフラストラクチャーのレジリエンス強化

出所: UNEP (2023)「適応ギャップ報告書2023」から作成

適応の主な分野を、資金ニーズやモデル推計されたコストの金額で見ると(図9-8)、資金ニーズが高いのは、「農業および漁業」「水および洪水」および「インフラストラクチャー、エネルギーおよび集落」であり、モデル推計されたコストでは、「水および洪水」と「インフラストラクチャー、エネルギーおよび集落」が多く、「沿岸・海洋資源」も多い。そのほかでは、「森林および生態系」が資金ニーズで、「保健」がモデル推計されたコストでそれぞれ大

きな割合を占めている。現実および将来のニーズを踏まえて、適応のどのような分野を優先すべきか検討してゆく必要がある。

図9-8 | 資金ニーズとモデルによるコスト



出所: UNEP (2023/2024) 「適応ギャップ報告書2023・2024」 から作成

10. 人工知能とエネルギー需要の将来

人工知能(Artificial Intelligence: AI)とエネルギーの密接な相互関係が世界の注目を集めている。その象徴的な例として、近年、生成AIの利用拡大やデジタル化の進展がデータセンターの大幅な拡大をもたらし、局所的にはデータセンターの建設ペースに電力供給設備の立地が追いつかないことへの将来的な懸念が生じていることがある。

また、AIはエネルギー利用に関わる需要部門において、大きな便益をもたらすことが期待されている。AIは産業や運輸、建築物等において、生産性を向上させ、省エネルギーが期待できるなどエネルギー利用自体を大きく変革する可能性を有している。AIは需要予測により、最適な工場運転を導きだし、結果として生産性の向上、ひいては工場等のエネルギー効率を改善することが期待される。運輸では、自動運転により車間距離やルート選択の最適化を通じた燃費の向上と移動距離の短縮による省エネルギーを実現する。そして、建築物では快適性を維持しつつ空調等の運転を最適化することで省エネルギーを行う。このように、AIとエネルギーの将来は密接に関り合うことになる。

ここではAIとエネルギーの関係を概観し、データセンターの省エネルギーポテンシャルを検討した上で、AIが需要部門で果たしうる役割としての省エネルギーに着目し現状把握ならびに将来展望を行う。

10.1 人工知能とエネルギーの関係

近年のデータセンターの電力消費増加要因

人工知能(AI)とはコンピューターサイエンスの1つであり、人間の知能に関連する認知機能を模倣する能力を持つ機械やコンピューターを構築するための技術を指す。AIの種類はさまざまあるが、分析技術に着目すると、「ルールベース」「機械学習」「ディープラーニング」「生成AI」に分類できる。

- **ルールベースAI:** 人間が一定のルールをAIに与え、そのルールに基づいて動作するものである。
- **機械学習:** 人間の学習に相当する仕組みをコンピューター等で実現するもので、一定のアルゴリズムに基づき、入力されたデータからコンピューターがパターンやルールを発見し、そのパターンやルールを新たなデータに当てはめることで、その新たなデータに関する識別や予測等を可能とする手法である。
- **ディープラーニング:** 多数の層から成る人工ニューラルネットワークを用いて行う機械学習のこと。人工ニューラルネットワークは、人間の脳の神経ネットワークを模したもので、機械学習よりも精度が高くなる。

- **生成AI:** ディープラーニングの技術を基盤に、膨大な学習データをもとに新しいコンテンツを生成するものである。

近年生成AIの登場などを背景に、データセンターの増加とその電力消費増が、局所的な送配電電網のひっ迫や需要が集中するピーク時に電力供給が不足しかねないといったリスクを高めている。

現在、世界のデータセンターにおける電力消費のうち、14%がAIのワークロードであり、クラウドコンピューティングが54%、メールやストレージといった従来型のビジネス向けワークロードが32%を占めると推計されている⁵¹。AIは学習と推論の過程において、多くの電力を消費する。

一方で、これまでのデータセンターの趨勢に目を転じると、2015年から2019年の間、世界のデータ量が15.5 Zettabytesから2.6倍拡大していたが、電力消費は同期間においてほぼ変化なく一定の水準を維持していた。①サーバー、ストレージ、ネットワーク、インフラストラクチャー等におけるエネルギー効率の改善が進展していたこと、②小規模のデータセンターから大型クラウド、ハイパースケールのデータセンターへの移行があったこと、③画像や映像を処理する半導体チップである画像処理装置(GPU)の効率改善 が寄与している⁵²。

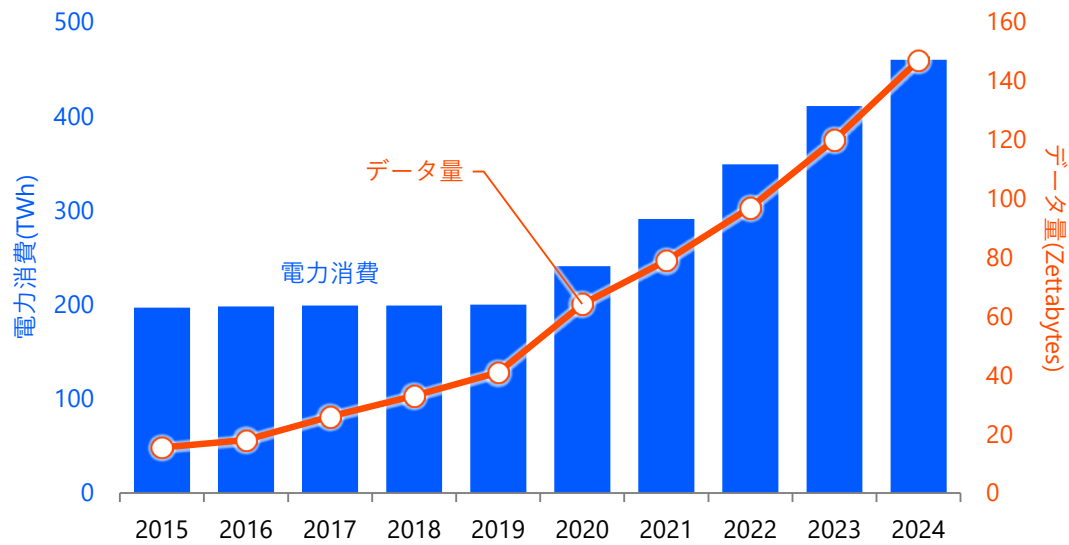
従前は、ほぼ一定の水準を維持していた世界のデータセンターの電力消費は、2020年から2023年の3年では、これまでの趨勢とは対照的に70%増大している。生成AIの利用拡大やデジタル化の進展、新型コロナウイルス禍におけるリモートワークやワーケーションの普及、それによる未提供地域を網羅する第5世代移動通信システム(5G)設備の整備が本格化したことが要因として挙げられる⁵³。すなわち、これらの要因がデータセンターの機器や設備における効率改善を凌駕するスピードで拡大したのである。

⁵¹ <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/ai-to-drive-165-increase-in-data-center-power-demand-by-2030>

⁵³

[https://www.jaif.or.jp/en/news/7022#:~:text=Among%20other%20things%2C%20it%20showed,/%20floor%20area\)%20as%20parameters](https://www.jaif.or.jp/en/news/7022#:~:text=Among%20other%20things%2C%20it%20showed,/%20floor%20area)%20as%20parameters)

図10-1 | 世界のデータセンターの電力消費とデータ量



出所: Masanet et al. (2020), Cisco, International Energy Agency, Goldman Sachs Research

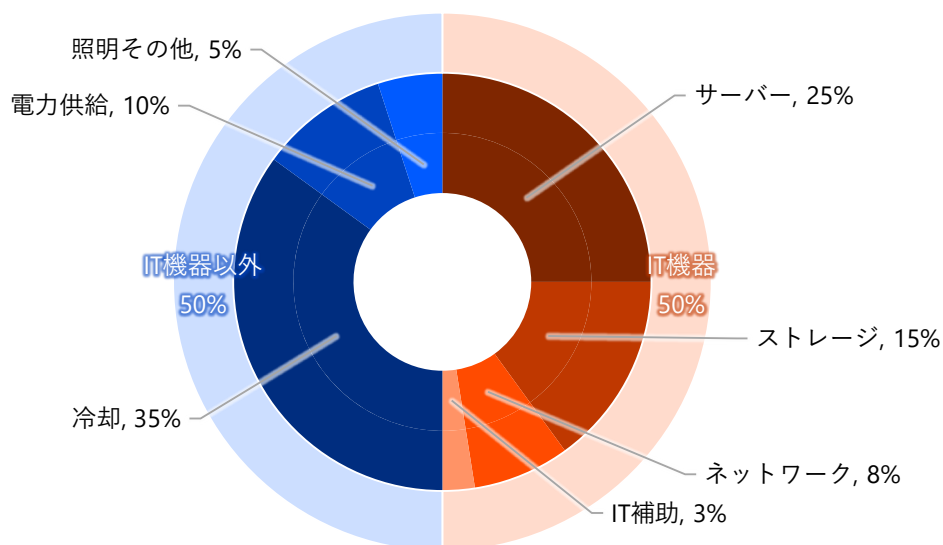
ハードとソフト面でのAIの効率化

AIとエネルギーの関係を概観するに当たり、将来的な効率改善という観点から、ハードとソフトの両面を考慮する必要がある。すなわち、①ハード面ではAIの演算をつかさどるデータセンターの情報通信(IT)機器の性能、冷却技術といった補助設備の性能、②ソフト面では異なる演算方式による電力消費の差異やAIモデルの効率化に分類できる。

データセンターの効率性能は、電力使用効率(Power Usage Effectiveness, PUE)で測ることが多い。PUEはデータセンター全体の電力消費をIT機器の電力消費で除したもので、1に近いほど省エネルギー性能が高いことを示す。データセンターはその規模に応じて性能は大きく異なるが、世界のPUE平均値は1.5程度である。PUEが2の場合は、IT機器の電力消費が全体の50%を占め、冷却に関わる電力消費が次いで大きく35%程度と続くことになる(図10-2)。都市近郊にデータセンターが設置されることが多く、土地の効率的活用の観点から、IT装置ラック当たりの高密度化が進展している。IT装置から排出される熱を冷却するため、空調機のフル稼働により効率性能が悪化する場合も生じている。

将来的には、IT機器の高効率化、革新的冷却技術の活用、設備の集約化(ハイパースケール化)など、あらゆる手段を講じる必要がある。AIのソフト面では、革新的な演算技術による省電力化が求められる。ディープラーニングにおいては、学習と推論というプロセスを経る。学習はAIシステムの構築においてエネルギーを最も消費する。

図10-2 | データセンターの電力消費内訳(PUE=2の場合)



出所: Hongyu Zhu et. Al. (2023). Future data center energy-conservation and emission-reduction technologies in the context of smart and low-carbon city construction . Sustainable Cities and Society | VOL 89 | 2023 |

生成型AIシステムでは、モデルの種類(大規模言語モデル[LLM]など)とデータの規模(数十億のWebページなど)によっては、膨大な量の計算が必要である。学習は、データセンターに設置されたスーパーコンピュータで数週間をかけて実行され、大量のエネルギーを消費する場合もある。

オランダの研究者Alex de Vrieによる生成AIの利用に関わる電力需要分析では、ChatGPTの稼働には1日当たり564 MWhの電力を消費する可能性があると指摘している。同分析でGoogleが毎日約90億件の検索にAIを使用した場合、年間29.2 TWhの電力が必要で、これはアイルランドの年間電力消費量に相当するとの分析結果が提示されている。

一方で、2025年にGoogleが発表した生成AIツールGeminiの電力消費は、1回のプロンプト当たり0.24 Whと一般的な検索とほぼ同等の水準にまで低減している。これまで、生成AIの検索では、一般的な検索より10倍電力を消費するとされてきたことと比較し、日進月歩で急速に省電力化が進展している。

表10-1 | データセンター、AIそしてエネルギーの関係:現状と将来

		現在	将来
ハードウェア(データセンター)	IT機器 サーバー、 ストレージ、 IT補助機器	IT機器はデータセンターの電力消費に占める割合が50%程度で最大 都市近郊にデータセンターが設置されることが多く、土地の効率的活用の観点から、IT装置ラック当たりの高密度化が進展。空調機のフル稼働により効率性能が悪化する場合も	ラックの配列最適化 カンパニーデータセンターからハイパースケーラーへのシフト 用途によってはエッジコンピューティングへ移行 GPUからCPUへのシフトなどサーバーの最適利用 集積回路、ストレージの高効率化
	補助施設 冷却、 バックアップ電源、 照明等	演算量の拡大とIT装置の高密度化により冷却需要も拡大。特に関連の電力消費は全体の35%程度に。	空冷式からリアドア空調方式、液冷方式、液浸方式による高効率化
ソフトウェア	演算 生成AI、 データ処理、 ソフトウェア	生成AIの演算に必要な電力消費は一般的な検索の10倍。一方で、最新の生成AIによる1検索あたりの電力消費は一般的な検索と同等相当に。	革新的なアルゴリズムを通じてタスクあたりのエネルギー需要を削減 モデルがさまざまなタスクに合わせて「適正規模」化

10.2 テック企業の取り組み

生成人工知能(AI)の利用に必要な大型データセンターを多数保有するハイパースケーラーはネットゼロに向けた野心的な目標を掲げている(表10-2)。その達成に向けた取り組みの中でも、オペレーションコストに直結するデータセンターのエネルギー効率改善においては、各社とも一丁目一番地として創意工夫を凝らしたさまざまな取り組みを行っている。

表10-2 | テック企業の取り組み

ハイパー スケーラー	ネットゼロ目標	ネットゼロ達成に向けた取り組み		
		データセンター の効率化	サプライチェーン の脱炭素化	電源の開発・支 援、二酸化炭素 除去(CDR)
Amazon (Amazon Web Services)	2040年 (Amazon全体)	効率的な冷却シ ステムの導入等 によるPUEの改善 効率的な半導体 チップの開発	低炭素建材(鉄 鋼、コンクリー ト)の利用 低炭素燃料(持続 可能な航空燃料 [SAF]、再生可能 ディーゼル)の活 用	再生可能エネル ギーへの投資、 電気購入契約 (PPA) バッテリーシス テムとのPPA、自 社システムの活 用 原子力発電の PPA、小型モ ジュール炉(SMR) 開発の支援
Microsoft (Microsoft Azure)	2030年 (Microsoft全体; アワリーマッ チング)	待機モード等の 省エネルギー運 用 先進的な冷却技 術の開発	低炭素建材(鉄 鋼、コンクリー ト、木材等)の利 用 低炭素燃料(SAF、 再生可能ディー ゼル)の活用 サプライヤーと の連携(脱炭素電 力利用の要求)	再生可能エネル ギーへの投資、 PPA 原子力のPPA (再 稼働を含む) CDR技術開発の支 援
Google (Google Cloud Platform)	2030年 (Google全体; アワリーマッ チング)	機械学習を活用 した冷却システ ムの最適化 タスクシフトに よるDR データセンター 設計の最適化	サプライヤーと の連携(脱炭素電 力利用の要求) 低炭素建材の利 用	再生可能エネル ギーへの投資、 PPA 自社技術による 脱炭素エネル ギーの実装支援

ハイパー スケーラー	ネットゼロ目標	ネットゼロ達成に向けた取り組み		
		データセンター の効率化	サプライチェーンの脱炭素化	電源の開発・支援、二酸化炭素除去(CDR)
Meta	2030年	ワークロードの監視および電力プロファイルの最適化 エネルギー効率の高いハードウェア設計 外気と直接蒸発冷却を活用した冷却の効率化	サプライヤーとの連携(2026年までに3分の2以上のサプライヤーが排出目標を設定することを目指す) 脱炭素燃料(SAF、バイオ燃料)の活用	再生可能エネルギー・バッテリーへの投資、PPA CDR技術開発の支援

ネットゼロ達成に向けた取り組み(企業横断的の取り組み)

iMasons Climate Accord (ICA):ビッグテックを中心としたデジタルインフラ企業等で構成されるiMasonsという業界団体における、デジタルインフラの脱炭素を目指す枠組み

Semiconductor Climate Consortium (SCC):半導体産業における脱炭素を目指す枠組み

ZEROgrid: 電力網の脱炭素化・信頼性向上に向けた大規模需要家を中心とした枠組み

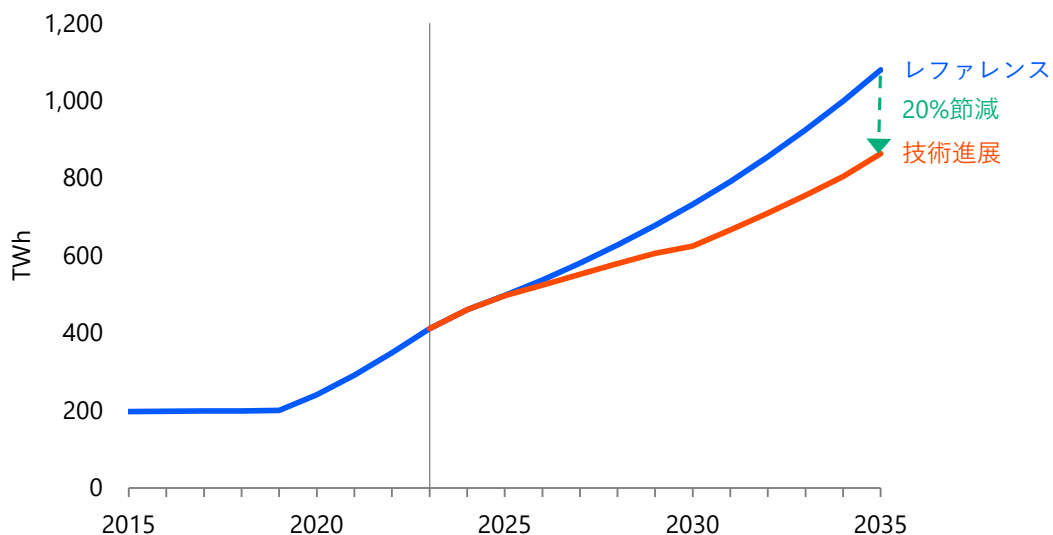
冷却システム等の情報技術(IT)以外の機器や施設全体の効率化による電力使用効率(PUE)の低減に向けては、先進的な技術やAIを活用した冷却システムの改善に加え、運用可能温度を引き上げることによる必要冷却量の低減などの取り組みが行われている。また、データセンター設計の最適化およびワークロードの監視強化やAIの活用などによるデータセンター運用の効率化も図られている。さらに、タスクシフト等によるデータセンターの柔軟性向上は、必ずしもエネルギー原単位の改善につながるわけではないものの、電力系統の需給状況に応じて電力消費量をコントロールするデマンドレスポンス(DR)に寄与することから、グリッドの脱炭素化に貢献する取り組みとして注目されている。

中央演算処理装置(CPU)や画像処理装置(GPU)など演算に利用されるIT機器の効率化に向けては、CPU等が行っていた処理のオフロード化や待機モード等の省エネルギー運用のほか、Amazon Web ServicesのTrainium、GoogleのTPU、MetaのMTIA、MicrosoftのMaia 100など、各社による独自のAI特化型半導体チップの開発等が行われている。

10.3 データセンターの電力需要と省エネルギーポテンシャル

世界のデータセンターによる電力需要はレファレンスシナリオで、2025年の497 TWhから2035年には1,080 TWhへ2.1倍拡大する(図10-3)。同期間のデータ量は230 Zettabytesから660 ZBへと2.9倍の水準に拡大する。人工知能(AI)演算関連のデータセンターにおける電力消費が増分を牽引し、その割合は現在の14%から2035年には30%へと倍増する。一方でデータセンターの電力消費増加ペースは、2020年～2024年の間に年率17.5%であったものが、2025年～2035年は8.1%へとやや緩やかになる。足元では大規模言語モデルにおいて、新しいデータをゼロから数週間かけてAIが学習する必要があるため、電力消費の大幅増があった。これが、今後のAIによる学習は変更点だけを学習する差分学習や一部のパラメーターだけを更新するなど効率的な学習が可能となっているため、将来的にはデータセンターの電力消費は従来と比較し緩やかなペースで増加する。

図10-3 | データセンターの電力需要と省エネルギーポテンシャル



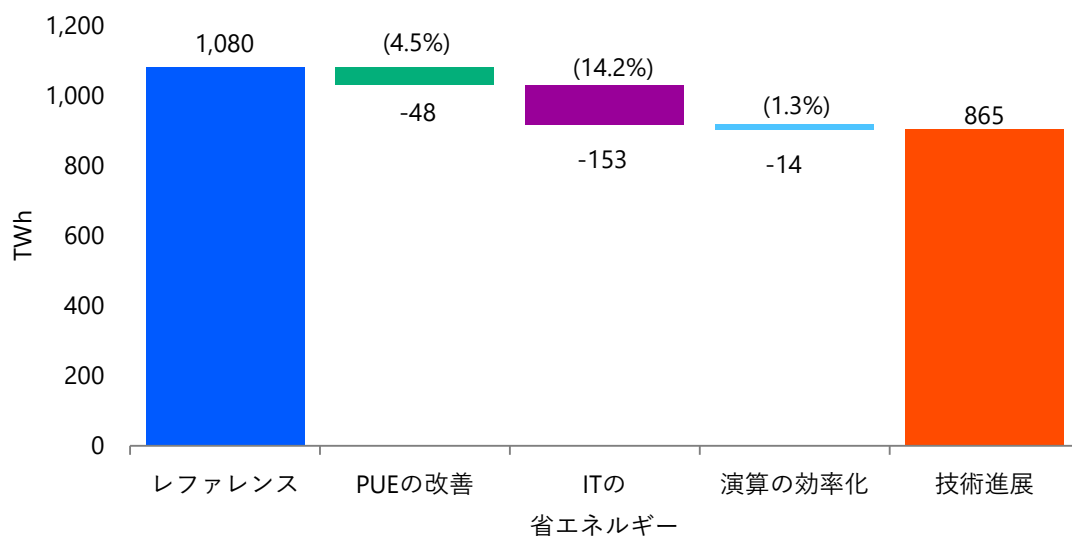
技術進展シナリオでは、データセンターの電力需要は2035年にレファレンスシナリオ比20%節減の水準となる。新規データセンターにおける高効率冷却技術の導入によるPUEの改善および情報技術(IT)機器の効率改善や演算の効率化がこれに寄与する。

世界のデータセンターにおける電力使用効率(PUE)の平均値は、現在1.5と推計される。レファレンスシナリオではこれが2035年に1.38に改善する一方、技術進展シナリオでは、液冷技術、液浸技術の導入がより拡大し、2035年に1.28に達する(レファレンスシナリオ比4.5%節減)。ITについては、より大きな省エネルギーポテンシャルを有しており、技術進展シナリオでレファレンスシナリオ比14.2%の省エネルギーとなる。サーバーでの中央演算処理装置(CPU)、画像処理装置(GPU)の高効率化、非ノイマン型コンピューターの活用、ストレージ

ジの効率化、メモリー—プロセッサ間の伝達経路の短縮、揮発メモリーの一部役割の不揮発メモリー(電源が切れても記憶内容が維持されるメモリー)による代替などさまざまな技術要素による効率改善が挙げられる。

演算の効率化の寄与は、レファレンスシナリオ比で1.3%程度の節減が期待できる(2035年)。生成AIの検索件数自体は、現在の年間3兆件から、2035年には倍以上の水準に達する見通しであるが、効率改善したモデルが一部活用されることが想定される。

図10-4 | データセンターの電力需要と省エネルギーポテンシャル(レファレンスシナリオ比) [技術進展シナリオ、2035年]



10.4 人工知能による省エネルギー(現状分析)

概観

人工知能(AI)利用拡大がデータセンターの電力消費を押し上げ、それにより電力が需給ひっ迫するとの懸念が国や地域、局所的に指摘されている。一方で、AIのエネルギー部門における利用により、天候予測による再生可能エネルギー利用の拡大、電力グリッドの最適な運用、そのほかの需要部門の省エネルギー・効率改善、新素材の開発等、さまざまな便益が期待できる。需要部門等へのAIの適用は、エネルギー消費がデータセンターよりも多いため、全体としてネットでの大きい省エネルギー効果が期待できるとも考えられる。

実際、AIが需要部門で果たしうる役割は多岐にわたる。それらは、4つのキーワードに集約できる。すなわち、「検知」「予測」「シミュレーション」「最適化」である。

例えば、製造業における調達から生産までの最適化、これを1つの工場で実施するのではなく、企業全体または企業を越えた取り組みとしてサプライチェーン全体の最適化、生産計画を実施できる。電力小売事業者による天候予測、再生可能エネルギーの最適な供給も実用化されている。需要側でのヒートポンプによる蓄熱のタイミング制御や電気自動車の充放電のスケジューリングを変動性再生可能エネルギー電源の供給に対応させるといったこともある。

以下では、部門別にAIによる省エネルギー貢献に焦点を当て、その役割を概観するとともに、省エネルギーポテンシャルや課題を検討し、将来を展望する。

産業

産業部門においてAI技術は、故障検知、生産管理や需要予測など、すでに導入が進められている。例えば、需要の変動に応じた最適な生産力の予測や調達をも考慮したサプライチェーン全体でのエネルギー消費量の最適化が行える。

また、AIは省エネルギーに向けた重要な役割を担う。特別な設備更新なしでも、追加的な省エネルギーとして、産業部門において数パーセントの省エネルギー効果をもたらす。省エネルギーをより深掘りするには、設備の更新を行う必要がある。産業部門はいわゆるhard to abateセクターであり、電化のみならず残った熱需要の節減と言う観点から、数パーセントであってもAIの貢献が期待できる点は重要である。

従来のデジタル制御は、目標値と現在値の差に基づいて制御を行うものであった。例えば、工場での熱の温度制御においては、一定の目標温度に達すると制御を停止することが生じる。そのため、時間経過とともに目標温度から乖離が生じ、再び補正が加えられることになる。

AI制御は、過去の運転データから学習し、乖離が発生する前に先回りして制御を行うものである。熱の温度制御の場合、目標値に達した後は、「対象が目標値から外れないようにするにはどのような制御を行うと良いか」を考えて制御する。

なお、AIを利用する場合、設備自体の最適運転に加え、工場内での複数プロセスの同時最適化やリアルタイム予測に基づく動的制御、大量データに基づく最適解導出、工場間での統合したアプローチが可能となり、さらなる省エネルギー効果が見込まれる。

図10-5 | 産業部門のAIによる省エネルギー

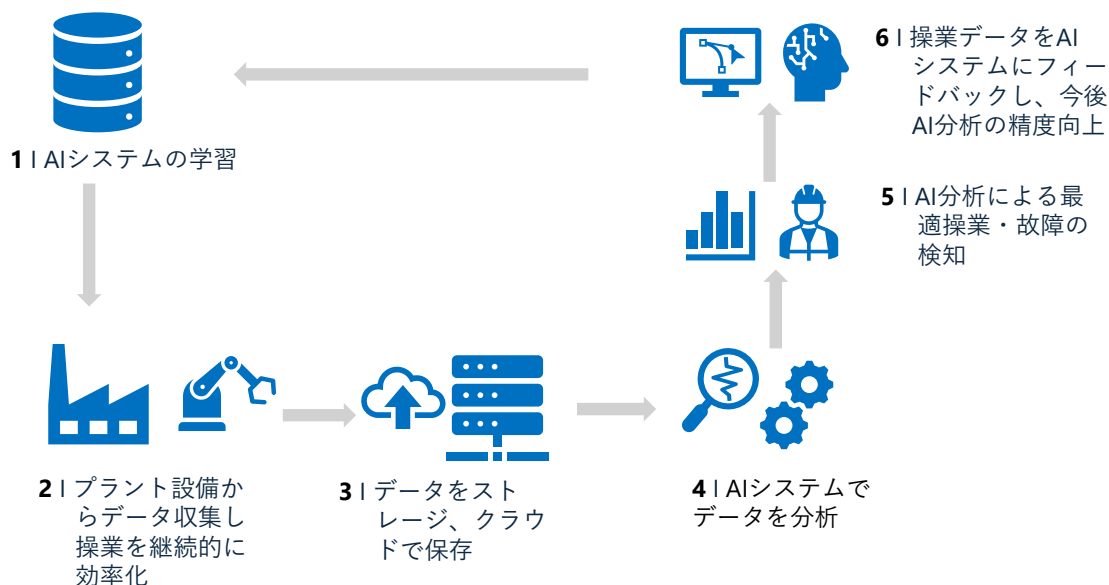
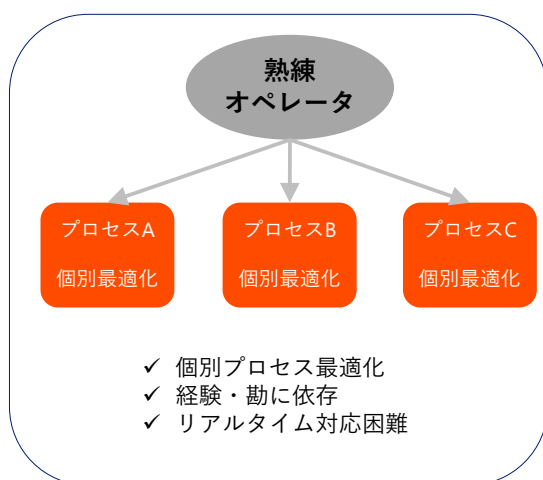
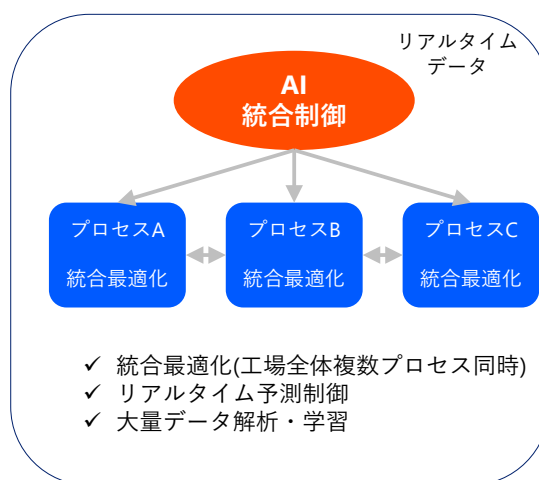


図10-6 | 産業部門の省エネルギー：従来のアプローチとAI統合アプローチの比較

従来のアプローチ



AI統合アプローチ



AIを活用した省エネルギー事例として、東芝の例が挙げられる。工場では複数のボイラ、タービンおよび発電機や冷凍機が稼働し、電力、蒸気、冷温水の供給が必要となる。東芝は、外気温や生産計画に基づき、AIによる需要予測を実施し、これに基づき数理モデルを用い、コスト最小化を目途とした設備の最適運転を実施するデジタルプラットフォームを提供している⁵⁴。

⁵⁴ 東芝エネルギーシステムズ（2021）「自家発電設備の運用を最適化」

<https://www.global.toshiba/jp/company/energy/topics/digital-transformation/dx008-210324.html>

アズビルは、工場制御にあたってのモデルの更新技術を提供している⁵⁵。工場の高度制御の精度は、モデルが工場の運用状態を精緻に表現できるかにかかっている。一方で、モデル導入後に経年変化や設備の修繕・改造によって、工場の運用特性が変わり、モデルの誤差が拡大した場合には、制御・最適運転等に関わる性能に影響する場合がある。このため、モデルを工場の変化に追従させることを目的とし、モデルの更新技術を提供している。

鉄鋼

鉄鋼業は世界の最終エネルギー消費の8%、エネルギー部門の二酸化炭素(CO₂)排出量の7%を占めるエネルギー多消費産業であり、また、その生産過程における脱炭素化は困難である⁵⁶。AIの活用により、生産状況に関するデータを取得して分析し、品質管理の改善、原材料コストの削減、機器の予知保全等のメリットが挙げられており、生産効率の向上とともに、エネルギー利用の節減やCO₂排出の削減につなげられる。

ヨーロッパ鉄鋼大手のArcelorMittalは、Energencyの産業用エネルギーパフォーマンスソフトウェアを導入し、工場の省エネルギーに取り組んでいる。同ソフトウェアプラットフォームは、AIアルゴリズムを活用し、工場のエネルギー性能をリアルタイムで評価可能である。ルクセンブルクのBelval工場では、Energencyの支援により、年間エネルギー消費量を9 GWh節減、年間エネルギー料金で15万ユーロ、3%を超える節約を達成した⁵⁷。また、ベルギーのGeel工場では、年間5%以上のエネルギー節減を目指している⁵⁸。

日本のJFEスチールは、製鉄所の高炉の状態を仮想空間に再現するサイバー・フィジカル・システム(CPS)を構築した。センサーで取得した温度や圧力などのデータに加え、高炉内部の映像情報もリアルタイムで収集し、CPS上で高炉の状態を可視化している。AIを活用し、各種モデルを使って解析することで将来を予測、最適な制御を実施する⁵⁹。デジタルツインはCPSのコア技術であり、その活用による部分燃焼最適化を実現している。同社の西日本製鉄所で実施し、従来比で燃料使用量を5%、CO₂排出量を年間6,600 t削減した⁶⁰。

⁵⁵ アズビル (2025)「パラメータ確率分布を用いたプラントモデル自動更新技術」

https://www.azbil.com/jp/corporate/pr/library/review/pdf/Review2025_05.pdf

⁵⁶ <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>、<https://unece.org/climate-change/press/cop27-un-report-shows-pathways-carbon-neutrality-energy-intensive-steel>

⁵⁷ <https://innoenergy.com/uploads/2023/01/success-story-arcelormittal-energency-eng.pdf>

⁵⁸ <https://belgium.arcelormittal.com/en/arcelormittal-chooses-energencys-artificial-intelligence-to-save-energy-in-steel-coils-processing/>

⁵⁹ <https://www.jfe-steel.co.jp/products/solution/data-science/01-blast-furnace.html>

⁶⁰ <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2023/07/230710.html>

セメント

セメント産業のCO₂排出量は世界全体で8%に相当し、日本では4.5%を占めるエネルギー多消費産業である⁶¹。現在までに提案されているセメント関連のAIは、センサーを用いたクリンカ製造時のプラント運転の熱最適化⁶²やAIによるコンクリート配合(セメント、砂、水、フライアッシュの配合割合)の最適化等⁶³が挙げられる。

ケンブリッジ大学発のベンチャー企業であるCarbon Reは、センサーを用いたクリンカ製造時のプラント運転の熱最適化を行っている。同社は、セメントプラントの運転データを基に、高精度なデジタルツインを作成し、リアルタイムでのプロセス最適化を可能にしており、プレヒーターおよびキルン(焼成)工程の燃料使用の最適化を行っている。また、既存のプラントに追加的に導入することができ、プラントに導入されているABBの「Expert Optimizer」やFLSmidthの「ECS/ProcessExpert」などの高度プロセス制御(APC)システムと連携し、AIによる自動調整が行われる。このAIを試験導入したHeidelberg MaterialsのMokra工場では、エネルギー起源のCO₂排出量が2%削減された。

製紙

製紙業は木材(パルプ)や古紙を原料として主に紙、板紙を生産しており、製造の過程で多くの電力、蒸気による熱を必要とするエネルギー多消費産業である。その製造工程は、紙の原料を作るパルプ化工程と、パルプを紙に加工する製紙工程に分けられる。

紙、板紙の生産において蒸気による熱、電力の需要は高い。エネルギー消費量、CO₂排出量を削減するため、世界各地で製紙工場におけるAIの導入を進める動きが見受けられる。例えば、乾燥工程の効率化、原料調達における配船計画の最適化、予知保全等のさまざまな分野においてAIの活用が期待される。

製紙業へのAI適用事例として、AIが提案した負荷平準化運転への切り替えにより、年間で電力コストを5%低減し、2万tのCO₂排出を削減した事例がある⁶⁴。

⁶¹ 野口貴文 09/2022. “2050年カーボンニュートラルに対するコンクリートの挑戦”. 国土技術研究センター. https://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/tech/reports/42/jice_rpt42_07.pdf

⁶² Carbon Re, <https://carbonre.com/>. Retrieved August 19, 2025

⁶³ Meta, July 16, 2025. <https://engineering.fb.com/2025/07/16/data-center-engineering/ai-make-lower-carbon-faster-curing-concrete/>

⁶⁴ <https://newji.ai/supplier/manufacturing-industry/paper-industry-dx-strategies-and-ai-iiot-application-examples/>

化学

化学産業は、石油化学や高分子化学、無機化学などに大別される。このうち石油化学は、原油から得られるナフサなどを原料に熱分解などの高温工程を伴うため、エネルギー多消費である。化学プロセスのエネルギー消費は、反応(例: 熱分解)、分離・精製(例: 蒸留)、乾燥・濃縮、搬送・混合、その他(補助設備)に大別され、特に反応と分離・精製工程での消費が多い。例えば、エチレンプラントの中核設備である分解炉は、消費エネルギー全体の過半を占める^{65, 66}。

石油化学産業では、低温活性・選択性向上などの触媒改良、廃熱回収・再利用や熱統合、加熱炉や蒸留塔の高効率化など、省エネルギーの取り組みが進められてきた。従来は設計時・定常状態を前提とした静的最適化や熟練オペレーターの経験・知識等に依存する運用が中心であった。しかし、AIを組み合わせることで、工場全体で複数プロセスを同時に最適化する統合アプローチやリアルタイム予測に基づく動的制御、大量のデータから最適解を導出するデータ駆動運用などが可能となり、省エネルギーに加えて品質安定と収率向上の両立が期待できる。

公表事例では、ユニット～プラントの最適化により数%程度⁶⁷の省エネルギーが報告され、特定のユニット(例: 回転炉)では2桁台後半の節減が示される場合もある(例: 化学メーカーで4%⁶⁸、回転炉で15%～30%⁶⁹の燃料節減)。ただし、導入範囲、運転条件、ベースラインによって効果は大きく異なる。限定事例にとどまるが、石油化学のエチレンプラントで、モノのインターネット(IoT)センサーとAIを組み合わせた可視化+最適制御により40%の燃料消費の節減が報告されている⁷⁰。

⁶⁵ <https://research-portal.uu.nl/files/691692/NWS-E-2006-3.pdf>

⁶⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218309083>

⁶⁷ <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-potential-of-advanced-process-controls-in-energy-and-materials>

⁶⁸ <https://c3.ai/wp-content/uploads/2024/05/C3-AI-Case-Study-Chemical-Manufacturer-Energy-Efficiency.pdf>

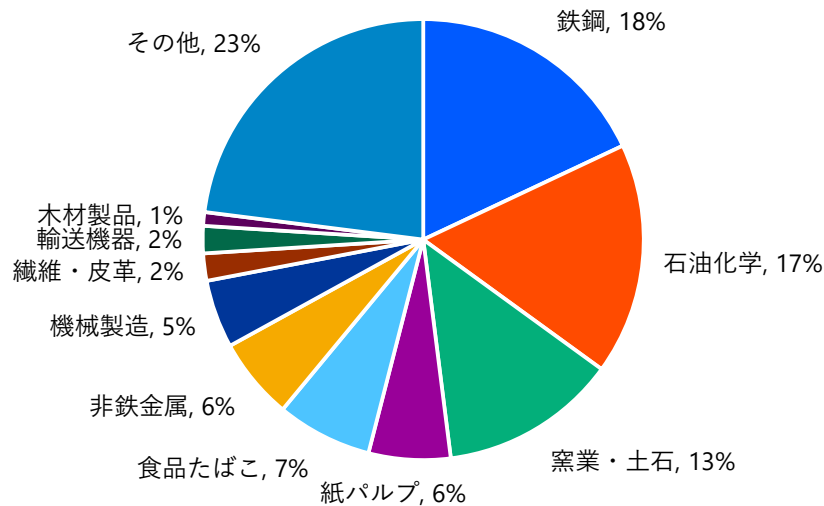
⁶⁹ <https://imubit.com/oxbow-case-study/>

⁷⁰ 横河電機 <https://www.yokogawa.co.jp/news/press-releases/2023/2023-03-30-ja/>

その他産業

ここまでエネルギー多消費産業である鉄鋼業、セメント業、製紙業、石油化学業について述べてきた。他方で、エネルギーを消費する産業はそれ以外にも存在する。その他の業種としては、食品・煙草業や非鉄金属業、機械製造業などのエネルギー消費量が多い⁷¹。

図10-7 | 世界の製造業における最終エネルギー消費量



出所: International Energy Agency (2024) "World Energy Balances"

製造業における最終エネルギー消費量では、電力が30%を占め、熱・その他が70%を占める⁷²。

AIを活用した工場での省エネルギー効果の事例として、横河電機は製造データ分析AIを用いて、省エネルギー指標を構築した上で、最適化や制御を行う汎用目的AIと組み合わせることで、3.3%の省エネルギーを実現した⁷³。富士電機は、AIを活用して、電気や熱の供給設備の運転を最適化することで5%~7%の省エネルギーが期待できるとしている^{74, 75}。同様の取

⁷¹ IEA (2024) "World Energy Balances"

⁷² IEA (2024) "World Energy Balances"

⁷³ 資源エネルギー庁(2025)「第48回 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 省エネルギー小委員会 資料4 ヒアリング資料(横河デジタル株式会社)」

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene/shinene/sho_energy/pdf/048_04_00.pdf

⁷⁴ 九州環境エネルギー産業推進機構(2024)「第148回エコ塾 競争力を生み出す省エネソリューション DX・AI技術を活用したエネルギーマネジメントシステムのご紹介(富士電機株式会社)」

<https://k-rip.gr.jp/wp/wp-content/uploads/2024/06/3e78a0a6d967afb90ef0174efdcd55c7.pdf>

⁷⁵ 富士電機株式会社HP「AI技術 ソリューション一覧」

り組みは海外企業においても実施されており、Schneider Electric Industries SASは、AIによって分析と提案を行うことで、ユーティリティ分野において10%から15%のエネルギー消費量が節減できるとしている⁷⁶。

家庭

家庭部門におけるAIを活用した省エネルギーは、各家庭のエネルギー使用状況、人の活動状況等をAIが学習・分析し、家電・機器がエネルギー効率を最適化した運転を行うことで達成される。また、AIの制御により、時々の電力料金や再生可能エネルギー電源の割合を踏まえて上げ下げデマンドレスポンス(DR)を行うなど、家庭部門のリソースを調整力として利用可能となる。家庭内のAIによる省エネルギー効果は、エアコンディショナーで14%⁷⁷、給湯で15%～35%⁷⁸、洗濯・乾燥で21%⁷⁹の事例が挙げられている。

エアコンディショナーについては、AIがライフスタイルや気温などの状況を判断し、自動制御することで快適さを保ちつつ、省エネルギーを実現する。例えば、起床時間や帰宅時間、部屋性能などを学習し、エアコンを緩やかに立ち上げることで起動時の消費電力量を抑えることができる。さらに、外出時間に合わせて自動的に温度を調節したり、AIが取得した気象情報から先回りして温度を制御したりすることでも消費電力を削減する。これらのAIによる制御はAIを搭載しない場合と比較し14%の消費電力を節減する。

https://www.fujielectric.co.jp/products/blue_navigation/energy_conservation/solution_list_energy_conservation_ai.html

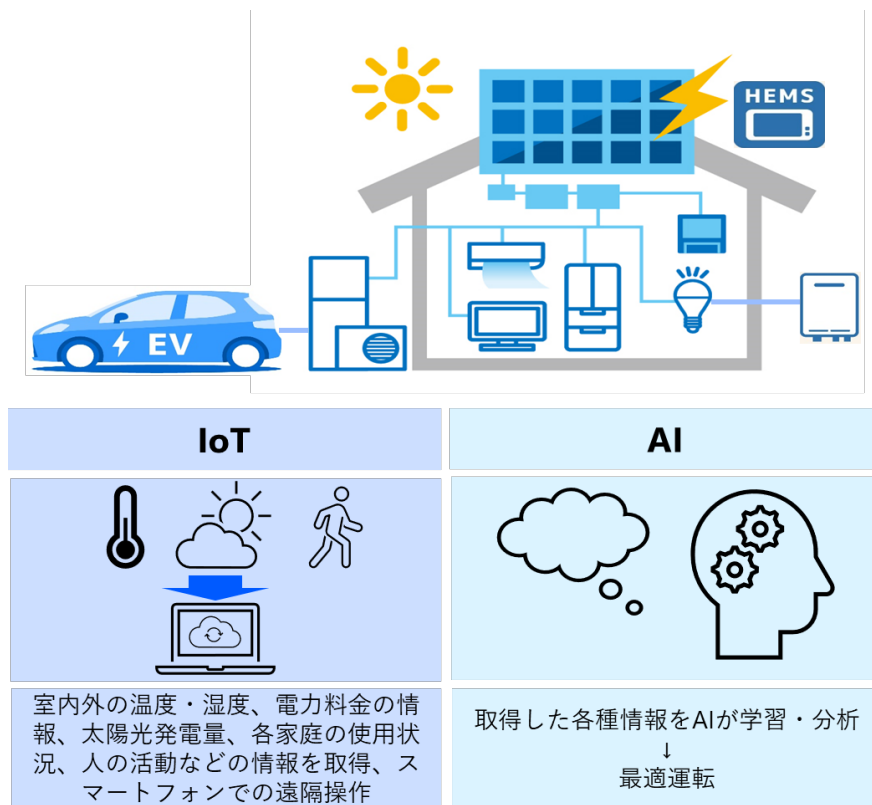
⁷⁶ Schneider Electric Industries SAS (2024) “EcoStruxure™ Industrial Advisor - Predictive Energy”
https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=PEB_99823549329&p_enDocType=Brochure&p_File_Name=EcoStruxure+Industrial+Advisor+-+Predictive+Energy+e-brochure.pdf

⁷⁷ シャープのAIoT制御ありとなしのエアコンの消費電力を比較した場合。シャープ「AIoTでもっと省エネ！」<https://jp.sharp/aircon/aiot-saving/> (2025年8月13日アクセス)

⁷⁸ パナソニックのAIエコナビ搭載の給湯器、ÖkoFEN (オーストリア)の木質ペレット給湯器による事例。パナソニック「AIエコナビ」https://sumai.panasonic.jp/hp/2point/2_11.html (2025年8月13日アクセス)、ÖkoFEN (2025)「Product catalog pellet heating」
https://www.oekofen.com/assets/download/DeutschMA/Drucksorten/Drucksorten_aktuell_EN/oekofen_catalogue_pellets_2025.pdf (2025年8月13日アクセス)

⁷⁹ パナソニックのAIエコナビ搭載の洗濯機の事例。パナソニック「AIエコナビ」
<https://panasonic.jp/wash/feature/LX/econavi.html> (2025年8月13日アクセス)

図10-8 | 家庭部門のAIによる省エネルギーのイメージ



給湯器については、主に風呂の保温時に、人の出入りをセンサーが検知することで、人が入浴していないときの自動保温のためのエネルギー消費を抑えることができる。また、風呂の利用パターンを学習することで、最適なタイミングでの加熱を実施する。これにより、AIを搭載しない場合と比べ最大35%の省エネルギーとなる。

洗濯機・乾燥機に関しては、水温、洗濯物の量・素材をセンサーで検知し、AIが最適な運転を判断することで省エネルギーの実現を図る。例えば、水温が高いときや衣類の量が少ないときは洗濯時間を短縮して自動で節電する。乾燥では水分が抜けやすい衣類が多いときは、乾燥時間を短くし、消費電力を節減する。上記のAI制御により、洗濯で最大8%、洗濯から乾燥までで最大21%の消費電力量削減の事例がある。

さらに、個々の機器だけでなく家庭エネルギー管理システム(Home Energy Management System, HEMS)でもAIを活用し、エネルギー消費の節減が可能である。AIが太陽光発電量や電気使用量を予測し、家庭内の機器をコントロールし、電力消費量の節減を促すといった仕組みである。

IoT家電は、インターネットにつながるにより、スマートフォンでのon/off操作や使用状況の遠隔確認、ならびに事前に設定したスケジュールや温度等に応じた運転が可能である。AI搭載家電は、収集したデータを学習し、より自律的に最適な運転を行うものである。

例えば、IoT家電のセンサーによって収集した過去の利用状況といったデータを家電からクラウドやサーバーに蓄積し、そのデータを天候情報等に照らし合わせてAIが学習・分析することで、よりきめ細かな制御が可能となる。

ただし、技術的には上記のようなAI搭載の家電・機器によって省エネルギーが可能であるが、これらの機器がどの程度普及するかといった点は課題である。AI搭載機器は、従来製品と比べて価格が高い傾向にあり、導入の障壁となりうる。

業務

業務部門での省エネルギーは、導入機器の効率改善が中心であり、その省エネルギー効果は導入後の実際の稼働状況によっては限定的となってしまう。しかし、近年のAI技術の進展、ネットワーク化されたセンサー類やクラウドコンピューティングの低コスト化、建築技術や建材の技術進展も包含した複合的な要因が重なって、業務部門での省エネルギーが劇的に進む契機になる可能性がある。

業務部門での省エネルギーについては、いくつかの段階に分けて考える必要がある。まずは、建物の設計段階では、これまでのエネルギー効率基準に準拠するだけにとどまらず、過去的大量データの蓄積をAI技術により活用することで、より効率的な設計が可能となる。また、運用段階では、人流や気候などをセンサーにより取得し、最適な照明、空調、動力の制御によって建物全体で効率的なエネルギー利用と快適性の両立も可能となる。さらには、周辺の建物群と並列化することで、コミュニティーレベルでの省エネルギーも見込まれる。

こうしたAIを活用した省エネルギー事例をいくつか挙げるができる。まず、ダイキン工業は、ヤマハのオフィスビルを対象にビルエネルギー管理システム(Building Energy Management System, BEMS)を通じて建築物のエネルギー利用を見える化し、蓄積したデータをAIにより解析、最適化して21%の省エネルギーを実現した事例を紹介⁸⁰している。

⁸⁰ ダイキン工業 (2025)「人工知能(AI)による空調の省エネを実現 | 熱負荷予測を活用した自動エネルギーチューニング」

<https://www.daikin.co.jp/tic/topics/feature/2025/20250507#:~:text=%E2%80%95%E2%80%95%E3%83%A4%E3%83%9E%E3%83%8F%E6%A7%98%E3%81%A7%E3%81%AF21%EF%BC%85%E3%80%81BMW%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%89%E6%A7%98%E3%81%A7%E3%81%AF16%EF%BC%85%E3%81%AE%E7%9C%81%E3%82%A8%E3%83%8D%E6%80%A7%E8%83%BD%E3%82%92%20%E7%99%BA%E6%8F%AE> (2025年8月13日アクセス)

また、同様の事例としてNTTデータ(2025)は、NTTが開発した空調最適制御シナリオ算出技術をJR新宿ミライナタワーのオフィスロビーに活用し、夏期のエネルギー消費量を50%削減できることを実証している⁸¹。その他にもZhao et al. (2023)は、大阪大学キャンパスの空調をAIによって自動制御することで、冬季の暖房のエネルギー消費を30%以上削減できることを実証している。海外でも同様に、Vattenfall (2023)は、居住用建築物のエネルギー消費をAIにより解析し、運転を最適化することで30%の省エネルギーを実証している⁸²。

建築物の省エネルギー計画を作成しても、目標と実績の乖離を日々調整するのには、労力を要するという課題がある。これを踏まえ、三菱電機のシステムでは、計画した目標値を達成するために、AIを用いた制御によりビル管理者などを介さずに空調の省エネルギーを実現している⁸³。このシステムのポイントは、受電電力と空調のエネルギー需要のパターンを機械学習を用いて分解し、省エネルギー効果を推算、その上で目標を設定し、省エネルギー管理を行うことである。またAI制御によっても実際は気象条件に応じて、空調温度など目標との乖離が生じる場合があるが、未達分を翌日の目標に再配分することにより年間で目標を達成できるようにしている。前年の電力消費との比較で1%~5%の省エネルギー効果が得られている。

AIによる制御は、建築物単体にとどまらず地域のエネルギーマネジメントにも貢献する。大成建設は、クラウド型街区エネルギー管理システム(Community Energy Management System, CEMS)を開発している⁸⁴。このシステムでは、天気予報や建物内の使用状況、過去の運用データをもとに、AIが最適な運転計画を立案する。建物にデータ収集装置を設置することで運用可能となる。また、複数の建物における制御が可能であることから、グリッドのひっ迫状況に応じて、需要を別の建物にシフトさせるなど、省エネルギーのみならず、調整力としての活用も可能となる。

⁸¹ NTTデータ (2021)「少量学習によるフィードフォワード型のAI空調制御により、省エネと快適環境の両立を実証」<https://www.nttdata.com/global/ja/news/release/2021/110100/> (2025年8月13日アクセス)

⁸² Vattenfall (2023) “Yes, AI will improve energy efficiency – Essentially all buildings can benefit from this technology” <https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2023/yes-ai-will-improve-energy-efficiency--essentially-all-buildings-can-benefit-from-this-technology#:~:text=The%20properties%27%20heating%20system%20is,total%20of%20about%2030%20percent> (2025年8月13日アクセス)

⁸³ 三菱電機 (2023)「ビル空調自動省エネルギーソリューション

“スマート・省エネ・アシスト”」<https://www.giho.mitsubishielectric.co.jp/giho/pdf/2023/2311106.pdf>

⁸⁴ 大成建設 (2025)「国内初、既存超高層複合施設にAIを活用した『クラウド型CEMS』を導入」https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2025/250711_10553.html

一方で、こうした建物のデジタル化による効率運用は、多数のネットワーク化されたセンサーの設置、収集したデータの処理によるオンサイトでのエネルギー消費の増加、あるいはデータセンター需要の増加に結び付くため、省エネルギーの結果が想定ポテンシャルと異なる可能性にも留意が必要であろう。センサー類の故障への対応や停電等の事象への対応についても考慮が必要となる。

運輸

道路

自動車輸送に係るエネルギー利用効率改善においてAIが期待されるのは、宅配便のような運送業務、すなわち数多くのトラックを使って大量の荷物を配達する際の最適化である。不特定多数の送り主からそれぞれの配達先へ荷物を届けるため、複数の配達業務をどのようにつなぎ合わせ、どのような経路で移動すれば、エネルギー利用効率が高くなるか、という経路最適化の問題である。これは、特に道路網が発達した都市部では、選択肢が非常に多い複雑な問題であり、AIを用いることによって、より良い経路を選べる可能性が高まる。経路選択に際して、道路の長さや傾斜、制限速度等が考慮されなければならないのはもちろんだが、例えば渋滞予測なども加味して最適化すると、省エネルギー効果はより大きくなると期待される。このような、トラック輸送網をAIで効率化しようとする取り組みは、国内でもすでにヤマト運輸⁸⁵等によって進められている。

また、トラックによる長距離輸送では、荷物の配達中だけでなく、配達後の空車の移動に伴う燃料消費も問題になる。エネルギー利用効率を高めるには、往路の配達と復路の配達を組み合わせ、空車を減らして配送効率を高めるのが望ましい。また、トラック走行時はできるだけ多くの荷物を積み荷台の空きを少なくすることでも、エネルギー利用効率を高められる。配達経路が重複・近接している複数の配達業務をまとめ、1台のトラックに混載して運ぶことが望ましい。このような省エネルギーの取り組みについては、花王⁸⁶やライオン⁸⁷等によってすでに進められているほか、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)事業「脱炭素社会実現に向けた省エネルギー技術の研究開発・社会実装促進プログラム」では、混載便の活用も含めたAIによる輸送効率化の検討がAir Business Clubと滋賀県立大学によって行われている⁸⁸。

⁸⁵ ヤマト運輸 https://www.yamato-hd.co.jp/news/2021/newsrelease_20210803_1.html

⁸⁶ 花王 <https://www.kao.com/jp/newsroom/news/release/2025/20250122-001/>

⁸⁷ ライオン https://doc.lion.co.jp/uploads/tmg_block_page_image/file/10377/20241225_02.pdf

⁸⁸ NEDO https://www.nedo.go.jp/koubo/DA3_100318.html

以上は自動車による輸送の計画に関わる例であるが、個別車両の運転最適化、すなわちエコドライブの実現についても、AIが貢献する可能性がある。例えば、周辺を走る自動車や付近の信号機等と通信する機能を備えた新しいタイプの「通信機能を持つ自動運転車」(Connected and Automated Vehicle, CAV)が提案・検討されている。CAVは通信によって周囲の道路状況を把握し、それに基づいて走行速度の最適化や駆動系の出力配分の調整(例: エンジンとモーターの配分調整)等をする。このことでエネルギー消費量を減らす、すなわちエコドライブを実現することができる。CAVに搭載される制御技術は、すべてがAIの応用というわけではないが、例えば信号の状況を自動車の制御に反映しようとする際には、機械学習で得られた知見やアルゴリズムが役立つと期待されている⁸⁹。

表10-3 | 道路部門のAIによる省エネルギー

用途	AIを活用した道路部門の省エネルギー
需要予測	貨物トラックやタクシー等、天候や交通情報等を踏まえ、積載効率および乗車効率を向上できる。
ルート判断	AIは機械学習を通して、ドライバーの移動に関わる好みや貨物トラックの場合は、配送の効率化等を考慮したルートの最適化を提示する。
車間距離維持	自動運転で車間距離を一定に維持することで、車列が渋滞なく移動でき燃費の改善に寄与する。また隊列走行により、空気抵抗を減少させ、燃費の改善に寄与できる。

航空、船舶、鉄道

航空、船舶、鉄道輸送でも、自動車輸送と同様な課題が発生する。まず、それぞれの飛行機・船舶・車両の飛行・航行・走行時のエネルギー消費量削減、すなわち自動車のエコドライブに相当する運転の最適化が必要になる。また、航空会社や海運会社が多数の飛行機や船舶を所有し、航空・海上輸送網を運営している場合には、発生する輸送業務を適切に組み合わせ、複数の空港や港の間の輸送が全体として効率よく行われるように輸送計画を立てる必要がある。ここで解決されるべき問題の構造は、自動車による輸送の場合と類似しており、AIによる効率向上が期待できる。実際、航空業界ではアラスカ航空が飛行ルートの最適化にAIを利用しており⁹⁰、また海運業界ではコスモ石油が内航船の配船計画にAIを利用して燃焼消費量の削減等の成果を上げている⁹¹。

⁸⁹ CAVの論文 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114025>

⁹⁰ アラスカ航空 <https://www.alaskakouku.com/2021/06/airspace-intelligenceai.html>

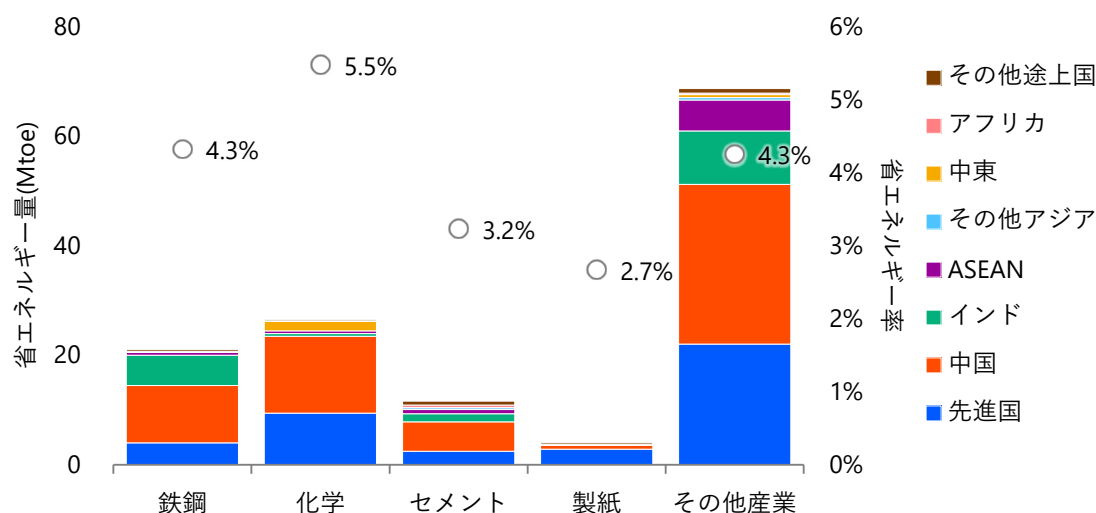
⁹¹ コスモ石油 <https://www.cosmo-energy.co.jp/ja/information/press/2025/250415-01.html>

10.5 人工知能による省エネルギーに関わるシナリオ分析

産業部門の人工知能による省エネルギーポテンシャル

産業部門における人工知能(AI)による省エネルギー効果は、2035年において技術進展シナリオ比2%~6%に上る(図10-9)。短中期的(2025年~2035年)には、AI導入は既設設備への後付けで、最適化・効率化を図るのが主軸となる。業種別では、化学での省エネルギー効果が石油換算26百万t(Mtoe)と大きく、これに鉄鋼、セメント、製紙業の21 Mtoe、11.5 Mtoe、4 Mtoeが続く。これらに加え、機械工業等の非エネルギー多消費産業で68 Mtoeの効果がある。

図10-9 | 産業部門のAIを活用した省エネルギーポテンシャル(技術進展シナリオ比) [2035年]



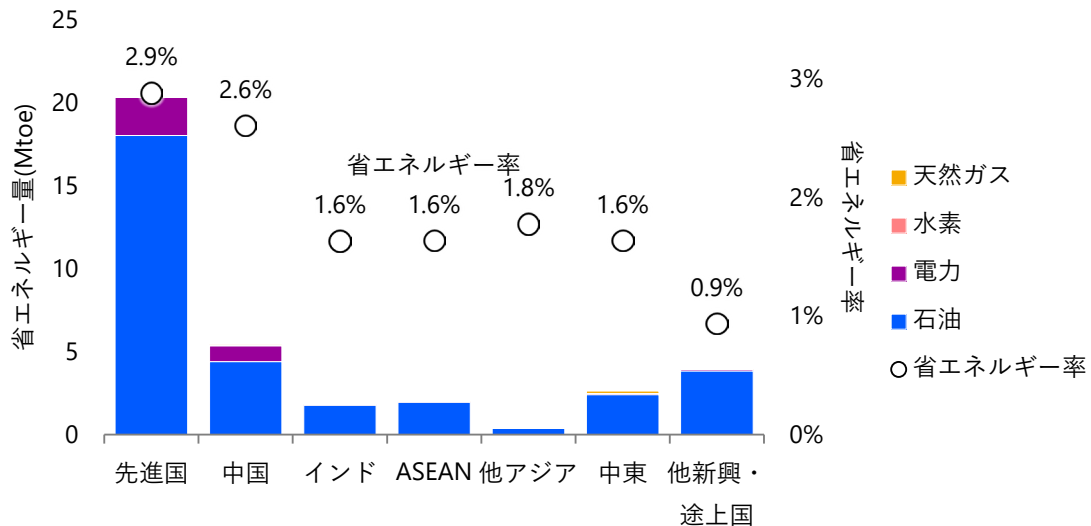
地域別には、経済協力開発機構(OECD)諸国では豊富な資本とデジタル基盤の優位性によりAI導入が早期から進む。中国では国家戦略による積極的デジタル化推進と新設・大規模増強を背景に、初期段階から高いAI導入率が見込まれる。インド、東南アジア諸国連合(ASEAN)、その他アジア、アフリカ、その他新興・途上国は、当初は後追いとなるが、急速な産業発展とコスト競争力向上ニーズから導入が加速し、2035年以降は新增設時の一括導入により後発優位を活かした高効率AI導入が期待される。

自動車のAIによる省エネルギーポテンシャル

AIを活用した自動運転による乗用車、バス、トラックの省エネルギー効果は2035年で36.5 Mtoeに上る(図10-10)。先進国での省エネルギー効果は技術進展シナリオ比2.9%程度、

中国では2.6%である。一方で、その他の新興・途上国では短中期(2025年～2035年)のうちに自動運転の導入は大きくは進展せず、省エネルギー効果は0.9%～1.8%程度となる。

図10-10 | 自動車のAIを活用した省エネルギーポテンシャル(技術進展シナリオ比) [2035年]

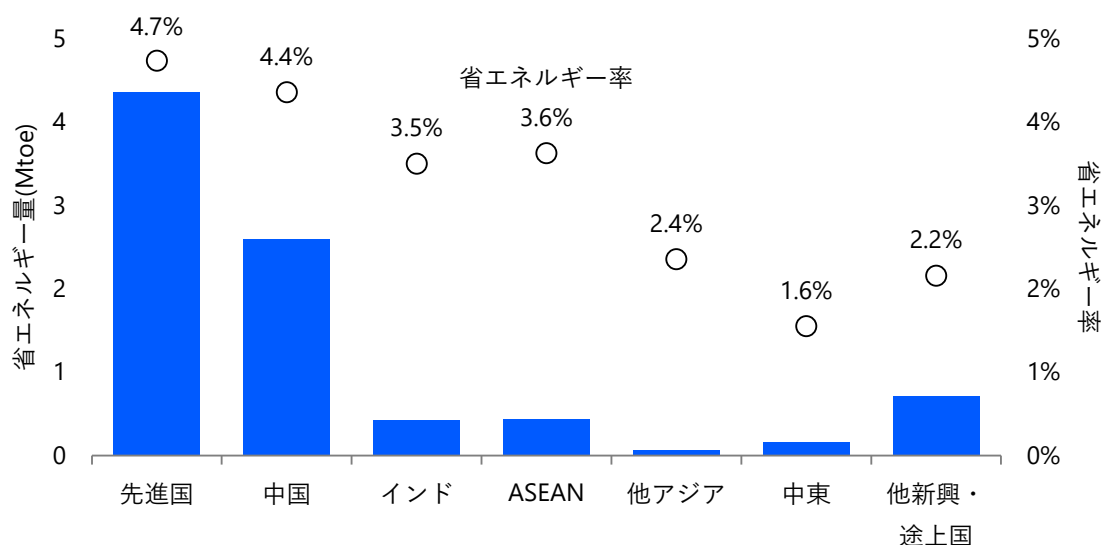


自動運転技術は電気自動車に限定されるものではなく、内燃機関自動車でも導入が可能である。電気自動車の普及が乗用車に比べ難しいとされるトラックやバス、タクシーなど商用車でも自動運転技術の利用拡大が期待される。省エネルギー効果として、天候や交通情報を考慮した需要予測により積載効率や乗車効率が向上できる。また、交通渋滞を回避し、ルート判断による最適化運転により輸送距離が節減される。自動運転により一定の車間距離を維持することで自動車の燃費改善に寄与できる。

業務部門のAIによる省エネルギーポテンシャル

2035年における冷暖房・換気・照明の省エネルギーポテンシャルは技術進展シナリオ比 8.8 Mtoe (102 TWh)に上る(図10-11)。これは2035年のデータセンターの電力需要をおよそ10%節減する効果に相当する。先進国での2035年におけるAIの省エネルギーポテンシャルは、4.3 Mtoeで、中国では2.6 Mtoeとなる。新興・途上国でのAI普及は、短中期においては最新の建物に限定される。

図10-11 | 業務部門のAIを活用した省エネルギーポテンシャル(技術進展シナリオ比) [2035年]

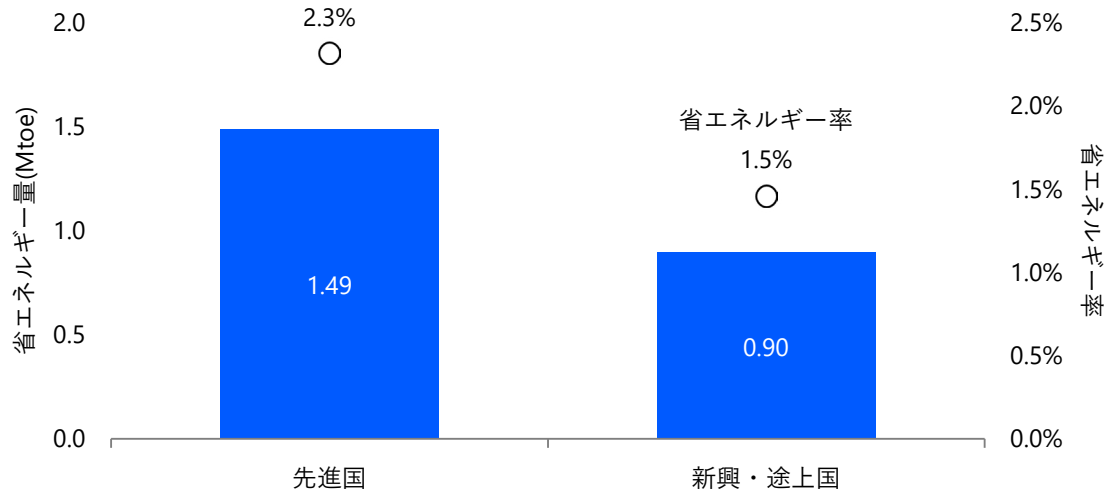


先進国では、1万m²以上の大規模建物ではビルエネルギー管理システム(Building Energy Management System, BEMS)によるデジタル制御がすでに標準化されている。BEMSでは、ルールに基づいて建物のエネルギー管理を行うが、これにAIの学習・予測機能を追加することで、より自律的な建物のエネルギー管理を行えるようになる。なお、AIは、既存設備の更新なしに、人流や気温といった情報をセンサーにより取得し、最適な照明、空調、動力の制御によって快適性を維持しつつ、建物全体でエネルギー効率の改善に寄与できる。新興・途上国では、デジタル化からAI導入というステップを踏むことによる普及が長期的には(2035年以降)期待される。

家庭部門のAIによる省エネルギーポテンシャル

AIを搭載した冷暖房・給湯機器の省エネルギー効果は、2035年において先進国で技術進展シナリオ比1.5 Mtoe (2.3%節減)、新興・途上国で0.9 Mtoe (1.5%節減)に上る(図10-12)。AIを搭載した技術は初期投資の高いハイエンド商品であるため、短期・中期での導入率は他の部門と比較し相対的に小さくなる。例えば、AI空調は、天候予測や人の行動を踏まえ先回り制御など、快適性を維持したままで省エネルギーが実現できる。さらなる普及に向け、その効果に関する理解促進が求められる。

図10-12 | 家庭部門のAIを活用した省エネルギーポテンシャル(技術進展シナリオ比) [2035年]



さらなる普及に向けて

AIの需要側での活用は、産業部門の生産性向上と省エネルギー、自動車の燃費向上や移動距離の節減、民生部門での快適性を維持したエネルギー効率の改善など、さまざまな可能性を有している。2035年においては、技術進展シナリオと比較して数%の追加的な省エネルギー効果が期待できる。

しかしながら、AIのエネルギー需要部門での導入に向けては多くの課題が存在している。第一に、産業や業務部門、自動車等において、AIを活用できる人材が不足している。例えば、工場の設備オペレーターは、過去の経験則に拠って設備の運転を行う場合が多い。AIで何ができるのかについて工場等の従事者に向けた理解促進が不可欠である。

また、活用できるデータが整備状況も課題として挙げられる。データが多ければ多いほど、精度の高い予測が可能であり、それに基づく最適運転が可能となる。すなわち、AIを運用する前にデータの整備が必要となる。

一方で、生産性向上によりエネルギー消費が増えてしまうなど、リバウンド効果にも注意が必要である。現在、AIが人間の行動やエネルギー利用のパターンを学習し、先回り制御することにより、リバウンド効果を抑える試みがなされている。こうした事例の共有も需要部門でのAI利活用促進に向けて重要である。

政策的な対応としては、人材の育成や認識の向上に向けたベストプラクティスの共有、普及拡大に向けたインセンティブの付与が求められる。AIの効果を発揮させるには、データの標

準化や入力時のルールを決める必要もある。さらには、サイバーセキュリティの確保など、AIの運用時の対応も必要となる。

データセンターの省エネルギーポテンシャルは、情報技術(IT)の効率改善による貢献が相対的に大きい。そのため、従来の中心課題である冷却効率の改善以外にも、IT機器の効率改善に向けた対策・方策が求められる。それには、データセンターの省エネルギーを測る指標としてITの効率など(電力使用効率[PUE]以外)の追加的評価も求められよう。また、データセンター事業者のみならず、半導体メーカー、IT関連メーカーといった多様なステークホルダーが協力することが重要となる。