令和 2 年度調査報告書

令和 2 年度

新興国等におけるエネルギー使用合理化等に資する事業

（マルチ枠組における国際動向調査）

令和 3 年 3 月

委託先　一般財団法人　日本エネルギー経済研究所

はじめに

世界的なエネルギー需要の増大や地球温暖化問題の深刻化といった課題の解決の一つの手段として、省エネルギーの推進及び再生可能エネルギーの導入拡大に取り組むことは、先進国、途上国問わず有効である。

現在、マルチの枠組においても世界的な省エネルギー推進や再生可能エネルギー導入拡大が注目されており、各種会合において議題として取り上げられ活発に議論が行われている。我が国は、省エネルギー及び再生可能エネルギー分野において先進的な取組を行ってきた実績と強みがあることから、こうした経験を国際社会と共有し、国際的な省エネルギー推進、再生可能エネルギー導入拡大の取組においてリーダーシップを発揮することが期待されている。

本事業では、国際エネルギー機関（IEA）、国際再生可能エネルギー機関（IRENA）、国際省エネルギー協力パートナーシップ（IPEEC）、クリーンエネルギー大臣会合（CEM）、アジア太平洋経済協力（APEC）等のマルチ枠組の活動に積極的に関与し、各国との関係を強化するとともに、国際動向についての情報収集を行った。また、今後の我が国による省エネルギー・再生可能エネルギー分野の国際展開及び環境整備に向けた、これらマルチ枠組の有益な活用を目指して事業を遂行した。具体的には、各マルチ枠組における省エネルギー・再生可能エネルギー関連の国際会議及び国際活動に、日本国政府と連携して参加し、各国の出席者との積極的な意見交換を通じて最近の動向について情報収集を行うとともに、日本の先進的取組を紹介するなどマルチの枠組における日本の主導的役割の強化を進めることで、世界的な省エネルギー・再生可能エネルギーの推進への貢献を図った。

本報告書においては、上記のマルチ枠組の活動に関して各タスクの概要、活動状況、今後の展望と課題、日本の貢献方法の分析を行うものである。本報告書の構成は、第 I 編に省エネルギー関連タスク、第 II 編に再生可能エネルギー関連タスクの二部構成でまとめている。

令和 3 年 3 月

（一財）日本エネルギー経済研究所

目次

はじめに ..... **III**

世界の省エネルギー・再生可能エネルギー政策を巡る 2020 年度の動向 VII
世界のエネルギー需給情勢 X
世界のエネルギー需給見通し XIV
世界的なエネルギー需給規模の急成長における多国間協力の意義 XVIII
マルチ枠組みにおける我が国の役割 XXII
マルチ枠組みにおける我が国への裨益 XXII

第 I 部　省エネルギー編

第 1 章 国際的な省エネルギー組織の取り組みと今後の課題 **1**

1.1 IEA EEWP（IEA 省エネルギー作業部会） 1
1.1.1 概要と意義 *1*
1.1.2 本年度の活動 *2*
1.1.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法 *3*
1.2 省エネルギーハブ 5
1.2.1 概要と意義 *5*
1.2.2 本年度の活動 *5*
1.2.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法 *5*
1.3 IEA 4E（電気機器エネルギー効率実施協定） 6
1.3.1 概要と意義 *6*
1.3.2 本年度の活動 *8*
1.3.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法 *11*
1.4 APEC EGEE&C（APEC 省エネルギー専門家会合） 13
1.4.1 概要と意義 *13*
1.4.2 本年度の活動 *14*
1.4.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法 *16*

第 2 章 各会合の議事録（省エネ編） **17**

2.1 IEA-EEWP 17
2.1.1 第 45 回 IEA-EEWP *17*
2.1.2 第 46 回 IEA-EEWP *17*
2.2 IEA 4E 18
2.2.1 第 25 回 IEA4E 執行委員会 *18*

2.2.2 第25 回IEA4E 執行委員会.....*18*
2.3 APEC EGEE&C.....19
2.3.1 第55 回APEC EGEE&C 会合.....*19*

第II部　再生可能エネルギー編

第1章 国際的な再生可能エネルギー組織の取り組みと今後の課題.....**22**

1.1 IEA REWP（IEA 再生可能エネルギー作業部会）.....22
1.1.1 概要と意義.....*22*
1.1.2 本年度の活動.....*23*
1.1.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法.....*24*
1.2 IRENA（国際再生可能エネルギー機関）.....25
1.2.1 概要と意義.....*25*
1.2.2 本年度の活動.....*27*
1.2.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法.....*28*
1.3 ISGAN（インターナショナル・スマートグリッド・アクションネットワーク）.....29
1.3.1 概要と意義.....*29*
1.3.2 本年度の活動.....*31*
1.3.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法.....*31*
1.4 APEC EGNRET（APEC 新・再生可能エネルギー技術専門家会合）.....32
1.4.1 概要と意義.....*32*
1.4.2 本年度の活動.....*34*
1.4.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法.....*35*

第2章 各会合の議事録（再エネ編）.....**37**

2.1 IEA REWP.....37
2.1.1 IEA-REWP 第77 回執行委員会（REWP ExCo77）.....*37*
2.1.2 IEA-REWP 第78 回執行委員会（REWP ExCo78）.....*37*
2.2 IRENA.....38
2.2.1 第19・20 回IRENA 理事会.....*38*
2.2.2 第11 回IRENA 総会.....*38*
2.3 ISGAN.....39
2.3.1 第19 回執行委員会（ExCo19）.....*39*
2.3.2 第20 回執行委員会（ExCo20）.....*40*
2.3.3 第21 回執行委員会（ExCo21）.....*41*
2.4 APEC EGNRET.....42
2.4.1 第54 回会合.....*42*

巻末付録１：マルチ枠組が発刊するレポート等の要約 43
（省エネ編） 43
巻末付録２：マルチ枠組が発刊するレポート等の要約 279
（再エネ編） 279

世界の省エネルギー・再生可能エネルギー政策を巡る 2020 年度の動向

省エネルギーおよび再生可能エネルギーの推進はエネルギー安全保障ならびに地球温暖化対策問題への取り組みの中でも最も重要な政策である。主要先進国・途上国を含めた 175 の国・地域が参加するパリ協定（2016 年発効）は、産業革命前からの世界の平均気温上昇を 2℃未満に抑え、さらに平均気温上昇 1.5℃未満を目指すとし、参加国において 2020 年以降の地球温暖化対策努力を定めている。

コロナ禍を受けた 2020 年は、経済回復に向けた道筋として「グリーンリカバリー」に向けた経済計画に合意したのを契機として、多くの国において 2050 年以降にカーボンニュートラルの達成を目標として設定、または検討し始めている。具体的には、中国では、習近平国家主席が 9 月 22 日、CO2 排出量を 2030 年までに減少に転じさせ、2060 年までにカーボンニュートラルを目指すと表明した。韓国では、文在寅大統領は 10 月 28 日に 2050 年にゼロカーボン排出を達成すると公約した。コロナ禍を受けた景気対策の一部として、韓国では、グリーン回復を目指し、約 70 億ドルの財政支出を行う。日本では菅義偉首相が 10 月 26 日に 2050 年にネットゼロ排出を達成することを表明した。徹底した省エネ、再エネの推進並びに次世代太陽光やカーボンリサイクル等の技術開発の重要性も強調した。

なお、コロナ禍に直面した世界各国において、省エネの推進は、雇用創出と経済回復、気候変動対策とエネルギー強靭性の向上という目的を達成する重要な手段であることが再認識された。

運輸部門では、欧州の主要都市や中国および米国カリフォルニア州の ZEV 規制と踏襲する 13 州での ZEV 規制が牽引している。EV（バッテリー式 EV およびプラグインハイブリッド EV）の販売台数は、2020 年には前年比 30%増の 324 万台に達した。地域別の販売台数では 2020 年は初めて欧州の販売台数が中国を超過し、前年比 139%増の 140 万台を記録している。コロナ禍の助成措置の強化並びに、95g の CO2 排出量規制が欧州での販売台数の増加に寄与している。

経年劣化により容量低下した EV のバッテリーの定置型への転用等の二次利用を促進し、コバルト等の希少資源を効率的に利用することが、将来的な EV 販売を見据え益々重要となる。この観点から、各国のバッテリーリユース・リサイクルに向けた対応が継続されるのに加え、国際標準化への検討が進められている。

欧州委員会はバッテリーに関する EU 法の改正を 2020 年 12 月に提案した。その主な内容は（1）ラベリングによるカーボンフットプリント情報の提示、（2）中古バッテリーの回収目標と義務、（3）コバルトやリチウム等の希少金属のリサイクル率表示、並びに（4）耐用年数の表示である。また本改訂案では、バッテリーの回収時期を把握し、リユース・リサイクルする体制を構築する目的で、「Battery Passport」としてオンラインでバッテリーのライフサイクルを把握するメカニズムを導入するとしている。

中国はすでに EV バッテリーの製造、販売、使用、リサイクルを追求できる情報をオンラ

イン上に提示し、事業者・消費者がアクセスできる仕組みを形成しており本格的な運用に向けた取り組みが継続する。カリフォルニア州は、2022 年までに EV バッテリーを 100%リユースする目標形成に向けた議論が継続される。

民生部門では、2020 年には景気回復策として建築物の省エネ改修や高効率機器への更新に対する施策が各国で公表された。EU が打ち出す建築物の省エネ改修について、従来型の断熱改修や機器の更新以外にも、「サイト近隣の再エネと建築物の統合」や、「循環型経済の形成原則に則った建材の利用」に加えて、「デジタル技術の導入を促す改修」が指向されているのは注目すべきである。これらに対応すべく EU では、「Smart Readiness Indicator」という建築物がスマート化にどの程度準備できているかを表す指標を用いた準備が進められる。

英国では、同国が目指す「グリーンな産業革命」に向けた計画の一つである建築物に関して、2021 年には「熱と建築物に関わる戦略」を形成する予定であり、新築建築物のエネルギー効率水準の向上や非効率なボイラーをヒートポンプに置換えるなど電化に向けた対応が継続されている。これ以外にも、脱炭素化の観点からカリフォルニア州では、2020 年はガスネットワークへの新規接続禁止等、電化に向けた動きが展開している。

2020 年は再生可能エネルギー（以下、再エネ）の分野も COVID-19 パンデミックの影響を否応なく受けた。しかし、その影響は 2020 年前半と 2020 年後半で大きく異なる様相を見せた。2020 年前半は前代未聞の世界的パンデミックに襲われた経済的・社会的混乱によってエネルギー需要の急減や原油価格の暴落が騒がれる中、成長市場である再エネ市場にも先行きの不透明感が色濃く漂った。2019 年通年の再エネ発電設備の新規設置量は過去最大の 190GW に達し、COVID-19 パンデミック前の予測では、2020 年の新規導入量は 2019 年をさらに大きく上回る 210GW まで急増するとの楽観的な見方が広がっていた。そうした好景気に沸く再エネ発電業界の前に COVID-19 パンデミックが突然襲ったのである。2020 年の再エネ市場は、発電容量の増加が COVID-19 前の予測から 10%以上低い 170GW 程度まで鈍化する、との悲観的な見通しが 2020 年前半には支配的になった。2020 年に再エネ発電容量の増加が鈍化する理由としては、再エネ発電設備、特に多国間にわたる風力のサプライチェーンの混乱が深刻で長期化していること（他方、太陽光発電については供給元が中国一国に偏っており、同国のロックダウンが世界的に早期に解除されたことからサプライチェーンの混乱が比較的早期に解消された）、世界各国における都市部のロックダウンによって建築物へのアクセスが制限されて屋根置き太陽光発電設備の新規設置が困難になっていることが挙げられた。この時点での再エネ政策の関心テーマはもっぱら「稀にみるパンデミックによる経済的混乱の中で再エネ導入を維持あるいは加速するためにどのような政策を打ち出すべきか」であった。

ただし、発電量全体が減少に転じて、石炭火力をはじめとする火力発電の発電量が急減する中で再エネ発電量だけは増加を維持するという予測が唯一の明るい見通しとして伝えられた。再エネ発電量だけが増加する背景には、これまでの投資で再エネ発電設備容量が

2019 年に大きく増加し（上述の通り 190GW と大きく増加）これらが 2020 年に発電を開始したこと、多くの国で優先給電や FIT の下での買い取り義務があり再エネ発電への優遇措置が適用されていること、（バイオマス以外の）再エネ発電の限界削減費用がゼロに違いためメリットオーダーで取引される欧米の卸電力市場で有利に働くことである。

状況が急速に変わるのは、2020 年後半に入り、COVID-19 パンデミック第一波が次第収束し、経済回復が鮮明になってからである。当初想定されていた鈍化ペースをはるかに上回る勢いで再エネ発電の新規設置が進み始めたのである。2020 年前半の市場予測では同年通年の再エネ発電容量の増加量は（上述したように）170 GW 程度とされていたが、この水準は 2020 年 10 月頃には早くも到達してしまった。再エネ発電への旺盛な新規意欲が COVID-19 パンデミック下でも衰えることなく続いていたことになり、2020 年前半の予測はこの投資意欲を過少評価していたとも見ることができる。結局、2020 年後半には、2020 年通年での再エネ発電設備の増加量は、過去最大であった 2019 年の 190 GW を上回る 200 GW を超えるという予測に大きく上方修正された。市場を取り巻く状況は 2020 年前半と後半ではまるで変ってしまったのである。再エネ発電量についても、火力発電量の減少が世界各国で目立つ中で、再エネだけが順調に発電量を増加させる傾向が世界的に鮮明になった。大幅な減収に見舞われた化石燃料ビジネスと対照的な状況となり、再エネ発電ビジネスがパンデミックに対してレジリエントであることが図らずも実証された形となった。

加えて、2020 年後半には世界各国で脱炭素社会形成に向けた動きが急加速した。前述の通り、COVID-19 の世界的混乱がそこからの世界秩序を新たに形成するという流れの中で脱炭素という目標に集約された。脱炭素へ向けた世界的モメンタムの急速な形成は COVID-19 パンデミックに襲われる 2020 年以前にはほとんど予想されていなかったことである。皮肉なことに 2020 年の COVID-19 パンデミックを経て、再エネ発電はそのレジリエンスを発揮しただけでなく、脱炭素への急速なシフトの中で将来に向けた再エネの一層導入加速は不可避なものとなったのである。

再エネへの政策的関心は 2020 年前半の「COVID-19 の再エネへの影響」から同年後半の「2050 年脱炭素の実現に向けた再エネの導入をいかに進めるか、特に再エネのエネルギーシステムへの統合をいかに進めるか」に再び回帰した。つまり、2020 年までに既に顕在化していた重要課題の一つ、「再エネのエネルギーシステムへの統合、とりわけ VRE の急速な増加による電力システムの柔軟性確保」が再びかつ一層先鋭化した形で政策立案者の優先的課題に戻ってきたのである。

本事業の対象となるマルチ国際枠組み、すなわち IEA の REWP、GIVAR、IRENA、ISGAN のいずれの場においても電力システムの柔軟性をいかに高めてゆくかは数年前より高い関心テーマとして議論されている。これらのマルチ国際枠組みにおいては、共通して、VRE 増加に伴う柔軟性確保は技術的には「解決可能な課題」との認識が既に形成されており、その柔軟性をコスト効率的に確保してゆくための制度的あるいは法的枠組み、規制や市場形成はどうあるべきか、について集中的な議論が行われている。世界的な脱炭素の流れを

受けて、この関連分野に関する議論は今後も一層多面的かつ精緻化し、マルチ国際枠組みの場を通じた専門的知見の共有が非常に重要になるであろう。

また、太陽光をはじめとしたVREは途上国でも急速に増加しているため、電力システムの柔軟性確保は先進国だけでなく途上国にとっても重要な政策課題になりつつある。途上国の電力システムは一般に脆弱なケースも多い。また急増する電力需要の増加に伴って電力システムの拡大・増強が進められているなど先進国とは状況が異なり、計画段階から将来の柔軟性確保を前提としたシステムを構築することが可能である。こうした観点からも途上国は積極的に議論に参加しており、これがマルチ国際枠組みの場における電力システムの柔軟性確保に向けた議論を一層活発にさせている。

ここへ近年加わった新たなテーマがエネルギーのデジタル化である。IoT、AI、ブロックチェーンといったデジタル技術の急速な進歩は、供給側のVREと分散型再エネ、需要側の蓄電池、EV、需要機器といった膨大な量の分散型エネルギー資源のアグリゲーションと最適制御を可能とする。デジタル技術の進歩がもたらす現実的な影響については依然として未解明な部分も多くあるが、電力システムの柔軟性を高めるために大きな役割を果たすことが期待されている。今後はデジタル技術の進展を前提とした制度設計や市場形成の在り方が議論されることになる。

また、2019年以降、とりわけ2020年に入ってから急速に関心が高まっているのが、再エネ電気から電気分解で得られる水素（いわゆるグリーン水素）である。再エネ、とりわけ太陽光と風力発電コストの急速な低下によって、化石燃料からの改質水素との競争性を持ちうるコスト水準での水素製造を模索する動きが活発化している。近年の再エネの進展はもっぱら発電分野に集中しており、最終エネルギー需要全体の8割を占める（電力需要以外の）分野、特に化石燃料の直接燃焼による冷熱需要の分野は再エネ化がほとんど進展していない。再エネから得られる水素によってこの閉塞状況を打開できる可能性が出てきており、P2Gによる電力システムの柔軟性確保の観点からも、水素は再エネ分野の新しい重要テーマとしてマルチの国際枠組みにおいて既に定着したと言ってよい。

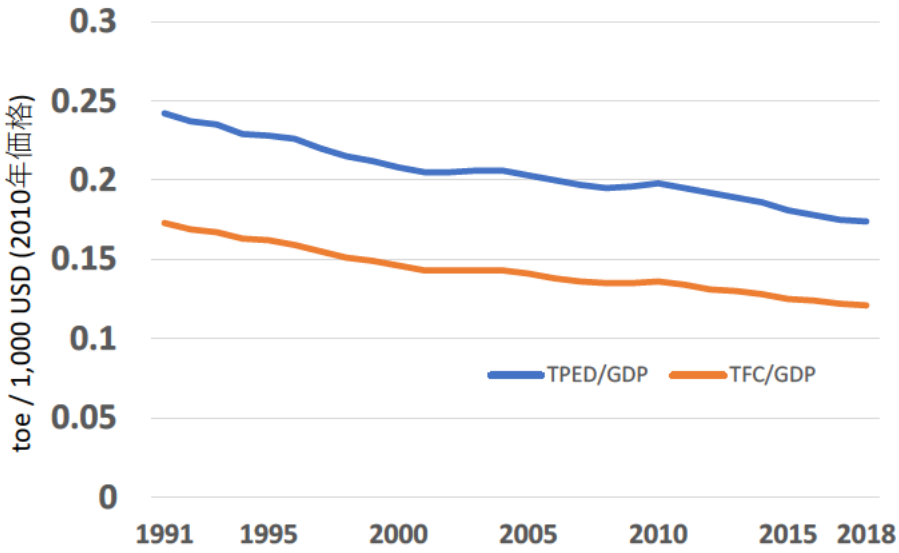
世界のエネルギー需給情勢

エネルギー原単位の推移

続いて、省エネルギー・再生可能エネルギーのマルチ枠組み活動の理解に不可欠である、世界のエネルギー需給情勢の内、エネルギー原単位の推移についてまとめる。

序図 1 は、1991 年から 2018 年の世界のエネルギー効率改善に関わる趨勢を把握する指標として、GDP あたりの一次エネルギー原単位と最終エネルギー原単位を概観するものである。エネルギー原単位の変動には、経済活動や人口、産業構造、適用技術等が影響するため、図が示す通り、その改善ペースは年代によって大きく異なる。例えば、同期間における一次エネルギー原単位は、年率平均1.21％で改善したところ、1991-2000年では同1.67%

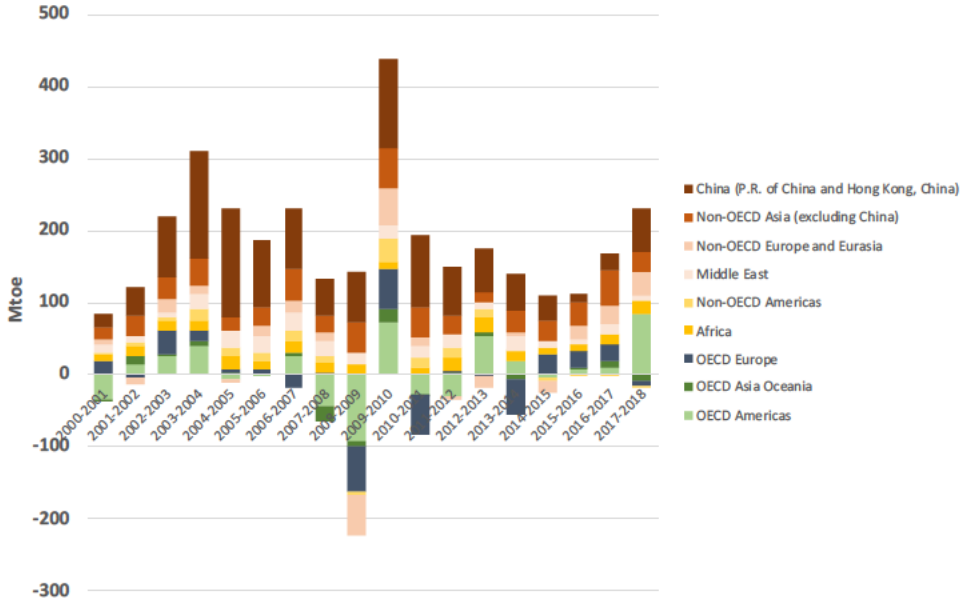
の改善、2001-2010 年は 0.49%、2011-2018 年では、同 1.61%のペースで改善した。最終エネルギー消費の原単位については、1991-2018 年の間では、年率平均 1.45%での改善であったところ、1991-2000 年では、年率改善が 1.87%と相対的に高く、2001-2010 年の間は、0.56%改善、2011-2018 年は同 1.45%の改善で推移した。



（出所）日本エネルギー経済研究所(2021)、IEA (2020) “Energy Balances of OECD and Non-OECD Countries” より作成

序図 1. 世界のエネルギー原単位の推移

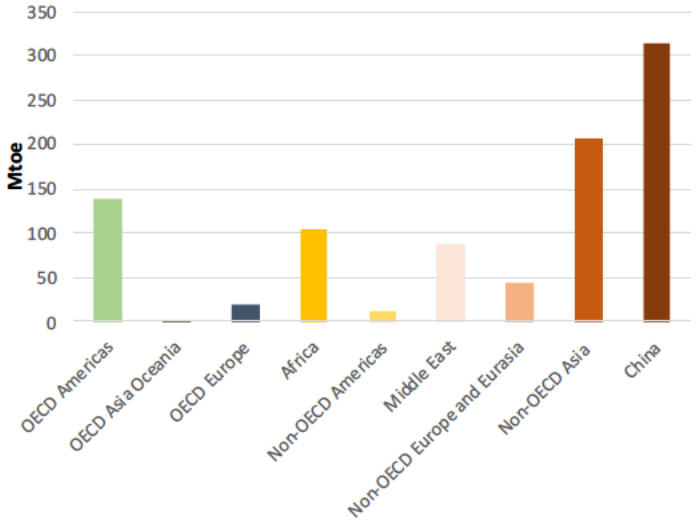
世界のエネルギー原単位の推移に影響する要因を分析するために、ここでは地域別のエネルギー増減に対する貢献を部門別の趨勢が把握できる最終エネルギー消費に焦点を当て外観する。序図 2 が示す通り、最終エネルギー消費の地域別増減には、大きく二つの趨勢が指摘できる。1 点目は、中国とアジアを中心としたエネルギー増分への貢献が 2000 年以降、世界の経済がリーマンショックによって冷え込んだ 2009 年まで大きく推移してきたことであり、2 点目は OECD 諸国のエネルギー増分幅が足元の 2015 年以降において縮小していることである。



（出所）日本エネルギー経済研究所(2021)、IEA (2020) “Energy Balances of OECD and Non-OECD Countries” より作成

序図 2.　世界の最終エネルギー消費の地域別増減（2000–2018 年）

序図 3 では、最終エネルギーの地域別増分を 2011 年から 201 8 年について示す。図が示す通り、同期間に世界の最終エネルギー消費の増分は 986 Mtoe であったところ、これに対する貢献は中国（香港を含む）が 314 Mtoe と 32%,これに Non-OECD アジアの 206 Mtoe（21%）が続く。先進国では、北米とメキシコおよびチリを含む OECD Americas が 139 Mtoe と最大であり全世界のエネルギー増分に占める割合としては、14%に上る。

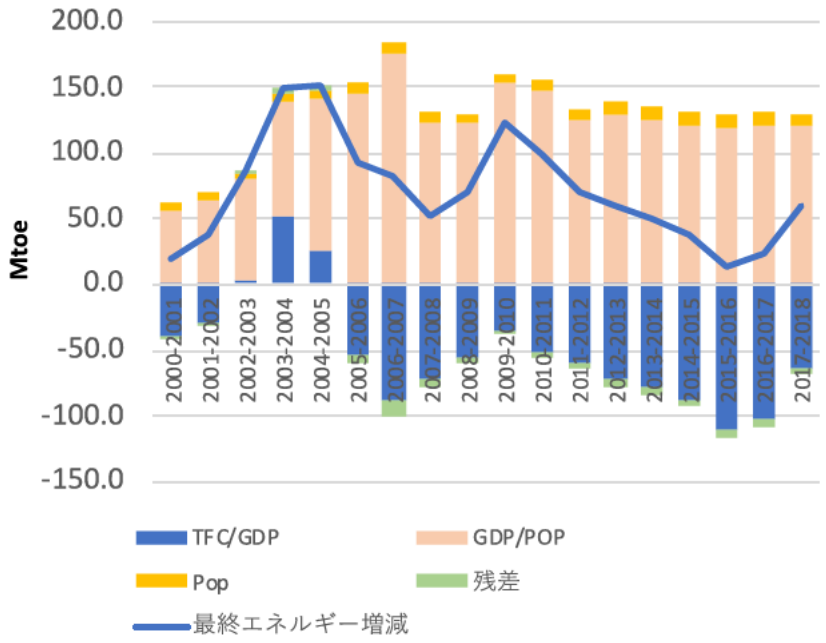


（出所）日本エネルギー経済研究所(2021)、IEA (2020) “Energy Balances of OECD and Non-OECD Countries” より作成

序図 3.　世界の最終エネルギー消費の地域別増分（2011–2018 年）

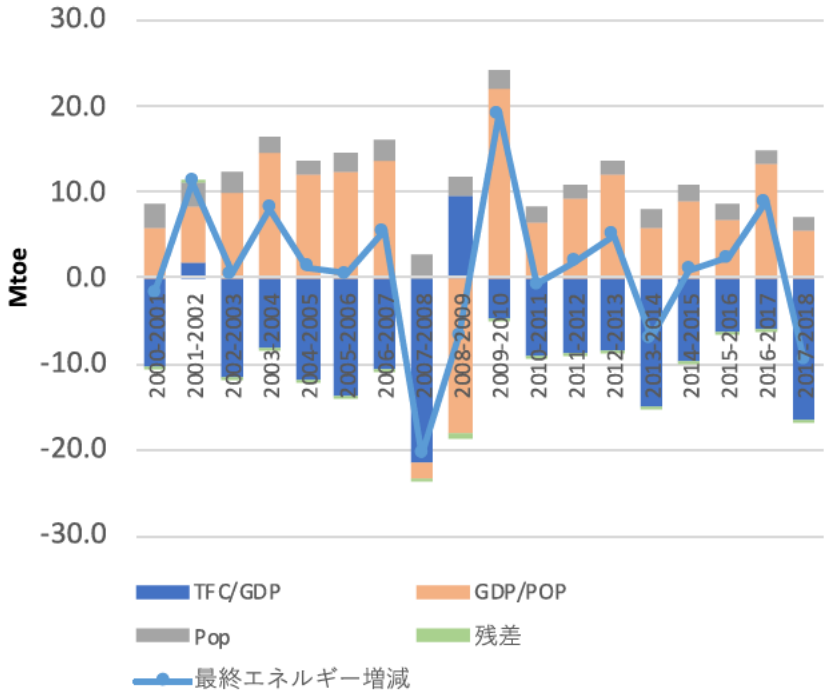
序図 4 から序図 5 では、エネルギー原単位の改善がどの程度エネルギーの増減に影響を与えてきたかを把握する目的で、要因分析を行う。ここでは、部門別の経済活動の派生需要である最終エネルギー消費に着目し、その増減要因を以下の通り、（1）エネルギー原単位要因、（2）経済要因、（3）人口要因、（4）その他の要因を残差として分析する。

序図 4 は中国の最終消費エネルギー増減要因の分析結果である。図が示す通り、中国のエネルギー原単位はリーマンショックによる世界経済が低迷した 2008-2009 年、2009-2010 年を除いて改善傾向で推移している。一方で、経済要因とその他要因がその改善幅を大きく上回り、エネルギー需要が増加してきたことがわかる。特に、その他要因として、国営企業を中心とした設備投資の拡大がエネルギーの需要増を牽引してきたと指摘できる。なお従来、中国では重工業主導でエネルギー効率の改善を行なってきたが、近年はエネルギー構造のサービス化が原単位の改善に寄与していることも指摘できる。



（出所）日本エネルギー経済研究所(2021)、IEA (2020) “Energy Balances of OECD and Non-OECD Countries” より作成

序図 4.　最終エネルギー消費の増減要因分析（中国）



（出所）日本エネルギー経済研究所(2021)、IEA (2020) “Energy Balances of OECD and Non-OECD Countries” より作成

序図 5.　最終エネルギー消費の増減要因分析(OECD Asia Oceania)

序図 5 は日本や韓国、オーストラリア、ニュージーランドを含む OECD Asia Oceania の最終消費エネルギー増減要因の分析結果である。図が示す通り、中国の傾向とは異なり、エネルギー原単位が着実に改善しており、エネルギー増分を抑制する効果が見て取れる。LED の導入等によるコスト効果的な手段に加え、追加的な改善を目途とした基準強化や運用面での効率改善等が同地域において共通の課題として指摘できる。

世界のエネルギー需給見通し

ここではエネルギーの将来見通しについて日本エネルギー経済研究所のエネルギー予測モデルに基づき概観する[1]。

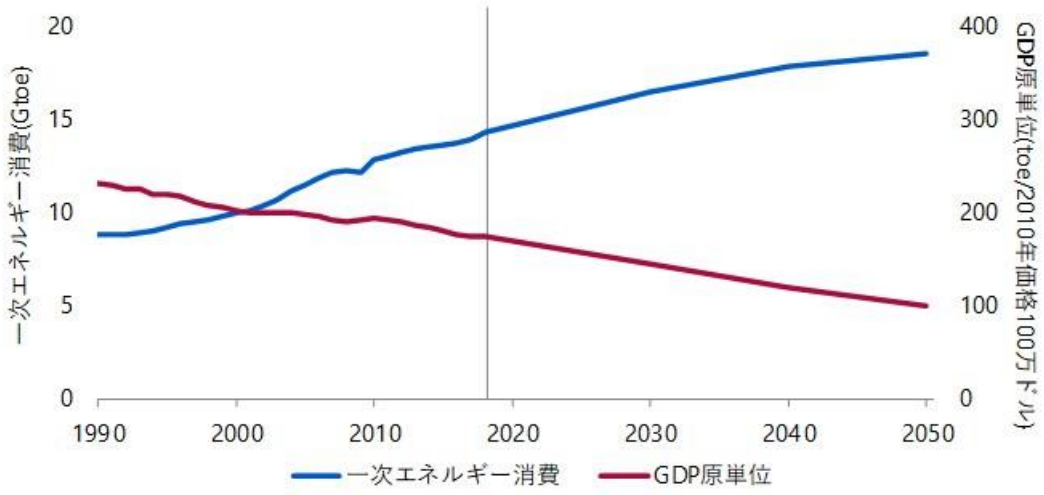
エネルギー・環境政策等の今日までの変遷を反映し、今後も趨勢的に推移してゆくとする「レファレンスシナリオ[2]」では、経済発展、生活水準の向上とともにエネルギーの需要は

[1] 世界エネルギー需給情勢および見通しについては、世界における 2050 年までのエネルギー需給予測を示した日本エネルギー経済研究所「IEEJ エネルギーアウトルック 2020」のデータに基づく。

[2] 日本エネルギー経済研究所の計量分析モデルにおいては、「レファレンスシナリオ」として、過去の趨勢および現在までのエネルギー・環境にかかる政策・技術等に従って将来の見通しを作成している。本シナリオでは今後、過去の延長上に見込まれる政策等を織り込んでいる。すなわち、政策・技術等の現状固定

ますます高くなってゆく（経済発展のためにはエネルギーが必要であるとも言える）。新型コロナウイルス感染症(COVID-19)は世界中に広がり、感染者数・死者数は増加し続けている。各国は国境封鎖・都市封鎖などにより拡大抑制を図ったが、これらの施策は旅客・貨物の移動や企業の生産活動を滞らせ、運輸部門や産業部門を中心に世界各国のエネルギー消費を減少させた。しかしながら、ワクチン・治療薬が開発されれば、各国の経済活動は力強さを取り戻し、世界の経済およびエネルギー消費も再拡大することになる。

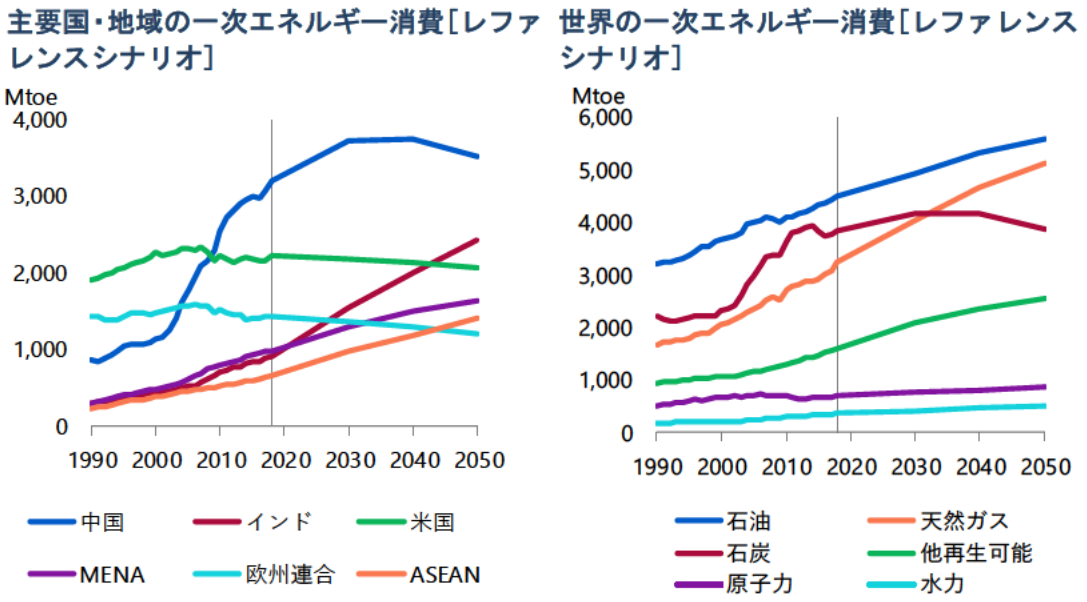
世界の一次エネルギー消費は、短期的には、2020年はCOVID-19の影響により減少する。しかし、長期的には現在に比べ1.3倍に増加する(序図6)。1990年から2018年まで年率1.8%であった増加率は2050年にかけて同0.8%に低減するが、これは各国が効率性を高めて原単位を減少させる効果である。



（出所）日本エネルギー経済研究所、“IEEJ Outlook 2020　深刻化するエネルギートリレンマの克服に向けて”2020年10月

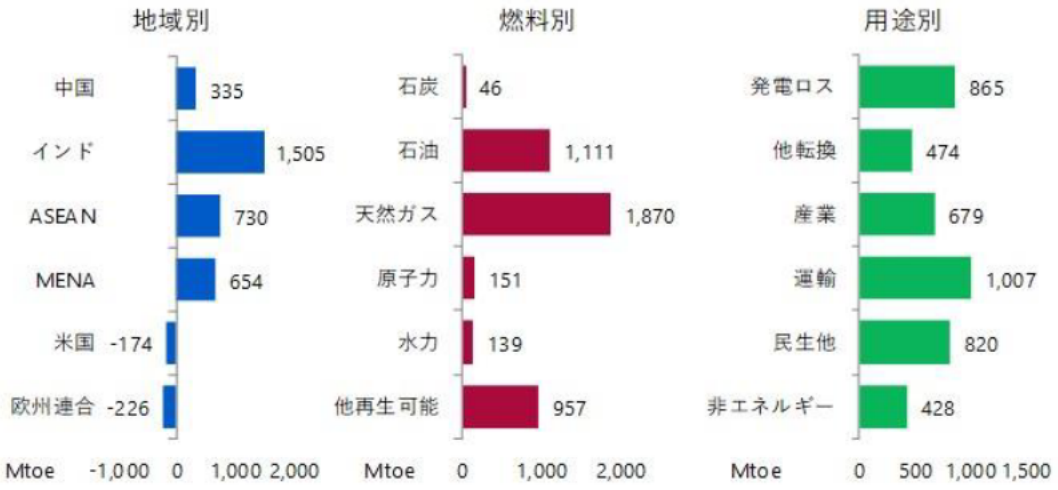
序図 6.　世界の一次エネルギー消費と対 GDP エネルギー消費原単位（レファレンスシナリオ）

を意味するものではない一方で、趨勢を逸脱した急進的な省エネルギー・低炭素化政策は打ち出されないものと想定している。



（出所）日本エネルギー経済研究所、“IEEJ Outlook 2020　深刻化するエネルギートリレンマの克服に向けて”2020年10月

序図 7.　主要国・地域の一次エネルギー消費[レファレンスシナリオ]（左図）
世界の一次エネルギー消費[レファレンスシナリオ]（右図）



（出所）日本エネルギー経済研究所、“IEEJ Outlook 2020　深刻化するエネルギートリレンマの克服に向けて”2020年10月

序図 8.　一次エネルギー消費増減[レファレンスシナリオ、2017-2050 年]

とりわけ世界の一次エネルギー消費増大を牽引するのは新興・途上国である(序図 7)。2018 年に 60.0%であった新興・途上国の世界シェアは、2050 年には 70.5%まで拡大する。世界のエネルギー消費が COVID-19 影響から大きく回復する要因は、新興・途上国にある。

したがって、新興・途上国がどのようなエネルギー源を利用するか、そして新興・途上国のエネルギー消費をどのように抑制してゆくか、ということが世界全体のエネルギー消費の動向を大きく左右する。

この新興・途上国のエネルギー消費のうち、特に大きなシェアを占めるのが、中国、インド、東南アジア諸国連合(ASEAN)のアジア新興・途上国である。新興・途上国全体に占めるアジア新興・途上国のシェアは2018年に36.0%であったが、2050年には42.4%まで拡大する（序図 7、序図 8)。COVID-19から回復する世界経済とエネルギー消費の拡大をデカップリングする鍵は、アジア新興・途上国のエネルギー政策やエネルギービジネスによるところが大きい。

世界のエネルギー消費を充足するために、石油、天然ガス、石炭の化石燃料が大きな役割を果たし続ける。今後最も増加するエネルギー源は天然ガスで、2050年の消費量は2018年の1.4倍になり、発電部門での消費を中心に年率1.4%で成長する(序図 8)。次いで大きく増加するのは石油で、運輸部門(自動車、航空、船舶など)を中心に年率0.7%で拡大する。石炭は、大気汚染や気候変動問題等を背景とした利用抑制の動きがあり、2040年頃をピークに減少に転じる。2050年の化石燃料シェアは78.8%で、2018年の81.2%に比べて減少するものの、世界が化石燃料なしにそのエネルギー需要に見合う供給を行うことは容易ではない。

原子力や再生可能エネルギーなどの非化石エネルギーは、その規模・シェアを拡大し続ける。原子力・水力・その他再生可能エネルギー(固形バイオマス除く)は、2018年から2050年の増加量の29%を占める。2018年には1990年と同じ18.8%であったシェアは、2050年には21.2%に到達する。しかし、非化石燃料だけで世界のエネルギー消費を賄うことは非常に難しい。2050年までのタイムラインにおいては、化石燃料と非化石エネルギーの併用が現実的である。

一方、用途別では、運輸部門と発電部門が今後最も増加する。運輸部門は、所得向上に伴う自動車利用の増加が大半を占めるが、航空、船舶による消費量も大きく伸長する。発電部門は、所得水準の向上や未電化地域における電力インフラの整備などを背景に、利便性の高い電力がより多く使われるようになり、供給側から見た電化率は特にアジアで上昇する(・船舶)による消費量も大きく伸長する。発電部門は、所得水準の向上や未電化地域における電力インフラの整備などを背景に、利便性の高い電力がより多く使われるようになり、供給側から見た電化率は、特にアジアで上昇する。世界の運輸部門と発電部門のエネルギー消費増大は、アジアを中心とした新興・途上国の運輸・発電インフラ整備を前提としている。運輸・発電部門に続くのは、産業・民生部門である。

世界的なエネルギー需給規模の急成長における多国間協力の意義

こういった化石燃料を中心とした世界的なエネルギー需要の増大傾向、これに伴って想定されうる地球温暖化問題の進行に対応するため、省エネルギーならびに再生可能エネルギー導入推進の取り組みは、世界的規模で喫緊の課題である。このような問題は、一カ国だけでの取り組みではその効果が限定的となりうる。地球規模での持続可能な取り組みを実現するためには、諸外国とも連携をとり、これらの課題に取り組むことが不可欠である。

翻って、国際的なマルチの枠組に目を向けると、世界的な省エネルギー推進や再生可能エネルギー導入拡大が、各種会合において議題として取り上げられ活発に議論が行われている。例えば、国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）、国際再生可能エネルギー機関（IRENA：The International Renewable Energy Agency）、国際省エネルギー協力パートナーシップ（IPEEC：International Partnership for Energy Efficiency Cooperation）、クリーンエネルギー大臣会合（CEM：Clean Energy Ministerial）、アジア太平洋経済協力（APEC：Asia-Pacific Economic Cooperation）等では、省エネルギー・再生可能エネルギーの促進のために、参加国で協力して活動を行っている（序表-1）

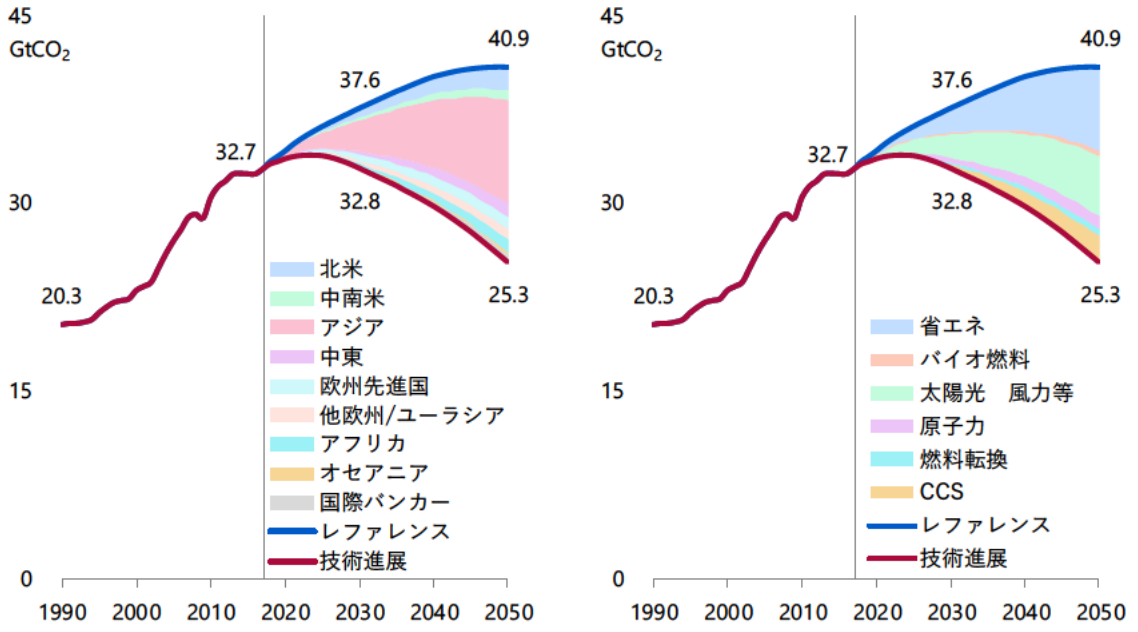
序表 1 で掲げたマルチ枠組みにおいて、参加国からみた一次エネルギー供給ベースでのカバー率は、最も参加国の少ない IEA4E においても世界の 7 割強を占め、また本事業の対象となる枠組み全体でみれば世界の 9 割に上る（2016 年時点）[3]。とりわけ、これらマルチ枠組みにおいて、これから急速な経済成長に伴う化石燃料需要の増加が予想される多くの新興国・途上国を含んでいる点は重要である。

[3] International Energy Agency, “World Energy Balance Table”より日本エネルギー経済研究所推計
（対象国のうち、フィジー、パプアニューギニア、ガンビア、バハマは除く）

序表 1.　各マルチ会合の概要

実施機関		マルチ会合	各会合参加において担う弊所の役割概要
International Energy Agency	省エネ	IEA省エネルギー作業部会 (IEA Energy Efficiency Working Party, EEWP)	さ省エネルギー政策の共有およびエネルギー効率の実態について参加国で意見交換をすると共に、省エネルギー推進のために取り得るオプションについて討議、事務局や長期協力問題常設作業部会(SLT)の関連活動に対し助言、提言を行う。IEAの省エネに関する調査および分析について、方向性や論点などの提案を実施。
	再エネ	IEA再生可能エネルギー作業部会 (IEA Renewable Energy Working Party, REWP)	IEAにおける再生可能エネルギーの研究開発/革新と市場展開を支援する組織として、エネルギー研究・技術委員会に対して再生可能エネルギーに関する助言を行う役割を担う。水素、バイオマス、地熱、水力、風力、海洋エネルギー、太陽光、太陽熱等の10の実施協定が設けられており、それぞれの特定技術に特化して、参加各国による研究開発と促進支援を実施。
	省エネ	IEA Efficient Electrical End-Use Equipment (IEA4E)	各国政府が各種電気製品のエネルギー効率を高めるための政策を立案し、支援を目的に活動。理事会(ExCo)の下に機器ごとの分科会(Annex)を設置し、関心がある参加国がAnnexで市場調査や政策分析、基準策定等のタスクを実施。
IRENA	再エネ	国際再生可能エネルギー機関 (International Renewable Energy Agency, IRENA)	再生可能エネルギーの普及及び持続可能な利用の促進を目的として設立。再生可能エネルギーの政策や技術に関する情報の収集、メンバー国での情報の共有、政策提案、技術移転、能力開発などを通じて、再生可能エネルギーの普及拡大を目指す。
ISGAN	再エネ	国際スマートグリッドアクションネットワーク(International Smart Grid Action Network, ISGAN)	再生可能エネルギー導入拡大、エネルギー消費低減、電気自動車の導入拡大などスマートグリッド関連技術の発展と普及を世界規模で促進することを目的として活動。
CLEAN ENERGY MINISTERIAL	再エネ	クリーンエネルギー大臣会合 (Clean Energy Ministerial, CEM)	米国、欧州、中国、インド含む主要先進国・新興国25ヶ国の閣僚等が一同に会し、クリーンエネルギー分野の世界的な普及・促進を目指す閣僚会合。 各イニシアティブの活性化のための提言および事務局の効率化を図るために、IEAへ事務局を移管。各イニシアティブの活動の活性化、事務局の効率化を目的とした取り組みを実施中。
	再エネ	多国間太陽光・風力ワーキンググループ (CEM/MSWWG)	世界的な太陽光発電と風力発電の大規模導入を目指すことを目的に、導入マップの作成、途上国でのキャパビル戦略の検討等を行ってきている。また、再エネ導入による経済波及効果の重要性を政策立案者に対して発信。
APEC Asia-Pacific Economic Cooperation	省エネ	APEC省エネルギー専門家会合 (APEC Expert Group on Energy Efficiency and Conservation, EGEE&C)	APECエネルギーワーキンググループが目指す域内のエネルギー安全保障の確保ならびに環境負荷の低減に向けて省エネルギーに関するAPEC事業を推進するとともに、各エコノミーにおける省エネルギー政策関連の情報交換の場として、専門家が集う場を提供。
	再エネ	APEC新エネルギー専門家会合 (APEC Expert Group on New and Renewable Energy Technologies, EGNRET)	APEC地域における新・再生可能エネルギーの導入促進を目的として活動を実施。EGNRETではスマートグリッド(ASGI：APEC Smart Grid Initiative)、スマートコミュニティ(ESCI：Energy Smart Communities Initiative)も対象としている。

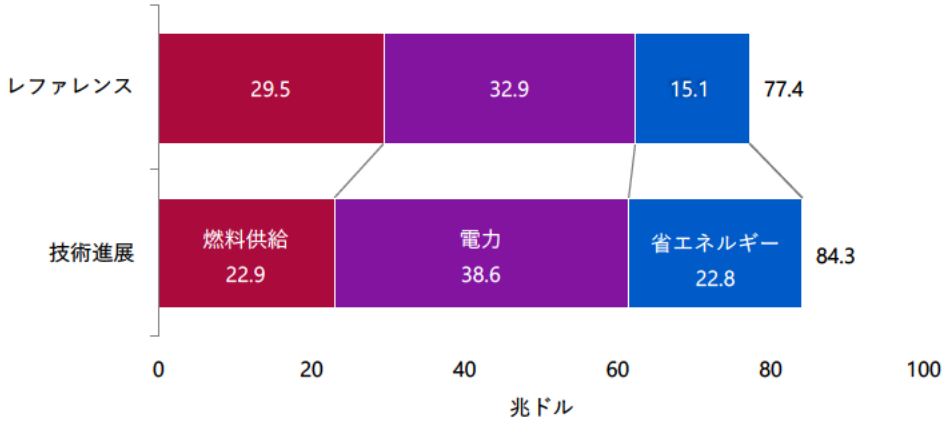
序図 9 はレファレンスに比べて、技術が進展した場合の世界の CO2 削減ポテンシャルを示している（技術進展ケース）。図が示す通り、地域別ではアジアを中心とした非 OECD 諸国でのポテンシャルが大きいことがわかる。加えて、技術別での CO2 削減ポテンシャルに対しても、省エネが最大であり、これに太陽光・風力等の再生可能エネルギーが続く。このことからも、世界的な省エネ推進、再エネ普及活動にアジアを中心とした非 OECD 諸国を取り込むことは持続可能なエネルギー利用のためにも不可欠であると言える。



（出所）日本エネルギー経済研究所、“IEEJ Outlook 2020　深刻化するエネルギートリレンマの克服に向けて”2020年10月

序図 9.　世界の地域別・技術別 C02 削減見通し

IEEJ Outlook において省エネ・再エネ等の技術導入を最大限見込んだ技術進展シナリオの投資額は累計 84.3 兆ドルと推計される。これはレファレンスシナリオより 6 兆 9,000 億ドル多い（序図 10）。他方、技術進展シナリオでの累積排出量は、レファレンスシナリオより 235 Gt 少ない。この追加的な投資を CO_2 排出削減量で割った、技術進展シナリオを実現するための平均投資額は、$28.8/t である



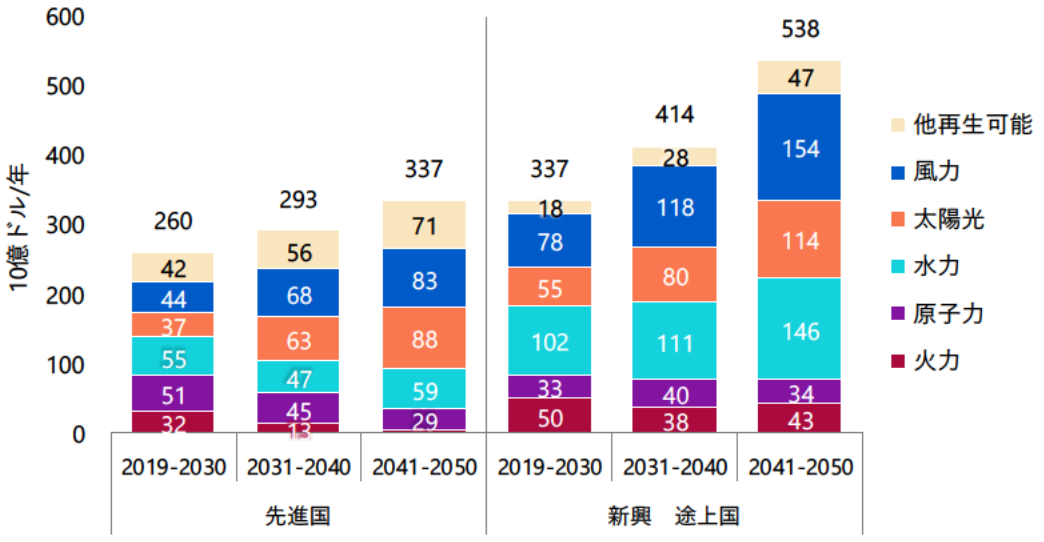
（出所）日本エネルギー経済研究所、“IEEJ Outlook 2020　深刻化するエネルギートリレンマの克服に向けて”2020年10月

序図 10.　世界のエネルギー関連投資額（2019-2050 年）

技術進展シナリオにおける化石燃料への累計投資額は、レファレンスシナリオの 8 割程度である。特に、石炭は投資額がレファレンスシナリオから 40%減少し 1 兆 4,000 億ドルにとどまる。それでも化石燃料全体で見れば、2040 年代に必要な投資額は現在のそれと遜色ない規模になる。環境保護を名目とした運動により化石燃料開発投資が足元より縮退することがあれば、エネルギーの安定供給を妨げかねない。金融機関などの投資主体や政策決定者には、3E+S を踏まえた判断が求められる。

技術進展シナリオでは、2050 年の発電量がレファレンスシナリオに比べて 3,900 TWh 減少する一方で、発電・送配電設備投資額は 2050 年までの累計で 16%多い 38 兆 1,000 億ドルにのぼる。電源の中で初期投資費用が比較的高い再生可能エネルギー発電、原子力発電などが、初期投資が安価な火力発電(主に石炭火力)を代替することが原因である。このような電源種の転換は気候変動対策に不可欠であるが、同時に初期費用の増加(と燃料費の大きな低減)は一般に投資回収年数の増加および電力市場における価格形成メカニズムの変化を伴う。事業者が十分な収益を確保することができ、なおかつそれを予見しやすくする制度設計が求められる。

先進国、新興・途上国ともに、再生可能エネルギーへの投資が発電設備投資の大半を占める（序図 11)。その中でも、風力、太陽光への投資が年々拡大傾向にある。火力発電への投資額は、先進国では年々縮小するのに対し、新興国では現在と同様の規模が求められ続ける。低炭素電源拡大はもちろん重要だが、火力発電についても可能な限り高効率、低環境負荷の技術が選択され、それらに対し着実に投資が行われることが望ましい。



（出所）日本エネルギー経済研究所、“IEEJ Outlook 2020　深刻化するエネルギートリレンマの克服に向けて”2020年10月

序図 11.　発電設備投資額（技術進展シナリオ）

マルチ枠組みにおける我が国の役割

上述の通り、将来的に新興国を中心とし世界的にエネルギー安定供給の確保と CO2 削減に向け、省エネルギー・再生可能エネルギー導入に必要性がある。こうした省エネルギー・再生可能エネルギーの推進に関するマルチ活動の効果に対して、日本として貢献が可能な分野が多く存在する。例えば、我が国は、世界規模でエネルギー需要が急増する一方で、世界の国々の中でも非常に高いエネルギー効率水準を長年維持している。これは、我が国が 1970 年代に経験した二度の石油危機を契機に、官民あげて、省エネルギー技術の導入とエネルギー管理を推進してきた結果である。他方、世界に目を向けると、経済水準・エネルギー効率共に低い地域が未だ多く存在する。これらの地域や複数の国々に対して、国際マルチ枠組みを活用することによって効率的に我が国がこれまで蓄積してきた省エネルギーに関するノウハウを提供することにより、これから成長するこれらの国々のエネルギー効率化を促すことが可能となる。この観点からも、マルチ枠組みの取り組みは、世界規模でエネルギー需要を抑制していくための有効な手段になると言える。

再生可能エネルギー分野においても国内での発電設備導入が進んできており、特に第 5 次エネルギー基本計画において、再エネを主力電源化することが明示されたことによって、今後の一層の増加は確実と考えられる。こうした再エネ発電の増加の世界的流れの中で、我が国の政策的な経験、知見、そして、技術分野の協力を推し進める一つのチャンネルとしてマルチの枠組みが有効に機能するものと考えられる。特に、今後の再エネ関連の基幹技術となることが確実な蓄電池、系統安定技術、水素利用の諸分野において世界トップレベルの技術を有する我が国としては、マルチの枠組みを通じて、我が国の持つ技術的優位性を活かしつつ、世界各国への働きかけを強めることが可能と考えられる。

マルチ枠組みにおける我が国への裨益

我が国として、本マルチ枠組みを積極的に活用し、参加する国々と協力して省エネルギー対策や再生可能エネルギー導入をグローバルに展開・促進していくことは、世界が直面しているエネルギー需給規模の拡大に伴う地球温暖化問題に資するとともに、我が国技術等の海外展開市場整備にも繋げうる重要な取り組みであると言える。

我が国は省エネルギー分野において先進的な取組を行ってきた実績や強みがあるほか、再生可能エネルギーについても導入拡大を図ってきており、マルチ枠組みを通じてこうした経験を国際社会と共有することにより、一定のリーダーシップを発揮できれば、世界の省エネルギー対策の推進・再生可能エネルギー導入の促進を主導することが可能となる。更に、省エネルギー・再生可能エネルギーの取り組みに関する主要国との協力体制を構築することは、我が国に裨益する戦略的な場とすることもできる。例えば ISO や省エネルギー政策に関する国際的な基準作成は、各国との協調体制が不可欠である。加えて、タイム

リーな一次情報の入手は、我が国産業の技術輸出拡大を支援することにも繋がる。さらに、我が国の 2030 年に向けた省エネルギー・再生可能エネルギーの取り組みの推進にも、海外の最新動向の把握が欠かせない。例えば、2030 年度までに省エネ量が最も大きく見込まれている運輸部門では、各輸送モードのエネルギー消費効率は向上し次世代自動車の普及も進展しているものの一層の対策を要する。大規模省エネ投資の促進に向けた取組みならびに運輸部門の政策措置の強化、そして新たな対策が引き続き検討されることになる。

再生可能エネルギー分野においては、我が国は積極的にその導入を進めているものの世界的にも突出して高いとされる再エネ発電コストの削減による国民負担の低減、自然変動再エネ増加に伴う電力系統の柔軟性確保、再エネ資源の賦存量の偏りに伴う送電線の増強といった課題の解決が我が国においても重要な政策テーマとして急浮上している。これらはいずれも世界的に共通の関心テーマとなっており、世界各国での経験や知見を共有する国際的なフォーラムとしてのマルチ枠組みの積極的な活用は極めて有用と考えられる。2020 年度は我が国にとっても関心の高い諸課題に着目した報告書が IRENA、IEA 等から多く発刊され、我が国からも多くのインプットがなされた。マルチ枠組みを通じた再エネ関連の政策、技術、知見の国際的な共有は、我が国の政策立案にも少なからぬ貢献をもたらしたものと考えられる。

以上の観点から我が国がマルチ枠組みに継続的かつ積極的に参加することは、我が国ならびに世界のエネルギー安全保障・地球温暖化対策にとって有益な取り組みであると言える。本報告書においては、上記に掲げた省エネルギー・再生可能エネルギーに関する国際的なマルチ枠組みの活動について、各タスクの概要、活動状況、今後の課題と展望、我が国が貢献できる可能性についての分析を行っている。構成は、本報告の第 I 編に表序-1 で掲げた省エネルギー関連タスク、第 II 編に再生可能エネルギー関連タスクについて取りまとめ、巻末に関連資料を添付している。

第Ⅰ部　省エネルギー編

第1章 国際的な省エネルギー組織の取り組みと今後の課題

1.1 IEA EEWP（IEA 省エネルギー作業部会）

1.1.1 概要と意義

- 設立の経緯

  本会合は、IEA の Standing Committee on Long-Term Cooperation（SLT）および IEA の省エネルギー関連の事務局への諮問機関として設立され、IEA 加盟国での省エネルギーのより強固な協力と行動を促すことを目的としている。

- 参加国

  OECD 加盟 36 カ国のうち、以下の 30 カ国

  豪州、オーストリア、ベルギー、カナダ、チェコ、デンマーク、エストニア、フィンランド、仏、独、ギリシャ、ハンガリー、アイルランド、伊、日本、ルクセンブルク、メキシコ、オランダ、ニュージーランド、ノルウェー、ポーランド、ポルトガル、韓国、スロバキア、スペイン、スウェーデン、スイス、トルコ、英国、米国

  アソシエイト国（中国、インド、シンガポール、ブラジル、インドネシア、南アフリカ、モロッコ、タイ）については、議長による招聘により参加が可能となる。

- 活動概要と意義

  IEA の省エネルギー作業部会（Energy Efficiency Working Party：EEWP）は、IEA 加盟国における省エネルギー政策の共有およびエネルギー効率の実態について意見交換すると共に、省エネルギー推進のために取り得るオプションについて討議、事務局や長期協力問題常設作業部会（SLT）の関連活動に対し、参加国が IEA の活動に対して助言、提言を行う。具体的には、以下の項目について諮問等を実施している。

  - IEA 加盟国さらには IEA 非加盟国における経済性のある省エネルギー政策の導入、改善と評価により副次的効果（健康効果、環境改善、雇用促進、エネルギー安全保障等の間接的効果）を促進する方法
  - 実施と評価の優秀事例
  - 最適な省エネルギーのための動向、政策および優先順位

  機能としては、以下の活動により参加国側からの貢献が期待されている。

  - 優先順位の高い部門の特定、省エネルギー政策および改善の拡大、各国固有のゴール、優先順位の設定
  - 各国の省エネルギー政策の情報共有
  - 加盟国でのエネルギー安全保障、環境、経済目標を効率的に支援するための省エネルギー政策の特定、国際協力の推進
  - 事務局事業を通じた、省エネルギー政策の支援、ガイドおよびレビュー分析

1.1.2 本年度の活動

IEA では、省エネルギーに関する調査分析を行っており、本会合にて方向性やテーマ、報告書に関する議論を行い、IEA の省エネルギー課の活動方針を決めている。省エネルギー市場報告書や行動変容報告書などが成果として発表されている。

本年度の EEWP の主要な活動を以下に示す。

- 省エネ分析
  - 政策ベータベース
  - 2020 年省エネ市場報告書
  - エネルギー部門の行動変容（Users-TCP）
  - 省エネとデジタル化
  - 産業部門の省エネ
  - 建築物の省エネ
  - 交通部門の省エネ
  - 都市の省エネ
  - 省エネと経済回復

- 新興国の省エネ（E4）
  - トレーニング週間
  - 省エネ協力（ブラジル、メキシコ、ラテンアメリカ、アフリカ、中国、インド、東南アジア）

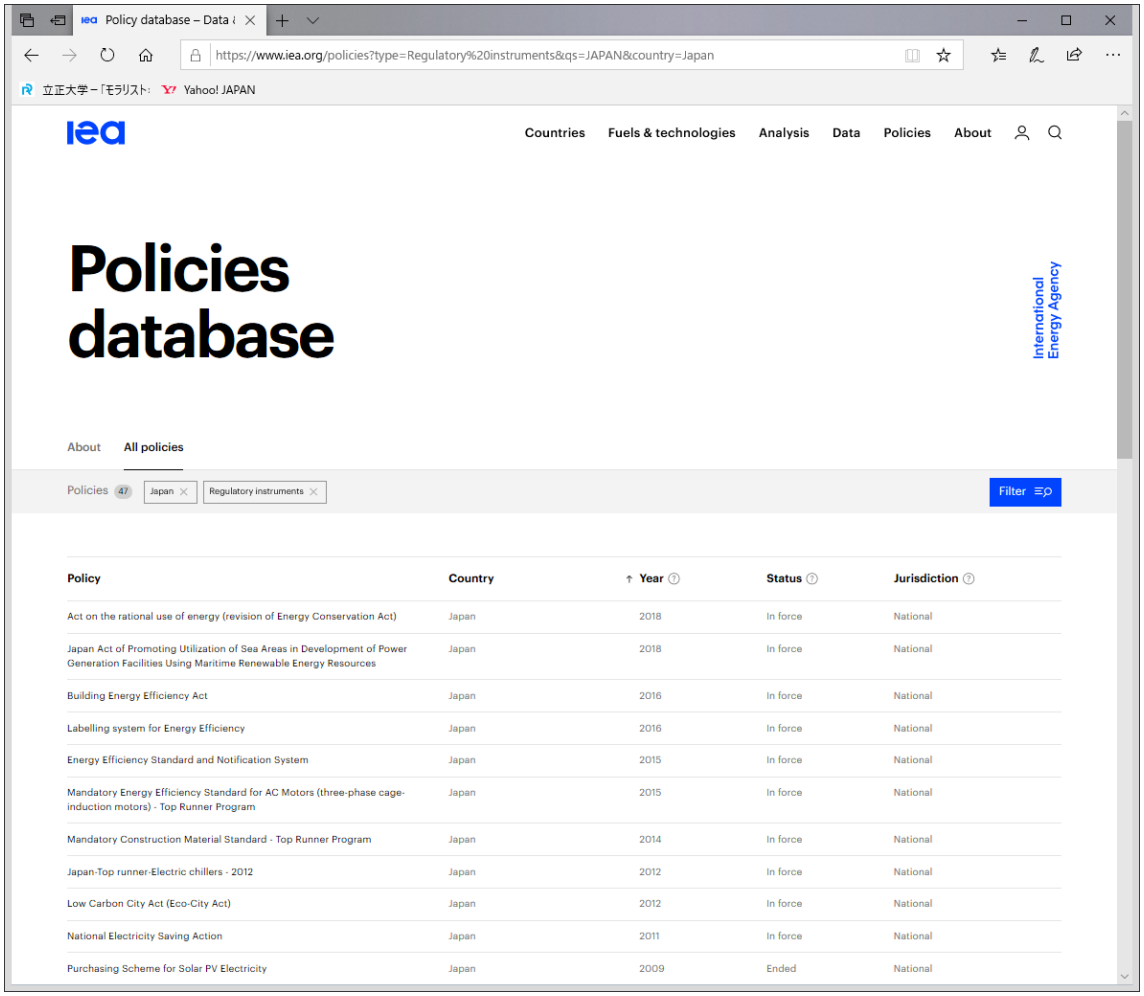
- 世界的な省エネ情報共有

- 国際機関との協力
  - 高効率化電（SEAD）イニシアティブ
  - IEA-TCP
  - G20（サウジアラビア）: 炭素循環経済
  - 3%クラブ

- IEA の省エネ戦略
  - 第 5 回省エネグローバル会議（2020 年 6 月）
  - 第 6 回省エネグローバル会議：気候変動の野心を高める省エネ（2021 年 3 月）
  - 人間を中心としたクリーンエネルギーへの移行の世界委員会
  - デジタル化による需要主導型電力ネットワーク（3D）イニシアティブ
  - 省エネハブ

- 各国省エネ政策の深堀とその他報告書等
  - 各国政策深掘り報告書（IDRs）

本事業での日本の活動は、9 月および 3 月に開催されたオンラインでの本会議への参加であった。主な議論は、加盟国から上述した IEA 事務局活動に対するアドバイス、各国の経験の共有、各国の要望であった。日本としては、IEA が発行する省エネルギー関連の報告書へのコメント・支援、IEA から要請のあった省エネルギー政策および省エネルギーインセンティブデータベースの提出、等を実施した。



（出所）IEAホームページ

図 1.1-1　政策データベース

1.1.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法

IEA からは、報告書のレビュー依頼等の要請もあるが、今後も IEA からの要請に応えながら、こうしたレビューや EEWP 会合などを通じて、日本として IEA 分析及び国際的発信

機能を活用していくことが重要である。また、IEA で取り上げるテーマは各国からの意見を基に設定されるため、興味があるテーマがあれば日本側から示すことが大切である。日本が G20 議長国として提案を行った国際的な省エネルギーベンチマークの調査を IEA の協力の下、進めている。

日本が本会議に参加する意義は、日本の省エネルギーの取り組みを本会議や IEA が主催するワークショップ等を通じて紹介することで、日本の政策を提示・アピールする場、また他国の省エネ政策を国内政策検討にも活かす視点で情報収集や IEA 及び他国政府機関とのネットワーク構築の場、として活用できることである。このような活動を通じて、日本の省エネルギーに関する経験・政策・取り組み等を加盟国およびオブザーバーと共有することで、世界的な省エネルギーの推進に貢献することが可能であり、今後も継続的に IEA が発行する報告書へのコメント、日本のケーススタディ等を紹介することが肝要である。

また本会議では、加盟国およびオブザーバーから省エネルギーに関する取り組み・政策の紹介が行われるため、日本として参考となる情報の収集、他国との協力の可能性についての情報収集にも活用可能である。

1.2 省エネルギーハブ

1.2.1 概要と意義

- 設立の経緯

  前身の IPEEC（国際省エネルギーパートナーシップ）が 2009 年に活動を開始したが、設立時に活動期間として合意した 10 年が経過し、2019 年 12 月をもって終了した。

  そこで、IPEEC 加盟国を中心に継続について議論を行った結果、IEA 内に設立された国際省エネルギーハブに活動を引き継ぐことで合意がなされた。

- メンバー国

  IEA からの情報によれば、現在加盟を表明している国は、アルゼンチン、豪州、ブラジル、カナダ、中国、EU、フランス、ドイツ、日本、韓国、ルクセンブルク、メキシコ、ロシア、サウジアラビア、英国、米国の 16 カ国となっている。

- 活動概要と意義

  具体的な活動については報告がなされていない。

1.2.2 本年度の活動

具体的な活動については報告がなされていない。

1.2.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法

今後、具体的な活動方針やテーマが議論され、その方針に沿った活動が行われる。

1.3 IEA 4E（電気機器エネルギー効率実施協定）

1.3.1 概要と意義

- 設立の経緯

  IEA は、各国政府が各種電気製品のエネルギー効率を高めるための政策立案を支援するために、2008 年に国際協力実施協定の一つとして、電気機器の高効率化を世界的に進めるための枠組みである IEA4E（Efficient Electrical End-use Equipment）を発足させた。2007 年の洞爺湖サミットで IEA が発表した加盟国への「Policy Recommendation」に沿って、その具体化を目指すプロジェクトとして推進するものである。

- 参加国・地域（14 か国 1 地域）

  オーストラリア、オーストリア、カナダ、デンマーク、フランス、日本、韓国、中国、オランダ、スウェーデン、スイス、英国、米国、欧州委員会、ニュージーランド（オブザーバー：ドイツ、メキシコ、シンガポール）

- 活動概要と意義

  2008 年から 2013 年を第 1 期、2014 年から 2019 年 2 月を第 2 期として活動している。2019 年 3 月から第 3 期が開始し、2024 年 3 月まで活動を予定。

  - ExCo（Executive Committee, 執行委員会）
    - 議長国：米国
    - 概要:4E 全体のコーディネーションを実施、４つの Annex 及び３つの ExCo 直下プロジェクトの活動が報告されるとともに、予算の配分を決定される。第 1 期に実施された各国の規制水準や機器の効率水準を比較する M&B (Mapping & Benchmarking) Annex は、第３期の現在は ExCo 傘下の直轄の PEET プロジェクトとして継続されている。
  - EMSA（Electric Motor System Annex, 日本未参加）
    - 議長国：スイス
    - 参加国：オーストラリア、オーストリア、デンマーク、欧州委員会、オランダ、ニュージーランド、スウェーデン、スイス、米国
    - 概要:機器に用いられる高効率モーターの基準と普及の調和を図ることを目的として、モーター単体及びモーター応用製品（ポンプ、ファンおよび圧縮機）のエネルギー消費低減への政策の調査を行っている。また、ISO/IEC での国際基準の策定動向の共有、産業界と政府関係者が出席する Motor Summit を年に一回開催している。
  - EDNA（Electronic Devices and Network Annex、日本参加）
    - 議長国：オランダ
    - 参加国：オーストラリア、オーストリア、カナダ、デンマーク、欧州委員

会、フランス、日本、韓国、オランダ、ニュージーランド、スウェーデン、スイス、英国、米国

- 概要:ネットワーク接続機器の待機電力の削減を目指し、各国の規制状況、市場調査などのプロジェクトを実施している。G20 と連携したネットワーク待機電力の削減に向けた活動を実施、政府と産業界がこの分野に関する協力を進めるために立ち上げられた CDA (Connected Device Alliance)の活動を支援している。日本は第２期の 2015 年 5 月より当該 Annex に参加している。

- SSL（Solid State Lighting Annex, 日本未参加）
  - 議長国：カナダ
  - 参加国：オーストラリア、カナダ、デンマーク、フランス、韓国、スウェーデン、英国
  - 概要：世界的な LED 照明機器の評価基準の統一を図り、ラウンドロビンテストを実施。日本は LED 照明の ISO 化活動の一環として、第 1 期のみ当該 Annex に参加した。第 3 期では 10 タスクを並行して実施中。その中には寿命試験方式の標準化、MV & E（Monitoring Verification and Enforcement）、製品データベースの作成と更新などがある。
- PECTA（Power Electronic Conversion Technology Annex, 日本未参加）
  - 議長国：スウェーデン
  - 参加国：スイス、オーストリア、スウェーデン、デンマーク
  - 概要：2019 年から新規 Annex として設置、パワーエレクトロニクス（パワー半導体）によるエネルギー効率改善を目指し、関連する技術開発情報の収集、パワエレによる省エネポテンシャルの推計といったタスクを実施予定。

以上が、2021 年 3 月時点における IEA4E としての活動の概要である（図 1 参照）。このうち、日本は実施協定の参加国として ExCo に出席、ネットワーク待機電力及び関連分野を対象とする EDNA に加盟している。

このため、EDNA の活動について、各国の政策動向を聴取するとともに、各国担当者が今後の規制導入等を見据えてどのような分野におけるタスク化に関心をもっているのかを聴取した。同時に、我が国産業界関係者との会合を通じて関心事項を整理、EDNA の活動に関する対処方針の相談や情報共有を行った。

図 1.3-1 IEA4E の組織体制図

1.3.2 本年度の活動

今年度は、5 月にオランダのユトレヒト、11 月に米国ニューオーリンズでの会合開催を予定していたが、新型コロナウイルス蔓延の影響により、全てオンラインでの電話会議が開催された。

ExCo では、IEA4E 全体の活動状況、各 Annex の活動、ExCo として実施されている下記の３つのプロジェクトについて報告があった。

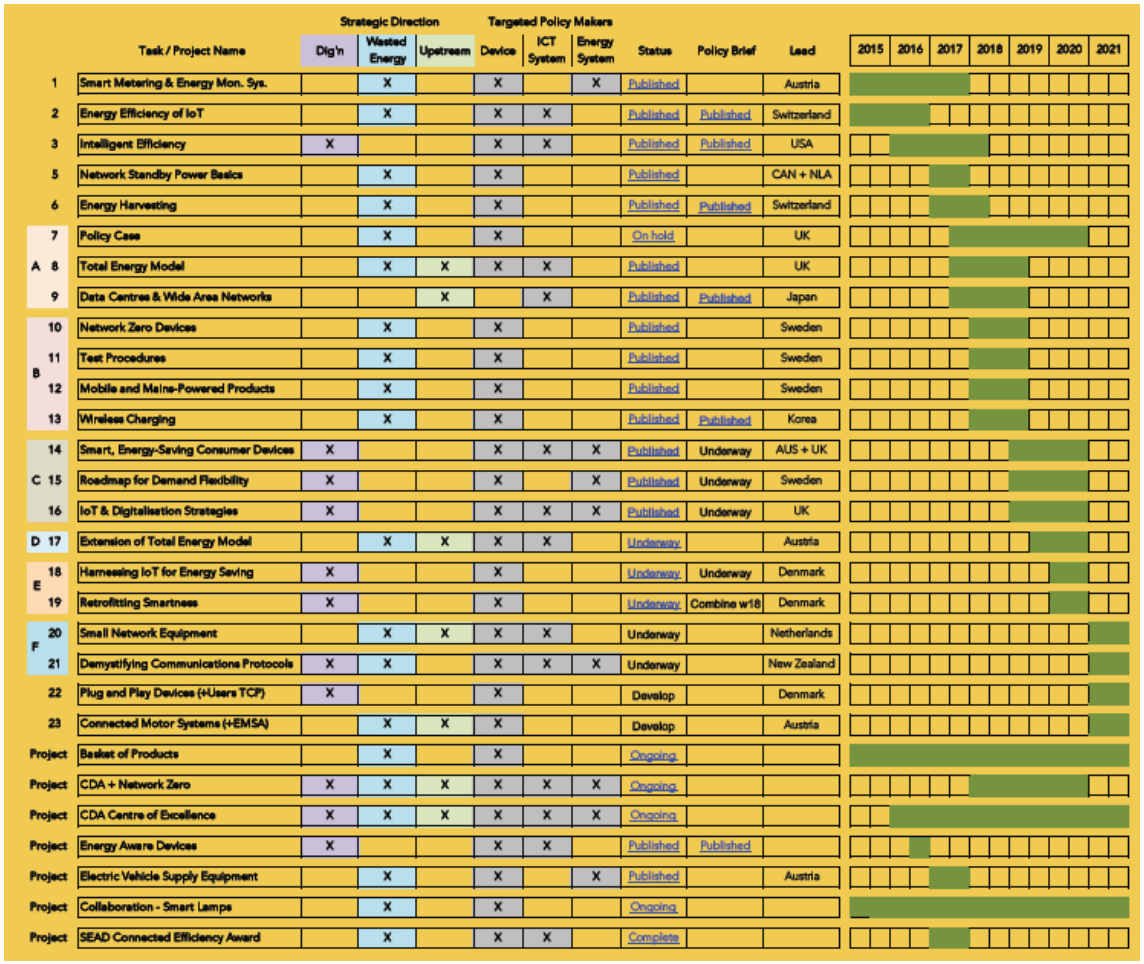
- PEET (Product Energy Efficiency Trends)
  - 期間：2019 年 3 月～
  - 概要：各国で規制の対象となっている製品のエネルギー効率のトレンドを調査、今後の技術動向についても調査を行う。
  - 状況：IEA4E 参加国からのデータ提供を受けて、エアコンやテレビなどを代表的なモデルに統合し、比較可能となるように標準化した上で、各国で販売されている製品の効率性を比較した結果が報告された。ただし、一部参加国のデータが提供されておらず、また結果の公表方法について議論があった。
  - 今後の展開：比較のための方法論のアップデート、データ提供国の拡大、公表方法について次回の会合で議論を予定している。
- システムプロジェクト
  - 期間：2019 年 3 月～
  - 概要:製品ベースの政策を基にシステムレベルへの影響を検討するためのカバレッジと定義を検討することを目的にしている。これを踏まえてケーススタディを行う。
  - 状況：2021 年 3 月に報告書最終案がまとまり、オンラインでのワークショップ

によって内容が精査され、4 月以降に公開を予定している。

- 今後の展開：4 月以降に報告書を公開予定。

- 新しいエアコン試験方法の検討及びラウンドロビンテストプロジェクト
  - 期間：2020 年 9 月～
  - 概要 : 2019 年から 2020 年に実施された各国のエアコン試験方法の国際比較結果を踏まえ、エアコンの能力を正確に評価するための新しい試験方法を産業界や技術専門家と検討、実機試験や各国試験所とのラウンドロビンテストを実施して新しい試験方法を検討する。
  - 状況：8 月にプロジェクト実施主体を選定、9 月からプロジェクトが開始され、10 月から 12 月にかけて産業界や技術専門家とのワークショップをオンラインで開催、その結果を整理した報告書案が整理された。
  - 今後の展開 : 報告書案に対する各所からのコメントを踏まえて、5 月までに米国で実機試験を実施する予定、6 月には実機試験結果が共有される。

次に、日本が参加する EDNA の活動について 4 月と 10 月の EDNA 会合（オンライン）の結果を整理する。以下は、これまでに実施済みのタスク及び進行中のタスクの一覧である。これらのうち、実施中のタスクの進捗状況を整理した。



		Task / Project Name	Strategic Direction: Dig'n	Strategic Direction: Wasted Energy	Strategic Direction: Upstream	Targeted Policy Makers: Device	Targeted Policy Makers: ICT System	Targeted Policy Makers: Energy System	Status	Policy Brief	Lead	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	1	Smart Metering & Energy Mon. Sys.		X		X		X	Published		Austria							
	2	Energy Efficiency of IoT		X		X	X		Published	Published	Switzerland							
	3	Intelligent Efficiency	X			X	X		Published	Published	USA							
	5	Network Standby Power Basics		X		X			Published		CAN + NLA							
	6	Energy Harvesting		X		X			Published	Published	Switzerland							
	7	Policy Case		X		X			On hold		UK							
A	8	Total Energy Model		X	X	X	X		Published		UK							
	9	Data Centres & Wide Area Networks			X		X		Published	Published	Japan							
	10	Network Zero Devices		X		X			Published		Sweden							
B	11	Test Procedures		X		X			Published		Sweden							
	12	Mobile and Mains-Powered Products		X		X			Published		Sweden							
	13	Wireless Charging		X		X			Published	Published	Korea							
	14	Smart, Energy-Saving Consumer Devices	X			X	X	X	Published	Underway	AUS + UK							
C	15	Roadmap for Demand Flexibility	X			X		X	Published	Underway	Sweden							
	16	IoT & Digitalisation Strategies	X			X	X	X	Published	Underway	UK							
D	17	Extension of Total Energy Model		X	X	X	X		Underway		Austria							
E	18	Harnessing IoT for Energy Saving	X			X			Underway	Underway	Denmark							
	19	Retrofitting Smartness	X			X			Underway	Combine w18	Denmark							
F	20	Small Network Equipment		X	X	X	X		Underway		Netherlands							
	21	Demystifying Communications Protocols	X	X		X	X	X	Underway		New Zealand							
	22	Plug and Play Devices (+Users TCP)	X			X			Develop		Denmark							
	23	Connected Motor Systems (+EMSA)		X	X	X			Develop		Austria							
Project		Basket of Products		X		X			Ongoing									
Project		CDA + Network Zero	X	X	X	X	X	X	Ongoing									
Project		CDA Centre of Excellence	X	X	X	X	X	X	Ongoing									
Project		Energy Aware Devices	X			X	X		Published	Published								
Project		Electric Vehicle Supply Equipment		X		X		X	Published		Austria							
Project		Collaboration - Smart Lamps		X		X			Ongoing									
Project		SEAD Connected Efficiency Award		X		X	X		Complete									

図 1.3-2 EDNA のタスク一覧

○ 実施中のタスク

- Task Package D – extension of total energy model (TEM) (Task ID 17)
  - これを拡張した TEM v2.0 では、ストリーミングによるエネルギー消費量を扱えるようにする。具体的には、TV で映画などをストリーミング視聴する。モバイルデバイスや PC でコンテンツなどをストリーミングで視聴することによるエネルギー消費量の増加をモデルの中で計算できるようにする。
  - 進捗状況：モデル拡張作業が終了、Web サイトでモデル結果を調整可能な形で公開できるように作業が進められている。
- Task Package E: Harnessing IoT for Energy Saving + Retrofitting Smartness (Task ID 18)
  - Topic 1 - Harnessing IoT for Energy Saving（リード国：ニュージーランド）
    - 現在市場に流通する IoT 機器・デバイスがエネルギーの節約に貢献できるのかを調査。具体的には、EnergyStar で検討している自動電源オフ機能が搭載されているか、搭載可能かといった点について調査を行う。
  - Topic 2 - Retrofitting Smartness（リード国：デンマーク）

- 現在流通している機器にネットワーク機能を追加する(これをレトロフィットと呼称)することが可能か、エネルギー効率改善やデマンドレスポンスへの参加等の可能性を調査する。

◆ 進捗：報告書案の作成を進めている。

○ <u>新規タスク</u>

◆ ブルータスクパッケージ：

- Metrics for Data Centre Efficiency: Develop an improved metric for the energy efficiency of data centres
  - データセンターのエネルギー効率の測定方法､国際基準等の動向について調査。

◆ オレンジタスクパッケージ：

- Interoperability for Smart Appliances and Demand Flexibility: Study the issue of interoperability and its impact on smart devices and demand flexibility
- Proprietary Ecosystems for Devices: Explore how proprietary ecosystems (and subsequent lack of interoperability) tend to restrict energy savings
- Standardisation Connection with Policy Makers
  - スマート機器間の相互運用性と DR への活用可能性、独自の製品エコシステム(例えば､Apple, Google, Amazon, MS 等の企業間で異なる製品エコシステム)間での相互運用性の整備によるエネルギー節約の可能性､機器間通信に関する国際標準の内容を整理する、といった機器の相互運用性に関するタスクをパッケージとする。

◆ グリーンタスクパッケージ:

- Mobile Devices: Examine the energy used by mobile devices (to date EDNA's focus has primarily been on mains-powered devices) and investigate policy options to improve this
- Emerging Battery Technologies: Overview/exploring of new storage technologies for IoT and mobile devices
  - モバイルデバイスやモバイルバッテリー等の機器の効率性に関する試験方法、計算方法、MEPS 等の規制導入可能性の調査、モバイル機器のバッテリー技術に関する調査をパッケージとして実施

1.3.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法

IEA4E の活動は、照明やモーター、パワエレ等のアネックスもあるが日本は参加していないため、ここでは ExCo 及び EDNA の活動に対する評価、今後の課題、そして日本の基本的対処方針について考察する。

まず、ExCo のプロジェクトとして PEET やエアコン試験プロジェクトでは、我が国でも関心の高い内容を扱っている。

PEET では、各国で実施されている省エネ基準・ラベリング（S&L）政策の対象製品のエネルギー効率を国際比較し、これまでの効率改善トレンドから政策的なインプリケーションを得ることを目的としている。各国での製品使用状況が異なるため、ISO/IEC の標準規格を参照しつつ、それぞれの国に適した試験基準が採用されている。また、各国で対象製品の能力、大きさ等が異なるといった差異があるが、これを標準化して比較することで、どのような政策・基準形成がエネルギー効率の改善に寄与したのかを検証することができるようになることに意味がある。一方で、その結果だけをみると、一部の国で製品のエネルギー効率の改善が進んでいないと受け取られかねず、比較方法論も含めて適切な情報開示の方法が必要である。

また、エアコン試験プロジェクトについて、これまでの国際比較結果を踏まえ、実機試験やラウンドロビンテストを行う次の段階に進んだ。これは、EU、米国、カナダでより実環境に近い方法でエアコンのエネルギー効率を計測するための検討が進められているが、それぞれの試験方法に得手不得手があり、これらを比較しながら実機試験での検証が行われる。加えて、適切に試験を実施できる方法となっているのかをラウンドロビンテストによって検証することが予定されている。今後、我が国産業界とも相談しつつ、適宜情報収集し必要に応じてデータ提供や知見を提供することが今後も有効と考えられる。

続いて、EDNA の活動は、①デマンドレスポンスに対応した機器のエネルギー効率基準、②ネットワークに接続された家電・機器のネットワーク待機電力の削減、③デマンドレスポンスを含むエネルギー供給システムとしての効率性、の 3 つに集約することができる。今後、我が国でも関連した機器の効率基準の導入や関連する政策動向を踏まえ、業界団体や専門家と相談しつつ対応方針を定めていく必要がある。

その一環として、これまで会合終了後に関係機関・団体等へ報告するための国内会合を実施していたが、新型コロナウイルスの影響により今年度は開催することができなかった。会合資料については共有しているが、今後の対応方針について知見を得るためにも、オンライン形式での会合開催についても検討する。

2050 年に向けたカーボンニュートラル宣言があったところである、引き続き機器の効率向上は重要な政策分野である。そのため、IEA4E の活動を通じて各国の規制動向について聴取するとともに、我が国としても関心がある領域については積極的に情報収集していくことが重要である。

1.4 APEC EGEE&C（APEC 省エネルギー専門家会合）

1.4.1 概要と意義

- 設立の経緯

  APEC 省エネルギー専門家会合（APEC Expert Group on Energy Efficiency and Conservation：EGEE&C）は、省エネルギー及びエネルギー効率向上の実践と技術の適用を通じて、APEC 域内におけるエネルギー安全保障の達成を支援し、経済及び社会的福利を促進し、環境便益を実現するために、1993 年、APEC エネルギー作業部会（Energy Working Group: EWG）により設立された。2020 年 11 月に香港が主催しオンラインで開催された会合で 55 回目の開催を迎えている。

  EGEE&C は、上記目的の達成のため、省エネルギーに関する APEC 事業を推進するとともに、各エコノミーにおける省エネルギー政策関連の情報交換の場として、専門家が集う場を提示している。EWG の下に他の 3 つの専門家会合と共に設定されている[4]。

- 参加国・地域

  APEC に参加する 21 のエコノミーが EGEE&C のメンバーであるが、EGEE&C への近年の参加メンバーは以下のとおりである。

  議長:香港

  参加エコノミー：オーストラリア、中国、香港、インドネシア、日本、韓国、マレーシア、ニュージーランド、フィリピン、シンガポール、タイ、中華台北、米国、ベトナム

  なお、オブザーバーとして以下の組織が EGEE&C 会合に参加している。

  ・国際銅協会（様々な APEC 事業を各エコノミーと共に実施している）

  ・CLASP（SEAD の事務局として同タスクグループの活動を紹介している）

- 活動概要と意義

  EGEE&C は、EWG 傘下の専門家会合であり、省エネルギー政策に関する各エコノミーにおける進捗共有ならびに APEC 資金を活用した省エネルギー事業の推進が主な活動内容である。APEC では 2035 年までにエネルギー原単位を 2005 年比で 45%改善する目標を設定していることもあり、APEC 資金を活用した事業の多くが省エネルギーに関連している。本専門家会合で省エネルギー政策の形成や基準形成に資する事業を選択し進捗を管理することは、45%のエネルギー原単位改善目標達成に向け重要である。

[4] 他の 3 つの専門家会合は以下のとおりである。EGCFE（Expert Group on Clean Fossil Energy：クリーン化石燃料専門家会合）, EGEDA（Expert Group on Energy Data & Analysis : エネルギーデータ・分析専門家会合）, EGNRET（Expert Group on New and Renewable Energy Technologies : 新再生可能エネルギー技術専門家会合）。

1.4.2 本年度の活動

2020 年度は、11 月 19 日～11 月 20 日に香港が主催し、オンラインでの第 55 回会合（EGEE&C55）が開催された。2020 年 3 月 4 日～3 月 5 日に台北において 55 回会合が開催される予定であったが、新型コロナウイルスの影響で開催が延期になった。

EGEE&C55 会合では、APEC 事業の進捗を確認するとともに、各エコノミーにおける省エネルギー政策の進捗について情報交換が行われた。

なお、事業進捗の確認を行ったのは以下のプロジェクトである。

(1) Energy efficiency incentive schemes -best practice guide: Australia

省エネ推進に向け、諸外国でどのようなインセンティブが付与されているかについてベストプラクティスを調査する事業である。政策立案者に対してインタビューを実施するとともに文献調査を行い、インセンティブに関する調査を行っている。

(2) Energy Intensity Reduction in the APEC Region's Urbanised Cities: Hong Kong, China

都市におけるエネルギー原単位の改善に向けた調査事業である。主要都市のコンセプト調査を実施している。

(3) APEC Workshop on District Cooling and/Heating System: Hong Kong, China

地域冷熱供給に関する調査である。ワークショップを実施し、諸外国での地域熱供給に関する知見を集める。

(4) 新規提案：APEC Capacity Building Workshop on Retro-commissioning: Hong Kong, China

既存建築物における設備の運用性能を分析し、効率を改善するための最適化を目指す「Retro-commissioning」に関するキャパビルを実施する事業である。APEC の省エネ目標達成への一助とすることを目標としている。本事業は、新規案件として香港政府が提案するもので、現在審査中である。

(5) 新規提案：APEC Green Data Centre: Hong Kong, China

COVID-19 の影響によりオンライン化が進展している。データセンターの省エネ・グリーン化が以前にも増して重要であるところ、IT 技術を活用したデータセンターの省エネ・グリーン化に向けたベストプラクティスを調査し、関係者に事例紹介としてワークショップへの参加を募る事業である。本事業は新規案件として香港政府が提案するもので、現在審査中である。

(6) PREE Project update: APERC

次の PREE はインドネシアが対象で、2020 年に実施の予定であったインドネシアを対

象とした省エネ審査は、2021 年に延期される。本省エネ審査において、第一回のインドネシアを対象とした PREE の実施から 10 年後の現在において、政策的にどのような変化があったかを調査するものである。

(7) Exploring Co-Benefit Opportunities for Renewable Energy and Energy Efficiency Projects in the APEC Region, Thailand
省エネと再エネのベストプラクティスを把握し、それらのコベネフィットを分析する調査である。運輸部門や民生部門、発電部門についてのベストプラクティスを把握する。

(8) Accommodating Disruptive Technology into EE/RE, Thailand
Disruptive technology の発電と配電、運輸、民生部門への影響を調査する事業である。ワークショップが 2021 年に行われる予定である。

(9) Industrial Capacity Building on Energy Efficiency Performance in the APEC Region, Thailand
工場の省エネ推進に向けたキャパビルを実施し、国際的な水準に達することを目指す調査事業である。

(10) EWG 13 Alignment Conformity Assessment Efforts for Energy Efficiency Regulations of Motors in the APEC and ASEAN Region, USA
モーターの省エネ基準についての比較調査、IEC 60034 の達成に向けた検討を行うものである。これについて、香港でのワークショップを開催した。プロジェクトは 2020 年の 8 月に完了している。

(11) University Collaboration, USA
APEC の大学間でのデータ共有に向けたワークショップを行うものであり、ANU ではオーストラリアのネットゼロ達成に向けた研究を行うような事例があった。

(12) Sustainable Mobility: Routes for integrating the Energy and Transport Sectors for Urban Cities, USA
都市における持続可能な発展に向けた交通のインフラ形成を行う調査事業である。

(13) Evaluation of Energy Technologies, Programs and Policies, USA
省エネ政策を国レベルでどのように評価するのかについて調査するものである。

1.4.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法

APEC EGEE&C 活動の中心である APEC 資金を活用した省エネルギー事業の推進について、米国ならびに中国提案の事業が従来は多かったものの、新規事業としては、香港やフィリピン、タイなど多様なエコノミーが APEC 資金を活用した事業提案を行っている。

実施事業の中には、ワークショップの実施にとどまる場合もあるが、政策形成への貢献として知見を収集する重要な機会として活用されている場合もある。

日本及びアジア太平洋エネルギー研究センター (Asia Pacific Energy Research Centre: APERC)が APEC 資金を活用し、各エコノミーの省エネ政策の Peer Review を実施している。APERC の役割としては、同事業の事務局として調整機能を果たしているが、Peer Review に参加する専門家は日本を含む APEC メンバーエコノミーから招聘される。こうしたプロセスにおいて、世界をリードする日本の知見を共有することは重要である。加えて、APEC 域内のエネルギー原単位の改善にかかわる進捗の調査を APERC が実施しており、本成果が長期のエネルギー見通し（APEC Energy Demand and Supply Outlook）に反映されている。こうした研究成果を活用し、省エネルギー技術導入、基準形成、専門家支援といった側面で日本のできる貢献分野を検討することは、特に Non-OECD メンバーの APEC エコノミーにおいて期待される。

APEC 資金に対する日本の拠出金はメンバーエコノミーの中で最大であることを考慮し、APEC 資金を活用し日本に裨益する事業を推進するなど、戦略的に APEC EGEE&C の場を活用することが必要だろう。2050 年以降のカーボンニュートラル達成に向けた宣言を日本や韓国、中国が行う中で脱炭素化に向けた政策形成が APEC 域内で関心を集めている。脱炭素化の議論は、再エネや水素の活用等、供給側の議論に終始しがちであるところ、日本の経験など、徹底した省エネルギーの推進の重要性を APEC エコノミーに広く共有することが重要である。

第2章 各会合の議事録（省エネ編）

2.1 IEA-EEWP

IEA-EEWP は、IEA 本部の所在地であるパリにて、基本的に開催される。ただし、今年度はオンラインによる開催となった。

2.1.1 第 45 回 IEA-EEWP

- 日程

  第 45 回 EEWP：2020 年 9 月 24 日（12：00～14:30　パリ時間）

- 概要

  第 45 回 EEWP

  - IEA 事務局より事業概要および体制の説明が行われ、議論が行われた。今後の活動について、省エネ市場報告書を 12 月に公表予定、自動車のエアコンに関する調査報告書を全日に発表、省エネとデジタル化、データベースの整備、省エネ緊急活動国際委員会を開催、新興国支援、国際機関との連携について説明の後、議論が行われた。
  - 持続可能な Covid-19 からの回復での省エネの各国の取り組みとして、米国、ルクセンブルク、ブラジル、デンマークから情報共有が行われ、質疑・応答を行った。
  - 省エネ市場報告書は、今年度は Covid-19 からの回復に焦点あて、分析を行う予定であることが説明され、質疑・応答を行った。

2.1.2 第 46 回 IEA-EEWP

- 日程

  2021 年 3 月 18 日（12：00～14:30　パリ時間）

- 概要

  - IEA 事務局より事業概要および体制の説明が行われ、議論が行われた。今後の活動について､省エネ戦略として人間を中心としたクリーンエネルギーへの移行の世界委員会、3 月末に開催予定の省エネグローバル会議、デジタル化により電力需要イニシアチブ､省エネハブ､政策データベース､省エネ市場報告書、産業ベンチマークを含む部門別分析、新興国支援（E4)、国際機関との連携、TCPs との協力について説明の後、議論が行われた。
  - 野心的な気候目標での省エネについては、カナダ、デンマーク、インド、アイ

ルランド、日本、英国、米国から発言があり、各国の取り組みが紹介された。

- 人を中心としたクリーンエネルギーへの転換については、IEA から概略の説明の後、デンマーク、オーストリア、インドネシア、カナダ、スイスから取り組みが紹介された。
- IEA より今年の省エネ市場報告書は、クリーンエネルギーへの転換、ネットゼロ排出を主要テーマと考えているとの説明が行われ、問題意識が提示された。過酷の意見は、メールにて提出可能。

2.2 IEA 4E

5 月に ExCo 25、11 月に ExCo26 として開催されたオンライン会合の概要を以下にまとめる。

2.2.1 第 25 回 IEA4E 執行委員会

- 日時：2020 年 5 月 6 日、7 日 20:00-21:30
- 会場：オンライン会合
- 参加国：豪州、カナダ、オーストリア、デンマーク、ニュージーランド、日本、韓国、オランダ、スウェーデン、スイス、米国、英国、中国、欧州委員会、IEA
- 議事概要
  - ✧ EMSA、SSL-Annex、EDNA、PECTA の各 Annex から進捗状況の報告があった。
  - ✧ 事務局から 4E プロジェクトとして実施している Product Energy Efficiency Trends の作業進捗、エアコン試験比較プロジェクトの後継プロジェクト、システムプロジェクトの再議論について進捗が報告された。

2.2.2 第 25 回 IEA4E 執行委員会

- 日時：2020 年 11 月 10 日 20:00-22:00、11 日 6:00-7:30、12 日 20:00-22:00
- 会場：電話会議
- 参加国：豪州、カナダ、オーストリア、デンマーク、ニュージーランド、日本、韓国、オランダ、スウェーデン、スイス、米国、英国、中国、欧州委員会、IEA
- 議事概要
  - ✧ EMSA、SSL-Annex、EDNA、PECTA の各 Annex から進捗状況の報告があった。
  - ✧ 事務局から 4E プロジェクトとして実施している Product Energy Efficiency Trends の今後の方針が説明された。また、9 月からエアコン試験プロジェクトを開始、冷房だけでなく暖房も加えることを検討することになった。加えて、システムプロジェクトについて、議論を整理した報告書案作成の進捗が報告された。

2.3 APEC EGEE&C

APEC　EGEE&C では、定期的に会合が行われている。以下に会合の概要を記す。

2.3.1 第 55 回 APEC EGEE&C 会合

- 日程：2020 年 11 月 19 日～11 月 20 日
- 開催場所：香港政府主催、オンライン開催
- 概要
  - EGEE&C 会合では、COVID-19 の景気対策としての省エネルギー政策や 2035 年のエネルギー原単位改善目標達成に向け、各エコノミーが省エネルギー政策の形成に関する進捗と課題を報告した。
  - APEC 資金を活用した事業の進捗確認については、以下の通り各事業担当エコノミーが報告を行った。
  - Energy efficiency incentive schemes -best practice guide: Australia

省エネ推進に向け、諸外国でどのようなインセンティブが付与されているかについてベストプラクティスを調査する事業である。

- Energy Intensity Reduction in the APEC Region's Urbanised Cities: Hong Kong, China

都市におけるエネルギー原単位の改善に向けた調査事業である。

- APEC Workshop on District Cooling and/Heating System: Hong Kong, China

地域冷熱供給に関する調査である。ワークショップを実施し、諸外国での地域熱供給に関する知見を集める。

- PREE Project update: APERC

次の PREE はインドネシアが対象で、2020 年に実施の予定であったインドネシアを対象とした省エネ審査は、2021 年に延期される。

- Exploring Co-Benefit Opportunities for Renewable Energy and Energy Efficiency Projects in the APEC Region, Thailand

省エネと再エネのベストプラクティスを把握し、それらのコベネフィットを分析する調査である。

- Accommodating Disruptive Technology into EE/RE, Thailand

Disruptive technology の発電と配電、運輸、民生部門への影響を調査する事業である。ワークショップが 2021 年に行われる予定である。

- Industrial Capacity Building on Energy Efficiency Performance in the APEC Region, Thailand

工場の省エネ推進に向けたキャパビルを実施し、国際的な水準に達することを目指す調査事業である。

- EWG 13 Alignment Conformity Assessment Efforts for Energy Efficiency Regulations of

Motors in the APEC and ASEAN Region, USA

モーターの省エネ基準についての比較調査、IEC 60034 の達成に向けた検討を行うものである。

- University Collaboration, USA

APEC の大学間でのデータ共有に向けたワークショップを行う事業である。

- Sustainable Mobility: Routes for integrating the Energy and Transport Sectors for Urban Cities, USA

都市における持続可能な発展に向けた交通のインフラ形成を行う調査事業である。

- Evaluation of Energy Technologies, Programs and Policies, USA

省エネ政策を国レベルでどのように評価するのかについて調査するものである。

第 II 部　再生可能エネルギー編

第1章 国際的な再生可能エネルギー組織の取り組みと今後の課題

1.1 IEA REWP（IEA 再生可能エネルギー作業部会）

1.1.1 概要と意義

- 設立の経緯

IEA 再生可能エネルギー作業部会（REWP : Working Party on Renewable Energy Technologies）は IEA のエネルギー研究・技術委員会（CERT: Committee on Energy Research and Technology）の下に 1982 年設立された CERT の下部組織である。IEA における再生可能エネルギーの研究開発と市場展開を支援する組織として、CERT に対して再生可能エネルギーに関する助言を行う役割を担う。

REWP の下には水素、バイオマス、地熱、水力、風力、海洋エネルギー、太陽光、太陽熱等の９つの技術協力プログラム（TCP : Technology Collaboration Programme）が設けられており、それぞれの特定技術に特化して、参加各国による研究開発と促進支援が実施されている。

- 参加国

オーストラリア、オーストリア、ベルギー、カナダ、チェコ、デンマーク、エストニア、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー、アイルランド、イタリア、日本、韓国、ルクセンブルグ、メキシコ、オランダ、NZ、ノルウェー、ポーランド、ポルトガル、スロバキア、スペイン、スウェーデン、スイス、トルコ、英国、米国、中国、インドの各国が参加している。

- 活動概要と意義

再生可能エネルギーと水素に関連する政策､市場問題および技術を検討することを活動目的としている。再生可能エネルギーに関連した各 IEA 技術協力プログラム（IEA-TCP）での研究開発と再エネ展開に関する取り組みを推進している。また、別途 IEA エネルギー研究・技術委員会（CERT）によって設立された非公式機関である再生可能エネルギー産業諮問委員会（RIAB）を通じて、金融と市場の役割を強化することによって政府と民間部門の対話の場を形成している。2011 年に設立された国際再生可能エネルギー機関（IRENA）（後述）とも研究調査やデータ構築を通じて密接な関係を維持している。IRENA が再生可能エネルギーに集中的に特化した国際機関であるのに対して､IEA REWP は再エネ以外の多様なエネルギー源を包括的に扱う IEA 全体の中で再エネを相対的に位置づけることができるという点に特徴を見出すことができる。また、両者の大きな相違点として、IRENA の加盟国の多くを途上国が占めるのに対して、IEA REWP は OECD の下部組織であることからその参加国の

多くが先進国に著しく偏っていることがある。IEA REWP 設立当時とは比較にならないほど世界のエネルギー需給における途上国の役割は高まっていることや再エネとりわけ太陽光発電の適地に途上国が多いことから、途上国の参加が IEA REWP にとっても必要になってくると考えられる。既に中国とインドは IEA 準加盟国の立場で定期的に会合に参加しており、OECD の下部組織でありながら途上国にも参加を拡大するという流れは今後も拡大すると考えられる。

1.1.2 本年度の活動

COVID-19 パンデミックの影響で本年度の REWP 関連の会合やワークショップはすべてオンライン開催となった。そうした中で 2020 年前半の REWP 会合では、COVID-19 パンデミックによる経済停滞が再エネ発電量や再エネ発電新規設置量へどういった影響をもたらすか、そして、それらの影響を踏まえて各国が再エネ導入を進めるために何を政策的に打ち出すべきかといった議論が展開された。2020 年前半は COVID-19 パンデミックの第 1 波によるロックダウンが世界各国で実施されて、広がる一方の COVID-19 のパンデミックに対して経済の先行き不透明性が非常に強まっていた時期であった。当時の 2020 年の再エネ発電容量の新規増加量は COVID-19 の発生がなかった場合のベースラインと比較して 10%以上の減少が予測されること、特に 2020 年はサプライチェーンの混乱を強く受けること、エネルギー需要の急速な減少によって再エネ市場も不確実性が高いといった内容であった。各国からは、今回のサプライチェーンの混乱に関連して再エネ発電機器生産の特定国への著しい偏りに対する問題意識、国内製造を促すためのローカル・コンテンツ規制の在り方、エネルギー需要の急減と化石燃料価格の低下の再エネへの影響、経済復興策と再エネへの支援策との関連性といった議論が展開された。総じて、2020 年前半の議論は前代未聞のパンデミックに襲われた世界の混乱が再エネの世界にも色濃く反映されていたと言える。

その後、2020 年後半からの世界各国でのロックダウン解除に伴って経済回復が鮮明になり、2020 年～21 年の再エネ市場予測についても修正版が IEA 事務局から共有された。2020 年前半のやや悲観的な予測から一転して楽観的な見通しとなった。2020 年の再エネ発電容量の予測値は大きく上方修正されて、再エネ発電量過去最大の増加量だった 2019 年の記録を塗り替えるとの予測になった。加えて、2020 年後半からは今回の COVID-19 からの経済復興をグリーン投資に結び付けようという動きが急速に強まり、各国首脳による 2050 年脱炭素宣言も相次ぎ、脱炭素の流れが一気に加速した。その中でその中で再エネへの投資拡大を求める声も強まった。こうした状況を受けて、2020 年後半の REWP 会合では、COVID-19 の影響に関する議論は影を潜め、経済復興策と再エネ政策をどのようにパッケージ化させてゆくのか、それに対して IEA の分析がどのように貢献できるか、について議論が展開された。このように 2020 年の REWP 会合はもっぱら COVID-19 の影響、そして、そこからの経済復興と再エネ政策に議論が集中した一年となった。

1.1.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法

IEA CERT の下に REWP が設立されたのは 1982 年である。設立当時の最大のエネルギー問題は、二度にわたる石油危機を色濃く反映して、石油の枯渇を見据えた代替エネルギー資源の開発であった。その後 40 年余が経過し、エネルギー問題は大きく変化した。2000 年以降は再生可能エネルギー、とりわけコスト低下が著しく進行した太陽光発電と風力発電を取り巻く状況は劇的に変化している。水力を含む再エネの世界の発電に占めるシェアは 2018 年には約 1/4 を超えて、2030 年には 30%を越す勢いで増加が続いている。特に、2020 年に COVID-19 パンデミックの影響で発電量全体が減少する中で再エネ発電量の増加が顕著だった OECD 各国、とりわけ欧州各国（OECD 欧州）では発電全体に占める再エネシェアは 44%と 5 割に迫る水準まで一気に拡大した。OECD 欧州全体では自然変動再エネ（VRE）のシェアも 2020 年には 20%に達しており、今後も一層の拡大は不可避の状況にある。

こうした中で、REWP における再エネ発電に関する議論の中心的テーマも「再エネ発電設備の導入拡大」という量的関心から、「VRE を統合してゆくために電力システムの柔軟性をいかに高めてゆくか」という電力システムの質的関心へ移った。2020 年は COVID-19 パンデミックという外的要因から一時的に再エネ発電の導入量に対して関心が集まったが、それは長期的視点からは一過性のものと考えられる。太陽光・風力発電は発電コストの低下によって競争力が急速に高まっており、市場統合を通じた量的な拡大に一定の方向性が見えてきた。これに対して、電力システムの柔軟性確保は VRE の量的拡大に伴って課題が一層深刻化、かつ急速に拡大する傾向にあり、我が国を含めた政策的関心の高い分野として今後も議論が展開されると考えられる。この分野の議論は技術、政策、市場と多岐にわたり、かつそれぞれの議論も非常に精緻になってきている。今後も専門的かつ精緻な議論が各国の専門家も交えて広く展開されてゆくことは確実である。蓄電池や EMS をはじめとして我が国が持つ技術の優位性を最大限発揮できるような政策的な議論へのインプットが求められるところである。

加えて、従来の発電部門だけに特化した再エネの普及開発から、熱需要や運輸部門におけるエネルギー需要に対して再エネ供給をいかに増加させるかという「発電以外の分野での再エネ普及」も新たな課題のテーマとして定着した。特に、2019 年以降関心テーマとして急浮上してきたのが再エネ水素（いわゆるグリーン水素）である。日照条件や風況に恵まれたエリアでの低コストの太陽光発電や風力発電からの電力、あるいは低需要時の余剰電力を有効活用した電気分解によって水素を製造し、従来再エネ化が困難であった熱需要や運輸部門でのエネルギー需要に対して様々な方法での利用可能性が議論されるようになった。2019 年度には第 2 回水素閣僚会議が我が国において開催されたのに合わせて、IEA からも初めての水素レポート（「Hydrogen 2019」）が発刊された。再エネ水素についても REWP としての本格的な議論は端緒に就いたばかりであり、今後も再エネに関連した中心的課題として扱われると考えられる。

以上述べた REWP で議論されている関心テーマはいずれも我が国においても重要な政策

的関心事項である。第 5 次エネルギー基本計画において、再エネの主力電源化が明確化された上に、2020 年 10 月は菅総理による 2050 年カーボンニュートラル宣言を受けて、日本においても再エネの急速な拡大が確実視される中で、VRE のシステム統合は今や再エネ政策の中心的な政策課題となった。米国のパリ協定復帰によって、VRE のシステム統合はまさに世界主要国間の共通政策課題となり、直接的に議論する場として REWP の有用性は増すと考えられる。また、再エネ水素に対する世界的な関心の拡大によって、水素の利用において世界をリードする立場にある我が国として、これまでの経験知見の共有といった貢献が求められているとも言える。上述したように 2020 年は COVID-19 パンデミックの影響を受けた混乱が REWP の議論にも影響を及ぼしたが、長期的には再エネの拡大基調は変わるどころか 2020 年を経て一層強化された形であり、REWP の重要性は一層高まっている。

1.2 IRENA（国際再生可能エネルギー機関）

1.2.1 概要と意義

- 設立の経緯

  再生可能エネルギーの普及及び持続可能な利用の促進を目的として、2011 年 4 月に発足した。事務局本部はアブダビに所在するが、ドイツのボンには分館としてイノベーション・テクノロジー・センター（IITC）が設置されている。IRENA は再生可能エネルギーの政策や技術に関する情報の収集、メンバー国での情報の共有、政策提案、技術移転、能力開発などを通じて、再生可能エネルギーの普及拡大を目指す。

- 参加国及び事務局長、理事国
  - 2021 年 3 月現在の加盟国数は 163（EU を含む）であり、加盟手続き中の国が 21 カ国である。
  - IRENA は、総会、理事会、事務局から構成される。現在（2021 年 3 月時点）の事務局長はフランチェスコ・ラ・カメラ氏（イタリア）である。
  - 2020 年の理事国は、アンティグア・バーブーダ、バングラデシュ、ベルギー、ブルキナファソ、チャド、キプロス、ドミニカ共和国、エジプト、ドイツ、イタリア、ヨルダン、キリバス、マレーシア、メキシコ、モザンビーク、ニュージーランド、フィリピン、スイス、ウガンダ、UAE、米国の 21 カ国。

- 活動概要と意義

  IRENA は以下のような幅広い活動を通じて、先進国・途上国の双方における再エネ導入拡大の推進や様々な課題解決への支援を行っている。

【各国、地域、グローバルレベルでの各種プログラム】

- Clean Energy Corridor：国内の電力システムへのコスト効果的な再エネの統合を支援し、他国との電力取引を促し、再エネの地域市場の設立を支援するイニシアチブ。
- Coalition for Action：再エネシェア拡大に向けた行動をとるため、官民のステークホルダーが参加する議論の場を提供。4 つのワーキンググループ（Business and Investors Group, Community Energy Group, Decarbonising End-Use Sectors Group, Towards 100% RE Group）を設立。
- Global Geothermal Aliance：地熱の利用拡大に向け、地熱関連企業、政策立案者、ステークホルダー間の議論・協力・協調したアクションを促すプラットフォーム。46 カ国および 40 のパートナー機関が参加。
- Parliamentary Network：国会議員に対してエネルギーや環境に関する政策立案に資する情報を提供。
- Renewable Energy Roadmap (REmap)：再エネのポテンシャルに関する評価を国別、地域別、世界レベルで展開。ロードマップでは、可能性のある技術の選択肢を提示し、技術、コスト、投資ニーズ、外部性、CO2 排出量、経済指標といった観点での評価を実施。
- Renewables Readiness Assessments：国別に再エネの開発・導入に関する適合性を評価するツール。再エネの導入拡大に向けた短期及び中期的に必要な行動を提示。
- Small Island Developing States (SIDS) Lighthouses initiative：再エネをベースとしたレジリエントなエネルギーシステムへ移行するための小島嶼国を支援するイニシアチブ。36 の小島嶼国および 29 のパートナー（IRENA 加盟国、国際機関や民間企業等）が参加。

【プロジェクトの推進】

- IRENA Global Atlas：再エネプロジェクト開発支援のための資源評価やマッピングデータを提供する地理情報のオンラインプラットフォーム。
- IRENA Project Navigator：担保可能な再エネプロジェクト開発を支援するためアクセスが容易で実用的な情報・ツール・ガイダンスを提供するオンラインプラットフォーム。
- IRENA Sustainable Energy Marketplace：再エネプロジェクト、投資家、サービス・技術提供者を結びつけるオンラインプラットフォーム（例えば、気候投資プラットフォーム（Climate Investment Platform））。
- IRENA/ADFD Project Facility：ADFD（アブダビ開発ファンド）が途上国において複製可能である程度の規模がありエネルギー転換をもたらす再エネプロジェクトに対して 3 億 5,000 万ドルの資金を提供し、IRENA が案件を審査・選定して低金利融資を行うプログラム。2020 年に予定されていた全 7 サイクル（7 年間の融資）が終了。

- Open Solar Contracts：IRENA と Terrawatt Initiative が連携して太陽光エネルギーの拡大を支援するプログラム。簡潔で世界的に適用される契約手続きによってプロジェクト開発および融資プロセスの効率化を促進。

【知見の提供】

- データ・統計：再エネの政策や導入の評価に必要な詳細でタイムリーなデータおよび統計を提供。再エネ発電容量統計は毎年 3 月、再エネの需給データは毎年 7 月に発表される。この他にも、投資、発電コスト、政策、経済的便益、イノベーション・テクノロジー、エネルギー転換、気候変動といったテーマ別に検索ができるように整備されている。
- INSPIRE (International Standards and Patents in Renewable Energy)：再エネ技術の利用に関する国際標準、特許等に関する情報を提供するオンラインプラットフォーム。

1.2.2 本年度の活動

IRENA は「2018 年－2022 年中期戦略（Medium-term Strategy 2018-2022）」を策定しており、世界的なエネルギーシステムの転換をリードするため、「技術・イノベーションのセンター・オブ・エクセレンス」、「再エネのためのグローバルボイス」、「全ステークホルダーのネットワークハブ」、「助言とサポートの源泉」をミッションとしている。本年度も同戦略を踏まえた「2020 年－2021 年事業計画」においてミッションごとに細分化された事業がコロナ禍でもオンライン会議等を駆使して遂行され、その実施状況や報告書等の成果物が第 19・20 回理事会および第 11 回総会において報告された。

IRENA の報告によると、2020 年 11 月末時点で、35 の報告書が公表されている。2020 年 4 月に公表された IRENA の主要な（flagship）報告書である「Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050」では、パリ協定に沿った脱炭素化達成に向けた見通しが示されている。気候変動対策の投資やエネルギー転換に必要な政策枠組みも提示し、シナリオ分析および社会経済への影響も検討されている。また、いち早く、2020 年 6 月には COVID-19 による世界経済やエネルギー・再エネ分野（特に雇用）への影響について分析した報告書「The Post-Covid Recovery: An Agenda for Resilience, Development and Equality」も公表した。2021～2023 年のパンデミックからの復興時期において、エネルギー転換を促進するため政策や投資の構造転換がレジリエントな社会作りに重要であるとしている。なお、REmap は国・地域レベルでの分析も行われており、2020 年 10 月には南東欧地域に焦点を当てた「Renewable Energy Prospects for Central and Eastern Europe Energy Connectivity」が公表された。また、2020 年 11 月末時点で、85 のウェビナー、および 162 のイベントの主催・共催も行った。

2020 年は、Collaborative Framework の下、5 つのテーマ（①エネルギーシステムにおける高い再エネシェア、②エネルギー転換の地政学、③グリーン水素、④水力、⑤海洋エネルギー／洋上再エネ）について議論が開始された。2020 年 6~7 月に第 1 回、同 9～10 月に第 2 回がオンライ会議の形式で行われた（第 3 回も 2021 年上半期に実施予定）。各テーマに関し

て、参加者より注目する分野や課題等が挙げられ、第 2 回会議において、対象範囲や枠組みの方針、実施方法について合意された。また各業界等ステークホルダーの参加・協力についても進められる。

他方、国際機関としての立場を活かして、IRENA は、エネルギー転換を推進するための国際的なプラットフォームやパートナーシップの拡大も進めている。IRENA が国連開発計画（UNDP）、Sustainable Energy for All（SEforALL）とともに 2019 年に立ち上げた「気候投資プラットフォーム（Climate Investment Platform）」では着実に活動が進められ、2020 年には 175 以上のプロジェクトおよび 300 以上のパートナーの登録に至っている。2021 年に英国で開催される COP26 に関しても IRENA の協力は期待されており、IRENA は 2020 年に 17 カ国の NDC に関するエネルギー転換を支援した。パートナーシップについて、最近では、2021 年 1 月、IRENA は国連食糧農業機関（FAO）と農業食品・漁業・林業や持続可能なバイオエネルギー分野で再エネ技術の利用を加速化するために MOU を締結した。また、2021 年 3 月には、IRENA は米州開発銀行（IDB）とラテンアメリカ・カリブ諸国においてパリ協定の 2030 年目標に向けたエネルギー転換を推進するために協力関係を結んだ。

日本との関係では、IRENA は国際会議や報告書作成において知見の提供で貢献している。2020 年 10 月に開催された水素閣僚会議特別イベントにラ・カメラ事務局長によるスピーチが行われた。2020 年 12 月には、日本およびドイツ政府の支援によって作成された「Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Renewables to Meet the 1.5℃ Climate Goal」が公表された。

1.2.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法

コロナ禍の困難な状況にも関わらず、「2020‐2021 年事業計画」の 94%（2020 年 11 月末時点）が実施中もしくは終了しており、多くの加盟国が IRENA による継続的な知見の共有や情報提供を高く評価している。IRENA は再エネ分野における政策や技術に関するタイムリーなテーマを扱った報告書を発表しており、先述したように 2020 年 6 月にはポストコロナによる再エネや社会経済への影響に関する報告書を出している。さらに、再エネに限らず、エネルギー転換による社会経済的な影響（例えば雇用への影響）やファイナンスに焦点を当てた報告書も出されている。また、REmap や Renewables Readiness Assessments では国別の分析を進めており、オンライン上でのプラットフォームや分析ツールの提供は、各国（特にリソースが限られた途上国）にとって再エネ政策・技術に関する貴重な情報源となっている。加盟国の協力によって構築されている再エネ電力に関するデータベースは、最新かつ信頼できるデータとして活用されている。なお、理事会・総会を含む対面式の会議の開催は困難であったが、様々なテーマを扱った多くの webinar が開催され、逆に、遠隔地からでも参加が容易になったという意味では情報共有や加盟国の意見交換が促進されたものと考えられる。

COVID-19 によって再エネがレジリエントなエネルギー源であることが世界で再認識され、カーボンニュートラルを宣言する国が続いたこともあり、エネルギー転換を推進する上で IRENA の役割はさらに重要になると考えられる。ラ・カメラ事務局長は、IRENA 事業と

して知見の共有や情報提供を優先事項としつつも、現場での活動（action oriented）にも注力していくことを表明していたが、COVID-19 の影響により、2020 年はプロジェクトの推進や投資に関する事業の割合が増えている。ドイツのように IRENA に対してあくまで事業を推進する（facilitate）役割を望む声もあり、少なくとも COVID-19 パンデミックが収束するまでは今年度のような形態での事業が続くと考えられる。

新たな動きとして 2020 年より開始された Collaborative Framework における今後の議論に注目される。5 つのテーマ（①エネルギーシステムにおける高い再エネシェア、②エネルギー転換の地政学、③グリーン水素、④水力、⑤海洋エネルギー／洋上再エネ）は、日本にとっても重要で貢献できる分野もあり、積極的な参加が望まれる。例えば、グリーン水素については、10MW の水素製造装置を備えた「福島水素エネルギー研究フィールド（FH2R)）」から得られる知見を共有できる。また、海洋エネルギー／洋上再エネについては、今後、洋上風力の拡大を目指す日本にとって、当枠組みを通じた情報収集やネットワークの構築が期待される。

最後に、再エネ事業へのファイナンスの確保は、エネルギー転換や再エネを推進する上で重要な課題である。規模の小ささや信用面でのリスクから投資可能な事業が少ない途上国にとって、IRENA/ADFD Project Facility が再エネ事業への投資において果たしてきた役割は大きかったといえる。日本は、諮問委員と専門家パネル委員の双方を担い、当プログラムの運営に実務面で大きく貢献してきた。IRENA と ADFD による新しい枠組みでの支援が行われる予定であるため、支援を表明しているニュージーランドとともに、日本も再エネ開発案件審査・評価において再び貢献できると考えられる。

1.3 ISGAN（インターナショナル・スマートグリッド・アクションネットワーク）

1.3.1 概要と意義

- 設立の経緯

ISGAN は、2010 年に米国エネルギー省の呼びかけで、世界の主要な 23 カ国・地域が参加して、 2010 年 7 月に米国ワシントン DC で開催された CEM（Clean Energy Ministerial）の 11 のイニシアチブの一つとして活動が開始された。2011 年 4 月の UAE アブダビにおける CEM2 において IEA の実施協定[5]として活動することが提案された。これを受けて当時の IEA ENARD（Electricity Networks Analysis, Research and Development）実施協定を発展的に解消して ISGAN の一部として組み込み、ISGAN は IEA の実施協定としても活動することになった。日本は当初 CEM 加盟国として参加していたが、2012 年 5 月に IEA-ISGAN 実施協定にも署名した。

2016 年 6 月の CEM7（サンフランシスコ）において CEM の事務局を IEA に移管す

[5] 現在は IEA 技術協力プログラム（TCP）へ改称。

ることが決定され、CEM のイニシアチブの一つでもある ISGAN も正式に IEA の EUWP に属する技術協力プログラム（TCP）となった。

- 参加国

  現在の参加国は、オーストラリア、オーストリア、ベルギー、カナダ、中国、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、インド、アイルランド、イタリア、日本、韓国、メキシコ、オランダ、ノルウェー、ロシア、シンガポール、南ア、スペイン、スウェーデン、スイス、米国、英国、ブラジル 26 カ国＋EU である。2020 年よりブラジルが正式に加盟している。

- 活動概要と意義

  ISGAN は、再生可能エネルギー導入拡大、エネルギー消費低減、電気自動車の導入拡大などスマートグリッド関連技術の発展と普及を世界規模で促進することを目的としている。また世界的な民間スマートグリッド同盟 GSEF（Global Smart Energy Federation[6]）とも官民協働のメカニズムを持っている。

  ISGAN の下での具体的な諸活動は Annex と呼ばれる各分科会の下で実施される。当初は Annex1 から Annex 4 までの 4 つの Annex で活動を開始した。その後、Annex5 から Annex7 までの追加、Annex1（スマートグリッド・インベントリ）の Annex2（スマートグリッド・ケーススタディ）への吸収がなされた。2016 年 3 月にはスマートグリッドに関連した技術的な講義を Webinar で提供する ISGAN Virtual Academy が Annex8 として新たに追加された。2021 年 1 月には、再生可能エネルギー導入拡大に伴う、電力システムの柔軟性を確保するための Flexibility Markets が Annex9 として発足した。以上を整理して現在活動を行っている Annex を以下に示す。

  - Annex 2: Smart Grid Case Studies
  - Annex 3: Benefit-Cost Analyses and Toolkits
  - Annex 4: Synthesis of Insights for Decision Makers
  - Annex 5: Smart Grid International Research Facility Network (SIRFN)
  - Annex 6: Power Transmision &Distribution Systems
  - Annex 7: Smart Grid Transition
  - Annex 8: ISGAN Acadmy on Smart Grid
  - Annex9：Flexibility Markets

  年 2 回開催される執行委員会（ExCo）では各 Annex の活動進捗状況と今後の活動

[6] 2020 年に従来の名称 GSGF（Global Smart Grid Federation）から変更。

計画の報告が行われる。また、毎年の CEM 会合においても各 Annex 及び ISGAN Award の活動成果についての報告が行われる。これらの Annex 活動に加えて、世界のスマートグリッド関連の優秀プロジェクトを審査して表彰する ISGAN 大賞も 2014 年から毎年実施されている。

1.3.2 本年度の活動

日本が中心的に活動している Annex5（Smart Grid International Research Facility Network：SIRFN) においては、昨年度に引き続き、分散型電源のテストプロトコル、マイクログリッドのテスト、電力システムテスト、Advanced Lab Testing Methods 等の開発が実施された。これまでの大きな成果として系統サポート機能の試験プロトコル原案の作成が挙げられ、スマートグリッドに関する世界先端技術開発の協力体制の確立、各国の事情を踏まえた共通試験法の開発、スマートグリッドの課題共有と共通認識の確立といった面で極めて重要な基盤を形成している。

日本が参加するもう一つの Annex 活動は、Annex 8 の ISGAN Academy on Smart Grid である。スマートグリッドに関連した学術的な内容の講義を Webinar 上で定期的に行うもので、日本は講義に用いる教材を選定・審査する Academic Committe の正式メンバーとしてその運営に貢献している。

日本が新たに参加を表明した Annex 活動は、Annex9 の Flexibility Markets である。本 Annex は、本年度英国主導で活動計画（PoW）の作成を行い、2021 年 1 月より正式に発足した。日本からは、PoW 作成に当たって、本 Annex が扱うテーマに関するアンケートへの回答や電話会合に参加し、インプットを行った。

その他、ISGAN 新規ターム（2022年3月～2027年2月）に取り組むテーマに関するアンケートへの回答、CEM が 2020 年から 2030 年の 10 年間で取り組むべき重点トピックに関するアンケートへの回答を行った。

ISGAN 大賞の 2020 年度の応募テーマ「Digitalization Enabling Consumer Empowerment」に対しては、9 カ国から 10 件の応募があり、日本から NEDO のスロベニアのスマートコミュニティ実証が大賞を受賞した。2020 年 9 月開催の CEM11 のサイドイベントにおいて表彰式が行われ、日本から METI と NEDO がプレゼンテーションを行った。

1.3.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法

世界的な再エネの急速な拡大に向けたエネルギー転換とそれに伴うスマートグリッドの機能や役割への関心の高まりを背景として、スマートグリッドに関する国際的協力活動の場としての ISGAN はその存在が広く認められている。13 のイニシアチブに増えた CEM 活動についてレビューが 2015 年に実施された結果、ISGAN は全イニシアチブ中の第 2 位にランキングされて高い評価を得た。2016 年には CEM の事務局が IEA に移行し、IEA の技術協力

プログラム（TCP）の一つとしてISGANの組織的な位置付けも明確になった。

スマートグリッドは広範かつ多様な要素を包含し得る概念であり、その認識に参加各国間で少なからぬ相違があり、その相違がISGAN活動への取り組みやそのインパクトの不明確さにつながっている点はかねてから指摘されていた。しかし、パリ協定の成立、グローバルレベルで自然変動再エネの急激なシェア拡大やICT技術による急速なデジタル化が現実化するなかで、電力グリッドの柔軟性とデジタル化、そしてレジリエンスというスマートグリッドが果たすべき基本要件やそのための政策的課題がISGAN参加各国間で共有されつつある。変動再エネのシェア拡大を所与とした「柔軟性・デジタル化・レジリエンス」という3つのキーワードの下、各国でのスマートグリッドに関連する実証結果や最新の知見を共有する場としてのISGANの方向性に一定の共通認識が確立されつつある。電力という単一のエネルギーシステムのスマート化を超えたエネルギーシステム全体のスマート化も視野に入れ得る国際的な組織としてのISGANの役割は一層高まってゆく可能性がある。

スマートグリッドに関する国際的な議論の場としてのISGANの枠組みはほぼ確立されたと考えてよいが、参加国が欧州に偏っていることから、欧州以外の参加拡大によって世界の多様な知見・経験を共有できる場になることが望ましい。そうしたネットワークの拡大にも日本が果たせる役割があると考えられる。日本としてもスマートグリッドの普及・拡大を通じた政策的かつ技術的な意義について参加各国との議論を深めて、ISGANを通じた国際的協力の在り方について再認識することが求められる。それが我が国のISGANへの貢献にも結実していくと考えられる。その意味ではAnnex 5（Smart Grid International Research Facility Network：SIRFN）における日本の貢献は参考になる事例であり、また2018年度から新たに日本が参加を開始したAnnex 8をはじめとして一層幅広いAnnex活動への日本の参加が望まれるところである。特に変動再エネのシェア拡大を所与とした「柔軟性・デジタル化・レジリエンス」はいずれも日本の直面する政策課題である。2021年に発足したAnnex9は柔軟性の特徴整理、需要家の関与、電力市場（需給調整市場、容量市場、卸電力市場等）の相関関係等をテーマとして具体的な政策課題を扱う予定であり、日本の更なる貢献が期待される。

1.4 APEC EGNRET（APEC 新・再生可能エネルギー技術専門家会合）

1.4.1 概要と意義

- 設立の経緯

  APEC 新・再生可能エネルギー技術専門家会合（Expert Group on New and Renewable Energy Technologies：EGNRET）は、APEC地域における新・再生可能エネルギーの導入促進を活動目的に、APECエネルギー作業部会（Energy Working Group: EWG）の下に1993年に設立された専門家会合である。EWG傘下の専門家会合は4つあり、他にはエネルギーデータ・分析専門家会合（Expert Group on Energy Data Analysis：

EGEDA）、エネルギー効率・省エネルギー専門家会合（Expert Group on Energy Efficiency and Conservation：EGEE&C）、クリーン化石エネルギー専門家会合（Expert Group on Clean Fossil Fuel Energy：EGCFE）がある。

なお、2009 年の第 33 回会合は中華台北で EGEE&C との合同会合が行われ、その後も 2 年に 1 回以上の頻度を目標に合同会合が行われることが確認された。その後、2011 年の第 36 回米国ワシントン DC、2014 年の第 42 回米国ホノルル、2016 年の第 46 回中華台北の台中市、2017 年の第 48 回韓国済州島、2018 年第 51 回タイ国チェンマイ、2019 年 3 月香港で合同開催がなされた。

- 参加国・地域

APEC 参加 21 エコノミーが対象メンバーであるが、近年参加しているのは、中華台北（議長）、タイ（副議長）、米国、中国、香港、インドネシア、韓国、マレーシア、フィリピン、シンガポール、日本である。かつて参加していたカナダは、バイオ燃料タスクフォースが終了した 2011 年以降は不参加となった。オブザーバーとして APERC、EGEDA 事務局、LCMT-TF[1]、PPFS[2]といった APEC 関連組織、関連機関の他に、IRENA、ICA（International Copper Association：国際銅協会）等が会合に参加することもある。

[1] Low Carbon Model Town Task Force の略で、日本を議長国とし LCMT コンセプトの精緻化、ケースタウンにおける FS 調査や政策レビューを主要活動とする。
[2] Policy Partnership on Food Security。農漁業の振興の一環として再エネにも注力している。

- 活動概要と意義

EGNRET の活動内容は、TOR に記載されている①「APEC 21st Century Renewable Energy Development Initiative」、②2010 年に福井県で開催された APEC エネルギー大臣会合で提案された「ASGI（APEC Smart Grid Initiative）」、③ESCI（Enegy Smart Communities Initiative）」、④APEC 地域における再生可能エネルギーの比率を 2030 年までに倍増（2010 年比）させる目標、の取組みを通じて、APEC 資金によるプロジェクトの実施と会合における情報共有を中心に進められている。EGNRET プロジェクトの一覧、現在進行中のプロジェクト、入札関係情報、これまでのプロジェクト成果である報告書については EGNRET のウェブサイトで公開[1]されている。また、近年は EWG 内での取組みに関する連携、EWG 外での APEC 組織との連携が推奨されている。

EGNRET は年 2 回のペースで開催されており、20 年以上の活動実績がある。一般的に会合の日程は視察を含めて 3 日程度で行われ、APEC プロジェクトのワークショップ等と同時に行われる場合も多い。会議は APEC の活動内容、APEC プロジェクトの進捗状況、ホスト

エコノミーにおける再生可能エネルギー全般の取組状況、特定のテーマに関する参加エコノミーの状況についての情報共有・議論等が行われる。近年は再エネの倍増目標（2014 年の APEC 首脳会合において，発電を含む APEC のエネルギーミックスにおける再エネ比率を 2030 年までに 2010 年比で倍増させることを合意）に向けた議論が継続的に行われている。

[1] http://www.egnret.ewg.apec.org/

1.4.2 本年度の活動

2020 年は年初から世界的に拡大した Covid-19 パンデミックの影響によって、APEC EGNRET の下での諸活動も全面的な停滞を余儀なくされた。とりわけ 2020 年前半は APEC 各国の政策的関心はもっぱら Covid-19 パンデミックによる感染拡大防止に集中しており、少なくともパンデミック第 1 波の収束が見えてきた 2020 年 7 月頃までは各プロジェクト活動も事実上停止し、予定されていた会合も軒並み中止となった。このため、当初 2020 年 3 月にフィリピンでの開催が予定されていた第 54 回会合も延期となり、最終的には半年以上遅れた 2020 年 11 月にオンラインにて開催された。従来は年 2 回開催されてきた EGNRET 会合の 2020 年度開催はこの 1 回だけであり、活動停滞を象徴するような 1 年であった。

APEC における再生可能エネルギーに関する近年の議論の中心は、上述したように、2014 年に APEC 首脳会議にて合意された、発電を含む APEC のエネルギーミックスにおける再エネ比率を 2030 年までに 2010 年比で倍増させることを目指す目標に関するものである。従来は、この方針を受けて、議長エコノミーの中華台北が実施する、再エネ倍増ロードマップに関するプロジェクト[1]に沿って議論が行われてきた。

中華台北は、本プロジェクトの実施者及び EGNRET 事務局として、「APEC エネルギー需給アウトルック」を 2〜3 年ごとに作成している APERC（Asia Pacific Energy Research Centre）や EGEDA と協力して、再エネ倍増に関する議論を深めてきた。ここで採用されている再エネの計測手法として注目すべき点としては、バイオエネルギーのうち薪炭等の伝統的バイオマスを再エネに含めないこと、一次エネルギーではなく最終消費エネルギーで計測すること、また、APEC エネルギーデータを使用して計測を行うこと等である。また、APEC において別途掲げられているエネルギー原単位削減目標、すなわちエネルギー効率改善が実現すれば、エネルギー需要の増加抑制を通じて再エネ目標達成のための必要増加分を減らすことができるので、エネルギー効率改善と再エネ導入を並行して実施することで一層高い費用対効果が得られるといった議論もなされている。

これら再エネ倍増に向けた諸課題については、EGEE&C や EGEDA、APERC といった APEC 内部の組織や機関との連携のみならず、引き続き IEA や IRENA 等の再生可能エネルギーに関する国際機関との連携も議論されている。以上、APEC の再エネ倍増目標に関する

経緯をまとめると、2015 年に再エネを定義、2016 年にロードマップの策定を提案、2017 年にロードマップ策定、2017～2018 年に再エネロードマップの素案を報告。2019 年は再エネロードマップや下位機関との協力について議論という流れとなる。

2019 年 5 月に開催された EWG では、APERC が同月公表した「APEC エネルギー需給アウトルック（第 7 版）」に基づき、2030 年に向けた再エネ倍増目標が困難であることが認識されたが、EWG は、エコノミー別の課題と政策分析が可能として、EGNRET に対し、目標達成のために必要な追加的努力を報告することを求めた。2019 年 10 月の第 53 回 EGRET 会合では、目標達成のための追加的努力についての議論及び情報共有や IRENA との連携の重要性などが強調された。このような経緯を踏まえて、オンライン開催となった第 54 回 EGNRET では、再エネ 2 倍目標の達成に向けて必要な取り組みは何か、どのような国家間の活動に注力するべきかが議論された。同会合では、併せて、COVID-19 は APEC 地域における再エネの導入に影響したか、再エネ導入目標に影響はあったかについても議論がなされた。

[1] EWG 11 2016A：Filling the Gap to Reach the Goal of Doubling Renewable Energy in the APEC Region

1.4.3 活動の評価、今後の課題、日本の貢献方法

APEC 地域における新・再生可能エネルギーが重要性を増すに伴い、2000 年代後半には APEC Biofuel Task Force（2006-2011 年）、Low Carbon Model Town Task Force（LCMT- TF：2010 年-）といった Task Force が設立されてきた。EGNRET の活動も、Biofuel Task Force 終了後の 2012 年にスマートグリッドやスマートコミュニティを取りこみ、LCMT-TF とも連携しつつ実施されている。

また、APEC 活動をリードするエコノミーの一つである米国の提案は、APEC 域外の IEA や IRENA、CEM 等を意識したものになっており、これら機関との連携の重要性も増している。APEC 地域の再生可能エネルギーの促進のために、これら日本も関与する組織や機関との適切な連携等を通じた日本の貢献の重要性が増している。

日本においては、太陽光発電等の出力変動する再エネの導入量を増加させるための各種制度や関連技術開発が進められており、これら日本の経験を踏まえた再エネ促進政策や実証事業の紹介を通じて、APEC 地域における再エネ拡大に貢献することも重要かつ必要である。

2019 年 1 月には、2017 年度に経済産業省の別事業で作成された質の高い廃棄物発電指針を紹介するワークショップが実施された。これは再生可能エネルギーに関する内容であったことから、EGNRET を通じて、日本のセルフファンドプロジェクトとして実施された。その後、2019 年半ばから、日本企業の海外進出に繋げるため、APEC における

ビジネス関係の諮問機関である ABAC（APEC ビジネス諮問委員会: APEC Business Advisory Council）と連携を取り始めている。今後も、廃棄物発電のみならず、例えば地熱発電など日本の進んだ再生可能エネルギーに関する知見や技術を、APEC 参加エコノミーに紹介する等の貢献も期待できる。

2020 年は Covid-19 パンデミックによる影響を強く受けた年であったが、同時に世界各国において脱炭素への取り組みの加速が鮮明になった年でもあった。APEC EGNRET 参加エコノミーにおいても、2020 年 10 月の我が国菅総理による 2050 年カーボンニュートラル宣言をはじめ、同年 9 月の中国による 2060 年排出実質ゼロ表明、同年 10 月には韓国の 2050 年カーボンニュートラル推進計画、そして、同年 11 月には米国で 2050 年排出ネットゼロを表明するバイデン氏が次期大統領に当選するなど、今世紀中ごろに向けた脱炭素の国家的目標が次々と旗揚げされた。これによって、APEC 地域における長期的な再エネ導入に一段と弾みが付くことは確実であり、EGNRET の果たす役割の重要性も自ずと高まる。APEC 地域での再エネ政策の動向をいち早く把握し議論に積極的参加することで、我が国が優位性を発揮する再エネ分野での政策的議論をリードするなど EGNRET の場を有効活用してゆくことが可能であろう。

第2章 各会合の議事録（再エネ編）

2.1 IEA REWP

2.1.1 IEA-REWP 第 77 回執行委員会（REWP ExCo77）

- 日程： 2020 年 4 月 8 日
- 場所：オンライン開催
- 主な議論
  - IEA から発刊される報告書「Renewable Energy Market Report 2020 - Forecasts and analysis to 2025」について説明があり、これに基づいて各国から Covid-19 の再エネ市場に対する影響について議論が行われた。併せて、同報告書で特集される予定の水力発電の役割についても議論が行われた。
  - IRENA から直近の活動状況について説明がなされた。
  - IEA 事務局、IEA 再エネ課から直近の活動状況について説明がなされた。
  - PVPS（太陽光）、SHC（太陽熱冷暖房）の各 TCP より直近の活動について報告がなされた。
  - 次期 REWP 会合について、2020 年 9 月 28 日～10 月 2 日にトロントでの開催を予定。IRENA Innovation Day、World Circular Economy Forum 2020（2020 年 9 月 29 日～10 月 1 日）との並行開催の予定。ただし、Covid-19 の感染状況を踏まえて開催地変更及びオンライン開催の可能性があるとの説明があった。

2.1.2 IEA-REWP 第 78 回執行委員会（REWP ExCo78）

- 日程： 2020 年 9 月 30 日～10 月 1 日
- 場所：オンライン開催
- 主な議論
  - Covid-19 パンデミックからの経済復興策における再エネの価値付け、IEA による分析の優先すべき対象分野、IEA 加盟国・IEA TCP による IEA の利活用等について集中的な議論が行われた。
  - TCP への新しい法的枠組み適用と実施協定の改定作業、IEA の加盟国補国・準加盟国の受け入れ、IEA 事務局の Coodinator としての TCP への参加について IEA 事務局から説明があり、これについて議論が行われた。
  - IRENA より、直近の活動状況、特に複数の再エネ関連分野にわたる Collaborative Framework の設立について説明があり、これについて議論が行われた。
  - IEA 事務局から直近の活動状況について説明があり、これについて議論が行われた。
  - 地熱、ECES（Energy Conservation and Energy Storage）、バイオエネルギー、水素、水力、海洋エネルギーの各 TCP から直近の活動状況について報告があり、これ

について議論がなされた。

- 次回 REWP 会合の開催地、開催時期については、この先の Covid-19 の世界的な感染状況が不透明なことから未定だが、オンライン会議の可能性が高い。仮に対面で行うことが可能になれば、当初予定のカナダあるいはチリを第 1 候補として開催を検討することとなった。

2.2 IRENA

2.2.1 第 19・20 回 IRENA 理事会

- 日程：2020 年 11 月 3 日～4 日
- オンライン会議にて開催（コロナ禍で 6 月に開催予定であった第 19 回理事会が延期されたため、第 19 回・第 20 回理事会は続けての開催となった。）
- 主な議論
  - 「2020‐2021 年事業計画」に関して、プログラム実施状況および予算執行状況が報告され、加盟国より全体的に評価・支援するコメントが出された。また「中期戦略（Medium-term Strategy 2018-2022）」に関する外部機関による中間評価についても報告が行われた。
  - エネルギー転換を進めるにあたり、IRENA の支援のあり方が議論された。IRENA に対しプロジェクト実施前の事業（プロジェクト開発・準備等）に注力することが要請され、気候投資プラットフォーム（Climate Investment Platform）やエネルギーデータ整備を通じた支援、キャパシティ不足や資源評価の欠如といった課題克服に向けた支援等が挙げられた。また、COVID-19 パンデミック後に途上国が直面する課題について検討することも要請された。
  - 2020 年より開始された 5 つの Collaborative Framework に関する議論の概要が各枠組みの議長国より報告された。多くの加盟国からこの事業に対する評価・関心が示された。
  - IRENA/ADFD Project Facility に関し、最終の第 7 サイクルを終了したものの、IRENA と ADFD は採択されたプロジェクトのモニタリングや支援に関して継続して協力することが確認された。

2.2.2 第 11 回 IRENA 総会

- 日程：2021 年 1 月 18 日～1 月 21 日
- 場所：オンラインで開催
- 主な議論：
  - エネルギー転換の促進に向けた国家エネルギー計画の重要性が議論された。特に気候変動対策および COVID-19 パンデミックからの経済復興策として、パンデミック渦中でもレジリエントであることが示された再エネが担う役割に注目されている。

多くの加盟国はエネルギー転換を推進しており、パリ協定目標の達成に向けてカーボンニュートラル目標やNDCの引き上げが表明された。また、途上国からは技術や融資（途上国の小規模事業でも利用できるような融資枠組み）に関する支援が要請された。

- カーボンニュートラルに向けた各国の政策や企業の取り組みについて意見が交わされた。グリーン水素に注目している加盟国は多く、課題（コスト、水素生産規模の拡大、インフラ、市場の整備、安全性等）も指摘された。また、低炭素化のためにバイオエネルギーの活用を唱える加盟国もあった。
- エネルギー転換に関するグローバルハイレベルフォーラムの設立が提案された。
- IRENA/ADFD Project Facilityに関し、今後も同様の融資事業について検討することが言及された。

2.3 ISGAN

2.3.1 第19回執行委員会（ExCo19）

- 日程：2020年5月19日～20日
- 場所: Web開催
- 主な議論：
  - ISGAN加盟国数は前回ExCo18時点から変わらず、EUを含む26カ国。
  - 今次会合より、各国1名ずつのRepresentative、Alternateのみが投票権を有することとなった。Alternate以外のオブザーバー参加は認められるが、投票権は有しない。
  - 予算レビューグループ(BRG)より、3月に行われた電話会合の振り返りがされた。3月の電話会合では、ISGAN事務局の新たなOAの選定を行うことが決定し、ExCo20までにOA選定のための公募要領(ToR)の作成を行うこと、ToR作成のためのワーキンググループにドイツ、カナダ、オーストラリア、スウェーデンが関心を示した。
  - ISGAN第3ターム（2022年3月-2027年2月）への延長に関しては、副議長のアメリカより、アドホックチームの参加を募集するとの説明があった。今次会合において参加表明や期限は明言なし。
  - 新規Annexインキュベーターチームリードのイギリスより、これまでの活動報告がされた。Flexibilityをテーマとして、新規Annexを創設するのか、既存のAnexの中で取り扱うのか決めることが必要との提案がされた。イギリスとしては、今後は単独でリードするのは難しいので、他の国にも協力してほしいとの発言がされた。アメリカからは、まずはアクションプランの検討をすること、カナダからは人的リソースを明確化することが必要との意見があがった。
  - ISGAN Award2020の結果報告がされた。2020年のテーマ “Digitalization Enabling Consumer Empowerment”に対し、9ヵ国10テーマがノミネートされ、日本からNEDOのスロベニアにおけるスマートコミュニティ実証が大賞を受賞した。

- 次回 ExCo20 の開催地は、当初オランダが予定されていたが、COVID19 の影響によりウェブ開催の方向となった。ExCO21 は、当初イギリスがオファーしていたが、オーストラリアより 2021 年 2 月に IRED2021 と共同でアデレードで開催することが提案された。なお、ExCo22 (2021 年秋)はデンマーク、ExCo23 (2022 年春)は中国よりオファーが出ている。

2.3.2 第 20 回執行委員会（ExCo20）

- 日程：2020 年 10 月 27 日～29 日
- 場所：Web 開催
- 主な議論：
  - ISGAN 加盟国数は前回 ExCo からブラジルが新たに加わり、EU を含む 27 カ国。オブザーバーとして、イスラエルが参加。インドネシアもオブザーバーとして参加する予定であったが、内部手続きの問題で不参加となった。
  - アメリカより、ISGAN 新規ターム申請に必要な作業とタスクチームの募集がされた。必要な作業は①新たな戦略計画の作成②IEA への質問書作成③IEA との実施協定策定に向けた議論との説明があった。タスクチームの活用時期は、2020 年 12 月-2021 年 6 月で、3 月までに電話会議を 4 回ほど実施する予定。今次会合においては、カナダ、オーストリア、スウェーデン、オランダ、イギリスが関心を示した。
  - 新規 Annex チームリードのイギリスより、前回 ExCo からの進捗として、新規 Annex で扱う項目の特定、新規 Annex の活動リストの作成などが報告された。新規 Annex に関心表明している国は、OA:イギリス、共同リード:カナダ、スウェーデン、特定トピックに関心:イタリア、日本、関心表明:インド、オランダ、ロシア、スペインが挙げられた。今次会合においてオーストリアが新たに関心を表明した。今後は、PoW（活動計画）を数週間以内に書面投票を行い最終化すること、各国にリソースがどの程度あるかアンケート調査を行うことに言及された。
  - 新規事務局公募チームリードのベルギーより、進捗報告がされた。今回の公募では AIT に代わる OA の選定を行い、KSGI は、これまでと同様に CEM、アジア地域への広報など同様の役割を担うことに異論はでなかった。公募は 12 月 2 日より開始し、1 月 15 日に〆切、次回 ExCo で新規 OA を選出する予定となった。
  - 予算レビューグループより、ベルギーに変わる新規 Chair の募集がされた。今次会合において立候補は出なかったが、カナダが次回の ExCo21 まで暫定的に引き継ぐことを表明した。
  - KSGI より、ISGAN Award2020 の表彰式と ISGAN Award 2021 の進捗が報告された。2020 の表彰式は 9 月 16 日に CEM11 のサイドイベントで行われ、金賞の日本からは METI と NEDO がプレゼンを行った。
  - 次回の ExCo21 はオンライン開催となった。開催時期は、新規タームへの延長申請

や新規 OA の入札の準備を踏まえて、2 月最終週～3 月初旬で開催することが有力となった。

2.3.3 第 21 回執行委員会（ExCo21）

- 日程：2021 年 3 月 16 日～18 日
- 場所：Web 開催
- 主な議論：
  - ISGAN 加盟国数は EU を含む 26 カ国。前回 ExCo で加盟国となったブラジルは、最終手続きが済んでおらず、現時点ではオブザーバーの位置づけとのことであった。
  - 予算レビューグループより、2020 年度の収支状況と 2021 年度及び 2022 年度の予算額が報告された。2020 年度までの拠出金未払いの国のうち未返信のメキシコ、南ア対しては、最終警告レターを発出し、回答がない場合に inactive state にする方向となった。2021 年度と 2022 年度の予算額は、それぞれ 27.4 万€、30.8 万€で承認された。
  - 予算レビューグループリーダーの選出に関しては、今次会合までに立候補者は出なかったが、カナダが引き続きリードする意向を示した。今後はカナダより申請書を提出し、加盟国には書面投票が行われる予定となった。
  - 新規共同事務局の公募については、4 社より応募があり、AIT が落札した。これによって AIT が 2021 年 6 月より 2 年間共同事務局を継続することが承認された。
  - 副議長のアメリカより、延長申請チームの進捗報告が行われた。申請に必要なドキュメントは、①質問書（AIT 準備）②ターム終了報告書（過去 5 年間の振り返り。5 枚程度。幹部と共同事務局で準備）③戦略計画（今後 5 年間の活動計画。延長申請チームで準備）となる。今次会合においては、③作成のための要素（Mission Model Canvas）が協議された。今後の予定は、Mission Model Canvas を基に 4 月初旬に③のドラフトを作成し、4 月末から 5 月初めにかけて①-③の書面手続きを行う。その上で 5 月中に EUWP（IEA End Use Working Party）への正式申請を行う。
  - 今次会合より、1 月に正式発足した Annex9: Flexibility markets の進捗報告が行われた。2021 年度の活動計画として、①Flexibility characteristics（カナダリードで Flexibility の特徴理解）②Interoperable Markets（イギリスリードで電力市場の比較、TSO/DSO コーディネーション、データ標準化や通信規格に関する調査）③Consumer Focused Flexibility（スウェーデンリードでスマーメーター、アグリゲーター、ダイナミックプライシング等の調査）④他の Annex とのコラボを実施することが報告された。
  - ExCo22 とは別に 6 月頃に 1 日の非公式 ExCo を行う方向となった。本会合は延長申請の準備に特化したもので、Annex の報告等は行わない。
  - ExCo22 は、10 月中旬（10 月 12 日-14 日が有力）にウェブ開催する方向となった。

2.4 APEC EGNRET

2.4.1 第 54 回会合

- 日程：2020 年 11 月 10 日～11 日
- 場所：オンライン開催
- 概要
  - EGEDA（Expert Group Energy Data Analysis）から APEC エネルギーデータの整備状況について、EGEEC（Expert Group on Energy Efficiency and Conservation）から直近の EGEEC の活動と APEC のエネルギー効率改善の動向について、APERC（Asia Pacific Energy Research Centre）から APEC Energy Outlook に基づく APEC 地域の再エネ導入動向と諸課題と脱炭素に向けた水素の役割について、APSEC（APEC Sustainable Energy Center）から 2020 年 9 月に開催された Workshop on Energy Transition and Scaling up Renewable Energy についてそれぞれ報告がなされた。
  - EGNRET プロジェクトの現状と進捗について、EGNRET 資金によるプロジェクト 1 件、提案中のプロジェクト 5 件、実施中のプロジェクト 10 件について説明がなされ、COVID-19 の影響で多くのプロジェクトが延期になっており、前回会合から終了したものはないとの報告があった。
  - 再エネ目標達成のためのロードマップに関して、EGNRET 事務局から状況の説明があり、再エネ 2 倍目標の達成に向けて必要な取り組みは何か、どのような国家間の活動に注力するべきか、COVID-19 は APEC 地域における再エネの導入に影響したか、再エネ導入目標に影響はあったかについて議論が行われた。この中で、日米韓が 2050 年ネットゼロを、そして中国が 2060 年ネットゼロを宣言したことについて特に関心が集まり、APEC のエネルギー消費の 73%を占めるこれら 4 か国の脱炭素表明は好機であり、各国の再エネ導入の進捗状況を共有することで相互に学ぶことができること、再エネ導入を加速化するベストプラクティスを示すことにおいて EGNRET の役割への期待が共有された。
  - APEC 事務局からの APEC プロジェクト全般についての説明の後、現在進行中の EGNRET プロジェクトに関してそれぞれのリード国から報告がなされ、COVID-19 による活動遅延への対応について議論があった。続いて、COVID-19 による再エネ市場への影響について各国から報告があり、適宜質疑応答が行われた。
  - 次回 EGNRET 会合については、中華台北のホストにより開催され、EGEEC と共同開催となる予定である旨事務局から報告があった。
  - 2021－22 年の EGNRET 議長として Tom. H. T. Lee 氏（中華台北）が、同副議長に Ms Munlika Sompranon 氏（タイ）がそれぞれ満場一致で再選出された。

巻末付録１：マルチ枠組が発刊するレポート等の要約

（省エネ編）

IEA Global EV Outlook2020 の要約

1. Global EV Outlook 2020 – Entering the decade of electric drive?

（2020 年 7 月発刊）

[https://webstore.iea.org/global-ev-outlook-2020] からダウンロード可能

- 本報告書は電気自動車の導入に関する世界の潮流ならびに技術課題やコスト動向及び将来見通しを提示するものである。以下に本報告書の要点をまとめる。

電気自動車市場の現状

- 世界の乗用自動車における電気自動車ストック（Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV), Battery Electric Vehicle(BEV)を含む）は、2019 年で 7.2 百万台に達している。 9 カ国で百万台以上の電気自動車を有しており、全体としては、中国、欧州、米国に集中している。

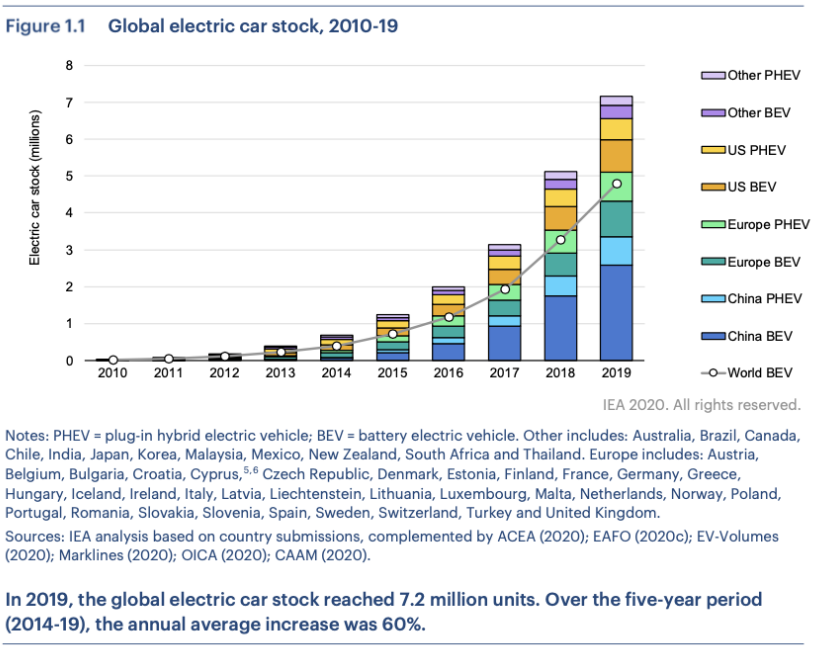
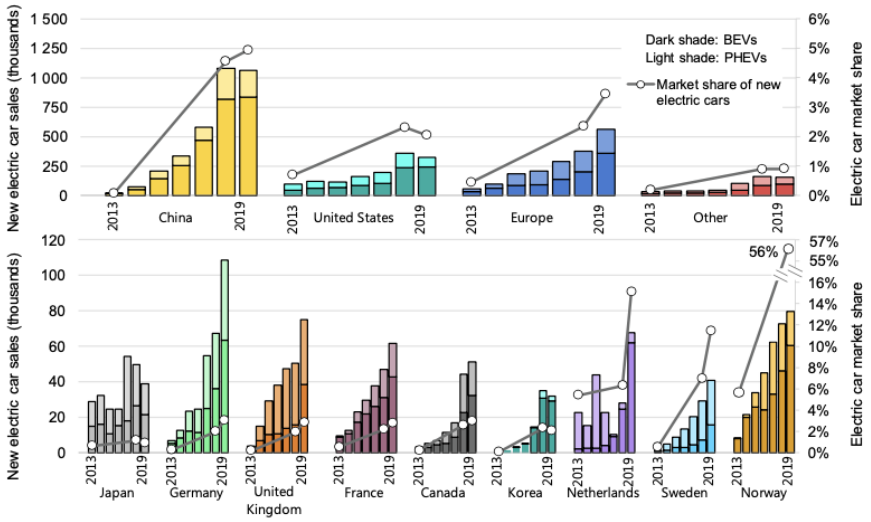


図 1.1：乗用車における電気自動車のストック台数の推移（2010–2019）

- 助成措置が初期段階の EV 普及拡大を支えてきたが、近年ではカリフォルニアの ZEV 規制や中国の NEV 等、目標と規制での導入を促す方向にシフトしている。2019 年において、米国の ZEV 規制や中国の NEV、そして欧州の CO2 排出規制が実施される国・地域が世界の自動車市場の 60%を網羅しており、17 カ国で 2050 年に向けた 100%ZEV 目標と内燃機関自動車のフェーズアウトが発表されている。
- 大幅な拡大を見せる EV 販売であるが、全ストックに占める割合としては 1%以下にとどまる。自動車の電動化は多くの市場における大型車や燃費の悪い自動車の販売拡大と並行して進展している。

Figure 1.2 Passenger electric car sales and market share in selected countries and regions, 2013-19



IEA 2020. All rights reserved.

Note: Regions and countries in this figure represent the largest electric vehicle markets and are ordered by size of their conventional car market.

Sources: IEA analysis based on country submissions, complemented by ACEA (2020); EAFO (2020c); EV-Volumes (2020); Marklines (2020); OICA (2020); CAAM (2020).

図 1.2：電気自動車の販売台数 と市場シェア（トップ 10 位、2013-2019）

- 2019 年の世界の乗用車における電気自動車のストックにおいて、47%は中国に存在し、ストック台数としては、3.4 百万台を記録した。欧州では、世界の 25%を占める 1.7 百万台に上り、米国は 20%を占める 1.5 百万台に上る。
- ノルウエーが電気自動車シェアの世界のリーダーであり、同割合は 19%を占める。これにアイスランドが続く(4.4%)。
- 世界の電気自動車販売台数は、2019 年に 2 百万台を記録した。販売においても中国が最大で世界の 50%を占める。これに欧州、米国が続く。

- 2019 年の世界的 BEV（純電動車）の販売は 2018 年と比較して 14%増加した、一方で PHEV の販売は 10%減となった。
- 世界的に補助金の支給が電気自動車の販売拡大を支えてきたが、2019 年には中国での電気自動車に対する補助金は、ほぼ半分にカットされ 2019 年後半には一旦補助金支給の停止がアナウンスされた。一方で、COVID-19 の景気対策として、中国では 2022 年まで補助金を継続的に支給することが決定した。
- 米国では、税控除に関わる段階的な廃止が法制度化されている。具体的には、200,000 台以上電気自動車を販売するメーカーに対する税控除停止が適用されることが 2019 年に決定した。Tesla や General Motor がこれに相当する。

電動バスの現状

- 電動バスの販売は、2016 年に急拡大して以降、減少している。2019 年の販売台数は 75,000 台であったのは 2018 年と比較して 20%減となっている。世界でのストックとして、513,000 台存在する。
- 2019 年の販売台数のうち、95%が中国におけるものである。一方で 2018 年との比較では補助金の減少により 20%減となっている。
- インドでは、FAME II プログラムによる助成措置のため、電動バスの販売は拡大している。コルカタやムンバイ、Pune、ベンガロールといったとして電動バスが運用されている。
- 南アメリカは電動バスが拡大する市場の一つであり、2019 年の販売台数は 2018 年と比較して 3.5 倍の 450 台に達している。チリのサンティアゴでは同地域における電動バスの台数が 400 台に至っており、最大である。

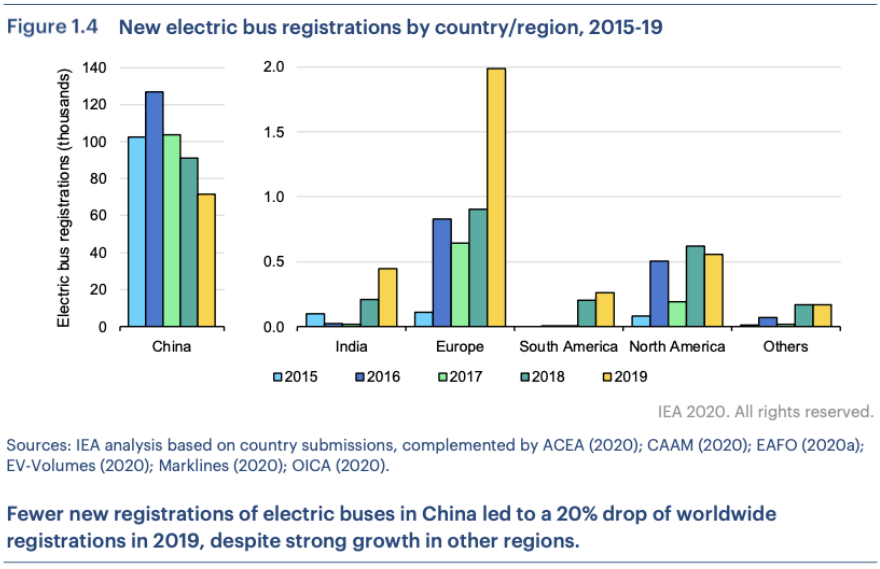


図 1.4：電動バスの販売（国・地域、2015-2019）

電動トラックの現状

- 2015 年に中国の中央政府が補助金支給を開始し、重量上限を廃止して以降、中国での電動トラックの販売が大幅に拡大した。2019 年には、1000 年良い大幅に販売台数が中国において拡大している。
- 欧州や米国での電動トラックの導入は限定的である。主に、デモンストレーションや、トライアルとしての活用に限られる場合が多い。
- 多くの場合、電動トラックは都市での活用に限定され、配達車両やゴミ収集車としての活用、または公共的な目的に資する利用が多い。電動トラックは、夜間に利用される場合が多いため、昼間にバス等の充電設備を活用できる。

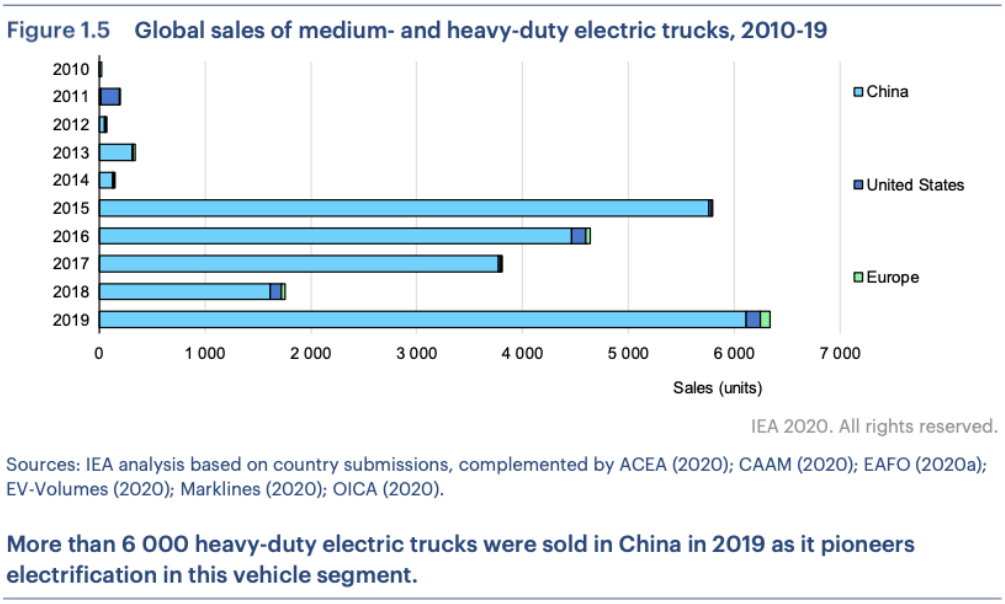
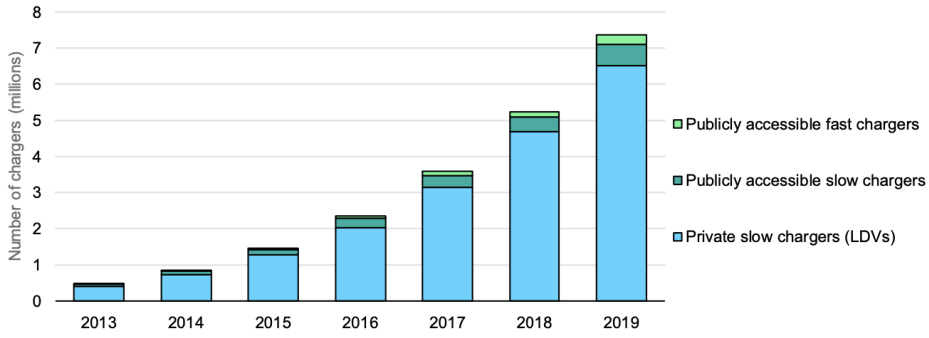


図 1.5：中型、大型電動トラックの販売（国・地域、2010–2019）

充電設備

- 2019 年の末までに 7.3 百万台の電気自動車用充電設備が世界で設置されており、そのうち 6.5 百万台が乗用車用の低速充電設備であった。充電設備のストック台数は、2018 年と比較して、40%増加した。
- 国別では、世界における民間所有の低速充電のうち 37%を中国が占め、これに米国の 24%が続く。公共設備として低速の充電設備のうち、50%を中国が占める。また、急速充電設備の 81%が中国に設置されている。

Figure 1.7 Global stock of electric LDV chargers, 2013-19



IEA 2020. All rights reserved.

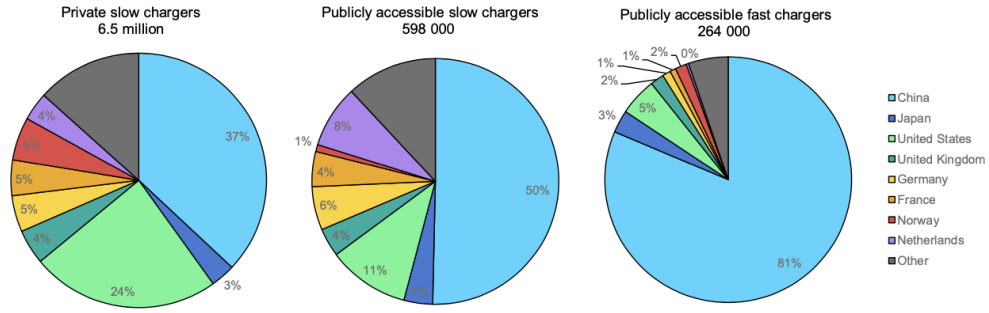
Notes: Private chargers include electric vehicle supply equipment (EVSE)[56] charging via both dedicated circuits and non-dedicated charge points.[57] Estimates for private chargers assume that each electric car is serviced by 1.1 private chargers on average (level 1 or level 2, either at home or workplace). These account for the majority of EV charging in all countries except China and Japan.[58] The estimates for China and Japan are lower (EVs are being deployed in dense urban areas), at 0.7 chargers per EV for 2019. This is based on a sample survey of 30% of electric car owners conducted by the China Power Consortium and China Electric Vehicle Charger Infrastructure Promotion Alliance (Chinabaogao, 2019; EVCIPA, 2020). The survey estimates that 70% of EV owners have access to at least one private charger at home and/or workplace, and this fraction is assumed to be representative of the population. For years prior to 2018, a ratio of 0.8 chargers per EV is used for China and Japan, in line with analysis conducted in *Global EV Outlook 2018 (IEA, 2018b)* and *Global EV Outlook 2019* (IEA, 2019b).

Sources: IEA analysis based on EVI country submissions, complemented by AFDC (2020b); Chinabaogao (2019); EAFO (2020a); ECF (2018); Engel (2018); EV-Volumes (2020); Mathieu (2018); Nicholas (2019); T&E (2020); ZapMap (2019).

LDV chargers topped 7 million in 2019 and the vast majority are private chargers.

図 1.7：世界の乗用車向け電気自動車の充電設備ストックの推移（2013–2019）

Figure 1.8 Private and publicly accessible chargers by country, 2019



IEA 2020. All rights reserved.

Sources: IEA analysis based on country submissions, complemented by Chinabaogao (2019) and (EAFO, 2020a).

The vast majority of electric light-duty vehicle chargers are private chargers. China accounts for 80% of publicly accessible fast chargers compared to 47% of the world's electric light-duty vehicle stock.

図 1.8：国別アクセス可能な充電設備の割合（2010–2019）

電気自動車普及に向けた政策

- 電気自動車の普及は政策が主導してきた。具体的には、公共調達や助成措置、その他燃費規制等の規制措置が実施された経緯がある。ここでは、2019 年の主要な電動化に向けた政策と、2020 年初期の政策をまとめる。

中国

- 中国では New Energy Vehicle (NEV)規制を導入、2019 年に 10%の新エネルギー車の製造・販売を義務付ける目標を設定していたが、2025 年には当初の 15-20%の目標から 25%に引き上げることを検討している。国レベルでは、助成措置の付与から規制に制度が変遷している。NEV 規制においては、製造事業者が新エネルギー車を販売または輸入するか、あるいは目標を超過達成した事業者からクレジットを購入することになる。
- NEV クレジットでは、2021-2023 年の間に 14%, 16%, 18%とする目標を設定している。NEV クレジット制度では、以下の通り技術別に得られるクレジットが異なり、2021 年以降は、純電動車よりもプラグインハイブリッド自動車、並びに燃料電池自動車へ傾斜し高いポイントがつけられることになっている。
-

表 2.3：NEV プログラムにおける自動車技術別のクレジット取得ポイント

Table 2.3 Range of credits per vehicle type and targets in China's NEV programme

	Range of credits per vehicle			NEV credit targets
Year	BEV	PHEV	FCEV	
Until 2020	1-5	2	1-5	2019: 10% 2020: 12%
From 2021	1-3.4	1.6	1-6	2021: 14% 2022: 16% 2023: 18%

Notes: Before 2020, the number of NEV credits was calculated as: i) BEV - (0.012 x electric range + 0.8) x efficiency adjustment factor; ii) PHEV - 2x efficiency adjustment factor; iii) FCEV - 0.16 x FCEV system rated power x efficiency adjustment factor. The efficiency adjustment factor depends on the vehicle energy consumption (kilowatt-hours [kWh] per 100 km) relative to its kerb mass (in kilogrammes). For further details about the adjustment factors before 2020 see ICCT (2018). After 2021, the number of credits per vehicle will be determined as: i) BEVs - (0.006 x electric range + 0.4) x efficiency adjustment factor; ii) PHEVs - 1.6 x efficiency adjustment factor; iii) FCEVs - (0.08 x FCEV system rated power x efficiency adjustment factor). For BEVs and PHEVs, after 2021 the threshold of the vehicle's efficiency to get an efficiency adjustment factor above 1 will be tightened.

Sources: MIIT (2017); IEA (2018b); MIIT (2019b).

- NEV 規制以外に国家電気自動車補助プログラムを実施している。具体的には、走行距離や 100km あたりのエネルギー効率（kWh/100km）、バッテリーのエネルギー密度

（Wh/kg）に応じて補助金が決定される。なお、2019 年同補助プログラムが改定されており航続距離が 250 km 以上の BEV/PHE へ補助を付す（従前は 150km）ことになっている。また、本助成措置が 2020 年末に廃止となる予定であったが、COVID-19 の景気対策として、2022 年までに延長された。

欧州

- 2019 年 4 月に乗用車と商用車の CO_2 排出基準の改定が採択された。その中で、新車において 2020 年に乗用車の 95gCO_2/km、商用車の 147gCO_2/km とする目標から追加的な改善割合を設定するものである。具体的には、2021 年をベースとして、30 年までに km あたりの CO_2 排出量を乗用車で 37.5%改善、商用車で 31%改善させるとしている。
- 2019 年に EU では、Heavy duty 車に対する CO2 パフォーマンス基準を導入した。これは、大型トラックに適用され、現在欧州で運航している車両の 65-70%の CO2 排出が適用対象となる。平均して、これらのトラックは、2025 年までに 15%燃費改善が必要であり、2030 年までには 30%の燃費改善を必要としている。
- Clean Vehicle 指令が 2019 年には改定された。これにより、電気自動車の導入促進に向けた乗用車やトラック・バスについての最低公共調達義務水準が設定された。

インド

- インド政府は 2030 年までにすべての新車販売を電動化するとの目標を形成した。しかし、実現性や裾野産業への影響を考慮し、2018 年 2 月には同目標を改定、2030 年の新車販売台数に占める割合を 30%とするとしている。
- インドでは、FAME (Faster Adoption and Manufacturing of (Hybrid and) Electric Vehicles) というスキームを活用し、補助金が支給されている。その他、中央政府の税控除、地方政府のインセンティブ等が提供されている。
- 第二フェーズに当たる FAME II では、電動バス、二輪・三輪の電動車、PHEV と HEV が対象とされており、中でも最大のインセンティブがバス(41%)に充当されている。結果として、2019 年の末には、5,595 台の電動バスが導入された。特に Kolkata, Nagpur, Delhi といった大都市で電動バスが購入されている。

米国

- EPA は前政権の基準は厳格すぎるとして、2021－2026 年に販売される新車の GHG 排出基準を下方修正する提案を行った。同連邦政府提案により、自動車メーカーや州政策担当者、法的機関等さまざまな交渉が行われた。すなわち、自動車の厳格な GHG 排出基準を形成しているカリフォルニアが現行制度を継続するとしている中、これを踏襲するすべきかについて、カリフォルニアを含む１４州において、連邦政府と法廷闘

争が行われたのである。

各国での EV 拡大に向けた助成措置

- 以下の通り、EV 導入拡大に向け各国で様々な助成措置が提供されている。

表 2.2：主要国における EV 導入に向けた助成措置のまとめ

Table 2.2 National electric car purchase incentives in selected countries

Country	Purchase subsidy	Tax reduction	Comments
Austria	EUR 1 500 (USD 1 700) (BEV, FCEV) EUR 750 (USD 850) (PHEV)		Electric range to be >50 km. For cars with maximum retail price of EUR 50 000 (USD 56 000). Diesel powered PHEVs excluded.
Belgium	EUR 2 000 - 4 000 (USD 2 300 - 4 500)		Four rebate levels, depending on retail price. In Flanders region, EV purchase incentives were abolished in January 2020.
Canada	CAD 5 000 (USD 3 700)* (BEV, FCEV, PHEV**)		* For cars with maximum retail price under CAD 45 000-60 000 (USD 33 600-44 800) (depending on car type). ** PHEV with battery capacity > 15 kWh.
China	CNY 16 200 (USD 2 300) (BEV*) CNY 22 500 (USD 3 200) (BEV**) CNY 8 500 (1 200) (PHEV***)	Exemption of purchase tax (10%).	Maximum retail price CNY 300 000 (USD 42 400). Depending on electric range * If 300 km ≤ range <400 km. ** If range ≥400 km. *** If range ≥50 km.
France	EUR 6 000 (USD 6 800)* / 3 000 (USD 3 400)** (BEV, FCEV and PHEV < 20 gCO_2/km)	No registration tax in many sub-national regions.	* Maximum retail price EUR 45 000 (USD 50 800), ** EUR 60 000 (USD 67 800) (not applying to FCEV). Subsidy can be increased if an old car is scrapped (depending on revenues).
Germany	EUR 6 000 (USD 6 800)* / 5 000 (USD 5 600)** (BEV)		* Maximum retail price EUR 40 000 (USD 45 200).

Country	Purchase subsidy	Tax reduction	Comments
	EUR 4 500 (USD 5 100)* / 3 750 (USD 4 230)** (PHEV)		** Retail price between EUR 40 000 (USD 45 200) and 65 000 (USD 73 400).
India	INR 10 000 (USD 130) / kWh* Capped to INR 300 000 (USD 4 000)	Income tax deduction of INR 150 000 (USD 2 000) on interest paid on electric vehicle loans.	* For PHEV and BEV, with a cap of 20% of vehicle retail price and for cars with retail price < INR 1 500 000 (USD 19 900).
Italy	0-20 gCO_2/km: EUR 6 000 (USD 6 800)* / 4 000 (USD 4 500)** 21-70 gCO_2/km: EUR 2 500* (USD 2 800) / 1 500 (USD 1 700)**	BEV exempt from annual ownership tax during five years after registration.	* When scrapping an old car (Euro 1-4 generations) at the same time as buying the EV. ** Without scrapping an old car.
Japan	Up to JPY 200 000 (USD 1 800) (PHEV*) Up to JPY 400 000 (USD 3 700) (BEV**) Up to JPY 2 250 000 (USD 20 800) (FCEV)	No purchase and weight taxes.	* Depending on electric range: JPY 200 000 (USD 1 800) if range > 40 km. ** Depending on range: JPY 400 000 (USD 3 700) if range > 400 km.
Korea	KRW 8 000 000 (USD 6 700) (BEV) KRW 22 500 000 (USD 18 800) (FCEV)		
Netherlands	Purchase subsidy under preparation (likely to apply in July 2020).	Several tax exemptions and reductions.*	* Since 2018, taxes on ZEV purchase increase progressively and will reach standard levels in 2026.
Norway	No purchase subsidy	BEV exempt from VAT (25%) and three purchase taxes.*	* Weight-, CO_2- and NOx-based taxes.
Portugal	EUR 3 000 (USD 3 400)		Maximum retail price EUR 62 500 (USD 70 600).

Country	Purchase subsidy	Tax reduction	Comments
Spain	EUR 1 300 - 5 500 (USD 1 500 - 6 200)* (PHEV and BEV)		* Depending on electric range: EUR 5 500 (USD 6 200) > 72 km. Only applicable if retail price < EUR 40 000 (USD 45 200).
Sweden	SEK 60 000 (USD 6 500)* (BEV and FCEV)		* Payable after six months of ownership. Capped at 25% of retail price.
United Kingdom	Up to GBP 3 000 (USD 3 800)* (BEV and PHEV**)		* Capped at 35% of retail price. Only for cars < GBP 50 000 (USD 63 600). ** If < 50 gCO_2/km and electric range >112 km.
United States		Tax credit up to USD 7 500 (PHEV and BEV)*	* Depending on battery capacity (min. 5 kWh). Gradual phase out for each manufacturer after it has sold 200 000 cars.

バッテリーのリユース・リサイクル

- EV バッテリーの材料として、代替が効かない物質へ依存することを考慮し、廃棄物を効果的に管理することは重要である。一般的に指摘されるのは、Reduce, Reuse, Recycle, Recover, Treat and Disposal という順を追った対応が求められる。固体廃棄物を持続可能な形で管理するためにこうしたカスケードアプローチに則ることは重要である。
- ユーズドのバッテリーを管理する戦略として、価値を維持することで資源の無駄遣いを減らすことができる。
- 初期容量の 70-80%を維持するリチウムイオンバッテリーは、定置型電池として活用が可能であり、ピーク需要節減や風力・太陽光といった変動型再エネのバランスにも活用が可能である。こうした EV バッテリーの定置型電池としての再利用は、電池の状況に応じて、5-15 年活用が可能である。

バッテリーのリユース・リサイクルの課題

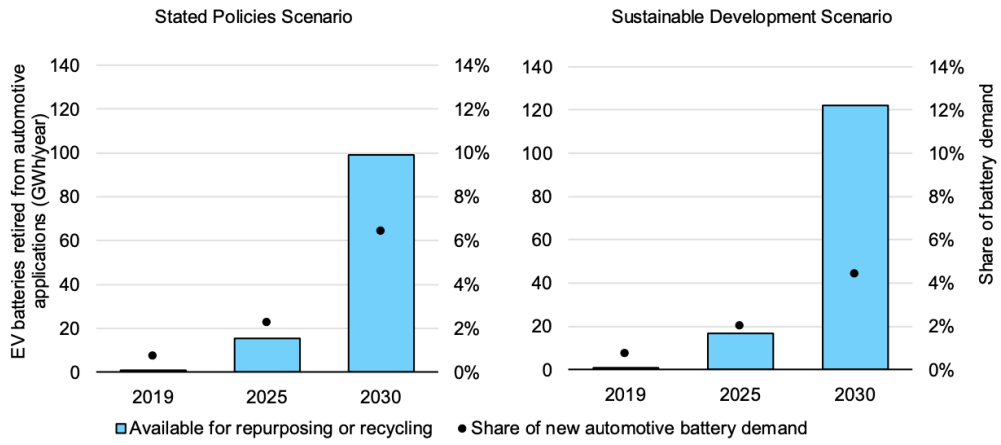
- バッテリーのリユース・リサイクルに関わる課題として、技術と費用が挙げられる。新製品のコストが低減し、パフォーマンスが改善される中で、リユース製品の競争力をどのように維持するかが課題である。
- 中古のバッテリーリユースに向けては、何段階ものステップを踏んで定置型電池に変えることになるがこれは費用がかかり、時間をも要する。こうしたコストは、$25-49/kWh に上るとの指摘もある。
- バッテリー管理の観点からは、バッテリーの状態に関するデータが不足していること

や、国によっては危険物という扱いになるため、輸送費用が高く輸出入が困難である。

バッテリーのリユース・リサイクル可能な容量

- Stated Policies Scenario では、2030 年までに 100 GWh のバッテリーがリユース・リサイクル向けに利用可能となる。これは、2019 年における乗用車用のバッテリー生産量と同じ水準である。また、Sustainable Development Scenario では、2030 年で 120 GWh のバッテリーがリユース・リサイクル向けに利用可能となる。

Figure 4.3 Automotive battery capacity available for repurposing or recycling, 2019-30



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Batteries for LDVs are assumed to have the same lifetime as the vehicle, while for heavy-duty vehicles, an average of
1.5 batteries per vehicle lifetime is assumed. Vehicle lifetimes vary according to region and are taken from the IEA Mobility Model (IEA, 2020). LDVs have lifetimes of roughly 15 years, HDVs around 20 years and two-wheelers about 8 years. Vehicle lifetimes are assumed to follow a normal distribution around the average lifetime.

Spent battery availability in 2030 is projected to be comparable to current production volumes.

図 4.3： 2019-2030 年における自動車用バッテリーのリユースまたはリサイクル可能な容量

バッテリーのリユース用途

- バッテリーのリユース用途として、ピークシェービング、周波数調整、そして再エネとの統合による電力システムの最適化が挙げられる。

表 4.1： リユースバッテリーを採用したプロジェクトの例

Table 4.1 Examples of storage projects using second-life EV batteries

Service	Lead entities	System description	Size
Peak shaving	University of California Davis Micro Grid; RePurpose Energy, California Energy Commission; Nissan.	System built from used Nissan Leaf packs charges from a photovoltaic array, then discharges on a constant cycle from 16h00-20h00.	287 kWh
Increased consumption of onsite renewables	City of Kempten pilot; Energy Local Storage Advanced System; Allgäuer Überlandwerk GmbH (regional utility).	Excess energy produced by onsite solar is stored in repurposed Renault Kangoo batteries, then discharged when demand is higher than supply.	95 kWh
Frequency regulation	City of Lunen pilot; Daimler Mobility House.	In collaboration with the local utility, 1 920 used modules are assembled at a retired coal plant to supply balancing power to the grid.	9.8 MWh
Telecom tower (backup)	China Tower'; BYD; Guoxuan High Tech; YinLong New Energy.	China Tower plans to replace lead-acid with used EV batteries to provide backup power for telecom towers (they operate close to 2 million across China).	30 kWh per tower; 54 GWh potential

Sources: Mobility House (2018), Jiao (2018), UC Davis RMI Winery Microgrid Project (n.d.), ELSA (n.d.).

リチウムイオンバッテリーのリサイクル

- 現状では素材価格が低く、リサイクルできる EV バッテリーの容量が限定的であることから、リサイクルの経済的な実行可能性は限定的である。しかしながら、将来的には素材価格の高騰が見通されるところ、リサイクルに向けた助成措置や制度形成は重要である。
- 以下の通り、商業ベース並びに実証事業としてリチウムイオン電池のリサイクルの事例が挙げられる。

表 4.2： リチウムイオン電池のリサイクル施設の例

Table 4.2 Examples of current lithium-ion battery recycling facilities

Company	TRL level	Country	Technology	Capacity (tonnes)
Akkuser Oy	Commercial	Finland	Mechanical	1 000
Fortum	Commercial	Finland	Mechanical, thermal treatment and hydro	
Umicore	Commercial	Belgium	Pyro and Hydro	7 000
Lithion	Commercial	Canada	Mechanical	2 500
Li-cycle	Pilot	Canada	Mechanical	7 500
Retriev Technologies	Pilot	United States	Mechanical	4 500
Accurec	Commercial	Germany	Mechanical and thermal Treatment	2 500
Valdi	Commercial	France	Mechanical and hydro	20 000[18]
GEM High-Tech	Commercial	China	Mechanical and hydro	10 000
Brunp	Commercial	China	Mechanical and hydro	25 000 - 30 000
JX Nippon Mining and Metals	Commercial	Japan	Pyro and hydro	5 000
NorthVolt	Pilot	Sweden	Mechanical and hydro	

Sources: Pinegar and Smith (2019); Eduljee et al. (2020).

リチウムイオン電池のリユース・リサイクル政策

- 欧州委員会はバッテリーに関する EU 法の改正を 2020 年 12 月に提案した。主な内容は（1）ラベリングによるカーボンフットプリント情報の提示、(2）中古バッテリーの回収目標と義務、(3）コバルトやリチウム等の希少金属のリサイクル率表示、並びに（4）耐用年数の表示である。また本改訂案では、バッテリーの回収時期を把握し、リユース・リサイクルする体制を構築する目的で、「Battery Passport」としてオンラインでバッテリーのライフサイクルを把握するメカニズムを導入するとしている。
- 中国はすでに EV バッテリーの製造、販売、使用、リサイクルを追求できる情報をオンライン上に提示し、事業者・消費者がアクセスできる仕組みを形成している。
- カリフォルニア州は、2022 年までに EV バッテリーを 100%リユースする目標を設定

している。

表 4.3： リチウムイオン電池のリユース・リサイクル政策

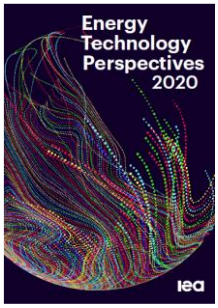
Table 4.3 Lithium-ion batteries end-of-life policies, 2019

Region	Policy	Year	Description	Developed for Li-ion batteries[22]
European Union	Battery Directive	2006	Extended producer responsibility. Requires 50% recycling of Li-ion batteries by weight.	No
China	Interim Measures for the Management of Recycling and Utilisation of Power Batteries of New Energy Vehicles	2018	Extended producer responsibility. Implements labelling, a traceability system and encourages standardisation of the design and production.	Yes
China	Guide for Collecting and Storing Li-ion batteries	2019	Ministry of Industry and Information Technology has released a guide for collecting and storing Li-ion batteries, along with a draft mandate on the testing of batteries that will be used in second-life applications.	Yes
California	California Assembly Bill No. 2832	2018	Establishment of a Lithium-Ion Car Battery Recycling Advisory Group to advise policies for the end-of-life to achieve as close to 100% of reuse and recycling as possible.	Yes
United States	New York State Rechargeable Battery Recycling Act. Minnesota Rechargeable Batteries and Products Statute. New Jersey statutes: sale of certain batteries dependent on battery management plan	2010; 1991; 1991	Extended producer responsibility. Ban on the disposal in landfills.	New York: Yes Minnesota: Yes New Jersey: No

以上。

Energy Technology Perspectives 2020

（2020 年 9 月発刊）



[https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020]からダウンロード可能

- 本報告書は世界がネットゼロエミッション(実質排出ゼロ)の目標を達成するために必要なクリーンエネルギー技術に関する分析とアドバイスを提示するものである。以下に本報告書の要点をまとめる。

エグゼクティブサマリー

エネルギーと気候変動目標の達成には、クリーンエネルギー技術の大幅な拡大を要する

- 2020 年の COVID-19 の影響により一時的に世界の CO_2 排出量は減少するが、エネルギーシステムの構造的な変化なしにこの減少傾向は継続しない。
- ネットゼロ排出の達成にはエネルギーの供給、転換そして消費段階において革新的な変革が必要である。これには、風力、太陽光、電気自動車と言った既に大幅に普及拡大する技術以外に水素や炭素吸収といった様々な技術の適用が求められる。IEA の持続可能な発展シナリオではこうしたエネルギー技術・インフラ以外に行動変容も考慮している。
- 本報告書では、800 の技術を分析し、2050 年までに世界がネットゼロ排出を達成するまでに何が必要かを分析している。持続可能な発展シナリオに加え、Faster Innovation ケースを設定し、クリーンエネルギー転換に向けた課題と機会を分析している。

発電部門の転換は、世界のネットゼロ排出に向けた 1/3 の道筋を充足する

- ネットゼロ排出への最大の貢献は電化することであり、これには自動車の電動化や、産業部門での熱供給、そして民生部門での熱供給やその他機器の電化が必要である。
- 2050 年のネットゼロ排出達成には、急速な低炭素発電技術の開発が必要である。Faster Innovation ケースでは、2050 年の発電電力量は現在の 2.5 倍になり、これは 3 年ごとに現在の米国の発電量を追加することを意味する。ネットゼロ達成に向けた再エネ容量は、2019 年に記録された水準の 4 倍を毎年設置することになる。

電力のみでは脱炭素化は不可能である

- CCUS はネットゼロ排出達成においての貢献が大きく、持続可能な発展シナリオでは、CCUS は合成燃料の生産や DAC として適用される見通しである。低炭素水素の製造においても CCUS は特に天然ガス資源を有する地域において重要である。
- 現在は石油、石炭、天然ガスがエネルギー源の 70%を占めているが、2050 年の持続可能な発展シナリオでは電力、水素、合成燃料、バイオ燃料が同様の割合を占め、エネルギーセキュリティに貢献をする。

将来に必要なクリーンエネルギー技術は今日の開発にかかっている

- 電化と水素、バイオエネルギー、そして CCUS のネットゼロに向けた進展はイノベーションをいかに急速に行うか、にかかっている。持続的な開発シナリオの 1/3 以上の技術は、現在商業化しておらず、Faster Innovation ケースでは、これが 1/2 に拡大する。Faster Innovation ケースでは、持続的な開発シナリオと比較して追加的な低炭素技術の導入を要するが、その 55%が電化、そして 25%が CCUS、20%がバイオエネルギー、そして残りの 5%が水素由来となる。
- 長距離輸送や重工業での低炭素化は最も難しい。省エネ技術や輸送需要の回避等は長距離輸送の低炭素化において重要であるが、持続可能な開発シナリオでの排出削減において 60%は現在デモンストレーション段階にある水素や CCUS 等を活用したものになる。重工業においても同様である。

既存施設からの排出量は極めて重要な課題を提示する

- 発電部門と重工業の既存施設からの排出量は全体の 60%を占める。何の対策も実施されない場合には、この割合が 100%に及ぶ。すなわち、長期に亘って残り続ける施設の排出量をいかに削減するかが重要である。特にアジアにおいて、新設の設備は今後何十年にも及ぶ運用が予見されるため、これらの低炭素化が大きな課題である。

政府の役割は極めて重要である

- 市場の役割は資金を運用させ、イノベーションを促進する上で肝要であるが、政府の役割はそれ以上に重要である。特に以下の対応が求められる。
  - 既存施設からの排出への対応
  - 初期導入段階の技術の市場参入を促進
  - インフラの更新
  - 研究開発への支援
  - 国際技術協力の拡大

・　クリーンエネルギー技術-役割の現状

クリーンエネルギーの必要性

- クリーンエネルギー技術の必要性はかつてないほど重要になっている。
- 温室効果ガスの人為的排出によって引き起こされる気候変動は、人類が直面する最も困難な課題の 1 つである。
- 必要なことは、必要なエネルギーサービスを提供する場合に、温室効果ガスを排出したり、大気(または土地や水)を汚染したりしないクリーンエネルギー技術への持続的かつ完全な移行である。

気候危機との闘い

- 気候科学者は、人為的温室効果ガスの発生により、平均気温の上昇や海面の上昇をもたらしていると考えている。その結果、産業革命以前よりも気温が 1 度上昇し海面は 20cm 上昇している。
- 国際的な取り組みを進める UNFCCC では、2016 年のパリ合意において、気温の上昇を 2 度以下に抑え、できる限り早く排出の減少に転じることを目指している。また今世紀後半でのネットゼロ排出を掲げている。
- 各国の対策は NDC として提出され、目標の達成に向けて、その実効性が不可欠である。

大気浄化

- クリーンエネルギー技術の貢献は、気候変動のみではなく、大気汚染対策としても有効である。

エネルギー安全保障の強化

- 供給側での再生可能エネルギーによる脱炭素化は、エネルギー安全保障の強化につながる。電源の再生可能エネルギー化により、電力システムの柔軟性を実現するための技術が求められている。

エネルギーと排出の動向とその要因

- エネルギーシステムの転換には時間を要する。技術開発も原子力、ガスタービン、風力発電、太陽光発電と進められてきているが、再生可能エネルギーによる化石燃料の使用からの排出量の増加を抑え込むのには十分な状況には至っていない。

世界のエネルギー動向

繁栄とエネルギー利用との間にある相関

- エネルギーは経済発展に寄与し、世界のエネルギー使用量、GDP、人口のすべては 19 世紀の初めから急激に増加している。
- 一次エネルギー、GDP、人口は図 1.1 に示す通り、増加してきているが、GDP 原単位は改善してきている。エネルギー需要はこれまでは GDP 成長と人口増加に同期しており、1950 年から 7 倍に増加している。

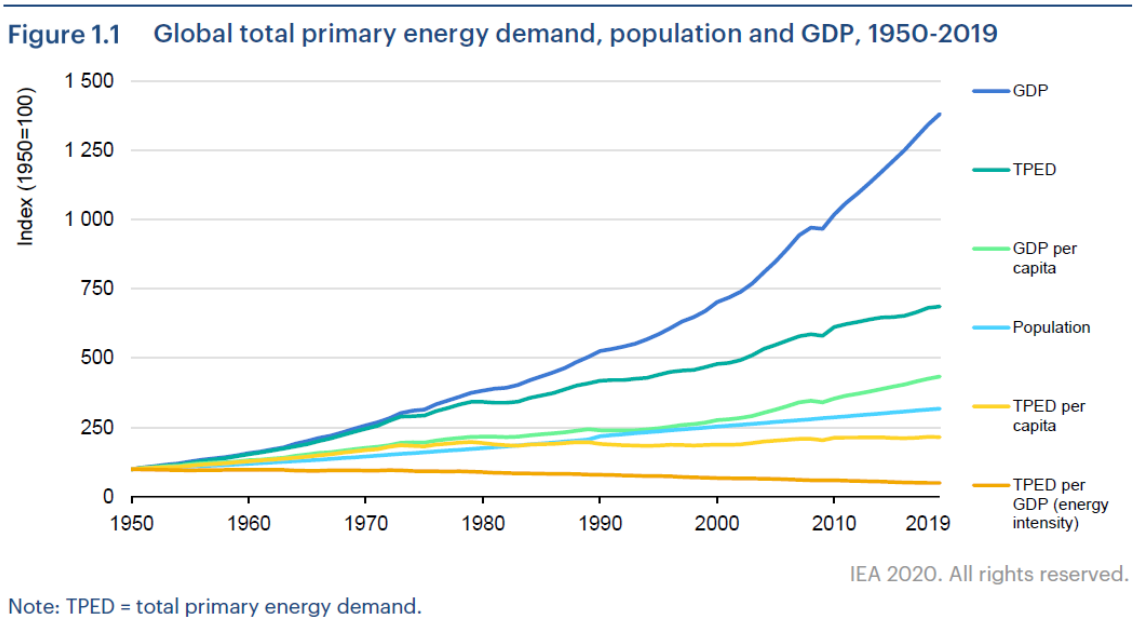


図 1.1 世界の一次エネルギー需要、人口と GDP （1950 年から 2019 年）

世界のエネルギーシステムは流れに乗りよりクリーンに

- エネルギー需要の増加に対応するために使用された燃料と技術は、技術革新が継続しエネルギー部門に影響を与えたため、大きな変革が起きた。 20 世紀初期の革新の波は石油の使用を拡大し、その後の波は天然ガスの使用、原子力発電の開発、そして最近では非水力再生可能エネルギー発電技術が増加した。

技術革新は 2000 年以降に加速

- 技術革新の速度は過去 20 年間で増加しており、現状ではバイオマス関連がその主流となっている。ただし、一部のバイオマスは持続可能ではなく、大気汚染の原因にもなっている。

電力部門における技術革新

- 着実に増加してきたクリーン燃料の発電であるが、2000 年代にはアジアでの石炭火力の急増によりシェアは低下した。しかしその後、風力発電や太陽光発電技術革新により、ガス火力と同等の競争力を持つようになり、シェアを伸ばしている。

- 一方、石炭火力発電では、亜臨界から超臨界へと技術が転換してゆき、高効率で低炭素な石炭火力発電に移行している。
- また、原子力発電は、ロシアや日本での事故もあり、新設が減少している。

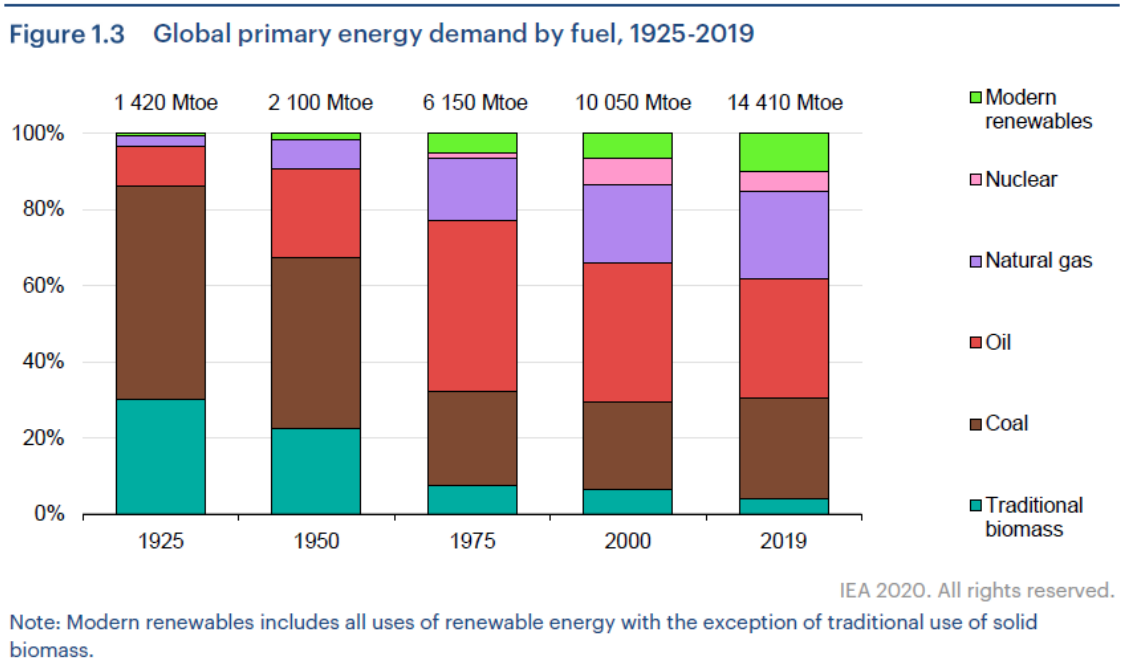


図 1.3 世界の一次エネルギー供給(燃料源別)(1925 年から 2019 年)

代替燃料における技術革新

- 輸送燃料として、バイオ燃料が以前から使われてきており、最近では技術革新により低コスト、生産効率の高いバイオ燃料の製造が行われている。
- 最近では、最終利用段階で CO_2 を発生しない水素が注目されているが、CO_2 を排出しない水素製造、供給インフラの整備、コスト低減が課題となっている。水素が将来のよりクリーンなエネルギーシステムで主要な役割を果たすこと、特に CO_2 排出量を削減することが難しい分野でますます期待されている。

エネルギー最終需要における技術革新

- 需要側では、照明や機器の効率改善、さらには産業構造の変化により需要を削減する効果があった。一方、交通や建物は需要の増加に影響している。
- 政策はエネルギー効率の改善に大きく寄与しており、建築物や(照明などの)機器における最低効率基準の義務化は効果が大きい。
- 運輸部門では、燃費の改善と燃費基準の導入により需要削減に大きく貢献している。また、電気自動車が普及してきており、期待されている。

Covid-19：クリーンエネルギー技術を加速させるか停滞させるか

- Covid-19 は再生可能エネルギーや電気自動車の普及に負の影響をもたらしたが、来年には回復する見通しである。
- 一方、基礎段階の技術では、特に民間での資金が圧縮されている。しかし、経済回復のための対策として、クリーンエネルギーの開発は効果的である。

エネルギー由来の CO_2 排出量への影響

- 世界の CO_2 排出量は、需要の増加および化石燃料への依存により、再生可能エネルギーの普及が追いつかずに増加している。ただし、Covid-19 により 2020 年は減少する見込みである。

ガスと再生可能エネルギーへの切り替えは CO_2 排出の増加を緩和

- ガスの使用増加により石炭のシェアが減少したことで、CO_2 排出原単位は改善している。また、再生可能エネルギーによる発電の増加と電気自動車や LED などの高効率機器の普及により、CO_2 排出量は抑制されている。

CO_2 排出傾向の地域さ

- CO_2 の排出には地域差があり、先進国では減少傾向にあるが、特にアジアの新興国では増加している。中でも中国は石炭の利用により急激に増加したが、経済の成熟と共に今後の減少が期待される。

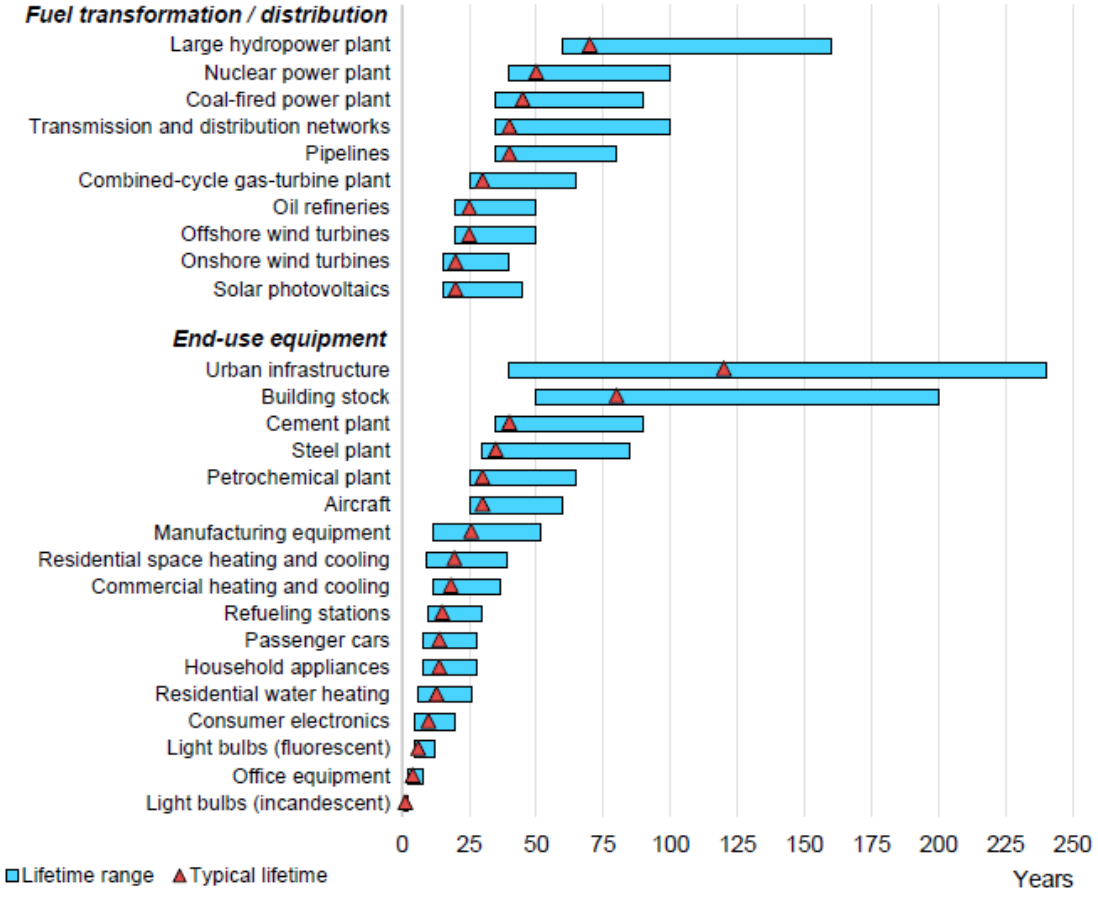
現在の CO_2 排出量は今後どうなるのか？

- クリーンエネルギー技術の利用を加速する取り組みとして、既存のインフラを有するそれぞれのセクターにおける対策技術の重要性を理解することが重要である。

既存インフラからの排出

- 既存のインフラをどのように扱うか、地球規模の気候変動への取り組みを達成するために検討することが重要である。また、直近での新規インフラの設置が今後の排出に影響を及ぼす。
- 既存インフラの主要な部門は、電力、重工業である。加えて、自動車や建築物も寿命が長く CO_2 排出が継続する。石炭火力、鉄鋼、セメント、化学部門からの排出が大きく、寿命も数十年と長い。

Figure 1.12 Typical lifetimes for key energy sector assets



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: The red markers show expectations of average lifetimes while the blue bars show typical ranges of actual operation in years, irrespective of the need for interim retrofits, component replacement and refurbishments. "Buildings" refers to building structures, not the energy consuming equipment housed within. Examples of "urban infrastructure" assets include pavement, bridges and sewer systems.

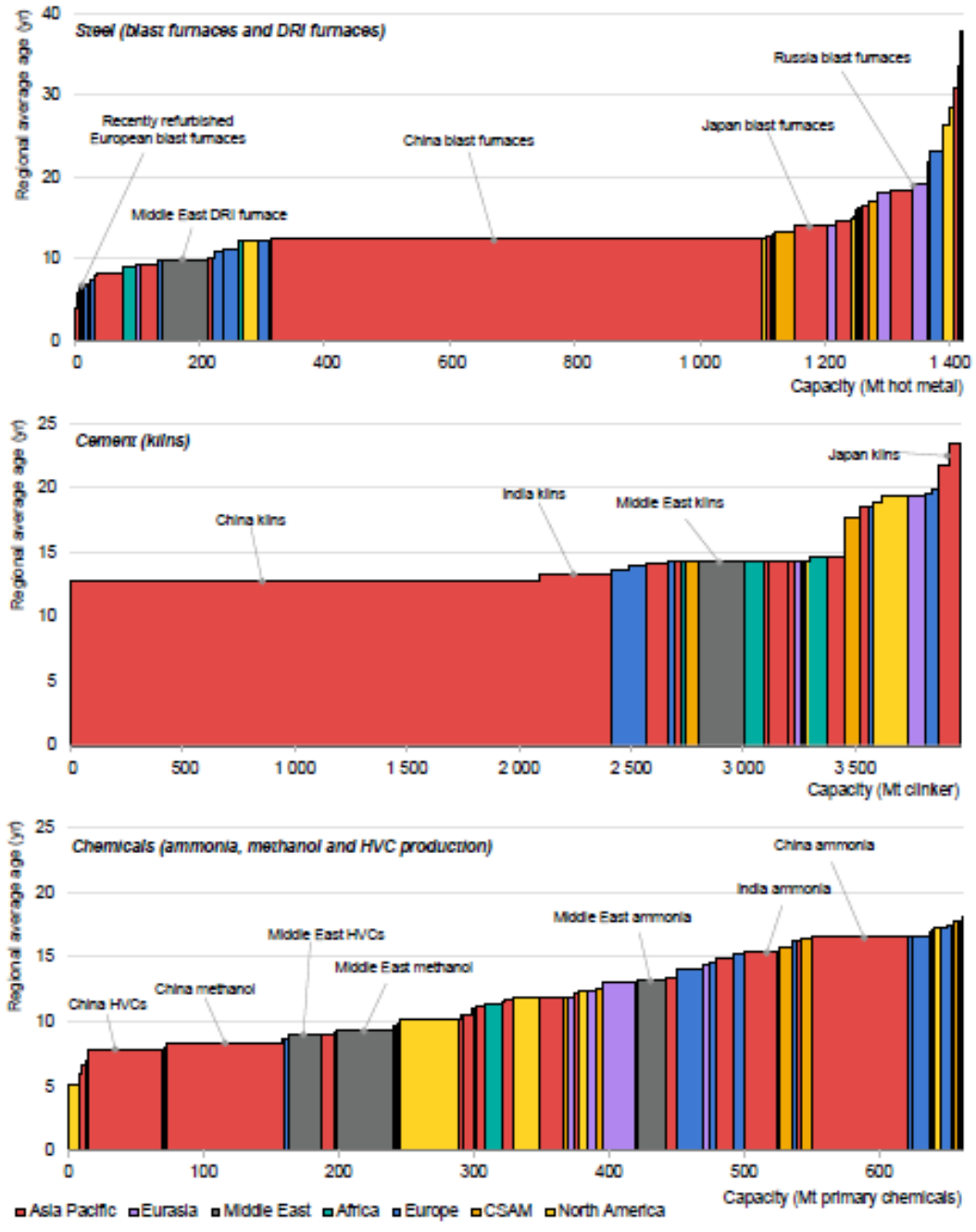
図 1.12 エネルギー部門の設備の典型的寿命

既存設備ストックの年数と分布

- 発電部門では、先進国よりも近年の経済発展に伴って設備が導入された新興国での寿命が長くなっている。
- 鉄鋼、セメント、化学部門においても、特に中国での設備寿命が長くなっている。
- 建築部門では、内部の空調や給湯設備は十数年の寿命であるが、躯体は地域や利用目的(住宅用／業務用)により差があるが、数十年から百年以上ある。特に効率の低い建物は寿命を短縮する必要がある。また、断熱の悪い建物は、冷暖房の効率を悪化させる。
- 自動車の寿命は比較的短いが、先進国から新興国への中古車の輸出による寿命の延長が課題であった。しかし、近年では新興国での経済発展に伴う新車販売が増加している。一方で、中国とインドの新車販売は減少傾向にあり、世界の自動車販売は今後数年でピ

ークに達する可能性がある。

Figure 1.14 Age profile of global production capacity for key industrial sub-sectors



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: CSAM = Central and South America. HVC = high-value chemicals. Average ages are calculated by region or country, depending on data availability, for 2019. Steel data are calculated based on plant-level data, while cement, ammonia, methanol and HVC calculations are based on historic data on capacity additions at the national level.

Sources: Informed by capacity and production data from Steel Institute (2018), Wood Mackenzie (2018), IFA (2020), Platts (2020b), and USGS (2020).

図 1.14 主要産業サブセクターの世界的な生産設備能力の経年プロファイル

・ ネットゼロ排出のために必要とされる技術

ネットゼロ排出への道筋を描く

- パリ協定の目標を達成するためには、クリーンエネルギーへの転換により、今後数十年間で温室効果ガスの排出量をネットゼロにするように急速に削減する必要がある。
- ネットゼロ排出を実現するためには、土地利用の変更、BECCS や DAC による CO_2 の除去が必要となる。特に排出削減が難しい部門からの排出を除去できれば、ネットゼロ排出が実現可能となる。2070 年までにネットゼロ排出を実現するシナリオを描く。

エネルギー転換シナリオ

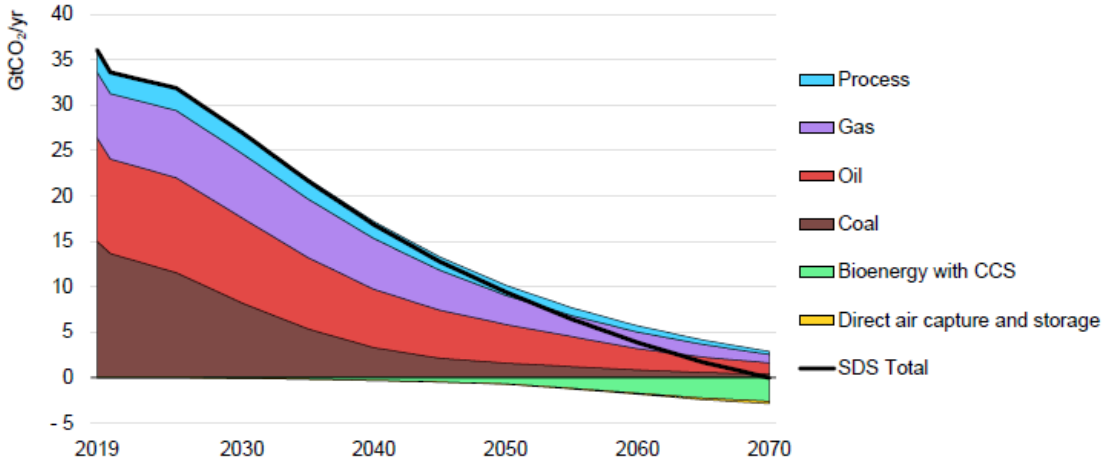
- 持続可能な発展シナリオ(SDS) : ETP-2020 の中心的シナリオであり、エネルギー部門からのネットゼロ排出に到達するための技術ニーズを理解するために適用する。また、SDGs を実現するためのエネルギー部門の技術革新について理解する。本シナリオにおけるエネルギーおよび産業関連からの CO_2 排出量の見通しは、2070 年にネットゼロを実現する。
- 公表政策シナリオ(SPS) : 持続可能な発展シナリオ(SDS)の比較シナリオとしての役割を果たす。パリ協定に基づく各国の NDC でなされたコミットメントを含め、エネルギーと環境に関してすでに導入または公表されている各国政府の政策とコミットメントが実施されることを前提として、世界のエネルギーシステムの進展を見通す。
- 2 つのシナリオでは、対象とする地域、部門、技術の範囲は同じあるが、モデリングのアプローチが異なっている。公表政策シナリオでは、結果を達成することを目的とせずに、政策等の条件を定義し、次にそれらがエネルギーシステムを転換することをモデル化している。持続可能な発展シナリオでは、将来の結果を定義し、技術の研究、開発、デモンストレーション、および普及を含み、政策の支援を通じてそれらを最小コストで達成する方法をモデル化している。
- 両モデルには、IEA の ETP モデルを利用しており、すべての部門を含む長年の蓄積により構築されたものでるである。ETP モデルは、エネルギーの供給と転換、建物、産業、運輸の各セクターをカバーしており、多くの技術を含む 4 つのモデルで構成されている。
- 技術の進展は不確実なため、まだ知られていないテクノロジーの出現を想定していない。現在開発されている利用可能な最善の技術やコスト情報を元に、普及の速度や政策的支援によるネットゼロ排出への貢献を評価している。

持続可能な開発シナリオにおけるネットゼロ排出の道程

CO_2 排出経路

- 公表政策シナリオと持続可能な発展シナリオ間でのエネルギー部門の CO_2 排出量の大きなギャップは、クリーンエネルギー技術の加速的な展開を通じて持続可能な開発を達成する上で世界が直面する課題の大きさを表している。公表政策シナリオでは、Covid-19 の影響から回復し、来年以降にさらに排出が増加する。持続可能な開発シナリオでは、Covid-19 の経済対策がクリーンエネルギー技術を支援し、2019 年に排出のピークを迎える。

Figure 2.1 Global energy sector CO_2 emissions by fuel and technology in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



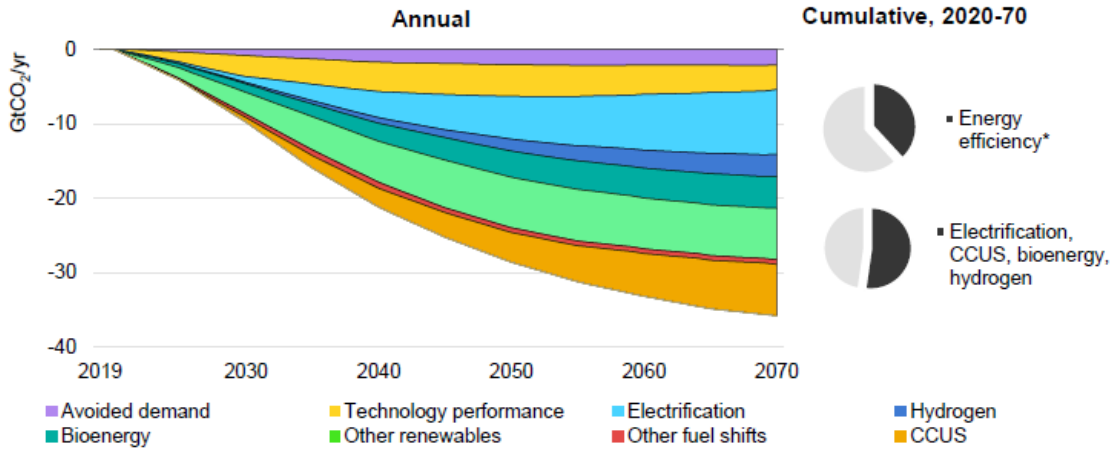
IEA 2020. All rights reserved.

Notes: CCS = carbon capture and storage. SDS= Sustainable Development Scenario.

図 2.1 持続可能な開発シナリオにおける世界のエネルギー部門からの燃料および技術別 CO_2 排出量(2019 年から 2070 年)

- ネットゼロの CO_2 排出を達成するには、さまざまな対策とさまざまな技術的普及が必要である。短期的には、エネルギー効率、特に産業プロセス、暖房と冷房、車両の燃費および再生可能エネルギー、特に風力と太陽光発電(PV)が重要である。

Figure 2.2 Global energy sector CO_2 emissions reductions by measure in the Sustainable Development Scenario relative to the Stated Policies Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

* Energy efficiency includes enhanced technology performance as well as shifts in end-use sectors from more energy-intensive to less energy-intensive products (including through fuel shifts).

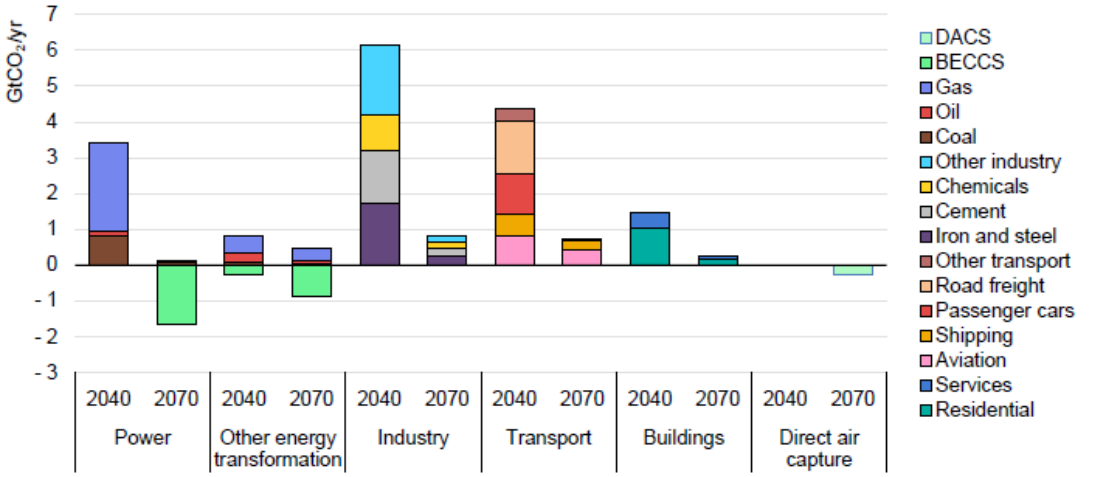
Notes: CCUS = carbon capture, utilisation and storage. See ETP model documentation for the definition of each abatement measure. *Hydrogen* includes low-carbon hydrogen and hydrogen-derived fuels such as ammonia.

図 2.2 持続可能な開発シナリオにおける公表政策シナリオからの世界のエネルギー部門からの対策別 CO_2 削減量(2019 年から 2070 年)

- 長期的には、4 つの主要技術の普及がネットゼロ排出への道のりにとって重要である。
  - **最終需要部門の電化**：発電部門が完全な脱炭素化することで排出削減への電化の貢献は増加する。
  - **CCUS**：CCUS の貢献は、最初は電力部門と重工業部門の既存設備からの脱炭素化に貢献するが、その後大気からの炭素の直接除去にシフトし、削減が難しい部門からの排出量を相殺することが期待される。
  - **低炭素水素**およびアンモニアや合成炭化水素燃料などの**合成燃料**：これらの燃料の使用は、さまざまな部門で時間の経過とともに増加してゆく。特に運輸部門での貢献が期待される。
  - **持続可能なバイオエネルギー**：持続可能なバイオエネルギーは、たとえば運輸部門などでの短期的に排出量を抑制する上で重要な役割を果たすが、産業部門など、エネルギー部門のさまざまな設備でのさらなる可能性がある。
- これら 4 つの技術は、特に産業部門や長距離輸送などの排出量を削減することが困難な部門において、排出量を削減する取り組みの中心となる。ただし、これら技術の多くの部分は開発の初期段階にあり、再生可能エネルギー、原子力、化石燃料の使用効率化技術ほどの開発状況ではない。
- 残存寿命が短い自家用車やヒートポンプ式暖房などの経済的かつ技術的に利用可能で

ある技術は、普及のチャンスである。一方、重工業部門や長距離輸送などは残存寿命が長く、クリーンエネルギー技術の代替の可能性は限られている。特に、鉄鋼やセメント産業、航空、海運、貨物車においては、2070 年でも炭素中立とならない。

Figure 2.3 Global energy sector CO_2 emissions by sector and sub-sector/fuel in the Sustainable Development Scenario, 2040 and 2070



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: BECCS = bioenergy with carbon capture and storage. DACS = direct air capture and storage. *Other energy transformation* includes coal mining, oil and gas extraction, oil refining, coal and gas transformation and liquefaction, production of hydrogen and hydrogen-based fuels, and biofuels production with and without CCS.

図 2.3 持続可能な開発シナリオにおける世界のエネルギー部門からの部門別・サブセクター別 CO_2 排出量(2040 年と 2070 年)

- CO_2 排出削減での課題としては、地域差があり、特に中国では発電や産業部門で導入の新しい寿命が長いインフラが多く、効率化と CCUS の適用が重要となる。

エネルギーへの影響

一次エネルギー需要の動向

- 2070 年の人口は 2019 年と比較して 35%の増加、経済は 3.5 倍と見込まれる。持続可能な開発シナリオでは一次エネルギー需要はほぼ横ばい、公表政策シナリオでは一次エネルギーは 40%の増加となる。

表 2.1 一次エネルギー需要(燃料別・シナリオ別):単位 Mtoe

Table 2.1 Primary energy demand by fuel and scenario (Mtoe)

		Sustainable Development Scenario		Stated Policies Scenario
	2019	2040	2070	2070
Coal	3 783	1 309	696	3 188
Oil	4 523	3 000	1 156	4 778
Natural gas	3 336	3 056	2 048	4 786
Nuclear	728	1 140	1 472	1 101
Renewables	2 220	5 325	9 905	6 013
Hydro	371	585	840	716
Modern bioenergy	935	2 365	2 948	2 252
Traditional use of biomass	588	0	0	287
Solar	118	1 156	3 414	1 283
Wind	123	759	1 564	845
Other renewables	86	461	1 140	630
Total	**14 590**	**13 830**	**15 278**	**19 865**
Net CO_2 emissions ($MtCO_2$)	*36 064*	*16 834*	*0*	*35 737*

Notes: Primary energy demand includes conversion losses from biofuel production. *Modern bioenergy* includes biomass processed/pre-treated for electricity generation, industrial applications and biofuel production. *Traditional use of biomass* refers to burning locally sourced biomass for household cooking and heating, using basic technology such as an open fire pit.

- 持続可能な開発シナリオでは、エネルギーと材料の効率の改善によりエネルギー需要がより緩やかに増加する。これは、現在利用可能な技術による効率化が進展した結果、エネルギー原単位も現在の 2/3 に減少する。また、2070 年に向けてクリーンエネルギー源の利用が飛躍的に増加する。
- 化石燃料の使用は 2070 年までに急速に減少し、使用されている化石燃料のほとんどは、新規および既存の発電所と産業プラントであるが、CCUS が広く普及しているため CO_2 排出はされない。石炭の消費はほとんどなくなるが、鉄鋼の生産によって使われている。石油需要は、現在のレベルを 75%下回り、需要の 65%近くは原料用であり、残りのほとんどは航空用および海運用である。 ガス需要は 2020 年代にピークに達し、現在のレベルを 40%近く下回わる。これは主に化学産業の原料として利用され、発電用では炭素回収を備えた設備で使用される。さらに、水素生産の燃料と原料として利用されるが、ほとんどが炭素回収を備えている。
- 非化石燃料に関しては、原子力は 2019 年から 2070 年の間に 2 倍以上になり、アジアの新興国での増加が約 75%を占める。水力や固体バイオマスを含む再生可能エネルギーのシェアは、2019 年の約 15%から 2070 年には 60%以上に跳ね上がる。建物や産業で

発電や暖房目的に使用される太陽エネルギーは、2070 年までに最大の一次エネルギー源となり、世界の一次エネルギー需要の 20%以上を占めるエネルギー源となる。持続可能なバイオエネルギーは、太陽エネルギーとほぼ同等のレベルに達する。これは、その用途の広い性質により、建物や産業部門に電力と熱を供給でき、輸送用の液体燃料に変換できるためである。

- 持続可能な開発シナリオにおける再生可能エネルギー(主に太陽光発電、風力発電、バイオエネルギー)の世界的な増加は、現在からの加速を意味しており、気候変動の取り組み、エネルギー安全保障を強化し、大気汚染を改善するためのより強力な政策によって推進される。可変再生可能エネルギーのより高いシェアを電力システムで実現するためには、電力のセキュリティを確保する必要があり、エネルギー貯蔵などの柔軟性メカニズムをさらに発展して使用する必要がある。
- 持続可能な開発シナリオでは、先進国では需要が急激に減少するが、インドおよび他のほとんどの新興国、特にアフリカと中東では、需要は増加するが、公表政策シナリオと比較すると緩やかとなっている。中国は、経済の減速と共に、効率化対策により需要が 1/5 に減少する。

表 2.2 一次エネルギー需要(地域別・シナリオ別):単位 Mtoe

Table 2.2 Primary energy demand by region and scenario (Mtoe)

			Sustainable Development Scenario		Stated Policies Scenario
	2000	2019	2040	2070	2070
Americas	3 127	3 500	2 911	2 950	3 646
Europe	2 027	1 934	1 474	1 423	1 632
Africa and the Middle East	843	1 691	1 991	3 327	3 857
Eurasia	741	898	775	735	1 156
Asia Pacific	3 012	6 158	6 229	6 330	8 653
International bunkers	273	408	450	510	921
World	**10 023**	**14 590**	**13 830**	**15 278**	**19 865**

Notes: Primary energy demand conversion losses from biofuel production. *International bunkers* refers to fuel demand in international aviation and shipping.

最終エネルギー需要の動向

- 持続可能な開発シナリオにおける世界の最終エネルギー消費量は、2020 年代初頭に横ばいになり、その後、着実に減少する。 エネルギーと材料の効率が大幅に向上したため、2019 年の需要を 10%近く下回り、公表政策シナリオの需要を 30%以上下回っている。石油とガスの需要は、持続可能な開発シナリオでは相対に最も急激に減少し、2019 年から 2070 年の間にそれぞれ 70%以上減少するが、石油需要の減少は絶対量でも大きい。ヒートポンプなどの技術をより効果的に適用した結果、建物の暖房需要と産業のプ

ロセス熱需要も減少する。電力消費量は絶対的に最も増加し、2070 年までに 2 倍以上になり、次に水素が続く。水素は 2020 年代に燃料として出現し、主に運輸および産業部門で使用される。電気と CO_2 から生成された水素に由来する液体合成炭化水素燃料は、2020 年代後半に貨物トラックや航空機で使用され始める。2070 年までに、合成燃料の使用量は、航空機燃料需要の約 40%を満たす。

表 2.3 最終エネルギー消費（部門別・シナリオ別）：単位 Mtoe

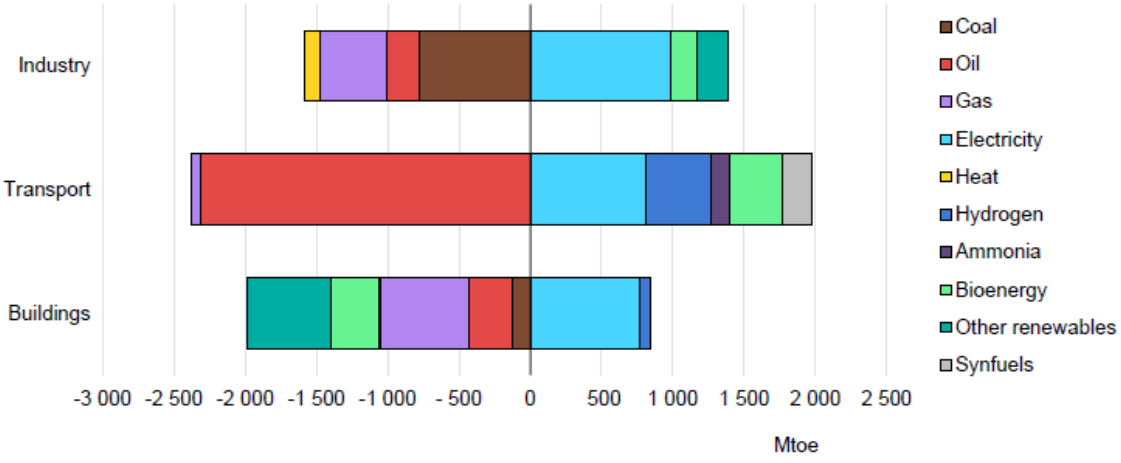
Table 2.3 Final energy consumption by sector, fuel and scenario (Mtoe)

			Sustainable Development Scenario		Stated Policies Scenario
	2000	2019	2040	2070	2070
Industry	2 054	3 278	3 162	3 077	4 513
Transport	1 961	2 865	2 537	2 461	3 923
Buildings	2 345	3 087	2 648	2 868	4 193
Other	950	1 153	1 310	1 081	1 639
Total	**7 310**	**10 384**	**9 657**	**9 486**	**14 269**
Coal	732	1 327	824	398	1 326
Oil	3 292	4 048	2 823	1 099	4 561
Natural gas	1 104	1 659	1 357	426	2 362
Electricity	1 076	1 943	2 909	4 507	4 004
Heat	240	312	272	187	356
Hydrogen	0	0	98	539	91
Ammonia	0	0	18	133	9
Bioenergy	859	1 035	1 035	1 315	1 285
Synfuels	0	0	32	254	0
Other renewables	7	60	290	629	275
Total	**7 310**	**10 384**	**9 657**	**9 486**	**14 269**
Hydrogen-related demand		*94*	*290*	*1 199*	*229*

Notes: Deviating from IEA Energy Balances, final energy demand for industry includes here and in the following energy use for blast furnaces and coke ovens. *Synfuels* refer to synthetic hydrocarbon fuels produced from hydrogen and CO_2. *Heat* refers to heat from combined heat and power plants or heat plants being sold to third parties, e.g. district heat use in buildings. *Bioenergy* refers to both traditional biomass use and modern bioenergy. *Other* refers to the final energy consumption in agriculture and fuels used for chemical feedstocks and non-energy products. *Hydrogen-related final energy demand* includes in addition to the final energy demand of hydrogen, ammonia and synfuels, the onsite hydrogen production in the industry sector and the final electricity produced from hydrogen.

- 化石燃料の減少は、運輸部門で最大であるが、産業部門と建築部門でも減少し、電力が主要なエネルギー源となる。運輸部門の燃料は、水素、アンモニアなどを含めた水素系燃料が 1/3、電力が 1/3 となる。

Figure 2.6 Change in global final energy demand by fuel and sector in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: In the industry sector, heat and hydrogen can be produced onsite at industrial plants, i.e. not being purchased from third parties. In these cases, the final energy demand for the industry sector includes the corresponding fuel input being consumed to produce heat or hydrogen. *Synfuels* refer to synthetic hydrocarbon fuels produced from hydrogen and CO_2. *Other renewables* include solar and geothermal energy.

図 2.6 持続可能な開発シナリオにおける最終エネルギー消費の変化量（燃料別・部門別）（2019 年から 2070 年）

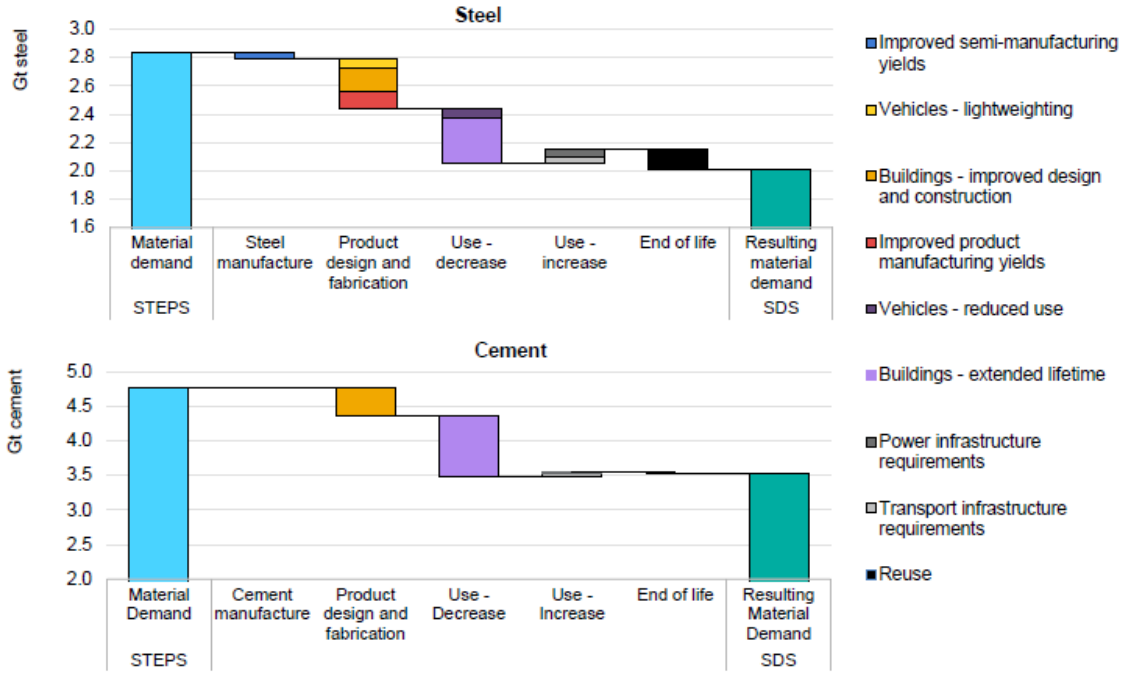
- エネルギー効率の改善は、世界的なエネルギー転換にとって極めて重要である。過去数年間、世界の CO_2 排出量の伸びを鈍化させる上で重要な役割を果たしており、今後、特に短期的には主導的な役割を果たす期待が持たれている。持続可能な開発シナリオでは、長期的に非効率的なエネルギー使用の固定化を回避し、最も効率的な技術の導入を加速するために早期の政策対応が必要とされる。クリーンで効率的な技術の普及には、消費者の行動やライフスタイルの変化も求められる。

材料効率に焦点を当てる：死角か？

- 排出量を削減するための材料効率の改善の可能性は、見過ごされがちである。材料効率は、材料のより効率的な使用と管理を通じてエネルギー需要を削減する幅広い対策をカバーしている。材料の需要を減らす、サプライチェーンでの CO_2 排出削減、排出量の少ない材料へのシフト、などに効果がある。
  - 設計段階：設計段階にて、軽量化などの最適化手段を考慮することで、同じ製品を製造したり、同じサービスを提供したりするために必要な量や重量を減らし、製造または組み立て段階での材料の使用量を減らすことが可能である。設計段階では、ライフサイクル全体を検討する必要がある。
  - 製造段階：廃棄物や材料の削減、またライフサイクル排出量の少ない材料が使える可能性がある。

- 使用段階：修理や改修によって寿命を延ばすことで、新製品を製造するための材料を減らすことが可能である。
- 寿命：製品寿命が尽きた場合、材料を再利用またはリサイクルすることで、新たな材料の製造を削減することが可能である。

Figure 2.7 Reduction in global steel and cement demand through material efficiency gains by stage in the supply chain in the Sustainable Development Scenario relative to the Stated Policies Scenario in 2070



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario. SDS = Sustainable Development Scenario.

図 2.7 持続可能な開発シナリオにおける公表政策シナリオからの材料効率による世界の鉄鋼とセメントの削減量（サプライチェーンのステージ別）（2070 年）

- 材料効率の向上は、政府の政策および規制により実現することができる。しかし現実的には簡単ではなく、いくつかの障壁がある。時間の制約、材料に比べて高い人件費、サプライチェーンの断片化、規制による制限、意識の欠如等である。解決に向けて、材料効率のメリットを実現するために、すべての利害関係者による取り組みを推進し、さらなる強力な政策が必要である。

重要な低炭素技術のバリューチェーンの見通しと準備

- 新しい技術が発展し、市場に投入されるまでには長い道のりが必要である。ある技術が、市場への道のりのどの位置にあるかを評価する 1 つの方法として、技術準備レベル

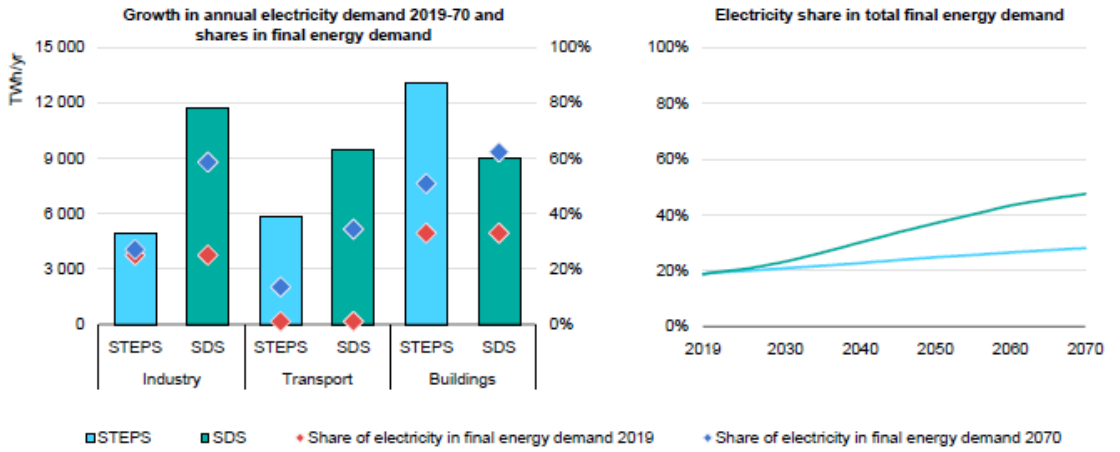
(TRL)尺度を使用することができる(ボックス 2.6)。

- 技術開発を支援するためには、それぞれの段階に合った支援を行う必要がある。
- 持続可能な開発シナリオでは、次の４つの主要な脱炭素戦略を特定した。1)運輸、産業、建築セクターの電化、 2)CCUS システムの展開、 3)水素および水素由来の合成燃料へのシフト(低炭素水素および持続可能な炭素源を使用)、4)より持続可能な代替燃料やバイオエネルギーの利用。これらの脱炭素戦略を実現するには、新しい技術を市場に投入し、関連するバリューチェーンのさまざまな段階のすべてで新しい技術を改善するためのイノベーションが必要である。

電化

- 持続可能な開発シナリオにおけるクリーンエネルギーへの転換の主な柱の一つは、電化の加速である。公表政策シナリオよりも約 6,000 TWh(25%)多く、現在の消費量の約 135%に相当する。世界の最終エネルギー需要に占める電力の割合は、現在の 19%から 2070 年には 47%に増加する。

Figure 2.8 Growth in global electricity consumption by sector and scenario and electricity share in total final consumption in the Sustainable Development Scenario



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario. SDS = Sustainable Development Scenario.

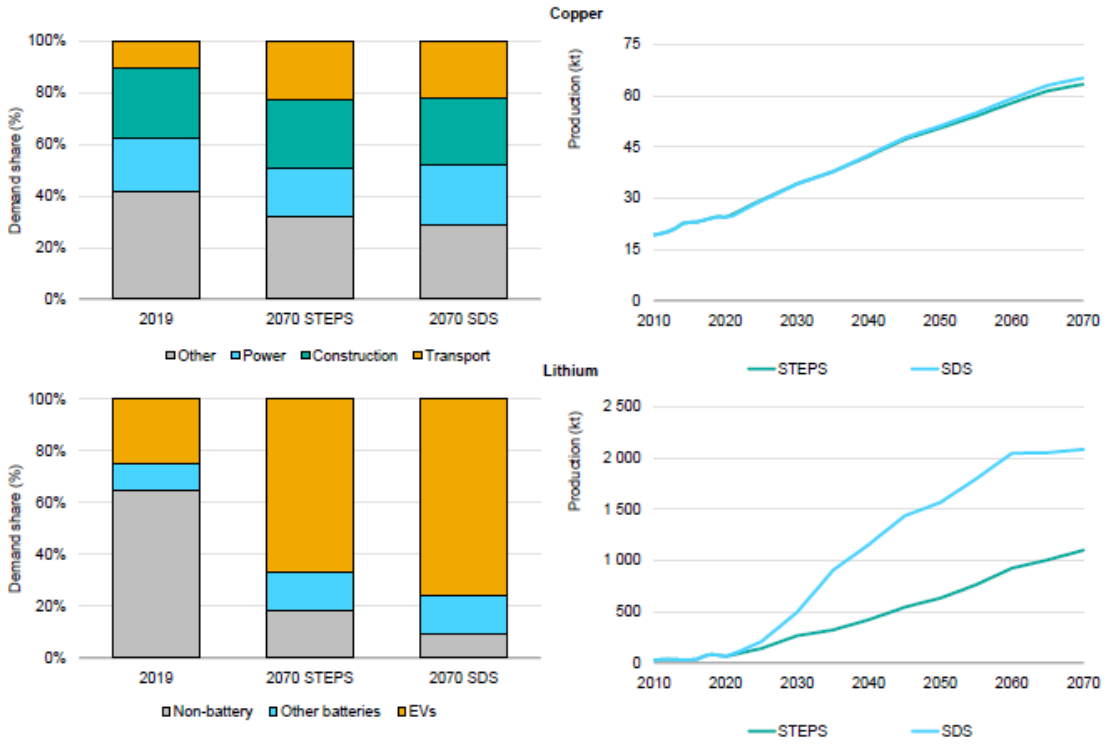
図 2.8 持続可能な開発シナリオにおける世界の電力消費の成長(部門別・シナリオ別)と最終消費における電力シェア

- 持続可能な開発シナリオでは、すべての部門(建築、産業、運輸)で電化が進むが、部門により需要の増加量やシェアは異なる。機器の効率化の進展や燃料転換など、要因は部門により異なる。
- 持続可能な開発シナリオでは、公表政策シナリオと比較して、最終部門での電化が進み、

電源の低炭素化により 2070 年で年間約 30%の CO_2 排出量が削減される。

- 電化の増加により、電力システムはより柔軟性が求められ、電気自動車(EV)への充電の分散や暖房用ヒートポンプの使用時間のピーク対策などが求められる。
- また、太陽光発電と風力発電への依存度が高くなると、これらの発電源の日ごとおよび季節ごとの自然変動に対処するためのシステムの柔軟性の必要性が高まる。そのため、より広い地理的領域を利用して変動を滑らかにするために隣接地域の系統システムとの相互接続の強化に加えて、調整電源との組み合わせによる電力ネットワークの構築が求められる。
- デマンドレスポンスや大規模蓄電池、揚水発電、水素貯蔵などの対策も必要となるが、コスト削減が大きな課題である。
- さらに、バイオメタンや水素による熱供給においては、その製造過程において電力を使用することが想定されるため、電化の間接的な効果とみなすことができ、持続可能な開発シナリオでは世界の最終エネルギー需要に占める電力の全体的なシェアは、2070 年には 55%に増加する。
- 一方、高効率機器やインフラの整備には、銅、リチウム、コバルト、プラチナなどの金属やレアメタルが必要となるが、地域偏在性に課題もある。

Figure 2.10 Global copper and lithium demand by sector and scenario



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario. SDS = Sustainable Development Scenario. EVs = electric vehicles. *Other uses* of copper are mainly for electronics and consumer products. Non-battery use of lithium is varied: ceramics, lubricants, metallurgy, polymers, air purification or even pharmaceutical. The lifespan of batteries for electric vehicles is assumed to be the same as vehicles (between 14 and 17 years for light-duty vehicles). Electric trucks and buses are assumed to use two sets of batteries during their lifetime.

図 2.10 世界の銅およびリチウムの需要（部門別・シナリオ別）

低炭素電力バリューチェーンの技術的準備

- ネットゼロの CO_2 排出を達成するには、最終需要部門での電化の加速と発電の脱炭素化が不可欠である。しかし、重工業や長距離輸送などの電化が困難な部門もあり、現状では基礎段階の技術に留まっている。

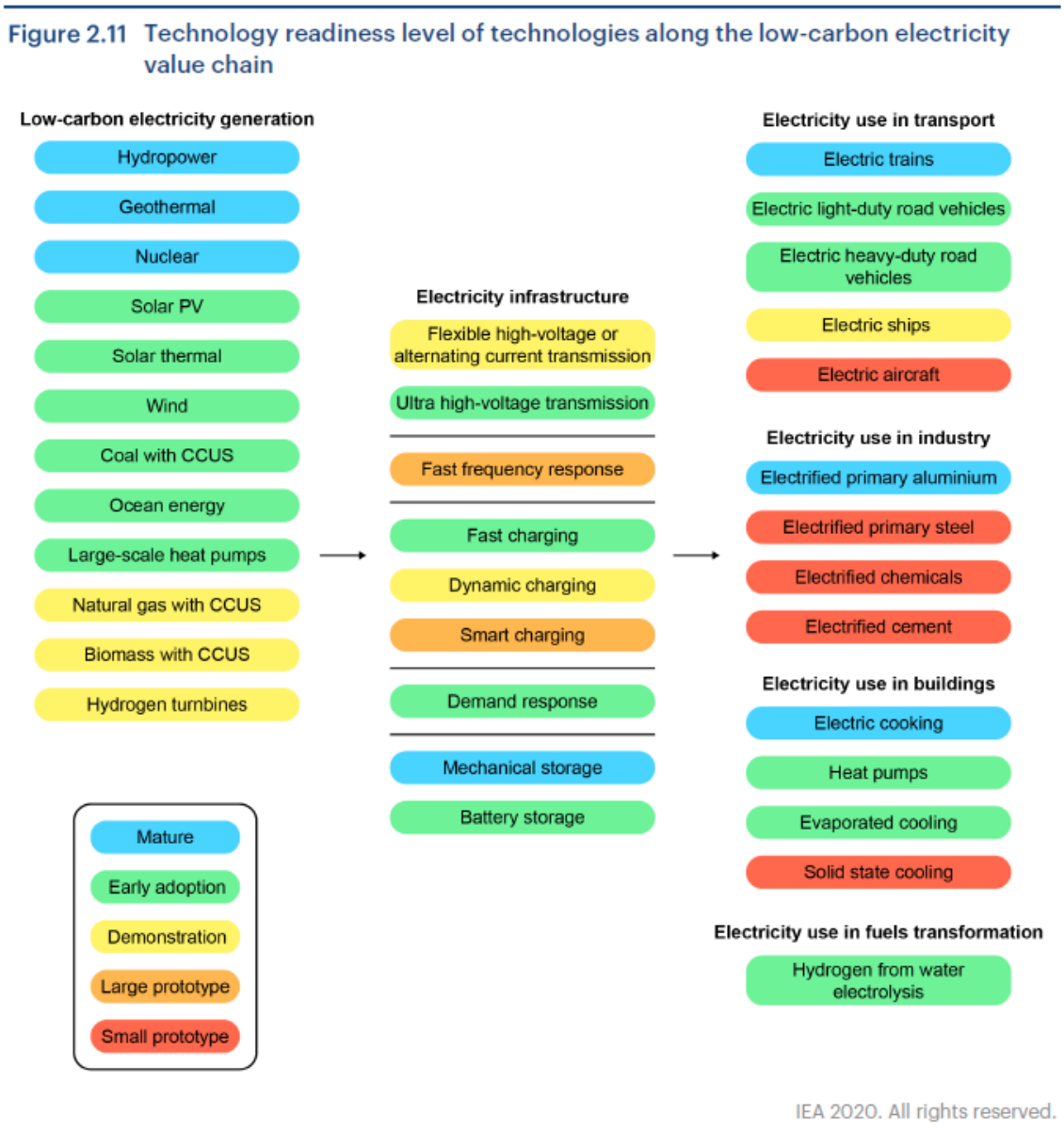


図 2.11 低炭素電力バリューチェーンに沿った技術の技術準備レベル

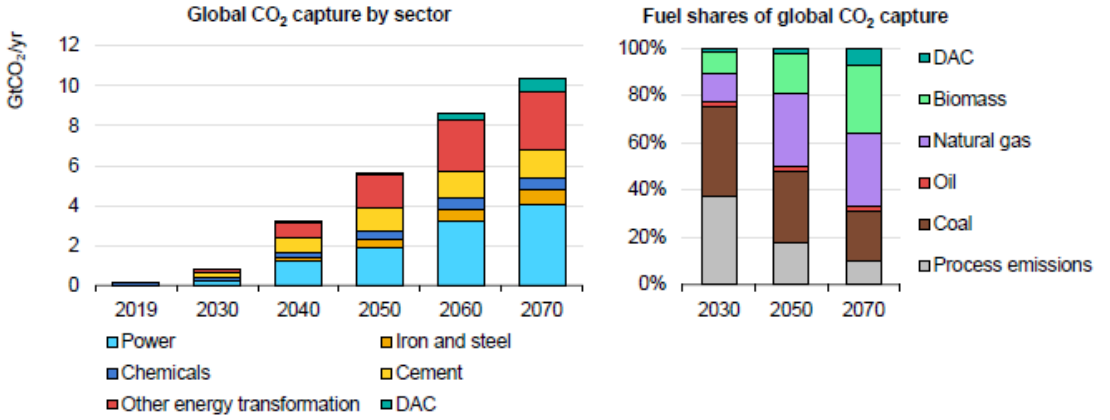
CCUS

- 持続可能な開発シナリオでは、CCUS はネットゼロの世界のエネルギーシステムへの転換において、実質的かつ幅広い役割を果たす。さらに CCUS は、BECCS と DAC により、負の排出(CO_2 除去)となる。合計すると CCUS は、公表政策シナリオと比較して、世界中の CO_2排出量の累積削減量のほぼ 15%に相当し、CCUS の役割と貢献は時間と

ともに増大する。

- 2070 年の持続可能な開発シナリオではネットゼロ排出に達し、約 10 Gt の CO_2 が回収される(図 2.12)。電力部門は、回収された総 CO_2 排出量の 40%弱を占め、そのうちの約半分は化石発電所からの排出であり、CO_2 回収設備の設置により既存の発電所の継続的な運用を可能にする。残りの半分はバイオマス火力発電所で回収され、重工業と輸送部門からの排出量の相殺に貢献する。

Figure 2.12 Growth in global CO_2 capture by sector and fuel in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

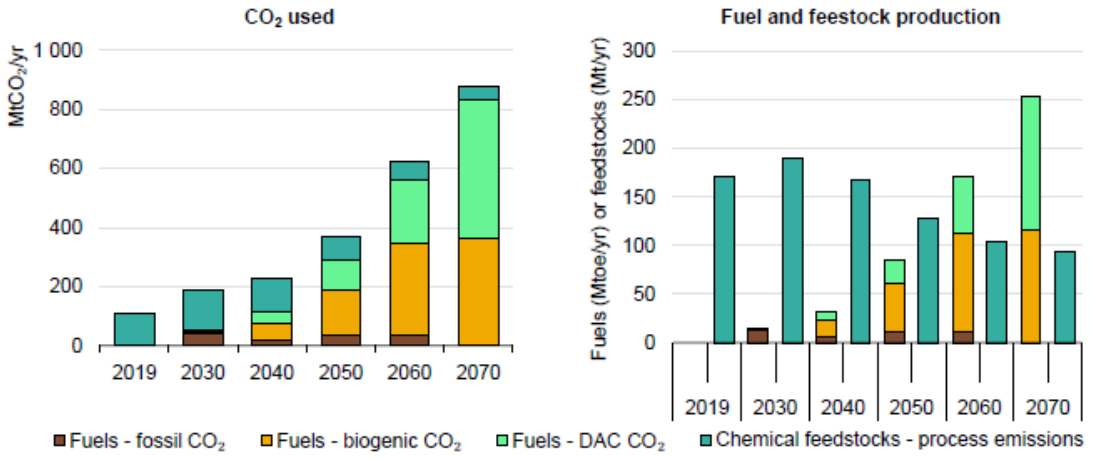
Note: DAC = direct air capture.

図 2.12 持続可能な開発シナリオにおける世界の CO_2 回収の成長
(部門別・燃料別)(2017 年から 2070 年)

- CCUS は、セメント、化学、鉄鋼産業にとって重要な役割を果たす。これら 3 つの業種からの持続可能な開発シナリオにおける CO_2 の回収量は世界の 1/4 となる。また、30%が他の燃料生産から、40%が水素製造によるものである。一方、バイオ燃料製造に適用される BECCS は約 900 $MtCO_2$ の負の排出となる。
- CCUS は、持続可能な開発シナリオにおいて 3 つのフェーズを経て、2070 年のネットゼロ排出へ向かう。2030 年までは、既存のインフラと設備からの排出への対応である。これまでの主な回収元は、石炭火力発電、化学(主に肥料)、セメント、鉄鋼業からであった。2030 年から 2050 年の次のフェーズでは、発電の中でも調整電源である天然ガス火力発電にシフトすることで、再生可能エネルギーによる発電を支え、天然ガスからの水素製造も支える。発電およびバイオ燃料での BECCS の適用拡大による貢献が期待される。2050 年から 2070 年の最終フェーズでは、既存のインフと化石燃料の使用からの排出量を削減するため、炭素除去と燃料生産のために CCUS が適用される。2070 年には、BECCS と DAC が大きな役割を果たすことになる。

- 持続可能な開発シナリオでは、2070 年に回収された CO_2 の 90%以上が貯留され、残りは合成燃料や原料として利用される。特に、航空機燃料としても利用される。ただし、合成燃料の製造には水素が使われ、その水素は電気分解により生成される。

Figure 2.13 Global CO_2 use for fuel and feedstock production in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: DAC = direct air capture. Feedstocks refer to the production of methanol and urea.

図 2.13 持続可能な開発シナリオにおける燃料用および原料製造用の世界の CO_2 利用量(2017 年から 2070 年)

部門ごとの動向

発電部門

- CCUS は、石炭火力発電と天然ガス火力発電の既存設備への適用により、電力系統の柔軟性に貢献する。2050 年以降は、BECCS との組み合わせにより、発電からの CO_2 排出はネットマイナスが可能となる。2070 年での CCUS を備えた発電容量は 1,100GW となり発電電力量は約 6,000TWh となる。

産業部門

- 持続可能な開発シナリオでは 2070 年までに、セメント製造から排出される CO_2 の約 90%、化学、鉄鋼での排出の約 75%が回収さる。これを実現するには、2070 年まで毎年平均 40 近くのセメント工場、15 以上の化学工場、10 以上の製鉄所に回収設備を設置する必要がある。

その他のエネルギー転換部門

- 持続可能な開発シナリオでは、製油所や石油およびガス生産などのエネルギー転換部門での CCUS の設置により、ネットゼロ排出の実現に貢献する。なお、CCUS により水素や合成燃料の製造が低炭素で可能となり、船舶などの低炭素化に貢献する。

CCUS バリューチェーンの技術的準備

- **回収**：これまでは、天然ガス精製やアンモニア製造時に回収されてきたが、今後は大規模な商業化に向けた技術開発が必要となる。当面の回収方法は、化学吸収法が利用される。
- **利用**：尿素や炭酸飲料としの利用ではなく、建築材料や合成燃料の原料としての利用拡大が見込まれる。
- **貯留**：石油増進回収による貯留が主流であるが、大規模な帯水層や枯渇石油・ガス田への貯留の商業化が取り組まれている。
- **負の排出**：バイオマス利用の CO_2 排出量の回収と貯留および DAC による回収は、どちらも負の排出を実現するものと期待される。DAC は現在、パイロット規模での実証が行われている。

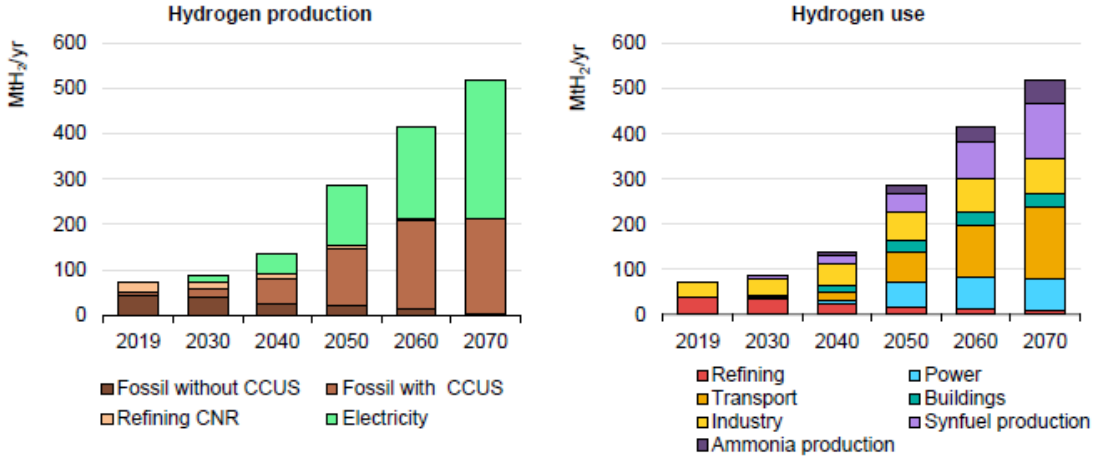
図 2.14 CO_2 バリューチェーンに沿った技術の技術準備レベル

水素および水素ベース燃料

- 水素は、クリーンエネルギーシステム転換での貢献に大きな期待を寄せられている。水素を利用することで、長距離輸送、化学薬品、鉄鋼生産など、代替の対策が少ない部門での脱炭素化を進めるオプションとなる可能性があるためである。また、再生可能エネルギーの変動電源からの電力を貯蔵する機能を有している。さらに、天然ガス、石炭、石油、再生可能エネルギー、原子力など、さまざまなエネルギー資源から生産可能であり、化学の原料に利用したり、CO_2 と組み合わせて運輸部門用の合成炭化水素燃料に変換したりすることも可能である。

- 持続可能な開発シナリオでは、2070 年の水素の需要は 2019 年の 7 倍となり、自動車、トラック、船舶、航空機、化学、鉄鋼で利用される。

Figure 2.15 Global hydrogen production by fuel and hydrogen demand by sector in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



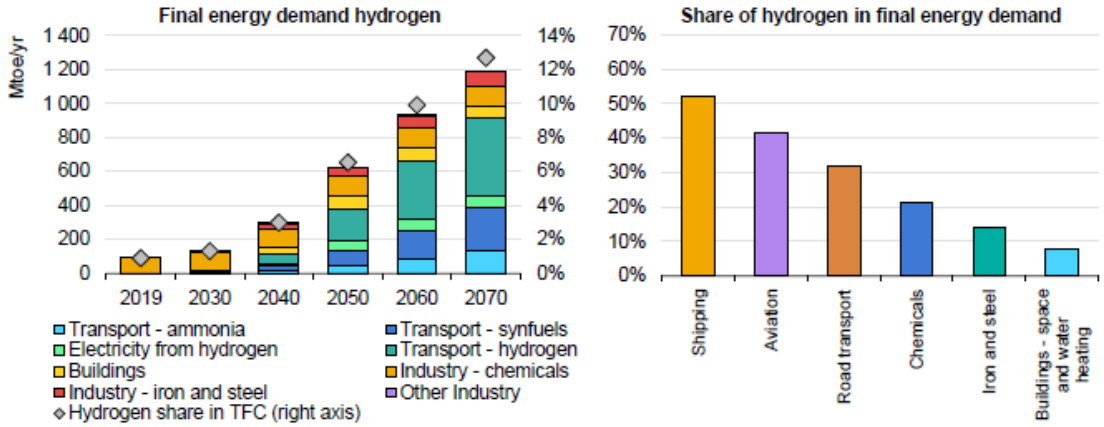
IEA 2020. All rights reserved.

Notes: CCUS = carbon capture, utilisation and storage. *Refining CNR* refers to the production of hydrogen as a by-product of catalytic naphtha reforming in refineries. *Ammonia production* refers to the fuel production for the shipping sector. Hydrogen use for industrial ammonia production is included within the industry use.

図 2.15 持続可能な開発シナリオにおける世界の水素製造量
（燃料別・部門需要別）(2019 年から 2070 年)

- 持続可能な開発シナリオでは、水素および水素ベースの燃料は、2019 年の約 1%と比較して、2070 年には最終エネルギー需要の 13%を占め(図 2.16)、これらの燃料のほとんどは輸送および産業で使用される。
  - 輸送部門：2070 年の輸送用燃料の使用の 70%を占め、さまざまな輸送手段の最終エネルギー需要の大部分で利用される。
  - 産業部門：鉄鋼生産における還元剤としての利用がけん引してゆく。またアンモニアやメタノールの原料としても利用される。

Figure 2.16 Global final energy demand for hydrogen by sector and share of hydrogen in selected sectors in the Sustainable Development Scenario



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: TFC = total final consumption. *Synfuels* refer to synthetic hydrocarbon fuels produced from hydrogen and CO_2. Shares of hydrogen in the final energy demand include for transport modes ammonia and synthetic hydrocarbon fuels.

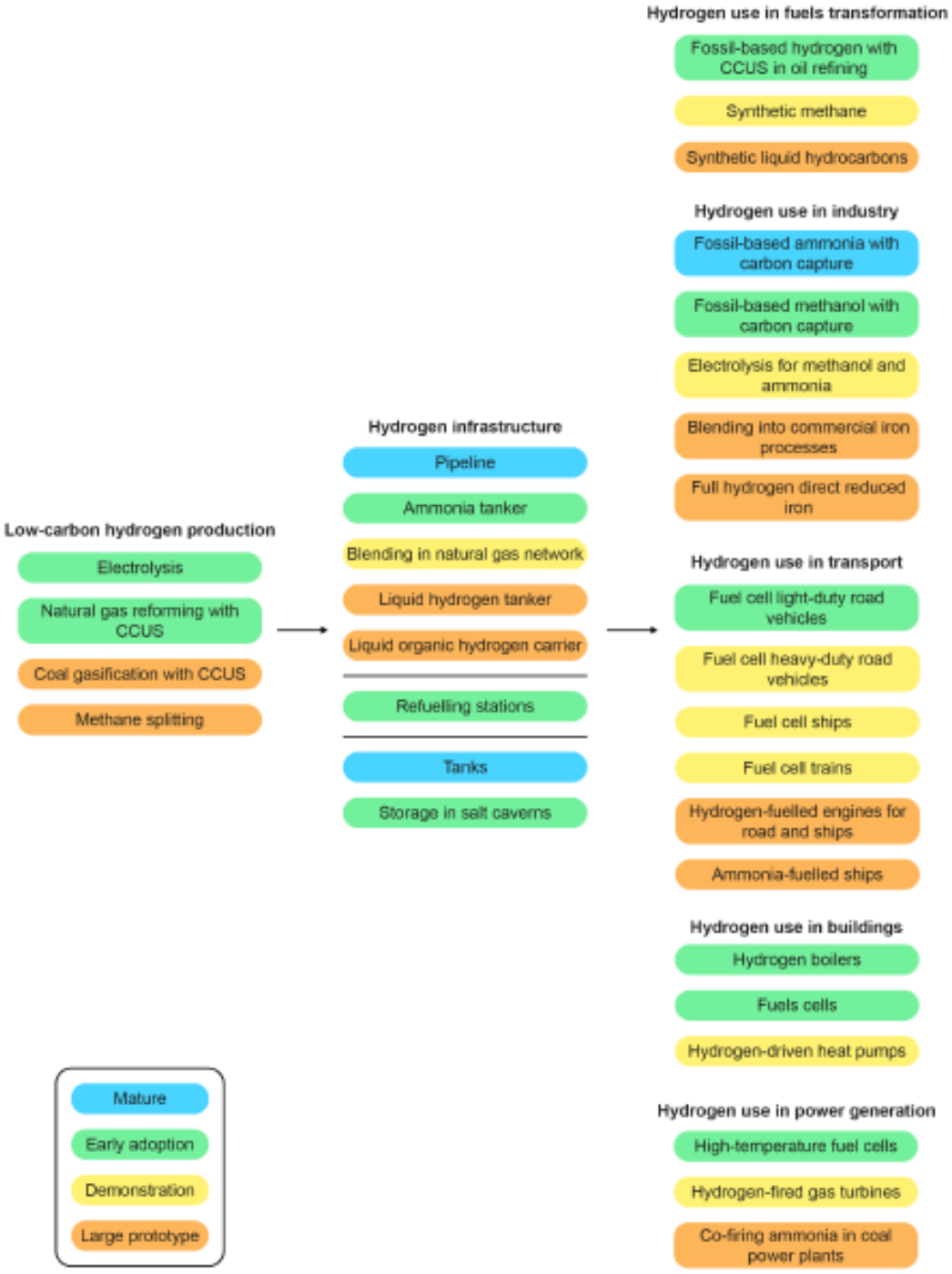
図 2.16 持続可能な開発シナリオにおける世界の最終エネルギー需要での水素（部門別）と主要部門での水素のシェア（2019 年から 2070 年）

- 現在の水素製造は、天然ガスおよび石炭から製造されているため、CO_2の排出要因となっている。持続可能な開発シナリオでは、低炭素水素に切り替わり、ほぼ電気分解により製造される。

水素バリューチェーンの技術準備

- 低炭素水素のバリューチェーンは、現在はまだ商業規模には達していない。それぞれの分野で異なる開発段階にあり、課題に直面している。
- 現在の低炭素水素製造において、再生可能エネルギー電力のコスト削減および大規模化が、今後の普及の鍵となる。また、CCUS 付き天然ガス改質もオプションの一つである。今後は、鉄鋼および長距離輸送での利用が期待されている。

Figure 2.18 Technology readiness level of technologies along the low-carbon hydrogen value chain



IEA 2020. All rights reserved.

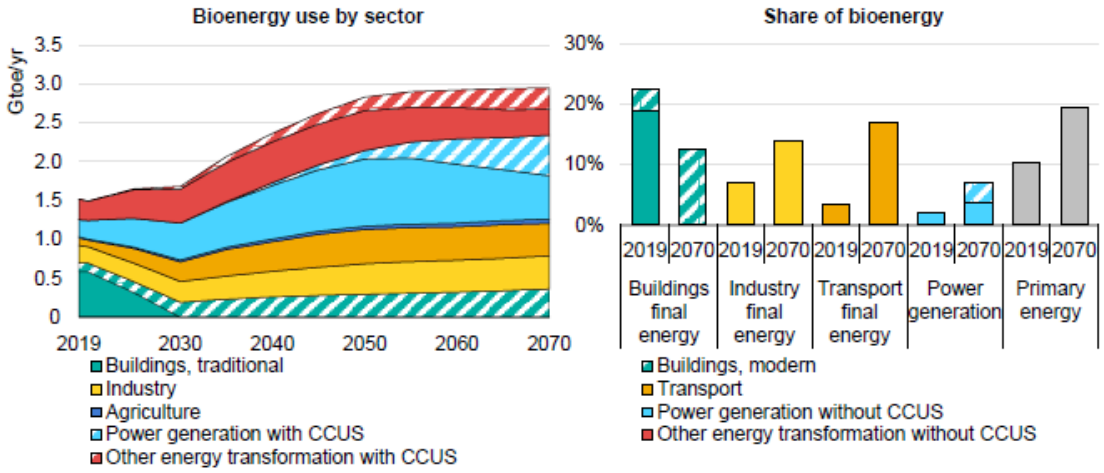
Notes: CCUS = carbon capture, utilisation and storage. Technologies included are at large prototype or at a more advanced stage. For more detailed information on individual technology designs for each of these technologies, and designs at small prototype stage or below, see: www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide.

図 2.18 低炭素水素バリューチェーンに沿った技術の技術準備レベル

バイオエネルギー

- バイオエネルギーは、エネルギー部門からの CO_2 排出量を削減する上で中心的な役割を果たす。持続可能な開発シナリオでは、バイオエネルギーは太陽光に次ぐ世界で 2 番目に大きな一次エネルギー源になり、エネルギー需要に占めるシェアは、現在のレベルから 2070 年にはほぼ 20%に倍増する(図 2.19)。
- バイオエネルギー需要の成長を持続可能な方法で実現するためには、社会的、環境的、経済的な悪影響を解決することが重要である。
- 2070 年のバイオエネルギーの使用の大半は、輸送用バイオ燃料の製造と、電力と熱の発生に使用される。いずれの場合も、その多くは CCUS を使用している。 バイオエネルギーと CCUS の組み合わせにより、CO_2 が除去され、負の排出が実現する。持続可能な開発シナリオでは、これらの負の排出により、2070 年にネットゼロ排出の目標を達成できる。

Figure 2.19 Global bioenergy demand by sector and share of bioenergy use in key sectors in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

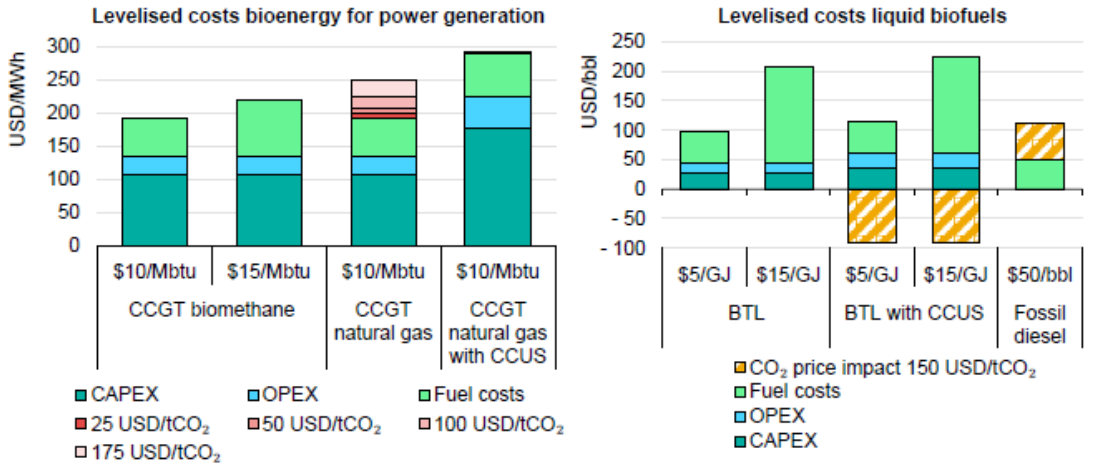
Notes: CCUS = carbon capture, utilisation and storage. *Other energy transformation* includes coal mining, oil and gas extraction, oil refining, coal and gas transformation and liquefaction, production of hydrogen and hydrogen-based fuels, and biofuels production with and without CCUS.

図 2.19 持続可能な開発シナリオにおける世界のバイオエネルギー需要(部門別)と主要部門でのバイオエネルギー利用のシェア(2019 年から 2070 年)

- 持続可能な開発シナリオでは、液体バイオ燃料は 2040 年代までは車両用燃料として活躍するが、その後は電力と水素の普及により減少してゆく。2070 年に向けては、航空燃料としての利用が拡大してゆく。
- バイオメタンは、地域差はあるものの既存の天然ガス導管から混入することで、暖房用など需要側での低炭素化に貢献する。

- バイオマスは、再生可能エネルギー発電として、低炭素化および変動電源対策としての役割で貢献し、BECCS により負の排出を実現する。
- バイオエネルギーはコストが高いため、炭素価格や燃費基準などの政策支援が必要である。
- バイオエネルギー資源は世界的に不均一に分布しており、必ずしも需要地の近くにあるとは限らないため、国際的に取引が発生する。

Figure 2.21 Competitiveness of bioenergy for power generation and biofuels, 2050



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: CAPEX = capital expenditure. OPEX = operating expenditure. CCGT = combined-cycle gas turbine; BTL = biomass-to-liquids. Bbl =barrel. MBtu = million British thermal unit.

CCGT: load factor: 10%; CAPEX: USD 1 000/kW without CCUS and USD 1 660/kW with CCUS; OPEX: 2.5% of CAPEX; gas price: USD 10-15/MBtu; net efficiencies: 61% without CCUS and 53% with CCUS; technical lifetime: 25 years; representative discount rate: 8%.

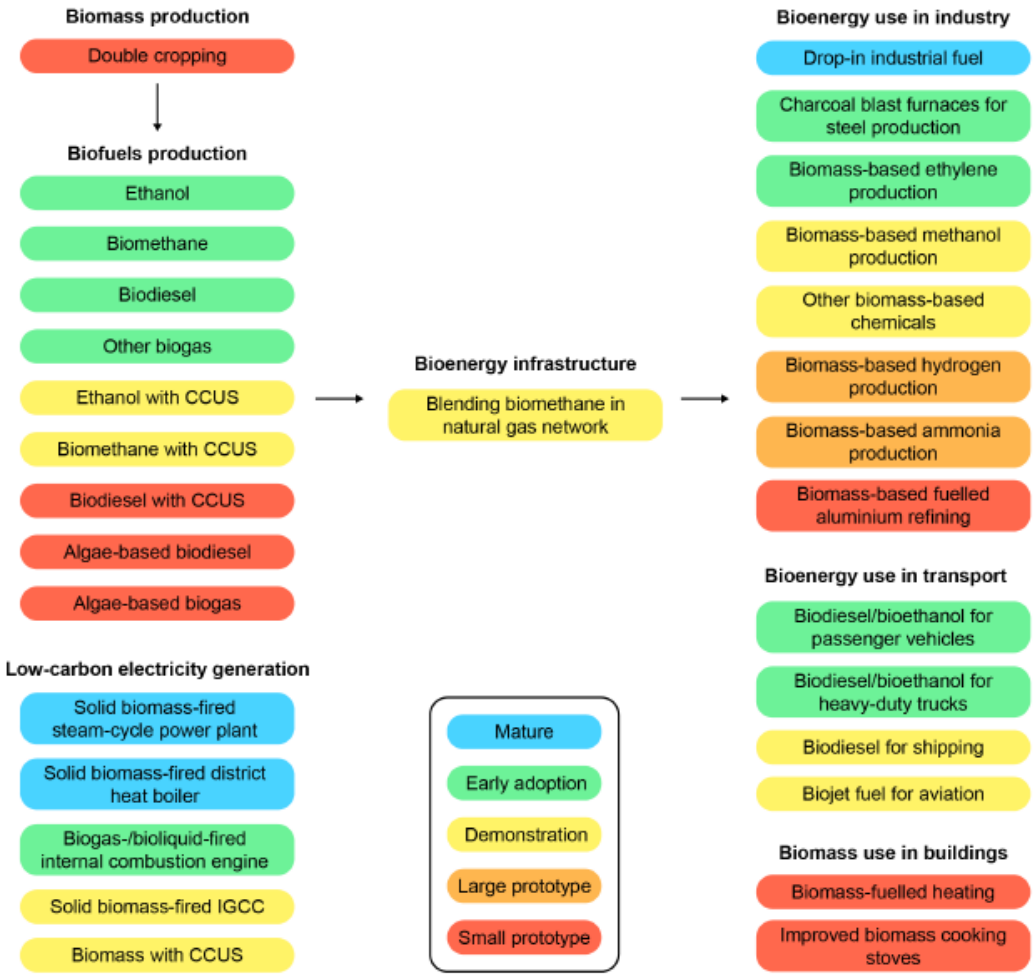
BTL: load factor: 90%; CAPEX without CCUS: USD 46/(GJ/yr); OPEX without CCUS: USD 3/(GJ/a); conversion efficiency without CCUS: 52%; CAPEX with CCUS: USD 63/(GJ/yr); OPEX with CCUS: USD 4/(GJ/yr); biomass feedstock price: USD 5-15/GJ; conversion efficiency without CCUS: 52%; capture rate with CCUS: 90%; technical lifetime: 25 years ; representative discount rate: 8%..

図 2.21 発電とバイオ燃料でのバイオエネルギーの競争力(2050 年)

バイオエネルギーバリューチェーンの技術準備

- バイオエネルギーの早期の商業化は難しく、現在はバイオマス火力発電や輸送用燃料として初期段階にある。
- ただし、他の技術と相対的に比較すると、短期的に脱炭素へ向かう手段としての可能性がある。
- BTL により、長距離輸送の燃料や航空燃料として利用することで脱炭素化へ貢献する。
- CCS との組み合わせは、負の排出に向けた重要な取り組みとなる。

Figure 2.22 Technology readiness level of technologies along the bioenergy value chain



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: CCUS = carbon capture, utilisation and storage. IGCC = integrated gasification combined cycle. Technologies included are at large prototype or at a more advanced stage. For more detailed information on individual technology designs for each of these technologies, and designs at small prototype stage or below, see: www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide.

図 2.22 バイオエネルギーバリューチェーンに沿った技術の技術準備レベル

・ 実質排出ゼロへ向けたエネルギー転換

- 単一の燃料や技術では、エネルギー部門全体が正味ゼロの CO_2 排出量に到達することは不可能である。 成否は、エネルギー部門の個々の部分や国固有の状況に合わせて調整された、幅広い燃料と技術にかかっている。
- 持続可能な開発シナリオで示されているように、実質ゼロの CO_2 排出量達成には、エネルギーの生産と使用の方法を根本的に変え、低炭素電力、バイオエネルギー、水素、水素ベースの燃料を合わせて、最終エネルギー需要の 70%以上を提供する必要がある。
- 発電は、再生可能エネルギー、CCUS、原子力など、利用可能な幅広い技術により、最初に脱炭素化した部門の一つである。世界の発電量は 2070 年までほぼ 3 倍と予測され、増加分の約 70%は最終需要部門の電力需要の増加分、残り 30%は、熱、水素、アンモニア、メタノール、水素ベースの合成炭化水素燃料など、他のエネルギーや産業用原料への変換に利用される。
- 持続可能な開発シナリオでは 2070 年に電解槽から約 300Mt の水素が生成され、そのために今日の世界の発電量の半分に相当する 13,750 TWh もの電力を必要とする。

  電解槽の容量は、現在の 170MW から 2070 年までに 3000 GW 余りに増加し、CCS による水素製造は、低コストのガス資源と CO_2 貯留が可能な地域でも重要な役割を果たす。
- 産業、運輸、建築部門の CO_2 排出量は、2070 年までにそれぞれ 90%以上減少する見通しである。産業部門では、電力使用量は 2 倍になり、2070 年までの累積排出削減量の約 4 分の 3 は、CCUS を含む未だ商業化されていない技術に依存する。電化は 2070 年までの輸送における累積排出削減量の 30%以上を占め、長距離輸送ではバイオ燃料と水素が電化に続く。建築物では、エネルギー効率や再生可能エネルギーと並んで、電化が主要な脱炭素化の手段である。
- 実質 CO_2 排出量ゼロへの移行には、クリーンエネルギー技術への多額の投資が必要である。2070 年までの全体的な投資ニーズは、持続可能な開発シナリオでは、公にされた公表政策シナリオよりも 31 兆米ドル(または 10%)高く、新規技術への投資は時間とともにますます重要になっている。2060 年代には、年間投資総額のほぼ半分が、現在実証実験または試作段階にある技術への投資である。

前書き

- 脱炭素化の速度とレベルは部門によって異なり、持続可能な開発シナリオでは 2050 年代に発電やその他のエネルギー変換部門の排出量がマイナスに転じ、運輸と産業からは 2070 年以降も排出が続く(**図 3. 1**)。

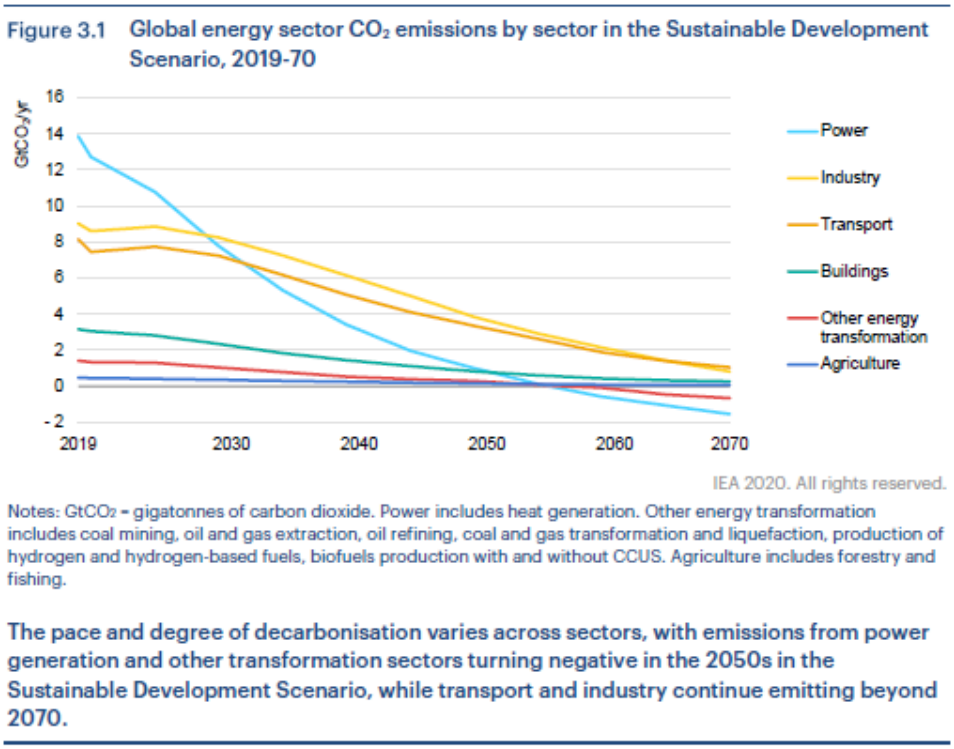


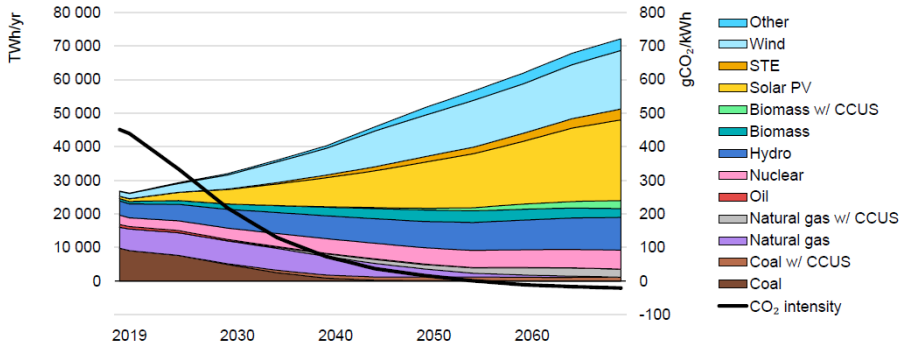
図 3.1 持続可能な開発シナリオにおける世界の需要部門別の CO_2 排出量（2019-2070）

- 部門ごとに動向が異なる理由は様々であるものの、主な理由は適切な技術の可用性に違いがあるためである。例えば、化石燃料を使用することなく鉄鋼を生産する技術はまだ存在しない。総じて実質排出ゼロに貢献できる技術はあるものの、それらはさらなる開発を必要とし、イノベーションが重要となる。また技術支援のための政策がなければエネルギー転換は達成できない可能性がある。
- 脱炭素化の動向について部門間の違いを説明するもう一つの重要な理由は既存設備の構成である。高価で耐用年数の長い設備(産業・電力のプラントおよび建築物、船舶や航空機)は脱炭素への進展を妨げる。
- エネルギーシステムの脱炭素化へ向けた技術選択は、国によって異なる。例えば豊富な再生可能エネルギー資源を持つ国では発電からの排出削減策として再生可能エネルギー技術に焦点を当て、低コストの化石燃料と CO_2 貯蔵手段を持つ国では産業・発電分野における CO_2 の改修・貯留・利用(CCUS)へ重点を置く可能性がある。建築物や運輸部門における脱炭素化策の場合は、地域暖房や地下鉄などインフラ技術の適用には国民がどこにどの程度集中して住んでいるかが考慮される。

発電

- 発電の技術変革は、クリーンエネルギー転換の中心的な要素である。脱炭素化は、発電の二酸化炭素排出原単位を低下させ、2019 年の 463 g CO_2 /キロワット時(gCO_2 / kWh)から 2055 年頃には実質換算でゼロ未満へ低下する。発電燃料ミックスの脱炭素化と最終消費における電化の進展は、持続可能な開発シナリオにおいて実質排出ゼロを達成するために中心的な役割を果たす。
- 太陽光発電(PV)、風力、その他の最新の再生可能エネルギー技術は、CCUS を備えた原子力発電所や火力発電所とともに、大量の CO_2 を排出することなくエネルギーを電気に変換する[7]。電化の急速な進展により、最終需要家ではさらに電力の低炭素化が進む。
- 世界の発電構成における再生可能エネルギー(CCUS によるバイオエネルギーまたは炭素回収貯留によるバイオエネルギー(BECCS)を含む)のシェアは、2070 年に 86%に達し、残りの 14%は原子力発電所(8%)、火力発電所(CCUS(5%)と水素(1%))由来である。(図 3.2)。

Figure 3.2 Global power generation by fuel/technology in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: TWh = terawatt-hours; gCO_2/kWh = grammes of CO_2 per kilowatt-hour; STE = solar thermal electricity; PV = photovoltaic; CCUS = carbon capture, utilisation storage. Other includes geothermal power, ocean energy and hydrogen.

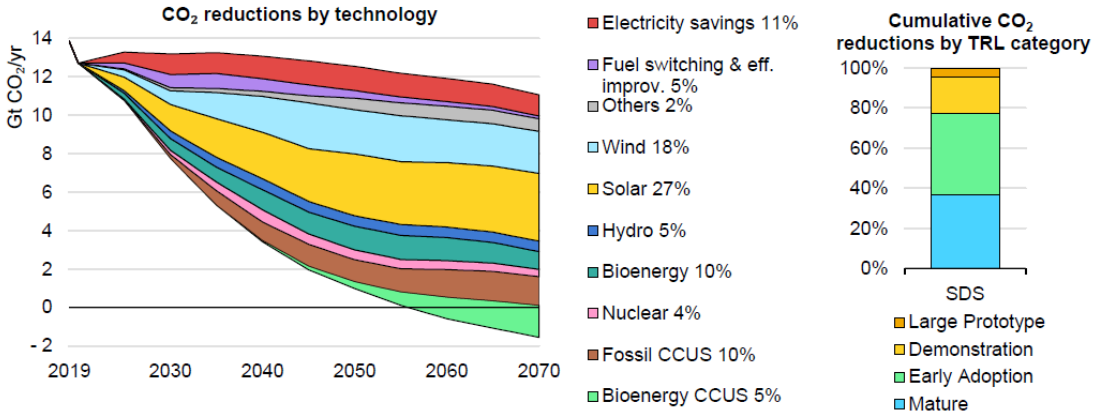
図 3.2 持続可能な開発シナリオにおける発電燃料/技術別の CO_2 排出量 (2019-2070)

- 低炭素電力から生産される熱、水素、アンモニア、メタノール、水素ベースの合成炭化水素燃料などの燃料および産業用原料は長距離道路貨物、海上輸送、航空など、電化が難しいエネルギーシステムの脱炭素化において特に重要である。2070 年までに、総発電量の約 19%が、水素および水素ベースの燃料、および水の電気分解に基づく原料の生産に使用される。
- 持続可能な開発シナリオにおける発電部門の世界累積 CO_2 削減量は公表政策シナリオ

[7] バイオエネルギーの場合、燃焼時に排出される CO_2 は、バイオマスが成長するにつれて吸収される CO_2 によって完全に相殺されると想定される。CO_2 回収を備えた火力発電所の場合、回収率が 90%と 99%の異なる設計が想定されている。

における削減量の約３５％であるそのうち再生可能エネルギーによる累積削減量は約62%を占め、次に CCUS(BECCS を含む)が 15%、原子力が 4%と続く(図 3.3)[8] 。持続可能な開発シナリオでは多くの発電技術を利用可能とするが、BECCS は商用規模への適用は実証段階としている。

Figure 3.3 Global CO_2 emissions in the power sector by scenario and decomposition of the difference by technology type



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: TRL = technology readiness level; eff. improv. = efficiency improvements; STE = solar thermal electricity. Others include geothermal and marine energy as well as hydrogen. Electricity savings refer to electricity demand reductions in end-use sectors through more efficient end uses of electricity, leading to emissions reduction in the power sector. The percentages in the labels indicate the contribution of each technology type to cumulative overall emissions savings by 2070. See Box 2.6 in Chapter 2 for the definition of the TRL categories *large prototype, demonstration, early adoption* and *mature*.

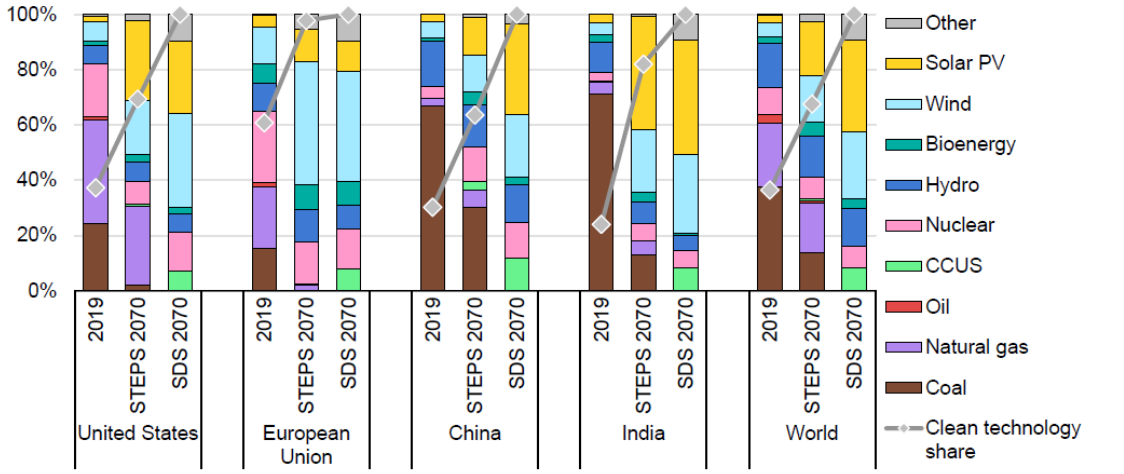
図 3.3 シナリオ別の各発電技術による CO_2 排出量および即応性レベル別の CO_2 排出量

- 持続可能な開発シナリオにおいてすべての地域の電力は、2070 年までにほぼ完全に脱炭素化されるが、発電における脱炭素化経路は、再生可能エネルギー資源および CO_2 貯蔵場所の利用可能性に応じて、地域による違いが生じる(図 3.4)。
- 太陽光発電、風力、原子力に加えて、天然ガスやバイオエネルギープラントに適用される CCUS は、その広大な CO_2 貯留の可能性を反映して、2070 年の発電構成の 7%を占める[9]。

[8] 示されている CO_2 削減量は、低炭素技術がすでに展開され、時間の経過とともに CO_2 が削減されるという公表政策シナリオに関連していることに留意する必要がある。このシナリオでは、低炭素発電の割合が 2019 年の 37%から 2070 年に 67%に増加する。これは、世界の平均二酸化炭素排出原単位が 2019 年の 463 gCO_2/kWh から 2070 年までに 190gCO_2/kWh に減少する主な要因である。

[9] CCUS に関する詳細は今後発行予定の Energy Technology Perspective　特別レポートにて説明される。

Figure 3.4 Electricity generation mix by region, fuel/technology and scenario, 2019 and 2070



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario; SDS = Sustainable Development Scenario; CCUS = carbon capture, utilisation and storage. Coal, oil, natural gas and bioenergy do not include CCUS. CCUS category includes coal, natural gas and bioenergy with CCUS. Other includes solar thermal, geothermal power, marine energy and hydrogen.

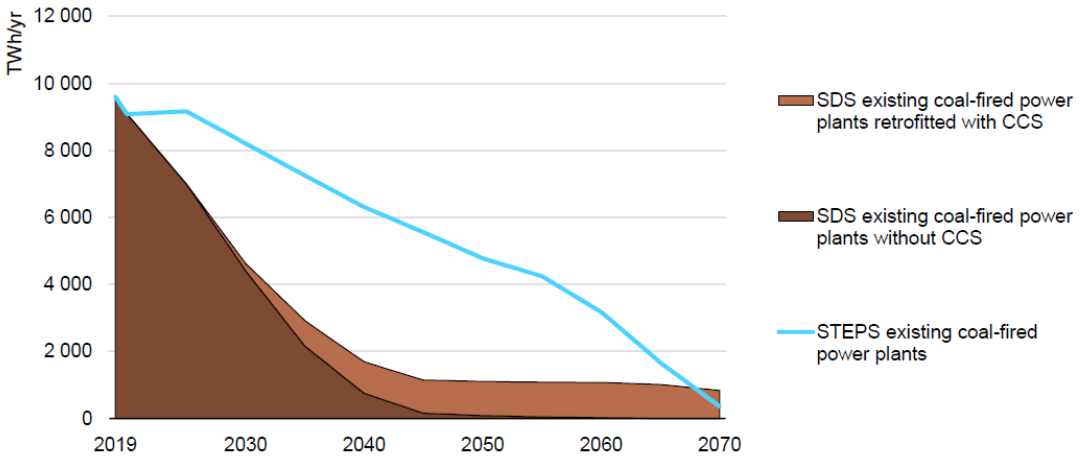
図 3.4 地域別の発電構成、燃料/技術およびシナリオ(2019 年から 2070 年)

- 発電における実質排出ゼロを達成するには、クリーン技術の迅速な展開が必要となる。持続可能な開発シナリオでは、2070 年までの期間の平均で毎年 475 ギガワット(GW)の太陽光発電が追加され(2019 年 108 GW)、190 GW の風力(2019 年 60 GW)、15 GW の原子力発電(2019 年 5 GW)、および 25 GW の CCUS を備えた火力プラントと 7 GW の BECCS(2019 年にはなし、2025 年以降の大規模展開を予測)が見込まれている。
- 電力需要が大幅に伸びているアジアの新興国におけるクリーン電力への移行において原子力は、重要な役割を担っている。この地域で世界の原子力発電容量増加分の 80%以上を占め、2019 年の 415 GW から 2070 年までに約 780 GW へと増加する。
- 発電における脱炭素化の主な障壁は、多くの火力発電所特に中国の石炭火力発電所が比較的新しいことである。既存あるいは現在建設中のすべての石炭火力発電所が技術的な耐用年数稼働すると、2050 年代後半には年間約 4.5 $GtCO_2$ を排出する。これらのプラントからの CO_2 排出量を明らかにし、持続可能な開発シナリオで 2050 年代に発電からの排出量を実質排出ゼロにするためには、さまざまな対策が必要である。(図 3.5)
- 石炭火力発電所への CCS 後付けでは、主に中国の 190GW クラスの新しい石炭火力発電所へ CCUS により改造が行われている。多くの既存の石炭火力発電所はその役割を変更し、主に電力システムの予備容量を提供するために使用されるため、発電量と CO_2 排出量が削減される。 わずかな技術的変更で実現可能な最大 15～20%のバイオマスとの混焼技術も、短期的には排出量の節約に貢献する。また、日本で成功裏に実証されている(中国電力、2018 年)ように、石炭火力発電所で同時にアンモニアを燃焼させ

ることも可能である。

- CCS のない既存の石炭火力発電所からの発電は、持続可能な開発シナリオでは段階的に廃止され、2045 年までにほぼ完全に廃止される。CO_2 回収によるプラント改修により、約 1,000 TWh の石炭生成が 2045 年以降も継続することが可能となる。(図 3.5)

Figure 3.5 Coal-fired electricity generation from existing plants in the Stated Policies and Sustainable Development scenarios, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: TWh = terawatt-hours; SDS = Sustainable Development Scenario; STEPS = Stated Policies Scenario; CCS = carbon capture and storage. Existing coal-fired power plants refers to plants in operation or under construction in 2019. Co-firing of biomass is applied to around 85% of the coal power plants retrofitted with CCUS.

図 3.5 シナリオ別の石炭火力発電所の発電量(2019 年から 2070 年)

- 変動型再生可能エネルギー(太陽光発電、陸上および洋上風力)は、持続可能な開発シナリオの 2070 年の発電構成の世界平均で 57%を占める。増加していく変動型再生可能エネルギーを電力システムに統合することは、クリーン電力への移行における主要な課題である。電力システムは、変動型再生可能エネルギー発電(VRE)が少ないときに需要に対応した電力を供給可能とするために、柔軟性を高める必要がある。このような柔軟性を提供する方法として、下記 4 つの方法が挙げられる。

フレキシブル発電

- 短時間で起動・停止が可能であり、その出力を VRE の出力調整に利用できる。例えば、ガスタービン、蒸気タービン、コンバインドサイクル発電所、ガスエンジン、エネルギーを貯蔵する太陽熱発電所、貯水池水力発電所、原子力発電所などがある。持続可能な開発シナリオでは、天然ガス、バイオメタン、または水素を燃料として 2070 年に平均 500 時間未満稼働する、CCUS のない約 4,000 GW のガスタービンとコンバインドサイクル発電所(総設備容量の 12%)が発電側の主要な調整予備容量となる。

電力ネットワークの広域連携

- より広い地理的領域全体で負荷を分散し、発電所によって提供される発電上限量を減

らす。高圧直流送電(HVDC)の東西送電網を朝夕の PV 発電送電に利用し、南北送電網は季節的なバランス調整に利用する。HVDC の優れた制御とメッシュ型の HVDC 送電網の開発を可能にする柔軟な高圧グリッド技術は、現在実証段階にあるが、従来の交流送電が経済的または現実的ではない大規模な洋上風力発電設備の風力タービンの統合を可能にすると同時に、長距離送電線において重要である。

デマンドレスポンス

- 特にピーク需要を削減し、負荷が低く電力が安い期間に電力を再供給することにより、高まる柔軟性のニーズに対応する上で大きな役割を果たす。EV や温水および暖房用(蓄熱を伴う)のヒートポンプへの電力供給に伴う電力の使用量増加は、デジタル化の後押しを受け、時間の経過とともに電力需要のシフトを促進する。

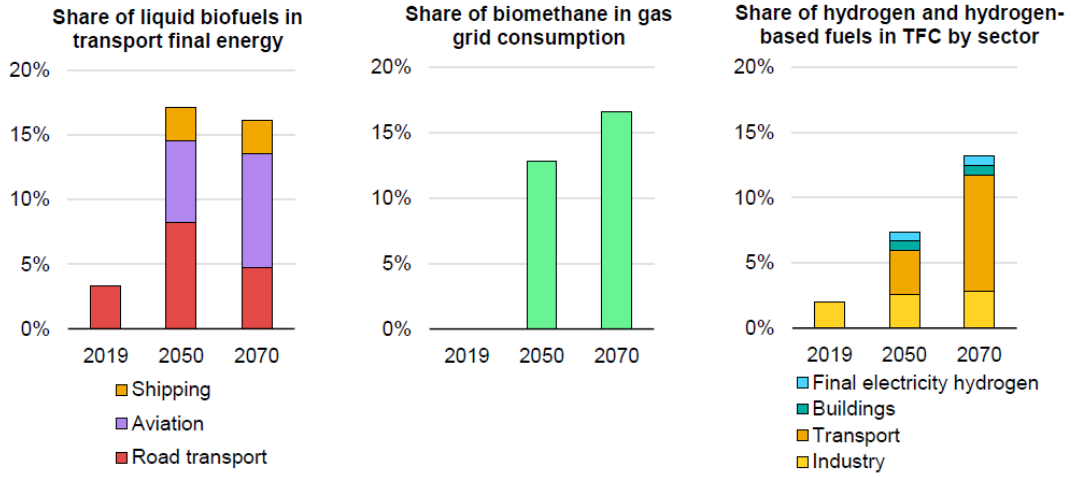
蓄エネルギー技術

- 蓄エネルギーにより、VRE の需要を超えた場合は電力を蓄え、VRE が不足する際に放電することが可能になる。何十年も前からある揚水発電は重要なオプションであり、2019 年の容量は 158 GW、2070 年までにほぼ 2 倍の 300 GW を見込む。蓄電池はコスト低下に伴い PV との組み合わせ、ユーティリティとしての蓄電プラント、グリッド調整力としての蓄電利用など利用の幅が広がっており、持続可能な開発シナリオでは、世界中の公益事業規模の蓄電容量が 2019 年の 173 GW から 2070 年には 2100 GW に増加し、そのほとんどを平均放電時間 5 時間の蓄電池が担っている。EV の普及も蓄エネルギーを促進する可能性がある。持続可能な開発シナリオで 2070 年に 20 億台が見込まれる小型 EV は、そのグリッド(V2G)インバーターによりグリッド調整力となり得る 150 TWh を超えるエネルギー貯蔵量を表す可能性がある。

代替クリーン燃料

- 実質排出ゼロを達成するために、電気、バイオエネルギー、水素、水素ベースの燃料(アンモニアと合成燃料)といった形で低炭素燃料は、持続可能な開発シナリオにおいて、2070 年のすべての最終エネルギー需要の約 70%を提供する、これは今日、化石燃料が占める割合である。持続可能な開発シナリオでは、液体バイオ燃料、バイオメタン、低炭素水素、その他の水素ベースの燃料(水素と CO_2 から生成されるアンモニアと合成炭化水素燃料)などの代替燃料が、輸送、建築物および産業における脱炭素エネルギーの使用に重要な役割を果たす。
- 全体として、代替燃料は 2070 年に世界の最終エネルギー需要の 20%を占め、水素および水素ベースの燃料だけですべての最終エネルギー需要の 13%を占める。液体バイオ燃料の使用は、最終エネルギー需要全体の 5%にすぎないものの、輸送部門の脱炭素化にとって重要である。液体バイオ燃料は、すべての輸送エネルギー需要の 16%を占め、特に航空、海運、大型トラックで使用される(図 3.6)。

Figure 3.6 Role of hydrogen and liquid and gaseous biofuels in the Sustainable Development Scenario



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: TFC = total final energy consumption. Hydrogen-based fuels refer to the fuel use of synthetic hydrocarbon fuels produced from hydrogen and CO_2, and ammonia. Final energy demand of hydrogen includes in addition to the final energy demand of hydrogen, ammonia and synthetic hydrocarbon fuels, the onsite hydrogen production in the industry sector and the final electricity produced from hydrogen.

図 3.6 持続可能な開発シナリオにおける水素と液体および気体のバイオ燃料の役割

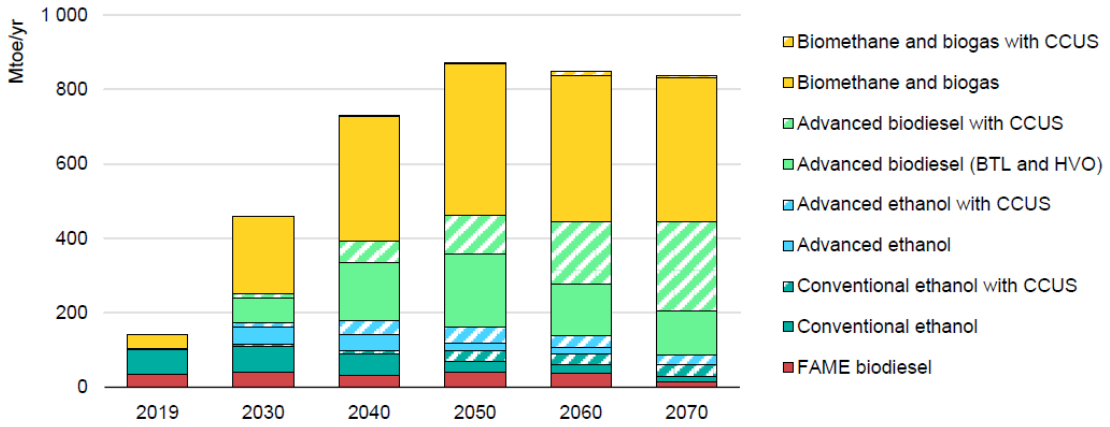
バイオ燃料

- 持続可能なバイオマスに由来する液体バイオ燃料は、従来の石油ベースのディーゼルやガソリンに代わる低炭素の代替燃料であり、エンジンの空燃比および車両に変更を加えることなく従来の燃料の一部あるいはすべてを代替可能である。従来からのバイオ燃料(大豆油や菜種油から精製された脂肪酸メチルエステル(FAME)バイオディーゼルと、砂糖作物(サトウキビなど)または穀物(トウモロコシや小麦など)から得られたエタノール)に関する技術は十分に確立されており、Covid-19 パンデミックが発生する前の生産量は 1 日あたり合計約 200 万バレル(mb/d)であった。ただし、従来からのバイオ燃料は食用作物との農地の競争、および潜在的な直接的および間接的な土地利用変化に伴う生物多様性への悪影響といった持続可能性への懸念があり、ケースバイケースで持続可能性を評価する必要がある。
- 次世代バイオ燃料は農業、林業、食品の残留物や廃棄物、または辺境の土地で栽培された非食用作物から生産され、持続可能性への懸念が従来型より低減されるが、バイオマスからバイオ燃料への変換に複雑な処理を必要とする。次世代バイオ燃料にはセルロース系エタノール、急速熱分解による燃料 (BTL)、廃食油、植物油を原料とする炭化水素製造によるバイオディーゼル (HVO)および水素化処理エステルと脂肪酸によるバイオジェット燃料 (HEFA)が含まれる。BTL は実証段階であり、実用化にはさらなる開発が必要であるものの、大量の都市固形廃棄物、林業残渣、農業残渣資源を

活用する手段として大きな期待が寄せられている。これらの燃料が真にカーボンニュートラルであるためには、原料の供給と生産の全プロセスでクリーンエネルギーを使用する必要があるが、現状必ずしも実行されていない。

- バイオ燃料は 2019 年における運輸部門の液体燃料需要の 3.5%を占め、世界合計は 95 Mtoe であり、その大部分は従来型のバイオ燃料であった。持続可能な開発シナリオでは、液体バイオ燃料は急速に拡大し、2040 年までに約 390 Mtoe (約 8 mboe/d、運輸部門の液体燃料生産の約 4 分の 1)に達する見込みである。これは主に BTL テクノロジーによって牽引され、2030 年までに大規模な実用化を見込んでいる (図 3.7)。

Figure 3.7 Global biofuels production by technology in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Advanced biodiesel here includes biojet fuel production. Biomethane and biogas numbers shown here include power generation, gas grid injection and transport use. The vast majority of liquid biofuels are consumed in transport, while a small portion is consumed in industry.

図 3.7 持続可能な開発シナリオにおける技術別バイオ燃料生産量推移
(2019 年から 2070 年)

- バイオガスとバイオメタンも持続可能な開発シナリオで重要な役割を果たす。バイオガスは、メタン、CO_2、および少量の他のガスの混合物であり、現在、約 8 GW の内燃エンジンでの発電、およびコージェネレーションプラントでの電力と熱の生成に利用されている。
- バイオガスは、新興経済国での従来のバイオマス使用に代わるクリーンな調理用燃料としても使用可能であり、CO_2 やその他の汚染物質を除去することで、さらにバイオガスをバイオメタンにアップグレードできる。バイオメタンは、天然ガスに混合して供給し、既存の設備で使用することも可能である。
- 持続可能な開発シナリオでは、世界中のバイオガスとバイオメタンの総生産量は、現在の 30 Mtoe から 2040 年には 335 Mtoe、2070 年には 390 Mtoe に増加する。天然ガスネットワークへのバイオメタンの世界平均混合シェアは、2040 年に 8%、2070 年には

16%へ達する。

- 液体と気体の両方のバイオ燃料の生産コストは、特に従来のバイオ燃料の場合、コストの 80%を占める原料コストの影響を強く受ける。化石燃料と炭素の価格も、従来の燃料と他の代替燃料のいずれとの間でもバイオ燃料の競争力に影響を与える。持続可能な開発シナリオにおける CCUS の役割の拡大は、主に今日よりもはるかに高い CO_2 価格によって牽引される。

水素および水素ベースの燃料

- 今日水素は、主に天然ガスの水蒸気改質によって生成され、主に化学および精製産業の原料として使用されている(IEA、2019a)。持続可能な開発シナリオでは、世界の水素生産は急速に成長し、エネルギー使用で約 4 億 4500 万トンの水素(MtH_2)(1 280 Mtoe)、2070 年にプロセスで使用する場合は 75 MtH_2(215 Mtoe)、これは原料としての水素の現在の使用レベルから 7 倍に相当する(図 3.8)。

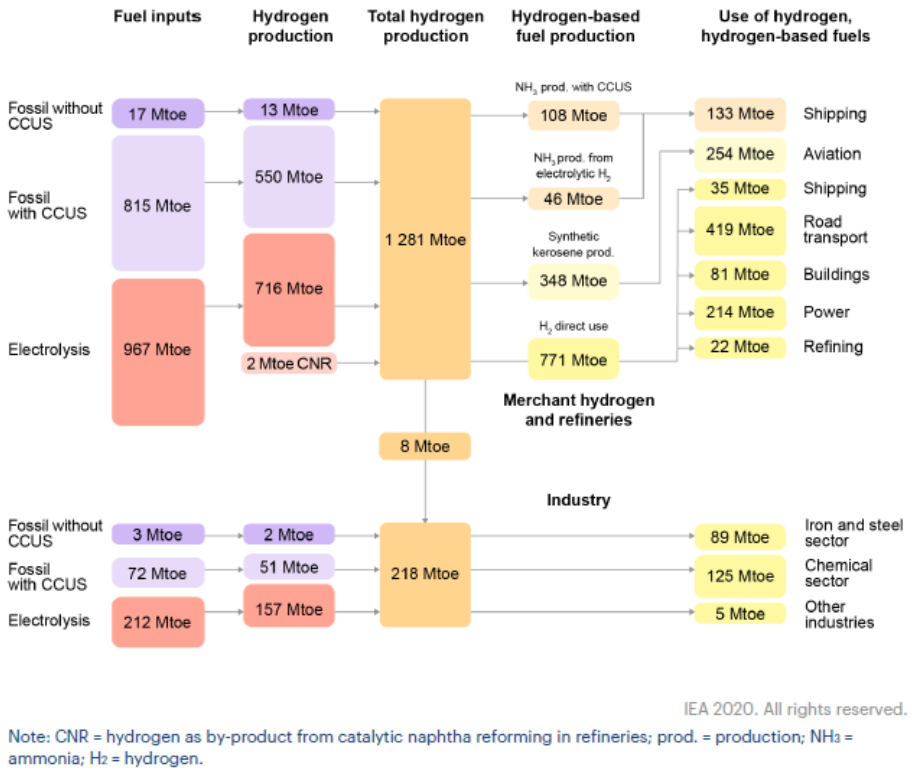


Figure 3.8 Global hydrogen production and demand in the Sustainable Development Scenario, 2070

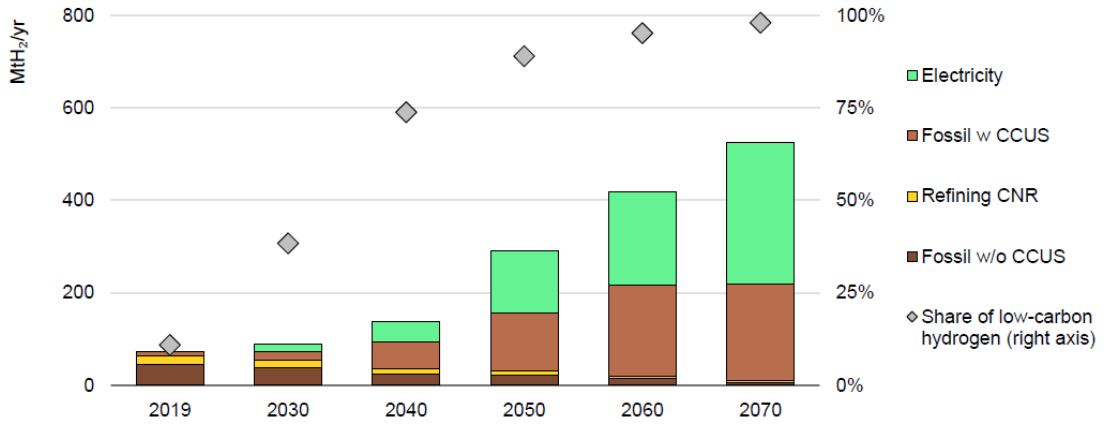
図 3.8：持続可能な開発シナリオにおける世界の水素生産と需要(2070 年)

水素

- 持続可能な開発シナリオにおいて当初は CCUS のない化石燃料は世界中の水素生産の

主な供給源として継続するものの、2030 年以降は、生産量のほとんどすべての増加は低炭素水素によるものとなり、太陽光や風力資源が良好な地域で再生可能エネルギーベースの電力を使用するか、化石燃料と CCUS の組み合わせ、特に天然ガスによるものが増加する(図 3.9)。

Figure 3.9 Global hydrogen production by technology in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



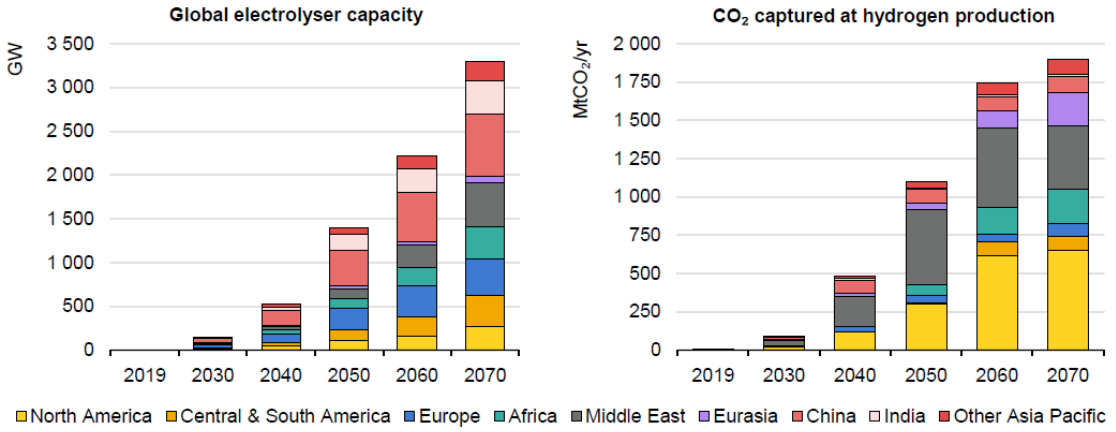
IEA 2020. All rights reserved.

Note: CNR = hydrogen as by-product from catalytic naphtha reforming in refineries.

図 3.9　持続可能な開発シナリオにおける世界の技術別の水素生産量（2019 年から 2070 年）

- 再生可能エネルギーのコストが下がるにつれ、電解水素への新たな関心が高まり、その結果、かなりの電解槽容量を備えたプロジェクトが委託または発表されている。たとえば、10 MW の電解槽と 20 MW の太陽光発電を組み合わせた設備が 2020 年の初頭に日本で稼働を開始し、固定燃料電池システムと燃料電池車に水素を供給した(NEDO、2020 年)。
- 持続可能な開発シナリオでは、世界の電解槽の容量は、2019 年の約 170 MW から 2070 年までに 3,300 GW 余りへと急速に増加し、年間平均約 4,000 時間の全負荷時間で稼働し、最小コストで水素を生産する(IEA, 2019a)地域の状況に応じて、系統電力と再生可能エネルギーベースの専用発電所の組み合わせにより電力が供給され、生産は、チリ、中国、ヨーロッパ、アフリカ、中東など、低コストの再生可能エネルギーを利用する地域や国が主体となる(図 3.10)。この急速な成長は、製造能力のスケールアップと、水の電気分解装置のコストを下げる能力に依存する。今日の世界の製造能力は約 1.5GW / 年であるが、持続可能な開発シナリオでは、2070 年までには 60 GW /年へと増加する。その結果、電解槽の平均コストは、今日の 1 キロワット電気(kWe)あたり 850-1 100 米ドルから、持続可能な開発シナリオでは 2050 年頃に 300 米ドル/ kWe 未満へと低下する。

Figure 3.10 Global development of electrolyser capacity and CO_2 capture from hydrogen by region in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

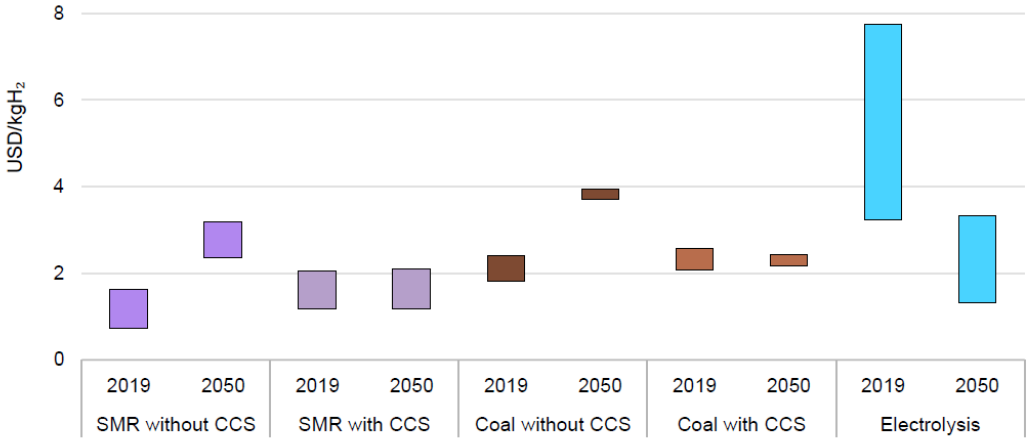
図 3.10 持続可能な開発シナリオにおける地域別の電解槽容量と水素からの CO_2 回収(2019 年から 2070 年)

- 電解槽容量の増強に加えて、電解用のクリーンな発電を急速に拡大する必要がある。2070 年までに、持続可能な開発シナリオでは約 13,750 TWh の電力が水素生産に使用され、これは世界の発電量のほぼ 20%に相当する。低炭素水素を生産するために必要な発電量の確保は、水素の展開における大きな課題であると同時に低コストの再生可能エネルギー発電を利用する大きな機会でもある。太陽光発電と風力発電のコストが下がる中、太陽光発電と陸上風力資源の両方が利用可能な地域では、ハイブリッドプラントで両方を組み合わせると、全負荷時間が増加しコスト削減につながる可能性が高い。[10]
- CCUS 利用による天然ガスまたは再生可能エネルギーベースの電力から生成される低炭素水素のコストは、主にガスと低炭素電力のコストに依存する。今日、天然ガスから生成される水素のコストは、0.7～1.6 US ドル/キログラム水素(kgH_2)の間で変動し、CO_2 回収を追加すると、コストが約 1.2～2.0 US ドル/kgH_2、再生可能電力から水素を生成する場合、通常約 3.2～7.7 US ドル/ kgH_2 のコストとなる(図 3.11)。

  持続可能な開発シナリオにおける再生可能技術と電解槽のコスト削減により、再生可能エネルギーベースの電力から水素を製造するコストは、世界のいくつかの地域で CCUS を使用した天然ガスと競争可能となる。

[10] 水素生産のための再生可能電力供給オプションについての分析は、The Future of Hydrogen の地理空間的分析に基づく(IEA、2019a)

Figure 3.11 Hydrogen production costs by technology in the Sustainable Development Scenario, 2019 and 2050



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: CCS = carbon capture and storage; SMR = steam methane reforming; coal = coal gasification. Electrolysis based on dedicated renewables-based generation.

Capital expenditure (CAPEX) assumptions: SMR without CCUS - USD 910/kWH_2 (2019 and 2050), SMR with CCS - USD 1 583/kWH_2 (2019) and 1 282/kWH_2 (2050); coal without CCUS - USD 2 672/kWH_2 (2019 and 2050); coal with CCS - USD 2 783/kWH_2 (2019 and 2050); electrolysis - USD 872/kW$_e$ (2019) and USD 269/kW$_e$ (2050).

Operating expenditure (OPEX) assumptions (as % of CAPEX): SMR without CCS - 4.7% (2019 and 2050), SMR with CCS - 3.0 % (2019 and 2050); coal with and without CCS - 5.0% (2019 and 2050); electrolysis - 2.2% (2019) and 1.5% (2050).

Efficiency assumptions (lower heating value): SMR without CCS - 76% (2019 and 2050), SMR with CCS - 69% (2019 and 2050): coal without CCS - 60% (2019 and 2050), coal with CCS - 58% (2019 and 2050); electrolysis - 64% (2019) and 74% (2050).

Full-load hour assumptions: SMR and coal gasification 8 322 hours (2019 and 2050); electrolysis 3 000-4 000 hours (2019) and 2 000-3 000 hours (2050). *Stack lifetime*: 100 000 hours.

System lifetime assumptions: 30 years.

Fuel price assumptions: natural gas - USD 1.4-6.3 per gigajoule (GJ) (2019) and USD 1.7-7.0/GJ (2050); coal - USD 1.6-3.8/GJ (2019) and USD 1.0-2.2/GJ (2050); electricity - USD 36-116 per megawatt-hour (MWh) (2019) and USD 20-60/MWh (2050).

CO_2 capture rate assumptions: SMR with CCS - 95%, coal with CCS - 90%.

CO_2 price assumptions: USD 0-15/tCO_2 (2019) and USD 180/tCO_2 (2050).

CO_2 transport and storage cost assumptions: USD 20/tCO_2. Representative *discount rate* for this analysis is 8%.

図 3.11 持続可能な開発シナリオにおける水素製造コスト(2019 年および 2050 年)

水素ベースの燃料：アンモニアおよび合成炭化水素

- 水素をアンモニアまたは合成炭化水素燃料に変換する主な利点は、体積エネルギー密度が高くなることであり、貯蔵と輸送が容易になり、車両、船舶、航空機に必要な燃料の体積が少なくなり、また、既存の化石燃料を使用するインフラとの幅広い互換性もある。アンモニアおよび合成炭化水素を生成するために必要な追加の手順は、純粋な水素を生成する場合よりもエネルギー損失が大幅に高くなる可能性があり、製品がより高価となる。 主に、航空および海運には適した代替案がないため、炭素価格の上昇やその他の政策に支えられて、持続可能な開発シナリオにおいて、特に長期的に、これらの業種でますます重要な役割を果たしている。

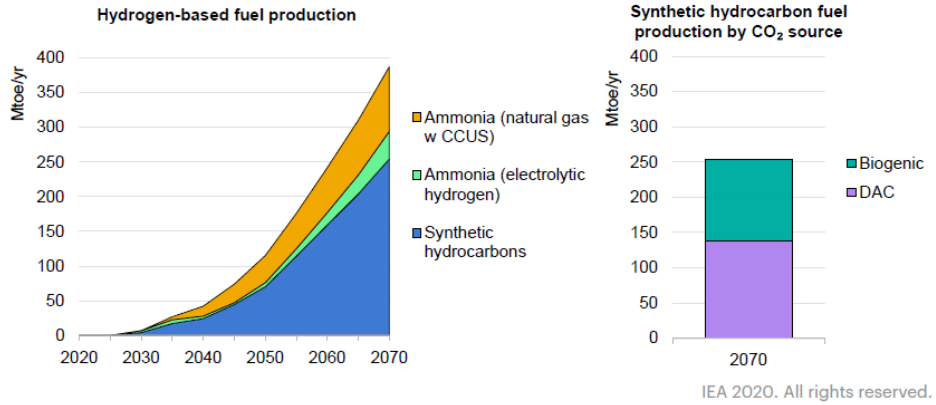
アンモニア

- アンモニアは確立されたハーバーボッシュ法を使用して、低炭素の水素と窒素から生成される。このプロセスで使用される水素は、天然ガスの水蒸気改質から得られるが、電解水素から生成することも可能である。現在の技術では、電解水素からアンモニアを生成するには、アンモニアの Mtoe あたり合計 23,000 GWh の電力が必要であり、その約 90%は水素の生成に使用され、約 7%は窒素の生成に、残りはハーバーボッシュ合成に使用される。電解水素からのアンモニア生成の全体的なエネルギー効率は LHV(低位発熱量)ベースで約 50%である。アンモニアは毒性があるため、その取り扱いには注意が必要であり、これは専門的な訓練を受けたオペレーターに限定されることを意味し、その可能性を制限する可能性がある。

合成炭化水素(メタン、ディーゼル、灯油、メタノール)

- 合成炭化水素の製造方法には、一酸化炭素(CO)を炭素源として使用するフィッシャー・トロプシュ法など、合成炭化水素の製造に使用できるいくつかの方法がある。カーボンニュートラルであるためには、この CO は、バイオエネルギー源からの生体 CO_2 から、あるいは直接空気回収(DAC)技術を使用して大気から捕獲された CO_2 から生成される必要がある。DAC を介して捕捉された CO_2 と一緒に電解水素から 1 リットルの合成灯油を生産するには、約 25kWh のエネルギーが必要である。この 80%以上は水素の生成に使用され、約 15%は DAC を介した CO_2 の回収に使用される電気および熱エネルギーであり、残りはフィッシャー・トロプシュ法に使用される。現在の技術では、エネルギーの約 40%のみが最終的な液体製品になるが、プロセスの最適化により、全体的な変換効率が 45%を超える可能性がある。

Figure 3.12 Production of hydrogen-based fuels in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



Notes: Biogenic CO_2 refers to CO_2 captured at biomass conversion processes, such as biofuel production or biomass-fired power plants.

図 3.12：持続可能な開発シナリオにおける水素ベース燃料の生産(2019 年から 2070 年)

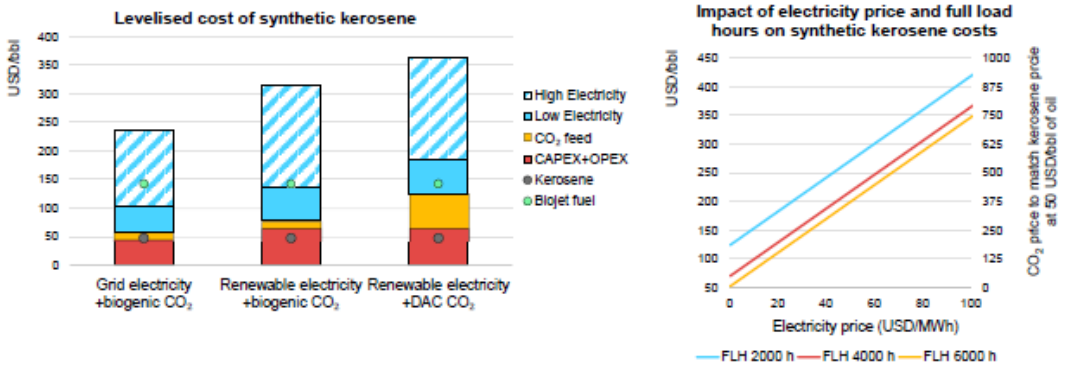
- 持続可能な開発シナリオでは、2070 年に 250 Mtoe の合成炭化水素が主に電解水素から

生成され、130 Mtoe のアンモニアが生成される。そのうち 70%は CCUS を含む天然ガスから生成され、残りは電解水素から生成される(図 3.12)。合成灯油は 2070 年に航空エネルギー需要の 40%を占め、アンモニアは海上輸送の燃料需要の 50%以上を占める。これらの燃料を生産するには、約 390 Mtoe の電解水素、つまり 2070 年の総発電量の約 9%と、バイオマス使用または DAC からの原料として 700 Mt の CO_2 が必要となる。

- 水素由来燃料もエネルギー貿易において重要な役割を果たす可能性があり、再生可能エネルギーのポテンシャルが非常に高い国が、同様の資源を持たない国へ水素由来燃料の形で太陽光または風力資源の輸出できるようになる。この貿易の可能性は、いくつかの国の水素戦略において、例えばドイツと日本は水素輸入の事例を認識し、オーストラリアはそれらを提供する機会を認識している。 持続可能な開発シナリオでは、世界で生産されているすべてのアンモニアの約 60%、合成灯油の 50%が 2070 年に国際的に取引され、水素および水素ベースの燃料の取引の可能性を強調している。[11]
- クリーンなアンモニアおよび合成炭化水素燃料のコストは、さまざまな要因、特に水素のコストに依存する。水素からの変換プロセスの効率は、現在合成炭化水素で約 40%、アンモニアで 50%であるが、これらの効率を改善すると、製造コストの削減につながる。合成炭化水素燃料の場合、原料の CO_2 の利用可能性とコストも全体コストへ影響する要因である。CO_2 コストは現在、エタノールプラントからの 1 トンあたり 30 米ドルから、DAC からの 1 トンあたり 135〜340 米ドルの範囲にあり、CO_2 の排出価格、CO_2 の長期地中貯蔵による利益レベルによって決まる。
- 水素ベースの燃料の競争力は、CO_2 価格などで化石燃料の使用にペナルティを課す、あるいはクリーン燃料基準などのクリーン燃料の使用を奨励するなどの政策措置にも依存する。例えば、合成灯油が 200 米ドル/バレルのコストで生産できる場合、合成灯油が 50 米ドル/バレルの石油価格で化石灯油と競争できるようになるには、375 米ドル/トンの CO_2 価格が必要になる。(図 3.13)合成炭化水素を従来の化石燃料と競争力のあるものにするためには、低い電力コストと高い CO_2 価格の組み合わせが必要である。

[11] ここでのアンモニアの生産と貿易は、輸送燃料としての使用を指し、化学製造業におけるアンモニアの生産と使用は含まれていない。

Figure 3.13 Projected synthetic kerosene production costs from different sources and impact of electricity costs and full-load hours, 2050



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: bbl = barrel; FLH = full-load hours. Costs projected in 2050. Left graph is a sensitivity analysis considering the use of dedicated renewables-based electricity and CO_2 from DAC as the CO_2 feedstock.

Capital expenditure (CAPEX) assumptions: USD 355/kW_e with grid electricity, USD 269/kW_e for electricity from dedicated renewables-based plants and USD 564/kW of fuel for the synthesis stage.

Operating expenditure (OPEX) assumptions: 1.5% of CAPEX for electrolysis and 4% for the synthesis stage.

Efficiency assumptions (lower heating value): 74% for electrolysis and 73% for the synthesis stage.

Full-load hour assumptions: 5 000 hours for grid electricity and 3 000 hours for electricity from dedicated renewables generation.

Stack lifetime: 100 000 hours. System lifetime: 30 years.

Electricity price assumptions: USD 15-44/MWh for grid electricity and USD 20-60/MWh for electricity from dedicated renewables generation.

Kerosene and biojet fuel prices based on current prices.

CO_2 feedstock price assumptions: USD 30/tonne CO_2 for biogenic CO_2 from biofuel conversion plants and USD 142/tonne CO_2 from DAC. Representative *discount rate* for this analysis is 8%.

図 3.13 さまざまな要因別の合成灯油製造コストの予測と、電気料金と全負荷時間の影響(2050 年)

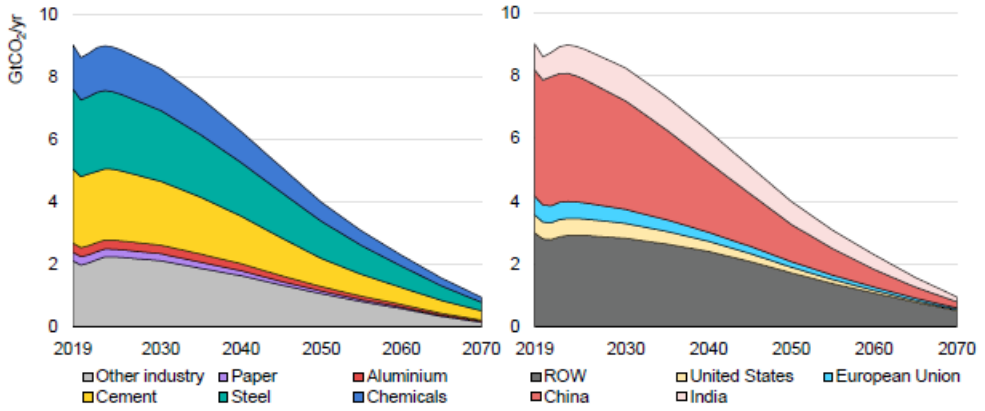
産業

- 産業部門は、プロセスのエネルギー消費原単位が高く、設備(工場や機械)の耐用年数が長く、一部の業種では従来の化石燃料に代わる低炭素の代替品がないといった理由から、CO_2 排出量を大幅に削減することが特に難しい[12]。これは、持続可能な開発シナリオの予測に反映されている。エネルギー転換後の 2070 年には、その排出量は 2019 年より 90%少ないにもかかわらず 2 番目に大きな CO_2 排出源となり、排出量の約 40%を占める(図 3.14)。
- 今日の産業部門からの CO_2 排出量の約 70%は、化学薬品、鉄鋼、セメントの生産時に由来し、2070 年までにほぼ 80%に増加する。これは、他のエネルギー消費原単位の低い業界が、その年までにほぼゼロ排出に達するためである。
- 現在化石燃料は最終的な産業エネルギー需要全体の約 70%を占め、化学、鉄鋼およびセメントの生産により産業化石燃料総需要の約 60%を占めている。石炭はこれらの材

[12] 化学、鉄鋼およびセメント業に対する技術の必要性と即応性については、第 4 章で解説される。

料の生産に使用される主要なエネルギー源であり、総エネルギー需要の約 50%を占めるが、化学では石油とガスも原料と燃料の両方として多用される。

Figure 3.14 Global direct CO_2 emissions in industry by sub-sector and region in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



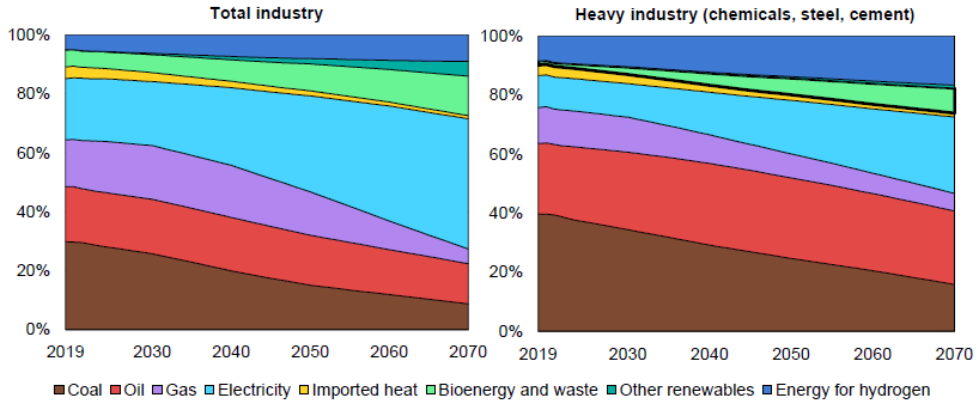
IEA 2020. All rights reserved.

Notes: ROW = rest of world. Includes direct energy-related and process emissions. Other industry includes less energy-intensive industries such as food and beverage, mining and textiles.

図 3.14 持続可能な開発シナリオにおける業種および地域別の産業 CO_2 排出量(2019 年から 2070 年)

- 2070 年までに、産業部門における化石燃料使用は持続可能な開発シナリオでは 60%以上削減され、主に電気とバイオエネルギーに置き換えられる(図 3.15)。残りの CO_2 排出量の 4 分の 3 余りが回収され、恒久的に貯蔵される。

Figure 3.15 Final energy demand by fuel shares for total industry and selected sub-sectors in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Industry final energy demand refers to the IEA Energy Balance (IEA, 2020d) boundaries of total final consumption by industry, non-energy use for chemical feedstocks and energy consumed in the transformation sector by blast furnaces and coke ovens.

図 3.15 持続可能な開発シナリオにおける全産業および 3 業種の最終エネルギー需要に対する燃料シェア (2019 年から 2070 年)

- 持続可能な開発シナリオでは、業界の電力消費量は 2070 年までに 2 倍以上になる。電気は、短中期的には直接低温および中温の熱に使用され、長期的には電解水素製造、鉄鋼製造の還元、および化学物質の原料として使用される。
- 特に水素は、産業部門における水素の需要が 2070 年までに 80%(約 360 Mtoe)増加し、産業部門の総エネルギー需要の 9%を占めるため、より多くの電力を必要とする。持続可能な開発シナリオでは、2070 年に消費された水素の 60%が水の電気分解によって生成され、残りの大部分は CCUS を備えた化石燃料発電所から生成される。
- 持続可能な開発シナリオの太陽熱や地熱などの再生可能エネルギー利用拡大のほとんどは、温度熱要件が低い、エネルギー消費原単位の低い産業の利用によるものである。

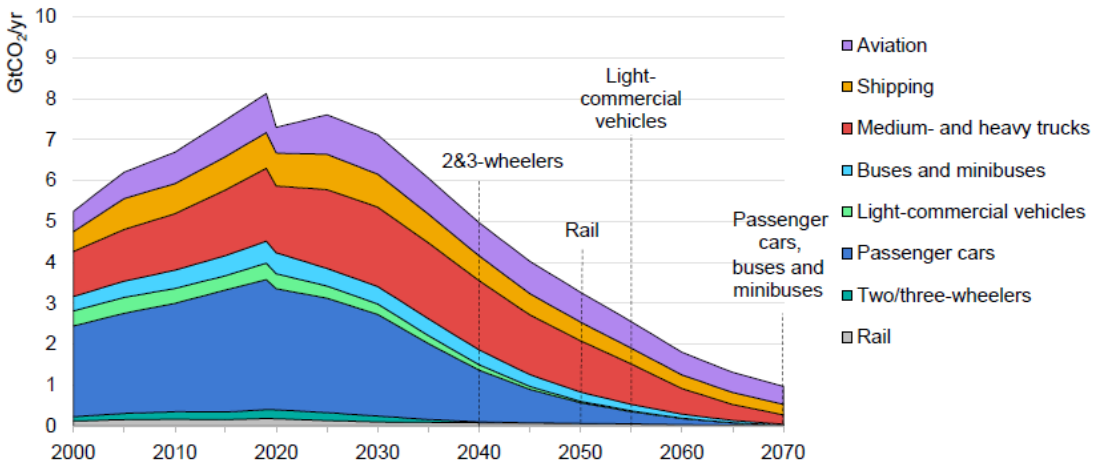
運輸

- 今後半世紀にわたって運輸部門の CO_2 排出量を削減するためには、人と貨物を動かす輸送方式の構造転換、低炭素エネルギーへのシフト、そしてエネルギーをより効率的に使用することに重点を置くことが必要である。これには幅広い技術の組み合わせが必要であり、その多くは開発中あるいは商品化の初期段階にあるが、これらには、車両、駆動装置、エンジン、代替燃料をサポートするために必要なインフラ、サービスプロバイダーがデータを活用するためのデジタル技術およびソフトウェアが含まれる。
- 持続可能な開発シナリオでは、運輸部門で使用される化石燃料からの世界の直接 CO_2 排出量は、2019 年の 8.1Gt から 2070 年までに 1Gt へとほぼ 90%減少する。(図 3.16)。

  これは主に、脱炭素化された電気を動力源とする電気自動車へのシフトを反映したもので、2070 年の排出量のほとんどすべては、中大型トラック、船舶、および航空に由来し、これらについては代替のゼロカーボン燃料および技術への切り替えが特に難しい。[13]
- 持続可能な開発シナリオにおける輸送需要は、2019 年から 2070 年の間に移動距離が 2 倍、自動車の所有権は 60%の増加、旅客機と貨物機の数は、3 倍あまりを見込んでいる。燃料需要としては、バイオ燃料の生産は 2019 年の 2 mb/d から次の 10 年で 5mb /d に拡大する。電気自動車と燃料電池自動車のサポートインフラとして、2030 年までに約 1,900 万の公共充電器と約 13,000 の水素燃料補給ステーションが建設される。

[13] 中大型トラック、船舶および航空に対する技術の必要性と即応性については、第 5 章で解説される。

Figure 3.16 Global CO_2 emissions in transport by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Dotted lines indicate the year in which various transport modes have largely stopped consuming fossil fuels and hence no longer contribute to direct emissions of CO_2 from fossil fuel combustion. Residual emissions in transport are compensated by negative emissions technologies, such as BECCS and DAC, in the power and other energy transformation sectors.

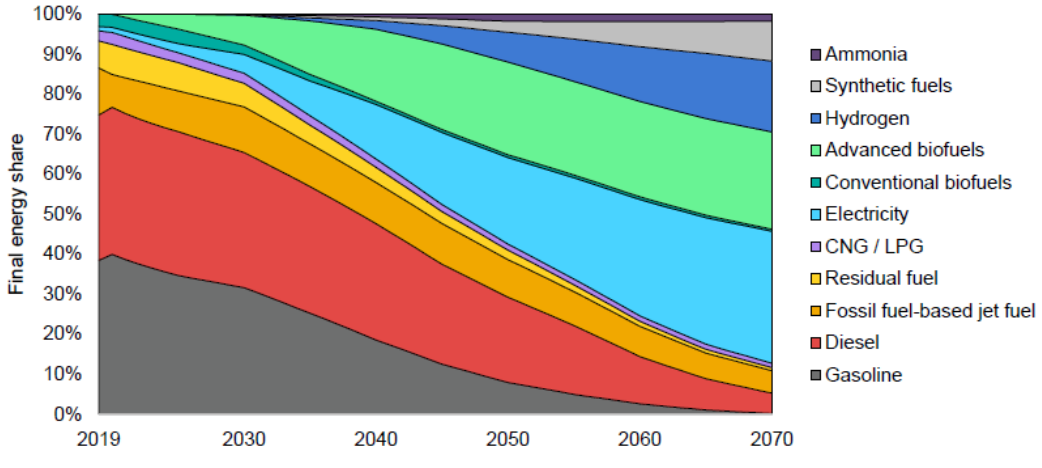
図 3.16 持続可能な開発シナリオにおける輸送方式別の世界の CO_2 排出量（2000 年から 2070 年）

- 様々な輸送方式における排出量削減の速度には、設備の耐用年数、代替の低炭素燃料の採用範囲、電化の範囲、およびより持続可能な方法で乗客の移動と貨物サービスを提供する範囲といった要素が関係する。
- **二輪車/三輪車**は耐用年数が 10 年を超えることはまれであり、電化が 2030 年までに完了、燃費が 2～3 倍改善され、2040 年までには CO_2 排出量がほぼゼロになる。
- **鉄道**も主に電化によって CO_2 排出量が急激に削減される。2050 年代半ばまでに電化され、燃料電池やバッテリー式電動駆動装置の導入が見込まれる。
- **小型の商用車**は短期間で急速に電気への転換、その後長時間の運転が必要な場合は水素燃料電池への切り替えが見込まれ、2050 年代半ばに正味ゼロ排出量を達成する。
- **乗用車**は 2030 年代初頭にハイブリッド電気自動車が約 15%とピークに達し、その後 2050 年までにフルバッテリーEV に徐々に置き換えが進む。中国、EU、日本、米国がゼロエミッション車(電気自動車や燃料電池電気自動車を含む)への移行を主導し、従来の自動車は 2040 年代に販売を終了するが、他の国では 2060 年まで販売され世界全体としては 2070 年の数年前にようやくゼロエミへ近づく。2070 年には EV が 90%、燃料電池車が 10%となる。エネルギー消費原単位は電動駆動装置の効率が 3～5 倍となることから[14]、2040 年以降 EV 化の進展に伴い急激に低下する。

[14] 持続可能な開発シナリオは、2030 年に販売された陸上車両の 30%を EV とする IEA のキャンペーン(EV30

- **電気バス・ミニバス**は補助金制度なども後押しして 2070 年までにバスの約 3 分の 2 は蓄電池式の EV、4 分の 1 は水素燃料電池バスへの切り替えが見込まれる。ただし、長距離バスではディーゼルまたはバイオ燃料への燃料代替がしばらく続く。長期的には燃料電池や蓄電池を用いた電化も長距離輸送における競争力を確保する可能性がある。
- 運輸部門全体として、エネルギー効率の改善は、特に 2040 年までの期間において、持続可能な開発シナリオにおける CO_2 排出量の削減に最大の貢献となっている。
- 道路輸送では、ここ数十年の燃費の改善は、主に燃費/ CO_2 基準によって推進され、「ボーナス・マルス」タイプ[15]の支援策、都市レベルの政策などによって推進されグローバル燃料経済イニシアチブ(GFEI)が設定した、2005 年と比較して 2030 年までに新規登録された乗用車の燃費を 50%向上させるという目標も達成できる見込みである。
- 電化、バイオ燃料、その他の低炭素燃料(水素と合成炭化水素)へのシフトによる CO_2 排出削減量は、持続可能な開発シナリオにおける運輸部門からの 2070 年までの世界の排出削減量の 70%を占める。当初、バイオ燃料は重要な役割を果たすが、2040 年代には、電動駆動装置、水素および合成燃料が利用可能になり、競争力が高まるにつれて、バイオ燃料は姿を消す。バイオディーゼルは中期的には船舶に使用され、エタノールは航空用のバイオジェット燃料の製造に使用される。

Figure 3.17 Global transport sector energy consumption by fuel in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: CNG = compressed natural gas; LPG = liquefied petroleum gas. Fossil fuel-based diesel takes longer to be replaced in the transport sector fuel mix than fossil fuel-based gasoline, as alternatives for diesel in heavy-duty trucking and intercity buses take longer to deploy.

図 3.17 持続可能な開発シナリオにおける世界の運輸部門のエネルギー消費の燃料割合(2019 年から 2070 年)

@ 30)の目標を達成する。対象には、自動車、LCV、バス、トラックが含まれ、EV にはバッテリー、プラグイン、燃料電池の電動パワートレインが含まれる、二輪車や三輪車は対象外。

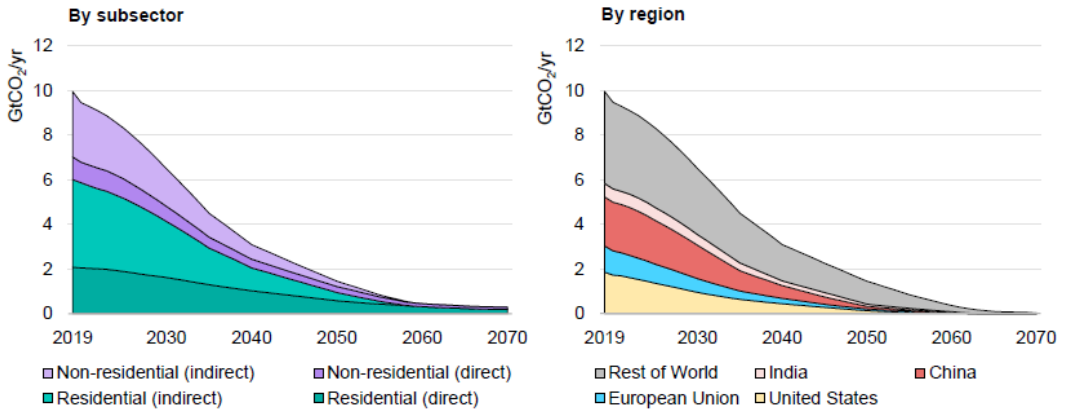
[15] フランスのボーナスマルスプログラムは、「feebates」を最初に実装したものです。
Feebates は燃料消費量の多い車への車両の購入時または登録時の税金で、その収入はエネルギー効率の高い車の購入に対する補助金の資金として使用される。

- 2070 年までに、運輸部門の最終エネルギー需要の 30%が電気(2019 年 1%)となり、バイオ燃料は 36%(2019 年 3%)を、アンモニア、水素および合成燃料は輸送最終エネルギー需要のほぼ 4 分の 1 を提供する(図 3.17)。
- 蓄電池は運輸部門の脱炭素化を可能にするコア技術である。[16]リチウムイオン(Li-ion)バッテリーは、小型 EV で広く使用されると予測され、広く普及することでコストの低下がすすむ。リチウムイオンに代わる素材としてキログラムあたり 400～500 ワット時(Wh/kg)の密度を達成できるリチウム金属アノードを備えた全固体電池が最も進んでおり、トヨタは 2020 年代初頭に車両で全固体電池を実証する予定である。次世代タイプのバッテリーは 2025 年から 2035 年の販売開始を見込んでいる[17]。

建築物

- 住宅、オフィス、ショップ、ホテル、学校、その他の商業施設および公共施設を含む建築物は、今日、世界中で消費される最終エネルギーの 30%(または約 3,100Mtoe、世界の約 55%の電力消費を含む)、建設段階も含めると約 37%を占めている。[18]
- 2019 年に空調、給湯、調理、その他のサービス用途で世界の化石燃料燃焼からの直接排出量は約 3 Gt CO_2 に達した(図 3.18)。

Figure 3.18 CO_2 emissions from the use phase of buildings by sub-sector and region in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

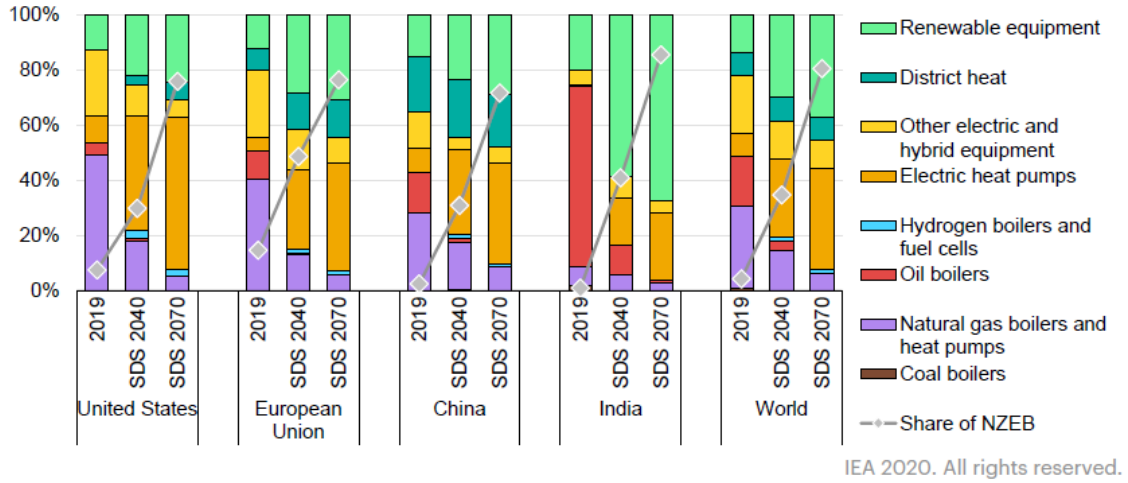
Note: Indirect emissions include the emissions associated with the generation of electricity and heat consumed in buildings.

図 3.18 持続可能な開発シナリオにおける用途別および地域別の建築物使用段階からの CO_2 排出量（2019 年から 2070 年）

[16] 持続可能な開発シナリオへのリチウムイオン電池の貢献は、脱炭素化された発電と、重要な電池材料(コバルト、後にリチウムなど)の再利用とリサイクルの確保に基づいている。
[17] 電気自動車用バッテリーの最近の革新と潜在的な革新の詳細については、Global EV Outlook 2020 (IEA, 2020c)の 4 章を参照
[18] なかでも住宅は、床面積(80%)、最終エネルギー使用量(70%)、CO_2 排出量(60%)を占め、建築物の中で群を抜いて最大の構成要素となっている。

- 建築物で使用される膨大な数の電気・電子機器(例：エアコン、ヒートポンプ、家電製品、照明)による電気と熱の消費による間接 CO_2 排出量は、9.8 $GtCO_2$ に達する。材料の生産および建築物の建設における CO_2 排出量は、3.5 $GtCO_2$ であり、主にセメントと鉄鋼の製造におけるプロセス関連の排出によるものである。
- 建築物の床面積は持続可能な開発シナリオでは、2070 年までの期間に 2 倍以上に増加すると予測しているが、直接的および間接的な排出は、建築物の外皮性能向上、設備の省エネおよび電化、さらに建築物自体と電力部門でのクリーンな燃料への切り替えにより、2060 年にはほぼ排出量がゼロとなる。全世界の床面積の 3 分の 1 以上が、2040 年までにほぼゼロエネルギーレベルとなる。
- 持続可能な開発シナリオでは、化石燃料ベースの暖房および給湯技術は、再生可能エネルギー源に接続された低炭素電気ヒートポンプおよび熱交換器、または地域暖房システムで動作する。ヒートポンプと地域エネルギーシステムは、2070 年の世界の暖房機器販売のほぼ半分を占める(図 3.19)。

Figure 3.19 Heating equipment sales share and share of near-zero energy buildings by region in the Sustainable Development Scenario



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: SDS = Sustainable Development Scenario; NZEB = near-zero energy buildings.

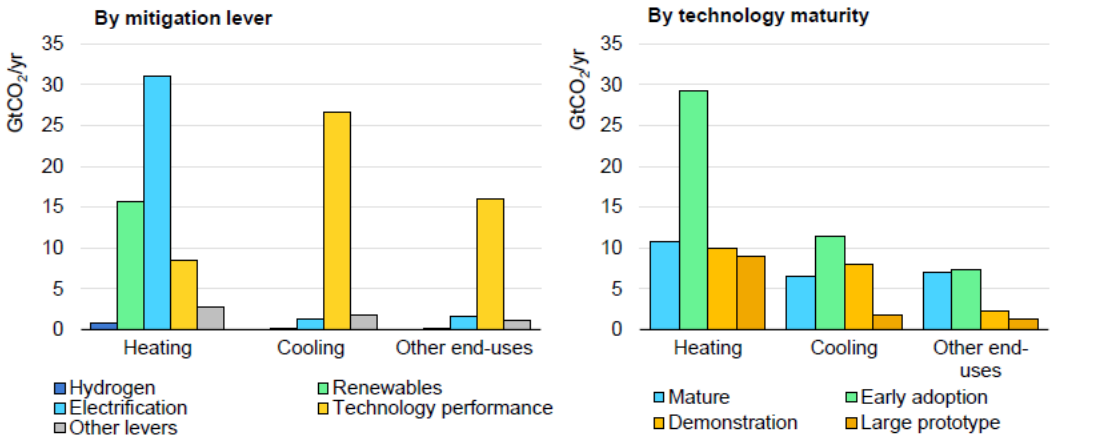
図 3.19 持続可能な開発シナリオにおける暖房機器の販売シェアと地域別のニアリーZEB のシェア

- 建築物で利用される再生可能エネルギーとしては、太陽熱暖房、低排出バイオマスボイラー、および地中熱ヒートポンプが挙げられる。太陽熱技術は、2040 年の給湯需要の約 3 分の 1 を供給する。持続可能な開発シナリオでは、2070 年には再生可能エネルギーの直接利用により最終エネルギー使用量の 25%以上が賄われる。[19]

[19] 建築物で生産された再生可能電力の自家消費を除く。

- エネルギー効率の高い建築物の設計、電化、再生可能エネルギーとの統合により、建築物の直接排出量は 2070 年に 300 Mt 未満に削減されます。化石燃料の使用は、2070 年までに段階的にほぼ廃止される。
- 持続可能な開発シナリオにおける建築物からの2070年までの累積CO_2排出削減量の約70%は、現在利用可能なソリューションの展開によるものだが、ほとんどの場合、さまざまな気候や多様な建築物に適用するためにはイノベーションが必要である。残り30%は現状開発または実証段階にある技術による削減である(図 3.20)。

Figure 3.20 Global cumulative CO_2 emissions reductions in the buildings sector by mitigation lever and technology readiness level in the Sustainable Development Scenario relative to the Stated Policies Scenario, 2020-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Other levers include fuel shifts other than electrification, hydrogen and renewables (e.g. coal to natural gas heat pumps) and other factors impacting service demand. Other end uses include lighting, appliances, cooking and other services. See Box 2.6 in Chapter 2 for the definition of the TRL categories *large prototype*, *demonstration*, *early adoption* and *mature*.

図 3.20 持続可能な開発シナリオにおける排出量削減策および即応性レベル別の CO_2 排出削減量(2019 年から 2070 年)

- 持続可能な開発シナリオの建築部門における技術の可能性を実現するには、以下の分野でイノベーションが必要である。
  - コスト削減とパフォーマンス向上を実現するパッケージ化されたマルチサービスクリーンエネルギーソリューション(例えば、プレハブによる標準化と 3D スキャナーを用いた最適化デジタル技術を統合した建築物のリノベーション)
  - 最終用途の組み合わせによる消費者サービスの効率と品質の向上(例えば、統合された地域エネルギーネットワークで地熱と廃熱源の利用を効率化し、地域暖房と冷房システムを組み合わせて効率を 30～50%向上させる)
  - 地域の状況に合わせて調整された高性能技術の展開(例えば寒冷地用ヒートポンプ)

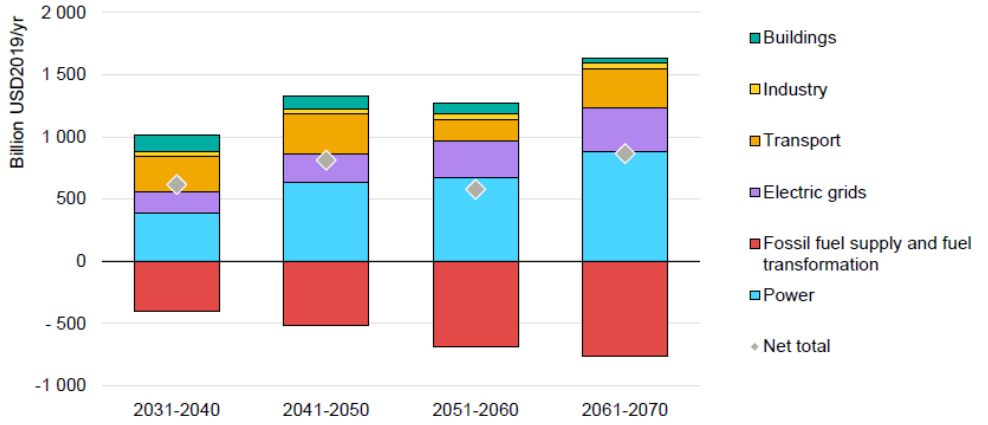
- 排出量の削減が特に困難で費用がかかる鉄鋼およびセメント産業の脱炭素化を支援するための材料効率化対策

- 下記の分野はイノベーションの進展が期待できる。
  - 電化―例えば、エレクトロクロミックウィンドウ (TRL 8)[20]は、電流が流れると特性が変化し、建築物のニーズに応じて熱取得を調整する。太陽光発電(PV)ウィンドウ(TRL 8)は、効果的な PV パネルとして、屋根の表面積によって決定される分散型 PV 生成の上限を超える発電を可能とする。
  - 電力の柔軟性対策は電力系統への投資を抑制する効果がある。ー例えば需要側の対応策として、予熱、予冷、エネルギー貯蔵(電気で熱を生成)、車両から家庭への融通など。
  - 技術の組み合わせー例えば米国、EU、中国で実証事業が行われている電力の価格に応じた個々の需要家または統合負荷の調整など。

投資への影響

- 持続可能な開発シナリオで想定されているクリーンエネルギーへの移行には、公表政策シナリオよりも供給側で約 10%多いエネルギー関連投資が必要となる。エネルギー部門(最終用途を含む)の累積資本支出は、2019-70 年の期間合計で約 31 兆米ドル(または約 6,100 億米ドル/年)公表政策シナリオよりも多い。(図 3.21) 。

Figure 3.21 Change in average annual energy-related investment by sector and decade in the Sustainable Development Scenario relative to the Stated Policies Scenario



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Building sector investment includes only energy efficiency measures. Transport sector investment includes for vehicles the costs for the powertrain, but not the rest of the vehicles, also referred to as gliders (see ETP Model documentation for more information on investment accounting boundaries).

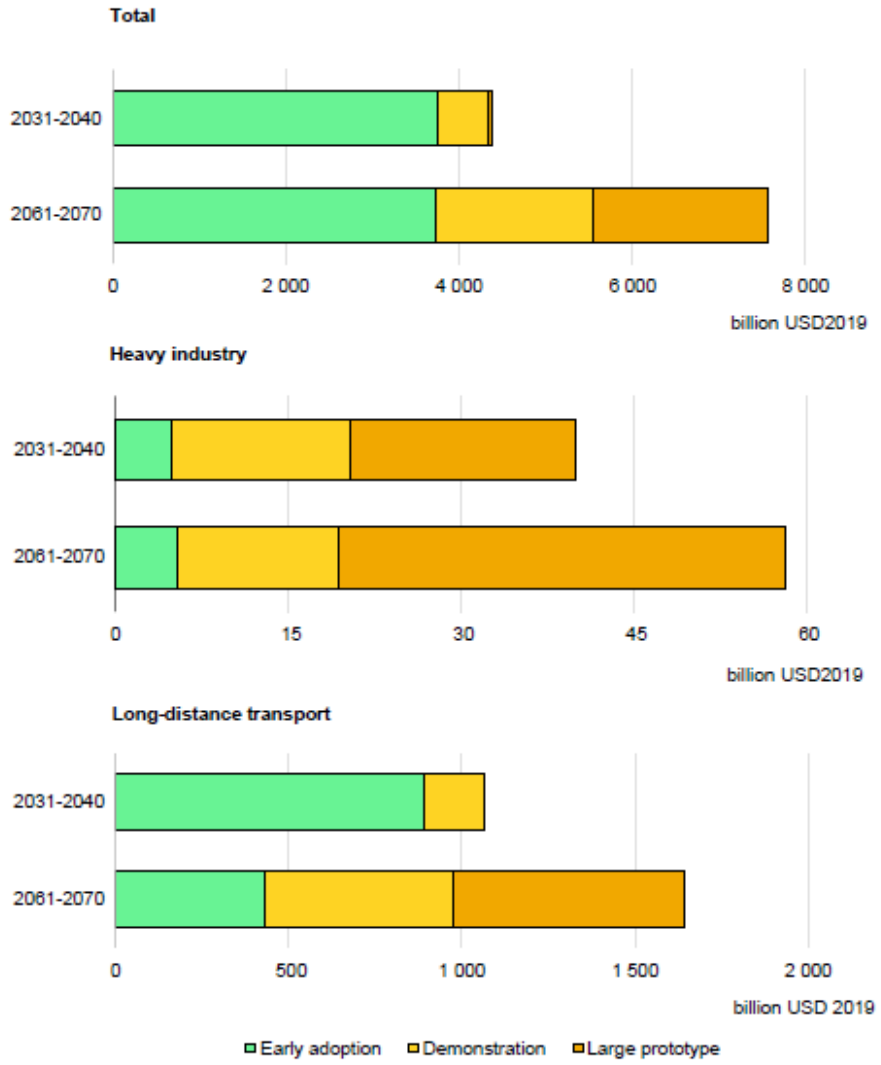
図 3.21 公表政策シナリオとの比較による持続可能な開発シナリオにおける部門別 10 年平均年間エネルギー関連投資額の推移

[20] TRL：technology readiness level 技術の即応性レベル

- 電力および発電における低炭素技術の利用増加が、この高い投資ニーズの最大の要因であり、電力への投資ニーズは 2070 年までで約 39 兆米ドル(または年間約 7600 億米ドル)増加している。増加分の大部分は約 24 兆米ドルの再生可能エネルギー源(平均で年間 4,750 億米ドル)であり、続いて送電網のアップグレードと拡張への追加投資(約 10 兆米ドル)、CCUS 石炭、ガス、バイオエネルギー(3.6 兆米ドル)、および電力貯蔵(3.2 兆米ドル)と続く。
- 産業、運輸、建築物におけるエネルギー使用の効率化と、電気や低炭素燃料などの利用を促進するために、2070 年までの追加の累積投資として約 19 兆米ドル(年間約 3,700 億米ドル)を見込んでいる。
- 化石燃料供給への投資は、需要が少ないため、公表政策シナリオよりも合計で 30 兆米ドル(年間 5,950 億米ドル)少なくなっている一方で、水素および水素ベースの燃料には 2070 年まで 2.5 兆米ドル余り(年間 480 億米ドル)の追加投資が必要であり、バイオ燃料の生産には約 9,150 億米ドルが必要である。
- 持続可能な開発シナリオにおいて、需要側では、より効率的な低炭素技術への追加投資は、2050 年までに年間約 5,500 億米ドルへと急速に増加し、その後減少する。建築物では、断熱を改善するために今後数十年にわたって多額の投資が必要であるが、この投資により、公表政策シナリオに比べて建築物ストックの寿命が延び、長期的には建築物への投資ニーズを減らし、セメントの全体的な需要の減少につながる。運輸部門では陸上車両への投資が長期的には減少する一方で海運は、エネルギー効率対策とともに、アンモニアや水素などの低炭素燃料への移行のコストを補うため、2070 年までに約 6 兆米ドルの追加投資を必要とし、鉄道は、2070 年までに約 21 兆米ドルのインフラ投資が必要である。
- 持続可能な開発シナリオにおいて 2070 年頃までに正味ゼロ排出量に到達するには、特に重工業や長距離輸送において、今日商用レベルに達していない技術の開発と大規模な展開が必要である。 今日成熟している、または利用され始めた技術は、持続可能な開発シナリオにおける 2030 年代の投資全体のほぼ 90%を占める(図 3.22)。
- 新しいテクノロジーへの投資は時間の経過とともにますます重要となり、2060 年代には、ほぼ 4 兆米ドル/年(全体のほぼ半分)が実証段階にある技術に費やされており、これは、公表政策シナリオよりも約 60%多い。重工業および長距離輸送に関連する平均年間投資の増加は特に大きく、既存の技術の革新および新技術の迅速な開発と展開の必要性は、研究開発への投資を増やすことの重要性を強調する[21]。

[21] 6 章に関連説明あり

Figure 3.22 Average annual investment in technologies by technology readiness level in the Sustainable Development Scenario



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Annual investments displayed here exclude those related to mature technologies. The three broad technology readiness level categories refer to the status of technology types today.

図 3.22　持続可能な開発シナリオにおける技術準備レベル別の技術への平均年間投資

・ COVID-19 の重工業への影響

- 産業部門の 2019 年におけるエネルギー需要は世界の一次エネルギー需要の 1/4 を占めており、同部門での化石燃料消費は全体の 70%に及ぶ(石炭：40%、石油・天然ガス：30%)。産業部門の CO_2 排出量は 9 $GtCO_2$ に及び、これはエネルギー部門の排出量のほぼ 1/4 を占める。
- 産業部門の内訳として、セメント生産におけるクリンカー生産過程が最大である。
- COVID-19 の短期的な影響が指摘できる。2020 年の前半においてセメント生産は 6%減、鉄鋼は 5%減、化学は 2%減であった。中国ではすでに生産が回復基調にあるものの、他国の需要は 10-20%程度生産が低減する見通しである。
- 建設業界の回復は、多くの要因に依存しており、例えばインフラや不動産は多くの景気刺激策として対応されている。これは持続可能な建設を実現する機会を呈している。EU での循環型経済の形成に向けた対応として、建設業の廃棄物リサイクルが挙げられることと、バイオ由来の製品ならびに建築物の耐用年数の延長が挙げられている。持続可能な発展シナリオでは、素材の効率化についても分析しており、これがセメントと鉄鋼の利用にかかわる対公表政策シナリオにおける CO_2 排出削減の 1/3 を占める。

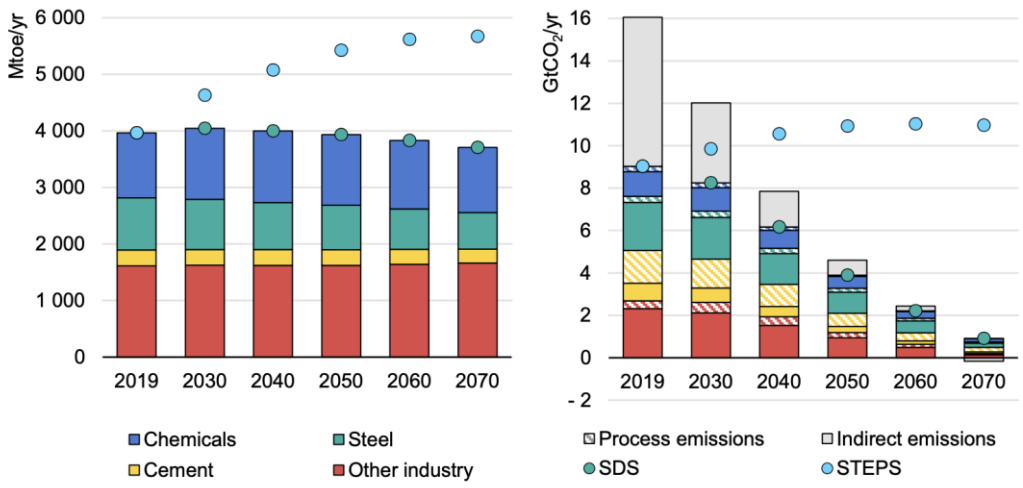
なぜ重工業の排出削減は難しいのか

- **高温熱の必要性**：多くの重工業において、高温熱が必要であり現在のところこれを化石燃料の燃焼によってのみ行われている。
- **プロセス排出**：産業プロセスは多くの化学反応によって生じる。CO_2 排出削減に向けた対応としては、CCUS やその他の素材への転換等、根本的な対策を要する。
- **設備の長寿命**：産業の生産設備は長寿命であり、一般的には 30-40 年の間使われる。代替技術への以降は費用が大きいため難しい。
- **貿易への配慮**：鉄鋼やアルミといった製品は、世界的に競争に晒されており、CO_2 排出削減に向けた対策に追加的な費用が発生することで、国際競争力を失いかねないといった配慮が働く。
- COVID-19 により重工業の低炭素化はさらに困難となる可能性がある。現在の投資判断は今後何十年に亘る CO_2 排出に影響する。

産業部門のエネルギーシステムにおけるネットゼロへの道筋

- 重工業におけるネットゼロへの道筋は、代替手段が限定されることや既存設備が高コストで長寿命であることから達成が他の部門よりも時間を要する見通しである。しかしながら、持続可能な発展シナリオでは、重工業は 2070 年までに現在より CO_2 排出量を 90%削減する見通しである。

Figure 4.2 Global industrial energy consumption and CO_2 emissions in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

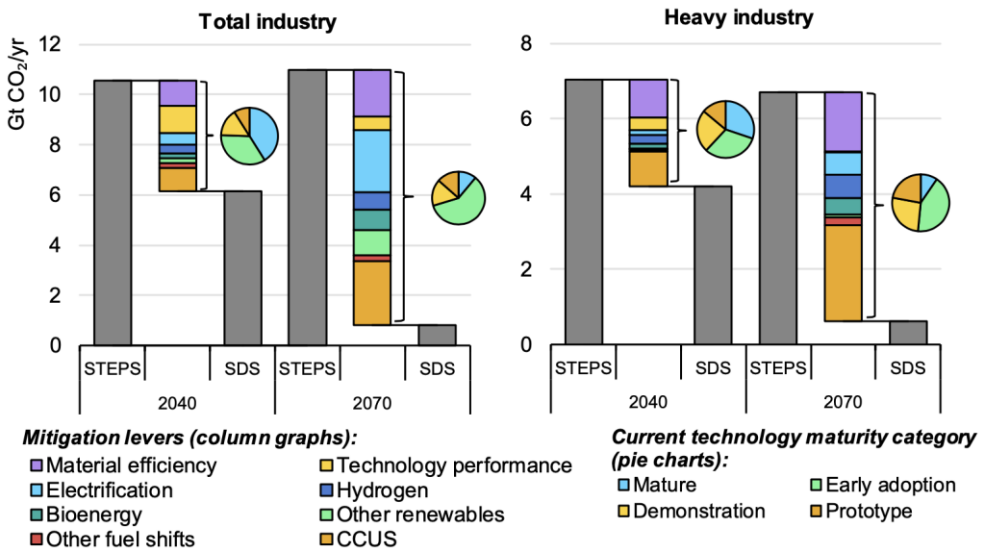
Notes: STEPS = Stated Policies Scenario. SDS = Sustainable Development Scenario. Industrial energy consumption includes total final consumption in industry, energy consumed by blast furnaces and coke ovens (iron and steel), and non-energy use (of which petrochemical feedstock is included within chemicals). Direct industrial emissions include energy-related emissions and industrial process emissions and those stemming from the transformation of fuels in coke ovens and blast furnaces. Indirect emissions are approximated based on the regional average grid intensity of imported electricity and heat, except for a portion of the electricity and heat consumed in the iron and steel sector, where the first choice of fuel for electricity is assumed to be coke oven gas and blast furnace gas. Markers on the right-hand graph correspond to the total direct CO_2 emissions from industry in each scenario.

While energy demand remains relatively flat in the Sustainable Development Scenario, steps taken to tackle CO_2 emissions result in a 90% reduction in direct emissions by 2070.

図 4.2 持続可能な発展シナリオにおける産業部門のエネルギー消費と CO_2 排出量(2019 年から 2070 年)

- 産業製品への需要は増加する見通しであるが、持続可能な発展シナリオでは総エネルギー需要は 2070 年までほぼフラットにとどまる。エネルギー構成としては、化石燃料の割合が現在の 85%から 2070 年には 55%へと大幅に減少し、電力 (水素製造とバイオエネルギーを含む) の割合が大幅に拡大する。
- 図 4.3 が示す通り、産業部門の排出削減には様々な技術を必要とする。現在既に商業化されている、または適用段階にある技術が重要な役割を担う。技術の運用改善や、素材の効率的利用、バイオエネルギーの転換、そして低・高温の熱の電化がそれに相当する。短期的のみならず長期的にこれらのエネルギー節減が重要である。特に、建築物やインフラに関わる建設部門における素材の効率的利用は、鉄の需要やセメント需要を節減する点で特に重要である。

Figure 4.3 The technology portfolio for reducing direct industrial CO_2 emissions, 2040 and 2070



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario. SDS = Sustainable Development Scenario. CCUS = carbon capture, utilisation and storage. See Box 2.6 in Chapter 2 for the definition of the maturity categories: large prototype, demonstration, early adoption and mature.

An array of strategies is required to reduce industrial CO_2 emissions, with innovative technologies like CCUS and hydrogen playing a large role, particularly in the longer term and in heavy industry.

図 4.3 直接 CO_2 排出削減に関わる技術のポートフォリオ(2040 年と 2070 年)

化学

- 化学部門は世界の GDP の 1%に相当し、世界の産業部門のエネルギー消費のうち、30%を占める。一方でその半分は原料としての利用に関わるため、CO_2 排出としては鉄鋼やセメントと比較し小さく、世界における産業部門由来の CO_2 排出の 16%を占める。
- 化学部門はアンモニアやメタノール、エチレン、プロピレン、ベンゼン、トルエン、複合キシレン等、高付加価値化学または BTX 芳香属として知られる一次化学物質を生産するが、このプロセスが大部分のエネルギー消費と原料を必要とする。
- これらの一次化学物質は、最終製品であるプラスチックや合成繊維、肥料、塗料、添加剤、溶剤に転換される。この過程はエネルギーの消費が小さい。

- 化学部門の CO_2 排出削減は以下の 4 要因により困難であるとされている。
  - **非導電性の素材に対する高温の必要性**：スチームクラッカー(ほとんどの化学物質の構成要素であるエチレン、プロピレン、BTX 芳香族化合物を製造するための基本ユニット)およびその他の大型ユニットは、1000° C に近い温度で運用されてお

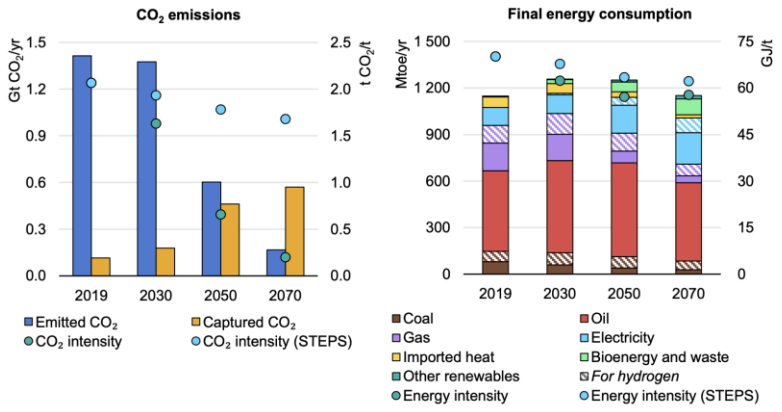
り、現在の技術を使用して電気からこの量の熱を生成するのは非現実的で費用がかかる。

- **既存設備の長寿命**:スチームクラッカーなどの上流ユニットは、装置として非常に大きく、かつ通常 30 年は稼働する。
- **貿易の配慮**：長距離輸送が可能な化学物質は、気候変動対策によるコスト増は国際的な競争条件に影響するため難しい。
- **素材に使われている化石燃料への対応**：化学部門のサプライチェーンと製品から完全に CO_2 を削減するには、原材料として使われている素材の炭素と水素を削減することを意味しており、これは、大気中の CO_2 吸収や電界水素、化学製品のリサイクル、あるいはバイオエネルギーの利用を必要とする。

ネットゼロ排出への技術的な道筋

- 上述の要因のため化学部門の CO_2 排出削減は難しいものの、持続可能な発展シナリオでは、2019 年から 2070 年の間に 1.4 Gt CO_2 から 0.2 Gt CO_2 へと 90%の排出量が削減される。
- CCUS や変動型再生可能エネルギーを使用した電解水素など、化学部門の排出量を大幅に削減するために必要な技術のほとんどは、商業化前または小規模な展開段階ある。このため、技術開発、コストの低下、サプライチェーンのスケールアップが、必要とされる。非常に大規模な展開を開始できるようになるまでには、おそらく 5 年から 10 年かかるだろう。
- 短中期(2020-40)では、持続可能な発展シナリオでの排出削減のかなりの部分が技術パフォーマンスの改善と代替燃料への切り替えによるものであり、公表政策シナリオと比較してそれぞれ約 30％と 40％の CO_2 排出削減を担う (図 4.6)。

Figure 4.5 Global chemical sector direct CO_2 emissions and energy consumption in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



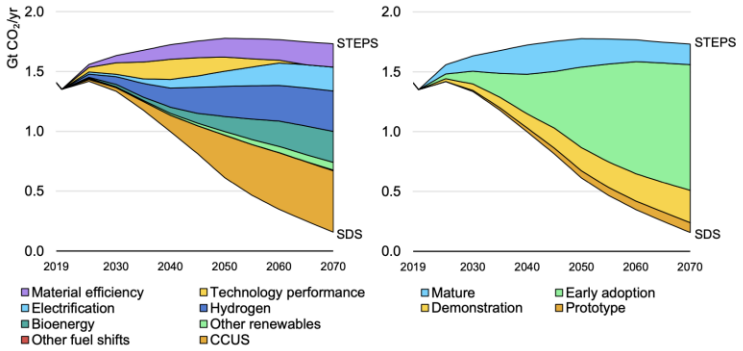
IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario. Captured CO_2 includes that which is captured then used as feedstock for urea production, as well as that which is captured and stored. Energy consumption includes that used as feedstock. Sectoral energy and CO_2 intensities are calculated based on total primary chemical production and total chemical sector energy consumption.

Emissions from the chemicals sector fall by around 90% between 2019 and 2070 in the Sustainable Development Scenario, thanks to material efficiency and technology performance improvements, increased use of bioenergy and electricity-derived hydrogen feedstock, and an extensive CCUS roll-out.

図 4.5 世界の化学部門における直接排出削減とエネルギー消費、持続可能な発展シナリオ(2019 年から 2070 年)

Figure 4.6 Global CO_2 emissions reductions in the chemical sector by mitigation strategy and current technology maturity category, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario; SDS = Sustainable Development Scenario. CCUS = carbon capture, utilisation and storage. Electrification here includes only direct electrification, primarily via conventional technologies. See Box 2.6 in Chapter 2 for the definition of the maturity categories: large prototype, demonstration, early adoption and mature.

CCUS and electrolytic hydrogen routes play the largest role in cumulative chemicals sector emissions reductions in the Sustainable Development Scenario. Electrification and the use of bioenergy for low- to medium-temperature process heat play an important role downstream.

図 4.6 世界の化学部門における直接排出削減と技術の成熟度(2019 年から 2070 年)

鉄鋼

- 世界経済の中心である鉄鋼生産は、非常にエネルギー集約的な産業部門であり、2019年の産業エネルギー消費量の22%、最終エネルギー消費量全体の8%を占めている。鉄鋼部門のエネルギー消費は総生産コストの 10〜25%を占めている。現在、石炭はそのエネルギーの主な供給源であり、同部門のエネルギー消費量の約 75%を占めている。残りのほとんどは電気と天然ガスがほぼ同等に占めている。
- 鉄鋼生産の CO_2 原単位は大きく、粗鋼 1 トンあたり平均で約 1.4 トンの直接 CO_2 排出量、または輸入電力と熱生成からの間接排出量を含めると 2.0 トンになる。鉄鋼生産には石灰フラックスとグラファイト(電気炉のアノード用グラファイト)、直接排出には、化石燃料の燃焼と変換からのプロセス排出とエネルギー関連排出が含まれる。
- 製鉄の主な投入物は、鉄鉱石、エネルギー、石灰、そして鉄屑である。鉄鉱石の場合は、エネルギー投入は酸素を還元する過程において投じられる。一次的な鉄鋼生産は、鉄鉱石を原料とするもので、二次生産とは鉄屑を原料とする。
- 一次生産過程は、複数の異なるプロセスを経るが、最も一般的なのが高炉・転炉 (Blast furnace-basic oxygen furnance: BF-BOF) であり、世界における製鉄のほぼ80%が本生産方法を利用しており、一次生産のほぼ 90%を占める。コークスと鉄鉱石が転炉に投入され、高温熱と微粉炭または天然ガスを投入し、鉄鉱石を還元する。その他、石灰やその他の添加剤を投入し、不純物の度合いと温度を制御する。高炉から生産された溶鉄は1,400-1,500 度に上り、これが今度は鉄屑とともに転炉に送られる。転炉では酸素を注入し、鉄のグレードに応じて炭素含有量を最初は 4-5%であったものを 0.25%へと低減させる。
- この他、一次生産として直接還元鉄・電炉があるが高炉・転炉プロセスとの大きな違いは以下の通りである。
  - 直接還元鉄 (DRI) 製造設備は鉄鉱石 (または鉄鉱石ペレット) を還元性ガスで直接還元し、金属鉄を多く含む直接還元鉄 (DRI) を製造する。
  - 直接還元鉄・電炉プロセスでは、天然ガスを用い複製ガスを生成する。一方、高炉・転炉プロセスでは、コークスや石炭を活用する。

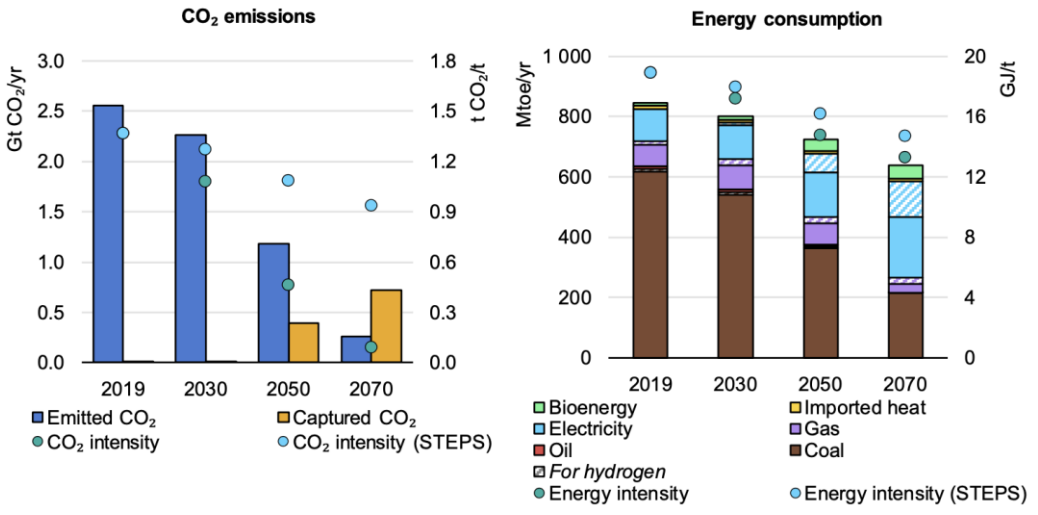
- 鉄鋼部門での排出削減は今後以下の課題に直面する。
  - **石炭利用割合の大きさ**：一次生産は石炭への依存が大きく、水素や電力を利用した生産に向けた技術革新が行われているものの全てを化石燃料ベースの生産プロセスからシフトするのは技術的にも経済面でも困難である。
  - **設備の長寿命**：鉄鋼部門の製造プロセスは、複雑かつ資本集約的であり、その設備は高炉で 25 年、その他のプロセスで 40 年使われる。現存する高炉・転炉プロセスのうち 90%が 2030 年にまで継続して運用される見通しで、35%は 2050 年まで継続して運用される。

- **貿易への配慮と低マージン**：鉄の国際貿易市場の競合性は高く生産地のエネルギーコストに鉄鋼生産の経済性が大きく左右される。そのため、既に同部門は鉄鋼生産のエネルギー原単位を改善するための投資を行っており、追加的改善余地が小さいと言える。

ネットゼロ排出に向けた道筋

- 持続可能な発展シナリオでは、粗鋼の直接排出原単位は現在の水準から 10%低減し、2070 年には 0.13 tCO_2/t に達する。生産水準は現状と同等水準を維持する見通しであるため、原単位の改善が CO_2 排出削減を意味する。
- 持続可能な発展シナリオでは、短期から中期にかけて、技術のパフォーマンス、素材の効率的利用、そして二次生産の割合の増加が貢献する。
- 技術のパフォーマンス向上としては、以下のように投入エネルギーの節減を意味する。
  - コークス乾式消火設備（CDQ：Coke Dry Quenching）：潜熱を回収し高炉でのエネルギー投入を節減しつつ高品質のコークスを生産する。
  - 高炉炉頂圧発電（TRT：Top pressure Recovery Turbine）：高炉炉頂部から排出されるガスの圧力によりタービンを回転させて発電する。

Figure 4.10 Global iron and steel sector direct CO_2 emissions and energy consumption in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Note: STEPS = Stated Policies Scenario.

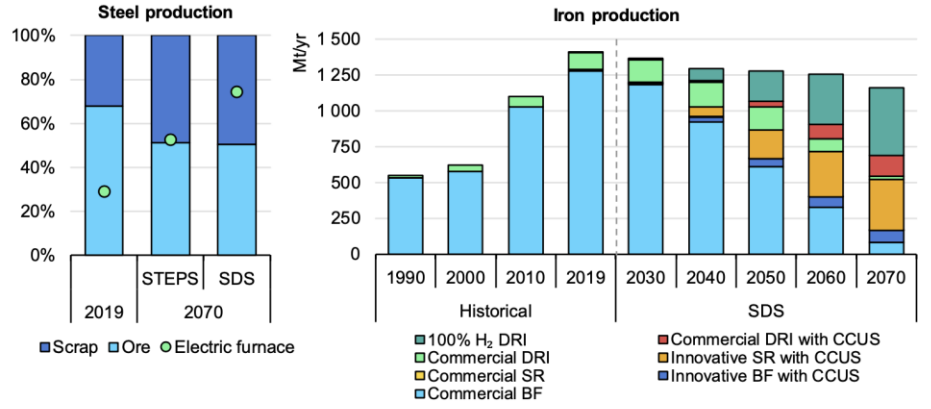
Iron and steel emissions fall by around 90% by 2070 in the Sustainable Development Scenario, thanks to widespread deployment of CCUS and hydrogen-based steelmaking.

図 4.10 持続可能な発展シナリオにおける世界の鉄鋼部門における直接排出削減とエネルギー消費量（2019 年から 2070 年）

- 長期的には、革新的な技術を採用し、一次生産を行うことになる。これらの技術は、現在開発の初期段階にある以下の 4 つの技術を含む。
  - CCUS を備えたガスベースの DRI：CCUS を備えた天然ガスベースの DRI であり、水素と一酸化炭素が主要な還元剤となる。
  - 100%電解水素ベースの直接還元
  - CCUS と組み合わせた革新的な製錬還元
  - CCUS を備えた革新的な高炉

- 2070 年までに、CCUS と電解水素は合わせて、持続可能な発展シナリオにおける排出削減の 43%を占める見通しである (公表政策シナリオとの比較)。化学部門と同様に、化石燃料を使用して生成された水素 (ブルー水素と呼ばれる) に CCUS を備えた設備は、特に天然ガスベースの DRI-EAF 生産において、鉄鋼部門の特定のプロセスからの排出を削減する比較的安価な方法である。

Figure 4.12 Global steel production by route and iron production by technology in the Sustainable Development Scenario, 1990-2070



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario. SDS = Sustainable Development Scenario. CCUS = carbon capture, utilisation and storage. DRI = direct reduced iron. SR = smelting reduction. BF = blast furnace. **Commercial BF** includes traditional coal, gas and charcoal-based blast furnaces, with and without top pressure recovery turbines, without CCUS. **Innovative BF with CCUS** includes blast furnaces with process gas hydrogen enrichment and CO_2 removal for use and storage (for example, as being developed by the COURSE50, IGAR and 3D projects), including CCUS retrofits to existing blast furnaces and those newly installed over the coming decade. **Commercial SR** refers to smelting reduction without CCUS (COREX and FINEX). **Innovative SR with CCUS** includes application of CCUS to existing smelting reduction concepts (for example COREX and FINEX) and novel smelting reduction concepts with CCUS (for example, as being developed by the HIsarna project). **Commercial DRI** includes gas and coal-based DRI without CCUS, including that which has a portion of blended electrolytic hydrogen. **Commercial DRI with CCUS** includes gas and coal-based DRI with CCUS. **100% H_2 DRI** comprises fully electrolytic hydrogen-based DRI (for example, as being developed by the HYBRIT project and ArcelorMittal in Hamburg). For further details on examples of projects developing these technologies, see Table 4.2.

While incremental gains in energy and material efficiency contribute the most to lowering iron and steel sector CO_2 emissions in the short to medium term, innovative technologies are the main drivers in the long term.

図 4.12 持続可能な発展シナリオにおける技術別の鉄鋼生産(1990 年から 2070 年)

セメント

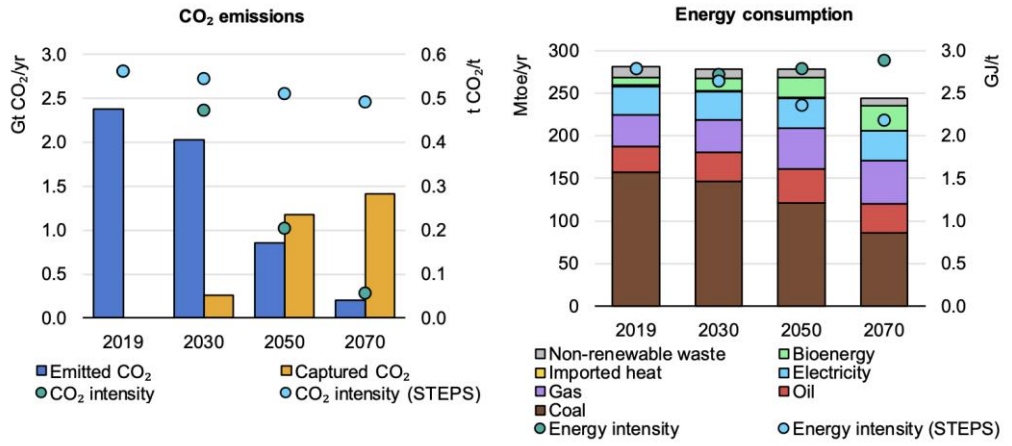
- セメントの製造には大量の CO_2 を排出するが、これは熱を生成するために化石燃料を燃焼することと、製造過程において重要な化学反応のプロセスが要因となっている。コンクリートは、水に次いで世界で最も消費量が大きい物質であり、毎年一人当たり 0.5 トンにも上るコンクリートが生産されている。したがって、セメント生産に関わる排出削減は大きな CO_2 削減に寄与しうる。
- セメントを作るには、クリンカーと呼ばれる塊状の物質を生成するために、大量の熱エネルギーが必要である。これはキルンにおいて、石灰岩と粘土を混合し、熱を投じて製造される。その後、石膏やスラグやフライアッシュと石灰石を等と混合され、粉砕したものがセメントとなる。
- 1 トン当たりのセメント生産において、0.5-0.6 t CO_2 が排出される。2019 年に同部門は、280 Mtoe のエネルギーを消費 (産業部門の 7%) し、産業部門の CO_2 排出量の 26%に及ぶ 2.4 $GtCO_2$ を排出した。
- CO_2 排出削減にあたっては、以下の課題があげられる。
  - **プロセス排出**：セメント製造の排出は石灰の焼成プロセスにおいて起きる。これは、炭酸カルシウム ($CaCO_3$) から形成される石灰石が熱せられる過程で酸化カルシウム (CaO) と二酸化炭素 (CO_2) に分解されることが挙げられる。実際にこうした排出は、CO_2 の吸収と貯蔵、またはフライアッシュやスラグ等のセメント系材料との混合によりクリンカーの必要性を減らすこと、あるいは、CO_2 排出が相対的に少ない石灰石以外の結合材を製造することが挙げられる。しかしながら、これらの技術は商業化されておらず、後者２技術は建築物規制において利用が許可されていない国が多くあるといった課題が指摘できる。
  - **化石燃料ベースのプロセス**：クリンカーの生産過程はエネルギー集約的であり、石炭への依存が大きい。代替燃料としては、バイオエネルギーや廃棄物が挙げられるが、他の最終消費部門での利用との競合関係にあり、CO_2 フットプリントは石炭と比較して高い場合がある。技術的にも、高温で大量のエネルギーが必要なキルンにおいて、電化や水素または集中型の太陽光発電は、技術的にも課題がある上にコストが非常に高い。
  - **地域的な制約**：セメント生産プランとは、地域的に分散しており、原材料の生産地に近い場所に所在する場合や需要地の近隣に所在する。それぞれの地域でアクセス可能なエネルギー資源を使うため、バイオマス等のコスト効果的かつ低炭素な燃料へのアクセスが限定されている。
  - **設備の長寿命**：セメント生産工場は長寿命であり、特にこの十年に新興国において多くの工場が新設されている。既存設備を CCS 技術とともに回収することは必要であるが、焼成粘土などの石灰石を代替する低排出原料を処理できるようにする

ことが必要となる。

ネットゼロ排出に向けた道筋

- 持続可能な発展シナリオにおいて、世界のセメント生産由来の CO_2 排出量は、2019 年の 2.4 Gt から 2070 年には 0.2 Gt へと大幅に減少する。この排出削減への貢献として、CO_2 吸収と貯蔵の貢献が大きく、2070 年に排出される CO_2 の 80%は CCS により削減される。公表政策シナリオでは、排出量は分析期間の間ほぼ変化がなく、2070 年には持続可能な発展シナリオの 12 倍の水準である 2.3 Gt に達する。
- セメントの生産に関わる CO_2 排出削減には特効薬はなく、多様な技術を適用する必要がある。素材の効率的な利用に関わる対策は 2070 年の排出削減のうち、ほぼ 1/4 を占める。

Figure 4.16 Global cement sector direct CO_2 emissions and energy consumption in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



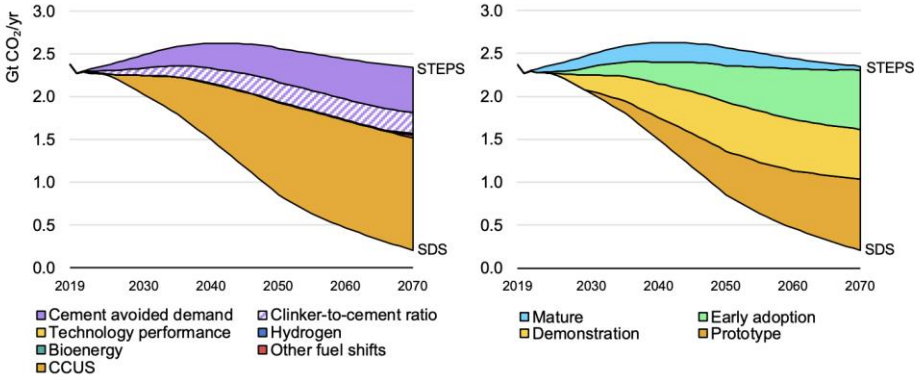
IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario. Energy intensity here includes all energy used per tonne of cement, including additional energy needs for some strategies deployed in the Sustainable Development Scenario – chemical absorption carbon capture and storage, calcined clay use and alternative fuel use. This explains the increasing overall energy intensity by 2070.

CO_2 emissions from the cement sector fall by around 90% between 2019 and 2070 in the Sustainable Development Scenario, largely due to material efficiency and the large-scale deployment of CCUS.

図 4.16 持続可能な発展シナリオにおけるセメントの CO_2 排出および エネルギー消費量(2019 年から 2070 年)

Figure 4.17 Global CO_2 emissions reductions in the cement sector by mitigation strategy and current technology maturity category, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario; SDS = Sustainable Development Scenario. CCUS = carbon capture, utilisation and storage. Cement avoided demand and clinker-to-cement ratio both fall within the broader category of material efficiency. The thermal energy used by chemical absorption CCUS deployment is subtracted from the CCUS contribution, and thus does not impact the efficiency contribution. See Box 2.6 in Chapter 2 for the definition of the maturity categories: large prototype, demonstration, early adoption and mature.

Material efficiency and CCUS together play the leading role in reducing cement sector emissions in the Sustainable Development Scenario. Over 60% of cumulative reductions come from technologies that are not yet commercially available.

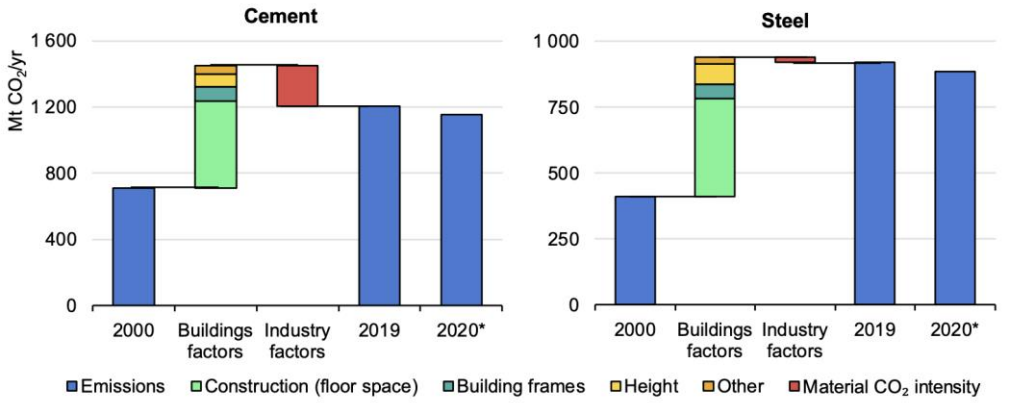
図 4.17 持続可能な発展シナリオにおけるセメントの CO_2 排出削減と適用技術の成熟度(2019 年から 2070 年)

建設用の大型材料

- 建設部門はエネルギーの消費部門であると同時に、材料と中間素材の消費者でもり、結果としてその生産はエネルギー消費と CO_2 排出に寄与している。世界におけるこれらの大型材料は近年経済成長とともに拡大している。製造プロセスの改善にもかかわらず、建築材料の CO_2 排出量は増加しており、この傾向は特に新興国において顕著である。
- 本セクションでは、建設部門で活用される材料の効率的な利用の推進に関して、鉄鋼とセメント部門への影響を評価する。
- 建築部門について、Scope-3 などの標準的な排出アカウンティングの枠組みにおいて、セメントや鉄鋼等の消費に関わる排出量の計算が組み込まれている。Scope-1 の排出は直接排出であり、Scop-2 の排出は、電力や熱の製造に関わる間接的な排出である。世界的に、建設部門は、2 Gt のセメントと 0.5 Gt の鉄鋼を消費し、それらはセメントと鉄鋼需要のそれぞれ 50%、30%に及んでいる。
- セメントと鉄鋼需要のドライバーは、床面積の拡大であり、2000 年以降に世界的な床面積は、60%増加し 90 billion m^2 の追加があった。床面積当たりのセメントや鉄鋼の使用量も拡大しており、これには特にアジアにおいて鉄筋コンクリートと鉄骨フレームの利用が顕著であることが影響している。加えて、建築物の高さが 2000 年以降増加しており、150 m 以上のビルの新築件数は 5 倍の水準に至り、これらの高さの平均は 170 m

から 230 m に拡大している。(230 ページ)

Figure 4.20 Decomposition of embodied cement and steel sector CO_2 emissions in buildings construction, 2000-20



IEA 2020. All rights reserved.

* Projected emissions for the year 2020 account for construction activity indicator for the first half of 2020 followed by an assumed economic recovery facilitated by no further major lockdowns for the second half of 2020.

Notes: This figure is based on a logarithmic mean divisia index which compares each influencing factor contributing to embodied emissions in 2019 relative to 2000 to assess their contribution to the change in emissions. *Other* includes increased material use per unit of new floor area related to changes in building code enforcement and construction practices, as well as the effect of existing floor area renovation.

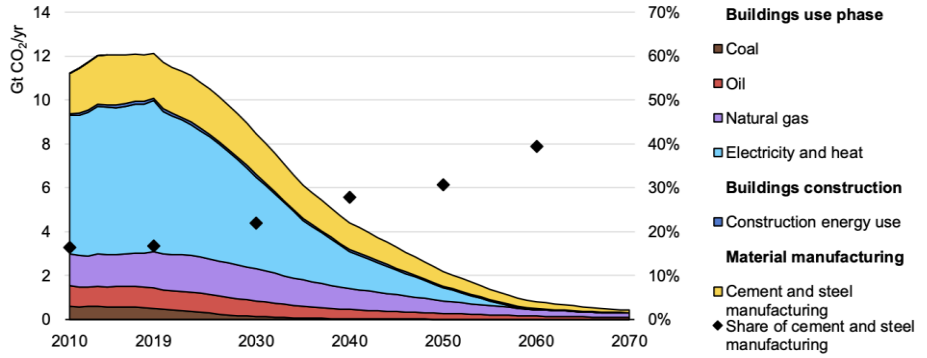
Embedded emissions in the cement and steel used in buildings have increased sharply since 2000, with increased construction and other factors outweighing the effect of a fall in the carbon intensity of both materials – particularly cement.

図 4.20 セメントと鉄鋼部門の CO_2 排出に関する建築の影響
(2000 年から 2020 年)

建設用の大型材料

- World Green Buildings Council が提唱した「Bringing Embodied Carbon Upfront キャンペーン」は世界の 80 の公的機関並びに民間企業によって採択されており、建築物のヴァリューチェーンにおける脱炭素化に向けた協力を必要としている。建築物の材料に体化された (embodied) CO_2 排出をいかに抑制してゆくかは、ネットゼロの達成に向け非常に重要な役割を果たす。
- これは、上記で概観した通り、ネットゼロ達成に向けた技術は開発段階であるとともに、投資サイクルは 25 年またはそれ以上に及ぶためで、セメントのキルンや高炉など 40 年以上にも及ぶ場合がある。

Figure 4.22 CO_2 emissions in the buildings and construction value chain in the Sustainable Development Scenario, 2010-70



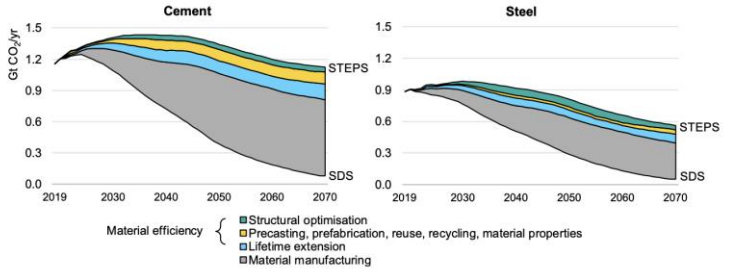
IEA 2020. All rights reserved.

Despite gains in material efficiency, the share of cement- and steel-related emissions in total buildings emissions jumps from less than a fifth today to 40% by the 2060s.

図 4.22 持続可能な発展シナリオにおける建築物と建設に関わるバリューチェーンの CO_2 排出見通し(2010 年から 2070 年)

- 建築物の材料に関わる効率改善は脱炭素化に向け、大変重要な役割を果たす。一方で、全ての建築物関連の排出量におけるセメントと鉄関連の割合は、持続可能な発展シナリオにおいて、2019 年の 20%から 2040 年には 30%に拡大し、2070 年に向けてさらに増加する。これは、建築物の化石燃料消費の減少ペース(電力や再エネで代替)が 2040 年までに 55%と、セメントや鉄の生産に関わる同減少ペースである 40%を上回るためである (図 4.22)。

Figure 4.23 World cement- and steel-related CO_2 emissions in the buildings construction sector by scenario and driver, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

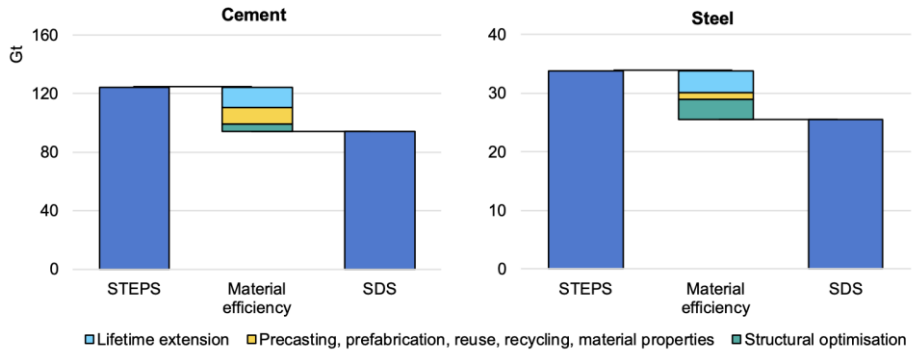
Notes: STEPS = Stated Policies Scenario. SDS = Sustainable Policy Scenario. *Structural optimisation* refers to innovative design or composite framing that reduce material overuse while ensuring that buildings elements fulfil their structural functions. *Material properties* refers to the use of best available steel and concrete to reduce overall material use. *Lifetime extension* includes renovation and construction strategies.

Material efficiency measures contribute to around a third of the total reduction in emissions by 2070 in the Sustainable Development Scenario relative to the Stated Policies Scenario.

図 4.23 建築物と建設におけるセメントと鉄鋼に関連する CO_2 排出(2019-2070 年)

- 図 4.23 が示す通り、持続可能な発展シナリオにおいて、資材等の材料に関連する効率改善は CO_2 排出削減に向け主要な役割を担う。公表政策シナリオと比較した持続可能な発展シナリオにおける 2070 年の CO_2 排出削減のうち、材料の効率改善が寄与する割合は 1/3 以上に上る。

Figure 4.24 Contribution of material efficiency to reducing cumulative cement and steel demand for buildings construction in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: *Lifetime extension* includes renovation and construction strategies. *Material properties* refers to the use of best available steel and concrete to reduce overall material use. *Structural optimisation* refers to innovative design or composite framing that reduce material overuse while ensuring that buildings elements fulfil their structural functions.

Material efficiency measures contribute to reducing cumulative cement and steel demand by 20% to 2070, with the main contribution coming from lifetime extensions.

図 4.24 持続可能な発展シナリオにおける建築物の建設に関わる材料の効率的利用に関する貢献(2019 年から 2070 年)

- 図 4.23 が示す通り、持続可能な発展シナリオにおいて、資材等の材料に関連する効率改善は CO_2 排出削減に向け主要な役割を担う。公表政策シナリオと比較した持続可能な発展シナリオにおける 2070 年の CO_2 排出削減のうち、材料の効率改善が寄与する割合は 1/3 以上に上る。
- 建築物の材料に関わる効率的な利用手段は以下の通りである。
  - 建築物の寿命を延長するためのリノベーション
  - 最適なデザインによるコンクリートと鉄利用の節減
  - 中空のコンクリートスラブの活用
  - 現場で組み立てるために既に工場等であらかじめ製造されたプレ客とコンクリート、プレファブ材料の活用
  - セメントや鉄の再利用
  - デジタル技術を活用した資材利用の最適化、プレファブのデザイン、建築に関わる最適化

・ **長距離輸送に必要な技術**

- 運輸部門のエネルギー消費量は 2019 年世界の最終エネルギー消費量の 30%近くを占め、エネルギーからの CO_2 排出量の 23%を占めている。長距離輸送における石油使用量と CO_2 排出量の削減–この章で扱う長距離トラック輸送、貨物海運、および航空輸送ーでは、代替燃料技術にはまだ利用可能なものがなく、当初は石油ベースの燃料よりもコストがかかる可能性がある。
- 長距離輸送を担う陸上、海上、および航空部門は Covid-19 パンデミックによって大きな打撃を受けており、2020 年の航空旅客数は 2019 年の半数と予測される。しかし、長期的には、所得と人口増加が引き続き需要を押し上げ、脱炭素化に向けた課題をより深刻深刻なものにすると予想される。
- 持続可能な発展シナリオでは、運用面ならびに技術面での革新により、短中期的にはエネルギー効率が向上し、長期的には低炭素燃料と電動パワートレインへの切り替えにより排出量が削減される。しかし、長距離輸送 3 つの部門からの総排出量が 1.0 Gt CO_2 を超える場合は、2070 年までにどの部門も脱炭素化を達成しない。2070 年の排出削減量の 60%以上は、現在普及していない技術によるものである。
- トラック輸送では、2070 年には電気と水素が主要な燃料となる。これは、蓄電池と燃料電池の急速な発展に加えて、水素燃料補給ステーション、電気トラック用の高速充電器、電気道路システム(運転中に車両に電力を供給する)などの新しいインフラへの巨額の投資にかかっている。
- 海上輸送では、バイオ燃料、アンモニア、水素が 2070 年の燃料需要の 80%以上を占め、世界の水素生産の約 13%を使用する。エネルギー効率の改善も多大な貢献が見込まれるが、これらの進展には、化石燃料との価格差を埋めるために、効率目標と低炭素燃料基準をさらに厳しくする必要がある。
- 燃料規制が最も厳しい航空輸送では、バイオ燃料と合成燃料が 2070 年の燃料需要の 4 分の 3 を占める。バイオ燃料のような供給制約のない合成燃料は、2030 年頃から増加し、2070 年までに需要のほぼ半分を占める。政策による、需要促進および新しい航空機とエンジン技術への後押しが必要である。

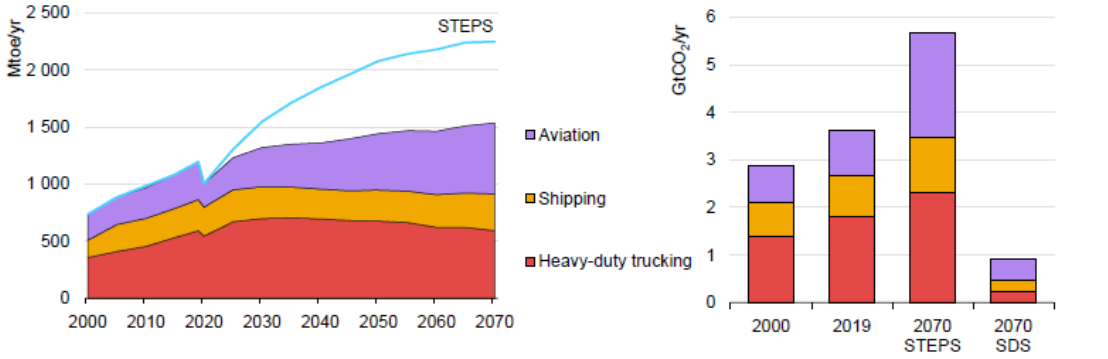
前書き

- 運輸部門は、道路や鉄道による輸送、河川、海運、航空の輸送に至るまで、あらゆる形態の旅客および貨物サービスを担っている。2019 年には 1 日あたり約 5,500 万バレルの石油(mb / d)を占め、世界の石油需要全体の半分以上を占めている。
- 運輸部門は大気汚染の主要な原因であり、近年は特に自動車からの環境への輸送の影響を軽減するための措置が講じられている。汚染物質を削減するための規制と燃料消費量を削減するための燃費基準は、事実上すべての主要な自動車市場で標準となっており、大型車への燃費基準の適用が拡大している。
- ゼロエミッション車(ZEV)の義務化を通じてゼロ排出技術を推進し、ガソリン/ディー

ゼル車を禁止する国および地域が増加している[22] 。2025 年から 2050 年の間にガソリン/ディーゼルエンジン車(ICE 車)を段階的に廃止する国々は、2019 年の世界自動車販売市場の 4 分の 1 近くを占めている。

- 2019 年には、大型のトラック輸送、海運、航空が 25 mb / d 近くの石油を消費し、運輸部門からのエネルギー需要と CO_2 排出量の約 45%を占めている(図 5.1)。コロナ禍において貨物輸送のパターンが劇的に変化した。物流企業は、都市封鎖と工場の閉鎖による供給の混乱と需要の急激な変化に対応してグローバルなサプライチェーンを再構成した。活動の減少により、陸/海/空すべての長距離輸送におけるエネルギー使用量が大幅に削減された。
- 旅客航空業界は特に大きな打撃を受けており、現在のところ、完全な需要回復は 2022 年後半から 2025 年の間と見込まれている[23]。

Figure 5.1 Global energy consumption and CO_2 emissions in long-distance transport by sub-sector in the Sustainable Development and Stated Policies scenarios



IEA 2020. All rights reserved.

Note: STEPS = Stated Policies Scenario; SDS = Sustainable Development Scenario.

図 5.1 持続可能な開発および公表政策のシナリオにおける長距離輸送部門別の世界のエネルギー消費と CO_2 排出量

長距離輸送トラック

コロナ禍後の概観と展望

---

[22] 詳細は、Global EV Outlook 2020, IEA, Paris, 第2章を参照 www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020.

[23] コロナ禍の輸送部門に与える影響の詳細な分析については、The Covid-19 Crisis and Clean Energy Progress, IEA, Paris, を参照 www.iea.org/reports/the-covid-19-crisis-and-clean-energyprogress/transport#abstract .

- トラックの種類とそのエネルギー消費および排出量について Box.5.1 にまとめる。道路輸送の総貨物量としては、コロナ禍において海上輸送や航空輸送ほど大きな打撃を受けなかったものの、パンデミックの初期には、特定の地域輸送、長距離輸送などの活動が制限され、現在も引き続き困難な状況が続いている。トラック運転手と倉庫作業員の安全を確保するための社会的距離、国境検問所(特にヨーロッパ)、およびその他の運用上の制約により物流上の課題が多く発生し、道路/海上/航空による輸送料金が引き上げられた。これにより鉄道貨物の需要が増加し、例えば中国とヨーロッパ間で鉄道輸送の進展が見られた。
- 2019 年の大型トラック(HFT)と中型トラック(MFT)を合わせた保有台数は世界の自動車保有台数の 6%を占め、MFT の台数は 3,300 万台、HTF の台数は 2,700 万台と、10 億台の乗用車/小型トラックよりもはるかに少ない。それにもかかわらず、HFT と MFT は世界で消費される自動車燃料の約 30%を占め、多くの地域では、この割合はより高くなっている。例えばインドでは、2019 年に使用された自動車燃料の 40%以上をトラックが占めた (図 5.2) 。
- 平均して、HFT は鉄道や海上貨物よりもエネルギー集約的であり、100 tkm あたり約 2.5 リットルのディーゼル燃料を消費する。列車は HFT/MFT の約 30%のエネルギー、輸送用船舶は約 10%のエネルギーを消費する。

Box 5.1：トラックの種類とそのエネルギー消費および排出量について

車両総重量(GVW)＝(車両重量)＋(乗車定員総重量)＋(最大積載量)による分類

① 大型トラック(HFT,Heavy-freight trucks)：GVW15 t 超

トラクタが 1 台または複数のトレーラーを牽引する方式の車両(トラクタートレーラー)を含む。大型の HFT は年間 10 万キロメートル(km)以上をカバーすることが多く、道路貨物輸送の 4 分の 3(トンキロベース)を占め、トラックの総エネルギー使用量と CO_2 排出量の半分以上を占める。

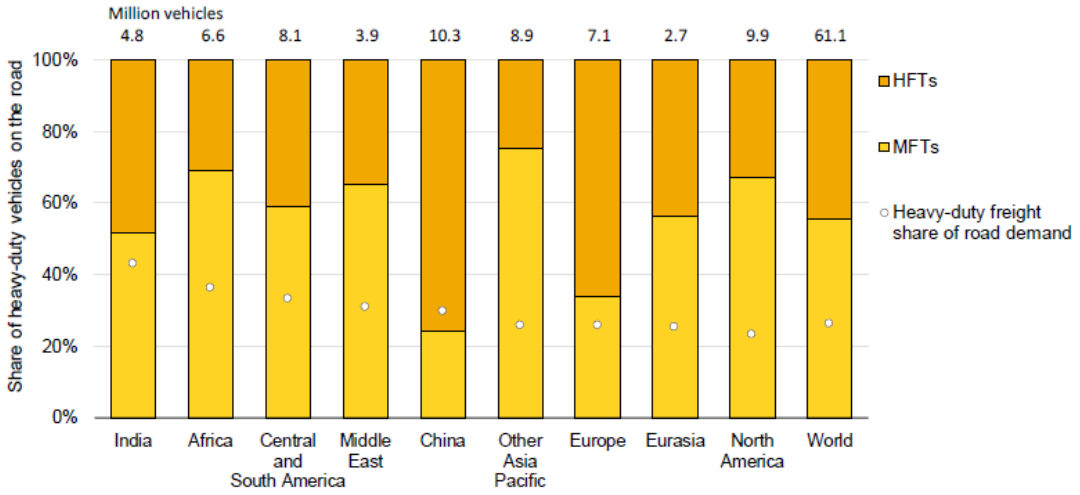
② 中型トラック(MFT,Medium-freight trucks)：GVW3.5 t 以上、15 t 以下

小型トラック、リジッドトラック、トラクタートレーラー、大型バン、ごみ収集車や消防車などの公共および商用サービス車両も含まれる。高速道路ネットワークがあまり発達していない国では、HFT と同様に長距離輸送により倉庫や港から最終目的地まで商品や建築資材の輸送等を担っている。

③ 小型商用車(LCV,Light-commercial vehicles)：GVW3.5 t 未満

小型の郵便や商用の個別配送、工業製品や建築資材の作業現場への輸送、その他の非貨物商用サービスに利用されその多くは市街地での利用であり、電化に適している。LCV は 5 章では扱わない。

Figure 5.2 Heavy-duty truck fleet and share of road fuel demand, 2019



IEA 2020. All rights reserved.

Note: HFTs = heavy-freight trucks; MFTs = medium-freight trucks.

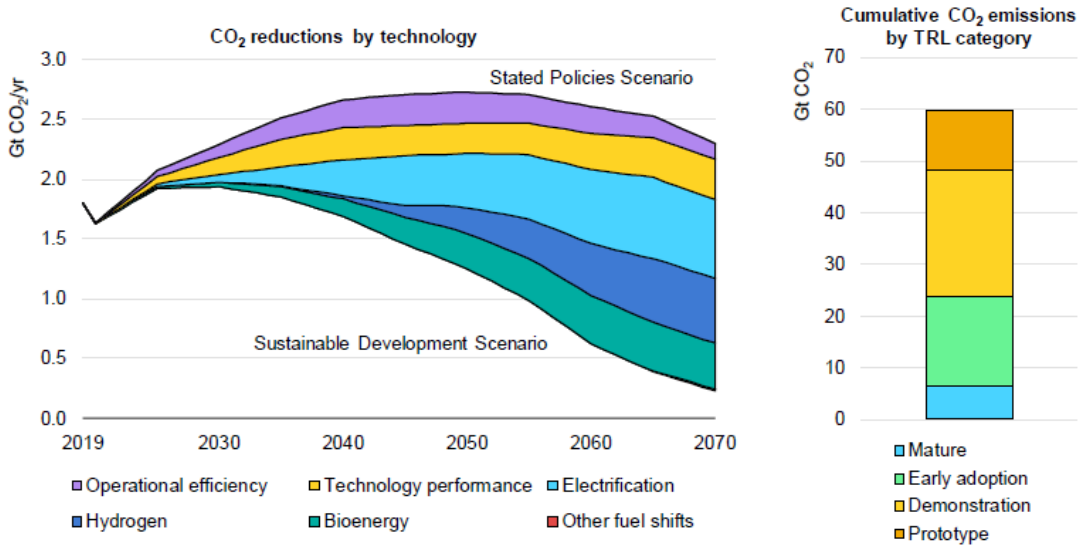
図 5.2 中/大型トラックの割合と自動車燃料消費(2019 年)

- 中/大型トラックは CO_2 排出量の大きな要因であり、2019 年には、輸送関連の CO_2 排出量全体の 22%を占め、エネルギー関連の CO_2 排出量全体の 5%以上を占めた。また、汚染物質排出の主な原因にもなっており、輸送関連の総排出量の 3 分の 1 以上を占めている。窒素酸化物(NO_X)の排出量と、輸送に関連する微粒子状物質(PM2.5)の総排出量のほぼ半分を占め、二酸化硫黄(SO2)のシェアははるかに低く、輸送関連の排出量の 7%となっている。これは主に、ほとんどの主要国の自動車用ディーゼル燃料の燃料品質基準で低濃度の硫黄が義務付けられていることと、国際海運からの排出量がはるかに多いためである。
- ガソリン/ディーゼルエンジンのトラックは、汚染物質の排出を削減するために、費用のかかる後処理システムを使用する必要があり、世界中の汚染物質排出基準が厳しくなるにつれて、後処理コストが増加し、ゼロエミッションパワートレイン技術を促進する。
- トラックへの大気汚染物質排ガス規制は世界の多くの国で実施されているが、大型車(トラック、バス)を対象にした燃費および CO_2 排出量の規制は一部の国と地域(カナダ、中国、インド、日本、米国および EU)でのみ実施されている。しかし、これは変化をみせ、より多くの国が大型車の基準を導入することを計画している。 2019 年には、世界の小型トラック(LDV)の販売台数の 85%以上が燃費/ CO_2 基準の対象であり、中/大型トラックは 70%未満が基準適用地域外で販売された。
- ゼロエミッショントラック普及の主な障壁は、メーカ・モデルが限定されること、価格、インフラの制限が挙げられるが、一部の物流会社ではそのほとんどが LCV であるが電気トラックの採用が始まっている。

実質排出ゼロへ向けた技術の道筋

- 持続可能な発展シナリオでは、道路貨物輸送からの世界の CO_2 排出量は、2019 年の約 1.8 Gt から 2070 年にはわずか 2 億トン(200 Mt)へと 90%減少する(図 5.4)。道路貨物輸送を完全に脱炭素化するコストは高いため、実質排出ゼロは 2070 年以降に持ち越しとなる。公表政策シナリオでは、排出量は 2045 年まで増加し続け、2050 年頃に 2.7Gt でピークに達し、2019 年のレベルから約 40%増加する。
- 持続可能な発展シナリオで中/大型トラックからの CO_2 排出量削減対策は、下記の 3 カテゴリに分類される[24]。
  - 業務および物流システムの体系的な改善
  - 燃費の向上
  - 低炭素代替燃料の採用

Figure 5.4 Global CO_2 emissions from trucks by abatement measure (left) and technology readiness level (right) in the Sustainable Development Scenario relative to the Stated Policies Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Some operational efficiency technologies and measures, such as platooning and retiming urban deliveries, improve technical vehicle efficiency. The effects of switching to biofuels, electricity and hydrogen (fuel cell electric) vehicles are distinguished from other fuel switching, which are primarily from diesel to natural gas and synthetic fuels. TRL = technology readiness level. See Box 2.6 in Chapter 2 for the definition of the maturity categories: large prototype, demonstration, early adoption and mature.

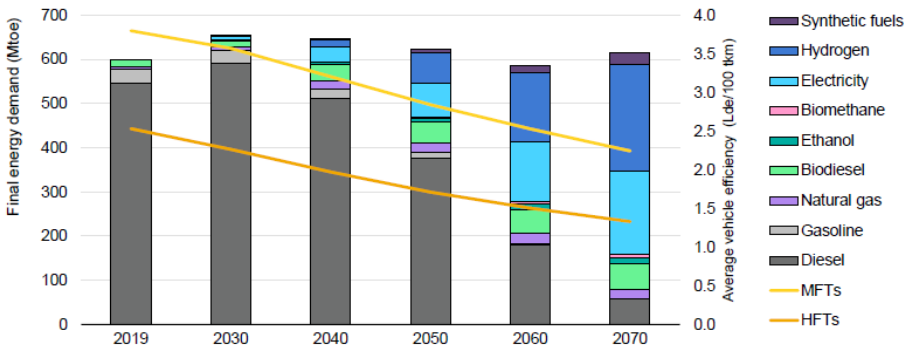
図 5.4 公表政策シナリオと持続可能な発展シナリオにおける削減措置(左)と技術

[24] 3 つの主要な戦略の詳細については、下記を参照
The Future of Trucks: Implications for Energy and the Environment
www.iea.org/reports/the-future-of-trucks

の即応性レベル(TRL)(右)によるトラック輸送の世界的な CO_2 排出量
(2019 年から 2070 年)

- 持続可能な発展シナリオにおいて、短期的には技術的および運用上の効率向上(混成を含む)が中/大型トラックの運用の炭素原単位削減に最も貢献するが、電気トラックも 2020 年代にわずかながら導入が始まる。大型車では、頻繁に利用される(通常は 10 万 km /年以上)トラックは液化天然ガス(LNG)に移行し、走行距離が短く、定期的には運転されない小型トラックは圧縮天然ガス(CNG)が採用されるものの、トラックの天然ガス消費量の伸びは穏やかであり、ガスによる削減効果が限定的であることを反映している。ガソリンやディーゼルと直接混合できるバイオ燃料など、バイオ燃料のシェアも 2030 年代に増加し、従来の天然ガスと化学的性質をほとんど区別できないバイオメタンも 2040 年代から使用される。
- 持続可能な発展シナリオにおいて、長期的にはトラックの脱炭素化には、電気と水素に依存するパワートレインへの移行が必要であり、プラグインおよびバッテリー電気トラックは、2020 年代に市街地における中型貨物トラックから導入が始まり、その後、より広範な地域にまで拡大する (図 5.5) 。2070 年には水素と電気は合わせて、トラックからの世界の最終エネルギー使用量の約 70%を占め、約 2,400 TWh の電力(ロシアとインドの現在の合計電力使用量に相当)および 83 Mt の水素(2019 年に使用された全水素の 15%以上)を必要とする。
-

Figure 5.5 Global heavy-duty trucking energy demand by fuel and average vehicle efficiency in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Lde = litres of diesel equivalent; tkm = tonne-kilometres; MFTs = medium-freight trucks (3.5-15 tonnes GVW); HFTs = heavy-freight trucks (> 15 tonnes GVW). Efficiency improvements more than offset activity growth in the 2030-60 time period, but after 2060 activity demand growth overwhelms efficiency improvements, leading to increases in final energy demand.

図 5.5 持続可能な発展シナリオにおける燃料と平均車両効率による
世界の中/大型トラック輸送のエネルギー需要(2019 年から 2070 年)

- 2020 年代にカリフォルニア州と他の米国の州では中/大型トラックを対象とするゼロ

エミ車の義務化政策によりプラグインハイブリッド/燃料電池/蓄電池パワートレイン電気トラックの導入が始まり、サポートインフラの展開によりゼロエミトラックの普及が促進される。地域路線および長距離路線に高速/超高速/メガ(150 kW から 1~2 MW)充電インフラを設置すると、電気トラックによる長距離輸送が可能となる。

- 2040 年頃までに、水素を使用する燃料電池トラックの導入が進展し、燃料電池と水素貯蔵タンクのコストが下がるため、LDV では経済的に成立する規模となる。これには、特に競争力のある価格で水素を供給できる燃料補給インフラの開発が必要となる。
- 2050 年まで、世界のほとんどの中/大型トラックは ICE に依存し続けているものの、MFT ではハイブリッドパワートレインの導入が進み、中/大型の電気トラックの数が増え始める。車両技術の採用促進と充電/水素燃料供給インフラ整備を進めている国および地域(中国、日本、韓国、EU 諸国および米国)ではゼロエミッショントラックへの移行がすすむ可能性が高い。
- 代替の低炭素液体燃料は、炭素含有の大きい燃料からのより迅速な移行を促進するために重要であり、バイオ燃料、特にバイオディーゼル(エタノールとバイオメタン含む)は、持続可能な発展シナリオにおけるトラックの化石燃料の重要な代替燃料である。ライフサイクル温室効果ガス(GHG)排出量が少ない、または実質ネガティブのバイオ燃料生産経路の研究開発を促進する政策フレームワークは、その展開を促進し、従来の燃料よりも高いコストや限られた生産量といった課題への取り組みをサポートする。

先進技術の即応性と競争力

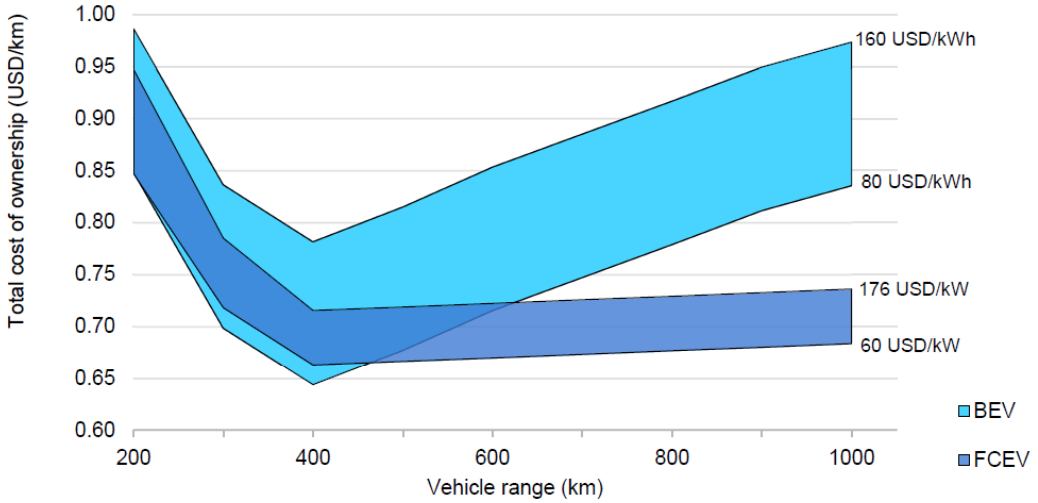
- 表 2 に示すように、短期的には、物流、運用およびエネルギー効率を改善する技術が利用可能になり、システムレベルの改善とトラックの燃料消費量の削減に貢献する。また、よりクリーンな燃料と対応するパワートレインの開発への取り組みもある。多くの新しい技術の開発段階はそれぞれ異なり、どの程度の成功をおさめ、進展するかはさまざまな要因に依存する。
- 持続可能な発展シナリオでは、エネルギー効率化技術により 2015 年と比較して 2025 年に 15〜25%、2035 年に 25〜35%、トラックの燃費を向上することができると見込んでいる[25]。達成するためには経済的実行可能性を限界近くで維持しながら技術の採用を効果的に義務づける車両燃費基準の策定が必要である。効率改善に関する技術的、運用上の障壁は、グリーン貨物プログラム[26]などを通じて対処可能である。

[25] 技術効率改善の費用対効果の可能性に関する技術経済分析は、トラックの種類によって異なる。この分析は下記を参照している。
Dünnebeil et al., 2015; Norris and Escher, 2017; Verbeek et al., 2018; US EPA & NHTSA, 2016; Krause and Donati, 2018; ICCT 2018.

[26] グリーン貨物プログラムは、技術的および運用効率情報を共有し、炭素排出量の会計および開示を行動計画と組み合わせることにより排出量を削減し、運用および技術効率を向上させ、貨物部門全体で技術と実務を促進する公的機関およびステイクホルダーによるコンソーシアムである。

- 低炭素燃料とパワートレインの将来の組み合わせは、エネルギーと電力密度、バッテリーと燃料電池の耐久性、電力と水素の供給コストなど、コスト削減と性能向上によって決まる。
- 水素の供給コストを 1 キログラム(kg)あたり 5 米ドル未満に下げることができ、政府が想定する性能の燃料電池を大量生産できると仮定すると、燃料電池トラックは輸送距離が 500 km 超える場合、充電式電気トラックに対してコスト優位性があり、地域および長距離輸送において市場を開拓する(図 5.7)。

Figure 5.7 The effect of battery and fuel cell prices on total cost of ownership of heavy-duty trucks in long-haul operations



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: kWh = kilowatt-hour; kW = kilowatt; BEV = battery electric vehicle; FCEV = fuel cell electric vehicle. The delivered price of hydrogen is assumed to be USD 5/kg, with about USD 4/kg related to the cost of hydrogen production (via centralised steam methane reforming with CCUS or electrolysis), and, in the case of off-site production, of transporting the hydrogen to the refuelling station. An additional 1 USD/kg mark-up comes from the amortised capital and operating costs of the hydrogen refuelling station itself.

図 5.7 長距離輸送大型トラックの所有コストに対する蓄電池と燃料電池の価格の影響

表 5.2 大型トラック輸送における主要新技術の状況

Technology	TRL	CO_2 reduction means	Year available (Importance for net-zero emissions)	Deployment status
System and logistics efficiency				
Platooning	8-9	Reduction in aerodynamic drag	Present -2025 (Low-medium)	2008: Japan *Energy ITS* demonstration of CAV platoons. 2011: California *PATH* programme. 2014: NREL *SmartTruck* demonstrations. 2016: European *Truck Platooning Challenge*. United States Caltrans/Volvo, Auburn/Peterbilt demonstrations. 2017: European Union *SARTRE* project demonstration of V2V.
Autonomous trucks	5-8	Energy and fuel efficiency	2025-35 (High)	2019: Plus.ai made an autonomous truck trip across the United States. 2020: Einride recruits remote operators for autonomous trucks.
Energy efficiency				
Lithium-ion batteries	5-9	Electrification	Present -2050 (High)	Various chemistries and designs are available. Li-ion batteries with various chemistries installed on cars (NMC, NCA), and buses and trucks (also LFP) are continuously improving. Other lower TRL chemistries, such as solid-state Li-metal, could make battery electric trucks commercially viable in the mid to long term.
PEM fuel cells	7-9	Hydrogen	Present -2030 (High)	The US Department of Energy, through its national laboratories, together with Toyota, Ballard, and Hyundai, are leading in basic and applied PEM research and commercialisation.
Alternative fuels and powertrains				
ED95 engines	8-9	Fuel switching	Present (High)	Scania has pioneered compression ignition engines that can run on 95% ethanol. Hundreds of trucks are operating in Sweden.
Electric HDTs	8-9	Electrification	Present (High)	2019: cumulative global deliveries of electric HDTs totalled more than 23 000, more than 95% in China. Most of these were battery electric trucks, and most were MFTs. BYD, Cummins, Daimler, Emoss and Fuso were the earliest manufacturers. The Tesla Semi model will soon be on the market.
FCEV HDTs	8-9	Hydrogen	Present (High)	Daimler, Fuso, Toyota, Hyundai, Scania, Volkswagen and PSA are developing FCEV trucks, ranging from prototypes to commercial models. The start-up Nikola has secured substantial funding and many pre-orders for its semi-trucks. FedEx and UPS are testing fuel cell range-extender Class 6 delivery vehicles. In Europe, the *h2Share* Project is demonstrating several heavy trucks over 12 tonnes.

表 5.2 大型トラック輸送における主要新技術の状況（続き）

Technology	TRL	CO_2 reduction means	Year available (Importance for net-zero emissions)	Deployment status
Alternative fuels infrastructure				
Megachargers / HPCCV	5-6	Electrification	Present - 2030 (High)	Tesla is developing prototype super-fast chargers (1.2-2 MW). Daimler is working on a charger with a rate of up to 3 MW.
Hydrogen refuelling stations	9	Hydrogen	Present (High)	2019: more than 400 HRS stations, most of which are in Japan, Germany, United States and China, supply H_2 to road vehicles. More large stations dispensing H_2 at 700 bar are being built.
Electric road systems	6-9	Electrification	Present (High)	Siemens has built a handful of demonstration catenary systems on highways, totalling more than 30 km, in Sweden and Germany. In-road conductive and inductive designs are also being tested.

Notes: TRL = technology readiness level. BEV = battery electric vehicle. PHEV = plug-in hybrid electric vehicle. FCEV = fuel cell electric vehicle. HDT = heavy-duty truck. CAV = Connected and autonomous vehicles. NREL = National Renewable Energy Laboratory. V2V = Vehicle-to-vehicle. NMC = Nickel manganese cobalt. NCA = Nickel manganese aluminium. LFP = Lithium iron phosphate. PEM = Polymer electrolyte membrane. HPCCV = High power charging for commercial vehicles. HRS = Hydrogen refuelling stations. A broader list of technologies compatible with a low-carbon transition for the heavy-duty road freight sub-sector is presented in the technology mapping portion of *The Covid-19 Crisis and Clean Energy Progress* (IEA, 2020b).

- 持続可能な発展シナリオにおける炭素含有が相対的に小さい燃料による中/大型トラックの総所有コストは、中期的には、バイオ燃料または合成燃料を使用するハイブリッド電気トラックは、特にディーゼル税が高い地域では、石油ベースのディーゼルと競争できる可能性がある。長期的には、必要なインフラが整備された場合は、蓄電池/燃料電池の電気トラックが利用可能となり、地域の汚染物質と CO_2 排出量に基づく燃料税が高い、または同等の効果がある政策を想定すると、ガソリン/ディーゼルエンジン車よりも競争力が高くなる可能性がある。
- 技術革新を推進するには、強力な政策介入が必要である。例えば、代替燃料に必要なインフラの官民の費用負担への燃料税の一部割り当てにより、カリフォルニア[27]では急速充電設備と水素燃料補給設備の整備が加速しており、他所でも適用可能である。大気汚染物質の排出を禁止または制限する制度(ゼロ/低排出ゾーンの設定)は、都市および港における ZEV インフラ/車両の展開を促進する可能性がある。

[27] 米国カリフォルニア州は、電化やその他のゼロエミッション技術を加速するために LDV に対する ZEV を義務化し、成功を収めている。2020 年 7 月、その範囲を大型トラックに拡大するための措置を講じた。AdvancedClean Trucks 規則を成立させ、カリフォルニア市場向けのトラックを製造する OEM に対して、2024 年以降 ZEV トラックのシェアを増やすことを義務付けている。他の 15 の米国州とコロンビア特別区がカリフォルニアの規制に加わり、ZEV トラック市場を後押しすることを目的とした覚書に署名した。

- 政府による支援は、スウェーデンとドイツにおける初めての道路に空中送電線または電導性レールを敷設する電気道路システムの実証プロジェクト、またカリフォルニア、中国、フランスおよび日本で水素燃料補給設備の近年の開発もおいて主要な役割を果たした。
- 都市環境で利用される LCV においては、パワートレインは燃料電池または燃料電池のレンジエクステンダーを利用した電動化が進展するだろう。一方で長距離輸送で用いられる中/大型トラックではバイオ燃料、プラグインハイブリッド、蓄電池 EV、燃料電池 EV などの既存のオプションのうち何が主流となるか決定するのは時期尚早である。ゼロエミッションの大型トラック輸送を実現するために、どのような技術・燃料を推進できるかの見極めには、研究開発、実証実験等が必要である。

貨物海運

コロナ禍後の概観と展望

- 貨物海運は国際貿易および長距離輸送の主要な手段であり、トンキロベースで世界の総貨物輸送活動(内陸輸送を含む)の約 4 分の 3 を占める[28]。貨物海運は、トンキロベースで最もエネルギー消費の少ない輸送方法であり、貨物輸送活動全体に占める割合は大きいものの、使用エネルギーは約 5 分の 1、運輸部門全体の使用量のわずか 8%となっている[29]。
- 貨物海運に使用されるエネルギーの大部分は、石油ベースの燃料に大きく依存している。2019 年の総燃料消費は 221 Mtoe であり、そのうち約 180 Mtoe(約 3.7 mb/d)は重油、45 Mtoe (約 1 mb/d)は船舶用ディーゼルおよび船舶用ガス油、このうち、ガス主に液化天然ガスは、0.1 Mtoe を占めた。 2019 年の CO_2 排出量は合計 710 Mt で、これは貨物輸送による CO_2 総排出量の 5 分の 1、運輸部門総排出量のほぼ 10%、エネルギー部門総排出量の約 2%に相当する。
- コロナ禍において、世界貿易量は 2020 年の第 1 四半期に約 3%減少し、第 2 四半期には 20%以上減少したと推定されている[30]。アジア、ヨーロッパ、北米の港では、2020 年上半期の貨物とコンテナの取引量は 2019 年の同時期よりも 10〜17%減少した。2020 年第 3 四半期には、出荷量が回復し始めており、2020 年全体では 2019 年よりも約 7%低くなると推定されている。2021 年の回復についてはコロナパンデミックの期間と経

[28] 本章のデータと予測は、国際海運に関するものである。貨物輸送からの燃料消費量と CO_2 排出量の約 5%(総輸送量の 2%)を占める国内輸送は、ごく短距離の輸送を除き、国際海運と同様の技術的課題に直面している。

[29] 国際的に登録された船舶に供給される燃料に関する国内統計データに基づく IEA の国際海運 CO_2 排出量の推定値は、船舶の活動と関連する燃料消費量に基づく国際海事機関(IMO)の推定値よりも低くなっている。例えば、2012 年 IEA は、国際海運が約 600 $MtCO_2$ を排出すると推定しているが、IMO は約 800 $MtCO_2$ の排出を推定している。本章の分析は、IEA の統計に合わせて調整されている。

[30] CCSA (Committee for the Coordination of Statistical Activities) (2020), How COVID-19 is changing the world: a statistical perspective, 2020, https://unstats.un.org/unsd/ccsa/documents/covid19-report-ccsa.pdf

済回復の速度に依存する。

- 貨物海運は岐路に立っている。現在、船舶の GHG と大気汚染物質の排出規制が増加しており、これは業界にとって喫緊の課題である。貨物海運には主に長距離を移動する大型船が使用されるため、石油ベースの燃料を代替する手段は非現実的であるか、または非常にコスト高となる。さらに、船舶の寿命は 20〜35 年と長く、新しい低炭素技術の採用を妨げており、船舶の種類(BOX 5.2)によってその課題は異なる。
- 貨物海運の脱炭素化オプションには様々なものがあり、短期的には、エネルギー効率の向上、サプライチェーンを最適化するための対策、および減速航海による燃料消費抑制、中長期的には、バイオ燃料や排出物のない水素ベースの燃料(アンモニアと水素)などの低炭素燃料に切り替えることで、大幅な排出削減を達成できる。これらは、長距離の大洋横断輸送に特に重要であるが、長距離輸送を担う大型船には、エネルギー密度の高い燃料が必要である。沿岸の短距離船は、エネルギー密度の低い燃料を使用できるため、技術的には蓄電池電力への切り替えが可能である。
- 燃費(走行距離 1 km あたりのエネルギー使用量)にはいくつかのパラメータがあるが、最も重要なものは速度と載貨重量トン数である。コンテナ船は概して高速で移動するときに燃料消費量が最も多く(特定の燃料消費率は速度の 2 乗で増加する)、大量の商品を運び、最長距離をカバーする。また、通常はライナーとして運行しており、コンテナの積み下ろしのために短時間で停止する以外は稼働している。このため、ばら積み船が貨物海運の総輸送量(トンキロベース)に占める割合が大きいにもかかわらず、コンテナ船のエネルギー消費と CO_2 排出が最も大きくなっている。ばら積み船とコンテナ船が国際貨物海運では支配的であり、総エネルギー使用量(ほぼ完全に石油の形で)および CO_2 排出量の約 60%を占めている(図 5.9)

Box 5.2：貨物輸送船の種類とそのエネルギー消費および排出量について

用途による分類

① タンカー

原油や、ガソリンなどの石油精製品、あるいは化学品などの液体貨物を輸送する。LNG(液化天然ガス＝Liquefied Natural Gas)を運ぶLNG船が近年急速に増加している。[31]

② ドライバルク船

鉄鉱石、石炭、穀物、銅鉱石などさまざまな資源を、梱包せずに大量にそのまま輸送するばら積み船。

③ コンテナ船

国際規格の海上コンテナに貨物を収納して運ぶ船

④ 一般貨物船

クレーンを備え、梱包された貨物を運搬する船

⑤ その他専用船

自動車運搬船、タグボート、RO/RO(荷物の積み下ろし)機能を備えた貨物船など。

運行形態による分類

① 定期貨物船(ライナー)

主にコンテナ船と RoRo 船あわせて訳 6000 隻のライナーが運行されている。[32]

② 不定期貨物船

チャーターにより不定期に運行する。

- 海運における大気汚染および GHG 排出量の削減を目的とした、主な国際規制を表 5.3 にまとめる。

[31] DNV-GL (2020a), Veracity, www.veracity.com/

[32] World Shipping Council (2020), How Liner Shipping Works (web page), www.worldshipping.org/about-the-industry/how-liner-shipping-works

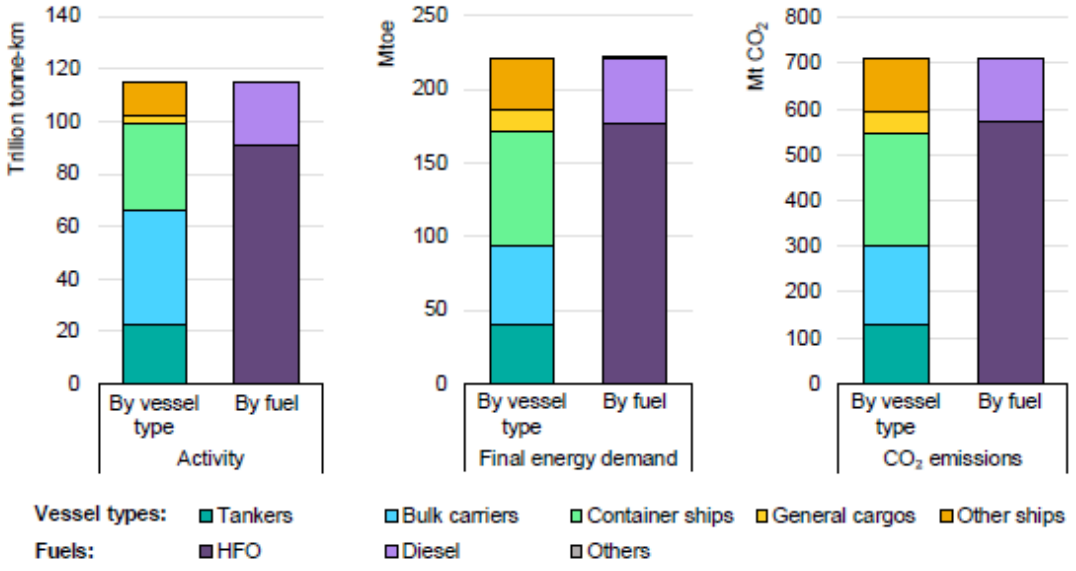
表 5.3 貨物海運における大気汚染と GHG 排出を対象とする主な国際規制

Table 5.3 Main international regulatory policies covering air pollution and GHG emissions in maritime shipping

Name	Geographic coverage	Year introduced	Description	Regulatory actor
IMO Initial Strategy	Global	Adopted in 2018	Reduce absolute GHG emissions from shipping at least 50% by 2050 relative to 2008. Reduce CO_2 emissions per transport work at least by 40% by 2030, pursue efforts towards 70% by 2050.	IMO
Data collection system (DCS) for fuel oil consumption	Global	2019	All ships over 5 000 tonnes engaged in international voyage must collect consumption and other data for each type of fuel oil consumed. Flag states must collect and aggregate the data and submit to the IMO.	IMO
Submission of CO_2 emissions reports (MRV)	Ships calling at EU ports	2018	Companies must submit a CO_2 emissions report for all voyages in the European Union for all vessels under their responsibility.	European Commission
EU Emissions Trading System (ETS)	Ships calling at EU ports	2022 (expected)	Proposal to include shipping in the ETS as part of the Green Deal.	European Commission
Energy Efficiency Design Index (EEDI)	Global	Enforced in 2013	Requires minimum energy efficiency per tonne-km for new large vessels and mandates improvement steps depending on vessel type: 10% in 2015, 20% in 2020 and 30% in 2030 compared with average performance of vessels built in 2000-2010.	IMO
Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)	Global	Adopted in 2016	Monitors ship efficiency performance, mandates collection and submission of relevant data and establishes mechanisms to improve efficiency of existing ship operations.	IMO
Global Sulphur Cap	Global	January 2020	Limits the sulphur content of maritime fuel used on board vessels trading outside of sulphur ECAs to a maximum of 0.5%. Ships without exhaust gas scrubbers are not permitted to carry fuel for use with a sulphur content exceeding 0.5%.	IMO
Emission Control Areas (ECAs)	Baltic Sea, North Sea, Caribbean Sea and North American sea	Enforced respectively in 2005, 2006, 2012 and 2014	To operate in these areas, ship engines must comply with stricter standards for SOx and NOx than in global waters. In particular, there is a limit of 0.1% sulphur for fuel used by ships operating in SOx ECAs and NOx TIER III standards apply to ships operating in NOx ECAs.	IMO

Notes: IMO = International Maritime Organization; MRV = monitoring, reporting and verification; EC = European Commission; SOx = sulphur oxides; NOx = nitrogen oxides.

Figure 5.9 Global freight activity, energy consumption and CO_2 emissions in international maritime shipping by vessel type and fuel, 2019



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: HFO = heavy fuel oil. Other fuels include LNG, biofuels and electricity.

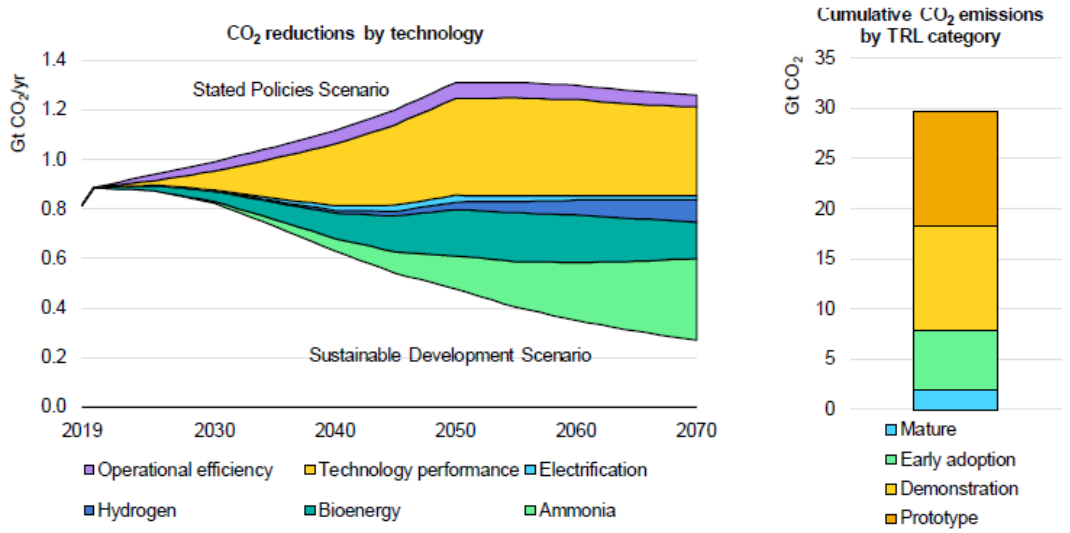
図 5.9 世界の貨物海運における船舶の種類と燃料別の輸送量、エネルギー消費、CO_2 排出量(2019 年)

- 国際貿易は、Covid-19 のパンデミックによって引き起こされた混乱から回復し、今後も拡大し続けると予想され、公表政策シナリオでは、貨物輸送量は年平均 2.5%増加し、2070 年には 2019 年の 260%へと拡大する。持続可能な発展シナリオでは、年平均 2.4%増加し、2070 年には 2019 年の 230%へ増加する。
- 持続可能な発展シナリオでは、石油タンカーと石炭運搬船の必要性が減少するため、輸送量の伸びはわずかに低くなっているものの、水素と水素運搬船およびバイオの貿易量の増加によって部分的に相殺される。両方のシナリオでの出荷活動の増加は、今後数十年で汚染を削減し、CO_2 排出量を削減する必要性を強調している。

実質排出ゼロへ向けた技術の道筋

- 貨物海運における CO_2 排出量は、コロナ禍の 2020 年に減少の後、再び増加すると予測されている。持続可能な発展シナリオでは、CO_2 排出量は 2020 年代初頭に 2019 年とほぼ同じレベル、つまり 710 Mt でピークに達し、その後 2070 年には 120Mt へと減少する。(図 5.10)公表政策シナリオでは、2050 年にはほぼ 1100 Mt に上昇し、2019 年のレベルからほぼ 50%の増加となる。その後、効率対策および燃料切り替えと輸送量の増加が相殺し 2070 年までほぼ横ばいが続く。

Figure 5.10 Global CO_2 emissions reductions in shipping by mitigation category (left) and technology readiness level (right) in the Sustainable Development Scenario relative to the Stated Policies Scenario, 2019-70

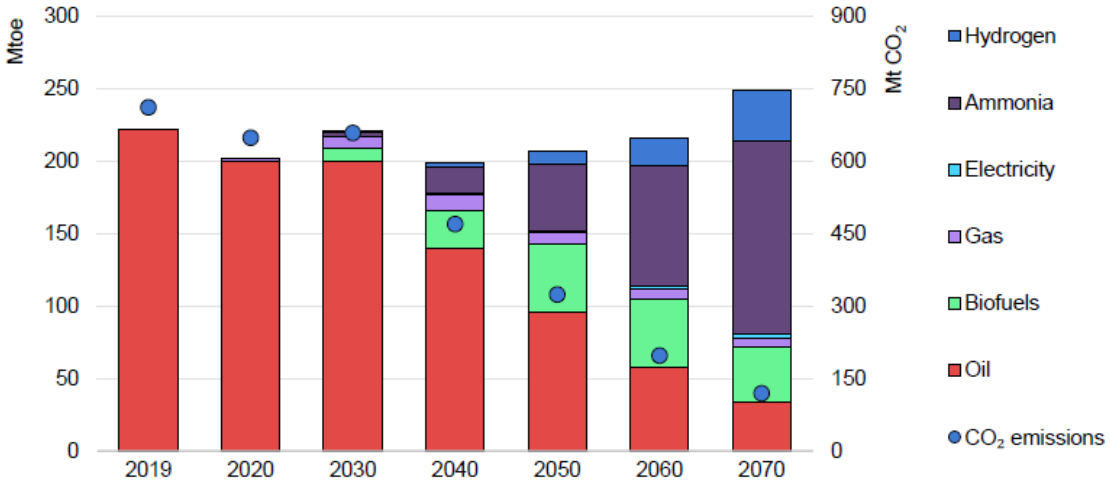


IEA 2020. All rights reserved.

Note: TRL = technology readiness level. See Box 2.6 in Chapter 2 for the definition of the maturity categories: large prototype, demonstration, early adoption and mature."

図 5.10　公表政策シナリオと持続可能な発展シナリオにおける排出量削減策(左)と技術の即応性レベル(右)による貨物海運の CO_2 排出削減量(2019 年から 2070 年)

Figure 5.11 Global energy consumption and CO_2 emissions in international shipping in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Efficiency improvements more than offset activity growth in the 2030s and 2040s, but by 2050 activity demand growth overwhelms efficiency improvements, leading to increases in final energy demand. The category biofuels includes biomethane and is considered to be carbon neutral.

図 5.11 持続可能な発展シナリオにおける国際貨物海運における世界のエネルギー消費と CO_2 排出量(2019 年から 2070 年)

- 持続可能な発展シナリオでは、主にバイオ燃料と水素ベースの燃料への切り替えにより、国際貨物海運による排出量は 2019 年から 2070 年の間に 5 分の 4 以上減少する。(図 5.11)

- 短期的には IMO の硫黄酸化物排出規制等への対応のため、燃料が VLSFO(超低硫黄燃料油)、船舶用ディーゼルオイル、船舶用ガスオイルおよび LNG などへ切り替わり、大型船には SO_2 スクラバーが設置され、バイオ燃料の混焼も実施される。大型船以外では 2020 年代初頭に LNG が普及し、大気汚染は減少するものの、温室効果ガス排出量の削減にはあまり効果がない[33]。
- 中期的には、バイオ燃料との混合が増加する。バイオ燃料の消費量は、現在ごくわずか消費される水準から 2040 年には 25 Mtoe 以上、2060 年にはほぼ 50 Mtoe に跳ね上がり、運輸部門総エネルギー使用量の 5 分の 1 以上を占める。2025 年頃から、バイオ燃料油(BFO)が VLSFO と混合される量が増加し 2070 年までに、運輸部門総エネルギー消費量の 7%へ増加し、従来の重油燃料に取って代わる。
- 長期的には、BTL (バイオ液体燃料)の利用が 2050 年頃から大規模生産へと移行するにつれて拡大する。またアンモニアと水素の利用も増加し、アンモニアと水素を燃料とする船舶は、2025 年からの短距離および中距離輸送で使用され、その後着実に競争力を高め、バイオ燃料と混合された化石燃料を使用する船舶が 2050 年以降引退するにつれて徐々にそれらの船舶に取って代わる。これらを合わせると、2060 年以降に販売される新造船の 60%以上がアンモニアと水素を利用するもので、運輸部門のアンモニアの使用量は 2070 年に約 130 Mtoe に達し、2019 年の肥料生産に使用された世界のほぼ 2 倍となる。大型船の燃料としての水素は、水素貯蔵のコストが高く、エネルギー密度が低いものの、2070 年には水素使用量が 12 Mt に達し、これは 2019 年の世界のバンカー需要の 16%、今日の世界の水素使用量の 16%に相当する。2070 年には石油とガスの使用量は、輸送燃料の総消費量の 6 分の 1 にとどまる。
- 世界最大の 20 の港は、世界の貨物の半分以上を占めており[34]産業用および燃料補給船向けの水素およびアンモニアを生産する拠点として機能する可能性がある。現状これらのハブの多くは中国にあり、米国とヨーロッパにも存在する。
- 2070 年までの期間を通じて、貨物海運の燃料としての電気の使用は限定的であり、2070 年には約 3Mtoe を占めている。電気は主にハイブリッド船で使用され、2030 年の新造船販売全体の約 5%を占めると予測されている。

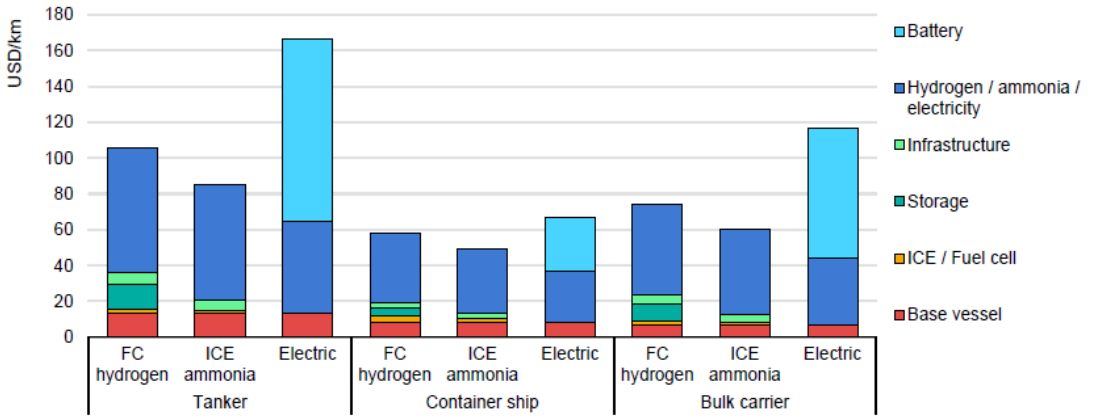
[33] ICCT (International Council for Clean Transportation) (2020a), The climate implications of using LNG as a marine fuel (working paper), https://theicct.org/publications/climateimpacts-LNG-marine-fuel-2020

[34] UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development) (2018), Review of maritime transport, https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018_en.pdf

先進技術の即応性と競争力

- 海上輸送における主要な新技術の状況を表 5.4 に示す。海運をカーボンニュートラルに移行するために必要な技術のいくつか、特に代替燃料への切り替えを可能にする技術は、まだ商用レベルに達していない。したがって、持続可能な発展シナリオの軌道を達成するには、より集中的な研究開発の努力が必要である。
- すでに利用されている唯一の技術は TRL9 のコールドアイロニング[35]である。TRL が 8 の電気船は、特にフェリーの輸送をゼロエミッション船に制限する規制措置の結果として、北欧諸国でますます採用されているものの、電池パワートレインは長距離を移動する大型船に電力を供給することはできない。外航船のメインエンジンの代替え技術で実用レベルに達したものはまだない。
- 電気推進船が長距離で経済的に実行可能になるには、バッテリー技術の大幅な進歩が必要である。水素は貯蔵コストが高いため、アンモニアよりも経済的ではない (図 5.12) 。

Figure 5.12 Total cost of ownership of hydrogen, ammonia and electric vessels by ship type, 2030



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: FC = fuel cell; ICE = internal combustion engine. Battery capacity and hydrogen/ammonia tankers are designed to cover a distance of 10 000 km. Annual travel: 96 000 km for an oil tanker, 98 000 km for a bulk carrier and 180 000 km for a container ship (in line with average speeds and days at sea registered by IMO, 2014). Fuel costs in 2030 (including production and distribution): USD 0.17/kWh for hydrogen (produced via electrolysis), USD 0.13/kWh for ammonia (produced via electrolysis) and USD 0.2/kWh for electricity.

図 5.12 船種別の水素、アンモニア、電気推進船の総所有コスト(2030 年)

- バイオ燃料は、燃料システムを変更せずに重油やディーゼルへのドロップイン燃料として高い割合で混合できるため、短中期的には最も有望な代替燃料である。
- 水素燃料船は技術開発の初期段階にあり、小型船での水素燃料電池と ICE の実証プロジェクトが進行中であるものの、2030 年までに大規模な展開は見込めない。貨物海運

[35] 停泊中に陸上の送電線を客船に連結して必要な電力の大部分を供給するインフラである。

において、水素は複雑な貯蔵システムを搭載する必要がない圧縮水素の形で短距離および中距離の船の燃料として使用される可能性が最も高い。

表 5.4 海上輸送における主要な新技術の状況

Table 5.3 Main international regulatory policies covering air pollution and GHG emissions in maritime shipping

Name	Geographic coverage	Year introduced	Description	Regulatory actor
IMO Initial Strategy	Global	Adopted in 2018	Reduce absolute GHG emissions from shipping at least 50% by 2050 relative to 2008. Reduce CO_2 emissions per transport work at least by 40% by 2030, pursue efforts towards 70% by 2050.	IMO
Data collection system (DCS) for fuel oil consumption	Global	2019	All ships over 5 000 tonnes engaged in international voyage must collect consumption and other data for each type of fuel oil consumed. Flag states must collect and aggregate the data and submit to the IMO.	IMO
Submission of CO_2 emissions reports (MRV)	Ships calling at EU ports	2018	Companies must submit a CO_2 emissions report for all voyages in the European Union for all vessels under their responsibility.	European Commission
EU Emissions Trading System (ETS)	Ships calling at EU ports	2022 (expected)	Proposal to include shipping in the ETS as part of the Green Deal.	European Commission
Energy Efficiency Design Index (EEDI)	Global	Enforced in 2013	Requires minimum energy efficiency per tonne-km for new large vessels and mandates improvement steps depending on vessel type: 10% in 2015, 20% in 2020 and 30% in 2030 compared with average performance of vessels built in 2000-2010.	IMO
Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)	Global	Adopted in 2016	Monitors ship efficiency performance, mandates collection and submission of relevant data and establishes mechanisms to improve efficiency of existing ship operations.	IMO
Global Sulphur Cap	Global	January 2020	Limits the sulphur content of maritime fuel used on board vessels trading outside of sulphur ECAs to a maximum of 0.5%. Ships without exhaust gas scrubbers are not permitted to carry fuel for use with a sulphur content exceeding 0.5%.	IMO
Emission Control Areas (ECAs)	Baltic Sea, North Sea, Caribbean Sea and North American sea	Enforced respectively in 2005, 2006, 2012 and 2014	To operate in these areas, ship engines must comply with stricter standards for SOx and NOx than in global waters. In particular, there is a limit of 0.1% sulphur for fuel used by ships operating in SOx ECAs and NOx TIER III standards apply to ships operating in NOx ECAs.	IMO

Notes: IMO = International Maritime Organization; MRV = monitoring, reporting and verification; EC = European Commission; SOx = sulphur oxides; NOx = nitrogen oxides.

- アンモニアは水素に比べて液化温度とエネルギー密度が高いため、海運やその他の分野での潜在的な炭素を含まない燃料として注目されている輸送用燃料としての使用す

る際の主な障壁は、急性毒性のため漏洩が深刻な水質汚染を引き起こす可能性があることおよびコストである。アンモニアは、燃料電池(水素と同じように)だけでなく、従来の ICE でも使用でき、アンモニア燃料電池は、コストの削減と規模の拡大へさらなる技術開発が必要である。

- エネルギー効率の改善だけでは、輸送時のゼロエミッションを達成するのに十分ではないものの、コストを削減につながる。低炭素の輸送用燃料は化石燃料よりも高価だが、エネルギー効率対策により、追加の燃料コストを制限できる。船舶のエネルギー効率を改善するための現在の主な指針は、エネルギー効率設計指数(EEDI)(表 5.3)であるが、新技術の採用を促進するために、IMO はより厳しい基準の導入を迫られている。[36]
- 検討する価値のある政策の 1 つは、「運用燃料基準」である。これは、船舶に対して運用の二酸化炭素排出原単位の削減目標を義務付けるものである。このような基準は、欧州連合モニタリング報告および検証(MRV)および IMO データ収集システムに登録された排出レベルをベースラインとして使用することによって、地域およびグローバルに実施可能である (表 5.3 参照) 。

航空輸送

コロナ禍後の概観と展望

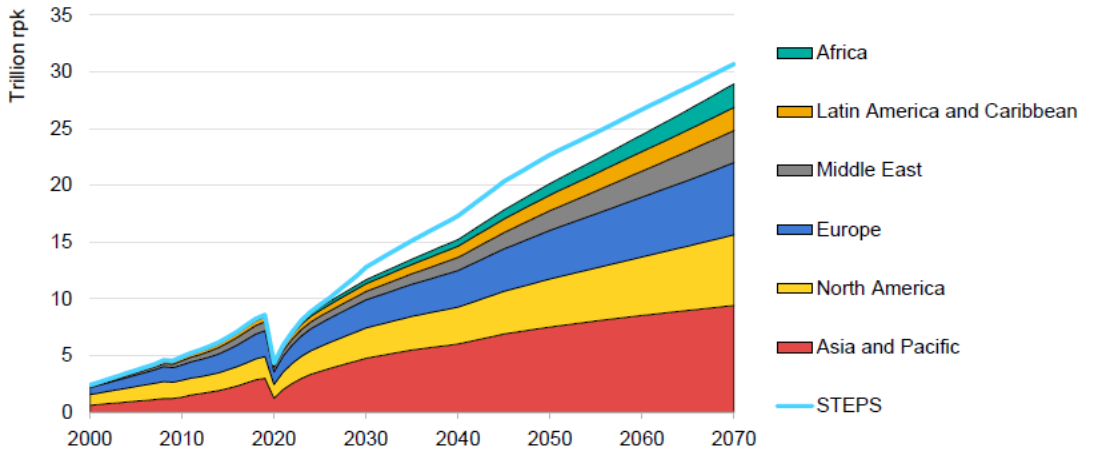
- 旅客航空部門は、コロナ禍において最も大きな打撃を受けた部門であり、乗客数は 2020 年 4 月に 95%近く減少し、5 月の第 1 週の定期便数は 2019 年の同じ週より 70%近く減少、占有席数はわずか 37%であった。業界の推定によれば、2020 年には全体としての有償旅客キロ(rpk[37])が 50%減少し、国際線の乗客数は 60%減少であった[38]。しかしながら、航空は、人口増加、経済発展、および国際貿易の増加により、遅くとも 2030 年代までに、旅客部門において最も急速に成長する部門へ返り咲く可能性がある。
- 航空は全体として、2019 年の化石燃料燃焼からのエネルギー部門の直接 CO_2 排出量のほぼ 3%を占めた。国際民間航空機関(ICAO)が管理する現在の排出削減の枠組みは、国際航空の炭素オフセットおよび削減スキーム(CORSIA)を含み、CO_2 排出量の効果的な削減にはつながっていないと考えられている。

[36] ICCT (2019), Turning the ship, slowly: Progress at IMO on new ship efficiency and black carbon, Staff blog, 21 May 2019, https://theicct.org/blog/staff/mepc74

[37] rpk(有償旅客キロ)は収益を創出する旅客数(有償旅客数)に飛行距離を乗じた値である。

[38] IATA (International Air Transport Association) (2020a), COVID-19 Outlook for air travel in the next 5 years (presentation), www.iata.org/en/iata-repository/publications/economicreports/covid-19-outlook-for-air-travel-in-the-next-5-years/

Figure 5.14 Passenger aviation activity by region in the Sustainable Development Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: rpk = revenue passenger-kilometre; STEPS = Stated Policies Scenario. Not including unscheduled or private flights. The projections were developed using the Aviation Integrated Model developed by University College London Energy Institute (AIM, 2020).

図 5.14 持続可能な発展シナリオにおける地域別の有償旅客キロ (2019 年から 2070 年)

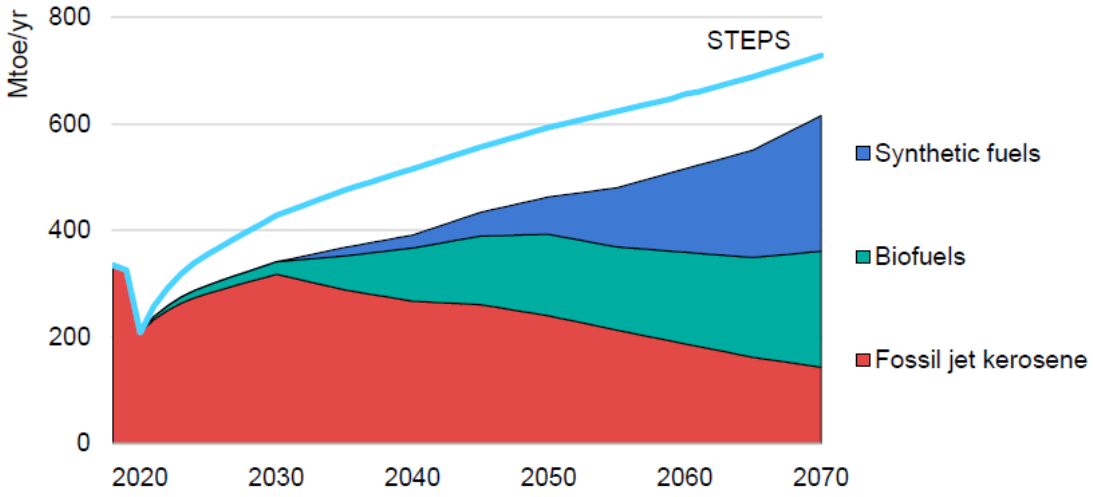
- 持続可能な発展シナリオでは、航空需要はコロナ禍後 2019 年の活動レベルに戻るまでに、3 年以上を要する。その後、特に発展途上国、アジア太平洋地域とアフリカで、世帯収入が増加するにつれて拡大を続ける。持続可能な発展シナリオでは、航空旅客輸送は 2019 年から 2070 年までに約 350%増加する。一方で、空の旅のコストを増加させ、需要を減らす税金を含む強力な政策措置により、持続可能な発展シナリオでは、公表政策シナリオよりも 2040 年までに rpk が約 12%低くなり、そのギャップは 2070 年まで 10 %以上が継続する。(図 5.14)
- 航空貨物の量も増加するが、旅客航空の数ほど急速ではない貨物専用便とベリー便の両方で運ばれる貨物の量は、2013 年から 19 年にかけて平均して年間 3.8%増加した。ベリー便は、持続可能な発展シナリオの予測期間にわたって、平均して年間 2.0%拡大すると予測されている。旅客機サービスの終了後に貨物専用機として転用されるため、新しい航空機モデルで具体化されたエネルギー効率の改善が貨物機に至るまでには時間を要する。
- 2019 年に航空用ジェット燃料からの直接 CO_2 排出量は全エネルギー部門の CO_2 排出量の 2.8%を占めているが、航空機が高エネルギー密度の燃料を必要とするため、軽減するのは難しい。(図 5.17)技術が進歩したとしても、現在の設計に基づく蓄電池が中距離・長距離航空路線で使用可能なエネルギー密度を達成できる見込みはほとんどない。バイオ燃料は持続可能なバイオマスの入手先が限られており、水素や合成燃料は技術

的には実現可能であるものの、従来の燃料と比較してはるかにコストが高い。(図 5.18)

実質排出ゼロへ向けた技術の道筋

- 持続可能な発展シナリオにおける世界の航空燃料消費量と、公表政策シナリオにおける総燃料使用量を図 5.15 に示す。持続可能な発展シナリオでは、持続可能な航空燃料の開発と採用を促進するための厳格な政策が、航空からの CO_2 排出量削減を促進する上で主導的な役割を果たす。
- 運用効率が向上し、エネルギー消費の少ない移動方法へ移行することで、燃料の使用量も削減される。中期的には、技術的および運用効率の向上は、持続可能な航空燃料のより迅速な展開とともに補助的な役割を果たし、長期的には、特に 2050 年以降に、合成燃料は CO_2 排出量の削減に貢献する。

Figure 5.15 Global aviation fuel consumption in the Sustainable Development Scenario and total fuel use in the Stated Policies Scenario, 2019-70



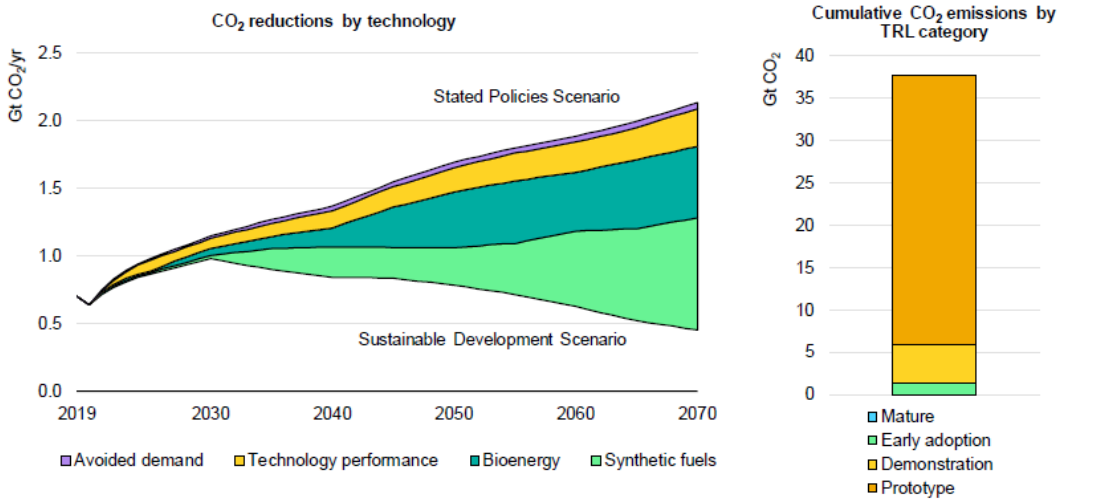
IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario. Projections developed using the Aviation Integrated Model developed by University College London Energy Institute (AIM, 2020).

図 5.15　持続可能な発展シナリオにおける世界の航空燃料消費量と公表政策シナリオにおける総燃料使用量(2019 年から 2070 年)

- 公表政策シナリオと比較した持続可能な発展シナリオにおける削減措置(左)と技術準備レベル(右)による航空の CO_2 排出量を図 5.16 に示す。持続可能な航空燃料は、特に 2050 年以降持続可能な発展シナリオにおいて航空からの排出量を削減する上で極めて重要な役割を果たす(図 5.16)。ただし、2070 年において需要の 4 分の 1 を賄うジェット燃料を完全に代替するものではない。

Figure 5.16 Global CO_2 emissions in aviation by abatement measure (left) and technology readiness level (right) in the Sustainable Development Scenario relative to the Stated Policies Scenario



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: The projections were developed using the Aviation Integrated Model developed by University College London Energy Institute (AIM, 2020). TRL = technology readiness level. See Box 2.6 in Chapter 2 for the definition of the maturity categories: large prototype, demonstration, early adoption and mature.

図 5.16 公表政策シナリオと比較した持続可能な発展シナリオにおける削減措置（左）と技術準備レベル（右）による航空の CO_2 排出量

- エネルギー効率の改善は、持続可能な発展シナリオ全体における排出削減の重要な技術的推進力となる。2034 年までに新しい航空機の費用効果の高い運用上および技術上の燃料燃焼削減の最大の可能性は 40%と推定[39]されており、持続可能な発展シナリオに折り込まれている。
- 国際線で ICAO が設定した燃費目標年平均 2%の改善率(ICAO、2013 年)と、国際線と国内線を合わせた 2009～20 年の IATA の年率 1.5%の改善目標(IATA、2018 年)はどちらも 2009～19 年の期間に達成された航空業界全体(国内および国際)の実際の改善率(rpk ベースで 2.9%、rtk ベースで 2.4%)を下回っており、車両効率基準が業界の効率化を推進する役割を果たしている自動車業界とは対照的である。
- 持続可能な発展シナリオでは、持続可能な航空燃料の採用を促進する財政措置(オフテイク契約および低炭素燃料指令など)は、航空機およびエンジンの最低燃費基準を義務付ける規制政策とともに、ますます重要な役割を果たす。ただし、政策の策定には燃料効率とのトレードオフ(BOX5.6)を認識する必要がある。

[39] ICCT (2016), Cost assessment of near and mid-term technologies to improve new aircraft fuel efficiency, https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT%20aircraft%20fuel%20efficiency%20cost%20assessment_final_09272016.pdf

BOX5.6：航空機の燃費向上とトレードオフ項目

・航空機の負荷に応じたサイズ選定とスピード
・航空機の運用・メンテナンスに伴うコスト
・ストップオーバー：離着陸は燃料を消費する一方で、長距離を継続飛行するためにはより多くの燃料を運ぶ必要がある。
・騒音対策：バイパス比の高いターボファン以外の対策は燃料使用量が増加する。(例えば、住宅密集地を避けるための迂回や急勾配の飛行ルート採用など)
・NO_x対策

先進技術の即応性と競争力

- 航空部門の主要な新技術の状況を表 5.5 に示す。効率向上は、エンジン、機体、パワートレインの改善によって達成できる。改良エンジンは、主にバイパス比(バイパスストリームの質量流量とコアに入る質量流量の比)を上げることで、大幅な効率向上が図られている(バイパス比が高いほど、同じ推力での燃料消費量は少なくなる)。オープンローターや超高バイパス比(UHBR)エンジンなどのより革新的な設計では、バイパス比をさらに高めており、最大 30%の燃料燃焼を削減できる可能性がある。
- 燃料電池電気およびハイブリッド電気航空機の RD&D プログラムは初期段階にあり、最初のプロトタイプは 2030 年代に計画されている。しかしながら、現在利用可能なバッテリーの重量エネルギー密度は、リージョナルジェットでの短い飛行をサポートするためでも少なくとも 3 倍に増加させる必要があり、 2070 年までに持続可能な発展シナリオで予測されるバッテリー技術の進歩(つまり、セルレベルのエネルギー密度がほぼ 2 倍になる)が実現すれば、すべてのフライトの約 40%に適用できる、バッテリー式電気航空機の技術要件を満たす。(図 5.17)
- 長期的に完全な脱炭素化を達成するには、クリーンな燃料に切り替える必要がある。現在、5 つのバイオジェット燃料の生産経路が、国際線に必要な燃料規格である米国材料試験協会(ASTM)規格 D7566 に準拠しているが、これまでのところ、HEFA ジバイオジェット燃料のみ商用可能である(TRL9-10)。航空会社、空港、燃料供給会社の間では長期供給契約を含む持続可能な航空燃料の配備を支援する多くの対策がすでに実施されている。ネステはオスロ空港の HEFA 燃料を、ワールドエナジーはロサンゼルス空港へ燃料を提供している。

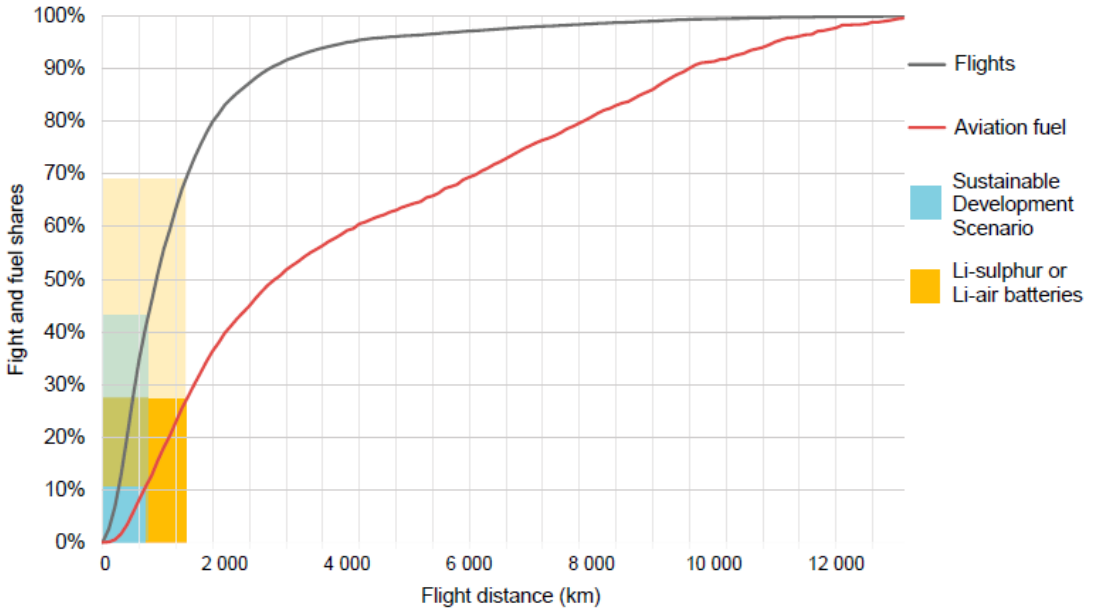
表 5.5 航空部門の主要な新技術の状況

Table 5.5 Status of the main emerging technologies in the aviation sector

Technology	TRL	CO_2 reduction mechanism	Year available (importance for net-zero emissions)	Deployment status
Engines				
UHBR engines	5	Fuel efficiency	2030-35 (High)	Ground tests of Rolls Royce's UltraFan with a 25% fuel saving potential will start in 2021. The manufacturer collaborates with Airbus under the EU Clean Sky 2 programme and this UHBR engine will be available towards 2030.
Open rotor engines	5	Fuel efficiency	2035 (High)	Demonstration of the GE36 open rotor engine dates back to the 1980s. In 2017 SAFRAN ground-tested a demonstration model with 30% potential fuel savings that will be market ready in 2030.
Airframes				
Blended wing-body aircraft	3	Fuel efficiency	N/A (Medium)	Boeing together with NASA conducted test fights of a small-scale prototype until 2013 and Airbus in 2019. This concept is validated yet neither manufacturer has confirmed plans for a large prototype.
Alternative powertrains				
Hybrid electric aircraft	4-5	Fuel switch	N/A (Medium)	Airbus together with Rolls Royce is developing a prototype for a hybrid electric aircraft under the E-Fan X programme. The aim is to launch a test flight by 2021 with an aircraft with one electric motor and three regular jet engines. Wright Electric aims to launch a 186-seat aircraft for short-haul flights in 2030. Small aircraft (Cassio and the Ecopulse) have performed flight tests.
All-electric aircraft	3	Fuel switch	N/A (Medium)	A nine-seater seaplane, retrofitted with a battery and electric engine, had its inaugural flight in 2019 in Canada, trailblazing the development of small battery electric aircraft for very short distances (the aircraft has a range of about 160 km). Batteries with higher energy density will be needed for longer distances.
Fuel cell electric aircraft	3	Fuel switch	N/A (Medium)	DLR tested a fuel cell powered four-seater motor glider (HY4) in 2016. Boeing tested a fuel cell electric prototype in 2008. There are no announced programmes for larger aircraft.

Notes: UHBR = ultra-high bypass ratio. A broader list of technologies compatible with a low-carbon transition for the aviation sub-sector is presented in the technology mapping portion of *The Covid-19 Crisis and Clean Energy Progress* (IEA, 2020b).

Figure 5.17 Share of flights and fuel use in overall commercial passenger aviation, 2017



IEA 2020. All rights reserved.

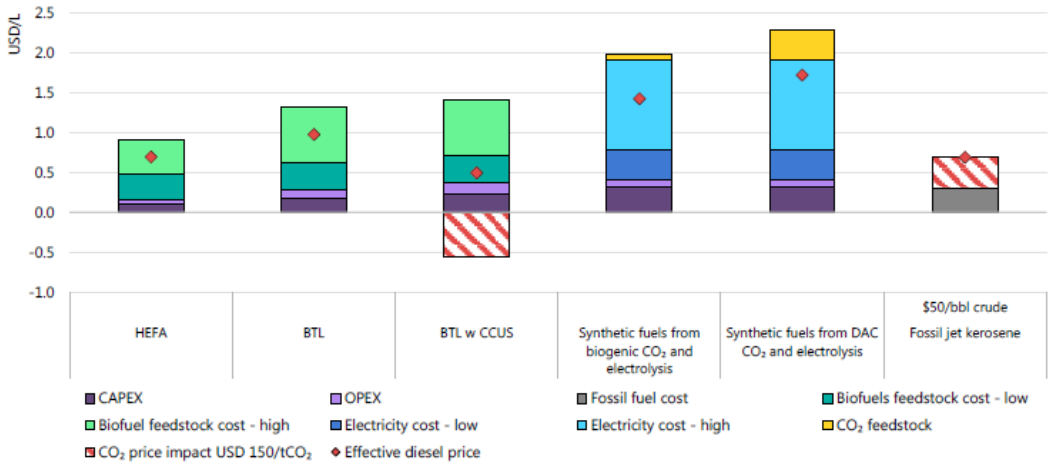
Note: The boxes show the share of aviation fuel use (solid) and flights (transparent) that could theoretically be offset by battery electric aircraft entering the fleet in 2070 in the Sustainable Development Scenario, or by lithium-sulphur batteries.

Source: IEA analysis based on OAG (2018); Schäfer et al. (2019).

図 5.17 民間旅客航空全体におけるフライトと燃料使用のシェア(2017 年)

- 2050 年の持続可能な航空燃料の生産コストを図 5.18 に示す。持続可能な発展シナリオでは、2050 年に炭素価格が 150 米ドル/トンと高く、HEFA ジェットおよび BTL ベースのバイオジェット(CCUS を使用)燃料が最終的に化石ジェット燃料と競合する可能性があるように見えるものの、将来の生産コストと石油価格非常に不確実である。
- 米国では、カリフォルニアの低炭素燃料基準(LCFS)と国の再生可能燃料基準(RFS)が相まって、すでに HEFA ジェットが商業的に実施可能になっている。英国の再生可能輸送燃料義務といった財政的支援の例もあるが、HEFA と化石ジェット燃料、また BTL ベースのバイオジェット燃料/合成ジェット燃料と化石ジェット燃料のギャップを埋めるためには、より多くの政策支援が必要である。

Figure 5.18 Levelised production costs of sustainable aviation fuels in 2050



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: HEFA = hydrogenated ester fatty acid; BTL = biomass-to-liquid; CCUS = carbon capture and utilisation; DAC = direct air capture; CAPEX = capital expenditure; OPEX = operational expenditure. Effective diesel price refers to the levelised production cost with carbon prices included where shown. Levelised costs assume a discount rate of 8%. Crude oil price of USD 50 USD/bbl are assumed. Biomass feedstock costs range USD 5-15 per gigajoule. Synthetic fuel production here uses biogenic CO_2 at a cost of USD 30/tCO_2 and CO_2 from DAC at a cost of USD 150/tCO_2, and hydrogen from electrolysis powered by a dedicated renewable energy system. Electricity prices for hydrogen production and synthetic fuel production range USD 20-60 per megawatt-hour (MWh) across regions while an average electricity price of USD 40/MWh is assumed for biofuels and is included in the biofuel OPEX. For more details on synthetic fuel production costs, see Chapter 2.

図 5.18 持続可能な航空燃料の生産コスト(2050 年)

・　クリーンエネルギーイノベーション

- イノベーションは不確実で競争的なプロセスであるが、プロトタイプ、実証、早期採用、そして成熟期の 4 つのステージを経る。技術の特性によって、それらのステージを通過するスピードは異なる。政府は、技術開発への資金提供を通じて、それらのプロセスを通過していくことを広範に支援する役割がある。
- ネットゼロを達成するには、重要な技術への強力で的を射た技術開発と革新的な取組への努力が必要である。2070 年の時点で、公表政策シナリオと持続可能な発展シナリオを比較すると、累積 CO_2排出削減量の 35%は現時点でプロトタイプまたは実証段階にあり、さらなる技術開発がなければ規模の拡大が見込めない技術に依存している。累積CO_2排出削減量の 40%は、まだ商業的に市場に展開されていない技術に依存している。
- Faster Innovation Case は、2070 年ではなく、2050 年にネットゼロ排出を実現するためにはクリーンエネルギー技術の開発を加速させる必要があることを示している。CO_2排出量を削減する技術が現時点でプロトタイプまたは実証段階の技術である割合がと持続可能な発展シナリオよりも 75%高く、2050 年の排出削減量の 45%は商業的に展開されていない、あるいは非常に限定的な技術によって削減される。
- Faster Innovation Case でのネットゼロ排出への移行過程において、技術的な変化のペースと規模をさらに拡大させる必要がある。発電部門は、2050 年までに 20,000TWｈ(持続可能な発展シナリオに比べて 35%の増加)の電力需要の増加が見込まれており、水素や合成燃料によってより早急に脱炭素化する必要がある。毎年、再生可能エネルギー電源容量を平均で 770ＧW追加され、これは持続可能な発展シナリオよりも 50%以上大きなものである。追加的な代替燃料への需要は 20%高く、水素へは 50%、毎年約 50ＧW の電気分解装置を追加していく必要がある。
- Faster Innovation Case での追加的な脱炭素化は、需要の電化(2050 年時点で追加削減の 35%を占める)、CCUS (25%以上)、バイオエネルギー (20%以上)への取組よって進む。加えて、低炭素水素の利用によって重工業において追加的に 30%の排出削減となる。

イントロダクション

- これまでの章で議論してきたように、国連 SDGs を達成するためには、研究段階の技術を含む、広範なクリーンエネルギー技術が必要である。
- 技術開発には時間が必要であり、全てが成功するわけではないが、急速な変化をもたらした革新的な技術を見つけることの重要性を強調しているに過ぎない。
- この章では、持続可能な発展シナリオでのイノベーションの役割を分析することで、最もコスト効率的にネットゼロ排出に各国が達することを助ける効果的なイノベーションサイクルの必要性を強調する。また、Faster Innovation Case を分析することで、2070 年にネットゼロ排出に達する持続可能な発展シナリオの目標を 2050 年に前倒しするた

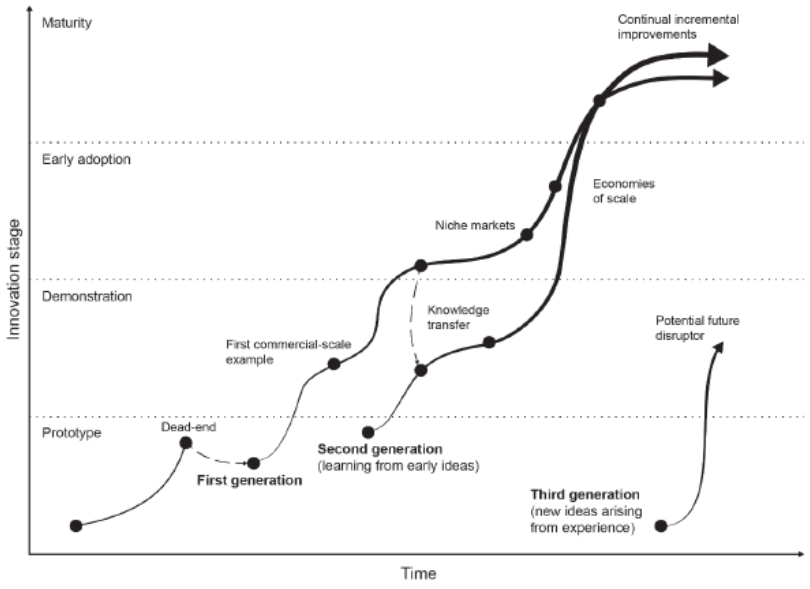
めに、どの程度クリーンエネルギー技術イノベーションがさらに必要となるのかを探求する。

- この章は、各国の政策担当者がネットゼロ排出を達成するためにエネルギー部門がクリーンで強靭になるために果たすイノベーションの役割、COVID19 からの経済復興計画におけるクリーンエネルギー技術への投資の受容性を示すために ETP 特別報告書として発表されている。2020 中盤時点ではロックダウン等による影響をすべて検討することはできないが、2020 年第一四半期の利用可能なデータから早期トレンドを類推した。

クリーンエネルギーイノベーションと政府の重要な役割

- この報告書ではイノベーションを、新製品や生産プロセスのアイデアを生み出し、その開発を研究室から市場への主流の普及まで導くプロセスとして扱う。各ステージ様々なリスクに直面し、結果として一部の製品だけが市場に展開される。
- イノベーションの道筋は進化論的であり、急進的・斬新的な進歩によって特徴づけられる。新たな技術が開発され、技術開発への資金提供によって支援される“increasing returns to adoption”サイクルという好循環が形成される。ただし、初期段階においてはこの循環が弱く、リスクをとった投資が必要になる。
- 技術が採用されるかは、企業、消費者、政策、競合する技術、インフラ、そして社会情勢
- といった多くの要素に左右される。政府や民間企業は、規制対応や新たなビジネスモデルの開発など試行錯誤を通じて技術改善に取組み、イノベーションの成功の可能性を高めようとする。
- 成功するイノベーションシステムには、利害が一致し、多様な機能を持つ幅広いアクターが関与しており、それぞれのアクターは公共政策によって強化される。この機能は以下の 4 つに分類することができる。
  - Resource push: 技術開発のための資金提供、研究員の増員、研究インフラの整備
  - Knowledge management: 研究者、アカデミア、企業、政策担当者、国際機関との知見の共有
  - Market pull: 市場ルールや規制によって技術開発へのインセンティブを高める
  - Socio-political support: 新たな技術・サービスへの社会的・政治的に広範な支持
- 最終的に 4 つのステージを通過する成功する新しいアイデア
- イノベーションのプロセスは線形ではなく、その技術の特徴(タイプ、デザイン、コンポーネント)によって異なるが、4 つのステージに分類することができる。それぞれのステージに異なる特徴と要求事項があるが、成功する技術はそれらを最終的に通過する(図 6.1)

Figure 6.1 Four stages of technology innovation, feedbacks and spillovers that improve successive generations of designs



IEA 2020. All rights reserved.

Successful technologies eventually pass through four stages of innovation, with R&D contributing improvements and spurring ideas for novel prototypes at each stage.

図 6.1 次世代の設計を改善する技術革新、フィードバック、波及効果の 4 つの段階

- Prototype：新しいコンセプト、デザイン、既存機器の改善などを行う段階。成功する確率は低いが、プログラム当たりの費用も低い。
- Demonstration：新しい技術を導入した最初の商業用フルスケールユニットを用いる段階。プロトタイプ段階よりも時間、コスト、リスクを必要とし、特に大規模設備の場合には「死の谷」と呼ばれる。
- Early adoption：この段階では、既存技術と比べて高いコストと性能ギャップがあるが、顧客が使用を試す、または、特定の目的のために必要としている。収益性は低く、引き続き死の谷に直面するが、政府が社会的、環境的、経済的な便益があると考える場合には資金面や政府購入などの支援を得られる可能性がある。商業利用しながら、製品コストを引き下げながら改善を進めることで、市場シェアの獲得を目指す。
- Maturity：技術が成熟し、市場のメインストリームとなって既存資産の置き換えが進む。さらに、技術者や顧客からのフィードバックを受けて、技術の改善がさらに進められる。主要なデザインが受け入れられ、リスクも一般投資家に受け入れられる程に身近になる。

イノベーションのシステムにおける政府やその他関係者の役割

- イノベーションの各段階で、多くの関係者が重要な役割を演じ、それがエネルギーイノベーションの主要なドライバーとなる競争となる。
- 政府の役割は、技術開発への資金提供、ネットワークインフラの提供、特許保護、輸出支援など多岐にわたって重要役割がある。一方で、イノベーションに対する公的な支援は、企業が政府からの確実な利益を得ることを目的としてしまい、既存企業がもつ既存技術の改善だけにとどまってしまうことで、破壊的な技術が生み出される基礎研究には届かないという政府の失敗の可能性もある。破壊的な技術は、市場価値が低くとも政府が望む社会的・環境的な成果と関連するのであれば、特に重要度が高くなる。
- 企業の研究の効率性を引き上げるのは、公的な研究開発への資金提供から生じるアイデアに依存することが示唆されている(Fleming et al., 2019)。また、公的なエネルギー研究開発への資金提供が、民間企業の拠出を減らすことなく刺激することになる(Nemet and Kammen, 2007)。産業クラスターを支援し、戦略的に政府購入を活用、インフラへの投資といった Mission Oriented アプローチ((Díaz Anadón, 2012; Mazzucato, 2018).)をとることによって、イノベーションの成功率を増加させることができる。
- 歴史の中で、イノベーションのスタート地点である研究開発の重要性が強調されており、世界各国の政府が主要な新技術の成功を支援する上で重要な役割を果たす。

COVID19 クリーンエネルギー技術革新のための脅威か機会か？

- COVID19 によるロックダウンなどによって、大恐慌時代以来の経済低迷期に入った。
- 技術革新は構造転換のドライバーである。革新的な技術は経済的な便益をもたらし、研究開発投資と雇用の関係は複雑だが新たなハイテク技術は雇用を増加させることが示唆されている。
- COVID19 によって 3 億人の雇用が失われ、4 億 5 千社が深刻な状況に直面しているが、クリーンエネルギー技術革新への投資によって 75 万人分の技術者などの専門家の雇用が生み出される。これによって将来的に新たな技術が生み出されるが、クリーンエネルギー技術革新への投資をやめてしまえば、この機会が失われる。
- 短期的に、COVID19 による経済の減速は、企業の収益性を悪化させて投資余力を奪っておりクリーンエネルギー技術革新への投資を止める脅威となっている。政府の公的な研究開発支援は民間よりも継続性があり、主要国政府は危機への対応の中で技術革新を加速させる資金を増やす可能性が十分にある。
- 2020 年下半期は、クリーンエネルギー技術革新への投資を倍増させる唯一の機会となる。短期的に各国政府は、衛星や雇用、流動性供給などによって景気回復に注力しているが、経済復興計画においてクリーエネルギー技術革新への投資を実施することで、ネットゼロ排出を達成するための各セクターの投資サイクルを変化させることができる。

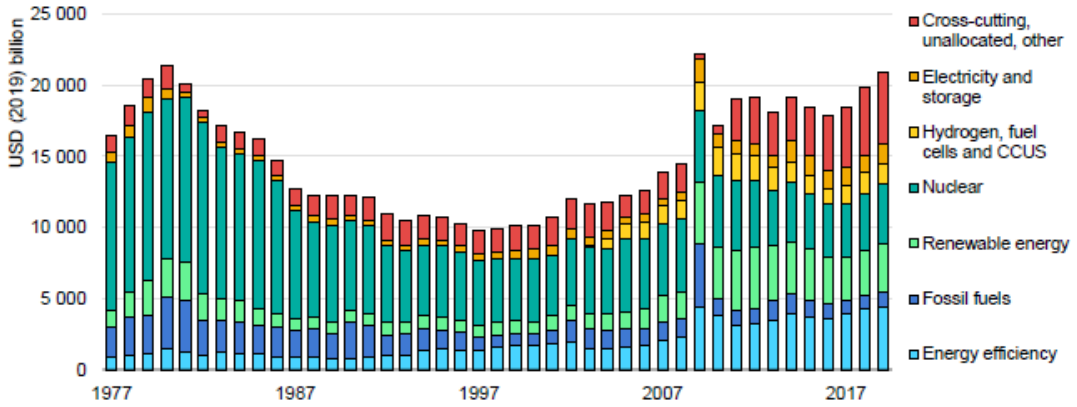
2020 年のグローバルなクリーンエネルギーイノベーションの状態

- コーネル大学と WIPO(世界知的所有権機関)が毎年出版する Global Innovation Index によってグローバルなイノベーションの姿を知ることができるように、IEA でもクリーンエネルギーイノベーションの状況を知るための指標を開発した。現時点では、一面的ではるが、将来的にスコープを拡大していくことで世界中のイノベーションの進展状況をしることができるようになる。こうした活動は政策担当者等に対して効率的な資源配分や開発を加速させるといった便益がある。

政府の研究開発資金

- 2019 年のエネルギー関連研究開発への拠出は前年比で 3%増加となる 300 億 US ドルで、そのうち 80%が低炭素エネルギー技術に使われた。2015 年に主要 24 か国が Mission Innovation initiative を立ち上げ、公共投資に占めるクリーンエネルギー研究開発投資を今後 5 年間で 2 倍にすると約束したことで近年は拡大していた。
- IEA は 1970 年台から各国予算に占めるエネルギー研究開発投資の実績データを保有している。インフレ率等を調整した結果、2000 年から 2012 年に IEA 加盟国の研究開発投資は概ね 2 倍に拡大しているが、1980 年代に一部の国で原子力の研究開発に注力していた時期と比べると低い水準にある。(図 6.2)

Figure 6.2 Public energy technology R&D and demonstration spending by IEA member governments by technology, 1977-2019



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: CCUS = carbon capture, utilisation and storage. Peak in 2009 was due to post 2007-08 financial crisis stimulus funding, especially in the United States.
Source: IEA (2020d).

IEA member government R&D spending, which goes mostly to low-carbon technologies, has been broadly flat since 2012 after having doubled over the previous decade or so.

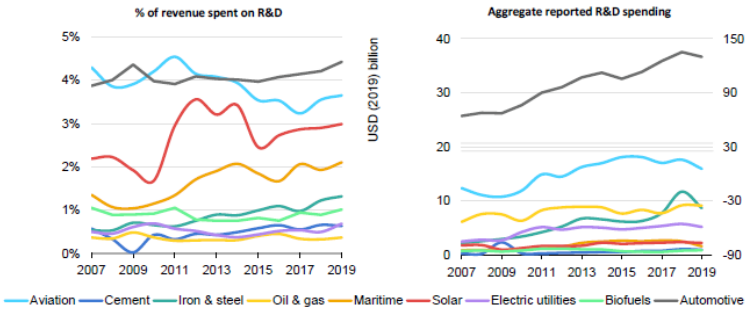
図 6.2 IEA 加盟国政府による技術別公的エネルギー技術開発と実証への支出の推移(1977 年から 2019 年)

- 以前の研究開発資金の拠出先と比べて、近年はエネルギー効率や再生可能エネルギーなどに多くの資金が拠出され、バランスをとったポートフォリオになっている。とは言え、供給側技術に対する資金拠出も多く、排出量を大幅に削減する技術の開発が進められている。しかし、エネルギー研究開発予算は増えているが、政府の研究開発予算に占める割は縮小している。

民間部門の研究開発資金

- エネルギー技術関連企業の研究開発投資は、過去 10 年で 40%増加し、2019 年に 90 億 US ドルに達している。前年比の伸び率は 3%と、過去数年と比べると緩やかになったが、これは金融危機やオイル価格の暴落といった要因が挙げられる。
- これらの研究開発資金のうち 25 億 US ドルが再生可能エネルギーの技術開発に投じられており、2010 年から 2019 年に 74%増加した。
- 自動車産業はエネルギーに依存する産業よりも多くの研究開発投資を行っており、これは燃費規制や競争上のプレッシャーによって、低燃費車や EV の開発に経営資源を集中的に投じているからである。投資が 2018 年と 2019 年は投資が横ばいとなっているが、新しい企業がバッテリーや燃料電池を市場に投入し、主要な製造事業者を追い出そうとしている。

Figure 6.3 Global corporate R&D spending as a share of revenue in selected sectors, 2007-19



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Includes companies reporting 50% or more of their revenue in these sectors, per Bloomberg Industrial Classification System (BICS), and for which both reported R&D and revenue data are available in a given year. Total R&D expenditure (not only energy-related R&D) is scaled by the company's revenue share in the reported sector. Automotive is shown on the right-hand axis in the chart of aggregate reported R&D spending. Like other classifications such as International Standard Industrial Classification (ISIC) and the classification of economic activities issued by the European Commission. Acronym NACE comes from French (Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne), BICS provides a structure for analysing data related to different economic activities. It is used here because of the high degree of disaggregation of firm-level data for energy-related sectors.

Source: Bloomberg LLP (2020).

Some sectors for which new technologies will be critical to net-zero emissions typically reinvest a small share of their revenue in R&D, while auto companies markedly outspend other sectors.

図 6.3 特定セクターごとの収益に占めるグローバルな企業の研究開発投資の割合(2007 年から 2019 年)

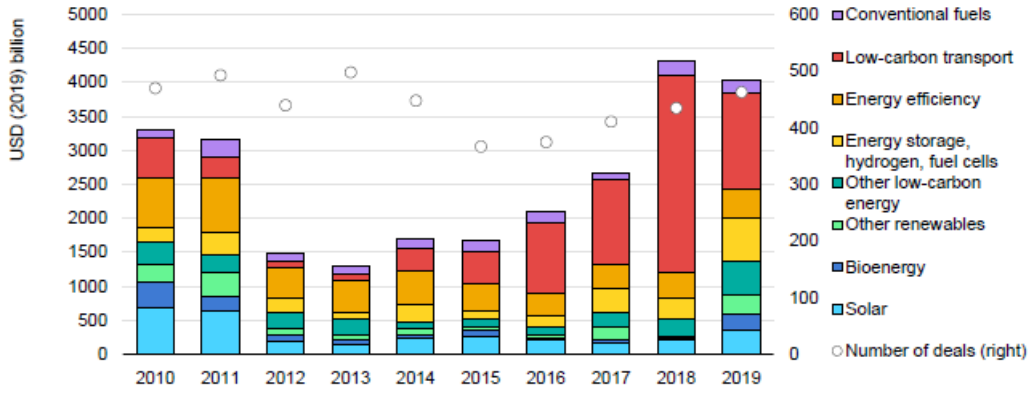
- その他の産業では、収入に対する研究開発の比率が小さいが、これは新しい技術が競争

に与える影響がそれほど大きくないことを表しているとみることができる。しかし、ネットゼロを達成するためには、これらのセクターでも研究開発を増加させ、新しい技術やプロセスの導入、改善を進めていく必要がある。

ベンチャーキャピタル

- エネルギー技術関連のスタートアップに対する自己資本投資は2019年に1650億USドル、こうちリスクの高い初期段階のベンチャーキャピタル(seed, series A and series B)は40億USドルとなっている(図 6.4)。こうしたベンチャー企業への投資に占める政府や企業の割合は低いが、民間のリスク資本が新たな市場を作り、規模を拡大していくために重要な役割を果たしている。

Figure 6.4 Global early-stage venture capital deals for energy technology start-ups



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Transport includes alternative powertrains and their infrastructure, but does not include shared mobility, logistics or autonomous vehicle technology. Bioenergy does not include biochemicals. Other low-carbon energy includes CCUS and smart grids. Conventional fuels include fossil fuel extraction and use, and vehicle fuel economy. Includes seed, series A and series B financing deals. Outlier deals of over USD 1 billion that distort the year-on-year trend are excluded; they totalled USD 1.6 billion in 2016, zero in 2017, USD 2.1 billion in 2018 and zero in 2019.

Sources: IEA calculations based on Cleantech Group (2020).

Venture capital investment remained robust in 2019, with investments spread more evenly between sectors than in recent years. Storage and hydrogen saw the most growth.

図 6.4 エネルギー技術スタートアップへのグローバルな
アーリーステージベンチャーキャピタル取引

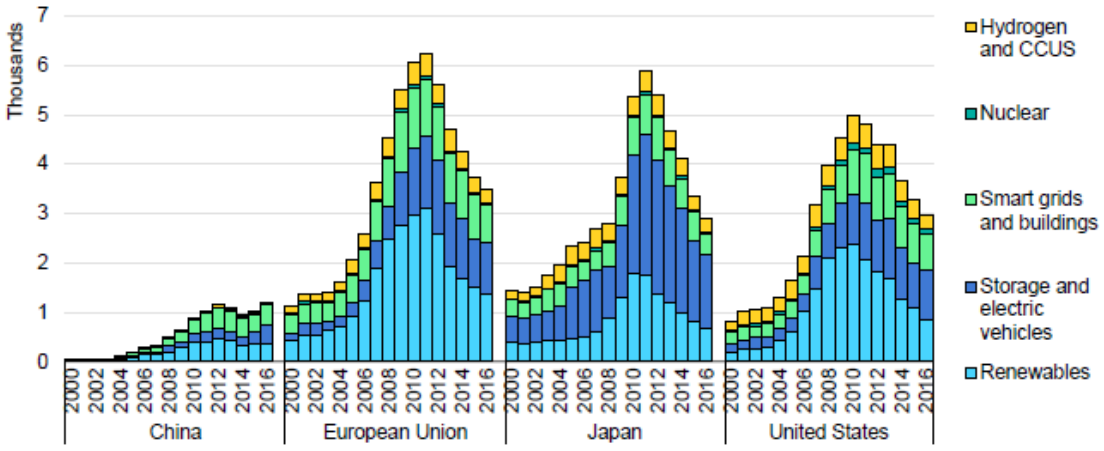
- ベンチャーキャピタルは、将来的なスケールアップによって市場で勝ち残れる可能性がある起業家が求める資金需要を満たす役割がある。エネルギー分野でも、資本集約的でないデジタル技術を提供するスタートアップの支援にはベンチャーキャピタルが効果的であった。最近は、EV、水素製造、電力ストレージといったハードウェア分野の場合には、さらにベンチャーキャピタル投資が活発化している。

- こうした投資をさらに活発化させるために、一部の政府がクリーンエネルギースタートアップへ直接投資を検討しており、EU は 1 億 US ドル規模の Breakthrough Energy Ventures Europe を立ち上げている。企業も同様にスタートアップへの投資を拡大しようとしているが、規制や技術的な不確実性があるため、企業ベンチャーキャピタルやオープンイノベーションへの資金割当を増やしている。

特許化

- 低炭素技術に関連する特許数は 2011 年にピークを迎えた後、以降減少傾向にある(図 6.5)。特許は、これまでの研究開発の結果を表しており、クリーンエネルギーイノベーションのトレンドを知ることができる指標ではあるが、特許受理までの時間を要し、ソフトウェア等は特許化されるわけではなく全ての成果を表すものではない。

Figure 6.5 Issuance of patents for low-carbon energy technologies in selected countries/regions



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: CCUS = carbon capture, utilisation and storage.
Patent count refers to the number of granted international patent families that include at least two geographical offices. Counts are allocated to countries based on the country of the inventor.
Source: OECD (2020).

Following a decade of strong growth in patents for low-carbon energy technologies, there has been an almost uninterrupted slowdown since 2011.

図 6.5 特定の国・地域別の低炭素エネルギー技術特許の発行数

- 2011 年以降に再エネ関連の特許が減ったのは、PV、エタノール、風力に関連する技術が成熟し、各国の市場に導入されたことが要因と考えられる。しかし、先進バイオ燃料、地熱、海洋、その他の自然エネルギー分野の特許の数が、その減少を相殺できていないことが懸念される。

COVID19 によるクリーンエネルギーイノベーションへの潜在的な影響

- 2020 年は EU や中国の研究開発計画の最終年であり、次の計画に向けた予算を議論される予定であったが、COVID19 によってその予算が疾病対策や景気回復などに流用されている。企業も同様に、研究開発の再検討を行っている。
- 多くの国で COVID19 によるパンデミックへの対策を優先しているが、一部の国ではクリーンエネルギーイノベーションへの直接的・間接的な施策を検討している。
- 政府発表やデータが示すのは、既にイノベーションシステムが脆弱になっていることであり、実証段階や市場投入段階にある製品が最も影響を受けている。新興国は景気刺激策を発表していないが、研究開発予算は大きなプレッシャーに直面している可能性が高い。

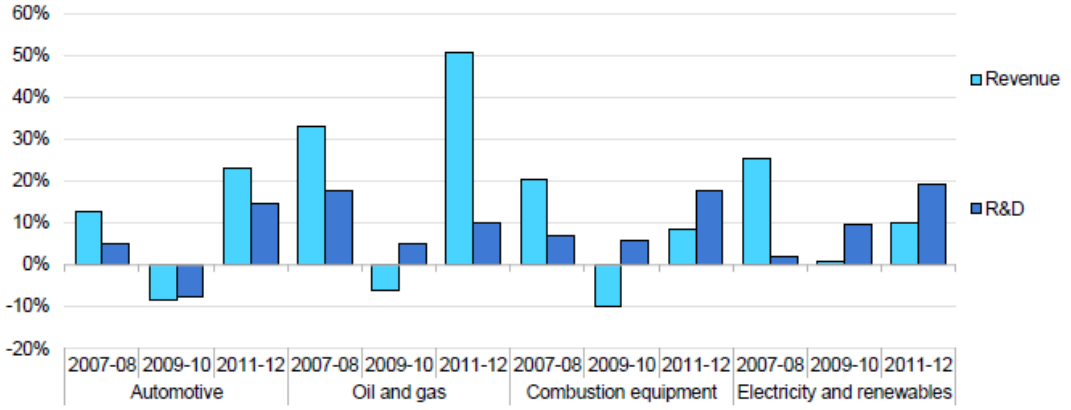
政府の研究開発資金

- 公的なエネルギー技術開発への COVID19 の影響を決めるには早すぎるが、過去のリーマンショックの時期と比べれば、その後に予算が減少したことを踏まえれば、2022 年から 2025 年は予算制約へのプレッシャーが高まる。インドやブラジルのような新興国では、クリーンエネルギー開発が活発であったが、追加予算がない限り頓挫することになる。これは、今後数十年間のクリーンエネルギーへの移行に重要な意味をもつ。

民間部門の研究開発資金

- 企業の研究開発予算も、収益低下の結果として多くのエネルギー関連セクターで削減あるいは減少する。2020 年上半期の企業決算から、自動車、航空、化学は研究開発費を前年比で減少させており、2021 年になっても研究開発予算へのプレッシャーが続くと見込まれる。
- 2007 年-08 年のリーマンショックや 2014 年の石油価格の暴落を振り返ると、自動車部門を除いて研究開発費は堅調に推移している。また、2009 年のように政府が税制優遇などの措置で研究開発を支えることもあり、こうした不況期が企業にとって破壊的な技術を採用する契機となる幾つかのエビデンスがある。

Figure 6.6 Growth rates for revenue and R&D for selected sectors, 2007-12



IEA 2020. All rights reserved.

Note: Shows average annual growth rates per pairs of years for the top 20 R&D spenders per sector that reported data in each year.

Source: IEA calculations based on Bloomberg LLP (2020).

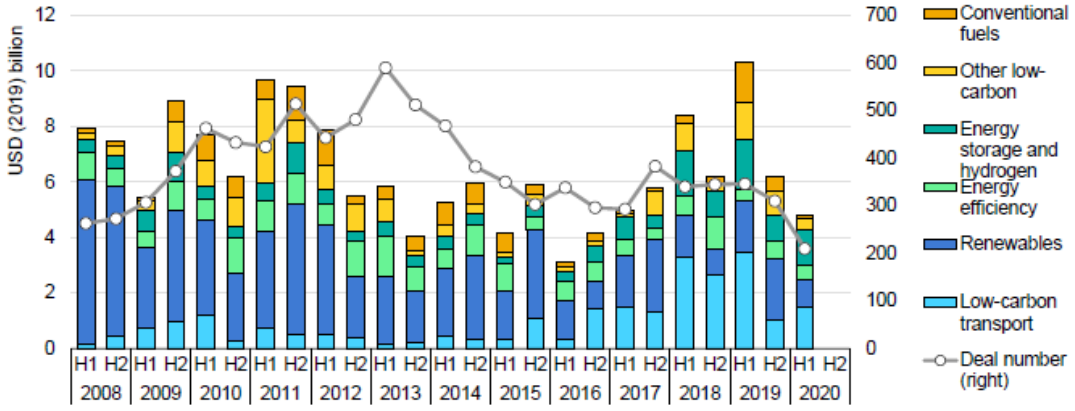
Total R&D spending of key energy sectors grew more slowly in 2009-10 than before the 2007-08 financial crisis, with a decline in the automotive sector; electricity and renewables were an exception.

図 6.6 特定のセクターにおける収益と研究開発投資の成長率
(2007 年から 2012 年)

ベンチャーキャピタル

- 初期段階のベンチャーキャピタルは 2020 年上半期に前年比で 20%減少、下半期も様々なリスク要因によって減少が見込まれる(図 6.7)。このため、多くのスタートアップが資金繰りに奔走し、エネルギー技術の専門家などをレイオフする損失に直面することになる。このため、クリーンエネルギー技術をもつ企業の資金調達にブレーキをかける可能性がある。

Figure 6.7 Value and number of global energy-related venture capital deals (early and late stage) by semester and year



Notes: H1 = first-half of the year; H2 = second-half. Transport includes alternative powertrains and their infrastructure, but does not include shared mobility, logistics or autonomous vehicle technology. Renewables includes bioenergy but not biochemicals. Other low-carbon includes CCUS and smart grids. Conventional fuels includes fossil fuel extraction and use as well as vehicle fuel economy.

Includes seed, series A, series B, grants, growth equity, buyout and late-stage private equity, coin/token offering and private investment in public equity financing deals. Deals reported in the last week of June 2020 are not counted. Outlier deals of over USD 1 billion that distort the year-on-year trend are excluded; they totalled USD 2 billion in 2008, USD 1.9 billion in 2009, USD 1 billion in 2010, USD 3.5 billion in 2011, USD 4.8 billion in 2012, USD 7.9 billion in 2013, USD 6.4 billion in 2014, USD 1.3 billion in 2015, USD 1.6 billion in 2016, USD 3.9 billion in 2017, USD 9.4 billion in 2018, USD 1.3 billion in 2019 and USD 1.2 billion in 2020.

Sources: IEA calculations based on Cleantech Group (2020).

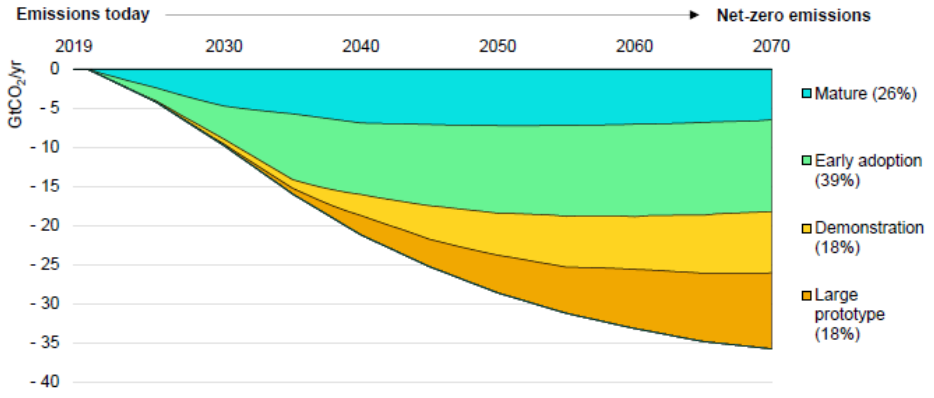
The first-half 2020 saw half as much energy-related venture capital activity (early and late stage) as in the same period in 2018-19; high-value later stage fundraising rounds were affected most.

図 6.7 半期ごとの世界のエネルギー関連ベンチャーキャピタル取引の価値と数(初期及び後期)

持続可能な開発シナリオでのイノベーションの必要性

- 技術開発と展開によって新たなエネルギー需要を満たし、既存エネルギー資本を置き換える技術変化によってクリーンエネルギーへの転換を進める持続可能な開発シナリオ(持続可能な発展シナリオ)では、ネットゼロ排出を達成するために、今後 50 年で実証の初期段階にある技術もコストが低減し、性能が改善されることで広く普及すると想定している。当然のことながら、将来にわたって確実にそうした技術が普及するわけではなく、様々な不確実性が存在している。
- 2070 年の時点で、公表政策シナリオと持続可能な発展シナリオを比較すると、累積 CO_2 排出削減量の 35%は現時点でプロトタイプまたは実証段階にあり、さらなる技術開発がなければ規模の拡大が見込めない技術に依存している。累積 CO_2排出削減量の 40%は、まだ商業的に市場に展開されていない技術に依存している(図 6.8)。それらの技術は、重工業、長距離輸送で普及することによる貢献が最も大きい。

Figure 6.8 Global energy sector CO_2 emissions reductions by current technology maturity category in the Sustainable Development Scenario relative to the Stated Policies Scenario, 2019-70



IEA 2020. All rights reserved.

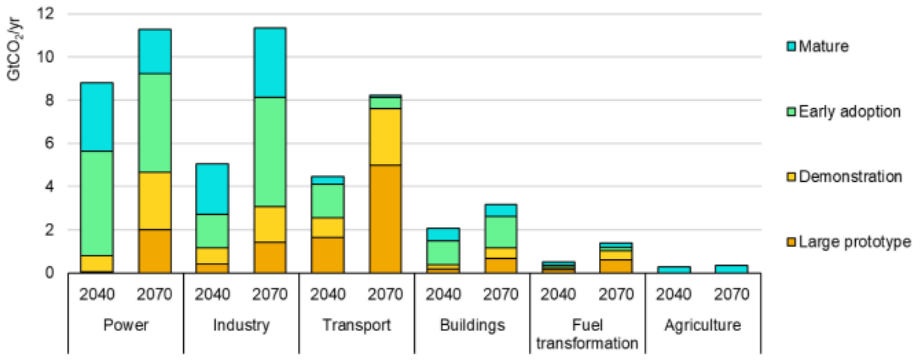
Notes: $GtCO_2$ = gigatonnes of carbon dioxide. Percentages refer to cumulative emissions reductions by 2070 between the Sustainable Development Scenario and the Stated Policies Scenario enabled by technologies at a given level of maturity. See Box 2.6 in Chapter 2 for the definition of the maturity categories: large prototype, demonstration, early adoption and mature.

Technologies that are only at the large prototype or demonstration stage today contribute almost half of the emissions reductions in 2070 in the Sustainable Development Scenario.

図 6.8 公表政策シナリオに対する持続可能な発展シナリオの技術成熟度別エネルギー部門からの世界の CO_2 排出削減量(2019 年から 2070 年)

- 持続可能な開発シナリオにおいて、セクターごとに成熟した技術が占める割合は異なる(図 6.9)。運輸部門では長距離輸送の EV 化のようなプロトタイプの果たす割合が大きいが、産業部門では設備の寿命が長いため既に市場に投入された技術が占める割合が大きい。長期的には、ネガティブエミッション技術の導入がネットゼロ排出に大きく寄与する。

Figure 6.9 Global CO_2 emissions reductions by current technology maturity category and sector in the Sustainable Development Scenario relative to the Stated Policies Scenario, 2040 and 2070



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: $GtCO_2$ = gigatonnes of carbon dioxide. See Box 2.6 in Chapter 2 for the definition of the TRL categories large prototype, demonstration, early adoption and mature.

Emissions reductions enabled by technologies that are at large prototype or demonstration stage today increase more than threefold between 2040 and 2070 in the Sustainable Development Scenario.

図 6.9 公表政策シナリオに対する持続可能な発展シナリオの現在の技術成熟度・セクター別の世界の CO_2 排出削減量(2040 年および 2070 年)

- 持続可能な開発シナリオの中では、過去に類を見ないスピードでプロトタイプや実証段階にあるクリーンエネルギー技術が費用効率的に普及していく。このことは、COVID19 による影響を排して、ネットゼロ排出を達成するためにクリーンエネルギー技術のチャンスが増えるように保護する必要性を示している。

Box 6.1 Covid19 による潜在的なクリーンエネルギーイノベーションへの影響 - Reduced Innovation Case

- Covid19 による危機は、政府のクリーンエネルギー技術への投資を停滞させ、長期的な気候目標の達成を妨げる要因になる。
- Reduced Innovation Case では、CCUS、水素、電化のイノベーションが遅れることによる影響を探るために、2 つの仮定を導入した。
  - 実証段階のプロジェクトの完了が 5 年遅れる。
  - 初期導入段階にある技術の普及ペースが 2025 年に 50%、2030 年に 30%、2040 年に 15%遅れる。
- Covid19 による新技術の導入がどの程度遅れるかは不確実だが、特にプロトタイプや初期導入段階にあるヒートポンプや EV の導入が遅れることを想定して分析した。
- その結果、最も効率の高く、ストレージとしても活用可能なヒートポンプの導入が 5 年遅れることで、2040 年に持続可能な発展シナリオ.と比べて累積排出量が 3GtCO$_2$ 程度排出が増加すると試算された。また、ＥＶの導入が遅れる場合、2.5GtCO$_2$の排出増となり、累積バッテリー製造も 20%減少となる。加えて、CCUS 技術の商業レベルでの実証や水素製造も遅れることで、2040 年の時点で累積排出量がそれぞれ 8GtCO$_2$、1.5GtCO$_2$の排出増となる。

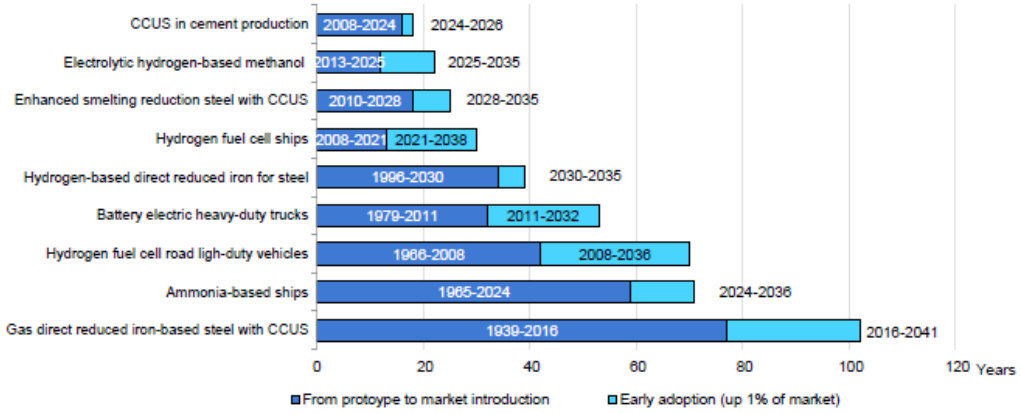
- 持続可能な発展シナリオの技術革新のスピードは前例がないものであるが、同様にデジタル技術も前例がないスピードで普及しており、これを活用することで達成することができる。それ以外の技術は、CCS のように新しいインフラが必要であり、社会や規制による強い圧力が必要になる。

研究室から技術を市場に出すまでのタイムスケール

- 歴史的にみると、新しいエネルギー技術が普及(国内市場のシェアの 1%を獲得)するまで 20 年から 70 年程度を必要とする。近年の例では、PV や車載用リチウムイオン電池は 30 年程度、LED は英国において 10 年程度で普及した。これらのケースでは、政府がイノベーションを介在することで加速させた。
- こうした事例を踏まえつつ、持続可能な発展シナリオでは、政府の支援が強化されることでさらに早く市場に新しい技術が普及すると仮定している。ただし、資金資源の不足、燃料価格リスク、政治の不安定性といった要因による将来のイノベーションへの影響は想定していない。
- 持続可能な発展シナリオでは、大規模施設の場合、プロトタイプから実証まで 6 年から 8 年、商用化までさらに 10 年を想定している。一方で、バッテリーや電気分解装置な

どの小型製品やモジュールについては 12 年から 14 年で商用化されると想定している。結果として、シナリオの中でそれぞれ異なる時間軸で初期導入段階に至る(図 6.10)

Figure 6.10 Time to materiality for selected technologies in the Sustainable Development Scenario



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Time period from market introduction to materiality relates to global deployment projections in the Sustainable Development Scenario. Pace of deployment of a given technology depends not only on observed historical patterns for analogous examples, but also on how competitive it is on cost and performance compared with alternative available low-carbon technologies delivering an equivalent service, as well as the effectiveness of policies to stimulate uptake.

Sources: Matsunaga, Tatsuya and Kuniaki (2009); Zemships (2008), Molino et al. (2018); European Cement Research Academy (2012); Brohi (2014); TATA Steel (2017); Kohl and Nielse (1997); Ballard (2019); Kraftwerk Forchung (2013), Nuber, Eichberger and Rollinger (2006).

Bringing new clean energy technologies to market on a large scale after the first prototype can take from 20 years to more than 80 years in the Sustainable Development Scenario.

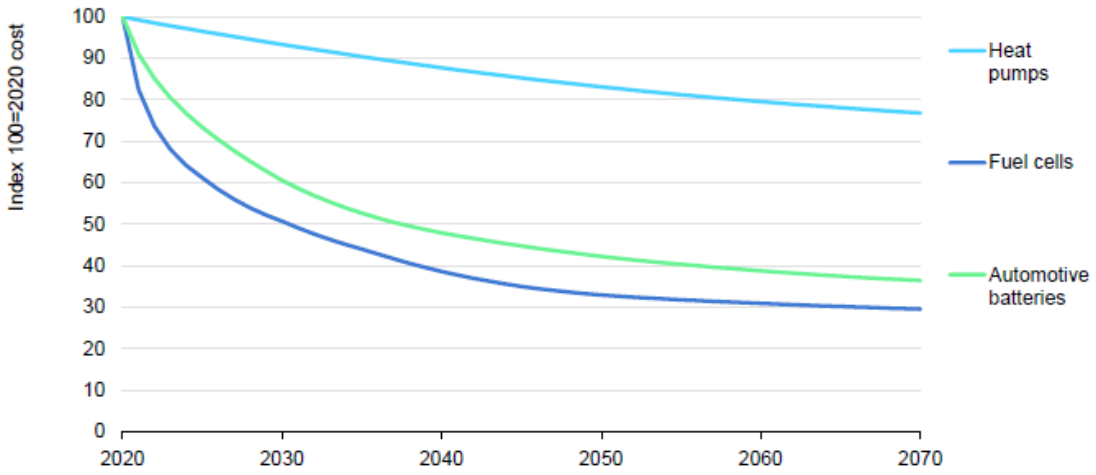
図 6.10 公表政策シナリオにおける技術が成熟するまでの期間

学習曲線の下方移動

- 同様の技術を継続的に使うことによるコスト削減等は経験的に学習曲線(あるいは経験曲線)として描かれる。典型的な例として、累積設置容量を 2 倍にするために必要な時間におけるコスト削減率としてみることができる。
- 例えば、PV の場合、1970 年代から累積設置容量が 2 倍になったとき、コストは 24%減少した。近年では、それが 30%を超える水準になっている。リチウムイオン電池の場合は 20%程度だった。
- 持続可能な発展シナリオでは、PV やリチウムイオン電池をベースに、小型機器などの学習曲線を個別に設定している(図 6.11)。ただし、ヒートポンプのような既存技術は学習曲線に従ってコスト削減が進んでいる場合には、その限りではない。

- 図6.11 2020年から2070年の持続可能な発展シナリオにおける技術ごとの単位コスト低減

Figure 6.11 Unit cost reductions for selected technologies in the Sustainable Development Scenario, 2020-70



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Cost reductions are calculated as a function of cumulative installed capacity in 2018, projected capacity additions from the model and component-specific learning rates. Learning rates for heat pumps, automotive battery cells and fuel cells stacks are 10%. Learning rates for battery packaging and fuel cell balance of plant are 5%.

Technology costs decline in the Sustainable Development Scenario, though at different rates reflecting specific scale and technology attributes.

図6.11 持続可能な発展シナリオにおける技術の単体コスト低減見通し(2020-70年)

イノベーションを加速させるための技術的属性

- 技術ごとに異なった属性をもっており、イノベーションを加速させるための方法を検討するにはこれを知る必要がある。また、政府が主導的に進めるのか、民間がリスクをとって進めるのかを知る必要がある。
- 持続可能な発展シナリオでは、学習曲線や技術の採用率に影響を与える属性がある(表6.1)

表 6.1 より迅速なイノベーションサイクルまたはより迅速な学習を可能にするエネルギー技術の特性

Table 6.1 Energy technology attributes that can favour more rapid innovation cycles or faster learning

Attribute	Description	Past examples	Examples in the Sustainable Development Scenario
Small enough unit size to be mass produced	Small units can be prototyped and tested quickly before factories are built. As a result, global demand can support many factories and industrial competition can lead to faster turnover of products. New generations of these technologies hit the market every few years, with associated innovative improvements. In some cases, mismatched investment and consumption cycles can, however, lead to oversupply and intensive competition for market share.	• PV • Li-ion batteries	• Heat pumps • Fuel cells
Modularity	Modularity confers many of the same benefits as small unit size, but can also apply to larger units that cannot be mass produced but can be readily standardised and added sequentially to a facility. One of the main benefits is lower capital requirements for each stepwise addition, reducing the risks associated with scaling-up and enabling the pace of deployment to match that of other elements in the value chain.	• PV • Aluminium smelting	• Solid sorbent-based direct air capture • Electrolytic hydrogen routes for chemicals production • Small modular nuclear reactors • Standardised building retrofits
Offers services valued by consumers	Technologies need to be first taken up in niche markets where a small number of consumers are willing to pay a premium for their specific benefits. End-users, especially early adopters, will often pay a premium for a product that offers convenience, fun and reputational benefits. While many low-carbon technologies offer limited performance or economic advantages, low-carbon products could offer reputational and other benefits that consumers want, helping them to enter a virtuous cycle of adoption, learning, network effects and expansion to new applications.	• Passenger cars • Smart thermostats • LEDs • Micro-mobility • Smartphones (which replace up to 18 other devices)	• Autonomous, connected, electric and shared vehicles • Connected appliances • Building-integrated PV • Decentralised energy trading • Electrochromic fenestration
Spillovers (strong synergies with technology advances elsewhere)	Shared between researchers and engineers from different sectors, reducing the need for dedicated energy R&D. This is because the advances needed to make a technology commercial in one application are simultaneously beneficial in another unrelated application. Electric vehicles are an example of a technology that was promoted for decades without uptake until spillovers from consumer electronics batteries, hybrid vehicles, lightweighting and motors helped it to take off.	• Combined-cycle gas turbines (from jet turbines) • PV (from semiconductors) • Li-ion for EVs (from Li-ion for consumer products) • LEDs for lighting (from LEDs for electronics) • Offshore wind and geothermal (from oil and gas)	• CCUS (from oil and gas exploration, chemical catalysis and gas separation) • Batteries, fuel cells and electrolysers (from each other and other electrochemical technologies) • Biofuels (from agriculture) • Smart, connected energy
Can be used as a drop-in replacement or bolt-on device.	A new technology can be adopted more quickly if it requires no changes to associated equipment or infrastructure. A "drop-in" replacement is a substitute that is fully compatible with the dominant existing means of providing an energy service. A "bolt-on" device is fully compatible with existing processes, but leaves them intact and adds an additional function, such as emissions capture. CO_2 capture has the potential to be a "bolt-on" device, but usually requires significant changes to associated infrastructure (e.g. CO_2 storage).	• Certain biofuels, e.g. hydrotreated vegetable oil • Biomethane • Catalytic converter • Desulphurisation	• Hydrogen-based synthetic fuels • Electric vehicles using existing road and electricity infrastructure • Biojet fuel
Replaces hardware or labour with digital solutions	Many recent energy sector innovations have replaced manual or analogue processes with digital ones. Innovation in digital technologies requires limited capital and allows continuous experimentation and cheap upgrading *in situ*. In addition, many digital products generate data that have commercial value, meaning that the risk of investment is shared between the energy-related and data-related value streams.	• Seismic geological exploration • Power grid management	• Autonomous, connected, electric and shared vehicles • Passive demand response • Digital twin O&M • 3D printing
Minimal dependence on improvements in other technologies in the value chain	For instance, the success of CO_2 capture depends in large part on simultaneous developments in CO_2 transport, utilisation and storage. Though it is less of a bottleneck than for CCUS, the same factor has affected variable renewable power generation, which often relies on improvements to the grid or storage solutions. These dependencies raise the risks of R&D in each coupled element of the value chain and can significantly slow the pace of innovation.	• Biomass power generation • Nuclear • LEDs • Coal gasification	• Renewables plus storage • Enhanced smelting reduction-based steel
Minimal need for adaptation to local conditions	Some technologies, such as batteries, may need to be adapted to local climatic conditions when they are deployed in a new region. Temperature extremes, temperature swings or frequent storms are examples of local conditions that can dramatically change performance. Variations in fuel supply, for example for biomass gasification, can also make it harder to standardise a technology for a global market. In some cases, end-use products need to be adapted to local consumer preferences, regulations and expectations. Technologies that do not encounter these problems can	• Internal combustion engines • Turbines	• Novel battery chemistries • Fuel cells

Note: EVs = electric vehicles; CCUS = carbon capture, utilisation and storage; O&M = operation and maintenance.

Box 6.2 イノベーションを加速させるための重要な属性としてのスピルオーバー

- エネルギー技術開発においてスピルオーバーが投資先や産業競争を変えてきた例が多くある。知識の蓄積もその一つであり、様々な領域にわたって好影響を与える。持続可能な発展シナリオでも、ネットゼロ排出を達成するためにスピルオーバーが重要な役割をはたしている。
- スピルオーバーは、知識が技術エリアを超えて伝播することによる知識スピルオーバー、異なるアプリケーションにまたがって技術を実装することで得られるアプリケーションスピルオーバーがある。前者は、異なる領域で使われる共通の知識が使用されている場合に発生する可能性がある。後者は、蒸気機関、電力、情報技術のような汎用技術が大規模に使われることで発生する可能性がある。
- 知識のスピルオーバーは、研究者やエンジニアが学会などで情報交換することや、部門横断的なサービスを提供する企業が重要な役割を果たしている。
- 多くのクリティカルなスピルオーバーは、エネルギー部門以外で研究が行われた成果を活用している。コンバインドサイクルガスタービンは 1939 年に英国軍が開発したものであり、PV パネルもマイクロプロセッサを生産するためのシリコン生産から派生している。炭素陽極を使うリチウムイオン電池も石油精製産業が開発したものである。

クリーンエネルギーイノベーションにはより迅速な進展が必要

- 各国で COVID19 から復興するための景気刺激策が検討されており、クリーンエネルギーに転換していくための重要な機会である。
- このセクションでは、持続可能な発展シナリオを補完する Faster Innovation Case を分析する。このケースは、持続可能な発展シナリオ で目標とする 2070 年にネットゼロ排出の達成を 2050 年に前倒しした場合の影響を分析することで、各国政府の景気刺激策におけるクリーンエネルギーへの拠出割合を検討するための機会を提供する。

Faster Innovation Case - イノベーションはどこまで可能なのか？

- 2050 年は IPCC の 1.5℃特別報告書でも象徴的な意味をもつ時点であり、クリーンエネルギーへの転換のマイルストーンとなっている。ただし、この問題の複雑さは、技術革新だけでは解決できず、現在のライフスタイルの根本的な変化を必要とする可能性が高い。そこで、持続可能な発展シナリオに対して、主に以下の 3 つ点を変更したケースを分析した。
  - 研究室や初期プロトタイプにある技術に高いスピルオーバーが発生すると想定し、それらの技術の供給制約を解除して供給曲線をシフトさせ、低コストで導入できる

と想定した。

- プロトタイプから市場に導入されるまでの期間を、最近のクリーンエネルギー技術が導入されるまで短くなった経験を踏まえて、短くなると想定した。
- 新しい技術の市場での採用率を引き上げた。

- Faster Innovation Case は、これまでに全く前例がないペースでイノベーションが進み、実証段階での遅れなどが全く生じないと想定している。当然のことながら、様々な課題が生じる可能性があり、一方で COVID19 からの復興計画においてイノベーションを刺激することができる可能性もある。多くの課題と不確実性があるなかで、2050 年までにどのように技術開発を進めなければいけないのかを示すことがこのケースの目的である。
- Faster Innovation Case は、持続可能な発展シナリオと比較して、2050 年の時点で 10 Gt CO_2の追加的な排出削減となる(図 6.12)。2050 年に残っているのは、運輸部門(重量自動車、航空、海運)で 1.1 Gt CO_2、産業部門(鉄鋼、セメント、化学)で 0.9 Gt CO_2、建築物部門で 0.3 Gt CO_2、となっている。

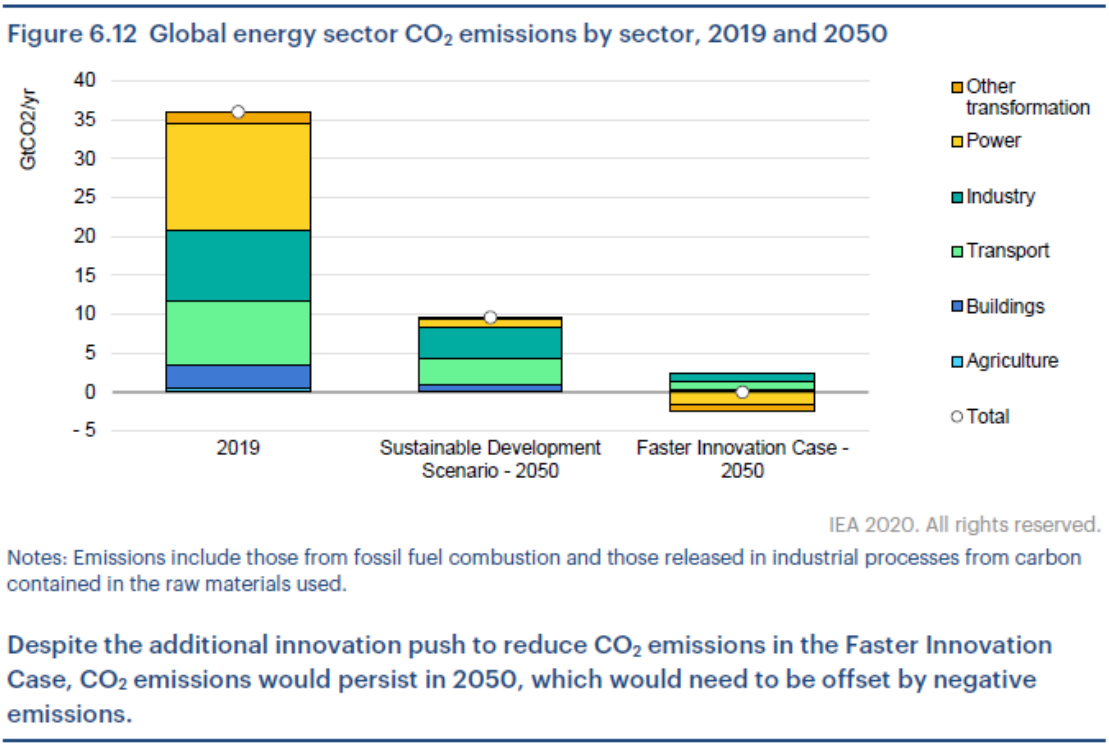


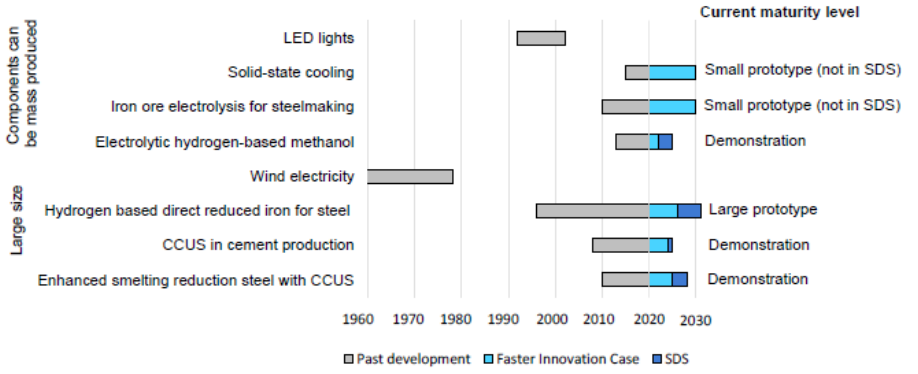
図 6.12 世界の部門別 CO_2排出量(2019 年および 2050 年)

Faster Innovation Case でのイノベーションニーズ

- 次の 30 年でネットゼロ排出を達成するためには、次の 6 年間で水素還元鉄、再エネ水素ベースのアンモニア、CO_2吸収セメントが市場に導入されると仮定している。また、

機器やモジュールについても、プロトタイプから実証段階まで早急に進み、大量生産される必要がある。

Figure 6.13 Period from first prototype to market introduction for selected technologies, including the quickest examples in recent developments



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: SDS = Sustainable Development Scenario; CCUS = carbon capture, utilisation and storage. The classification between large process technologies and those dependent on components able to be mass produced is based on the characteristics of the equipment or process steps within the technologies analysed that are not commercially available today.

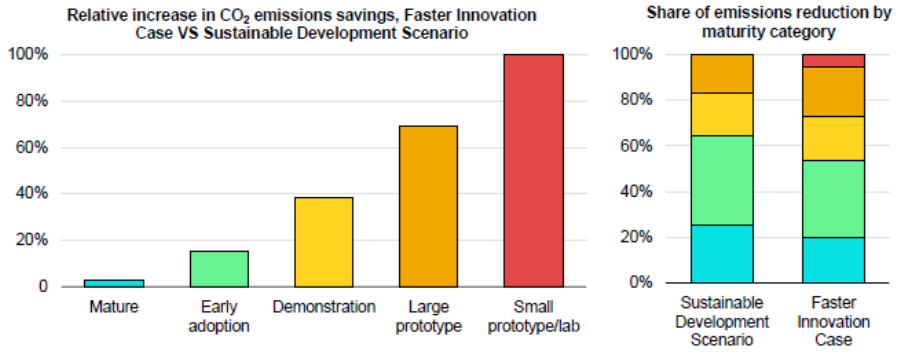
Sources: Historic year from different technologies based on Gross (2018), European Cement Research Academy (2012); Brohi (2014); TATA Steel (2017) and Nuber, Eichberger and Rollinger (2006).

The time to market introduction for pre-commercial technologies would be reduced by almost 40% on average in the Faster Innovation Case compared to the Sustainable Development Scenario, on the basis that a single commercial demonstration would be enough to allow a move to vigorous market deployment.

図 6.13 近年の最も迅速な開発例を含む、最初のプロトタイプから市場に投入されるまでの技術別の期間

- Faster Innovation Case では、持続可能な発展シナリオに比べて平均的に 2 倍の速さで商業化し、3 倍の速さで大量に生産されることでその他の技術とのシナジーが生じる。このため、2050 年の時点で持続可能な発展シナリオに比べて、現在市場に投入されていない製品の排出削減への寄与が 60%高い(これは 17 Gt CO_2に相当する)(図 6.14)。現時点で市場に投入されていない製品の排出削減への寄与は大きい。

Figure 6.14 Contribution to global energy sector annual CO_2 emissions reductions in 2050 by current technology maturity category



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: In the right graph, emissions reductions are relative to the Stated Policies Scenario. The Sustainable Development Scenario does not include technologies that are at small prototype stage or in the laboratory today.

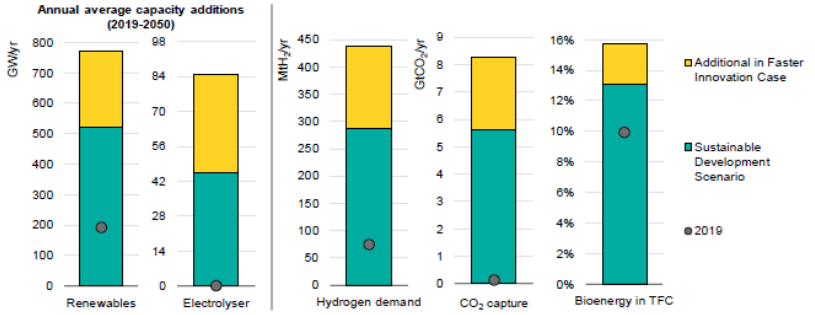
Annual emissions reductions from technologies at the prototype stage today would be more than 70% higher in 2050 in the Faster Innovation Case than in the Sustainable Development Scenario.

図 6.14 現在の技術成熟度別の 2050 年における世界のエネルギー部門の年間 CO_2 排出削減量への貢献度

Faster Innovation Case での技術ニーズ

- 2050 年にネットゼロ排出を達成するために、エネルギーに関連する全てのセクターで全ての技術を加速させることが必要になる。2050 年に Faster Innovation Case では、持続可能な発展シナリオと比べて、一次エネルギー供給に占める化石燃料の割合が 40%減少し、特に石油製品は 2050 年に 40%減少する。これは主に、運輸部門での EV、水素、バイオ燃料の増加による。
- ネットゼロ排出に移行するために、Faster Innovation Case ではエネルギー供給側が急速に変化することが必要になることを示している。電力部門では、2050 年までに追加的に 20,000 TWh が必要となり、脱炭素化を急速に進める必要がある。これによって、最終的な消費部門での電化、電解水素の供給によって排出削減にも寄与する。そのためには、2050 年まで毎年手再エネ電源を 770 GW ずつ増やしていく必要がある(図 6.15)。その他にも低炭素代替燃料の供給も増やす必要がある。

Figure 6.15 Selected decarbonisation indicators by scenario in 2050



IEA 2020. All rights reserved.

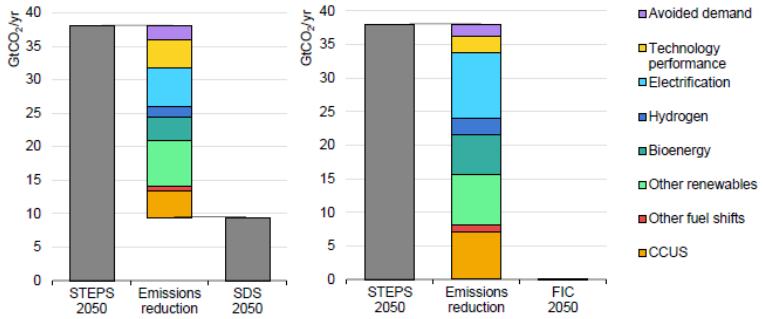
Notes: GW/yr = gigawatts per year; MtH2/yr = million tonnes of hydrogen per year; TFC = total final energy consumption. Renewables exclude bioenergy-based power generation equipped with carbon capture. CO_2 capture includes captured emissions for storage and use.

Transitioning to net-zero emissions by 2050 in the Faster Innovation Case significantly amplifies the scale of change required across all technologies.

図 6.15 シナリオ別の脱炭素化指標(2050 年)

- Faster Innovation Case の主な排出削減は持続可能な発展シナリオと大きく変わらない。2050 年の時点で、電化、CCUS、バイオエネルギー、水素によって持続可能な発展シナリオと比較して 90%の追加的な排出削減となる。特に、BECCS や DAC といった CCUS は最も大きく排出削減に寄与し、2050 年に 2.5 Gt CO_2の排出削減となる。水素関連技術についても、持続可能な発展シナリオに比べて大きく進展し、産業部門での水素需要が 35%、アンモニア発電も 70%増加する。

Figure 6.16 Global energy sector annual CO_2 emissions reductions by type of abatement measure and total primary energy demand, 2050



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario; SDS= Sustainable Development Scenario; FIC = Faster Innovation Case. Hydrogen includes hydrogen and hydrogen-derived fuels such as ammonia and synthetic hydrocarbon fuels. Nuclear is included in other fuel shifts.

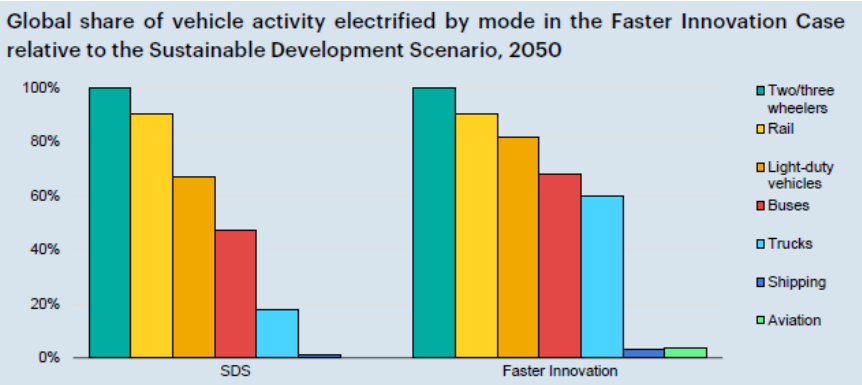
Electrification, CCUS, bioenergy and hydrogen account for around 90% of additional emissions reductions in the Faster Innovation Case in 2050 compared to the Sustainable Development Scenario.

図 6.16 世界のエネルギー部門の年間 CO_2 排出削減量
(削減策の種類別および総一次エネルギー需要別)(2050 年)

Box 6.3 研究室や小型プロトタイプ段階での技術間の重要な機会

・ 政策担当者は、将来大きな影響を与えるが現時点で研究室やプロトタイプ段階の技術への支援を景気刺激策の中で検討すべき。その技術には 2 通りあり、1 つはスピルオーバーが期待される技術、もう一つは供給制約(バイオ燃料等の採取)を解除する潜在力をもつ技術。それらの技術のうち、Faster Innovation Case で重要なのは以下の技術。

- 先進電池科学とリサイクル技術：持続可能な発展シナリオでは、2070 年に 800GWh/kg のバッテリー性能が必要になり、これは現在の性能の 3 倍に当たる。これによって運輸部門の電化が進むことで排出削減が期待される。そのためには、リチウムのリサイクル技術を確立し、供給制約を解消する必要がある。現時点では、コボルトやニッケルだけがリサイクルの対象だが、これを拡大して 2070 年に 35%をリサイクルできるようにする。



- 持続可能なバイオマス供給を拡大する革新的な技術：エネルギー投入が同じだが、収量が 2 倍になる作物の開発によってバイオ燃料の生産を拡大する。また、廃棄物管理システムの規模も拡大させる。産業部門での設備改修なしに使用を増加させ、バイオ燃料を電化が難しい船舶や航空機に使うなど、最終消費段階でのバイオエネルギーを増やす。
- 一次製鋼の直接電化：現時点で一次製鋼を化石燃料なしで経済的かつ拡張性のある技術はないが、一次製鉄の直接電化(鉄鉱石の電気分解)が可能である。また、(低温アルカリ電気分解と高温溶融酸化物電気分解もあるが、小規模な試験にとどまっている。Faster Innovation Case では、世界の粗鋼生産の 10%が鉄鉱石の電気分解を導入すると仮定している。
- 先進的な冷媒フリー冷房：現在、多くの冷凍空調機器がハイドロフルオロカーボンを冷媒に用いているが、モントリオール議定書のキガリ改正によって、これの使用を 80%削減することに 195 か国が合意している。このため、先進的な蒸発冷却、先進的なデシカント、固体冷却技術などがプロトタイプ段階にある。Faster Innovation Case では、2050 年にそれらが導入され家庭部門等での排出削減になると試算した。

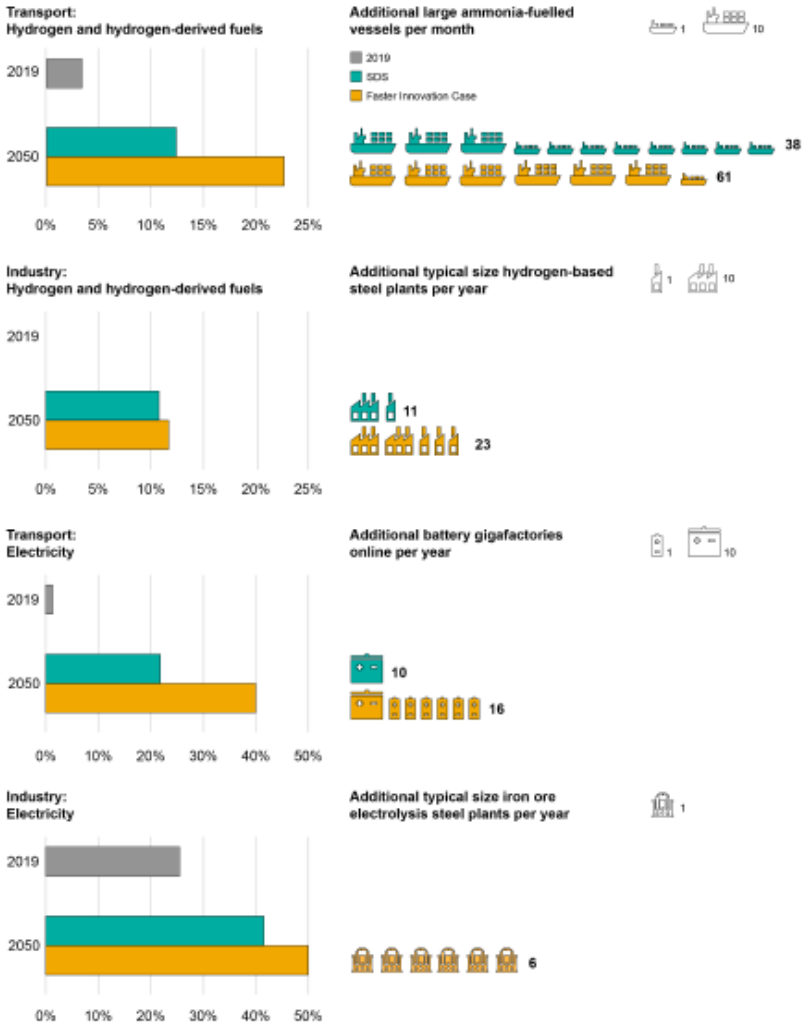
電化

- 持続可能な発展シナリオと同様に、Faster Innovation Case でも電化は主要な戦略であり、現在は最終エネルギー消費に占める電力の割合が 20%程度だが、2050 年には半分が電力となる。運輸部門での EV 化が電力需要増加の 3 割を占め、バッテリー技術の開発と実証が急速に進み、セルレベルでの重量エネルギー密度を 3 倍に達する。リチウム硫黄電池(Li-S)やリチウム空気電池(Li-Air)といったプロトタイプ段階やコンセプト段階の電池も潜在的に供給される。こうしたバッテリー技術の急速な進歩によって、Faster Innovation Case では 2050 年に小型車と重量自動車の 90%が EV 化している。
- EV への需要を満足させるために、Faster Innovation Case では 2050 年に 17TWh のバッテリー製造能力が必要になる。これは、テスラの Gigafactory を毎月建設していくことが必要な水準である。また、充電設備の拡充も必要であり、Faster Innovation Case では重量自動車用の急速充電器がグローバルに 1900 万台設置される。
- Faster Innovation Case では、急速なバッテリー技術の開発によって、特に長距離道路運送のオペレーションに大きな変革をもたらす。一方で、さらに高いエネルギー密度の燃料を要する船舶や航空機は、短距離を除いて道路運送ほどには影響を受けない。
- 産業部門では、大規模電熱の利用が拡大することで電力需要が大きく増加する。Electromagnetic のようなコンセプト段階の技術も、Faster Innovation Case では 10 年以内に市場に導入される。
- 鉄鉱石の直接還元のようなエネルギーを大量に消費する産業プロセスでの直接電化の商用化は、電化の新たな道を開くものである。現時点では小規模なプロトタイプ段階であるが、今後 10 年で実用化、2050 年まで 2 か月ごとに 200 万トンの製造能力が追加されていくと Faster Innovation Case では仮定している。また、建築物部門では、30GW の熱容量をもつ冷暖房用統合型ヒートポンプシステムが 2050 年まで毎月導入されると仮定している。

水素

- Faster Innovation Case では、主に運輸と産業部門で水素への需要が生じ、電気分解及び CCUS との連携で供給される。2050 年に電気分解装置の能力は 2,600ＧＷに達し、同年の追加的な電力需要の 45%を占める。
- 産業部門では、水素還元鉄プラントが 2050 年まで毎月 100 万トンずつ増加していく。急速な変化であるが、これが生じない場合には、既存の製鋼設備の 3 分の 1 以上が稼働を継続する。
- 海運業では、毎月 80 隻強の大型新造船が市場で必要とされているが、Faster Innovation Case では毎月 50 隻がアンモニアを燃料とする船舶が就航すると。

Figure 6.17 Global share of hydrogen and electricity in final energy demand by end-use sector (left) and selected adoption metrics of hydrogen technologies (right), 2019 and 2050



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario; SDS = Sustainable Development Scenario. Battery gigafactory capacity is assumed 35 GWh/yr. Final energy demand includes energy use for blast furnaces and coke ovens. Hydrogen includes direct demand of hydrogen and hydrogen-derived fuels for transport and buildings, and final energy demand required to produce hydrogen on-site for industrial processes. Typical size of steel plant considered is 1 Mt crude steel per year capacity. Typical maximum capacity for a large vessel considered is 50 kilotonnes of dead weight tonnage. Adoption rates show area average values for the period to 2050.

Electricity, hydrogen and other renewables see the highest growth in final energy demand, at the expense of fossil fuels, in the Faster Innovation Case relative to the Sustainable Development Scenario in 2050.

図 6.17 最終エネルギー需要における水素と電力の世界シェア(左)と水素技術の採用基準(右)(2019 年および 2050 年)

バイオエネルギー

- 運輸部門を主要なドライバーとして、2050 年に最終エネルギー消費に占めるバイオエネルギーの割合が増加する。バイオエネルギーの課題は需要側ではなく供給側であり、

バイオ燃料への転換技術や農法が急速に進展することで、持続可能性要件を確保しながら供給制約を乗り越えることができる。藻類ベースの燃料も 2050 年には供給されると Faster Innovation Case では想定している。また、バイオディーゼルやバイオジェット燃料のようなバイオ燃料をフィッシャー・トロプシュ法による GTL によって製造する方法が確立している必要がある。

CCUS

- Faster Innovation Case では、2050 年に CCUS によって年間 8 Gt CO_2回収される(図 6.18)。これには、DAC や BECCS といったネガティブエミッション技術も含まれており、2050 年までに年間 100 万 t CO_2の回収能力を持つプラントを毎月 16 か所設置、BECCS を年間 90 か所設置、セメントなどの産業部門での CCUS は毎月 5 か所設置していく必要がある。ただし、DAC の実証プラントの回収能力は年間 4 千 t CO_2程度である。

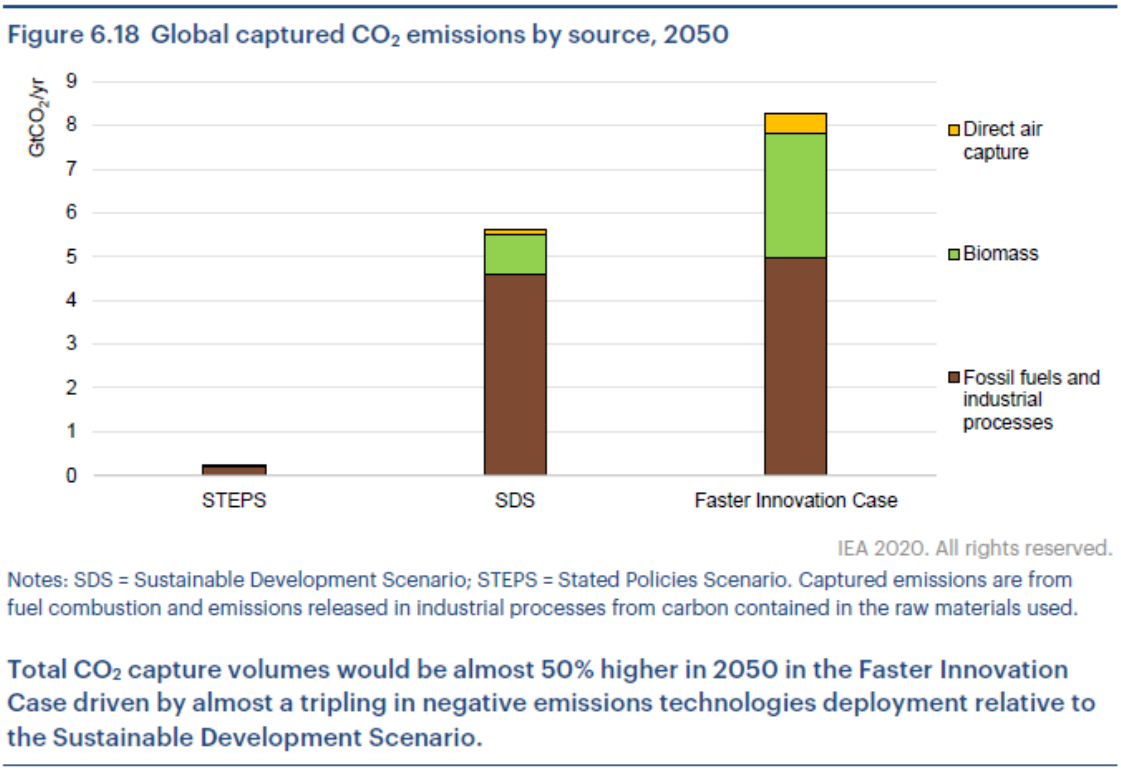


図 6.18 2050 年の世界のソース別 CO_2回収量

・　クリーンエネルギーへの移行

ネットゼロ排出への政府目標

- 2020 年 8 月には EU と 14 か国が 2030, 2040, 2050 年のネットゼロ目標を国内法制化あるいは法制度化に向けた提案を行っている。フランスや英国、ニュージーランドは 2019 年後半に法制度化が行われており、チリやハンガリーは法制化に向けた計画を 2020 年の 1 月、6 月にそれぞれ開始している。
- 目標達成に向けた対策として、国際カーボンクレジットの活用をスゥエーデンやのルゥエー、チリやスイスが計画している。

表 7.1 政府のカーボンニュートラル目標と法律整備に関わる進捗状況

Table 7.1 Government carbon or climate neutral targets by legal status

Legal status	Year	National and supra-national entities	Selected sub-national entities (non-exhaustive)
	Already achieved	Bhutan, Suriname	
In law	2030	Norway	
	2045	Sweden	California, Hawaii, Australian Capital Territory, Scotland
	2050	Denmark, France, Netherlands,[2] New Zealand, United Kingdom, Hungary	New York State, Tasmania, South Australia, Queensland, Victoria, Melbourne, Sydney, New South Wales, Catalonia, Galicia, Basque Country
Proposed legislation	2050	Chile, European Union, Fiji, Spain, Slovenia, Ireland, Luxembourg	Washington State, Massachusetts, Catalonia, etc.
In policy document	2030	Uruguay	
	2035	Finland	
	2040	Iceland, Austria	
	2050	Canada, Costa Rica, Cyprus,[3] Germany, Latvia, Liberia, Marshall Islands, Papua New Guinea, Portugal, Slovakia, Switzerland	Nevada
	2070	Ukraine	
	"As early as possible in the second half of the century"	Japan, Singapore	
	2100	Russian Federation	

Note: European Union countries are mentioned explicitly when their commitment is more advanced or more ambitious than that of the European Union, for example in terms of legal status, implementation plans or definitions.

- COVID-19 対策として、経済回復に向けた財政措置の公約を多くの国が行なっており、これらがネットゼロ目標と行動計画への約束を促進する可能性がある(Box 7.1 を参照)。
- 州別でも、カリフォルニアや豪州の New South Wales 州ではネットゼロ排出目標を設定しており、多くの都市が排出削減や気候変動中立に関する目標設定を計画している。

Box 7.1 COVID-19 に関わるネットゼロ排出目標達成に向けた政府の景気回復計画

- 欧州委員会では、COVID-19 の景気回復プランにおいて EU 予算を拡充し、2050 年のネットゼロ目標達成に向け、「欧州グリーンディール計画」と整合化を行なっている。
- 具体的には、循環経済の形成、クリーンエネルギー技術の普及、グリーンモビリティ、社会経済影響の低減が挙げられる。

表　EU の経済復興計画における低炭素化に向けた手段

Examples of decarbonisation measures part of EU's proposed recovery plans

EU green deal pillar	Examples of concrete targets	Targets in the Sustainable Development Scenario
Circular economy	Doubling annual renovation rates of existing buildings.	A third of the existing buildings stock renovated by 2050.
Clean energy technologies	6 GW of renewable hydrogen electrolysers by 2024, 40 GW by 2030.	Around 40 GW of renewable hydrogen electrolysers by 2030.
Green mobility	Installing 1 million electric vehicle charging points.	6 million electric vehicle charging points by 2030.
Alleviate socio-economic impacts	Support re-skilling, create new opportunities (EUR 40 billion Just Transition Fund).	Decline of coal, oil and gas use by 40% by 2050, while renewable use jumps 60%.

Note: This list is illustrative, not exhaustive, of the European Union's commitment to make concrete progress to decarbonise its economy in the wake of the Covid-19 pandemic. EU targets and supporting programmes still need to be approved by its decision making bodies (including the European Parliament).

- その他、カナダは石油・ガス産業の支援に向けて、メタン排出や非開発状態の瀬石油ガス田の一掃に向けた助成を行う。

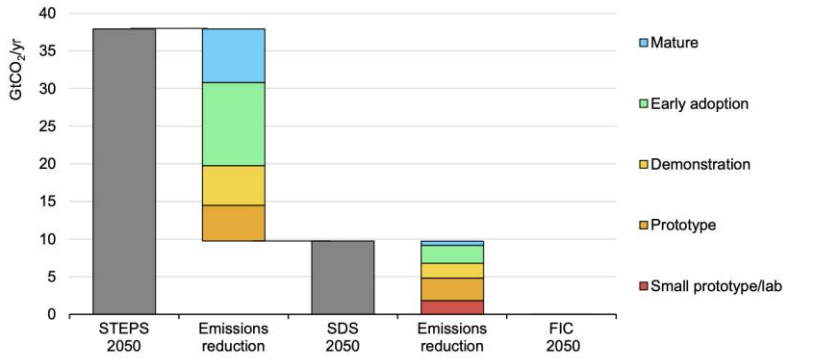
ネットゼロへの戦略

- ネットゼロ排出の達成には既存技術の適用にはとどまらない。持続可能な発展シナリオにおいて、多くの商業化される以前の技術を広く適用する必要があり、Faster Innovation ケースでは、現在では実証段階にある技術の活用も必要となる。
- エネルギーシステムの転換にあたっては、短期から中長期の戦略が必要である。特にいかについての対応を要する。
  - ➢ ロードマップを形成し、将来的なビジョンを打ち立てる。
    - ✧ 技術とインフラの必要性そして、技術革新に向けたギャップの把握
    - ✧ 技術別の優先順位形成とネットゼロ排出に向けた戦略

- 政策目標の進捗を把握するとともに、政策効果を評価し定期的に優先順位をレヴューする過程を構築する。
- 社会政治的な支援を得るために、展望と進捗について一般市民とコミュニケーション

の機会を形成する。

Figure 7.2 Global CO_2 emissions savings by current technology readiness category in the Faster Innovation Case relative to the Sustainable Development Scenario in 2050



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario; SDS = Sustainable Development Scenario; FIC = Faster Innovation Case. See Box 2.6 in Chapter 2 for the definition of the TRL categories large prototype, demonstration, early adoption and mature.

Reaching net-zero emissions requires a very rapid uptake of technologies currently at the demonstration or prototype stage: such technologies account for almost 70% of emissions reductions in 2050 in the Faster Innovation Case relative to the Sustainable Development Scenario.

図 7.2 持続可能な開発シナリオ及び Faster Innovation Case における世界の CO_2 排出削減と技術の発展段階別貢献(2050 年)

既存設備から排出削減を行う

- 既存設備の評価からクリーンエネルギーへの移行戦略は出発するべきであり、ロックイン効果があることを認識する必要がある。既存設備からの CO_2 排出は 750 Gt にも及び、これは 2070 年の持続可能な発展シナリオの排出量の 90%以上に相当する。ほとんどすべての新設備は炭素中立であるべきである。
- しかしながら、以下の対応が必要である。
  - ➢ 既存設備の早期リタイア
  - ➢ 建築物等における改修の推進
  - ➢ 燃料転換並びに段階的な混合

普及初期段階の技術の市場強化

- インセンティブ付与等により、普及初期段階の技術についての市場におけるコストを低減することが必要である。
  - ➢ クリーンエネルギー技術の “Market-pull”措置 : 市場拡大に向けたクリーンエネルギー技術、製品、サービスの需要喚起策の実施により、技術のパフォーマンスを改善し、コストを低減できる。

➢ R&D 支援の継続：R&D の継続は商業化したのちにも重要であり、コストの低減とパフォーマンスの改善に寄与しうる。

- 図 7.6 が示す通り、クリーンエネルギー技術のコストは今後 10 年の間に大きく低減する見通しである。“Market-pull”措置として、補助金の支給やリベート、低利融資等様々な対策がある。公共調達も技術の市場普及において重要である。

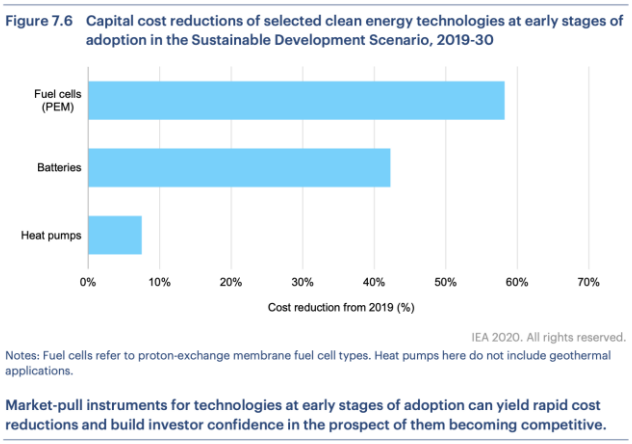
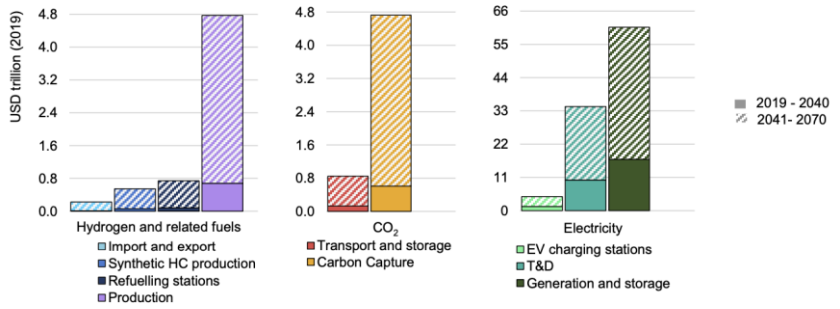


図 7.6 持続可能な発展シナリオにおける資本コストの削減見通し(2019 年から 2030 年)

技術の普及を促進するインフラの開発と更新

- ネットゼロ排出の達成にあたってはインフラの投資と更新が必要であり、それにより電力グリッドのスマート化や代替燃料の供給、CO_2 の輸送と貯蔵、そして機器と自動車を繋いだコミュニケーションが可能となる。
- こうしたインフラは、公共財としての要素が大きく、こうしたインフラが一旦形成されると利用に関わる新たなアイディアが創出される。一方で、クリーンエネルギー技術の需要増とともに、インフラが形成されるよう政府がインフラ形成に対して対策を講じる必要がある。
  - ➢ ネットワーク所有者とオペレーターがグリッドやパイプライン並びにコミュニケーションシステム等の既存インフラを活用し、クリーンエネルギー技術が統合できるよう、インセンティブを付与する。政府が長期的な低炭素化に向けた方向性を提示することは、投資家に対しての安定した将来計画を形成するのに役立つ。
  - ➢ 初期投資コストが高いインフラプロジェクトに対しての投資リスクを低減させる。初期段階においては、政府が直接投資を行い、同時にそうしたインフラの利用者に対するインセンティブを提供するといった対応が必要となる。
- 2070 年までの持続可能な発展シナリオを達成するためにインフラ投資として、100 兆ドルが必要となり、その 90%以上が電化に関連し、そのうち 30%以上が 2040 年までに投資を必要としている。

Figure 7.7 Global cumulative investment in selected energy infrastructure in the Sustainable Development Scenario



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: EV = electric vehicles; HC = hydrocarbons; T&D = transmission and distribution. Investments are undiscounted.

Electricity-related infrastructure dominates cumulative capital expenditure on energy infrastructure needed in the Sustainable Development Scenario.

図 7.7 持続可能な発展シナリオにおける世界の特定技術に対する累積エネルギーインフラ投資

研究開発とデモンストレーションを支援する

- クリーンエネルギー技術の R&D に対してどの程度の金額が必要か、あるいは誰に対して投資をするかといったことは特定できないものの、イノベーションを司るにあたり、以下の点に留意する必要がある。
  - 多様な成熟段階にある競合するデザインに対して R&D を促進する。
  - 公共資金を活用した R&D による知見を公開する。
  - 大規模なデモンストレーションに伴う投資リスクを低減させる

国際技術協力の拡大

- 気候変動の課題は世界的に共有されるものであるため、技術の進展に向けた負担を各国で共有することが望ましい。
  - 政策立案者間で良い政策に関する情報を共有する。
  - 各国での技術のパフォーマンス基準・コードを調和させる。
  - 各国や研究機関で協調し、必須技術の開発が遅れないように対応する。
  - 知見の交換を迅速に行えるようネットワークを形成する。

Power Systems in Transition

(2020 年 10 月発刊)

[https://www.iea.org/reports/power-systems-in-transition]からダウンロード可能

- 本報告書は電力部門で進行している変革についてまとめ、政策立案者を導くための推奨事項とともにベストプラクティスを提示するものである。以下に本報告書の要点をまとめる。

エグゼクティブサマリー

電力の安定供給は、社会の繁栄や 24 時間年中無休のデジタル経済にとって必要不可欠であり、最近の Covid-19 パンデミックに伴う医療機器や IT システムの利用など、我々の生活のあらゆる側面で決定的に重要な役割を担っており、安全で信頼できる電力供給を確保することは、すべての国にとって最も重要である。

今日、電力が最終エネルギー消費量に占める割合は 5 分の 1 となっているが、そのシェアは上昇している。IEA の持続可能な開発シナリオ(SDS)などパリ協定に沿ったシナリオでは、シェアの上昇傾向が加速し、2040 年までに電力が主要なエネルギー源として石油を超える可能性を示しており、電力需要はすべてのシナリオでわずか 20 年の間に約 50%増加する。

将来的に、電気は、暖房、冷房、輸送のみならず、通信、金融、ヘルスケアなどの多くのデジタル統合セクターでより大きな役割を果たすことが期待されており、強力な電力セキュリティ対策の必要性は、現代経済が適切に機能するための前提条件となる。

電力部門は劇的な変化を遂げており、比較的少数の大規模な火力発電所からの供給による集中型の垂直統合システムから、さまざまな規模の多数の電力生産者から構成される市場へと移行し、変動性の再生可能資源も利用されている。また、デジタルテクノロジーの役割は飛躍的に高まっており、より複雑なシステムの管理を可能にすると同時に電力システムをサイバー脅威にさらすことになる。政府や業界は電力システムのインフラストラクチャを気候変動の影響に適応させ、その堅牢性と回復力を維持することを優先する必要がある。

本レポートは、上記の動向を踏まえ、エネルギーの移行、サイバー脅威および気候変動へのへの対応が迫られる状況において、短期的および長期的なセキュリティレベルを最大化することを目的とした、技術的、経済的、政治的な行動をまとめた初めてのレポートである。

エネルギー移行における電力のセキュリティ

クリーンエネルギーへの移行は、世界中の電力システムに大きな構造変化をもたらし、太陽光発電と風力発電が最も安価な電力資源のひとつになる。IEA の持続可能な開発シナリオでは、平均総発電量に占める変動性再生可能エネルギーの年間シェアは、2040 年までに 45%に達する。変動性再生可能エネルギーの利用拡大により、燃料確保への懸念は低減するものの、電力システムの柔軟性を高める必要に迫られる。従来、主に系統の柔軟性を担ってきた発電所のうち、石炭火力発電所や原子力発電所は現状維持または減少する見込みである。需要側では、電化による電力の需要増加やデジタル化と技術促進に伴う分散電力システムにおける消費者の役割拡大が見込まれる。

構造の変化が進むなかで電力システムの安定性を確保するためには、新たなフレームワークの構築が必要であり、**政策、規制、市場設計を更新してエネルギー移行期間における電力セキュリティを確保する必要がある。**

すでに多くの国や地域では変動性再生可能エネルギーを電力システムに確実に統合できることが示されており、政策立案に統合可能なツールおよびレッスンが蓄積されている。また、柔軟性確保に向けた市場および規制の改革と同時に、既存の系統柔軟性を最大限に活用や廃止措置計画については、慎重な妥当性評価が必要となる。

今後は、特に新興国や途上国においては、太陽光と風力の拡大と平行して新規の変動性再生可能エネルギーリソースを開発する必要がある。また、需要と供給の変動が大きい状況で電力システムの信頼性を維持するためには、システムの柔軟性と多様性の確保が重要であり、ネットワークと柔軟性リソース(需要側、分散およびストレージ等)へのより多くのタイムリーな投資が必要となる。システムの柔軟性と適応性をもたらす技術としては、エネルギー貯蔵、相互接続、天然ガス火力発電所およびデジタル化による需要側の対応が挙げられるが、利用可能なすべての技術のシステムへの貢献度について高度な確率的分析を実施し、計画を更新する必要がある。

サイバーレジリエンスの強化

電力システムに対するサイバー攻撃の脅威は増大しており、政策立案者、規制当局、公益事業者、設備プロバイダーは、電力バリューチェーン全体のサイバーレジリエンスを確保するために重要な役割を果たす必要がある。政府は、高度に規範的なアプローチからフレームワーク指向のパフォーマンスベースのアプローチに至るまで、さまざまな政策および規制を通じてサイバーレジリエンスを強化できるが、リスクのグローバルな側面を考慮しながら各国の状況に応じて実装戦略を検討する必要がある。

気候レジリエンスの強化

気温の上昇、極端に変動する降水パターン、海面上昇、などの気象現象はすでに電力の安全性に対する重大な脅威となっており、気候に起因する混乱の可能性を高めている。気候変動の傾向と関連リスクは一般的に認識されているものの、気候レジリエンスに向けた具体的な行動を取り入れているのは、IEA ファミリーの 17 ヶ国のみであり、そのうち電力バリューチェーン全体をカバーしているのは 6 ヶ国のみとなっている。

気候レジリエンスを強化することによりクリーンエネルギーへの移行を促進し、より多くの電化ソリューションの導入を可能にするとともに再生可能エネルギー技術への移行を加速する。気候レジリエンスによるメリットとコストは、電力バリューチェーン全体に不均一に分布する傾向があるため、レジリエンス対策の提供に対して誰がその費用を負担するべきかという疑問を提示する。気候レジリエンスの政策措置は企業がレジリエンスを強化することを奨励し、潜在的な市場の失敗を防止することができる。電力安全保障政策においては、気候レジリエンスの強化を最優先する必要がある。

行動のフレームワーク

上記 3 つの領域(エネルギー移行、サイバーレジリエンス、気候レジリエンス)では、それぞれ異なるセキュリティ対策が必要となるが、包括的に適用される原則は以下のとおりである。

1) 制度化：明確な責任、インセンティブおよび規則の確立
2) リスクの特定：システム全体の定期的なリスク分析の実施
3) リスクの管理および軽減：電力サプライチェーン全体の備えを改善
4) 進捗状況の監視：経過の追跡と記録および経験の共有
5) 対応と復旧：停止や攻撃への対応および知見の収集

安全なエネルギー移行のための協力

クリーンエネルギーへの移行を成功させるためには、電力のセキュリティがこれまで以上に重要となる。世界中ですでに進行中のベストプラクティスとイノベーションを特定することに加えて、セキュリティを確保し、既存のフレームワークを構築し、方法論を開発するための政府やその他のステークホルダーによる新たな取り組みにより電力システムに必要とされる変更が可能となる。

世界の多くの国々が同様の課題に直面しており、政策立案者、規制当局、システムの運営者は、他の国や地域の経験から学ぶことが可能であり、IEA はそのような協力の中心となるであろう。

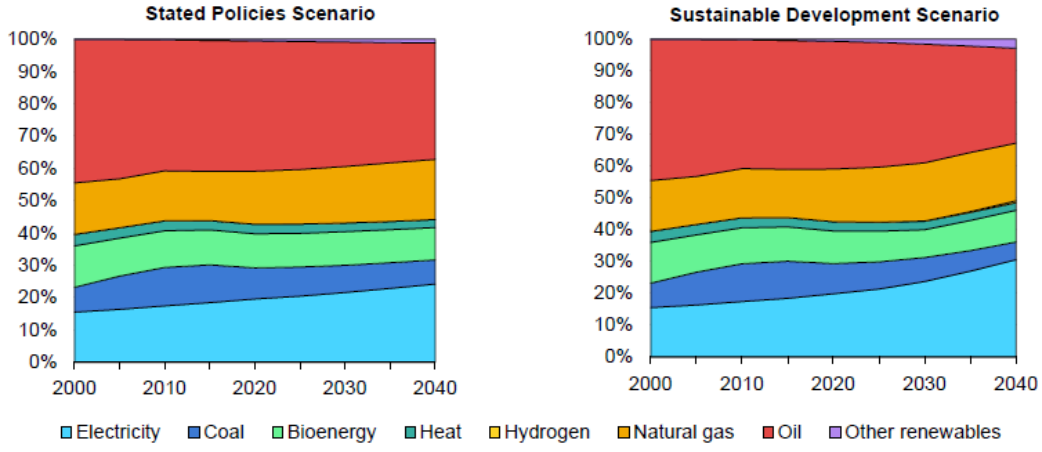
第1章 かつてないほど重要になっている電力セキュリティ

前書き

電気は社会の発展に不可欠である

- 現代的な社会生活は電力の安定供給なしには成立しない。今日、電力は一次エネルギー使用量の 5 分の 1 を占めるにすぎないが、デジタル経済や医療機器、在宅勤務で利用される IT システムなど生活のあらゆる場面で電力は決定的に重要な役割を果たしている。
- 最終エネルギー消費に占める電力の割合は 2000 年の 15 %から今日 20%にまで増加しているが、IEA の公表政策シナリオに示される現状の政策を維持する場合は 2040 年で 24 %までの増加にとどまっている、しかし、各国がパリ協定に沿った費用対効果の高いエネルギーミックスを目指す IEA の持続可能な開発シナリオでは 2040 年に電力が最終エネルギー消費に占める割合は 31 %に達し、現状石油の半分に満たない電力は石油を追い越す。

Figure 1 Share of global final energy consumption by fuel



IEA. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario. SDS = Sustainable Development Scenario.

図 1 燃料別の最終エネルギー消費に占める割合
（公表政策シナリオ・持続可能な開発シナリオ）

- 電力の重要性は、最終エネルギー消費に占める電気の割合に留まらない、電力は他のエネルギー特に石油およびガスと連携し民生および産業部門の基本的な活動を支えている。

電力システムは新旧の様々な脅威に対処する必要がある

- 電力システムの目標は、消費者に確実かつリーズナブルなコストで電力を供給することである。この目標を達成するためには、機器の故障や燃料不足、運用計画の失敗やヒューマンエラー、意図的な攻撃など、多くの脅威が存在する。
- 電力のセキュリティとは、障害や不足の事態へ対処し、復旧することにより電力を中断することなく利用可能とする電力システムの機能である。
- 電力のセキュリティは、エネルギー変換、サイバーイベント、気候への影響との関連でセキュリティーを最大化するための短期的そして長期的な技術的、経済的、政治的なすべての活動を連携させる。

表 1 主要な電力セキュリティの用語と定義

Table 1 Key electricity security terms and definitions

Term	Definition
Adequacy	The ability of the electricity system to supply the aggregate electrical demand within an area at all times under normal operating conditions. The precise definition of what qualifies as normal conditions and understanding how the system copes with other situations is key in policy decisions.
Operational security	The ability of the electricity system to retain a normal state or to return to a normal state after any type of event as soon as possible.
Resilience	The ability of the system and its component parts to absorb, accommodate and recover from both short-term shocks and long-term changes. These shocks can go beyond conditions covered in standard adequacy assessments.

Sources: Based on European Commission JRC and IEA Electricity Security.

- 妥当性：通常の動作条件でエリア内の総電力需要を供給する電力システムの能力。通常の状態と見なされるものを正確に定義し、システムが他の状況にどのように対処するかを把握することが、指針決定の鍵となる。
- 運用上のセキュリティ：電力システムが通常の状態を維持する能力、またはあらゆる種類のイベントの後にできるだけ早く通常の状態に戻る能力。
- レジリエンス：短期的な衝撃と長期的な変化の両方を吸収、調整、回復するシステムおよび構成部品の能力。衝撃は標準的な妥当性によりカバーされる条件を超える可能性がある。

電力供給を中断させる要因の種別

- **連鎖的停電、システム停電：**最初の停電により、連携するライン過負荷の増加によりシステムが崩壊した際に発生する。完全に復旧するには数時間から数日間を要し、バックアップ電源のある場合を除いて、ネットワーク上のすべての需要家に影響し、決

済システム、通信、信号機などの多くの重要なサービスに影響を与えるため、社会的被害は甚大である。また、輸送の混乱、食品の安全性の問題、治安に関連する問題、経済活動の喪失により、かなりの経済的損失につながる可能性がある。これらのイベントは主に複数の機器故障が同時発生した結果であり、発電容量の不足に起因することはほとんどない。地震による 2018 年の北海道の停電、2016 年の南オーストラリア停電は、激しい嵐と系統の相互接続基準の不備により発生した事例である。

- **負荷制限 :** 電力システムの 1 つまたは複数の系統電力を意図的に切断することである。これは、オンデマンドレスポンス、緊急供給、輸入などの他のオプションを使い果たした後、なお供給力が負荷に対して不足している場合にシステムバランスを維持するためにシステムオペレーターが講じる予防措置である。負荷制限は数分から数時間継続されるが、重要なサービスの提供を継続するための少量のエネルギーが供給されるものの、電力供給が完全に停止される需要家も発生する。電力システムは、近い将来にはデジタル化によって必須ではない電化製品やストレージへ選択的に供給を停止し、エレベータ等中断により不便の生じる用途への供給を継続することができるようになる。
- **長期に渡る電力の利用制限：**電力供給力が需要に対して大幅に不足するために、電力システムの運用者や政府が計画的に電力の供給を制限しなければならない場合に発生する。これはおそらく社会が直面する可能性のあるなかで最も深刻なイベントであり、事例として 2001 年に干ばつと不適切な投資(８割の電力が水力発電により賄われていた)により発生したブラジルの電力危機や、東日本大震災に起因する日本の電力危機が挙げられる。多くの発展途上国では長期間の電力利用制限が依然として課題となっており、先進国はこの課題を解決するための新たな投資枠を構築する必要がある。

表 2 近年の電力危機の事例

Table 2 Recent examples of major disruption to power supplies

Type of event, location, year	Key factors	Extent of blackout
Load shedding, California 2020	Heatwave	Rolling blackouts affecting up to 3 million people for up to 2.5 hours across several days
Load shedding, United Kingdom 2019	Lightning strike, operational security	1 million people for around 40 minutes, aggravated by transport delays
Load shedding, California 2019	Wildfires	Transmission lines shut down affecting 11% of PG&E customers for 3 days
Black system event, Hokkaido 2018	Earthquake	5.3 million people for 12-48 hours
Blackouts, Ukraine 2015-16	Cyberattacks	1-6 hours, 200 000+ people
Long energy rationing period, Brazil 2001	Drought, inadequate investment framework	20% of total energy consumption for 6 months

更新を迫られる電力セキュリティの枠組み

電力部門を取り巻く状況は劇的に変化している

- 中高所得国の多くは、１世紀あまりの経験を踏まえた高レベルの電力信頼性を誇っている。現在の枠組みは、複数の機関や利害関係者が関与する複雑な制度的枠組みであり、物理インフラの計画、市場と投資の枠組みの設定、システムの安全な運用と自然災害への準備など重要な側面を管理している。
- これまでの経験は、下記 1)~3)により特徴付けられるが、多くの国や地域では、もはやこれらの条件は当てはまらなくなっており、必ずしも将来への備えが十分とは言えない。
  1) 主に水力発電所と火力発電所を中心とし、集中管理された送電および配電ネットワークを介して、地域の独占を伴う垂直統合型ユーティリティによる供給
  2) システムの慣性は大容量の発電設備により提供され、発電システムは単独で制御されデジタルネットワークへの接続無
  3) 規制により、地域の電力供給は単一の事業体が責任を負い、事業体は収益性をカバーする電気料金の設定が担保される中で発電およびネットワーク設備への投資を実施

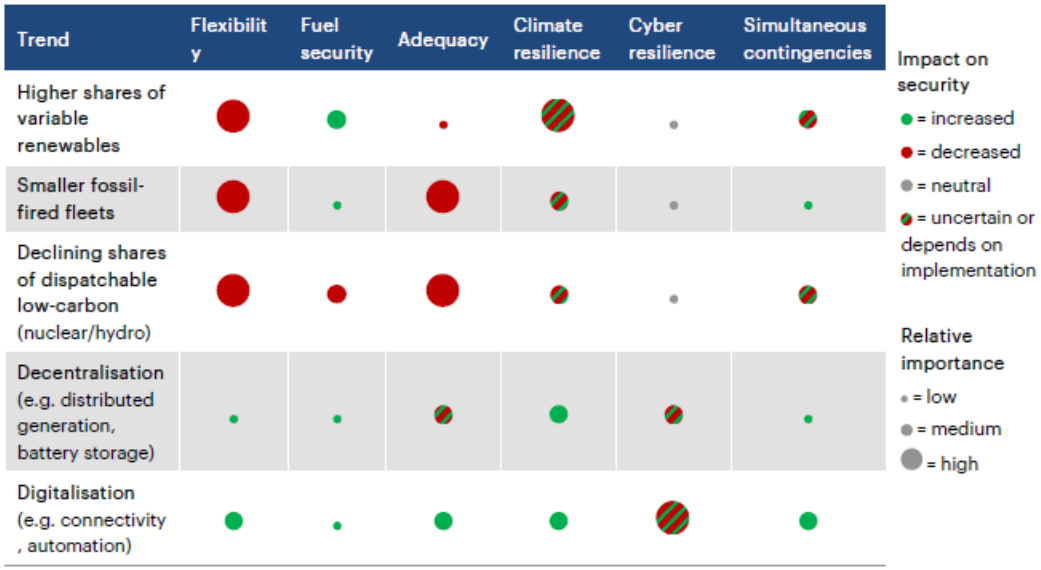
- 規制された地域独占を伴う電力市場は、自由化された競争市場へと置き換えられ、再生可能エネルギーの風力や太陽光発電は供給シェアを増やし、脱炭素化を目指す各国ではその開発が歓迎され、また化石燃料の輸入代金削減へも貢献している。風力や太陽光発電は変動性かつ非同期な発電であり、分散する複雑な需要側のリソースを管理

するために、電力システムは柔軟性と高度なデジタル化、さらに気候変動により引き起こされる異常気象への対応として電力供給インフラの堅牢性とレジリエンスが求められている。

- これらの状況を踏まえ、本レポートは政策立案者の注目を集めている下記３つの側面に焦点を当て、電力システムが今後数十年で直面する脅威の種類と、適切な制度的措置、市場設計、および技術を駆使してそれらを管理する方法の構造的レビューを提供する。
  1) 電力構成の変化により､運用上のセキュリティと長期的なシステムの適切性を確保するための新しい対策の推進
  2) サイバーセキュリティに対する新たなリスク
  3) 異常気象を含む気候変動の悪影響に対するより充実したレジリエンスの必要性
- 電力部門の展望は、様々な再生可能エネルギーの役割の拡大、停滞、原子力や水力などの従来型低炭素源、火力発電の減少、経済のさらなるデジタル化、気候変動といった要因の組み合わせによって電力供給停止への潜在的な影響と可能性が変化する。

表 3 電力システムの動向が電力セキュリティのさまざまな側面に及ぼす潜在的な影響

Table 3 Electricity system trends and their potential impacts on various aspects of electricity security



Notes: Circle colour indicates the potential impacts on various security aspects, e.g. flexibility. Circle size indicates the relative level of importance for a specific security aspect. The intent of the table is to illustrate the potential impacts in a generalised way. Actual impacts in specific countries and states/provinces will depend on their context and circumstances, e.g. generation mix, existing infrastructure, geography, climate. Simultaneous contingencies are outages of generation and transmission assets which are unexpectedly affected at the same time by the same event, such as earthquakes.

- 表 3 は電力システムの各種の動向が、電力セキュリティの様々な側面に対して及ぼす潜在的な影響の大きさを○の大きさで、影響の方向(プラス/マイナス/±ゼロ)の区別を色で示したものである。特定の国や地域における実際の影響は、世代構成、既存のインフラ、地理的、気候的な条件により異なる。不測の事態とは、発電・送電ともに予期せぬ停止へ追い込まれる事態、地震などを指す。
- 電力セキュリティの枠組みにおいては、各種の動向が特定のセキュリティ問題を軽減する一方で他の問題をいかに増加させるかが位置づけられる必要がある。

電力供給におけるセキュリティを確保するためには、適切なガバナンスが必要である

- エネルギー転換やサイバー脅威、気候変動などの新たな動きにより電力システムが進化し続ける中、政府と規制当局は、電力のセキュリティが維持されるように、すべての利害関係者に対する法的要件と規制要件を継続的に更新していく必要がある。
- 事例として、EU クリーンエネルギーパッケージが挙げられる。これは 1996 年、2003 年そして 2009 年に公表されたヨーロッパの電力システムの法的イニシアチブまたは法令パッケージから段階的な進化を経たものであり、送電分離や市場的な観点から始まった当初のものから、セキュリティ関連の規定が増加している。
- また、再生可能エネルギーのグリッドへの安全な統合をサポートし、ベースロード発

電所の廃止や他のプラントの使用率の低下に起因するリスクを管理するために、米国連邦エネルギー規制委員会は 2018 年 2 月にオーダー842 を発行した。本オーダーにより、すべての新設発電機は、グリッド相互接続の前提条件として、一次周波数応答サービスを提供する必要に迫られた。同様に、EU でも 2016 年すべての加盟国で法的拘束力のあるグリッドコードを確立している。

管轄区域を越えた統合計画が必要とされるがこれには重要な役割を演じる組織体から成る複雑なグループが関連する

- 電力システムの信頼性に対する新たな脅威は電力計画の枠組みへ課題をつきつけ、多くの管轄区域では統合された電力計画の枠組みが費用対効果の高い安全な電源ミックスへの移行において重要な役割を果たしてきた。
- これらの枠組みのもと、発電所とグリッドへの投資調整がさらにすすめられており、従来の管轄区域を拡大する新たなアプローチが登場している。
  1) 異なる管理区域およびバランス区域に渡る地域間計画
  2) 多様な需給リソースの統合計画
  3) 電力と他の部門間の統合計画
- 新たなアプローチは、歴史的に送電網から供給される電力に依存してきた配電網にまで及んでおり、多くの小規模な分散プラントの展開が集中している地域では、配電ネットワークから送電レベルまでの逆流がますます一般的になり、安全に管理する必要がある。この変化に対処するためには、送電システムのオペレーターと配電システムのオペレーターの間のより緊密な調整が重要である。
- 政策支援により、送電および配電計画のプロセスと発電計画とのより良い統合が可能となる。また、適切な計画規定とは、電力部門の拡大において重要な役割を果たし、グリッド、新世代、ストレージ、およびその他の柔軟性オプションをカバーし、確率は低いが影響が大きい災害の影響を予見するものである。

エネルギー移行期間における電力セキュリティ

- クリーンエネルギーへの移行は、世界中の電力システムに大きな構造変化をもたらし、変動性再生可能エネルギーはコスト削減と政策支援策に後押しされ過去 10 年で利用が急増している。この傾向は気候変動対策の目標に沿って継続あるいは加速する、同時に従来の火力発電所特に石炭火力そして原子力および水力発電所は現状維持または減少する見込みとなっている。
- 需要側では、エネルギー効率が向上しているものの、電化により電力需要が増加し、電力システムへ現在よりはるかに多くの投資が必要になる。技術とデジタル化の進展

により、電力システムにおける消費者の役割はより積極的なものとなり、今後数年間でより分散化が進むことが期待される。

- 政策立案者には、適切な政策、規制およびリソース適正を支援する市場設計を通じた電力システムのセキュリティ確保が求められる。これには、多様な低炭素発電技術の進歩と、新しい課題への対応を支援するためのデマンドレスポンス、ストレージ、デジタル化、市場の相互接続などの新しい柔軟性のあるリソースが含まれる。

増加する低炭素電源

エネルギーの移行により、変動性再生可能エネルギーは大いに成長する

- エネルギーの移行は、世界の電力システムの運用方法に大きな変化をもたらすが、最も重要なことは、低コストの変動性再生可能エネルギーの大規模な展開である。

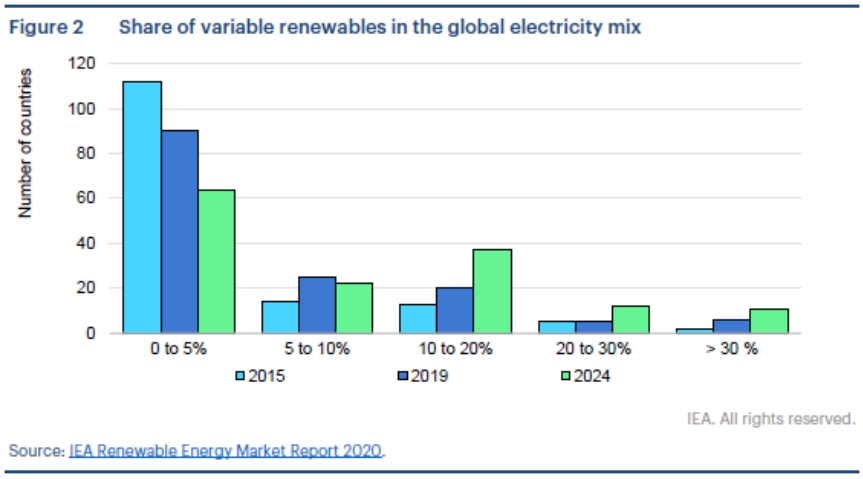


図 2 世界の電源構成における変動性再生可能エネルギーの割合

- 変動性再生可能エネルギーの大規模な展開に伴い、過去数十年間にわたり電力システムの柔軟性の大部分を担っていた従来の発電所は廃止され、残っている従来型プラントは、特にヨーロッパと米国で、ほとんどが天然ガスを燃料としている。ヨーロッパでは、天然ガスの国内生産の減少と並行して進展しており、天然ガス供給の安全と電力の安全はより緊密になっている。

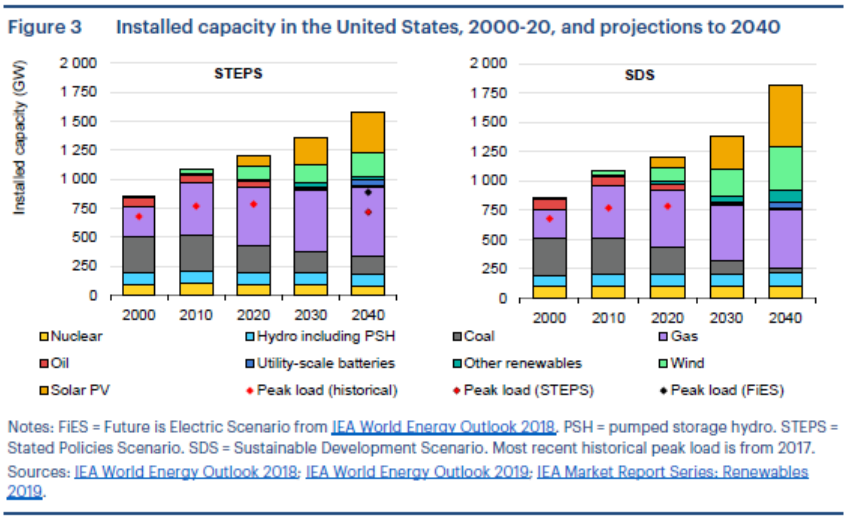


図 3 米国におけるシナリオ別の発電設備容量(2000～20 年および 2040 年までの予測)

- 排出削減目標を達成するために、風力および太陽光発電の導入を大幅に加速する必要がある。IEA の持続可能な開発シナリオは、太陽光発電と風力が主力となるが、他の低炭素発電技術、需要応答と蓄電、およびデジタル化と市場の相互接続によって支持される多様な電源構成となっている。
- 天然ガスと石炭は、特にインドのような発展途上国経済において依然として存在感を示す。原子力やバイオマスといった風力および太陽光以外の低炭素技術からの電力供給が達成されない場合、追加の費用や課題が生じる。風力および太陽光を他の低炭素電源の不足を補えるレベルまで成長を加速させることは、非常に困難である。
- シナリオは純粋に技術的な視点から論じられており、追加の風力タービン、原子力施設、化石燃料を利用する発電所および新たな送電網に対する社会的需要や政治的要因は低炭素化への移行をさらに複雑化する可能性を秘めている。

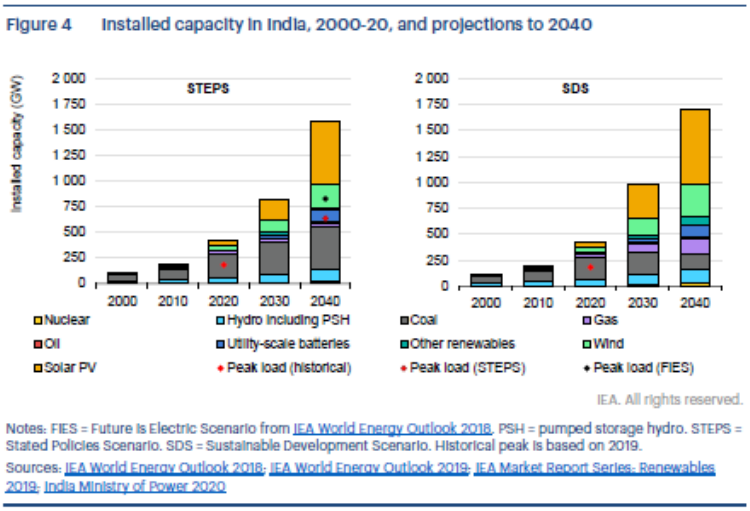


図 4 インドにおけるシナリオ別の発電設備容量(2000～20 年および 2040 年までの予測)

原子力などの低炭素石油代替電源は、電源構成に占める割合が減少している

- 原子力発電所は、低炭素で石油代替え可能であり、ある程度柔軟性を持つ発電源であるにもかかわらず、世界レベルで衰退している。IEA は、原子力発電所の寿命延長や新しいプロジェクトへの追加投資がない場合を原子力縮小ケースと想定し、今後数十年間について何が起こるか調査を行った。
- 原子力縮小ケースでは、先進国の原子力発電容量は 2040 年までに 3 分の 2 減少し、2018 年の約 280 GW から 2040 年には 90 GW 強に減少する。EU では最大の減少となり、原子力発電の割合は 2018 年の 25%から 2040 年には 5 %未満に低下する。

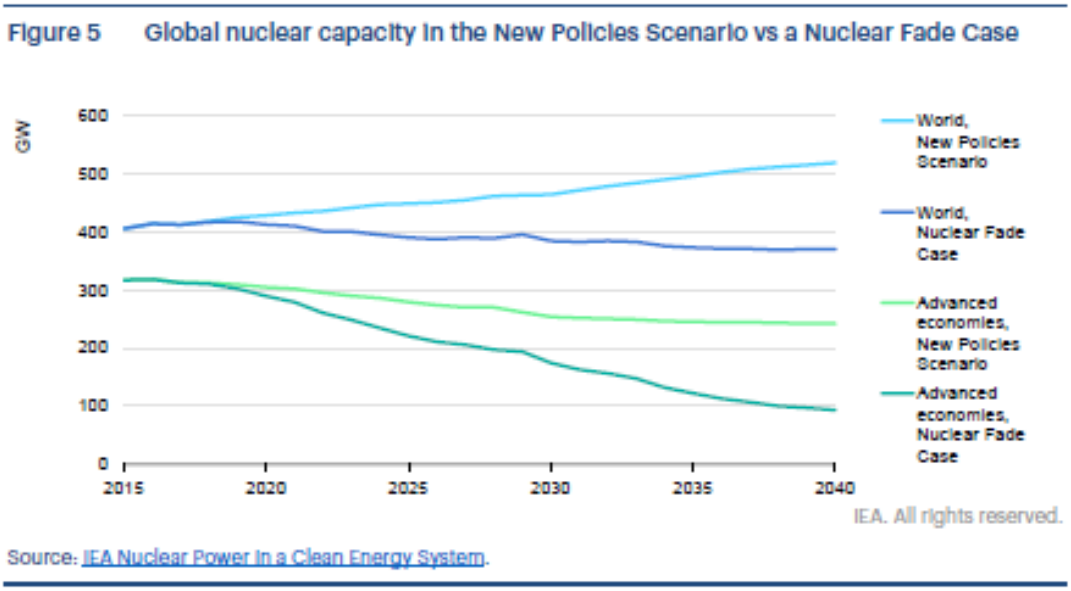


図 5 新政策シナリオと原子力縮小ケースにおける、世界の原子力発電容量の推移

- 原子力縮小ケースでは、先進国の原子力発電容量は 2040 年までに 3 分の 2 減少し、2018 年の約 280 GW から 2040 年には 90 GW 強に減少する。EU では最大の減少となり、原子力発電の割合は 2018 年の 25 %から 2040 年には 5%未満に低下する。
- バイオマスやバイオガスなどの他の電力供給源は成長が予想されるものの、そのペース(公表政策シナリオでは 2018-30 年の期間で世界の容量の 2.0 %から 2.2 %のペース)は石炭と原子力の減少よりもはるかに遅く、CCUS(炭素の回収、利用および貯蔵)を備えた発電所などの新しい技術は、持続可能な開発目標の達成に必要とされるレベルよりもはるかに遅れている。つまり、風力や太陽光発電以外の他の低炭素技術の成長は、石炭や原子力の廃止分を補うには不十分となるリスクを含んでいる。クリーンな水素はすでにさまざまな政策イニシアチブで推進されており、今後 10 年間にスケールアップできれば、長期的なエネルギー貯蔵源として大きな可能性を秘めている。

エネルギー移行により電力システムは多様化し、突発的な事象への適応性を高める

- 風力および太陽光発電は固有の資源であり、燃料輸入国の場合は輸入代金の削減と燃料自給率の向上に寄与している。また、電源の多様化により、燃料の供給と価格変動のリスクが軽減され電力セキュリティを向上させる。
- 大規模な火力発電所が通常の運転を再開するには、大規模システムの復旧が必要であり時間を要するが、分散型風力や太陽光発電などの小規模発電設備は停電からの復旧を早めることができる。
- 例えば中国の例では、石炭火力発電への強い依存から、風力と太陽光のシェア拡大への移行することで、2040 年までに電源多様性が高まる。

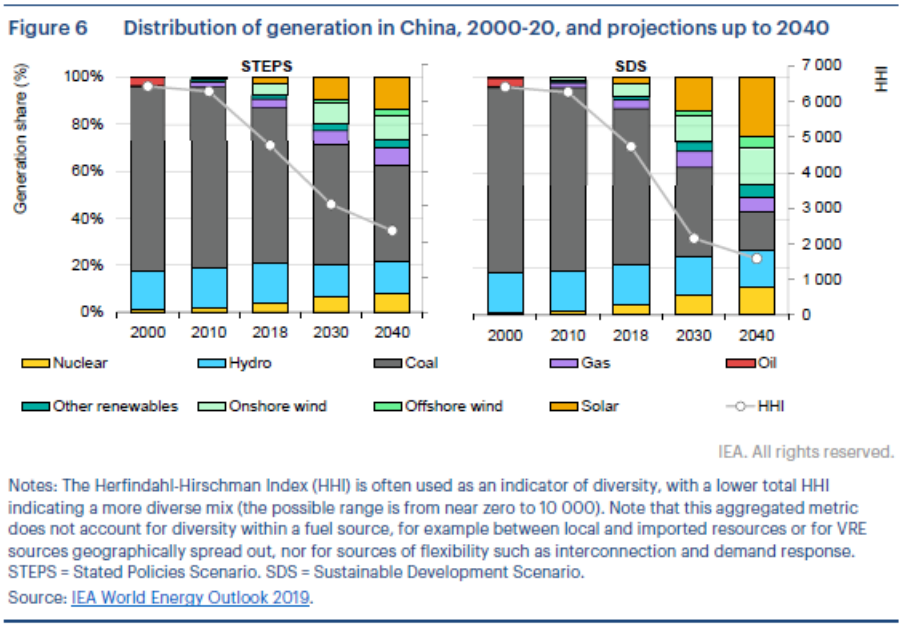
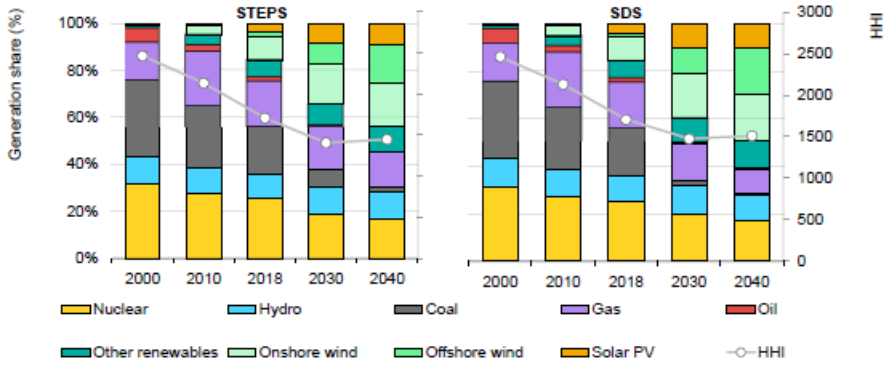


図 6 中国におけるシナリオ別発電の燃料比率(2000～20 年および 2040 年までの予測)

- ヨーロッパの電力市場は多くの国で電力システムの高レベル相互接続を実現し、天然ガス、石炭、原子力、水力、風力、太陽光、など多様な発電源に恵まれており、電力供給の安定性に対して高い信頼性を誇っている。システム多様性において、低炭素燃料による発電、デマンドレスポンスの柔軟性およびグリッド相互接続が今後ますます重要になる。

Figure 7 Distribution of generation in the European Union, 2000-20, and projections up to 2040



IEA. All rights reserved.

Note: The Herfindahl-Hirschman Index (HHI) is often used as an indicator of diversity, with a lower total HHI indicating a more diverse mix (the possible range is from near zero to 10 000). Note that this aggregated metric does not account for diversity within a fuel source, for example between local and imported resources or for VRE sources geographically spread out, nor for sources of flexibility such as interconnection and demand response. STEPS = Stated Policies Scenario. SDS = Sustainable Development Scenario.

Source: IEA World Energy Outlook 2019.

図 7 EU におけるシナリオ別発電の燃料比率(2000～20 年および 2040 年までの予測)

- EU では CO_2 排出量削減と大気汚染レベル軽減のために石炭火力発電所の廃止がすすめられており、気候変動やその影響を軽減するための目標を達成するための政策措置と資金戦略により支持されている。
- さまざまな生成パターンを持つ、より多くの VRE(変動性再生可能エネルギー)を統合することで時間の経過にともなう VRE 出力を平滑化することが可能となり、変動性を軽減し、システムの脱炭素化の経済的コストを削減することが可能となる。例えば、太陽光発電と風力発電は、日中と季節の両方の相補性を示すことが多く、1 日および 1 年を通して VRE 出力の全体的な変動を低減する。
- ヨーロッパにおける、洋上風力発電の計画拡大は、より大きな設備利用率と補完的な発電パターンが VRE 統合の課題を緩和し、低炭素電源構成をさらに多様化する有望な機会となっている。それでもなお最終的には、バイオマス、バイオガス、水素、CCUS など他の低炭素電源が VRE の生成が少ない期間を補完し、電力貯蔵および需要側の対応範囲を拡大する新たな柔軟性電源とともに必要である。

技術シフト

- エネルギー移行期において、変動型再エネ電源の増加とともに、石炭火力や原子力のフェーズアウトが同時に起きることとなる。これにより、ピーク需要時には天然ガス火力への依存が高まることとなる。
- 結果として、電力供給に関わる安全保障と天然ガスの供給可能性の関係が益々重要になる。欧州のエネルギーシステムでは、今後 10 年に上記のような事象が発生すること

になる。

- 特に、厳気象時において天然ガス火力の役割は重要である。欧州の場合、2018 年のピーク時では、通常の 85%ピーク需要が高まった事象が生じた。

Figure 13 North West Europe's peak supply days in 2018 and 2030

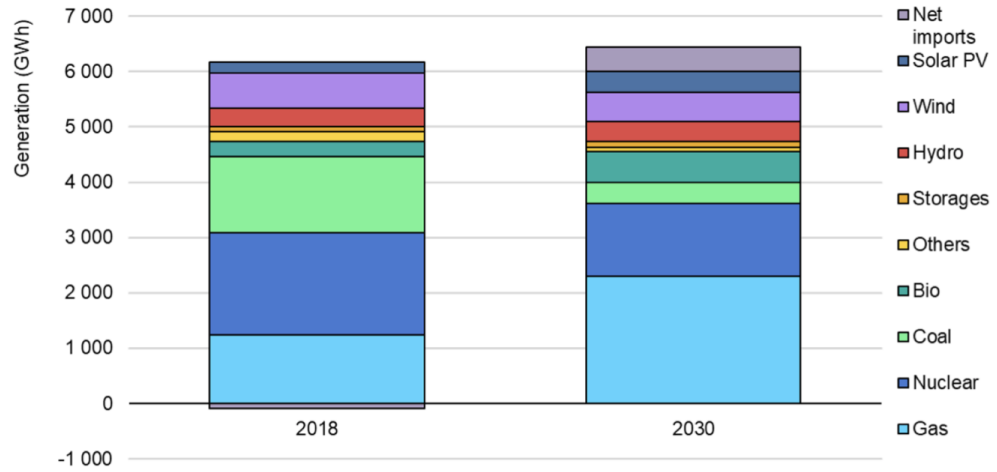


図 13 北西欧州のピーク供給時における発電電力量(2018 年および 2030 年)

デジタル化の出現

- デジタル技術の活用により、供給安定性を強化することができる。英国ではデジタル技術は、カスケードのイベントが生じないように、瞬間的に蓄電池の電力を供給できるようなシステムを既に構築している。これにより、2019 年 8 月の大停電リスクを回避している。
- 分散型電源の活用は、特定地域の配電が途絶し孤立化した場合に必要なレベルの供給を行うことができる。技術は多くのサービスを供給可能であり、規制や系統連系並びにグリッドコードの更新が必要である。
- 今後は、システムへの負荷を低減すべくデジタル技術を活用し電気機器の運用を制御する必要がある。
- 節電要請や自主的な節電行動の事例を除いて、消費者はシステムの負荷低減に関わる対応から現在のところ遠ざけられており、今後輸送や暖房の電化に応じてデジタル技術を IT プロトコルの標準化等を通して管理する必要がある。

蓄電池、VRE 並びに EV といった新技術が供給に関わる安全保障の考え方を変える

- 大規模な系統連系により、地域の多様性を踏まえ需要と供給の変動に応えることができる。大規模システムの的確さを評価する新たなシステムを構築することが重要である。

- 日本の台風の事例が示すように、大型の台風が同時に稼働できない場合などを想定する必要がある。
- 蓄電池技術と DR の活用は変動型再エネ電源の統合にあたって、重要な役割を担う。これらは、分単位や時間単位での短期的な変動の吸収に利用可能であるが、中長期的な(数週間や月単位)でのエネルギー貯蔵としては適切でない。
- 風力発電の天候不振による低稼働に直面した場合、多くの国において近隣地域からの電力融通によって対応されている事例がある。揚水発電は、短期的・中期的なエネルギー貯蔵の手段であり、既存システムの活用のみならず新規の開発を進めている場合もある。
- 水素エネルギーの活用やバイオメタネーションは、長期的な柔軟性措置として注目される。一方で商業化に向けては、リスクがある。
- 電力部門のイノベーションに向けて、不確実性へのヘッジを行いながら現実的な対応を行うことが重要である。
  - 揚水発電の改修や更新を含む水色発電の開発
  - 原子力発電の稼働年数延長と SMR の開発
  - 発電におけるバイオマスの利用
  - 合成燃料・ガスへの移行
- 電力部門のイノベーションに向けて、不確実性へのヘッジを行いながら現実的な対応を行うことが重要である。
- 技術面と費用面を考慮し、全ての燃料・技術が持続可能なエネルギーの道筋に向けた対応として必要である。

新たな計画ツールとインセンティブ

新技術は新たな計画ツールを必要とする。確率分析は供給の安全保障に関わる適切な分析方法である。

- 政策立案者や規制当局、システム運用者はリザーブマージンの計画といった決定論的なアプローチから、確率論に基づいた変動性やシステムの相互依存についてシミュレーションを行うことが重要である。シミュレーションの実施により、政策立案者はシステムの構成要素の把握に向けた理解を深めることができる。
  - 変動型再エネ電源の変動性
  - 発電、送電の停止
  - 地域的な送電の連係
  - システムのリザーブマージンと偶発的事象
  - 負荷の変動
  - DR

市場のデザインにより需給逼迫時には卸価格が高くなるように設定する必要がある。

- システムの変化を捉え、安定的な供給を行うためにサービスも進化する必要がある。発電部門においては、クリーンなエネルギー供給に向け適切にインセンティブを付与するとともに、ピークロードの供給並びに柔軟性措置、そしてリザーブの供給が求められる。
- 供給途絶に関わる許容可能なレベルを定義するとともに、電力の勝ちとして、消費者がどの程度を想定しているのか、供給途絶の経済的・社会的な影響についても考慮する必要がある。これらの理解に立脚した上で、適切な安定供給が確保できる市場形成・投資に向けた枠組みを形成することが重要である。
- 伝統的なピークの負荷に応えうる電力供給を行うのみならず、安定供給に資するサービスの提供が求められる。具体的には、柔軟性措置として利用される発電設備への投資が奨励されるような価格形成に向けた検討を行うべきである。

第2章 サイバーレジリエンス

前書き

デジタル化は電力システムに多くのメリットをもたらす一方で、サイバーセキュリティにリスクをもたらす

- デジタル技術は、効率の向上、コスト削減、停止時間の短縮など、電力消費者、公益事業、およびシステム全体に利益をもたらす。また、クリーンエネルギーへの移行を加速するのにも役立つ。インターネットは、デマンドレスポンスをより可能とし、エネルギー効率を改善し、費用対効果が高く安全な方法で、変動再生可能エネルギーの導入を促進する。
- ネットワークに接続されているデバイス(スマートサーモスタットや電化製品など)の数は急速に増加しており、世界のストックは今後 5 年間で 2 倍になり、2025 年までに 300〜400 億台に達すると予測されている。
- 一方で、分散型電源、電気自動車、蓄電池などの接続が増加することで、電力システムへのサイバー攻撃の可能性が高まる。
- サイバー攻撃により、デバイスやプロセスの制御が失われ、物理的な損傷や広範なサービスの中断が発生する可能性がある。このことは、家庭、企業への影響に加えて、サイバー攻撃に対処するコストを含め、電力会社に数百万ドルまたは数十億ドルの損害をもたらす可能性がある。

レジリエンスの強化

サイバー攻撃の実質的かつ増大する脅威は、回復力を強化するために強力な行動が求められる

- 電力システムでは、サイバー攻撃の脅威は大きく増大しており、そのリスクはますます高まっている。
- しかし、リスクと影響を特定することは非常に難しく、①サイバーセキュリティ事件に関する公開データの欠如、②規制当局やその他の当局に事件がまったく報告されない可能性、③「事件」や「攻撃」の範囲と定義の難しさ、が挙げられる。

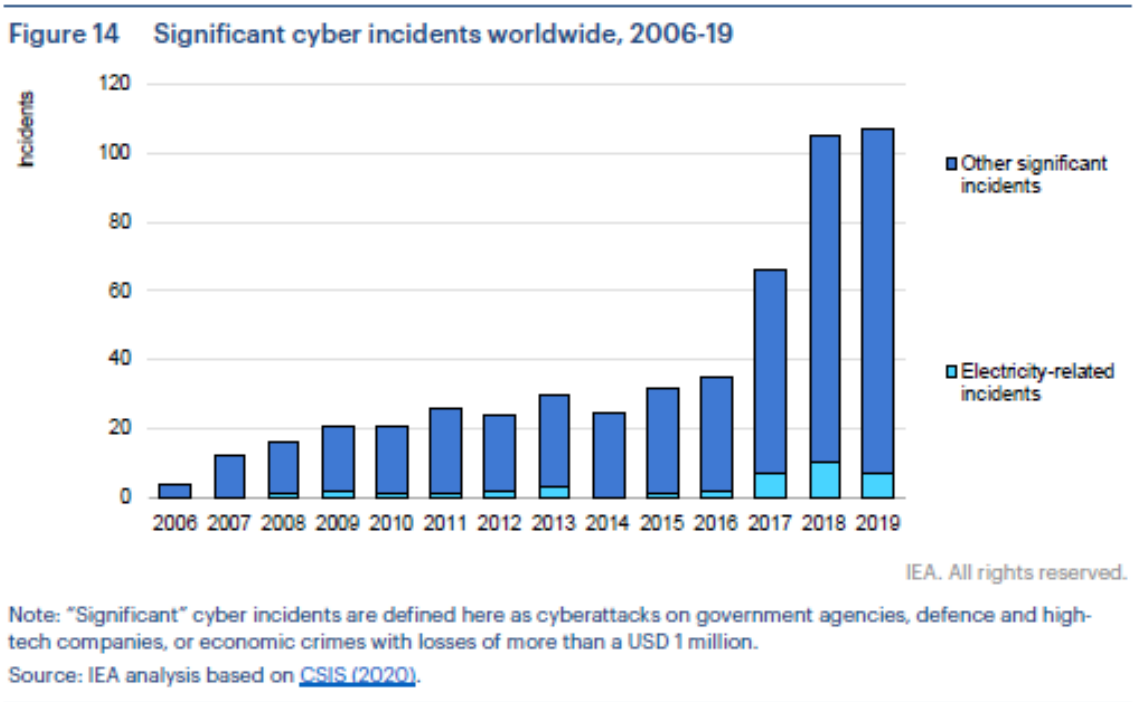


図 14 世界の重大なサイバー事件件数(2006 年から 2019 年)

- サイバー攻撃による電力システムの停止は、暴風雨による停電、機器の故障、操作エラーなどの他の原因と比較して、これまでのところわずかである。しかし、既に攻撃の事例があり、ウクライナ西部では変電所への攻撃により、電力ネットワークが停止した。
- サイバー攻撃を完全に防止することは不可能であるが、政策立案者、規制当局、システムオペレーター、業界などすべての関係者が、電力システムのサイバーレジリエンスを強化する上で重要な役割を果たす。

サイバーレジリエンスの強化は継続的な取り組みが求められ、電力バリューチェーン全体のすべての利害関係者の責任

- 組織内にサイバーレジリエンスの文化を根付かせ、リスク管理戦略を実践することが重要である。電力部門では、以下の視点が重要である。
  - ➢ 非常に高い電力利用を継続のためのリアルタイム性の確保
  - ➢ 各システム内およびシステム間の連携と相互補完
  - ➢ 新しいテクノロジーとこれまで積み重ねてきた取り組みの融合
- 電力システムのサイバーレジリエンスを強化することは、一般的にいくつかの段階を含む継続的なプロセスでからなっている。
  1) リスクと準備を特定して評価する。
  2) リスクと行動に優先順位を付けるためのリスク管理戦略の実施。

3) 攻撃が発生した場合、堅牢な対応と回復の手順に従う。
4) 過去の事件から学んだ教訓を文書化して組み込む。
5) 他の利害関係者と知識・経験を共有する。

- サイバー脅威は絶えず進化しているため、すべての組織は、脆弱性とリスク影響を継続的に監視および評価し、適切な措置を講じる必要がある。

サイバーレジリエンスを組織文化に

- サイバーレジリエンス対策活動は、別個の技術的な問題と見なされるのではなく、組織の文化として根付かせる必要がある。組織文化にならなければ、でデジタルトランスフォーメーションに伴う課題に対処できない可能性がある。
- サイバーレジリエンスは、サイバー攻撃後に学んだ教訓に基づいて、予防策と是正措置を組み合わせることが重要である。さらに重要なことは、死角や脆弱性を見つけるための外部利害関係者とのコミュニケーションである。
- 政策立案者、規制当局、規制対象者、その他の利害関係者による取り組みは、電力システム全体のサイバーレジリエンスを強化し、適切な対策を確実に実施することができる。

表 4 サイバーレジリエンスを強化するための潜在力が高い取り組みの概要

Table 4 Overview of potential actions to enhance cyber resilience

Stakeholder	Potential actions to enhance resilience
Utilities	• Incorporate cyber resilience into the organisational culture and integrate cybersecurity considerations into enterprise risk management frameworks. • Identify and assess risks and implement a risk management strategy to prioritise areas of action. • Implement robust response and recovery procedures to help maintain operations in the event of a cyberattack, with clearly allocated responsibilities. • Improve existing measures and implement new ones based on lessons learned internally from past incidents, and from external organisations via information sharing and analysis centres (ISACs) or knowledge-sharing platforms. • Exercise threat hunting and cyberthreat intelligence activities to prepare for high-end threats from highly capable and motivated attackers.
Equipment suppliers	• Participate in certification programmes to increase trust and security in products, processes and services. • Focus cybersecurity standards on risk management approaches and the processes by which security is maintained once equipment is commissioned. • Promote co-operation to avoid potential fragmentation that might be expected from having different regulators and supervisory bodies.

表 4 サイバーレジリエンスを強化するための潜在力が高い取り組みの概要（続き）

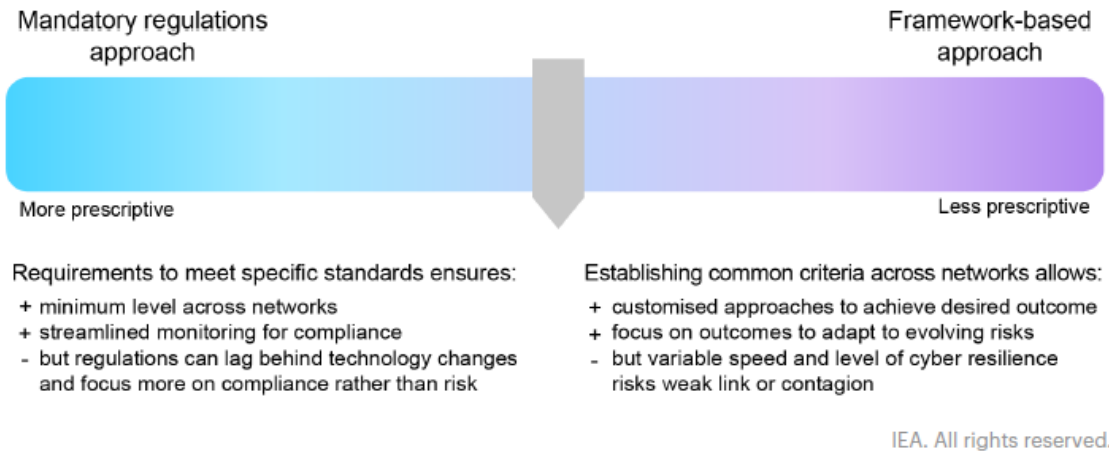
Stakeholder	Potential actions to enhance resilience
Policy makers and regulators	• Understand cybersecurity risks and communicate effectively to raise awareness. • Apply or adapt existing tools and guidance for key stakeholders. • Exercise caution when using assessments to compare different organisations. • Develop policies that foster sector-wide collaboration and response procedures. • Set up research partnerships with industry and academia to foster R&D on cyber resilience in electricity. • Facilitate and incentivise the sharing of best practices and vulnerabilities through workshops, bulletins, training, on-line communities, etc. • Provide direction and assistance in setting up ISACs, and participate in international ISACs.

政策と規制のアプローチ

効果的なサイバーレジリエンス規制を設定することは、施行とイノベーションの間の微妙なバランスが必要

- 世界中で、サイバーレジリエンスに対する多くの政策的アプローチがすでに採用されている。
- 強制的なアプローチの例といては、北米電力信頼度協議会(NERC)の重要インフラストラクチャ保護(CIP)標準があるが、強制的なアプローチの場合、業界は負担が大きすぎるとして反発する可能性がある。さらに、ハードウェア、サイバーセキュリティソフトウェア、および規制のサイクルの間に不一致がある可能性があり、技術の変化に対して、規制の更新が必要である。

Figure 15 The spectrum of cyber resilience approaches



IEA. All rights reserved.

図 15 サイバーレジリエンスに対するアプローチの強度

- あまり強制的ではないアプローチでは、対策を実施する際に実施者にある程度の自由を与えながら、セキュリティ原則を満たすことを目的としている。 規制当局は、特定の基準の達成やサービスの中断に対処するために必要な時間など、特定の目標指標を定義し、これらの指標を費用効果的に満たす特定の対策を決定するのは実施者に任せている(NARUC、2020)。
- 政策の導入は、すべての関係者に適切な最低限のセキュリティ要件レベルを設定し、事業者と製造業者間の協力により、情報共有を促進し、国際協力を実現するために不可欠である。 ただし、政策は必ずしもすべての組織を同じセキュリティレベルにすることや、すべての組織を最も高度なレベルにすることを目的とすべきではない。
- 電力システムのサイバーレジリエンスを確保するための政策を立案する場合、政策立案者は、ネットワークやシステムオペレーターだけでなく、電力システムと相互作用するすべての関係者を対象として、システム全体のレジリエンスを促進する必要がある。

実施するための戦略はリスクのグローバルな特徴を考慮しつつ国状に合わせて調整する必要がある

- サイバーセキュリティの対策は、実効性を高めることであり、強制的であると順守に集中してしまい、本当の意味を忘れてしまう可能性がある。世界の国々では、強制的な取り組みと最低限の規制の組合せにより、多様な電力システムに対応している。
- 一方で、システム供給者はグローバルにシステムを供給しているため、標準機器で脆弱性が特定されると、他の電力システムで悪用される可能性があるため、 政策立案者はシステム供給メーカーとの調整やガイドラインの策定が必要となる。
- サイバーレジリエンスへの投資は、金銭的な利益と比較検討したり、攻撃の防止を実証することで効果的であることが証明されることはないため、電力セクターのサイバーセキュリティ政策が政策立案者にとって複雑な問題となっている。

電力系統の末端と電力システムのバリューチェーン全体で回復力を確保することが不可欠

- 電気自動車、その他の分散型エネルギーリソース、および接続されたデバイスが普及するにつれて、サイバー攻撃が電力システムに重大な混乱を引き起こす可能性が高まっている。例えば、インターネット接続のエアコンやヒーターへの攻撃により、大停電を引き起こす可能性が指摘されている。
- 例えば米国では、分散型エネルギーリソース(PV や蓄電池)の潜在的な脆弱性をより理解し、電力供給を保護するための早期警告システムと対応アルゴリズムを開発するための研究が進行中である。

- 最終消費者向けデバイスの保護システムは、多くの場合、エネルギー省やエネルギー規制当局の規制範囲を超えている。消費者への規制は、消費者保護当局、公安および市民保護機関、エネルギー効率部門、さらにはドイツやフランスの場合のように IT セキュリティの特別機関などの他の政府機関にある可能性がある。したがって、エネルギー政策立案者は、システムに対する潜在的なリスクとそれらに効率的かつ効果的に対処する最善の方法を検討するために、さまざまな政府レベルや製造業者協会や標準化団体と連携することが重要である。
- 政策立案者は、サプライチェーンにおける潜在的なサイバー攻撃の脆弱性を検証、伝達、改善するためのプラットフォームが、業界や企業で取り組まれていることを確認する必要があり、さらに政策立案者にとって重要な事項は、取り組みが透明性と信頼を持って行われるのか、それとも認証、インセンティブ、ペナルティによって実施されるのかである。

政策立案者は電力システム全体のサイバーレジリエンスを強化する上で重要な役割を果たす

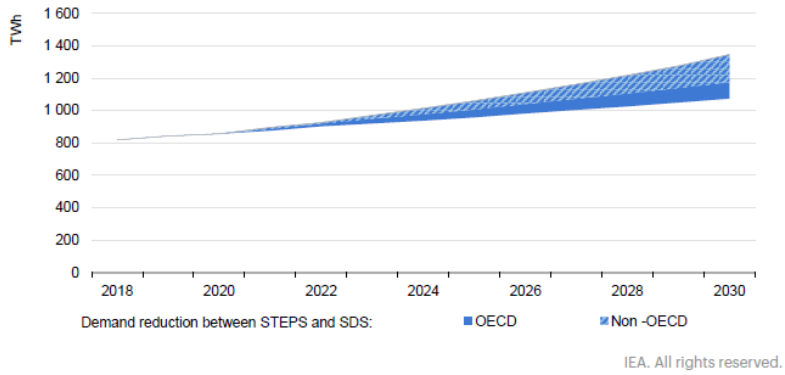
- 電力システムには、他のセクターと比較して、独特の運用条件や、脆弱性、および解決策があり、電力システムのサイバーレジリエンスを強化するには、最適な政策と戦略が必要である。
- エネルギー政策立案者は、電力システム全体のサイバーレジリエンスを強化する上で重要な役割を果たす。そのため、意識を高め、利害関係者と協力して、新たな脆弱性とリスクを継続的に特定、管理、伝達し、また、パートナーシップやセクター全体の協調、情報交換、電力セクター内外の研究事業を促進する上で中心的な役割を果たす立場にある。

第3章 気候レジリエンス

前書き

気候変動による気温上昇や極端気候の頻発等の影響は、電力安全保障に発電効率の低下、利用可能性の変更、発電ポテンシャルの低下といった十分な影響を与え、さらに送配電ネットワークへの物理的な損傷を与えることで送配電ロスが増加する。さらに、冷房需要の増加が見込まれる国では、発電容量を増加させる要因となる。

Figure 16 The projected growth in residential space cooling demand from 2018 to 2030 under IEA scenarios



IEA. All rights reserved.

Notes: STEPS = Stated Policies Scenario. SDS = Sustainable Development Scenario.
Source: IEA (2020), Energy Technology Perspectives 2020.

図 16 IEA シナリオにおける住宅用冷房需要の増加(2018 年から 2030 年)

熱波、山火事、洪水といった極端気候の増加が停電原因の大半を占めるようになり、米国カリフォルニア州や豪州の事例があったように、電力システムは気候ハザードによる影響に曝されている。

表 5 長期的な気候変動と異常気象による電力システムへの影響の概要

Table 5 Overview of main potential impacts on the electricity system due to long-term climate trends and extreme weather events

Climate impact	Generation	Transmission and distribution networks	Demand
Rising global temperatures	• Efficiency • Cooling efficiency • Generation potential • Need for addition	• Efficiency	• Cooling & heating
Changing precipitation patterns	• Output & potential • Peak & variability • Technology application	• Physical risks	• Cooling • Water supply
Sea-level rise	• Output • Physical risks • New asset development	• Physical risks • New asset development	• Water supply
Extreme weather events	• Physical risks • Effiiciency	• Physical risks • Efficiency	• Cooling

こうした気候変動による負の影響は、電力システムのレジリアンスを高めるための早急な行動の必要性を政策担当者、電力事業者、関連する利害関係者に強調させる。また、低炭素エネルギー技術の導入支援によって、将来的な気候変動による負の影響を減少させることにつながる。

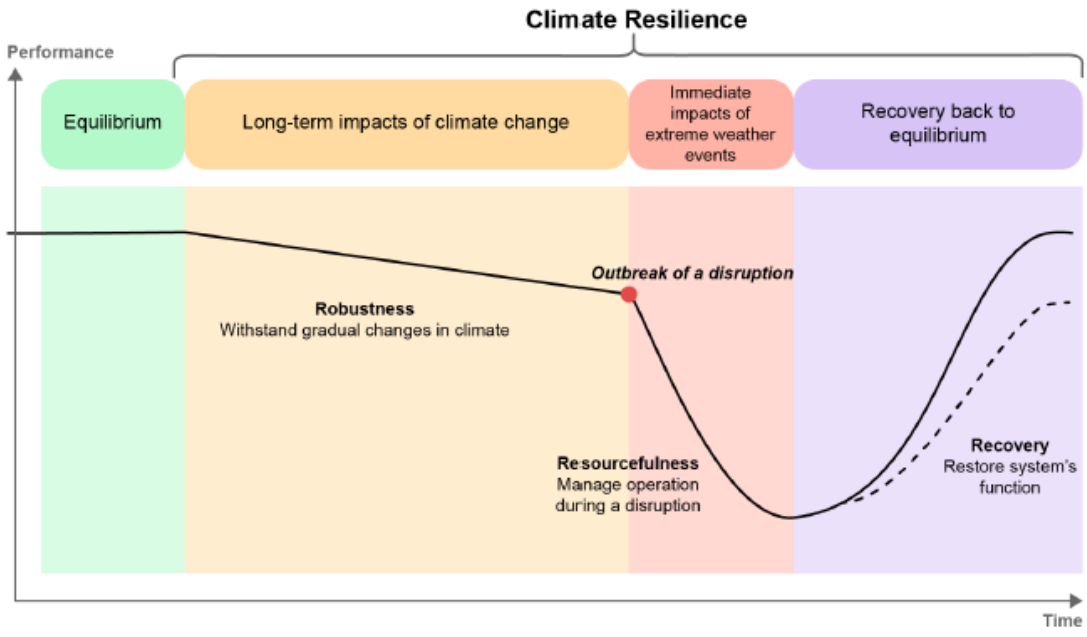
気候レジリエンスの恩恵

電力システムの気候変動へのレジリエンスは気候変動の悪影響に対応する

以下のフレームワークは、政策立案者が電力安全保障の要素として、頑健性、臨機応変さ、復元性といった気候変動への耐性をより明確に認識するのに役立つ。

頑健性は長期的な気候変化に耐えうる継続的なオペレーション能力、臨機応変さは極端気象による突然の影響を緩和する能力、そして復元性は気候ハザードによる影響から電力システムをいち早く復帰させる能力である。

Figure 17 Conceptual framework for climate resilience of the electricity system



IEA. All rights reserved.

Sources: Argonne National Laboratory (2012), Resilience: Theory and Applications (ANL/DIS-12-1), as modified by International Energy Agency.

図 17 電力システムにおける気候レジリエンスの概念的枠組

よりレジリエントな電力システムは気候影響による損失と損害を減らす。

最近の研究では、1 ドルの気候レジリエンスへの投資が、将来 6 ドルの節約につながると試算しており、レジリエントな電力システムの便益は気候変動によるコストを上回る。

例えば、送配電ネットワークを地下化することは大きなコストになるが、洪水や強風などの気候ハザードによるコストの方が大きい。2005 年に、スウェーデンの一部地域で暴風によって送配電システムが寸断され 20 日間の停電が発生した。その時にスウェーデンのネットワークオペレーターは 2 億 5000 万ユーロの損害が発生、マクロレベルでは 30 億ユーロを超える損失となった。

そのため、政府は送配電事業者が直面する気候ハザードへの対処方法を導入することで気候影響による損失と損害を減らすことができる。

気候変動に強い対策を採用することで持続可能な開発とクリーンなエネルギー移行に貢献

気候ハザードの増加によって SDGs のゴールに設定されている電力へのアクセス確保が脅かされており、気候変動に強い電力システムを構築することは SDGs の目標に貢献することに繋がる。また、電力は低炭素エネルギーシステムへの転換を促す役割がある。

政策措置

効果的な政策措置は気候変動へのレジリエンス構築における潜在的な市場の失敗を防止する

電力システムの気候変動へのレジリエンスを引き上げることによる便益は全ての関係者に等しくあるが、だれが責任を負い、だれがそのコストを支払うべきなのか。

原則的には、電力事業者が自らの資産と顧客を守るために責任を負うことになるが、幾つかの気候変動へのレジリエンス投資を躊躇させる要因がある。①投資のための資本コストは直ぐに必要になるが、それによる便益が得られるのは数十年後、②気候ハザードによる停電が発生しても社会的コストの一部しか電力事業者は負担しない、③独占的な市場では電力事業者にレジリエンス投資へのインセンティブが削がれてしまう。

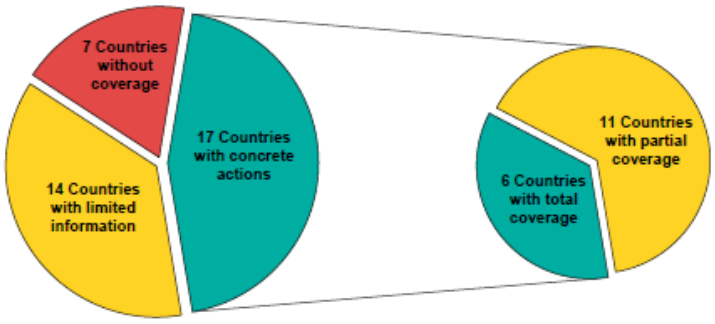
そのため、政策立案者には、電力事業者と協力して気候変動に強いシステムを構築していくための政策措置の検討・実施が必要になる。

電力安全保障政策において気候変動に強いことをより優先すべき

多くの国で電力部門のレジリエンス強化を進める方針だが進捗は遅れている。国家適応計画が策定されているが、電力部門の気候レジリエンスは見過ごされている。

IEA に加盟する 38 か国のうち、17 か国が国家適応計画の中でエネルギー部門のレジリエンス強化に向けた行動を進めることにしているが、ほとんどの場合、電力部門での対策は限定的である。

Figure 18 Coverage of the climate resilience of electricity systems in National Adaptation Strategies and Plans, IEA family countries



IEA 2020. All rights reserved.

図 18 IEA 加盟国の国家適応計画における電力システムの気候レジリエンスの範囲

国家適応計画の中で電力システムの気候レジリエンスを盛り込んでいいない国は、直ぐに行動を起こす必要がある。これによって民間部門に気候レジリエンスへの投資を促すシグナルとなり、潜在的な市場の失敗に対処することが重要である。

気候の影響とレジリエンスを評価するための明確な共通枠組みを構築することが最初の一歩であり、これを踏まえて政策立案者はサービス提供事業者に適切なシグナルを発する必要がある。これによって、電力会社は、自らが計画する長期的な設備投資計画に気候レジリエンスを織り込む。また、費用対効果の高い対策に対してインセンティブを提供することで、電力会社の取組を一層促すことになる。加えて、支援措置によって、電力会社はシステム運用の改善などのレジリエンス対策を実施することができる。

第4章 推奨項目

電力システムのセキュリティを確保するための指針

- 今後、電力システムのセキュリティを確保するためには、エネルギー転換やサイバーセキュリティ、気候問題への対処が必要になる。そのためには、それぞれの問題毎に、包括的なアクションを行うことが重要である。即ち、1.責任とインセンティブの制度化、2.リスクの特定、3.リスク管理とリスク緩和、4.モニタリング、5.緊急時における対応と復旧である。

責任とインセンティブの制度化

- 電力システムのセキュリティを確保するためには、関係者の責任の明確化やインセンティブ設計、ルールの確立が不可欠である。即ち、脅威の評価、リスクの伝達、説明責任者の明確化、インシデント[40]への対応を行うフレームワークの策定を行うとともに、関係者の役割分担を明確にする必要がある。

エネルギー転換

- 規制当局：システムの安全な運用を担保するために、電力市場の適切性・柔軟性・安定性を常に評価。ステークホルダーごとの緊急時における義務の明確化。送電事業者と配電事業者間の役割分担を明示。
- 系統運用機関(system operators)：新技術を踏まえた系統連系規格の更新。(ガス火力に依存している場合)ガス関連の妥当性評価の実施。
- 政策担当者：政策の予見可能性の向上。

サイバーレジリエンス

- 政策担当者：目標設定と対策指示およびそれらを評価する規制当局の指定。
- 政策担当者と規制当局：さまざまな規制を調整する機能の担保。サイバーセキュリティ対策を促進するための制度設計の構築。
- 政策担当者と規制当局と産業部門(industy)：サイバーレジリエンスに対する認識向上。

気候レジリエンス

- 政策担当者：エネルギー・気候関連の計画および規制の中核として、気候レジリエンスを扱う。
- 政策担当者・規制当局：系統運用機関との協力の下、異常気象を含む気象パターンの

[40] 訳者注：ここでのインシデントとは、重大な事故(アクシデント)に繋がるセキュリティを脅かす事象を指す。具体的には、不正アクセス、不正中継、 システムへの侵入、データの改ざん、サービス妨害行為等が該当する。
https://www nic.ad.jp/ja/basics/terms/incident html

変化が電力供給に与える影響を踏まえた長期シナリオを作成。電力事業者に対する適切なインセンティブ付与を行いレジリエンスの高い電力システムへの投資を促進。

リスクの特定、リスク管理とリスク緩和

- リスクに対する備えとして、サイバーレジリエンスや長期計画と演習、基準の設定などに基づく、電力システム全体の評価が重要な役割を果たす。リスク緩和のために、政策担当者はステークホルダーに対し適切な投資シグナルを提供する市場を構築する必要がある。その上で、サイバーセキュリティなどの新分野における能力開発も並行して行うべきである。

エネルギー転換

- 政策担当者：エネルギー源の多様性向上による社会的・地政学的・市場的・技術的・環境的リスクの評価。
- 規制当局・系統運用機関：長期計画の妥当性を担保するために、すべての柔軟性措置を検討。電力システムの安定的な運用への貢献に応じたエネルギー源ごとの価格設定に関するルール作り。
- 系統運用機関：将来的な技術要件を踏まえた系統連系要件(grid code)の開発。分散型電源の普及や社会のデジタル化の進展、経済的に可能なデマンドレスポンス量を踏まえた、負荷制限計画(load-shedding plans)の見直しの実施。

サイバーレジリエンス

- 政策担当者と産業部門：サイバーレジリエンスのベストプラクティスとガイダンスの提供。
- 電力事業者(Utilities)：情報技術(IT)・運用技術(OT)双方の観点に立脚した適切なリスク管理戦略の策定。
- 政策担当者と標準化機関と産業部門と研究者：サイバーセキュリティ対策の試験と検証を行う施設の建設。
- 政策担当者と標準化機関：市場への影響や認証方法、重要度を考慮した認証の実施。
- 政策担当者と産業部門：訓練の義務化や能力認定等も考慮したサイバーセキュリティに関するキャパシティ・ビルディングの実施。

気候レジリエンス

- 電力事業者と系統運用機関：ビジネスへの影響を踏まえた費用対効果の高い選択肢の特定。
- 政策担当者と規制当局：意思決定者が資産の潜在的リスクと利用可能な手法を検討したことを確認するための計画およびガイダンスの提供。
- 系統運用機関：発電所・送配電を含めた電力システムの技術的な強化を支援。
- 規制当局と系統運用機関：天気予報・スマートグリッド技術・単独運転スキーム(islanding schemes)の活用による電力システムの可視性と制御性の強化。

モニタリング

- 政策担当者や規制当局、電気事業者は戦略目標が達成されているか否かを確認するために、モニタリングを欠かすことはできない。モニタリングには、有事への備えの評価や緊急時における知見構築やインシデントレポートの共有も含まれる。

エネルギー転換

- 規制当局：電力システムの信頼性の追跡とレジリエンステストの実行。連系電力系統における計画手続きと情報共有ツールの義務化。

サイバーレジリエンス

- 政策担当者と規制当局 : 有事に対する備えへのモニタリングツールの開発および提供。緊急時のモニタリングおよび知見構築メカニズムの開発。
- 政策担当者と有識者(intelligence community)と産業部門：高度なサイバー攻撃による被害防止・軽減のために、侵入されることを前提とした非従来型の対策(threat hunting)およびそのメカニズム構築の支援。
- メーカー(Equipment providers)と電力事業者：サプライチェーンにおける脆弱性を検知するためのモニタリングの実施。
- 政策担当者と産業部門：インシデントレポート等の情報共有メカニズムの構築。

気候レジリエンス

- 政策担当者：ステークホルダーとの協議を踏まえて、検証に基づいた継続的なレジリエント対策の改善と実施。

緊急時における対応と復旧

- 緊急時における対応と復旧を行うためには、事故の防止のみならず、サイバー攻撃による停止などに効果的に対処する必要がある。即ち、緊急時対応のフレームワーク策定や緊急時対応演習、得られた教訓や情報の収集などである。

エネルギー転換

- 規制当局：過去の緊急時に生じた事例より教訓を得た上で、対処方針に反映する。
- 規制当局と系統運用機関：市場外の措置(out-of-the-market measures)が適応された際の安全な運用を保証するための評価・改革メカニズムの構築。分散型電源など新技術の復旧を支援するための手順の策定。

サイバーレジリエンス

- 電力事業者：サイバー攻撃が生じた際の対応および復旧手順の策定と、関係者の責任の明確化。
- 政策担当者と電力事業者：定期的な緊急時演習および教訓の実務への反映。
- 政策担当者と規制当局と産業部門：効果的なインシデント分析のための情報共有。

気候レジリエンス

- 政策担当者と規制当局と系統運用機関：関係各所との復旧作業の調整。効果的な対処を行うためのキャパシティ・ビルディング支援。

IEA “Promoting vehicle efficiency and electrification through stimulus packages” の要約

Promoting vehicle efficiency and electrification through stimulus packages
（2020 年 11 月公表）

[https://www.iea.org/articles/promoting-vehicle-efficiency-and-electrification-through-stimulus-packages] に掲載

- 本報告書は COVID-19 による経済低迷とそれによる自動車販売への世界的な影響、並びに景気対策としての電気自動車への助成措置について、主な取り組みをまとめ示唆を導出するものである。以下に本報告の要点をまとめる。
- 過去 10 年の間に世界の乗用車販売台数は、2018 年にはやや増加ペースが低迷したものの、毎年 5%増で推移してきた。COVID-19 を受けて、現在の状況は悪化している。欧州では COVID-19 の第一波の間、工場は生産を停止し、2020 年の前半には平均して 30 日間操業を停止していた。
- 結果として、2020 年の自動車販売台数は、2019 年の水準よりも 15%低くなる見通しである。

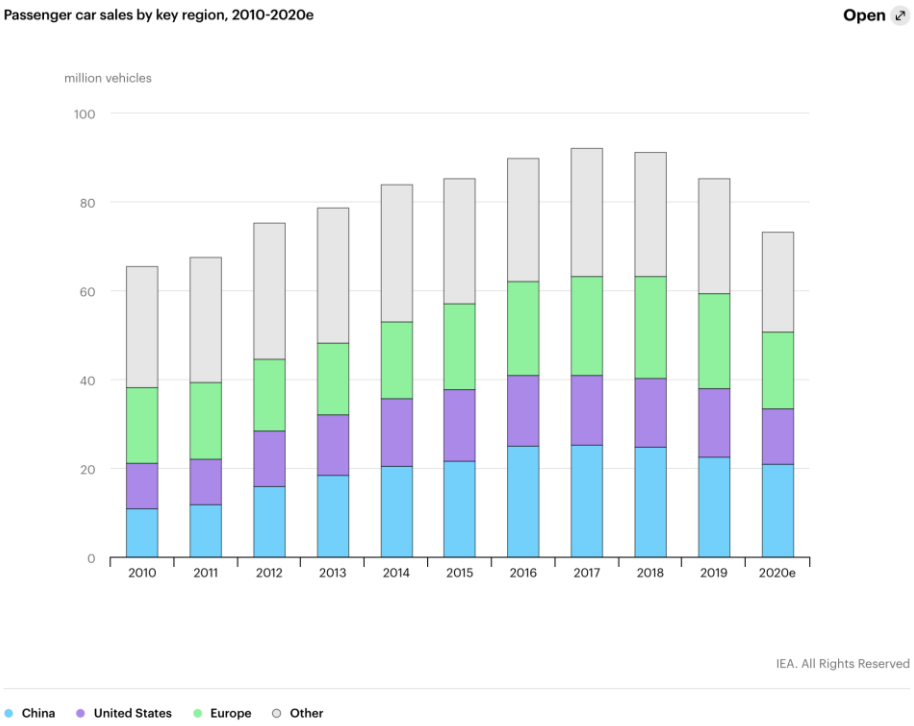


図 1:乗用車の販売台数の推移（2010-2019）

- こうした状況を受け、多くの国において助成措置やスクラッププログラムを実施し、乗用車の燃費向上と GHG 排出削減、そして大気汚染の改善を目指している。

	Germany	Spain	France	Italy
Programme start and duration	July 2020-December 2021	June-December 2020	June-July 2020	Temporary additional bonus: August-December 2020
New programme (yes/no)	No, temporary increase of bonuses of an existing programme	Yes	No, temporary increase of bonuses of an existing programme	No, temporary additional bonus on top of the existing Ecobonus programme
Type of vehicle eligible for subsidies	Electric and hybrid vehicles	Vehicles with CO_2 emissions under 120 g/km	Mainly electric and hybrid vehicles; vehicles with internal combustion engines for certain scrappage conditions	Electric and hybrid vehicles, Euro 6 vehicles
Scrappage requirement (yes/no)	No	Yes (cars older than ten years)	No, but scrapping a vehicle grants modest households an additional bonus of EUR 3 000 (for purchasing a vehicle with an internal combustion engine) to EUR 5 000 (for purchasing an electric vehicle)	No, but scrapping a Euro 0-1-2-3-4 vehicle grants additional bonuses (below)
Eligibility conditions		List price under EUR 40 000 for electric vehicles and hybrids	Income-based conditions (covering about 75% of population)	List price under EUR 40 000 for Euro 6 vehicles
		List price under EUR 35 000 for other vehicles	Scrappage bonuses vary according to CO_2 emissions of replaced and replacement vehicles	List price under EUR 50 000 for vehicles emitting less than 60 g/km
Eligible vehicles	Electric and hybrid vehicles	Vehicles with CO_2 emissions under 120 g/km	Electric and hybrid vehicles	Vehicles with CO_2 emissions under 110 g/km
Bonus amount per vehicle	Battery electric or fuel cell vehicle: EUR 7 500-EUR 9 000	Electric vehicle: EUR 4 000	Electric vehicle: EUR 7 000 (for vehicles under EUR 45 000)[2]	*Existing Ecobonus (+EUR 1 000-EUR 2 000 with scrappage)*
	Plug-in hybrid: EUR 5 625-EUR 6 750[1]	Hybrids: EUR 2 600	Hybrids: EUR 2 000 (for vehicles under EUR 50 000)	Emissions lower than 20 g/km: EUR 4 000
		Other: EUR 400-1 000	Additional scrappage bonus for modest households:	Emissions between 20 g/km and 60 g/km: EUR 1 500
			EUR 3 000 for a vehicle with an internal combustion engine, up to EUR 5 000 for an electric vehicle	*Temporary additional bonus (doubles with scrappage):* Emissions lower than 60 g/km: EUR 1 000; Emissions between 60 g/km and 110 g/km (Euro 6): EUR 750

- ドイツ：EUR 80 億を投じ、電気自動車の拡大を支援する。ドイツの助成措置は内燃機関自動車には充当されず、一方で電気自動車並びにハイブリッド自動車の助成額は倍増されている。
- フランス：電気自動車の購入に関わる補助金を増加させている。新たにプラグインハイブリッド自動車の購入に向けての補助金を拡大している。古い自動車をスクラップし新規に自動車を購入した場合にあてがわれるボーナスは、古い自動車の CO2 排出量と世帯所得に応じ決められる。
- イタリア：電気自動車、ハイブリッド自動車、そして Euro 6 適合自動車には既存の低燃費自動車へのボーナスに加えて追加的なボーナスが支払われる。既存自動車のスクラップは義務化されていないが、追加的なボーナスが支払われる。
- スペイン：電気自動車や燃料電池自動車の購入に対して、補助金が支払われる。補完的な措置として、低所得者層に対してはスクラップインセンティブが準備されている。
- 中国：2020 年に電気自動車とプラグインハイブリッド自動車の補助金プログラムを終了する予定であったのが、2022 年までに延長されている。なお、補助金額自体は減額となっており、また助成対象自動車は価格上限が設定されている。

- 上述の通りドイツ、フランス、イタリア、スペイン、中国等において、景気刺激策として乗用車の購入に向けた助成措置が提供されている。これらは、電気自動車並びにハイブリッド自動車の購入を促進しており、フランス、イタリア、スペインの対策としては購入に関わる高いインセンティブが付与される一方で、ドイツでは、内燃機関自動車はインセンティブから完全に対象外とされている。
- また、統合した運輸部門のアプローチとして、ドイツの事例に見られるように景気刺激策の多くが公共交通機関への支援や電気自動車の充電ネットワークの拡充に向けた対策を支援するとしている。
- 2009 年のリーマンショックに際して、ディーゼル車が普及していたが、現状では SUV 等の大型化が進展している。加えて、輸送の電動化が進展しておりこの点を考慮した政策の実施検討が必要である。
- 2020 年の 1-4 月データでは、主要な EU 諸国において電気自動車の販売は、前年同月比でほぼ倍増している。一方で、世界的な燃料価格の低迷により、内燃機関自動車の経済性が電気自動車のそれを上回っている点には注意が必要である。

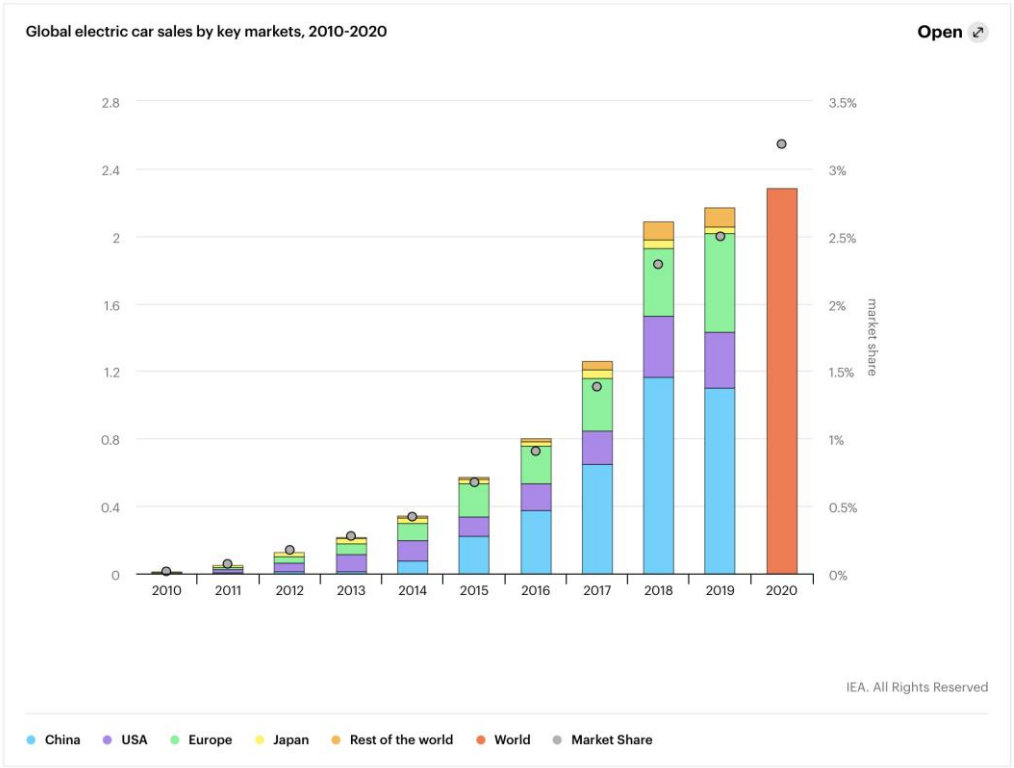


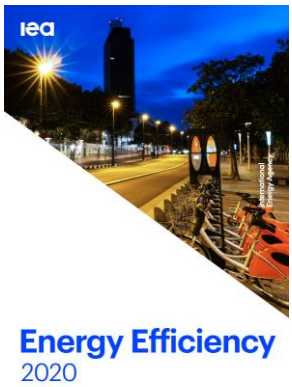
図 2:世界の主要地域における電気自動車の販売台数推移（2010-2019）

- 乗用車のスクラップと更新に加え、多くの政府では運輸関連の助成措置を提供し、公共交通機関を支援するとともに運輸インフラ投資の拡充を目指している。
- 例えば、スクラップインセンティブは、自転車やマイクロモビリティの購入と合わせて支給すると言ったことが考えられる。これにより、低炭素輸送手段へのシフトが促進できる。
- 大型インフラへの投資としては、電気自動車の充電インフラへの投資など、電気自動車の普及促進に資する効果が期待できる。ドイツで最近認証された助成措置は、ガソリンスタンドが電気自動車の充電スペースの導入を義務化している。
- スクラップ助成措置は大型トラックや小型の配達車、そのほか商用車やタクシー、バスなどの更新の機会をも提示するものである。車体のリノベーションによる商用車の電動化の脱炭素化に向けた重要な選択肢を提示する。
- なお、スクラップのみならず、部品のリユースも資源の効率的な利用の観点から重要である。部品のリサイクルについては、鉄やアルミニウム等、百万ドルの投資に対して、17 の雇用が創出されると推計される。

以上。

Energy Efficiency 2020

（2020 年 12 月発刊）



[https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2020]からダウンロード可能

- 本報告書はエネルギー効率と世界のエネルギー市場に対する Covid-19 パンデミックの影響、および 2019 年の傾向の分析とエネルギー効率の世界的な進展のためのアドバイスを提示するものである。以下に本報告書の要点をまとめる。

エグゼクティブサマリー

パンデミックの影響により既に遅れる省エネの進展はさらに低迷

2015 年以降、一次エネルギー原単位の改善ペースは悪化している。COVID-19 はさらに改善に向けた対応を遅らせる。経済低迷とエネルギー価格の低迷により 2020 年のエネルギー原単位の改善は 0.8%に留まり、これは気候等の影響を控除した 2019 年の 1.6%、2018 年の 1.5%と比較すると半分のペースである。2040 年までの Sustainable Development シナリオでは、CO2 排出削減の 40%が省エネルギーによる見通しであることから、こうした低迷は目標達成に向けた懸念を提示する。

省エネ投資は 2020 年に 9%減少

省エネ建築物への投資や高効率機器、低燃費自動車への投資は 2020 年に低迷する。経済が 4.6%低迷する見通しであり、所得の不透明さが消費者や事業者への投資判断に影響する。新車販売台数は、2019 年と比較して 10%低迷し、電動化は進むものの(販売台数は 3.2%増)ストック燃費は悪化する。エネルギー価格の低迷により、産業や業務部門の省エネ投資について、投資回収年数が長期化する。

エネルギー需要と原単位へのモビリティの変化の影響は甚大

移動制限や都市封鎖は長距離輸送および都市交通への影響が大きい。運輸部門のエネルギー消費は 2020 年に前年比 10%減少し、石油消費では 11%減(6 m/d)となる。これは、2020 年

の石油消費減少の 2/3 を占める。航空需要と共に鉄道需要も低減し、人キロ当たりのエネルギー消費は悪化する。

産業部門のエネルギー原単位は悪化する見通し

欧州と米国では、自動車製造は 2020 年の前半に前年同期比で 30%低い水準であり、金属の製造は同 15%低い水準であった。将来的な収益に関する不透明さから、投資の優先順位を再度検討されている。

建築物の効率改善はやや遅延する見通し

都市封鎖やソーシャルディスタンスにより実際に建築物の省エネ改修等は遅延する。スマートメーターの設置もインドや英国の場合は、前年と比較し 80-90%減少している。経済の見通しが不透明であることからも、パンデミック前と比較して断熱ガラスの普及が 6%低い。

機器の効率は短期的には改善する見通し

在宅時間増加により消費者の機器購入への関心が増している。パンデミック後にオンラインショッピングは世界的に 20-40%増加しており、機器の販売が通常よりも拡大していることを示唆する。

省エネルギーに向けた景気刺激策は欧州に集中

世界の景気刺激策において、省エネに関連する 660 億ドルのうち、260 億ドルが建築物に向けられており、100 万ドルの投資あたり 15 の雇用を創出するとの試算結果を得ている。200 億ドルが充電施設の建設を含む輸送の電動化に向けられている。なお、こうした景気刺激策には超高効率機器の普及にいは向けられておらず、部門別の偏りが見受けられる。電気自動車以外の燃費改善に関わる支出も見受けられない。

地域別でも、景気刺激策としての省エネ関連の助成金は欧州に集中しており、全体の 86%に及ぶ。残りはアジア太平洋と北米で実施されるものである。

省エネルギーに関する景気刺激策は追加で何百万もの雇用を創出

現在までに報告されている省エネ関連の景気刺激策は、2021-2023 年の間に 1.8 百万の雇用を創出すると推計される。その 2/3 が建築物関連で、16%が産業、20%が運輸関連である。またそのうち 80%が欧州での雇用創出に相当する。IEA の Sustainable Recovery Plan では、追加的に省エネルギーに関連して、4 百万の雇用を創出すると推計される。

危機による建築物と運輸のエネルギー消費への変化

ソーシャルディスタンスとテレワークの推進により業務部門から家庭部門へエネルギー

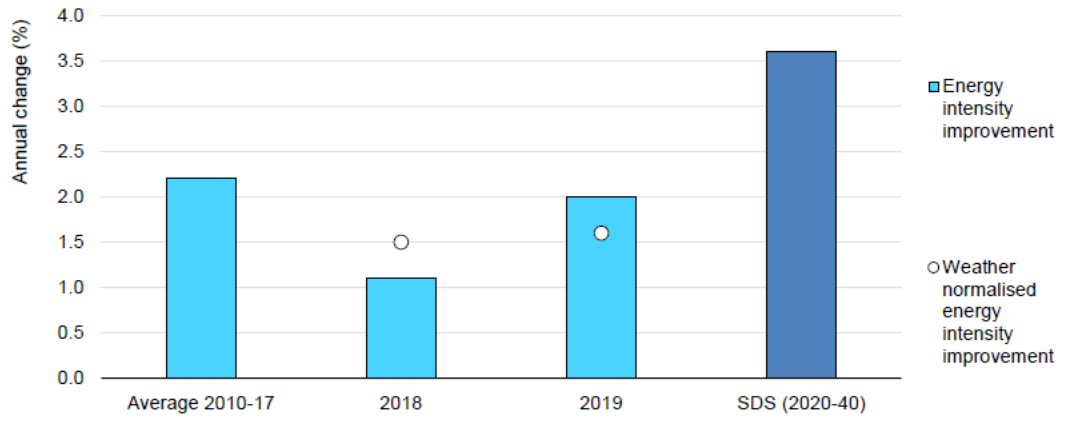
需要の転換が起きてきる。2020年の前半において、家庭部門の電力消費は前年同期比20-30%増加したが、業務部門の電力消費は10%低減した。

第1章 Covid-19 とエネルギー効率

Covid-19 以前からエネルギー効率改善のための緊急の行動が必要

- IEA では、エネルギー効率の改善が減速していると認識しており、2018 年の改善率は、1.1%、2019 年の改善率は 2.0%と低い水準である。

Figure 1.1 Average annual change in primary energy intensity improvement, historically and in the IEA Sustainable Development Scenario



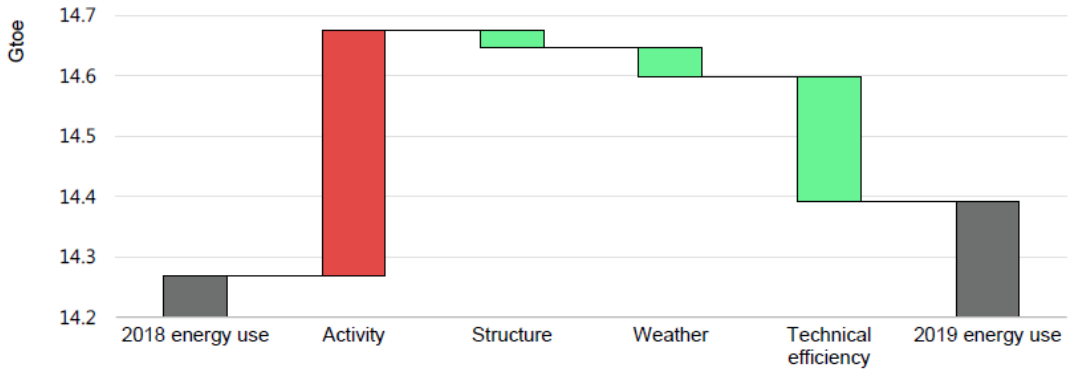
IEA 2020. All rights reserved.

Note: SDS = IEA Sustainable Development Scenario.
Source: IEA, Global Energy Review 2019.

図 1.1 一次エネルギー原単位の年平均改善率(経緯および IEA の SDS)

- 効率改善には３つの要素があり、①技術改善の進展、②経済成長率の低下、③気候、の影響が大きい。技術が進展し、経済成長が抑えられ、気候が温暖であったため、エネルギー消費が抑制された。

Figure 1.2 Change in global primary energy demand and causes, 2018 compared with 2019



IEA 2020. All rights reserved.

Note: Red columns are factors that increased energy demand, green columns are factors that reduced energy demand.

Source: IEA, Global Energy Review 2019.

図 1.2 世界の一次エネルギー需要とその要因(2019 年を 2018 年と比較)

Box 1.1 本報告書における主要な用語

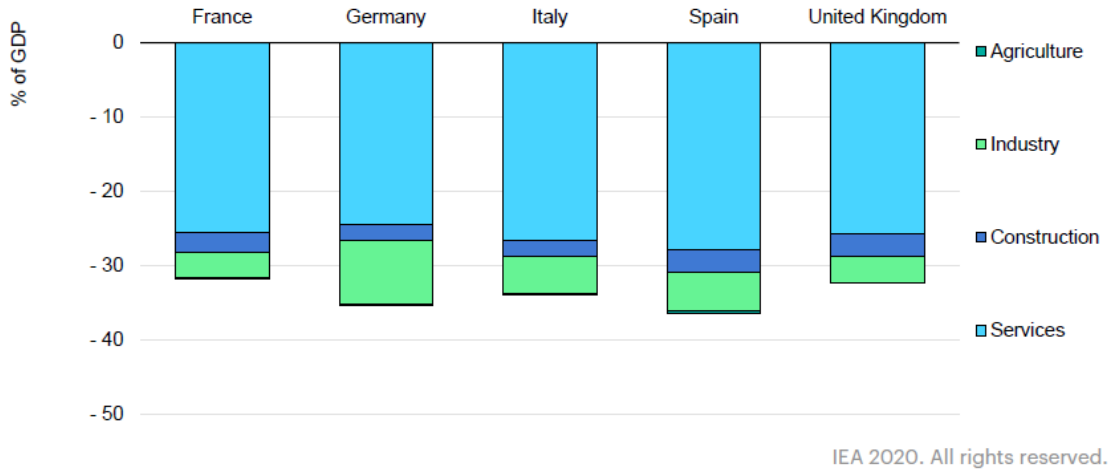
- 活動：エネルギーの需要を生み出す行動。エネルギー使用量の変化に影響を与える活動の変化を「活動効果」とする。
- 構造：経済またはセクター内の活動の組み合わせのこと。エネルギー使用量の変化に影響を与える構造の変化を「構造効果」とする。
- エネルギー原単位：活動単位あたりのエネルギー使用量。エネルギー利用の効率を表す。
- 技術的エネルギー効率(技術的効率)：建物、電化製品、家電機器、産業用機器、産業プロセス、車などのエネルギー使用技術によって提供される活動またはサービスの単位あたりのエネルギー使用の比率。

Covid-19 による要エネ新たな不確実要因

- 一つ目は、現在の経済危機は、より効率的な技術への企業や家庭による投資を遅らせる恐れがある。ただし、投資は計画的に実施されるため現状では大きな影響はまだ見えないが、今後、影響が拡大する可能性がある。
- 二つ目は、行動と市場を大きく変える可能性がある。航空需要や在宅勤務など、エネルギー効率への影響が発生する可能性がある。

- 三つ目は、経済危機に対する回復政策が、エネルギー効率を考慮して策定されるかどうか、により影響が異なる。
- 一方で、エネルギー効率改善の社会経済的メリットの認識が高まり、経済回復に向けた対策として考慮されるようになってきている。
- Covid-19 の影響は、長期間にわたる可能性があるが、リスクともチャンスともなり得る。
- 経済的影響が、どの部門で大きいか、例えば業務部門での影響が大きいことがしめされているが、全体における業務部門のシェアやエネルギー原単位などで全体への影響が異なってくる。
- したがって、これまでの評価とは異なる結果となる可能性がある。
- そのため、政府の公式統計データのみではなく、スマートメーターなどのデータを活用することも有効である。

Figure 1.3 Structural impact on economic sectors as a direct and indirect result of lockdowns



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: GDP = Gross value-added + taxes – subsidies. Gross value-added (GVA) is a common proxy for output. This illustrative effect on GDP demonstrates a subsequent illustrative effect on gross value-added assuming constant taxes and subsidies.

Source: OECD, Economic Outlook 2020.

図 1.3 各国のロックダウンの直接的・非直接的な部門別の影響

2020 年：エネルギー効率の変化の追跡においては不連続の年

- IEA では、2020 年の一次エネルギー需要は 5.3%の減少と予測している。世界の GDP は 4.6%減少し、一次エネルギー原単位の改善は、0.8%に留まる。
- ただし、Covid-19 の影響は、原単位の分子と分母の両方に影響するため、これまでのような評価指標として活用することは困難である。

経済危機はエネルギー原単位を増加させる可能性あり

- 過去のデータ分析から、景気の影響がすぐにエネルギー原単位に現れず、少し遅れて影響がでていることが分かっている。

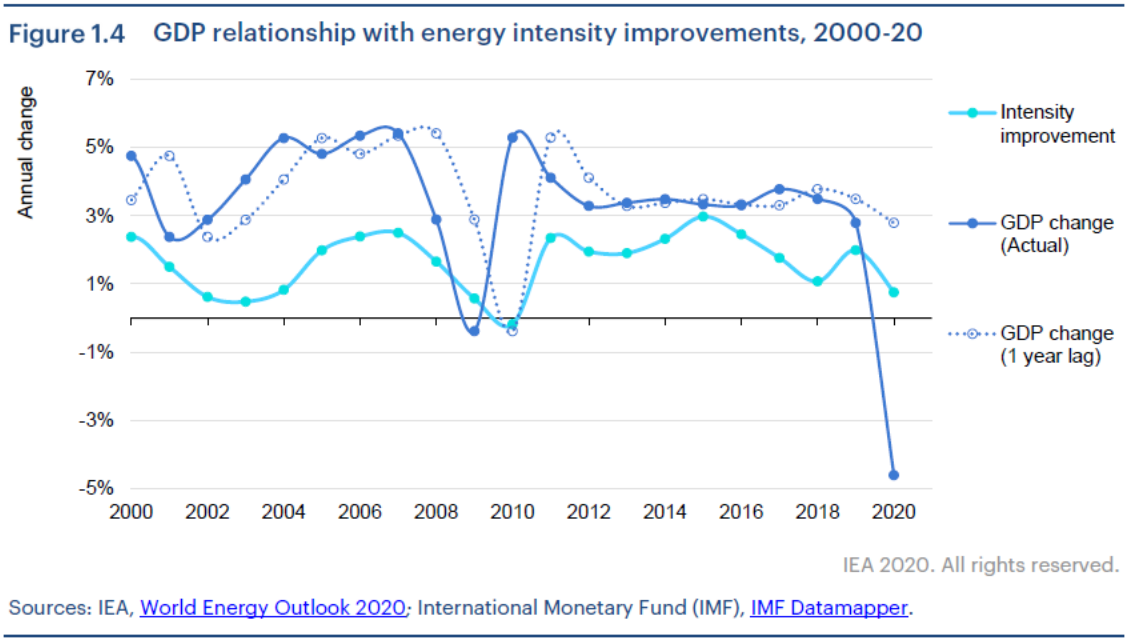


図 1.4 GDP とエネルギー原単位改善の相関(2000 年から 2020 年)

- 景気後退がエネルギー原単位に長期的な影響を与える理由の一つは、企業や家計の収入がより不確実になるにつれて、技術効率改善への投資が景気後退で鈍化する傾向があるためである。
- そのためエネルギー原単位の改善の遅れは、2021 年まで続くことと予想している。
- また、政府の収入も減少するため、エネルギー効率改善のための優先順位が低下し、公的式が減少する可能性がある。

今回の危機は、複数のメリットを備えた、より効率的なエネルギーシステムに移行する機会でもある

- 経済危機はエネルギー原単位の改善を妨げる可能性があるが、逆にこの危機がより効率的なエネルギーシステムへの移行を加速する機会を提供する要因がある。
- 通勤や旅行などの異動においては、従来の行動に戻る可能性もあるが、都市での交通インフラへの投資により、より効率的な移動手段が恒久的に提供される可能性がある。
- また、再生可能エネルギーの普及は進んでおり、特に太陽光発電への投資は、パンデミック下においても継続している。需要側でも再生可能エネルギーの特性に対応した

技術開発が進められている。

- さらに、エネルギー効率への投資は、温室効果ガスの排出を削減し、大気汚染を改善する。衆衛生予算のコストも削減にも貢献する。

第2章 建築物

パンデミックの影響により既に遅れる省エネの進展はさらに低迷

- 以下の三つの要因が短期的なエネルギー原単位の動向へ影響する。
- 業務から住宅建築物への部分的なエネルギー消費のシフトが原単位に影響する。
- 短期的には病院等のエネルギー多消費の業務部門のエネルギー消費が増加する。
- 健康への配慮を背景に、業者の建築物へのアクセスが制約されることから省エネ改修等の対応が遅れる。

表 2.1 パンデミックにより建築物のエネルギー原単位へ影響を与える要因

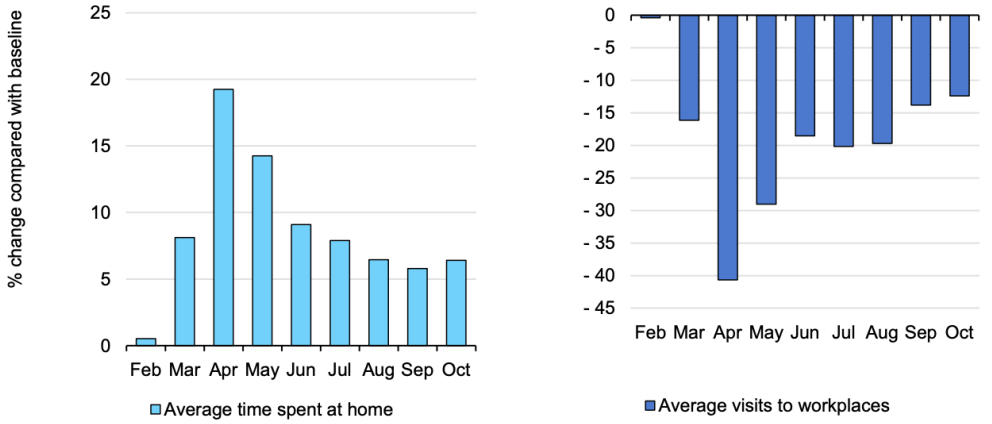
効果	要因	原単位への影響
活動/構造	住宅におけるエネルギー消費の増加と業務ビルのエネルギー消費量減少	悪化
	エネルギー多消費のサービス部門からのエネルギー消費増加	悪化
	業務ビルの換気頻度増加	悪化
技術	景気低迷と雇用の減退、オーナーの所得減	悪化
	低燃料価格と省エネ投資の投資回収年数の長期化	悪化
	健康への影響を懸念した業者の建築物へのアクセス低下	悪化
	ESCO 事業者の収益低減とデフォルト	悪化
	政府の景気刺激策	改善
	在宅時間の長期化によるエネルギー料金の増加、省エネ改修への投資	改善
	業務建築物オーナーの省エネ改修	改善
	在宅時間の長期化による DIY による投資の拡大	改善

- 長期的には、健康と経済の危機的状況がどの程度継続するかによってエネルギー原単位への影響が異なる。
- 一方で、政府の省エネ関連景気刺激策の実施により長期的には技術面での効率改善が促進される。

活動と構造の変化

住宅でのエネルギー需要増加と業務ビルでのエネルギー需要減少

Figure 2.1 Changes to average time spent at home (left) and visitors to workplaces (right), average over selected countries



IEA 2020. All rights reserved.

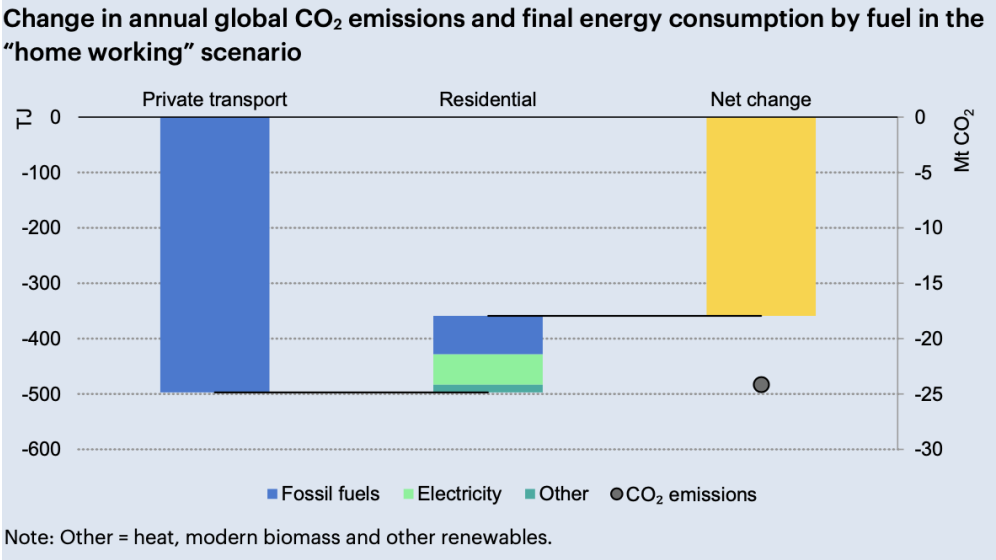
Notes: The data show how visitors to (or time spent in) categorised places change compared with Google's baseline days. A baseline day represents a normal value for that day of the week. The baseline day is the median value from the five-week period 3 January to 6 February 2020. "Home" refers to the "Residential" category, which shows a change in duration whereas the "workplace" category measures a change in total visitors. Countries include: Australia, Austria, Belgium, Brazil, Canada, Chile, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, India, Indonesia, Ireland, Italy, Japan, Korea, Luxembourg, Mexico, Morocco, Netherlands, New Zealand, Norway, Poland, Portugal, Singapore, Slovakia, South Africa, Spain, Sweden, Switzerland, Thailand, Turkey, United Kingdom, United States.

Source: Google LLC, Google COVID-19 Community Mobility Reports, accessed 10 November 2020.

図 2.1 平均的な在宅時間の変化（左）と職場への出勤回数の変化（右）

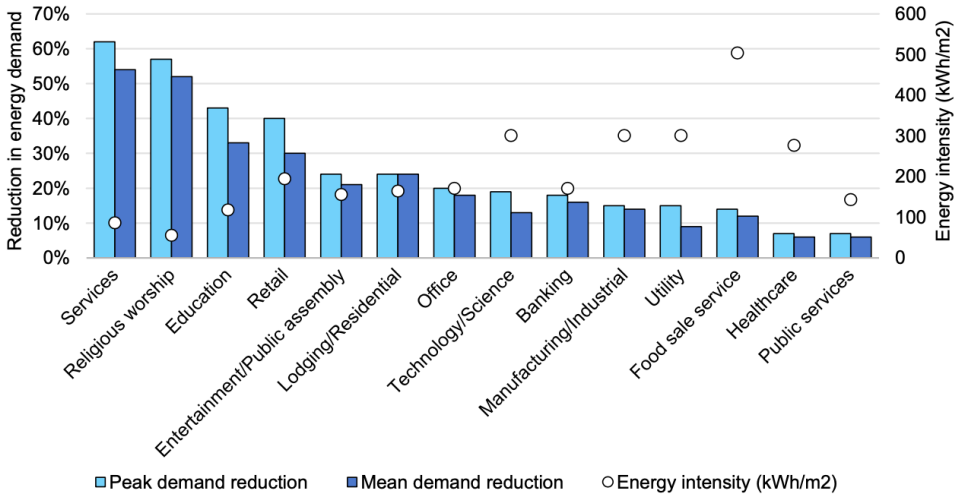
- 家庭部門の電力消費として、米国の特定地域などでは平日の消費が冷房需要の必要性から 20-30%増加している場合がある。インドでは、冷房需要が増加しているが、欧州の場合は、3−4 月期において前年同月比で電力消費が 40%増加している。
- 業務部門の電飾消費は、中国で 1 −2 月の間前年比で 3%減少したものの、現状では回復している。米国では、4-9 月期において前年比 8%減少している。
- 業務部門のエネルギー消費は、事務所において出勤者が少ない場合でも空調が継続的に運用される場合が多く、エネルギー消費として大きな変化が生じていない場合がある。在宅勤務のエネルギー消費減への影響としては、主に通勤の減少によるものである。

Box 2.1 在宅勤務シナリオにおける最終エネルギー消費の変化と CO2 排出



- 在宅勤務により自動車での移動と燃料消費が低減する。一方で、公共交通機関を利用する場合は在宅勤務により家庭のエネルギー消費は増加する。
- 世界的には、5 人に 1 人が在宅勤務を行っており、これが一週間に一回テレワークを実施した場合に、世界の石油消費は旅客需要の 1%を低減させる効果がある。家庭部門のエネルギー消費はあるものの、CO2 排出量として、年間 24 百万トンが削減される。
- 在宅勤務の重要なインプリケーションとして、オフィススペースへの需要減少、そして業務部門のエネルギー需要減少が挙げられる。一方で、在宅勤務を実施する者が都会からより広い敷地面積を求めて都市の外へ移住し、エネルギー消費を押し上げる効果が予見される。
- ビデオ会議の実施は、ジェット燃料需要と長距離輸送に関わる CO2 排出を低減させる。6 時間以上の出張を半減した場合、現状の航空機の効率水準において、年間の飛行回数を 1%低減させるにとどまるが、CO2 排出量を年間で 50 百万トン低減させる効果が期待できる。

Figure 2.2 Reduction in energy demand under stay-at-home orders and average energy intensity (by building type), two US regions



Notes: Reduction in energy demand as compared with expected usage under regular conditions. Services include, e.g., dry cleaners, copy centres, barber shops or repair shops. Food sale service includes, e.g., supermarkets and restaurants.

Sources: Uplight, *The Impact of Quarantine on Non-Residential Utility Customer Energy Use*; EIA, *Commercial Buildings Energy Consumption Survey*.

図 2.2 米国の二地域におけるエネルギー需要の低減

- 米国の二地域におけるスマートメータによると、大型の事業者は影響が微細であると共に、スーパーマーケットや病院での影響も微細であるとの結果を得ている。
- 図が示すとおり、エネルギー原単位の比較的低い業種では、影響が大きく、エネルギー原単位が大きいスーパーや病院等での影響が小さい傾向にある。このため、業務部門全体としての原単位は悪化する傾向にある。

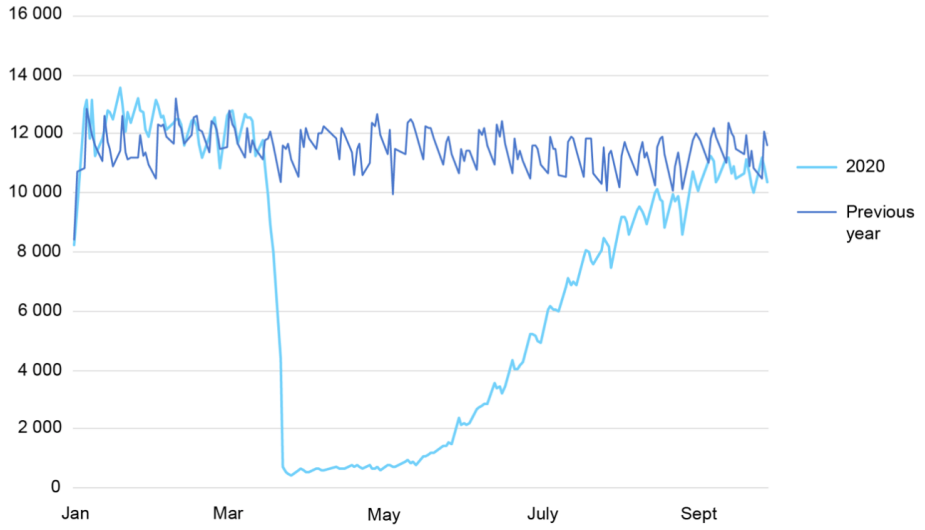
活動と構造の変化

- 都市封鎖のために技術的な省エネの改善ペースが遅れている傾向にある。長期的には、景気低迷により省エネ投資が制約を受ける可能性がある。一方で、景気刺激策として省エネを推進している国と地域では、今後数年の間に技術的な省エネが改善される見通しである。

都市封鎖による業者の省エネ改修、設備設置の遅延

- 健康への配慮を考慮し、住宅等での省エネ改修や設備設置が遅延した。英国におけるスマートメーターの設置は、都市封鎖が実施されている期間において、通常の 12,000 台/日の設置から 1,000 台/日へと大きく低減している。インドでも同様の趨勢が方臆されており、通常の 10,000 台/日の設置から 2000 台/日へと低減している。

Figure 2.3 Daily smart electricity meter installations, United Kingdom



Source: ElectraLink, Open Data.

図 2.3 英国のスマートメーターの設置件数の推移

世界的な新築着工の低迷は、省エネ投資への低迷を示唆

- 景気の低迷により建築物への投資が低迷している。世界の 2019 年からの建築投資は、1.2%増に留まり、これは 2020 年初旬の 3.1%増から大きく低迷している。ドイツでは、建築着工件数が 4.4%減少、カナダでは 7%減少している。
- グリーンな建材市場については、2019 年の年率 11.7%増から、8.6%増へとペースを減退させる(2027 年までの年率)。政策の実施によってこうした傾向が変化する見通しである。

第3章 家庭用機器

Covid-19 による、 家庭用機器の購入と使用に関する短期的な 3 つの見解

- 一つ目は、家庭外から調達していたサービスを家庭内で実現するための調理機器やエンターテインメント機器、および自宅で仕事や勉強をするための IT 機器の購入。
- 二つ目は、ロックダウンによる電化製品の一時的な買い控えとロックダウン後の需要の急増やオンライン販売の増加による埋め合わせ。
- 三つ目は、自宅で過ごす時間の増加に伴い、使用される家電製品の種類、タイミング、頻度の変化と、使用時間の増加による短寿命化および交換品購入の可能性。

表 3.1 Covid-19 危機に誘発される、家庭用電化製品のエネルギー原単位へ影響を与える要因

効果の型	要因	効率への影響
活動/構造	家電製品に使用増加による、エネルギー使用量の増加	悪化
技術	長期的 : 景気後退と失業による、今後 1～2 年の家電製品の交換率の低下	悪化
	長期的：経済危機における、規制当局による計画された最小エネルギー性能基準強化の遅延	悪化
	短期的：自宅で過ごす時間が長くなり家電製品の使用頻度が上がることで短寿命化し、交換が加速	改善
	短期的：在宅時間増加に伴う住宅のエネルギー消費の増加による高効率機器の導入・投資の促進	改善
	家電品のリサイクルスキームを対象とする景気刺激策による、非効率な家電品から最小エネルギー性能基準達成モデルへの交換	改善

活動効果と構造効果

家電製品の使用量が増加し、住宅の床面積あたりのエネルギー使用量の増加につながっている

- ロックダウンにより、住宅のエネルギー使用プロフィールが変化し、平日の 1 時間あたりの需要パターンはロックダウン前の日曜日に類似している。
- 変化が大きいのは、洗濯機と乾燥機であり、ロックダウン後は週末の利用が減少し、平日の利用が増加している。また、外出をしなくなったため EV の充電が減少し、照明やエンターテインメント機器の需要が増加した。

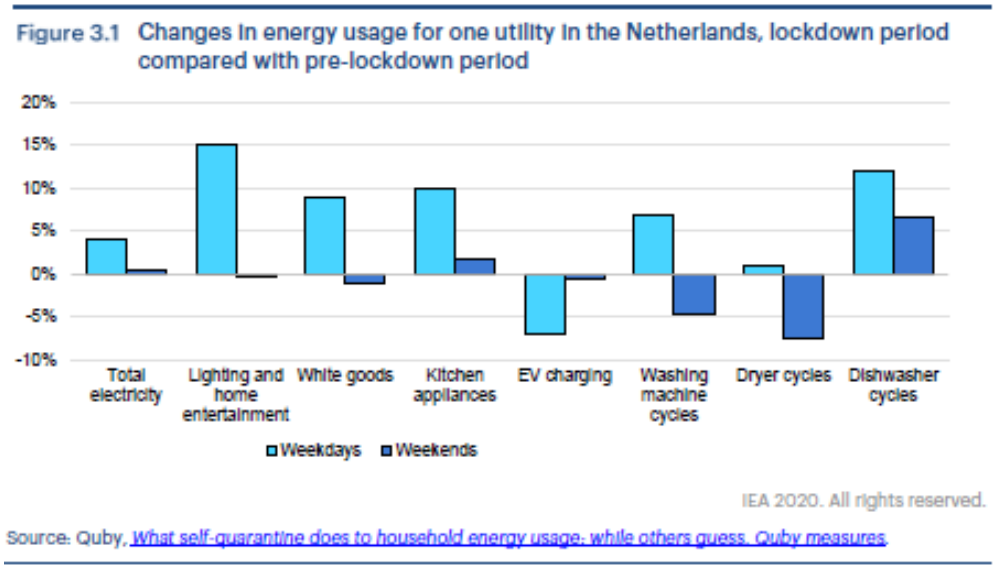


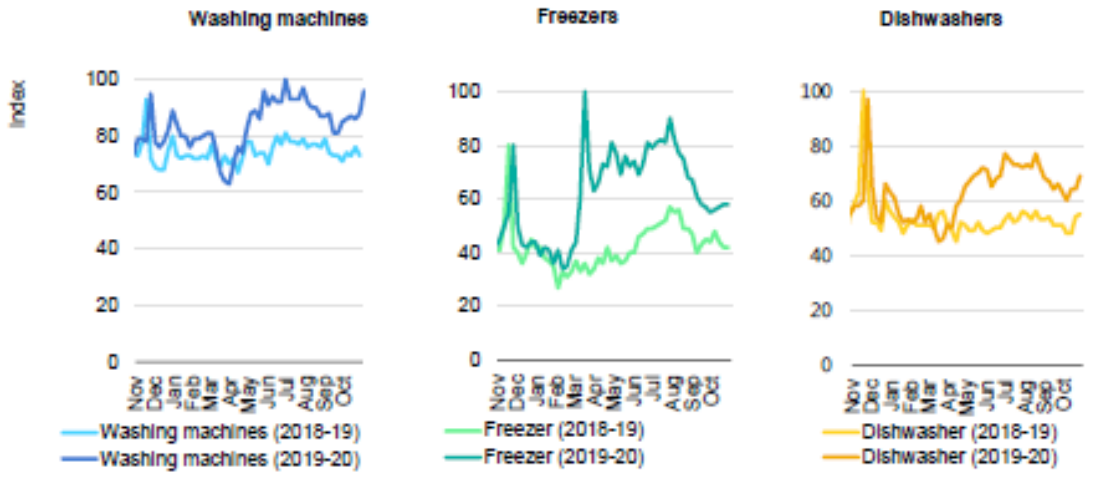
図 3.1 オランダの 1 電力会社圏内におけるエネルギー使用量の変化
（ロックダウン前後）

- デジタル技術の活用は仕事と娯楽の両面ですすんでおり、世界のインターネットトラフィックは 2 月から 4 月中旬にかけて約 40%増加した。ただし、ヨーロッパのネットワークオペレータによれば、データトラフィックが 50%増加したにもかかわらず、電力使用量はほぼ横ばいであり、これはデータ送信とコンピューターのエネルギー効率が 2～3 年毎に倍増しているという潮流によるものである。
- 一部の家庭用電化製品、例えば調理器具は業務用器具よりもエネルギー原単位では優位性があり、英国の調査によれば自宅の調理は 0.5kW に対して、レストランの調理には 1.5kW から 3.3kW が必要になる。しかしながら、このような家庭の電化製品利用によるエネルギー原単位の変化は、全体的な住宅のエネルギー使用量の増加と、建物を開けている限り一定のエネルギーを使用する商業ビルのエネルギー原単位の増加と相まって、建物の床面積あたりのエネルギー消費量を増加させることが見込まれる。

技術的効率の効果

ロックダウンにより、短期的には新しいアプライアンスの購入が促進され、技術的効率が向上する可能性がある

Figure 3.2 Worldwide weekly online shopping search indices for selected whitegoods, 2018-19 and 2019-20



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Worldwide searches within the Shopping category for the following topics: washing machine, freezer, dishwasher. Figures are indexed to the highest value. "Worldwide" refers to all countries where the Google search engine is available, and therefore excludes China.

Source: Google Trends.

図 3.2 生活家電のオンラインショッピング検索数
(2018-2019 年を 2019-2020 年と比較)

- オンラインショッピングの検索結果は、食糧不足を防ぐための冷凍庫など、ロックダウン対応に不可欠と見なされた家電製品の需要が当初増加していることを示している。
- ソーダマシンやパン焼き機などの小型家電製品の売上も、特に米国では、人々が食料品の買い物に費やす時間を制限し、DIY レジャー活動を増やすことを求めたため、ロックダウン中に増加した。
- 世界中で家電製品、IT 機器の購入がすすみ、多くの市場でエネルギー性能基準およびラベリングプログラムが導入されていることも併せると、家庭用電化製品の在庫はより効率的となっている可能性がある。

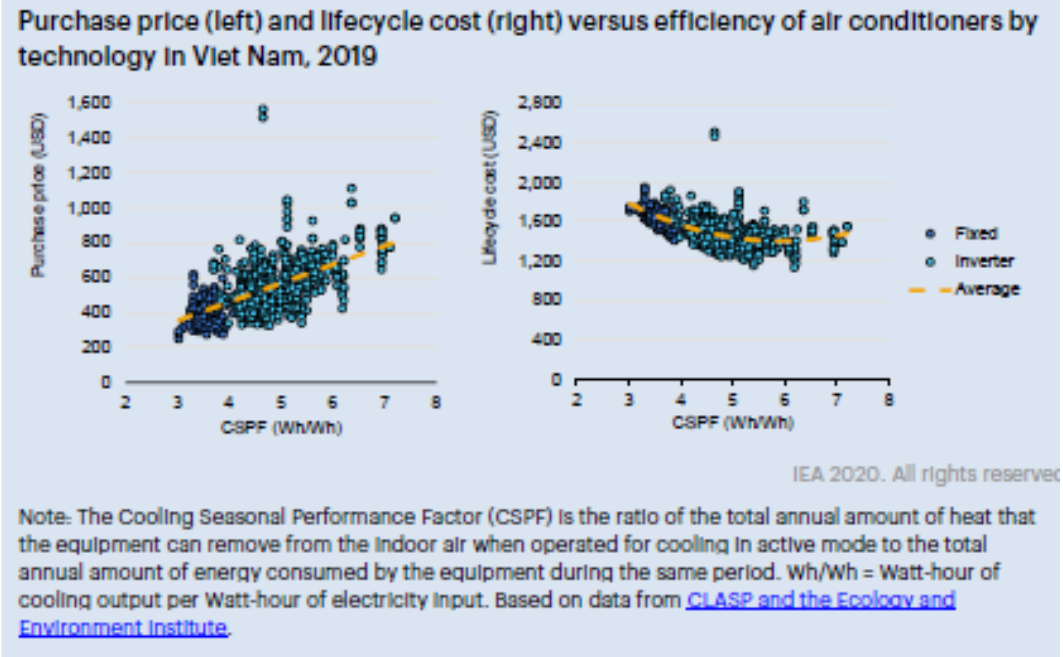
家庭用電化製品の効率改善のペースは、景気の動向に依存する

先進国と発展途上国いずれにおいても、主に 2 つの理由から景気後退の中であっても電気製品の交換はエネルギー効率が改善する

- 一つ目は、性能基準やラベリングなどの規制が多くの国で継続的に強化されており、新しい家庭用電化製品は一般的に交換前の製品よりもはるかに効率的である。
- 二つ目は、効率的な家庭用電化製品が必ずしも高価ではなく、例えば効率的なエアコンは多くの東南アジア諸国においてすべての価格帯にみられる。このため、エネルギー料金が高くなるにもかかわらず、消費者が安い低効率の製品を買うリスクは軽減さ

Box 3.1 効率の高い家庭用電化製品は必ずしも高価ではない：
東南アジアのエビデンス

- エネルギー効率の高い電化製品はランニングコストが安いためライフサイクルコストが安価になる傾向がある。しかし、ライフサイクルコストの計算が困難なために、製品の購入価格のみに基づき購入してしまうというエネルギー効率に関する既知の障壁がある。
- 家庭用電化製品のエネルギー性能表示ラベルは、消費者へエネルギー使用に関する情報を提供し、障壁の克服に役立つ。
- ライフサイクルコストの計算がなされない場合でも、ベトナムでは CSPF (冷房期間エネルギー消費効率) が 5 以上の高効率エアコンの平均購入価格が 530.8 米ドルを大幅に下回るモデルがいくつかあり、購入価格のみを考慮しても安価になる。



図：ベトナムにおけるエアコンの購入価格 (左) とライフサイクルコスト (右) 対技術レベル (CSPF) 、2019 年

れる。

- 経済危機が深刻化した場合は、今後 1～2 年で家庭用電化製品の交換率が低下する可能性がある。また、エネルギー価格の低迷が続いた場合も、エネルギー効率を高める行動を妨げる可能性がある。
- 例えば、家庭用電化製品の購入を直接奨励する政策 (リサイクルプログラムなど) や低所得世帯への補助金などは、家庭用電化製品の交換を促し、エネルギー効率を改善させる効果がある。しかしながら、これまでに家庭用電化製品の効率を対象とする景気

刺激策はまだ発表されていない。

第4章 産業

- ロックダウンにより、生産と消費需要が減少したため、2020 年にはすべての産業部門でエネルギー需要が大幅に減少すると予想される。
- 2008-09 年の大規模な金融危機の際は、政府の景気刺激策はエネルギー原単位の高い産業へより多く恩恵をもたらすものであったが、Covid-19 危機でも景気刺激策の制度設計に依るものの、同様な結果となる可能性がある。

表 4.1 Covid-19 危機に誘発される、産業のエネルギー原単位へ影響を与える要因

効果の型	要因	効率への影響
活動/構造	ほとんどの産業においてエネルギー需要が減少するが、エネルギー原単位の小さい産業で減少幅が大きい。	悪化
技術	景気の後退により、エネルギー効率の高い設備への投資が減少する。	悪化
	エネルギー価格の低迷が継続すると、エネルギー効率の向上に対する投資の回収期間が長くなる。	悪化
	産業支援として実施される効率を対象としない政府の景気刺激策や規制緩和策により、老朽化した施設の使用が継続し、エネルギー効率の改善が遅れる。	悪化
	エネルギーサービス会社が、収益の悪化によりデフォルトに陥る危機がある。	悪化
	需要の低迷のため施設の稼働率が下がり、エネルギー原単位の悪化につながる。	悪化
	政府による景気刺激の財政支出が、エネルギー効率の改善に直結している、または具体的な目標を掲げている。	改善
	需要の低下により、老朽化した施設が一次停止または廃止される。	改善
	経済危機は競争を激化させ、コスト削減の方策として、企業はエネルギー効率の改善を迫られることになる。	改善

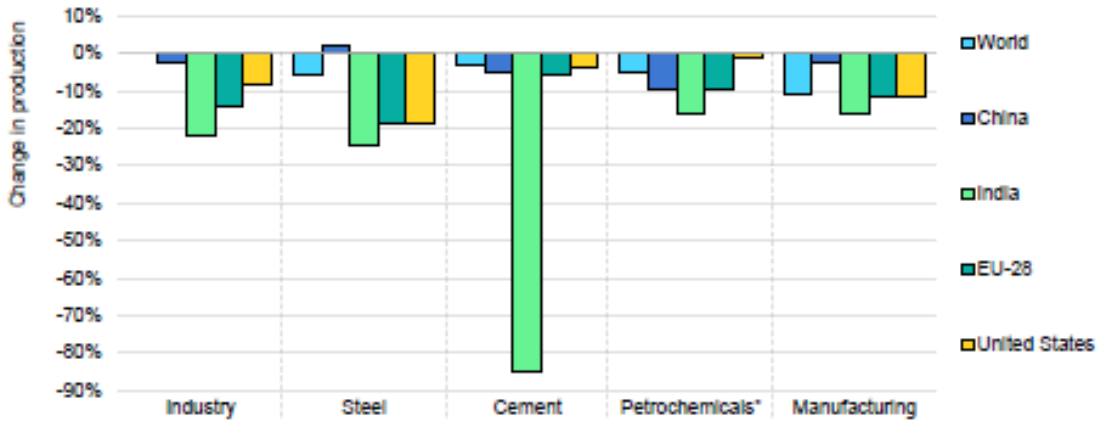
活動効果と構造効果

多くの産業分野における活動が低下し、エネルギー使用量が減少した

- 世界第 2 位のセメント生産国であるインドでは、セメント施設の封鎖と建設の減少に

より、インドおよびセメント輸出国の両方で、セメント生産は 2019 年の同時期よりも約 85%減少した。 セメントの主要な最終用途である建物の新築および改修への投資は、2020 年に世界で約 10%減少すると予想されている。

Figure 4.1 Change in tonnage production, selected sectors, first half of 2020 vs. first half of 2019



IEA 2020. All rights reserved.

Note: Ethylene is taken as a proxy for petrochemicals. When no reported data are available, estimates have been made.

Sources: MoSPI, IIP; St. Louis Fed, Industrial Production; Trading Economics, Euro Area Industrial Production, China Industrial Production; World Steel Association, Statistics; Global Cement, Chinese cement output falls by 4.8% to 1Bnt so far in 2020, Indian cement production falls by 85% in first half of 2020; St Louis Fed, Cement and Concrete Product; IFC, The Impact of COVID-19 on the Cement Industry; Platts, Global Polyolefins Outlook 2020; Investing, Chinese Manufacturing PMI, Eurozone Manufacturing PMI; Quandl, PMI Composite Index; FXEmpire, India Manufacturing PMI, United States Manufacturing PMI, accessed 27 August 2020.

図 4.1 一部の産業部門における生産量の変化（2020 年上半期 / 2019 年上半期）

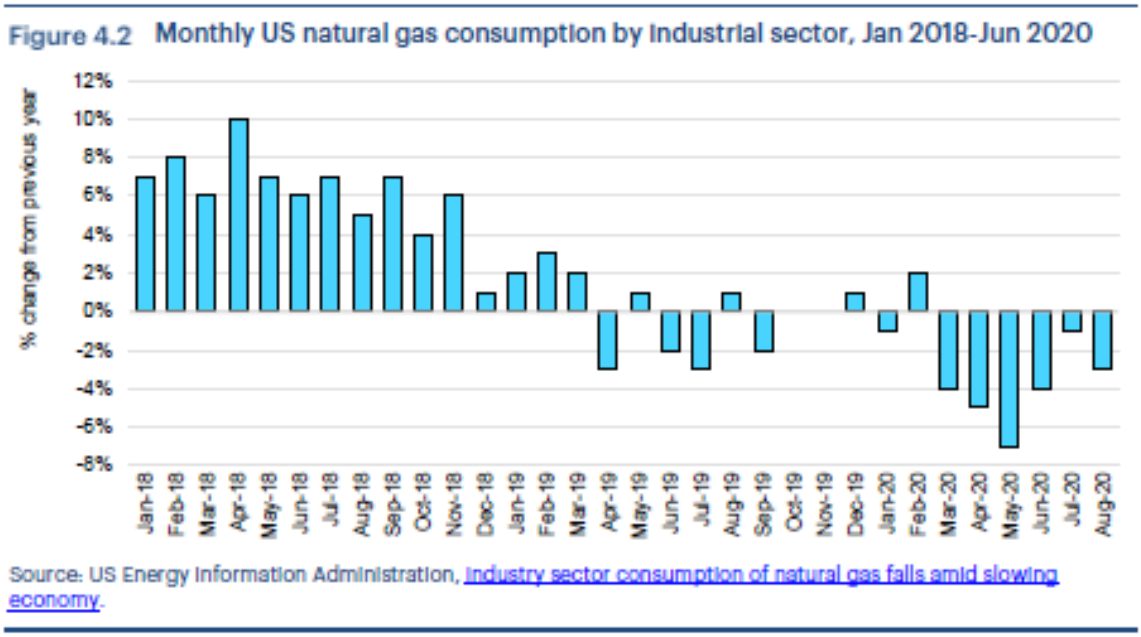


図 4.2 米国の産業部門による月間天然ガス消費量（2018 年 1 月から 2020 年 6 月）

- 鉱工業生産の低下の影響は、エネルギー使用にも波及しており、米国では、4 月の産業部門の電力使用量が前年比で 9%減少、2020 年 5 月の産業部門の天然ガス使用量が 8%減少となり、2009 年の世界的な不況以来最大の減少となった。
- パンデミック前は産業部門のガス使用量は横ばいであったが (2019 年にはわずか 0.1%の増加) 、パンデミックにより需要は大幅に減少した。米国エネルギー情報局は、2020 年には産業部門のガスの使用量が 4.4%減少すると予測している。

景気刺激策としての財政支出はすでに鉄鋼など川上産業の持ち直しを支援している

- 一部の国では、産業を対象とした政府の経済刺激策がすでに鉱工業生産を復活させている。中国では、需要を刺激するために、2020 年 1 月から 6 月の間に 4,638km の鉄道および都市鉄道のインフラストラクチャ (147 億米ドル相当) が承認され、これらのプロジェクトだけでも、2020 年上半期に、中国の鉄鋼生産の約 5%にあたる 2,380 万トンの鉄鋼を消費すると予想されている。

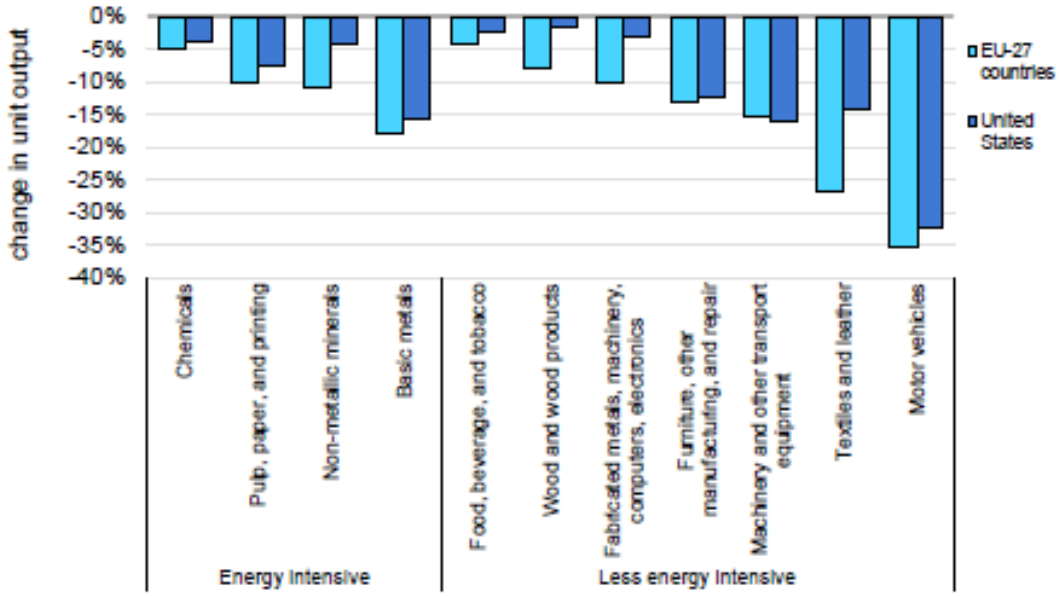
Covid-19 危機により、産業生産におけるエネルギー原単位を増加させる可能性がある

- エネルギーの観点から、エネルギー原単位の低い産業サブセクター (繊維、機械、設備など) の生産量が、エネルギー原単位の高いサブセクター (鉄鋼、セメントなど) の生産量よりも減少した場合、全体として産業のエネルギー原単位は、今後数年間で増加するだろう。これは、産業エネルギー原単位に対する「構造的影響」と呼ばれる。
- 米国とヨーロッパでは、現在の危機による個人消費の減少が、たとえば、エネルギー

集約型の化学製品の製造よりも、自動車などのエネルギー集約型の耐久消費財の製造に大きな打撃を与えている。しかしながら、世界の産業生産が 2020 年に産業生産のシェアとしてよりエネルギー集約的な製造業にシフトしたかどうかを見極めるのは時期尚早である。

- 景気後退から経済が再建するにつれ、以前の経済危機後の経験は、政府の刺激策の設計が、国の経済発展のレベルと組み合わせて、産業のエネルギー原単位を形成する上で重要な役割を果たす可能性があることを示している。発展途上経済は、建物や公共インフラの建設を増やすことによって刺激を追求する可能性が高く、それはエネルギー集約的な基礎金属とセメント生産からのより高い生産につながる。対照的に、先進国経済における製造業への刺激策は、エネルギー原単位の低い特殊化学品や自動車生産などのより価値の高いサブセクター向けが多くなる。
- 産業への財政支援をエネルギー効率の向上に結び付けることにより、政府は、現在の危機に対応した刺激策が展開される際に、産業のエネルギー原単位のリバウンドを減らすのに役立つ可能性がある。

Figure 4.3 Industrial sub-sector output change, first half of 2020 vs. first half of 2019, EU-27 countries and United States



Source: Eurostat, Production in industry (sts_inpr_m), accessed 25 October 2020. FRED, Industrial Production- Total Index, accessed 26 October 2020.

図 4.3 EU27 ヶ国および米国における産業サブセクター毎の生産量の変化
(2020 年上半期 / 2019 年上半期)

技術的効率の効果

- 現状投資は弱い動きで、生産レベルの回復に注意が向けられており、エネルギー効率

への投資は、エネルギー価格が低いため投資回収にさらなる時間を要し、優先順位が下がるリスクがある。

- エネルギー効率は、マーケティングや生産の最適化などのコアビジネス活動と投資をめぐって競合するため、エネルギー効率のメリットを測定することが不可欠となる。景気刺激策をエネルギー効率への投資に結び付ける政策措置がなければ、エネルギー効率の向上が遅れるリスクがある。

高効率モーターとモーターシステムの市場は失速する恐れがある

- モーターシステムのエネルギー効率を改善することは、産業技術効率を高めるための重要な方法であり、新たな規制を設けることで、産業用モーターのエネルギー性能が向上する。
- 産業用モーターの投資回収期間は通常 3～4 年と短く、Covid-19 危機にあってもその期間の延長は 10%程度に抑えられたが、多くの業界でコアビジネス、コストの削減および資金の流動性の維持を重視する傾向があるため、現在の危機はモーターのアップグレードの可能性を低下させている。これは、エネルギー使用量が運用コストにそれほど大きく寄与しない、エネルギー原単位の低い業界に特に当てはまる。それにもかかわらず、エネルギー原単位の低い業界で使用されている電気モーターおよび駆動システムが消費する電気は、産業部門のエネルギー節約ポテンシャルのうち最大のシェア (70%) を占めている。

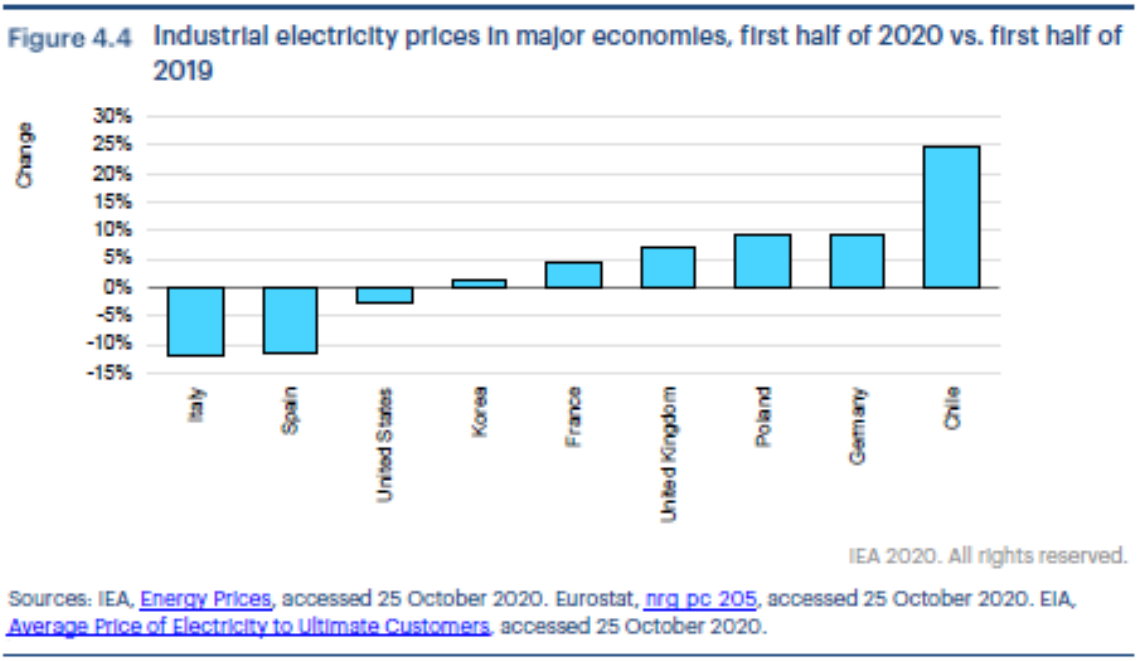
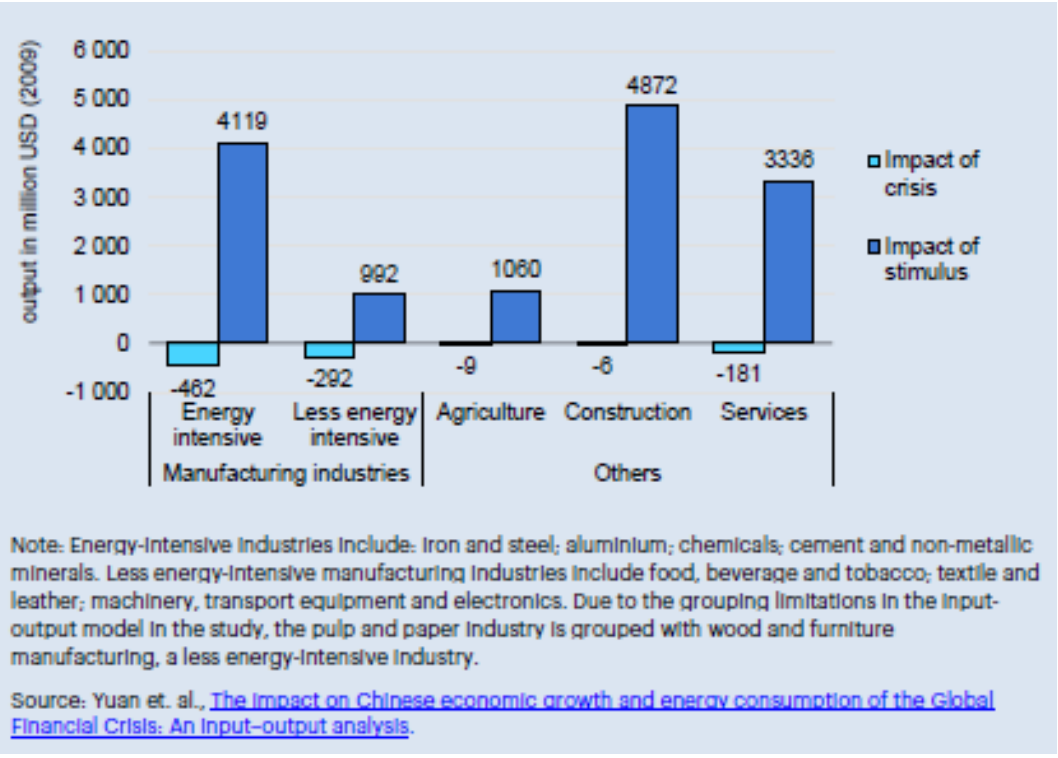


図 4.4 主要国の産業用電気料金の変化（2020 年上半期 / 2019 年上半期化）

- これまでのところ、2021 年に開始された産業効率プロジェクトに資金を割り当てているデンマークとフランスの注目すべき例外を除いて、産業向けの景気刺激策パッケージにはエネルギー効率対策が含まれているものはほとんどない。

Box 4.1 2008 年から 2009 年の金融危機後の産業構造とエネルギー需要に対する政府の刺激策の影響



Note: Energy-intensive industries include: iron and steel; aluminium; chemicals; cement and non-metallic minerals. Less energy-intensive manufacturing industries include food, beverage and tobacco; textile and leather; machinery, transport equipment and electronics. Due to the grouping limitations in the input-output model in the study, the pulp and paper industry is grouped with wood and furniture manufacturing, a less energy-intensive industry.

Source: Yuan et. al., The Impact on Chinese economic growth and energy consumption of the Global Financial Crisis: An Input–output analysis.

図 中国の 2009 年の景気刺激策が製造業の構造に与えた影響に関する推定

- 中国の 4 兆元 (2009 年には 5,860 億米ドル) もの刺激策について分析したところ、GDP に 4.5%の影響があり、エネルギー消費にはわずか 1.8%の影響に留まった。刺激策は、公共インフラ、住宅、医療、教育、研究を対象とし、結果として生じた建設の増加により、繊維、機械、食品および飲料などのエネルギー原単位の低い産業よりも、金属やセメントなどエネルギー集約型製造業により高い生産をもたらした。その結果、「製造業」内ではよりエネルギー集約的な構造になったものの、建設とサービスを考慮した経済全体としては、エネルギー集約的ではなかった。
- 産業構造の進化は景気刺激策によってではなく、エネルギー原単位が低く付加価値の高い産業の成長をサポートするイノベーションや貿易政策など、各国の経済的および社会的開発戦略に依存する。

Box 4.1 2008 年から 2009 年の金融危機後の産業構造とエネルギー需要に対する政府の刺激策の影響 (続き)

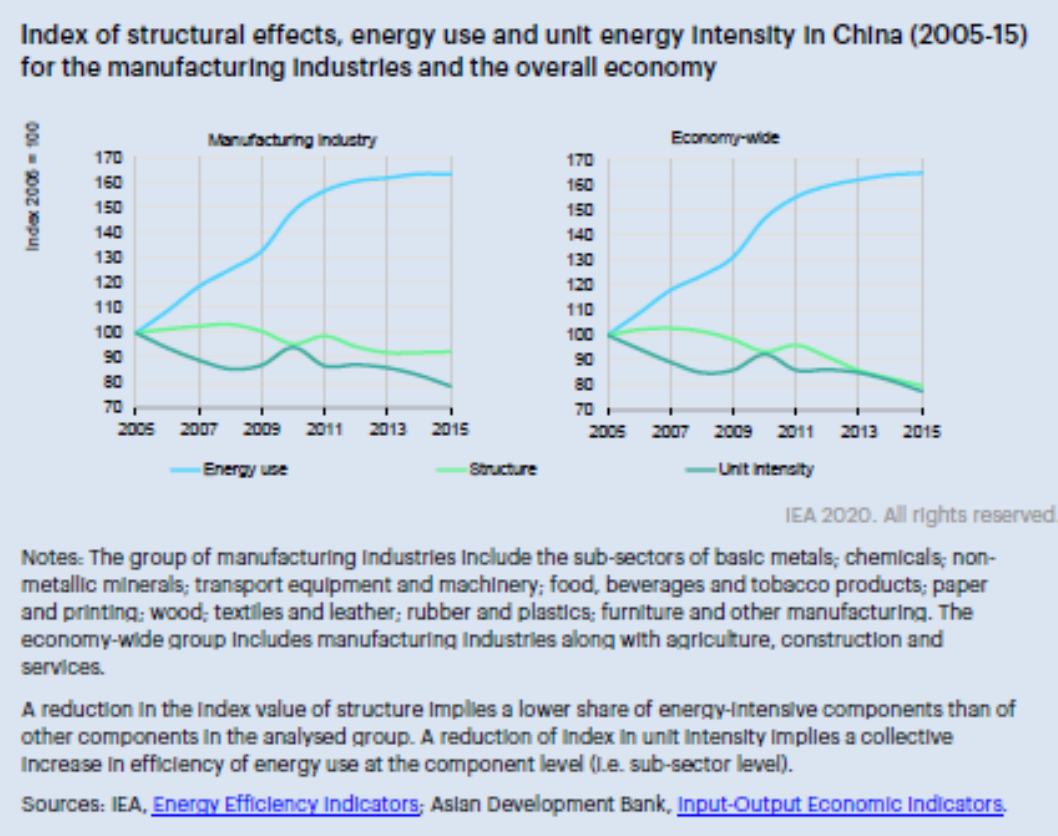


図 製造業および経済全体に対する中国の構造的影響、エネルギー使用およびエネルギー原単位の指標 (2005 年から 2015 年)

第5章 都市交通

- 2020 年には都市交通について、以下の趨勢が生じている。
- 通勤需要を中心とした輸送需要の低下
- 公共交通機関から乗用車・歩行・自転車等へのシフトと E コマースの進展による輸送需要の増加
- EV の販売増加によるストック効率の改善

表 5.1 パンデミックにより都市交通のエネルギー原単位へ影響を与える要因

効果	要因	原単位への影響
活動/構造	公共交通機関から乗用車へのシフト	悪化
	公共交通機関から歩行や自転車等へのシフト	改善
技術	景気低迷による乗用車販売の低迷、安価で燃費の相対的に悪い自動車の購入	悪化
	低燃料価格による燃費の悪い自動車の購入	悪化
	政府景気刺激策としての低燃費自動車の購入、高効率輸送機関への投資	改善

- 運輸部門は多くの政府景気刺激策として対象となっているが、その多くが EV の導入とインフラ形成を支援するものであり、そのほかの高効率な輸送モードを支援するものではない。

活動と構造の変化

通勤を中心とした都市交通の急激な減少

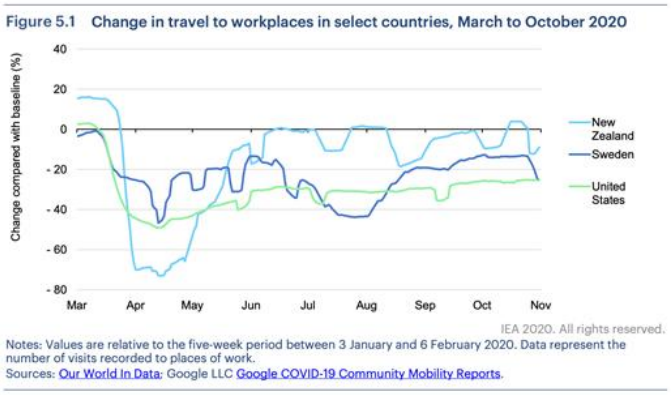


図 5.1 職場への移動に関わる変化(2020 年 3 月から 10 月)

- 都市封鎖や在宅勤務の奨励に伴い、都市交通需要は 3-4 月期に大きく減少している。スマートフォンのデータによると、10 月末の段階でもベースラインを下回る水準にある。
- カナダやメキシコ、米国において職場への移動はベースライン比 25%減となっており、多くの欧州の国において 15-30％低い水準にある。ニュージーランドのように COVID-19 の影響が比較的小さい国での通勤需要は大きく変化していない。
- イスラエルなど、9 月 18 日に開始した 3 週間の都市封鎖により乗用車での移動距離はベースラインの半分になっている。

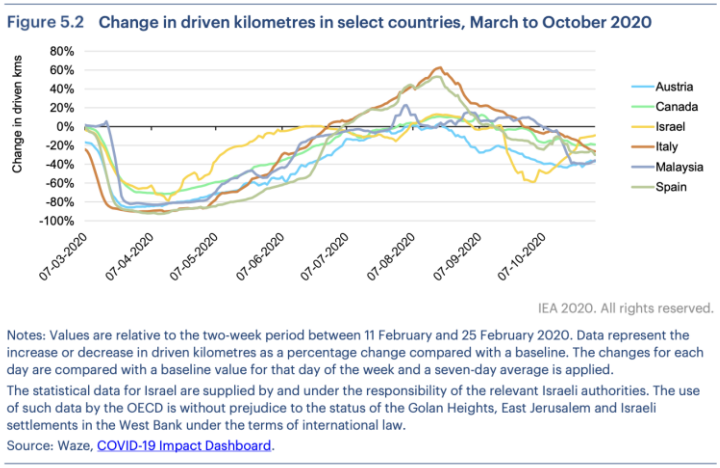


図 5.2 乗用車での移動距離の変化(2020 年 3 月から 10 月)

通勤を中心とした都市交通の急激な減少

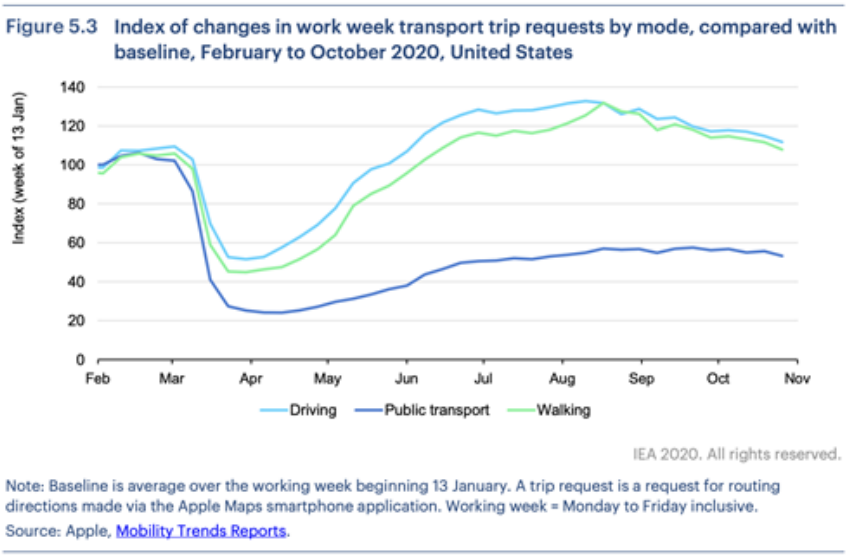


図 5.3 米国モード別の平日における輸送回数 (2020 年 2 月から 10 月)

- 公共交通機関での移動需要は乗用車や歩行等と比較して大幅に減少している。米国のデータによると、3-4 が月において大幅な減少が起きている。一方で、5 月の中旬には乗用車や歩行需要が回復しておりパンデミック以前の水準を超過しているものの、公共交通機関はベースラインよりも低い水準にある。

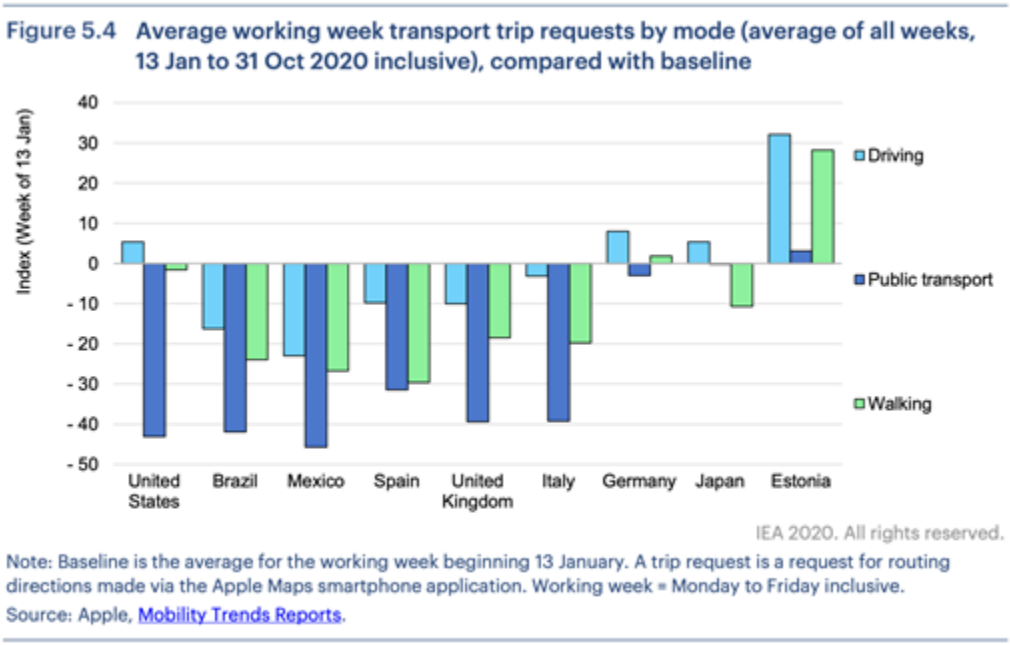


図 5.4 国別、モード別の平日における輸送回数指標　(2020 年 1 月 13 日から 10 月 31 日)

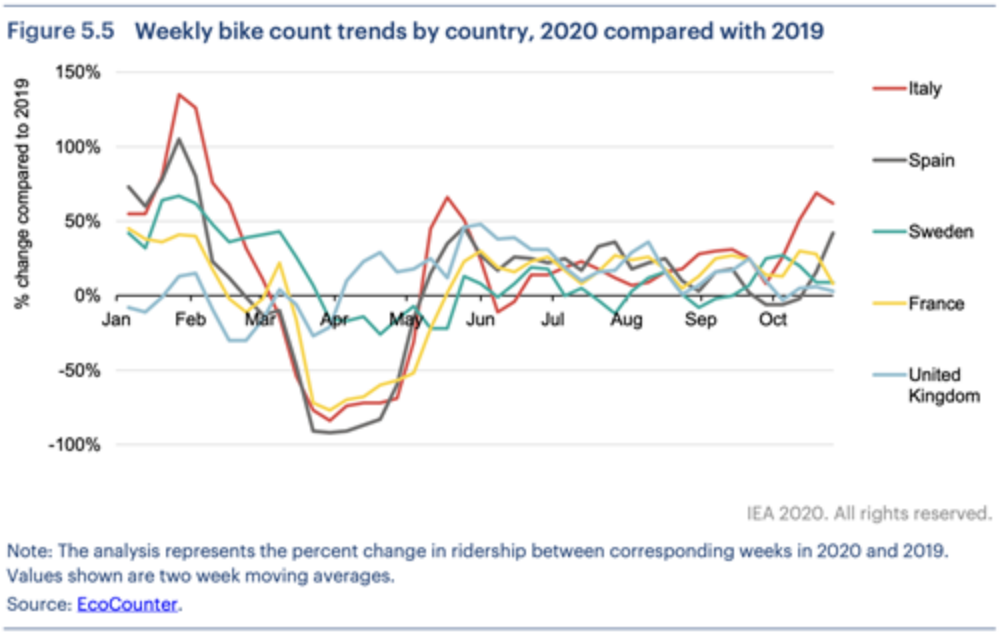


図 5.5　週別のバイク利用の変化　(2020 年と 2019 年の比較)

- ドイツ、日本、米国では乗用車での移動はパンデミック以前の水準を上回る一方で、公共交通機関の需要は減少している。バンコクや北京、上海での渋滞は、移動制限の緩和とともにパンデミック以前の状況に戻っている。
- 北米と欧州の国々においてバイク利用が拡大している。ジャカルタでは、バイク販売が1000%と言った拡大を呈しており、フランスやイタリア、英国では 9 月時点で前年同月比 15-25%増となっている。
- 個人での移動へのシフトは自転車や歩行の場合もあれば、乗用車の場合もあり、実施される政策によって異なる。多くの都市において、歩行や自転車利用を奨励している場合もある。

技術的な効率の影響
景気低迷とエネルギー価格の低迷

- 活動の低迷が輸送部門のエネルギー需要に最大の影響を与えているが、景気低迷と燃料価格の低下、そして政策が都市交通に影響を与える。
- 2020 年の自動車の置き換え率は低迷しており、ストック効率を悪化させている。
- 消費者へのサーベイでは、米国と欧州において 2020 年の新車販売は、25%低い水準にある。中国では、新車を購入する計画があるようだが、70%の新車購入者が若年層による一台目の購入であり、低燃費車への購買力は大きくない。
- 日本の場合は、新車と中古車の登録台数が 2020 年の前半に低迷していたが、後半には回復するものの、2019 年の 84%の水準となっている。
- 中国市場等での販売拡大に向けた兆候は見受けられるものの、世界の自動車販売台数は 2020 年において前年比 16%減との見通しである。

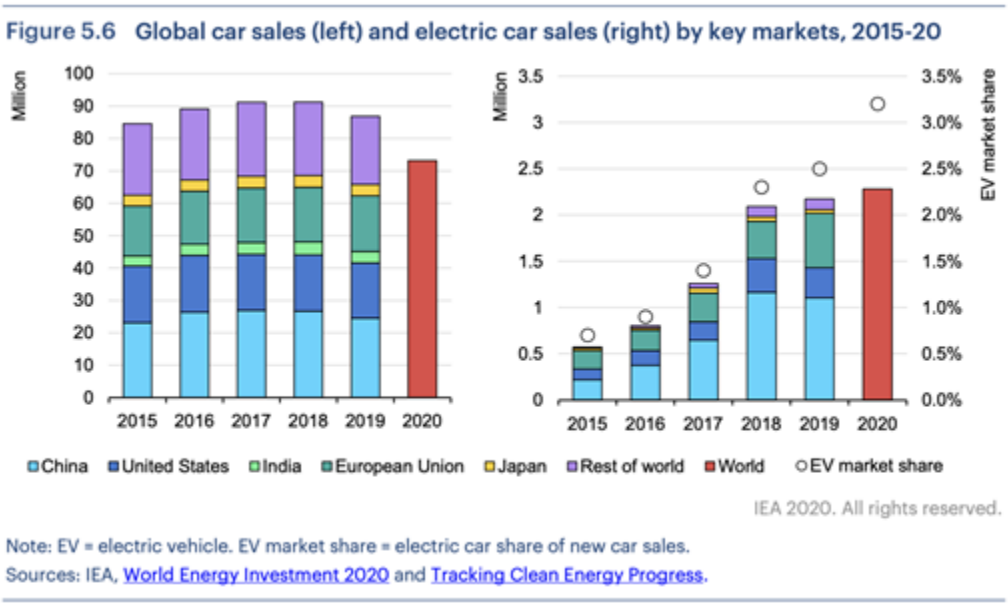


図 5.6 乗用車と EV の販売台数の推移（2015 年から 2020 年）

- 2020 年の新車販売台数のうち、電気自動車の販売シェアが増加する見通しである。世界の電気自動車販売台数は 2020 年において、2.3 百万台となり、自動車販売台数に占める割合では 2019 年の 2.5%から 3.2%へと増加する。これは、ストック台数として電気自動車は 1 千万台に上り、総ストックの 1%を占める。
- 石油製品価格が世界的に低迷していることから、電気自動車の相対的な運用費用の競争力が低迷している。一方で、G20 加盟国がの合計で 120 億ドルが EV 購入に関わる助成措置に付与されており、販売台数の拡大に寄与する。

第6章 長距離輸送

都市交通と同様に、Covid-19 パンデミックは長距離輸送を劇的に抑制し、活動的、構造的および技術的効率効果が相まってエネルギー原単位へ影響を及ぼした。

表 6.1 Covid-19 危機に誘発される、長距離輸送のエネルギー原単位へ影響を与える要因

	要因	効率への影響
活動/構造	航空および鉄道輸送における乗客率/搭乗率の減少により、乗客一人あたりのエネルギー使用量が増加する。	**悪化**
	旅客輸送におけるモーダルシフト：航空から自動車へ	**悪化**
	旅客輸送におけるモーダルシフト：航空から鉄道へ	**改善**
	貨物航空におけるモーダルシフト：航空から海運、そして大陸間列車へ	**悪化**
技術	旅客輸送より貨物輸送に利用される航空便の割合が高い	**悪化**
	航空機メーカおよび自動車メーカへの景気刺激策はエネルギー効率の改善と関連がなく、効率の悪い輸送の増加につながる。	**悪化**
	燃料価格の低迷が続くと、効率の悪い車両や燃料の購入を招く。	**悪化**
	政府の景気刺激策は、より効率的な車両と都市間輸送方式を対象とする。	**改善**
	遠距離旅行の需要が低下し、効率が最も低い航空機、列車、船が退役となる。	**改善**

- 貨物輸送は、ロックダウン中であっても、消費者が輸送を必要とする商品やサービスを購入し続けているため、旅客輸送ほど深刻な影響を受けていない。しかし、パンデミックによる需要の減少は、燃料、原材料、製品の長距離輸送に使用される貨物輸送には大きな影響を及ぼした。

航空輸送および鉄道輸送

活動効果と構造効果

飛行機利用の旅行や鉄道旅行の激減により、長距離輸送におけるモーダルシフトが起こる可能性がある

- Covid-19 危機により、航空貨物と航空旅客は前例のないほど減少した。旅行制限さなかの 4 月は、2019 年 4 月と比較して世界の航空貨物需要は 65%から 75%減少し、国

際航空旅客需要は 98%減少した。 航空便はその後徐々に再開されているものの、9 月の時点で 2019 年のレベルの約 45%にとどまっている。

- 11 月中旬の時点で、国際民間航空機関は 2020 年の航空旅客輸送量は 2019 年より 60%減と予想している。最大の低下はアジア太平洋地域であり、ヨーロッパがそれに続く。

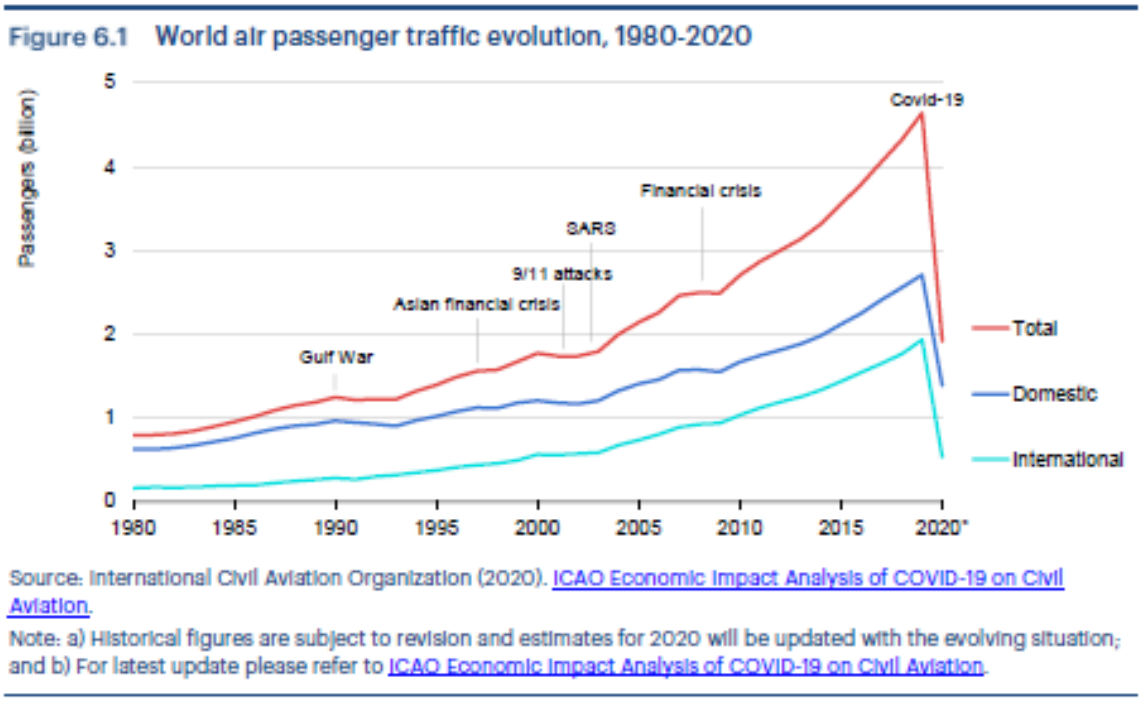


図 6.1 世界の航空便旅客数の推移（1980 年から 2020 年）

- 国際鉄道連合のシナリオによれば、2020 年の世界の旅客鉄道需要は 2019 年と比較して最大 30%減少すると予想される (2020 年 7 月現在) 。
- 鉄道は航空機の移動よりも乗客 1 人あたりのエネルギー効率が少なくとも平均 12 倍高い。したがって、航空機から鉄道へのシフトは、エネルギーの使用量と排出量を大幅に削減する。IEA の以前の分析において、航空便の約 14%が競争力のある高速鉄道に移行できることがすでに示されていた。
- フランス政府は、2020 年 5 月にエールフランスへの救済は、鉄道で実行可能な代替手段 (2 時間 30 分未満の旅行) がある場合、同区間の短距離国内線の提供を停止することを条件とすることを発表した。国内線を高速鉄道へシフトする可能性が高い中国では、2020 年前半に鉄道への景気刺激策が発表され、すでに鉄鋼需要を押し上げている。
- 他の国では、国内線の少なくとも一部が自動車旅行に取って代わられる可能性がある。5 月のある米国の調査によれば、回答者の約 60%が車での移動を増やすことを意図しており (飛行機で約 35%) 、同等の 2018 年の調査の 33% (飛行機で 60%) から増加している。ヨーロッパの同様の調査結果は、車が 50%、飛行機 30%、列車 10%である。

- エネルギー原単位は、航空から鉄道への移行によって大幅に減少し、航空から自動車への移行ではほとんど変化なし、鉄道から自動車への移行では増加する可能性がある。

旅行の制限と乗客数の制限により、航空旅客便と旅客鉄道の燃費が悪くなる

- 国際航空運送協会は、平均搭乗率が 2019 年の 83%から 2020 年には 63%に低下すると予想している。航空機 1 機あたりの乗客数が制限され、乗客 1 人あたりの燃料消費量が増加している。
- 鉄道における乗客数制限は、フランス、イタリア等の列車で一時的に導入され、乗客 1 人あたりのエネルギー使用量が増加したが、ほとんどの鉄道事業者は、現状座席制限を設けていない。その代わりに、可能な場合は乗客間のスペースを最大化するための対策を導入し、換気と清掃の手順を改善している。中国など一部の国では鉄道の乗車率が回復している一方で、他の国では乗車率の低下が継続している。

技術的効率の効果

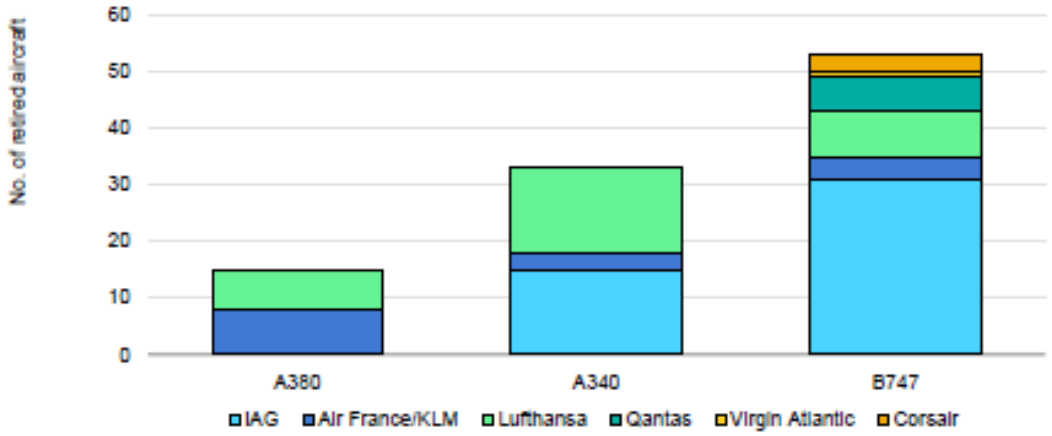
航空輸送における貨物便シェアの増加は、航空輸送の技術的効率に影響を及ぼしている

- 2020 年 6 月の世界の航空貨物需要は 2019 年 6 月と比較して 18%減少し、需要が 28%減少した 4 月の低迷から回復した。これは、Covid-19 の対応に必要な商品の迅速な輸送において、航空貨物が引き続き重要な役割を果たしているためである。
- 貨物機は旅客機よりも古く、効率が悪い傾向があるため、貨物便のシェア増加はエネルギー効率へ悪影響を及ぼしている。
- 2020 年 4 月には旅客機の貨物のみの運航が急増したが、旅客機から改造された貨物機は、通常の貨物機に比べて貨物容量が限られているため、燃料効率が低くなる。

非効率的な大型旅客機の早期退役はエネルギー効率にとって希望の兆しとなるのか？

- 大型旅客機のうち、エアバス A340-600 のほぼ半分、エアバス A380 の約 30%、ボーイング 747 の 70%が退役または長期保管される。2020 年 7 月、ボーイングは B747 の生産を 2022 年までに終了することを発表し、エアバスは 9 月に最後の A380 の初期組み立てを完了した。さまざまな航空会社が、古くて効率の悪い航空機の退役を発表した。合計で 550 機以上の航空機について、再び飛行する見込みが低くなっている。しかしながら、退役発表されたものの一部には、退役がその後延期されたものもある。

Figure 6.2 Number of retired four-engine aircraft (scrapped or long term storage) by model and airline since March 2020



IEA 2020. All rights reserved.

Source: Analysis based on data by Planespotters.net.

図 6.2 スクラップまたは長期保管された 4 発エンジン搭載の航空機数
(2020 年 3 月以降)

- 航空会社は、燃料の低価格が続いており、需要の回復に数年を要することからより効率的な飛行機の発注を延期またはキャンセルしている。一方で、航空機メーカーは、2020 年以降の増産計画を転換している。
- 深刻な財政難を抱える航空会社は燃料コストの削減を迫られることになった。例えばより効率的なボーイング 787 とエアバス A350 は、2019 年のわずか 4 分の 1 と比較して、2020 年の第 2 四半期の長距離便のほぼ半分を占めている。これはより効率的なタイプの航空機が将来の計画において役割を果たし続けることを示唆している。

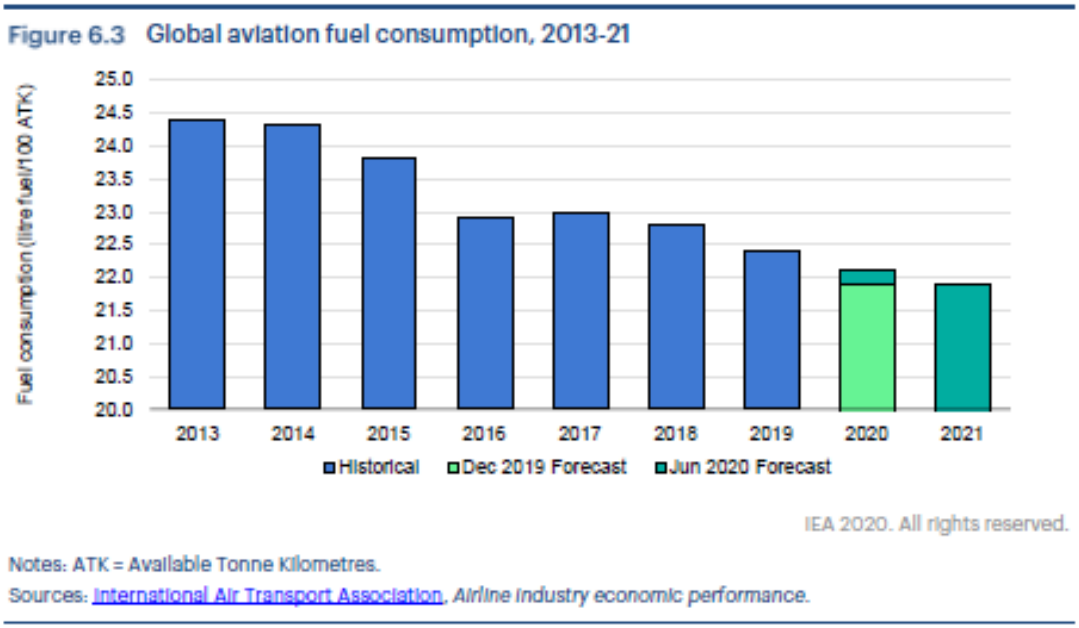


図 6.3 世界の航空燃料使用量の推移 （2013 年から 2021 年）

Box 6.1 大型旅客機の退役は、航空需要が危機前のレベルへ戻った際のエネルギー効率へどう影響するか？

- 影響は非常に軽微である。航空便数が 2019 年のレベルに戻った場合、大型の航空機 (エアバス A380 およびボーイング 747) を、小型でより効率的な航空機に交換されていたして、世界の航空機の平均燃料効率はわずか 0.2%の向上にとどまる。
- しかし、航空機を新たなモデルへ更新すると、通常燃料効率が 15%から 20%改善する。つまり、燃料効率を上げるためには新たな航空機の導入が必要である。

旅客鉄道における非効率なディーゼル列車廃止の加速

- Covid-19 危機によって、特に旅客鉄道におけるディーゼル機関車の廃止は促進されるだろう。ディーゼル機関車の市場は、パンデミック前の予測との比較で 2020 年から 2024 年の間に 24%縮小すると予想されている。
- 貨物鉄道では、特に米国やロシアのように電化ネットワークが非常に少ない市場では、ディーゼル機関車への投資が続くと予想される。

海上輸送

活動効果と構造効果

アジアからヨーロッパへのルートにおける船から鉄道への貨物輸送のシフトは貨物輸送のエネルギー原単位

- 世界のコンテナ貿易量は、2019 年 4 月と比較して 17%減少した 4 月に底を打った後、2020 年上半期 8%減少となった。EU への 2020 年上半期の船舶の到着数は 2019 年上半期と比較して 16.5%減少した。
- 世界の鉄道貨物量は最大 10%減少すると予測されている。ヨーロッパ大陸の貨物鉄道の交通量は 20%減少すると予測されており、2020 年に予測される世界の損失のうち約 3 分の 1 を占めている。
- 貨物輸送活動において世界最大シェアの中国では、鉄道貨物は回復力があり、2020 年上半期までの鉄道貨物輸送量は前年比 3.6%増加となった。この増加は海運から鉄道への輸送手段のシフトの結果である。ヨーロッパとアジアの貿易は 2 つの大陸を結ぶ鉄道利用へとシフトしている。
- 鉄道輸送は、航空輸送よりも海上輸送の代替えとなった可能性が高い。鉄道輸送は海上輸送よりエネルギー原単位が高く、航空輸送よりもエネルギー原単位が低いことから、代替えによりエネルギー原単位がわずかに悪化させる可能性がある。

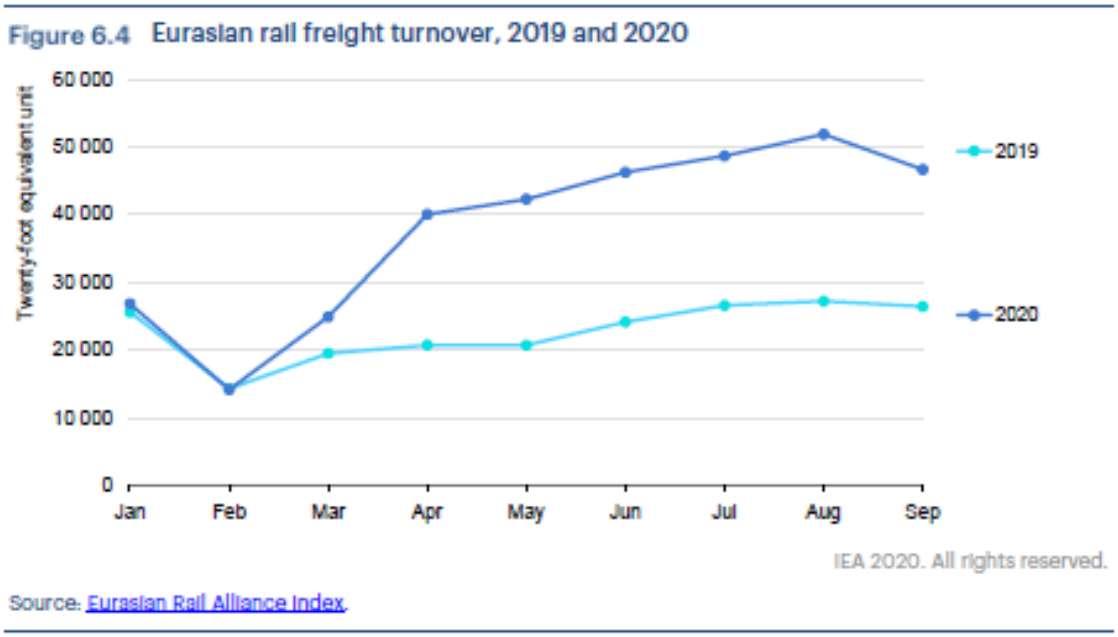


図 6.4 ユーラシア大陸鉄道貨物の売上げ高（2019 年と 2020 年の比較）

- ユーラシアルート大陸鉄道の貨物売上げ高は、2019 年と比較して 3 月は 30%高、8 月は 90%高となった。
- 東から西への鉄道ルートは特に利用が多く、容量の限界に達しつつある。通常は海上輸送よりも 1 週間ほど速いが、混雑のために輸送時間が増加している。

技術的効果

景気後退は船舶燃料価格を押し下げ、エネルギー原単位へ様々な影響を及ぼす

- 2020 年 1 月 1 日の時点で、国際海事機関は、輸送用燃料油の最大硫黄含有量を 3.5%から 0.5%に引き下げた。新しい規制に準拠するためには、超低硫黄の燃料油を使用するか、二酸化硫黄の排出を削減しながらより多くのエネルギーを使用する装置であるスクラバーと組み合わせて高硫黄の燃料油を引き続き使用かの二択となった。高硫黄燃料油と低硫黄燃料油の価格差は、2020 年第 1 四半期の 100 万トンあたり約 160 米ドルから、第 3 四半期には約 50 米ドルへと縮小した。その結果、高硫黄燃料油とスクラバーを使用した場合の回収期間は、350 万米ドル相当のスクラバーで 6 年から 7 年となった。
- 石油価格の低迷が続けば、より多くの海運業者が低硫黄燃料油へ移行する可能性がある一方で、規制がなければ、短期的には LNG、長期的にはバイオ燃料、水素、アンモニアなどの低炭素代替燃料の採用が遅れたり、妨げられたりする可能性がある。また、石油価格の低迷は、燃料消費量を削減するための技術的および運用上の対策を採用する必要性を減らす可能性もある。

旅客船の運航は一時停止するものの、非効率な船の退役または改修がすすみエネルギー効率は向上する

- 客船の運航は 2020 年に 3,200 万人の乗客数を見込んでいたが、3 月中旬以降停止されている。米国での操業は 10 月末まで停止されており、オーストラリア、カナダ、ニュージーランドでも同様の措置が発表されている。
- 航空業界と同様に、クルーズ客船業界でも古い客船の退役がすすんでおり、世界最大のクルーズオペレーターであるカーニバルは、13 隻、容量にして 9%の解体を発表した。別のクルーズオペレーターのロイヤルカリビアンも、古い客船の部品を廃棄または販売している。
- 航空業界と同様に、クルーズ会社は経営難により新造船の購入を遅らせる可能性がある。あるいは、パンデミック中の予期しない停船により、クルーズオペレーターは、将来の運用コストを削減するために、客船の大規模なエネルギー効率関連の改造を実施する機会も得られる。

Box 6.2 石油の安値が石油タンカーの輸送ルートを変える

- 3 月と 4 月に石油価格が歴史的な安値に達した際、一部のスーパータンカーは目的地に到着するまでの石油価格が上昇し、余分な燃料コストを相殺する以上の効果を期待され、より長い輸送ルートを取ったことが明らかとなった。

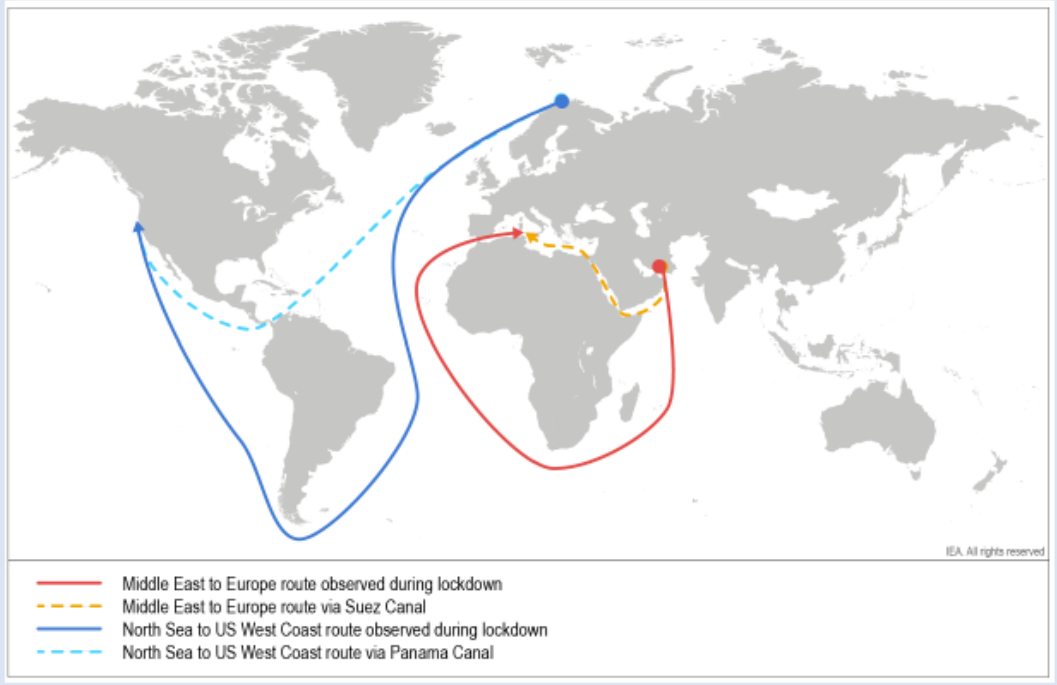


図 : 原油タンカーの輸送ルートの例 : 2020 年 3 月から 4 月にかけて利用されたルートと一般的なルート

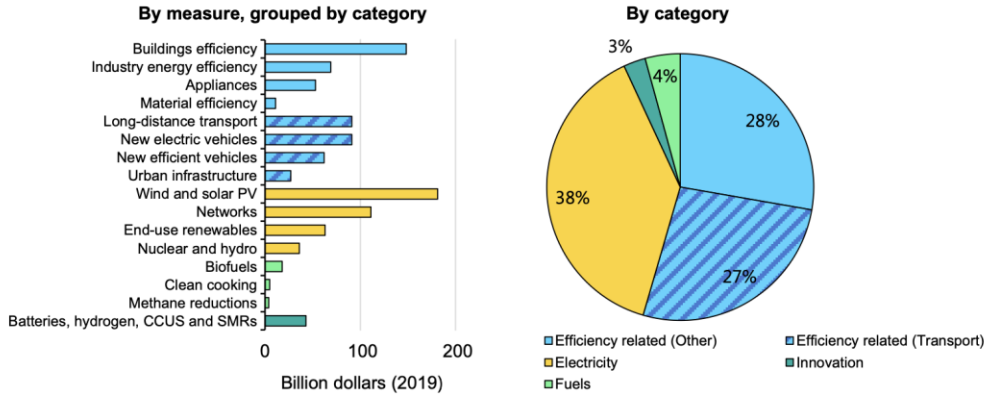
第7章 危機への政策的対応

- 本章では、2020 年の 10 月末における規制や助成措置等、危機への対応に着いてまとめる。省エネのみならず、業務や家庭向けの対策についても取りまとめる。

省エネルギー：持続的回復の中心

- IEA がまとめた持続可能経済復興プラン(Sustainable Recovery Plan)では、省エネ関連の投資が全投資額である 1 兆ドルのうち最大の割合を占めている。省エネルギーは労働集約的であり、既存の雇用確保と新規雇用の創出を迅速に行い得る。

Figure 7.1 Proposed allocation of average annual spending under the Sustainable Recovery Plan by measure and category



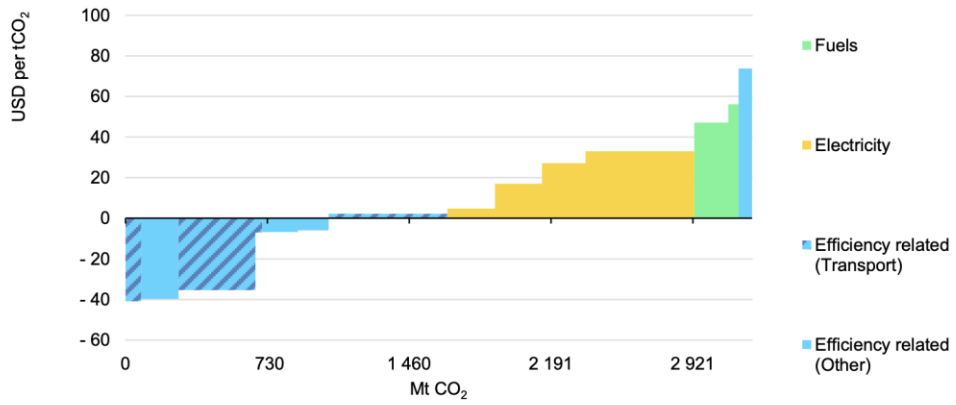
IEA 2020. All rights reserved.

Notes: PV = photovoltaic. CCUS = carbon capture, utilisation and storage. SMR = small modular (nuclear) reactor.
Source: IEA, *Sustainable Recovery: World Energy Outlook Special Report in collaboration with the International Monetary Fund*.

図 7.1 持続可能経済復興プランにおける対策別の政府支出

- 省エネ投資は、省エネルギー並びにエネルギー料金の節約につながる。以下は、対策別の CO2 削減費用である。省エネルギーの CO2 削減コストは、一般的にネガティブ、つまり不要な発電や上流に対する投資が回避できる。

Figure 7.2 Cost of abatement and emissions avoided as a result of selected Sustainable Recovery Plan measures, by category



IEA 2020. All rights reserved.

Source: IEA, *Sustainable Recovery: World Energy Outlook Special Report in collaboration with the International Monetary Fund*.

図 7.2 持続可能経済復興プランにおける対策別の CO2 削減費用

省エネルギー：持続的回復の中心

- 2020 年 10 月末の段階で、世界では 1140 億ドルのエネルギー部門に向けた公的支出が計画されており、その 58%が省エネルギーに対してである。省エネ刺激策は 500 万の雇用を創出する効果がある。

表 7.1 公表されたクリーンエネルギー関連の政府支出の分野別割合

Table 7.1 Announced public clean energy stimulus spending by category[13]

Category	Billion USD	Share of clean energy stimulus spending
Efficiency-related (Total)	65.6	58%
Efficiency-related (Transport)	35.7	31%
Efficiency-related (Other)	29.9	26%
Electricity	23.5	21%
Innovation	22.2	20%
Fuels	2.4	2%
Total	113.7	100%

Notes: This table provides a breakdown of the funding committed to clean energy stimulus spending. It excludes clean energy-related portions of the European Union's EUR 750 billion Next Generation EU Funds, as details on the spending allocations were still being finalised at the time of writing. Stimulus spending for G20 countries partly based on data from Energy Policy Tracker.
Committed investment in hydrogen is included under "innovation".

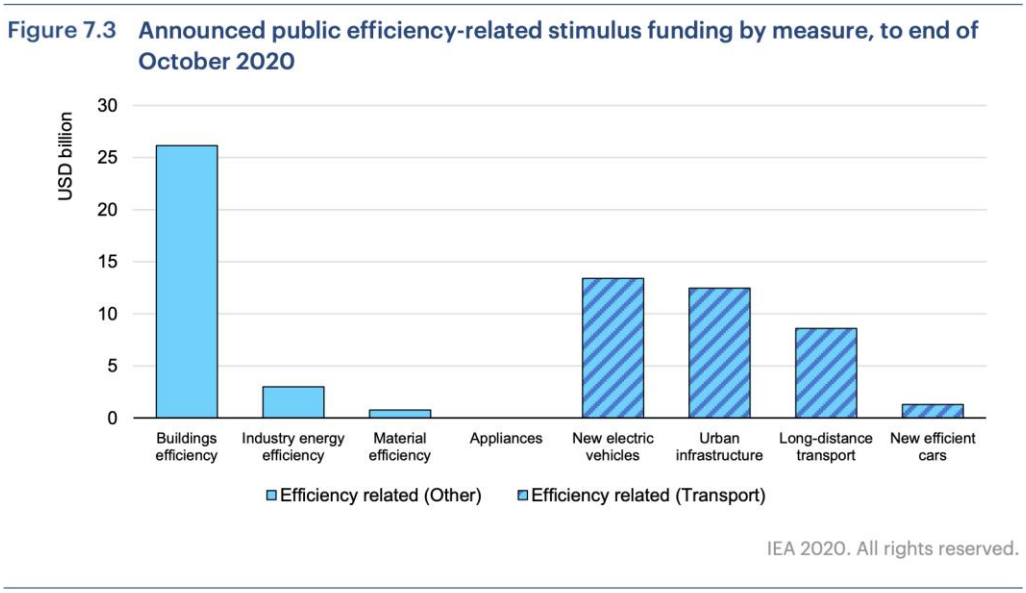


図 7.3 省エネ関連の景気刺激策に関する政府支出(2020 年 10 月末)

地域・分野別に異なる景気刺激策としての省エネ

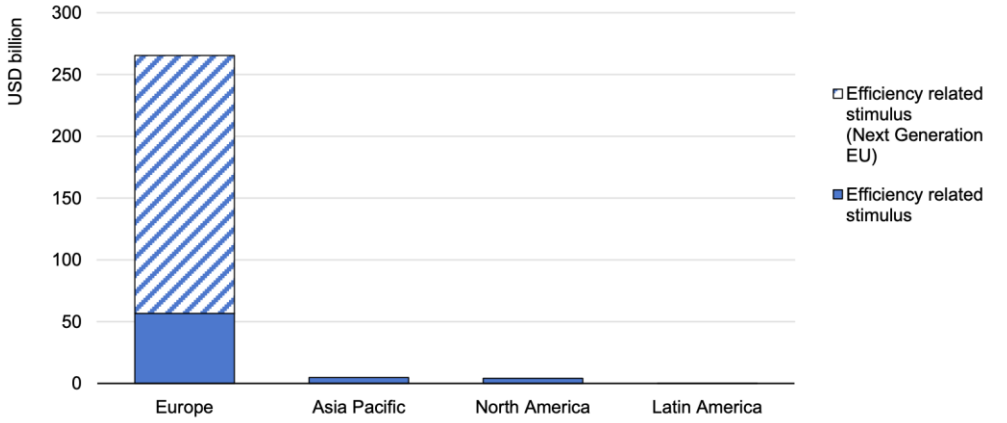
建築物の改修と EV が省エネ景気刺激策の主要な部分を占める

- 660 億ドルの省エネ関連景気刺激のうち、260 億ドルが建築物の省エネ改修に向けられる。これに nZEB への対策は含まれていない。
- 135 億ドルが EV の導入促進に向けられており、70 億ドルが EV の充電ネットワークの拡充に充当されている。15 億ドル以下が低燃費自動車の導入促進に向けられている。
- 都市計画としては、新たなインフラを形成し自転車での移動を促進する対策が 125 億ドルにのぼる。英国では、25 億ドルを充当し、自転車インフラを改善するとしている。カナダでは、Healthy Communities Initiative において、22.7 百万ドルをコミットし、歩行と自転車での移動を促進する。パリとその近郊においては、680 キロに上る自転車道の形成に向け 330 百万ドルを投じるとしている。

欧州での政府支出が大部分を占め、その他の地域は遅れを取る

- 地域別でも、景気刺激策としての省エネ関連の助成金は欧州に集中しており、全体の 86%に及ぶ。残りはアジア太平洋と北米で実施されるものである。
- 10 月の末までに公表された省エネ関連の景気刺激策は、Sustainable Recovery Plan が推計した水準には達していない。

Figure 7.4 Announced public energy efficiency stimulus funding by region, to end of October 2020

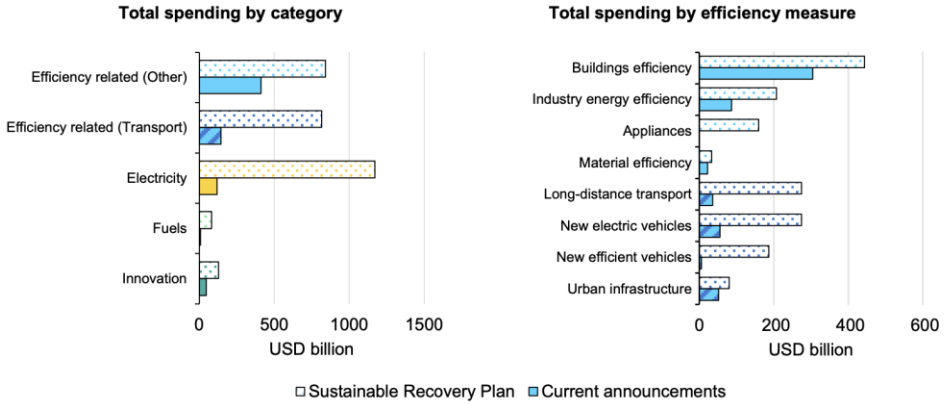


IEA 2020. All rights reserved.

Note: Next Generation EU funds are estimates because at the time of writing, details on spending are yet to be finalised. Estimated spending has been calculated based on funding patterns observed in past EU programmes.

図 7.4 地域別省エネ関連の景気刺激策に関する政府支出(2020 年 10 月末)

Figure 7.5 Estimated public and private investments from stimulus announcements for clean energy to end of October 2020 by category (left) and for efficiency by measure (right), compared with the IEA Sustainable Recovery Plan



IEA 2020. All rights reserved.

Note: Includes both public and private investment.

図 7.5 IEA の持続可能経済復興プランとクリーンエネルギー関連の景気刺激策比較(左)および省エネ関連の景気刺激策 との比較(右)(2020 年 10 月末)

パンデミック下の政策決定が省エネを推進する。

- 2020 年のエネルギー消費低迷を受けて多くの国で基準導入のタイミングを遅らせてい

る。政策実施の遅れは省エネ推進の遅れを意味する。現在導入される技術は将来に渡って継続的に使用されることを認識しなければならない。

景気刺激策を超えて、省エネ対策は継続する。

- 2020 年に計画される省エネ政策の変更は以下の通りである。
- Australia Energy Market Commission では、ディマンドレスポンスの新たなルールを形成し、産業と業務の消費者がアグリゲーターを通して 2021 年末から DR を卸し電力市場に販売できることになった。
- ブラジルは Procel Lab プログラムを実施し、省エネ関連のソリューションの開発に向けたスタートアップ企業の支援を行う。
- 中国は、Green and High Efficiency Cooling Action Plan を 2019 年に公表し、家庭部門のエアコン基準の向上を行う。
- デンマークは新たなプログラムである Skrotningsordningen を実施し、ガスグリッドや地域熱供給の供給外での石油ボイラーをヒートポンプに置換する。
- ドイツは、建築物の省エネ改修に向け税控除を実施する。改修コストの 40,000 ユーロを上限とし、その 20%を所得税から控除する。
- オランダは、暖房に関するファンドの形成や、建築物の改修に関わるコンサルティングやファイナンスに向けたデジタルプラットフォームを形成する。
- ニュージーランドは、公共部門の脱炭素化に向けた State Sector Decarbonization Program を実施する。2 億 NZ ドルのファンドを形成し、投資を行う。既に 8000 万 NZ ドルが教育機関や病院等での石炭ボイラーを低炭素の代替技術に置換することが決定している。
- スペインは、National Strategy Against Energy Poverty 2019-2024 の行動計画を形成し、3.5 百万から 8 百万にのぼるエネルギー貧困層に対して、省エネ手段を提供する。
- トルコでは、near Zero Energy ビルの形成に向けた定義を策定している。これにより、1 万平米以上または年間のエネルギー消費が 250 toe の公共建築物において、2020-2030 年の間に最終エネルギー消費の 15%を削減することを規定している。
- ベトナムでは炊飯器や洗濯機、テレビ、冷蔵庫に関する新たな MEPS が策定された。

第8章 エネルギー効率関連雇用と回復

- エネルギー効率において、もっとも重要な利点は、雇用の創出である。
- 都市、建物、交通システムの効率を改善するための多くの対策は、労働集約的である。
- クリーンエネルギーへの移行が拡大し続ける中、エネルギー効率関連の仕事は近年着実に増加している。一部の国では、エネルギー効率関連の仕事はエネルギー部門で最大の雇用の一つであると推定されている。

表 8.1 各国・地域におけるエネルギー関連の雇用の推計

Table 8.1 Estimated energy efficiency jobs in selected countries and regions

Country	Efficiency-related jobs (pre Covid-19 crisis)
United States	2.4 million
Europe	1 million - 3 million
China	729 000 - 730 000
Canada	472 000
Australia	60 000 - 236 000
Brazil	33 000 - 62 000

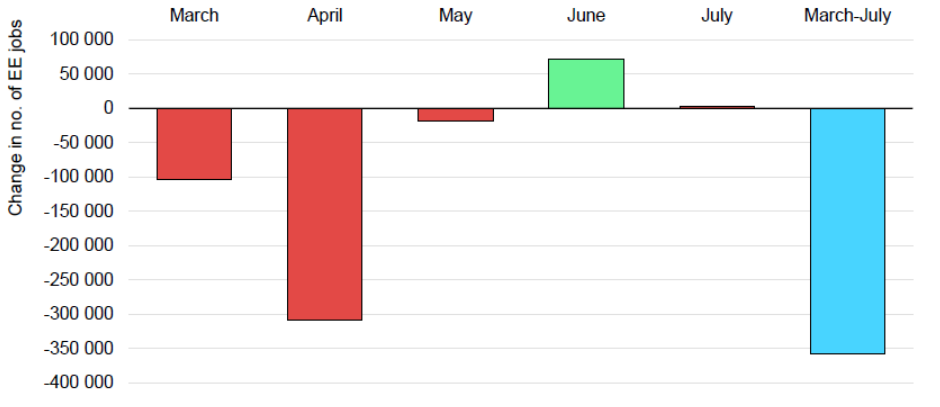
Note: Definitions of energy efficiency jobs differ between regions and the numbers provided in this table are therefore not directly comparable or additive. United States: as of February 2020; China: as of 2018, energy service companies only; Europe: as of 2020, buildings sector only (preliminary estimates subject to change); Canada: as of 2019; Australia: as of 2019; Brazil: as of 2018.

Sources: NASEO and EFI, *The 2020 U.S. Energy & Employment Report*; Wang Qingyi, 2019 Energy Statistics; BPIE (Unpublished), Working Paper: Examining the impact of Covid-19 on building efficiency employment in Europe; ECO Canada, *Energy Efficiency Employment in Canada*; EEC, *Energy efficiency employment in Australia*; Mitsidi, *Job creation potential in Brazil from 2018 to 2030* (in Portuguese).

不十分な政策措置はエネルギー効率関連の仕事を喪失するリスクがある

- Covid-19 による社会的距離の確保は、建物の効率改善を請け負う事業者の受け入れを難しくしており、またエネルギー価格の低迷で投資の回収期間が長くなっている。
- エネルギー効率の改善をサービスとして提供する ESCO 事業者は、現状では既存契約があり事業が成り立っているが、来年は抑制される可能性がある。
- また、ESCO 事業には公的支援が行われていることが多いが、今後の政府の予算によっては、業務の継続がむずかしくなる事業者が出てくる可能性がある。

Figure 8.1 Net changes in US energy efficiency jobs, March to July 2020



IEA 2020. All rights reserved.

Source: BW Research Partnership, *Memorandum: Clean Energy Employment Initial Impacts from the COVID-19 Economic Crisis, July 2020*.

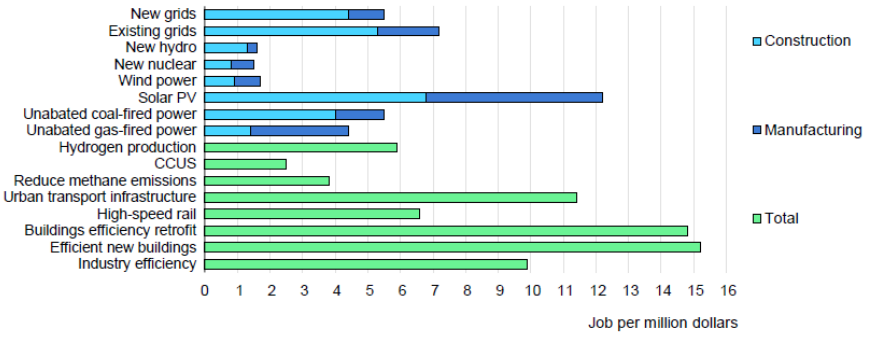
図 8.1 米国におけるエネルギー効率関連の雇用状況(2020 年 3 月から 7 月)

- 世界中では、Covid-19 危機のためにエネルギー部門全体で 430 万人の雇用が危険にさらされているか、すでに失われている。

エネルギー効率のための政府の経済刺激は、関連機器を急増させることができる

- 多くのエネルギー効率の更新業務は労働集約的であるため、100 万米ドルを費やすと、業種にもよるが、平均して 6～15 人の雇用が創出されると推定されている。
- エネルギー効率改善の仕事は、不況時に既存の雇用を保護したり、新しい雇用を創出したりしようとする政府にとっては、エネルギー部門で最も魅力的な投資の一つである。

Figure 8.2 Construction and manufacturing jobs created per USD 1 million of capital investment in the Sustainable Recovery Plan



IEA 2020. All rights reserved.

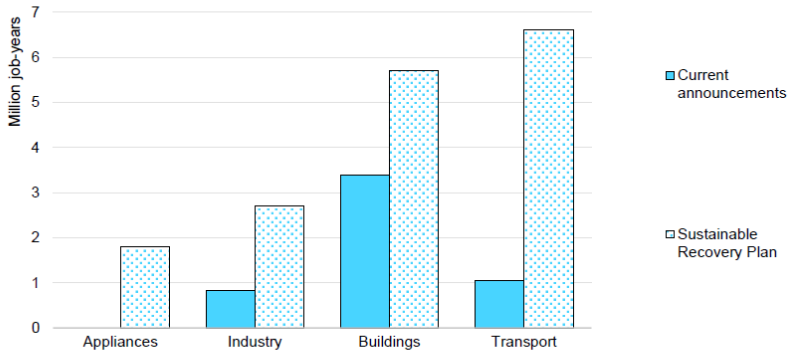
Source: IEA, *Sustainable Recovery: World Energy Outlook Special Report in collaboration with the International Monetary Fund*.

図 8.2 持続可能な回復計画における設備投資 100 万＄あたりの設置と製造の雇用創出数

効率改善のために景気を刺激する支出は、雇用創出の可能性として利用され始めているが、まだ機会の余地はある

- 政府の刺激策はまだ策定中であるが、雇用を創出する可能性の高いセクターへの支出が計画されている。建物の効率化対策は、発表された効率のための予算の大部分を占めている。建物の効率化の予算により約 340 万人の雇用年を生み出すと推定されている。

Figure 8.3 Estimated energy efficiency job creation potential from committed stimulus investments to end of October 2020 and in the Sustainable Recovery Plan



IEA 2020. All rights reserved.

Note: Industry includes industrial energy efficiency improvements and materials efficiency. Transport includes new efficient cars, new electric cars, long-distance transport and urban infrastructure. All numbers include job-years generated from a combination of public money and estimated leveraged private investment.

図 8.3 持続可能な回復計画および 2020 年 10 月末までの約束された刺激策による エネルギー効率関連の雇用創出ポテンシャル

表 8.2 産業、建物、輸送における刺激策の発表から現在までの地域別の エネルギー効率関連の推定総雇用数

Table 8.2 Estimated energy efficiency job-years by region from stimulus announcements to date in industry, buildings and transport

Sector	Europe	Asia Pacific	North America	Latin America
Industry	798 000	17 000	3 000	
Buildings	2 824 000	302 000	268 000	1 000
Transport	723 000	245 000	80 000	

Note: In this analysis, countries considered within each region are limited based on available data to date. Asia Pacific includes: Australia, China, India, Indonesia, Japan, New Zealand, and Korea. Europe includes: Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Netherlands, Poland, Portugal, Russian Federation, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey and the United Kingdom. Latin America includes: Argentina, Brazil and Mexico. North America includes: Canada and the United States. All numbers include job-years generated from a combination of public money and estimated leveraged private investment.

- 既存の住宅、学校、病院、または地方自治体の施設の建物効率の改善は、クリーンエネルギー対策の中で最も労働集約的であるため、今後数年間でかなりの数の雇用を生み出す可能性がある。
- しかし、まだ雇用を創出する機会は残されており、IEA Sustainable Recovery Plan では、3 年間で家電の効率改善に 1,600 億米ドルの公的および私的支出を確保できると予測している。これにより、160 万人の雇用を創出することができる。
- 産業部門の効率化のための支出は不十分であり、さらなる支出により 210 万人の雇用を創出できる。
- エネルギー効率に関連する現在コミットされている公的刺激支出は、民間投資と組み合わせて、500 万人以上の雇用を創出する可能性がある。
- IEA の持続可能な回復計画では、政府が追加として 2100 億 $ を約束した場合には、1200 万人近くの総雇用が創出される可能性がある。

表 8.3 これまでに発表された効率関連の刺激策および効率改善の対策により創出される可能性のある推定総雇用数

Table 8.3 Estimated job-years that could be created by efficiency-related stimulus announcements to date, by efficiency measure

Efficiency measure	Estimated jobs-years
Building retrofits	3 209 000
Industry energy efficiency	590 000
New electric cars	312 000
Railways	237 000
Charging infrastructure	230 000
Material efficiency	229 000
New buildings	188 000
Public transport	124 000
Walkways and bike lanes	122 000
New efficient cars	24 000

Note: Job-years are created from a combination of government and estimated private spending.

第9章 2019 年におけるエネルギー効率

エネルギー源単位とエネルギー効率

世界のエネルギー効率の改善は横ばい

- 2019 年における世界のエネルギー効率の改善率は 2%であり、2018 年と比較すると改善率は 1.1%増となった。しかし、この改善率の向上は天候による影響が大きく、実質的には前年同様の改善率であった。

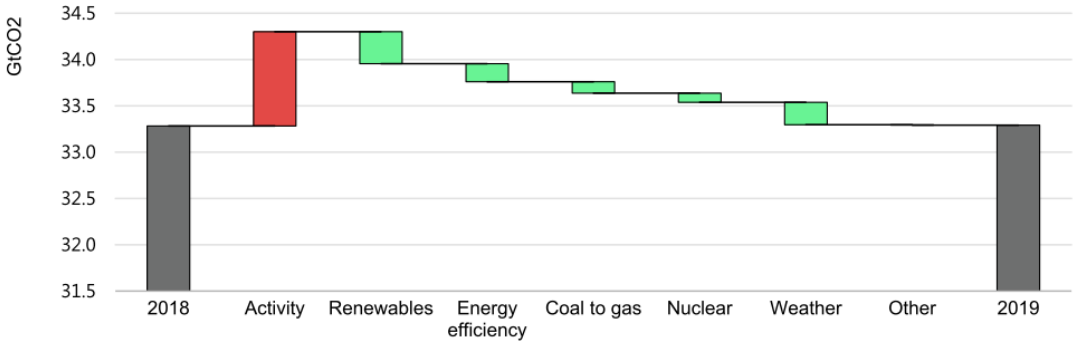
省エネルギー量は前年比 5%減

- さらに、エネルギー効率改善によって節減されたエネルギー量は 2018 年と比較して 5%減であった。これは、新規の省エネ政策の低迷と経済成長の鈍化による新規投資の減少が影響している。

エネルギー効率の改善は排出量削減に大きく貢献

- なお、エネルギー効率改善によって 2019 年に 2 億 t-CO2 が削減された。この削減量は再生可能エネルギーによる削減に次ぐ規模である。

Figure 9.1 Change in global energy-related CO_2 emissions and avoided emissions, 2018 compared with 2019



IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Y-axis starts at 31.5 Gt CO_2. Red columns are factors that increased energy-related greenhouse gas emissions, green columns are factors that reduced energy-related greenhouse gas emissions.

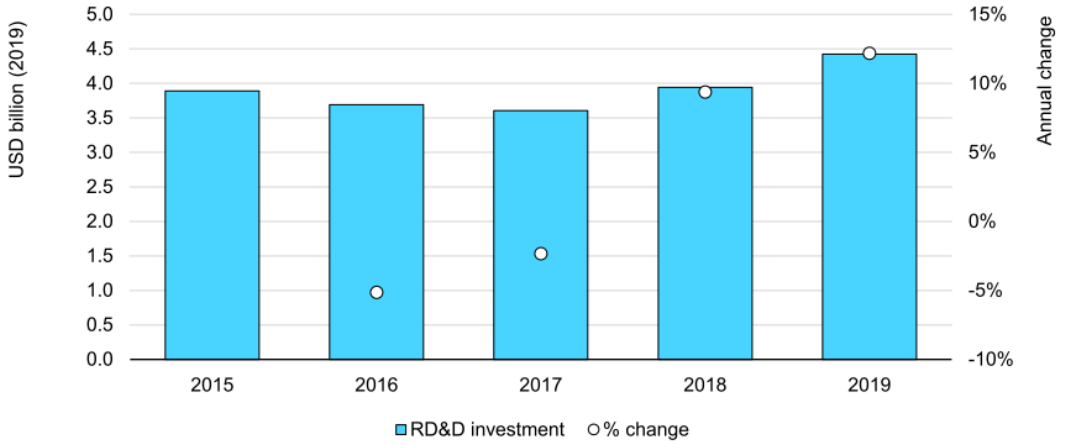
Source: IEA, Global Energy Review 2019.

図 9.1 世界のエネルギー起源 CO2 排出量と削減貢献量

投資による将来の省エネルギーへの寄与

- 2019 年の省エネルギー投資は、前年と概ね同規模の 2,500 億ドルであった。
- 特筆すべき点としては、公共部門による研究開発への投資が進展したことが挙げられる。研究開発費は、前年比 12%増の 450 億ドルであった。

Figure 9.2 IEA public energy efficiency technology R&D and demonstration spending, 2015-19



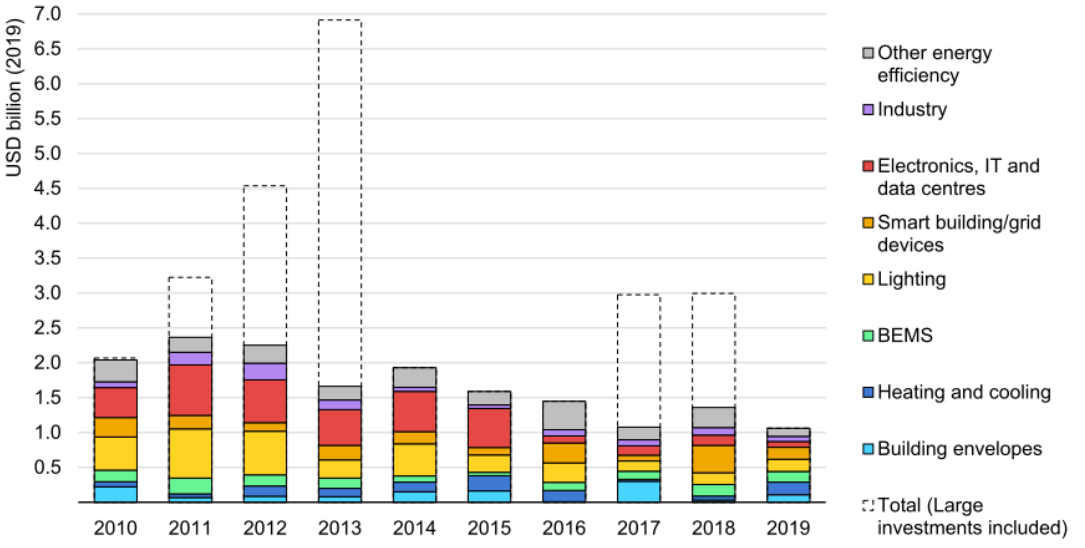
IEA 2020. All rights reserved.

Source: IEA, Energy Technology RD&D Budgets.

図 9.2 公共部門による省エネルギー技術の研究開発費の推移

- 一方で、スタートアップ(新興)企業への省エネルギー技術の研究開発に対する投資は、2018 年の半分以下であるが、5 億ドルを超える投資を除外した場合の変化は小さい。

Figure 9.3 Global venture capital investments in energy efficiency startups, by technology



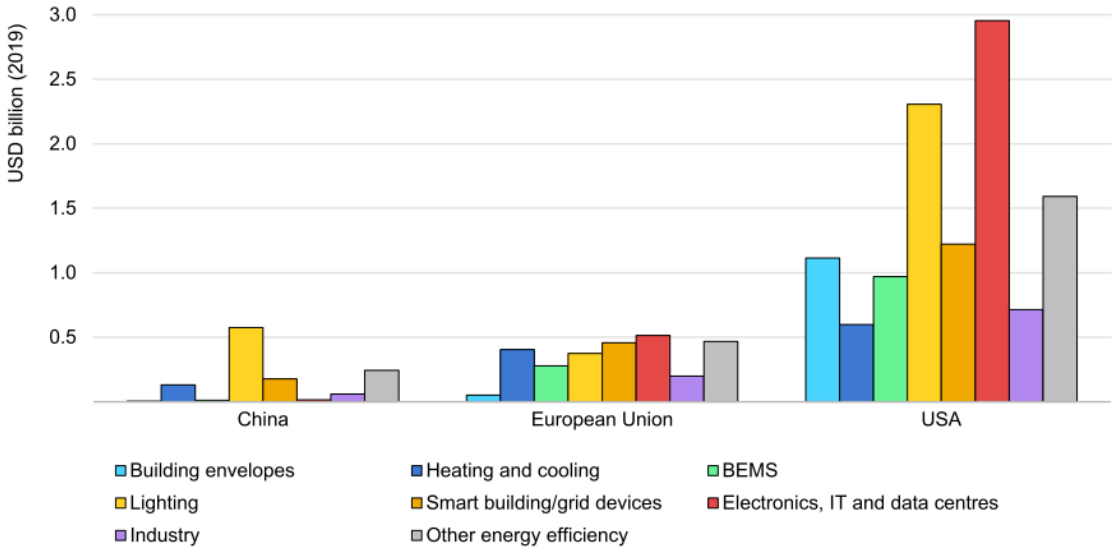
IEA 2020. All rights reserved.

Note: Data in the coloured columns exclude outlier deals greater or equal to USD 500 million to avoid skewing the technology distribution. BEMS = building energy management system.

図 9.3 スタートアップ企業への省エネルギー技術の研究開発投資の推移

- 省エネルギー技術の研究開発への投資を地域別にみると、シリコンバレーが存在し、IT やデータセンター関連技術に強みを有する米国が全投資のうち約 70%を占める。次いで、欧州の 16%、中国の 7%であった。

Figure 9.4 2019 energy efficiency venture capital investments by technology and region



IEA 2020. All rights reserved.

Note: Data exclude deals greater or equal to USD 500 million to avoid skewing the technology distribution. BEMS = building energy management system.

図 9.4 2019 年における地域・技術別の省エネルギー投資

建物部門

プレハブ建築は建設時の効率改善に引き続き寄与

- 建築時のエネルギー効率改善に資する工法として、プレハブ建築(モジュール式/建築)があり、2019 年の市場規模としては 700-1110 億ドルと推計されている。しかし、従来の工法からプレハブ建築への転換は、熱需要の大きい欧州や北米、中国北部では進んでいない。

エアコンの平均効率は高効率機器の後追いが続く

- エアコンの販売平均エネルギー効率はやや改善し、約 4W/W(電力投入 1 ワット当たりの冷気(ワット))であった。しかし、この値は欧州や米国の 10-12W/W と比較するとエネルギー効率は悪い。これは、アフリカなどでは、3W/W 未満の効率のエアコンが市場の 35%を占めることによる。

建築部門における省エネルギー投資は新興国の新築市場が牽引

- 世界の建築部門における省エネルギー投資は、新興国における新築市場と先進国における既築市場に分けられる。2019 年の建築部門における省エネルギー投資は、建設市場全体は好調であったものの、先進国や中国・中東市場が低調であり、その他の新興国が市場をけん引した結果、前年比 2%増の 1,500 億ドルであった。

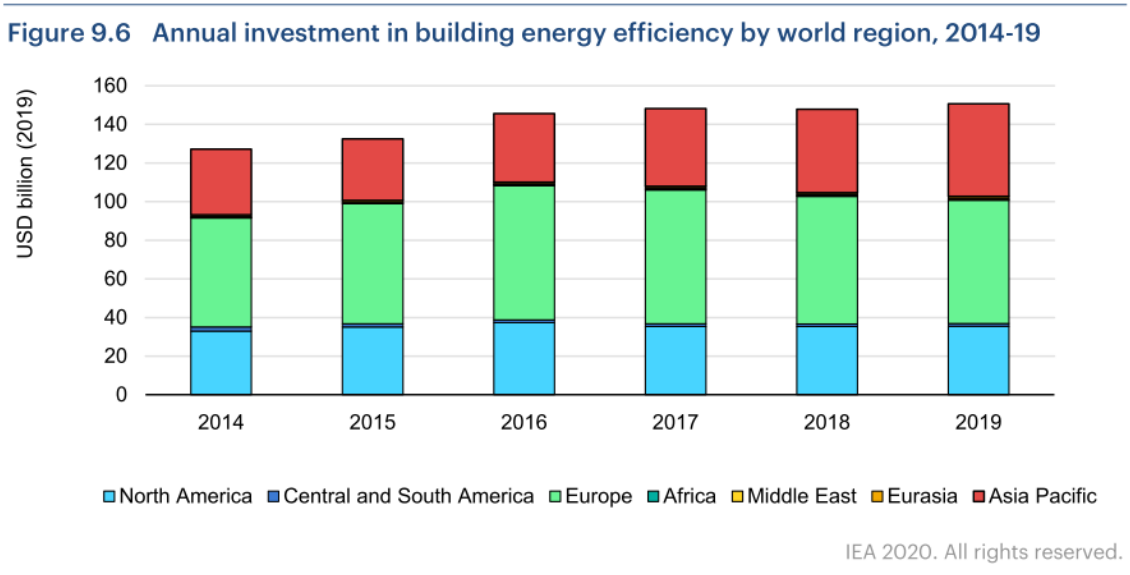


図 9.6 建築部門における地域・技術別の省エネルギー投資

運輸部門

電気自動車市場は堅調であるが車両の大型化が懸念

- 2019 年における電気自動車のストックは 700 万台であり、販売台数では 210 万台に達し、電気自動車の販売シェアは過去最高の 2.6%であった。他方で、車両の大型化が世界的に相次いだ結果、燃費改善率の低下や燃費悪化が生じている。

中国における高速鉄道の急速の発展

- 中国では 10 年間で約 24,000km の高速鉄道網を整備した結果、現在の高速鉄道による旅客数は航空部門と同等の水準となった。鉄道は自動車や飛行機と比較して、エネルギー効率が良いため、輸送部門のエネルギー効率改善に大きく寄与している。

運輸部門における省エネルギー投資は横ばい

- 運輸部門における省エネルギー投資は、自動車販売台数が減少した結果、前年比約 4%減であった。自動車市場全体が低迷した中、燃費が良い貨物車両に関しては燃費基準の導入によって投資が進んだ。しかし、中小企業にとっては、燃費が良い貨物車両は燃料代の低減によって初期費用が賄えるにも関わらず、その初期費用の高さから導入が困難であるという課題がある。

電気自動車への投資は微増に留まるが、販売比率が増加

- 世界の電気自動車の購入金額は前年比で 13%増加し、2019 年は 900 億ドルであった。内訳としては、600 億ドルはバッテリー式電気自動車で、300 億ドルがプラグインハイブリッド車である。電気自動車の販売台数は、乗用車全体の販売台数が約 400 万台減少する中、10 万台増であった。

産業部門

産業部門全体で省エネルギー技術の導入に遅れ

- 世界全体の急速な都市化の進展による建設需要の高まりによって、鉄鋼産業やセメント産業は好調であった。エネルギー多消費産業である鉄鋼・セメント産業は、産業部門におけるエネルギー消費量の約 30%、GHG 排出量の 41%以上を占める。
- なお、2019 年においては、エネルギー多消費産業におけるクリーンエネルギー技術の進歩には大きな変化は見られなかった。

Box 9.1 G20 諸国における産業部門のベンチマーク

- IEA は日本が立ち上げた産業部門のエネルギー効率の G20 ベンチマークイニシアティブを引き続き支援する。
- 国際的な産業部門のベンチマークは、エネルギー原単位に影響する要因を明らかにすることができる。一例として、鉄鋼業におけるエネルギー原単位と粗鋼生産量に占める高炉の比率が挙げられる。
- 設備の経年変化や導入技術の差異など他の要因があるため、必ずしもその関係は明確ではないが、高炉による粗鋼生産量の比率が高い国はエネルギー原単位が高い傾向が見て取れる。

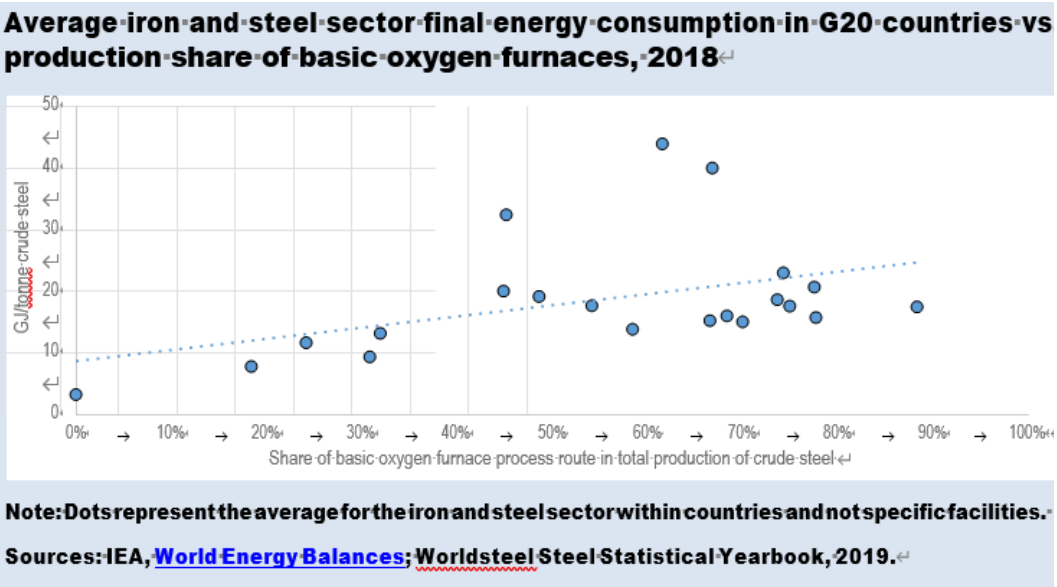


図 2018 年における G20 諸国の鉄鋼業最終エネルギー消費量平均と転炉鋼の割合

鉄鋼・アルミニウム産業におけるエネルギー効率は横ばい

- 鉄鋼産業のエネルギー効率の向上を図るためには、高炉から電炉への転換が最も効果的であるが、粗鋼生産量に占める電炉の割合は 2018 年 28.8%から 2019 年 27.7%と減少した。
- アルミニウムは工程と地域によって、エネルギー効率の変化は異なった。アルミニウム精錬工程(アルミナからアルミニウムを精製)におけるエネルギー効率は、14,000 kWh/t と横ばいであった。一方で、アルミニウムリファイナリー工程(ボーキサイトからアルミナを抽出)では、中国における省エネルギー技術の導入により、前年比 5%以上の効率改善が見られた。

エネルギー管理システムの認証数は欧州で停滞しているがアジアで増加

- エネルギー管理はエネルギー効率の改善を行う方法のうち、最もコスト効果的な洗濯の一つであり、エネルギー管理の国際標準である ISO50001 が存在している。
- ISO 取得を推進する上で、政府の規制やインセンティブ制度、企業の環境に対する価値観の変化などが重要になる。他方で、エネルギー管理の文化の欠如や技術不足、エネルギー管理の煩雑さなどが ISO 取得の障壁となっている。
- 今後、認証数の増加を促すためには、欧州で主流となっている複数の施設分の認証を一括で得るマルチサイト方式(マルチ認証)が、取得費用と認証のメリットの両立を図れるため、重要な選択肢となり得る。
- 全世界の ISO50001 の認証数は直近 2 年間において低迷している。これはアジアにおける認証数は増加しているものの、アジアの 2 倍以上の認証数を有する欧州での取得が低迷しているためである。

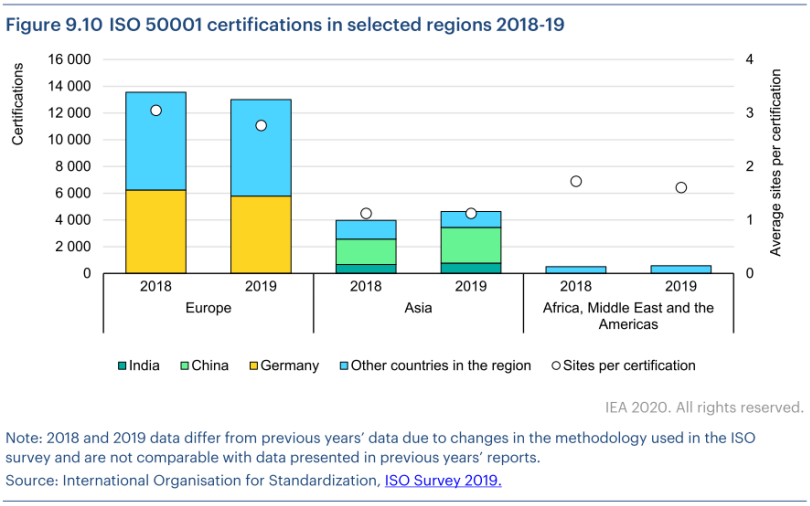
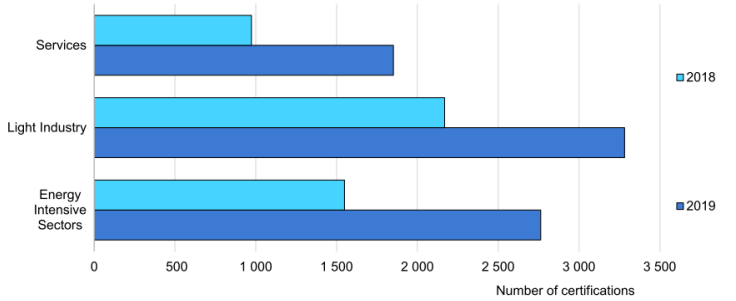


図 9.10 ISO50001 の地域別認証数

- 産業別に ISO50001 の取得数をみると、卑金属産業や食品飲料産業においては前年比で取得数は概ね 2 倍、化学産業では 1.5 倍の取得数であった。他方で、卑金属産業に見られるように、ISO50001 の取得は、ISO14001(環境マネジメントシステム)や ISO9001(品質マネジメントシステム)と比較すると少ないことが課題である。

Figure 9.11 ISO 50001 certifications by industry sector, 2018 and 2019



IEA 2020. All rights reserved.

Note: Energy intensive sectors includes: Pulp, paper and paper products, Chemicals, chemical products and fibres, Non-metallic mineral products, Concrete, cement, lime, plaster etc., Basic metal and fabricated metal products. Light Industry includes: Food products, beverage and tobacco, Textiles and textile products, Leather and leather products, Manufacture of wood and wood products, Publishing companies, Printing companies, Pharmaceuticals, Rubber and plastic products, Machinery and equipment, Electrical and optical equipment, Shipbuilding, Aerospace, Other transport equipment, Manufacturing not elsewhere classified. Services includes: Wholesale & retail trade, repairs of motor vehicles, motorcycles and personal and household goods, Hotels and restaurants, Transport, storage and communication, Financial intermediation, real estate, renting, Information technology, Engineering services, Other Services, Public administration, Education, Health and social work, Other social services.

Source: International Organization for Standardization, ISO Survey 2019.

図 9.11 産業別 ISO50001 認証数

産業部門における省エネルギー投資は横ばい

- 産業部門における省エネルギー投資は、概ね例年通りの水準である約 350 億ドルと推計される。
- 産業部門における省エネルギー投資の促進は、①主要国の政策変化と、②他の投資と比較した際の省エネルギー投資の投資回収期間、が重要な要素となる。しかし、近年大きな政策変更はなく、2019 年のエネルギー価格が低迷した結果、省エネルギー投資は低迷した。

巻末付録２：マルチ枠組が発刊するレポート等の要約

（再エネ編）

IEA/IRENA 発刊の再エネ関連主要レポートの要約（2020 年 1 月～2020 年 4 月分）

1. IRENA “Renewable energy finance: Sovereign guarantees”（2020 年 1 月発刊）

・ IRENA Renewable Energy Finance Brief シリーズの第 1 弾で 16 ページの小冊子。概要は以下の通り。

・IRENA の推定では、パリ協定の目標を達成するために必要なエネルギー投資は 2050 年までに合計 110 兆ドルに達する（年間に換算すると 3.2 兆ドル/年）。特に途上国において、再エネへの融資を可能とするのに不可欠と見られてきたソブリン保証を得ることは近年ますます困難になってきている。その場合に、ソブリン保証以外のリスク軽減策があることはまだ余り知られていない。

・パリ目標を達成するには公的資金だけでは十分ではなく、民間部門からの投資の必要性も既に広く認識されている。一般論で言えば、民間部門は民間資金の利用も可能である。それでも、必要な投資は実現できていない。

・ソブリン保証に関するこの小冊子は、発展途上国を対象として書かれている。途上国では、リスク回避するために投資家がリスクプレミアムを要求したり、追加的なセーフガードを必要としている。いずれも先進国では発生していない事象である。

・プロジェクトをファイナンシャル・クローズに近づけるには、ステークホルダーが納得できるようにプロジェクトに係るすべてのリスクを軽減、緩和または転嫁することが求められる。実は途上国の再エネプロジェクトに係る大きなリスクは、しばしばその国自体のカントリーリスクである。電力の長期的な買い取りが信用できない、法律やビジネス環境が変化する、政権の交代によって税制が変わるといったリスクがこれに該当し、投資家はほとんどリスクを取ることができない。過去においてこの種のカントリーリスクに対する包括的なソリューションとして金融機関が要求してきたのが「ソブリン保証」である。

・ソブリン保証とは、主要な債務者のデフォルトが発生した場合に、債務に対する政府の保証である。ソブリン保証は支払いデフォルトへの対応が主として期待されるが、実際にはあらゆる種類の債務に対して保証を提供することができる。再エネ部門では、負のリスク評価に苦しむ国において、IPP（独立系発電事業者）による発電への投資を誘致するためにソブリン保証が活用されることが多い。カバーされるリスクは、国営企業が発電電力のオフテイカー（引き取り手）となっている場合の不払い、PPA（再エネ電力の長期買取契約）によってユーティリティに課されたその他の責務、課税の一方的な変更、終了条項、通貨の非兌換性と送金制限等が含まれる。これらのリスクは政府のコントルール化にあると見なされ、政府によるソブリン保証はリスクの公平な配分を反映していると見なされる。

・ソブリン保証は通常、財務省によって起案され、その保証内容と既存法制度との整合性について法務当局がレビューを行う。このプロセスはしばしば時間がかかりプロジェクトを大

きく遅延させる要因ともなっている。従来、投資側の IPP、そして、彼らへの貸し手や保険事業者は「当たり前のように」にソブリン保証を要求してきた。これまで投資家は、途上国政府が責任を取る形でのソブリン保証に頼ってきたと言える。

・ところが、近年、以下ようなの理由によって、ソブリン保証を得ることが困難になってきている。

・IPP（独立系発電事業者）が関与するソブリン保証に係る紛争によって政府のリスクが高まっていること

・ソブリン保証を得るためにオフテイカーが多額の保証料を支払う必要があること

・ソブリン保証は IMF によって当該国の偶発債務として扱われるため、当該国の GDP 比の債務割合を高めてしまい、IMF からの支援を得ない追加債務に対する負担能力を限定してしまうこと

・さらに、いくつかの国ではソブリン保証は政府内において必ずしも尊重されておらず、PPA のような 20 年の長期にわたる保証の場合に、政権交代によっては保障が継続されないこともあり、ソブリン保証の信頼性を揺るがす事態にもなっている。

・ソブリン保証は常にベストオプションとは限らず､代替する手段として以下が挙げられる。

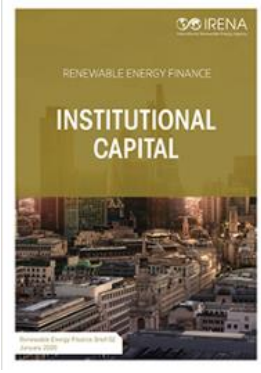
・政府による保証に代わって “Letters of comfort” 又は“letters of support”等政府からの支援レターによってステークホルダーの不安を緩和

・多国間銀行や保険会社の優先債権者ステータスの利用

・プットあるはコールオプション合意（PCOA）

・政治的影響の排除するために G 対 G の二国間合意を締結

2. IRENA “Renewable energy finance: Institutional capital”（2020 年 1 月発刊）



・IRENA Renewable Energy Finance Brief シリーズの第 2 弾で 12 ページの小冊子。概要は以下の通り。

・世界最大の資本プールの一つとして、資本機関投資家は現在進行している持続可能な低炭素経済への転換に不可欠な役割を負っている。しかし、この転換は、政策立案者、機関投資家そして他のステークホルダーが遅滞なく大量の資本を再エネに注ぎ込むアクションを取って初めてなし得るものである。間もなく発刊予定の「IRENA Mobilising institutional capital for renewable energy」はこの重要なグループの財務力を活用するための実務的なリコメンデーションを提示している。

・IRENA の分析によれば、再エネに対する機関投資には、ほとんど未利用なままの大きなポテンシャルがある｡5,800 を超える機関投資家と彼らによる過去 20 年間以上の再エネへの投資をサンプルとして調査した結果、機関投資家の約 20%がファンド経由で再エネへ投資したことがあるが、再エネプロジェクトへの直接投資の経験はわずか 1%だけだった。しか

し、下図に示すように、機関投資家による再エネへの直接投資は増加傾向にあり、2018 年の再エネへの直接投資額全体の概ね 2%を占めた。

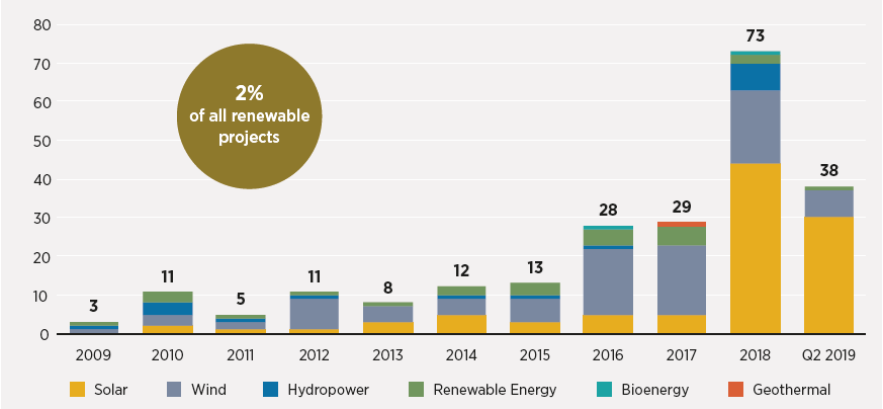
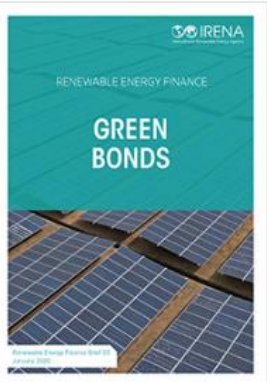


図 1　機関投資家が関与した再エネプロジェクト数（2009 年から 2019 年 Q2）

・再エネへの機関投資資金をスケールアップするためには、複数の分野での取り組みを適切に組み合わせる必要がある。政策立案者は、再エネへの投資を拡大させて、機関投資家が直面する障壁を下げるような政策枠組みを実施できる。これらには機関投資に対する制約や投資義務の見直しや明確な持続可能目標の設定が含まれる。グリーンボンドやグリーンファンドといった新しい金融手法は、再エネ資産への機関投資を育成するための新しいチャンネルとなり得る。

・再エネプロジェクトに関連した障壁をリスク回避によって低下させることも重要である。公的資金はこの点において積極的な役割を果たすことができる。機関投資家は、キャパシティ・ビルディングと協力構想を通じた適切な内部条件、例えば、再エネ資産からの得られる収益の最大化を確立する責任を負っている。

3. IRENA “Renewable energy finance: Green bonds”（2020 年 1 月発刊）



・IRENA Renewable Energy Finance Brief シリーズの第 3 弾で 16 ページの小冊子。概要は以下の通り。

・低炭素経済に向けての世界的な転換は、金融資本の投資先の大幅な変更を必要としている。グリーンボンドは、販売収益を持続可能な資産に割り当てる債券である。グリーンボンド市場は、機関投資家のような資本提供者と再エネのような持続可能な資産との間の重要な橋渡しの役割を持つ。2007 年に遅ればせながら開設されたグリーンボンド市場は、主として国際開発銀行によって牽

引されて、過去 10 年間で急速に成長した（下図参照）。2019 年の発行額は 1,900 億ドルに近づき、発行主体が多様化することで成長に弾みがついている。

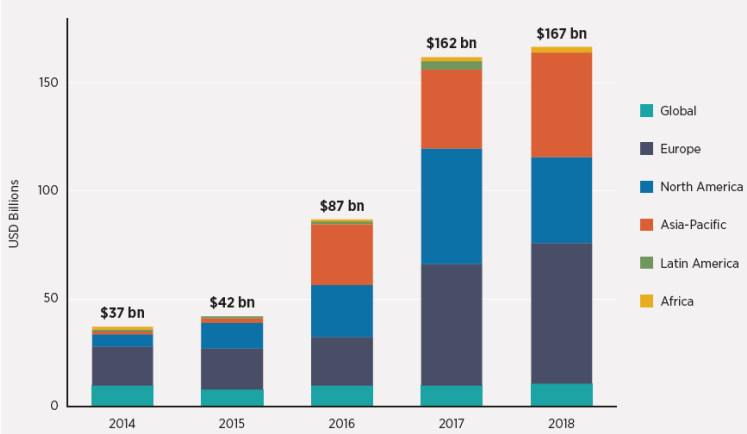


図 2　グリーンボンドの年間発行額（地域別）2014～18 年

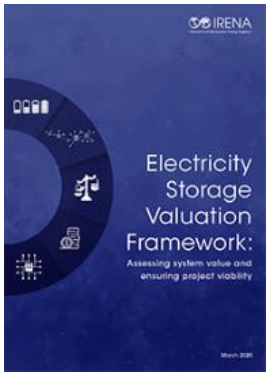
・現在のところ企業や金融機関が支配的ではあるが、気候変動に配慮したファイナンスとして国が発行主体となるグリーンボンドも増加してきている。欧州での発行主体に対して北米、そして、加速度的にアジア太平洋地域の発行主体からも参加が見られる。再エネはグリーンボンドの主要な引受先となっているが、ほとんどのグリーンボンドは、再エネ以外の複数の持続可能ソリューションへのファイナンスも行っている。

・グリーンボンド市場は急速に成長しているが、一層の成長と改善の余地が依然として存在する。グリーンボンドの発行額は世界全体の債券発行額のわずか 1%以下である。特に再エネ部門に関連したグリーンボンド市場の成長を加速させるために、様々なステークホルダー間の協力したアクションが必要である。

・政策立案者は、気候変動に対応したグリーンボンドの標準化を通じたグリーンボンドの供給と再エネ部門の成長の両者を支援することができる。公的資本は、再エネ資産のリスク回避を促し、元手資本の提供やキャパシティ・ビルディングを通じてグリーンボンドを支援することができる。機関投資家はその内部能力と投資目標でもって長期的な持続可能マンデートを援助することができる。

・信用格付け機関、金融機関、一般投資家といったその他のステークホルダーもまたグリーンボンド市場の強化や世界的なエネルギー転換の促進といった重要な役割を果たすことができる。

4. IRENA “Electricity Storage Valuation Framework”（2020 年 3 月発刊）



・IRENA によって開発された ESVF（Electricity Storage Valuation Framework : 電力貯蔵評価フレームワーク）を紹介する内容の報告書。ESVF とは、自然変動再エネ（VRE）の統合のために効果的な電力貯蔵政策の展開を目的とした 5 段階アプローチ（Five-phase method）を主とした政策的枠組みである。電力システムにおける電力貯蔵の価値をどのように評価するか、そして、電力貯蔵への投資環境をどのように形成するかが通底する問題意識である。概要は以下の通り。

・本報告書における電力貯蔵とは「電気エネルギーを貯蔵し、必要とする時に需要に応じて放電する技術」のことを指す。電力貯蔵は VRE の統合に伴う電力システムの技術的かつ経済的な課題に対処するための卓越したソリューションとされ、太陽光・風力がシステムにもたらす不確実性や変動に対応するための幅広い機能を提供できる。もし電力貯蔵が卸電力市場に参加できるのであれば、電力貯蔵は価格シグナルに応じた電力の消費（貯蔵）と給電を行うことができる。特に電力価格が非常に低いあるいはネガティブ価格（逆有償での給電）の場合に消費を拡大できるのは有用である。ネガティブ価格は電力システムが柔軟でないことのサインでもあり、電力貯蔵は消費・貯蔵によってそのような非柔軟な状況を回避し、そして収益を得ることもできる。

・太陽光発電と電力貯蔵を組み合わせれば、太陽光が最大発電する正午ごろの発電収益の「共食い効果」（太陽光発電の限界発電コストはゼロであることから、卸電力価格がどれだけ低下しても太陽光発電は昼間の発電量を最大化させるため、太陽光発電が増大するにしたがって卸電力価格が下落してゆき、太陽光発電ビジネスの収益をも低下させてしまう現象）を電力貯蔵は緩和させることができる。これによって太陽光発電の収益性は増加し、より多くの太陽光発電の設置を可能とする。昼間は需要よりも多く発電された分を貯蔵し後で放電することで、系統混雑や過剰供給に伴う出力抑制を効果的に緩和することもできる。電力市場が自由化されている場合でも垂直統合が残っている場合でも電力貯蔵は同じように機能する。

・電力貯蔵は、一次及び二次調整力そして常時給電（firm capacity）といった系統へのサービス提供によって、容量市場やアンシラリーサービス市場にも参加することができる。間接的には、ピーク用発電の削減や系統線混雑の緩和を通じて発電・送電へのニーズを抑制することで電力貯蔵はコスト削減にも貢献できる。配電網の末端で BTM（Behind-the-Meter）に設置した場合、電力貯蔵は分散型再エネの統合やプロシューマーの DR への積極的な参加を促すことができ、結果として家庭用電力コストの引き下げにもつながる。重要なのは、電力貯蔵は効率的に複数のサービスを同時に提供できることで、それぞれは小さいかもしれないが収益の積み重ねによって便益の拡大ができる点である。

・電力の貯蔵技術には様々な形態があり、それぞれの特性に応じた機能に優れた能力を発揮することができる。例えば、蓄電池は系統運用者からのシグナルに対して非常に高速での応動が可能であることが証明されている。これは従来提供されてきた系統サービスよりも高い

価値を有する新しいサービスに道を開き（例えば、1 ユニットの高速周波数応答は複数ユニットの一次調整力を代替できる）、新しい貯蔵技術の価値を評価できるように系統サービスの考え方をも変えてゆく。

・大量の電力をある時点から他の時点（例えば、同日～週、月の後に）に時空的にシフトする必要がある場合、伝統的に最も多用されてきた手法は揚水である。揚水発電は従来のバルクの価格差取引だけでなく、可変速揚水など新しい技術を用いて追加的な系統サービスも提供することもできるので、VRE が大きなシェアを占める電力システムは揚水発電のルネッサンス期と言えるかもしれない。

・電力貯蔵は、電力システムの高い VRE シェアやオフグリッド地域の電化促進、運輸部門の脱炭素化を可能とすることでエネルギー転換を促進する主要な役割を演ずる。しかしながら、貯蔵のシステム価値は電力市場において適切に評価されていないことが多く、十分な収益が見込めないことによる投資不足から、電力貯蔵に対する開発が低下するいわゆる「ミッシングマネー問題」を生み出す結果になっている。但し、電力産業の垂直統合が維持されている場合は、電力供給コストを削減するための貯蔵のポテンシャルを探るための適切なインセンティブが付与されていれば、生産コストと投資コストを踏まえた電力貯蔵の価値が十分に評価され得る。

・以上の議論を踏まえた上で、IRENA によって開発された ESVF（Electricity Storage Valuation Framework：電力貯蔵評価フレームワーク）は、以下の 5 つのフェーズから構成されている。

1. フェーズ 1：電力システムに一層多くの VRE を統合できるように電力貯蔵が提供できるサービスを同定。
2. フェーズ 2：フェーズ 1 で同定されたサービスを提供できる適格性の観点から電力貯蔵の様々な特性をランク付け
    - 適切ではない貯蔵オプションを分析対象から除外することがここでの目的
3. フェーズ 3：フェーズ 2 で同定されたサービスを提供する電力貯蔵の有効性について、エネルギー効率改善、DR、新規火力発電といった他のオプションと比較の観点からの評価・価値付け（システムレベルで電力貯蔵が提供するサービスがもたらす OPEX と CAPEX ベースの経済的利益の見積もり＝システム価値の見積もり）
    - ここで最適な貯蔵と他の柔軟性オプションが確定できたら、ここで利用された電力価格等のデータは次のフェーズ 4 でも再度利用することができる
4. フェーズ 4：実際の貯蔵プロジェクトについて、プロジェクトが市場価格の下でのプライステイカーである（＝フェーズ 3 で想定した市場価格をそのまま受容）との想定の上で運用を分析→プロジェクトが提供する様々なサービスとの組み合わせによって収益を最大化
    - このフェーズでは、電力貯蔵からの給電による収益の最適化を通じて、分析の焦点をシステムレベルから個別の貯蔵プロジェクトレベルにシフト

5. フェーズ 5：ライフタイムでの貯蔵プロジェクトの収益を算定し、当該プロジェクトが収益面から投資適格であるかを決定、あるいは不適格である場合は対応策をどのように同定するかを判断
    - このフェーズのアウトプットはプロジェクトレベルでの費用便益分析となるが、ここでの便益にはプロジェクトレベルとシステムレベルの双方のレベルの収益を含む（プロジェクトレベルだけでは収益が少なく投資適格性が得られないが、システムレベルでの収益を含めることで収益性が大きく向上し投資の適格性が得られる可能性があるが、旧来の市場ではこの部分が十分に評価されないことを示唆）。
    - フェーズ 3 でのシステム価値とプロジェクトベースでの収益との比較検討によって、プロジェクトの投資適格性が明らかとなり、さらに、旧来の古い設計のままの市場によって評価されない新しい技術への「ミッシングマネー問題」を解決するための規制措置等対策の検討が可能となる。

5. IEA “Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth”（2020 年 3 月発刊）

・本報告書は、バイオガスとバイオメタン[41]の原料賦存量に関する詳細な評価と世界各国の生産コストに基づいて、バイオガスとバイオメタン供給の持続可能なポテンシャルについて推定したものである。今後のグローバル・エネルギーシステムの転換の中でこれらのガスがどのように大きな役割を果たすか、政策立案者はどのような政策によってこれらのガスの持続的な成長を支援することができるかについて論じている。毎年発刊されている World Energy Outlook（WEO）における各シナリオによる 2040 年までのバイオガスとバイオメタンの需給の見通しをベースとしており、WEO の特別報告書と位置付けられている。概要は以下の通り。

≪バイオガスとバイオメタンの生産は、有機残渣と廃棄物を原料として収集し、それらをクリーンなエネルギー源へ転換する≫

・近代社会と経済は、クリーンなエネルギー源の生産に利用可能な大量の有機廃棄物を排出している。バイオガスとバイオメタンは異なるエネルギー生産物であり、それぞれの適用も異なるが、両者は様々な有機原料から製造されることや十分に利活用されていないといった共通点もある。これらのガスの生産と使用は、GHG 排出量の削減、廃棄物管理の改善、資

[41] ここでのバイオガスとは、無酸素環境での有機物の嫌気性発酵によって得られるメタンと CO2 等が混合したガスを指し、メタン含有率は 45%～75%程度で発熱量（低位）は 16～28 MJ/m^3 程度。同様に、バイオメタンとは、バイオガスから CO2 その他の不純物を除去して得られるアップグレード・バイオガス、あるいは固形バイオマスからのガス化とメタネーションから得られるほぼ純粋のメタンを指し、再生可能天然ガス（Renewable national gas）と呼称されることもある。こちらの発熱量（低位）は 36 MJ/m^3 程度で不純物が少ない分バイオガスより高い。

源効率性の向上といったサーキュラー・エコノミーの考え方を具現化したものである。加えて、バイオガスとバイオメタンは、地域コミュニティと地域産業をエネルギー転換へ統合してゆく方策にもなり得る。

≪バイオガスとバイオメタンの生産に必要な原料は豊富に存在しており、そのわずかな量だけが今日使用されているに過ぎない≫

・バイオガスとバイオメタンの持続可能な原料の世界的な賦存量に関する詳細なボトムアップ調査が本報告書のために実施され、その技術的なポテンシャルは膨大であるが現在ほとんど未利用であることが明らかとなった。その原料には、農産物残渣、家畜糞尿、都市固形廃棄物、下水汚泥があり、ガス化を通じたバイオメタンの直接製造には林地残材が含まれる。このポテンシャル評価の対象は、食料生産とは競合しない原料だけに限定している。2018年のバイオガスとバイオメタンの生産量は概ね 35 百万石油換算トンで、ポテンシャル全体からみるとわずかな量である。持続可能なポテンシャルを最大限利用すれば現在の世界のガス需要の 20%程度をカバーすることができる。

≪バイオガスとバイオメタンを生産できる可能性は世界各地に広く分布している≫

・世界中どこにおいても、バイオガスとバイオメタンを生産する大きな余地があり、持続可能な原料の賦存量は 2040 年までに 40%増加させることが可能である。最大のチャンスは天然ガスの輸入・消費量が急増しているアジア太平洋地区にある。また、北米、南米、欧州、アフリカにも大きな可能性がある。発展途上国の多くの地域において廃棄物管理と廃棄物収集の改善が実施されることで原料の賦存量の増加が想定され、世界全体でのバイオガスとバイオメタンのポテンシャルは今後 20 年間で急速に成長すると見込まれる。

≪バイオガスは家庭部門に対して、電気と熱の地域資源とクリーンな厨房用燃料を提供できる≫

・バイオガスは、メタン・CO2 その他の混合ガスで、発電、暖房、厨房需要に用いられる。その活用と競争力は世界の各地域の状況次第だが、バイオガスは、特に電力系統へのアクセスが困難、あるいは再エネ電力だけでは熱需要を満たすことが困難なコミュニティレベルのエネルギー・ニーズに対して持続可能な解を提供できる。この点は世界中どこでも共通である。途上国で厨房用燃料として広く使われている固形バイオマス（木材等）をバイオガスに代替することで、室内大気汚染による健康被害を緩和することができる。WEO の SDS（持続可能）シナリオでは、バイオガスは 2040 年までに、追加的に全アフリカの半分に相当する 2 億人の人々にクリーンな厨房用のエネルギーを提供することが想定されている。バイオガスは、CO2 やその他の混合物を除去することで、バイオメタンへアップグレードして活用することも可能である。

・バイオメタンへアップグレードすれば、バイオメタンはすべてのエネルギーシステムにおいて、ネットでの GHG 排出増加を伴わずに天然ガスと同等に利用できるという利点をもたらす。

・バイオメタンは、バイオガスから CO2 その他の不純物を除去して得られるアップグレードされたバイオガス、あるいは固形バイオマスからのガス化とメタネーションから得られるほぼ純粋のメタンのことを言う。従来の天然ガスと実質的に同一で区別できないことから、バイオメタンは天然ガス同様に輸送可能で、天然ガスが使用されている場所であればどこでも使用可能である上に、追加的な GHG 排出増加を伴わない。バイオメタンは IEA の各シナリオにおいても将来の急増が想定されている。バイオメタンは、重化学工業や貨物輸送といった既存の対策が困難な部門での GHG 排出削減をもたらし、既存のガス用インフラを低炭素社会へ適用可能とすることができる。このため世界の多くの地域においてエネルギー転換におけるエネルギー・セキュリティとコスト効率性を改善することができる。WEO の SDS（持続可能）シナリオでは、2040 年に約 10 億 t-CO2 の GHG 排出がバイオメタンによって回避できると想定されている。回避できる GHG 排出は、天然ガス燃焼に伴う CO2 排出の削減と有機廃棄物の分解から発生するメタン排出である。

≪バイオメタンのポテンシャルのほとんどは天然ガスよりコストが高いが、コスト差は年々縮小している≫

・いくつかの廃棄物埋立処分場ガス（LFG）を例外として、本報告書で対象としたほとんどのバイオメタンの価格は、天然ガス価格と比較して高価である。現在のバイオメタンの平均価格は約 19 ドル/MBtu＋ガス導管への注入コストである。しかし現在でも 30 百万石油換算トン（≅400 億 m^3）程度のバイオメタン（その多くは LFG）が天然ガスの国内価格を下回る水準で生産可能であると推定されており、この量は現在使用されているバイオメタンの 10 倍以上に相当する。このコスト差は、バイオメタンの生産技術が改善するに従って次第に縮小してゆくと見られている。とりわけカーボンプライシングが導入されている国では、天然ガスが相対的に割高となることでこの傾向は一層強化される。CO2 とメタン排出を回避できる価値は、バイオメタンのコスト競争力を長期的には高めてゆくことになる。

≪低炭素ガスはエネルギー転換に必須であり、バイオガスとバイオメタンのポテンシャルを引き出すための支援政策が求められる≫

・エネルギー転換を促進するためには複数の燃料と技術を加速させることが必要である。その中で、バイオメタンと低炭素水素に代表される低炭素ガスは、決定的に重要な役割を演ずる。最終エネルギーの 20%を占める電力消費は増加しているが、エネルギーサービス需要全体が増大しており、電力だけではエネルギー転換を進めることはできない。WEO の各シナリオにおいても、バイオメタンは低炭素ガスの最大供給者とされている。バイオガス・バイオメタン産業が今後進化するかは、原料の賦存量、市場条件、政策の優先順位によって国ごとに異なる。しかし、すべてのケースにおいて、バイオガスとバイオメタンの多様なメリットを実現するために、エネルギー、運輸、農業、環境、廃棄物といった横断的分野全体にわたる協調的な政策が必要である。

6. IRENA “Renewable Capacity Statistics 2020”（2020 年 3 月発刊）

・毎年この時期に発刊されている世界各国の再エネ発電容量の累積量を IRENA が再エネ電源別に各国毎にまとめた統計資料。今回の 2020 年版では 2019 年末時点のデータが直近データとして収録されている。概要は以下の通り。

・2019 年末時点で、世界の再エネ発電容量は累積で 2,537GW となった。その中で水力が 1,190GW と最も大きなシェアを占める[42]。水力以外では、風力が 623GW、太陽光が 586GW と残りの大半を占める。その他の再エネは、バイオマス 124GW、地熱 14GW、海洋 500MW である。

・再エネ発電容量全体は 2019 年に 176GW 増加した（対前年比 7.4%増）。このうち太陽光が 98GW（同 20%増）、次いで風力が 59GW（同 10%増）と再エネ全体の増加を牽引し続けた。水力の増加は 12GW（同 1%増）、バイオマスの増加は 6GW（同 5%）で、地熱の増加は 700MW を下回った。太陽光と風力が再エネ増加量の 90%を占めて、他の再エネを圧倒している。2019 年は水力の増加量が特筆して少なかったことが、太陽光と風力の存在感を一層高めた（下図参照）。

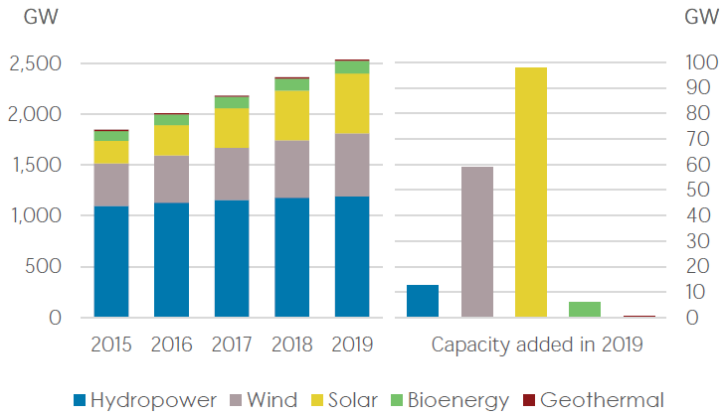


図 3　再エネ発電容量の累積値（左図）と 2019 年の増加量（右図）

・アジアは 2019 年再エネ増加量の 54%を占めた（2019 年のアジアの増加量は 95.5GW）。アジアの再エネ発電容量は 2019 年末に累積で 1,119GW に達し、これは全世界の 44%を占める。欧州と北米は、それぞれ 35GW（対前年比 6.6%増）と 22GW（同 6.0%増）の増加量であった。オセアニアと中東は絶対量でのシェアは小さいものの、増加スピードは最も速く、対前年比でそれぞれ 18.4%と 12.6%の増加であった。アフリカも、累積量では、アセアニアや中

[42] ここでの水力には揚水は含まない（＝IRENA の定義では、揚水は再エネには含まない）。揚水の発電容量は 121GW のため揚水を含む水力全体では 1,310GW となる。

東と概ね同水準の再エネ発電容量を有するが、2019 年増加量はわずか 2.0GW（対前年比 4.3%増）であった。2018 年と比較すると、アジアとアフリカでの発電容量増加は 2019 年よりわずかに少なくなった一方、欧州と北米では増大した。

・水力については、2019 年の増加量が 12GW と例年と比較して顕著に少なかった（2018 年の増加量は 21GW）。中国とブラジルがそれぞれ 4GW ずつ増加したのが大半を占める。

・風力については、2019 年増加量が 60GW と顕著な拡大の年となった（2018 年の増加量は 50GW）。中国と米国がそれぞれ 26GW と 9GW 増加し、引き続き全体を支配した。残りはドイツ、フランス、スペイン、スウェーデン、英国等 8 ヵ国において、それぞれ 1GW 強ずつ増加した。

・太陽光については、56GW 増加したアジアが引き続き世界の太陽光発電容量増加の 6 割を占めて他を圧倒したが、このアジアのシェアは 2018 年と比較すると低下傾向である（2018 年のアジアのシェアは 7 割）。中国（30GW）、インド（7.7GW）、日本（6.3GW）、ベトナム（5.6GW）、韓国（3.4GW）が 2019 年太陽光増加のトップ 5 か国で、次いで、米国、オーストラリア、スペイン、ウクライナ、ドイツである。中でも、スペイン、ウクライナ、ベトナムは 2018 年比で特に増加率が高かった国である。台湾、メキシコ、UAE においても 2019 年に 1GW 以上の増加が見られた。

・バイオマスについては、2019 年の増加量 6GW と概ね前年並みで目立った動きは少なかった。中国が 3.3GW 増とその半分以上を占め、次いで、トルコ（411MW）、日本（404MW）、イタリア（400MW）、ドイツ（324MW）が主要な増加国であった。

・地熱については、2019 年に 682MW の増加があり、2018 年の 548MW 増よりもわずかに多かった。トルコが 232MW と最大で、次いで、インドネシア（185MW）、ケニア（160MW）と続いた。

・オフグリッドについては、2019 年の増加量は 160MW（対前年比 2%増）で、累積にすると 8.6GW に達した。累積値ではバイオマスがオフグリッド発電容量全体の約 4 割を占めるがその増加スピードは遅い。2019 年の増加は太陽光発電が 112MW、水力が 31MW であったのに対して、バイオマスは 17MW に過ぎなかった。太陽光発電の発展がオフグリッド市場の新しいトレンドを形成している。極小規模の家庭用太陽光照明システム（ソーラーランタン等）の小売事業者は新しい市場へ進出し、既存市場の消費者は一層規模大きなシステムに移行しつつある。しかしながら、ミニグリッドは資金確保という課題に直面しているほか、いくつかの国では電力系統の拡張がオフグリッド発電への需要低下をもたらしている。

・再エネ発電への世界的なエネルギー転換の長期的なトレンドは下図から明らかである。

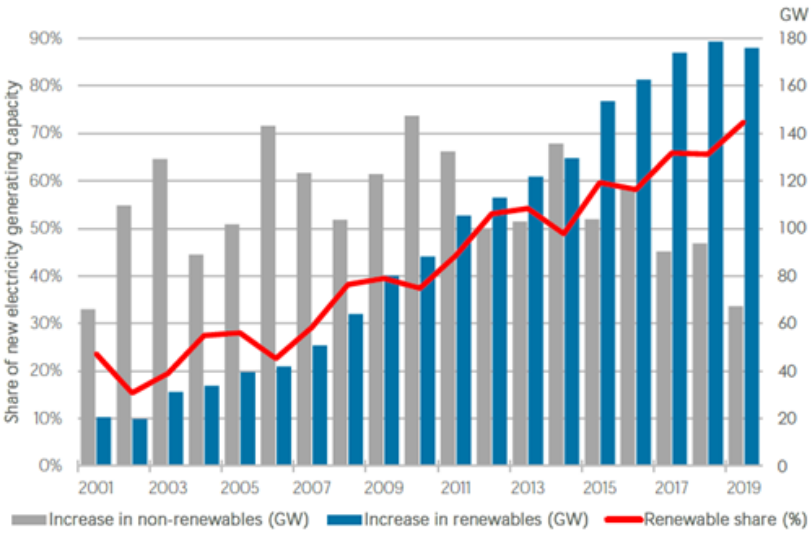


図 4　世界の発電容量（再エネと非再エネ）の年間増加量と再エネシェアの推移

・2019 年は、2001 年以降初めて再エネ発電容量の拡大がスローダウンした。しかし、2019 年は（化石燃料を含めた）すべての発電容量の増加量自体が少なく、特に非再エネの発電容量の増加は 2001 年以降で最低水準であった。このため、発電容量の増加量全体に占める再エネのシェアは上昇し続けており、2019 年には 72%に達した。同様に、発電容量の累積値全体に占める再エネのシェアも 2018 年の 33.3%から 2019 年の 34.7%に高まった。

・地域別にみると、2019 年の非再エネの発電容量は、アジア、中東、アフリカにおいてネットで増加したが、欧州と北米ではネットで減少した。2019 年の世界中のほとんどのエリアで発電容量増加の少なくとも 70%は再エネが占めた。例外は、アフリカと中東で、ネットでの発電容量増加に占める再エネのシェアがそれぞれ 52%と 26%であった。

IEA/IRENA 発刊の再エネ関連主要レポートの要約（2020 年 4 月～2020 年 5 月分）

1. IRENA “Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050”（2020 年 4 月発刊）

・ 2017 年発刊の “Perspectives for the Energy Transition”を皮切りに、2018 年発刊の”Energy Transformation: A Roadmap to 2050”、2019 年発刊の “Global Energy Transformation roadmap 2019 年版”と続いてきた IRENA による長期的なグローバル・エネルギー転換のロードマップ・シリーズの最新刊。概要は以下の通り。

・ 新型コロナウィルスのパンデミックによって引き起こされた社会経済の危機的状況に対しては、適切な社会・経済政策に裏打ちされた大規模かつ断固とした対応が必要である。各国が経済刺激策を検討する際には、持続可能性の確保やレジリエンスの強化、そして、国民の健康と福利厚生の課題に直面することになる。しかし、気候目標の達成に向けた社会の脱炭素への加速度的な取り組みの必要性は変わらない。

・この報告書で詳述するエネルギー転換のシナリオと追加的な脱炭素化の展望は、長期にわたる安定的な経済的成長のための持続可能かつ低炭素かつ Climate-safe な社会基盤の在り方を提示している。それは、より多くの雇用、より高い経済成長、よりクリーンな生活環境、大きく改善された福利厚生を確実なものとする。この野心的な取り組みは、2050 年までに世界のエネルギー起源 CO2 排出量の 70%を削減すること、そして、この CO2 削減量の 90%以上は再エネと省エネ対策の促進によって実現される。

・社会の脱炭素化を促進するための包括的な政策に支えられたエネルギー転換は、社会経済的な発展をもたらす。全体的なアプローチによって、エネルギーの脱炭素化と経済・環境・社会面の諸課題を並行して進めることができる。クリーンエネルギーに対する国際支援を含む「欧州グリーンディール」はこのような一つの事例である。2020 年のコロナ危機後の経済的刺激策を適切に活用することで世界を類似の方向に動かすことができる。

・究極的な気候ゴールは GHG 排出量ゼロである。この報告書では 2050 年を超えて CO2 排出量をネットでゼロ、ポテンシャルとしてはゼロまで削減する方策を探索している。水素、合成燃料、需要の電力化、次世代バイオ燃料、炭素マネジメント（＝新規・再植林、Direct air-capture 等の炭素の直接吸収（CDR）、BECCS（バイオマス CCS）、CCS、ブルー水素を含む CCUS 等炭素の直接制御を指す）そして、革新的ビジネスモデル、構造変化と行動変容が決定的に重要である。

・削減をかなり進めてもなお最後まで残り続けると考えられる CO2 排出がある。それは最も削減が困難で最も削減コストが高い CO2 排出である。具体的には、2050 年の時点でも、エネルギー集中産業、海運、航空といった部門においては依然として排出が続き、現状の CO2 排出量の 1/3 程度が残ると考えられる。この報告書で提示する一層深堀した脱炭素の見

通しは、このような排出削減が困難な部門から排出もゼロにしてゆくオプションを打ち出す。最後のストレッチとなるこれらの CO2 削減の 60%は、再エネ、グリーン水素そして、再エネをベースとする電力化によって実現されると想定される。

・エネルギー起源 CO2 排出は、過去 10 年間にわたって年率 1%のペースで増加してきた。新型コロナウィルスによる影響で石油需要が急減したことで 2020 年の CO2 排出量は一時的に減少すると見られるが、長期的にはリバウンドして排出増加トレンドに戻るとみられる。そうなる代わりに、ここで提示する「エネルギー転換シナリオ」（野心的だか現実的なエネルギー転換を再エネ拡大と省エネ推進で実現するシナリオ）では、パリ協定の目標に合致した地表気温上昇を 2℃以下とするための気候変動を緩和する道筋を提示する。そこには、再エネ目標の強化を含む各国の気候変動対策プレッジの継続的なアップデートのための方策も含まれる。

・エネルギーシステム転換の見通しでは、今世紀中頃までに現行計画で達成されると見られる水準よりも 2.4%高い GDP 成長が示唆されている。現在から 2050 年までの累積の便益は 98 兆ドルと見積もられ、これはエネルギーシステムの転換に必要とされる投資額を大きく上回る。これは「効率的な自己負担」と言い換えてもよい。なぜなら平易に述べれば、1 ドルの支払いに対して、3〜8 ドルのリターンが期待できるからである。「計画済みエネルギーシナリオ」（2019 年時点で現行のエネルギー開発計画あるいは NDC 等において公式に表明されているエネルギー開発目標に基づく本報告書のベースラインとなるシナリオ）と比較して「エネルギー転換シナリオ」は追加的に 19 兆ドルのコストが必要だが、それによってもたらされる追加的な便益は 2050 年までに少なくとも 50 兆ドルに達する。ネットゼロ排出の達成のための「深堀り脱炭素見通し」（The Deeper Decarbonisation Perspective）の場合はさらに 16 兆ドルの追加投資が必要となり（ネットゼロを超えて CO2 排出の完全ゼロまで目指す場合は 26 兆ドルの追加投資が必要）合計 45 兆ドルのコストをかける必要があるが、便益は累積で 62 兆ドル以上に達する。

・持続可能なエネルギーの将来を伴うエネルギー転換は、社会・経済開発の新しい様式を約束するものである。投資先の変化は、再エネに関連した雇用を 2050 年までに 42 百万人まで増加させる。これは現状の 4 倍以上の水準である。同様に、エネルギー関連産業全体の雇用は 2050 年までに現状よりも 40 百万人多い 1 億人となる。エネルギー転換の結果、経済全体の雇用は現状計画よりも 7 百万人多くなる。環境面、健康面そして全般的な福利厚生面での便益の拡大は、偏りなく世界中で実感されるようになる。大気汚染の緩和によって人々の生活全般は現状よりも改善され、エネルギー転換シナリオの下では 2050 年までに福利厚生指標は 13.5%高くなる。

・エネルギーと気候目標とを相互にリンクさせるために、世界の各エリアでの政策の野心度を引き上げることが重要である。再エネ、省エネ、電力化の３つが CO2 排出を大きく削減するためのアクションのための焦点となる。転換への道程には複数あるが、世界中すべてのエリアにおいて再エネのシェアが高くなる。特に、東南アジア、南米、EU、サブ・サハラ

以南アフリカの各エリアでは、2050 年までにエネルギー全体の 70～80%以上のシェアに達する態勢となる。同じように、熱や運輸といった最終エネルギー需要の電力化も世界中で上昇し、東アジア、北米、欧州の多くのエリアで 50%を超える。

・ 世界全体で見れば多くの利益を得るにも関わらず、エネルギー転換による経済構造や労働市場への影響は国・エリア、雇用の種類、部門によって異なる。再エネ、省エネ、その他エネルギー転換に関連した分野では雇用が増加する一方で、化石燃料等その他のエネルギー分野での雇用は減少する。しかし、公正な転換を確保する戦略によって個人やコミュニティへの歪みを最小化することができる。

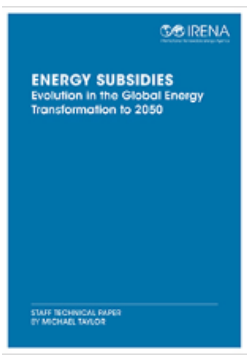
・世界のエリア毎に異なる社会経済の構造は、エネルギー転換の在り方にも影響を与える。影響の度合いに関連するのは、化石燃料への依存度、既存の産業生産性、技術の選択、国内サプライチェーンの多様性と深度といった要素である。エリアあるいは国の転換パス、制度構造、政策の野心度や政策の実行能力もまた 2050 年の結果を大きく変える要素となる。

・急速な脱炭素化には前例のない政策イニシアティブと投資を必要とする。「気候投資プラットフォーム」はパリ協定の目標達成に向けたクリーンエネルギーの取り組みを促進することを目的に 2019 年の国連気候行動サミットにおいて設立された。世界のエリア毎の投資フォーラムは、投資のための好条件形成と優良投資案件のプロジェクト組成と融資を支援することに役立つ。

・気候変動による大災害を回避するため、まだ間に合う時間内に世界レベルでのエネルギー転換を成し遂げるには強力な国際協調が必要である。各国政府と関係機関が幅広い野心的政策を実行してゆく中で、幅広い市民の合意を得ながら、特定の国やエリアへの著しい不利益の回避を確実にしてゆかなければならない。

・気候変動による災害危機を緩和できるか否かは、最終的には、実行される政策、その実施スピード、そしてその政策実現に向けたリソースの投入レベルの３点に依存する。今後の投資決定は低炭素経済の形成と両立できるかどうかの観点から評価されるべきであり、少なくとも脱炭素社会に向けた転換を阻害しないことが必要である。

2. IRENA “Energy subsidies: Evolution in the global energy transformation to 2050”（2020 年 4 月発刊）



・化石燃料、再エネ、そしてエネルギー部門全体に各国政府から投入されている補助金の金額について、その推定額を含む包括的な報告書。IRENA Innovation and Technology Centre（ボン）の Senior Analyst である Michael Taylor 氏の著によるテクニカル・ペーパー。概要は以下の通り。

・OECD と IEA のデータから、化石燃料への補助金については世界合計で 2017 年に少なくとも 4,470 億ドルと推定される。こ

のうち石油製品が2,200億ドルと最大を占め、電気料金を通じた化石燃料への補助金の1,280億ドルと続く。天然ガスと石炭への補助金はそれぞれ820億ドルと170億ドルと推計される。

・化石燃料への補助金は、多くの国において石油製品向けが多数を占める。2017 年に化石燃料への補助金額トップ 12 ヵ国（イラン、サウジ、中国、ロシア、インド、インドネシア、エジプト、ベネズエラ、英国、メキシコ、米国、イタリア）のうちの半数は石油製品への支援が大半を占めた。特にトップ 5 ヵ国の補助金総額は 1,890 億ドルとこの 5 ヵ国だけで世界全体の 42%を占める。同様に、トップ 10 か国では 2,720 億ドルで 2017 年の化石燃料への補助金の 61%を占める。化石燃料への補助金は特定の国々に集中していることが示唆されている（下図参照）。

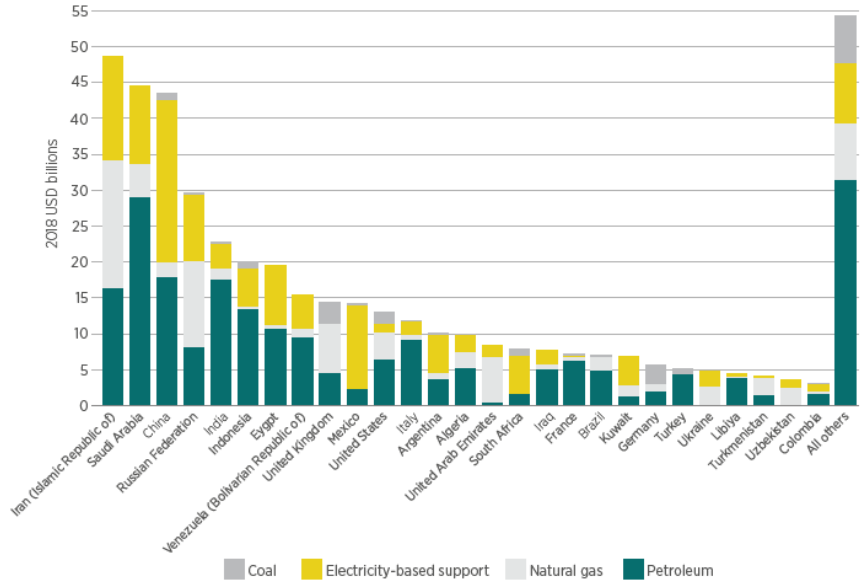


図 1　世界各国の化石燃料への補助金額

・再エネの供給側への補助金は、IRENA の推計で 2017 年に 1,660 億ドルと推定され、そのうち再エネ発電が 1,280 億ドル、バイオ燃料が 380 億ドルである。国別に見ると、EU が 900 億ドルで世界の再エネ補助金全体の 54%を占める。次いで、米国 230 億ドル（14%）、日本 190 億ドル（11%）、中国 160 億ドル（9%）、インド 38 億ドル（2%）、その他 15 億ドル（9%）と続く。対象別に見ると発電（再エネ発電）への集中が一部の特定の国で目立っており、特に日本（99%）、中国（97%）、EU（87%）、インド（76%）で際立って高い。他方、米国ではバイオ燃料向けが再エネ補助金の 61%を占めており、その他の国でも 71%と、世界全体で見ると再エネ補助金はバイオ燃料に集中している傾向が見られる。

・再エネやクリーンエネルギーを支援する Environmentally friendly 補助金は、エネルギー部門の資本配分の効率性を改善することができる。なぜなら、化石燃料の価格には大気汚染や

気候変動のコストは十分反映されておらず、そのコストがそのまま社会全体に転嫁される「外部性（あるいは外部経済）」によって資本配分に非効率が発生しているからである。化石燃料の燃焼に伴う大気汚染によってもたらされる健康コストは、2017 年には中央値で 2 兆 2600 億ドルと推計される。このうち気候変動コストは、CO2 排出コストを 11 ドル/t-CO2 と仮定した場合に約 3,660 億ドルと推計される。化石燃料の外部性のコストが燃料価格に十分反映されていない中で、再エネへの補助金は、再エネの化石燃料に対するコスト差を小さくすることで化石燃料への資本投資を再配分させる効果を持つ。

・再エネ補助金は増加したものの外部性による化石燃料価格とのインバランスは続いている。2017 年には化石燃料の（価格に反映されていない）外部性と化石燃料への直接的な補助金は総計で 3.1 兆円と推計され、再エネへの補助金の 19 倍の規模である（下図参照）。

）

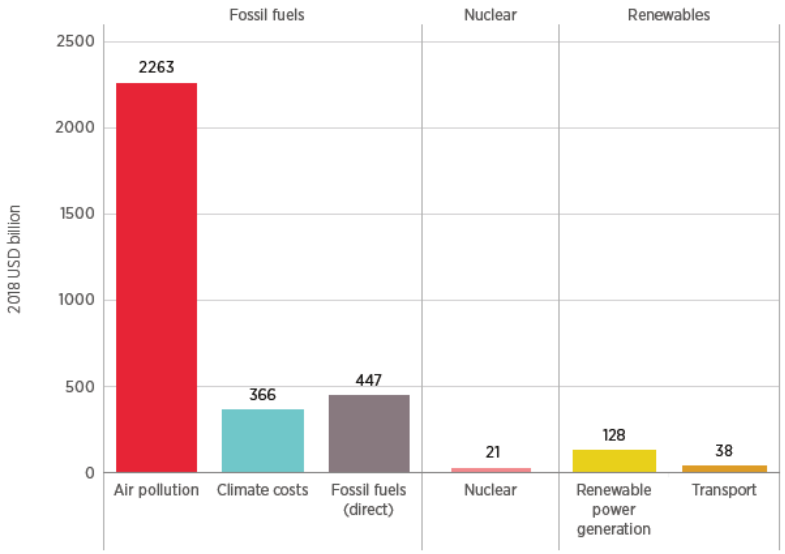


図 2 世界全体のエネルギー分野への補助金と気候変動、健康コスト（2017 年）

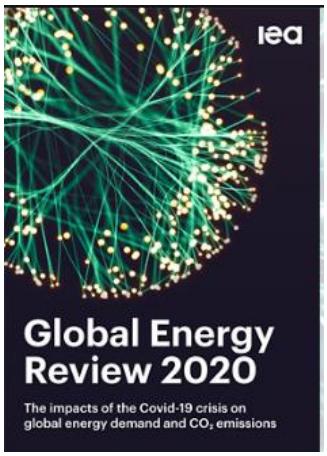
・世界全体での再エネ拡大加速のための技術的オプションを提示した IRENA の REmap によると、エネルギー部門への補助金は 2017 年の 6,340 億ドル/年から 2050 年 4,750 億ドル/年へ減少すると推計している。対照的に現行政策シナリオ（本報告書でのリフェレンス・ケース）では、2050 年に向けて石油と天然ガスの需要が増加し、単位当たりの化石燃料への補助金はほとんど減少しないことが想定されている。REmap における再エネ利用の増加は、リフェレンス・ケースよりも補助金を 2030 年に 3,410 億ドル、2050 年に 3,900 億ドルそれぞれ減少させる。累積すると、REmap ケースでは 2050 年までにエネルギー分野への補助金をリフェレンスケースとの比較で概ね 10 兆ドル減少させることができる。

・具体的には、化石燃料への補助金は 2017 年の 4,470 億ドルから 2030 年の 1,650 億ドルへ、さらに 2050 年の 1,390 億ドルへ減少する。既存の補助金プログラムは大きく減少し、2050

年までには化石燃料への補助金の 90%以上は産業部門の CCS の支援に向けられる。エネルギー部門の補助金全体に占める化石燃料のシェアは 2017 年の 70%から 2030 年 35%、2050 年 29%まで低下する。2050 年には産業部門の CCS への補助金は 1,260 億ドルに達し、これは製鉄部門、セメント、石油化学部門へ必要とされる補助金のそれぞれ 60%以上、23%、14%に相当する。

・他方、再エネ発電については、コスト競争力が急速に増してゆくことと、初期段階での太陽光発電への高い補助金が徐々に終了してゆくことから、REmap ケースでは、再エネ発電への補助金は 2030 年に 530 億ドルへ減少し、2050 年には実質的にゼロとなることが想定されている。再エネ発電に代わって、脱炭素化が一層困難な最終エネルギー需要部門での取り組みの必要性が高くなり、同部門の補助金に占めるシェアが次第に高くなってゆく。例えば、産業部門に対する補助金はリファレンスケースよりも高い水準の 1,660 億ドルに達し、そのうち 1,000 億ドルが省エネと再エネ熱利用の支援である。建築部門に対する補助金も 2050 年には 280 億ドルとなり、その 88%が再エネによる冷熱・厨房利用の支援となる。

3. IEA "Global Energy Review 2020: The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions"（2020 年 4 月発刊）



・Covid-19 の 2020 年エネルギー需要への影響を分析した臨時報告書。石油、石炭、天然ガス、電気、再エネ、原子力、CO2 排出等を包括的に取り扱っている。再エネ関連部分の概要は以下の通り。

・再エネは、現在までのところ、Covid-19 によるロックダウンの影響に対してもっともレジリエンスのあるエネルギー源である。特に再エネ電力にはほとんど影響が見られない。しかし、バイオ燃料等発電以外の他の再エネへの需要は低下している。

・2020 年第 1 四半期の再エネ全体の消費量は、2019 年第 1 四半期と比較して 1.5%増加した。特に再エネ発電量は約 3%増加している。2019 年に太陽光と風力発電設備がそれぞれ 100GW と 60GW と大量に導入されたこと、限界発電費用の安い太陽光・風力は他の発電源よりも優先給電される傾向があること、2020 年第 1 四半期は欧州と米国で風況が良好であったこと等がその背景にある。

・電力需要全体が減少している中で再エネ発電のシェアが大きくなっている。2019 年第 1 四半期の再エネシェアは 26%であったが、2020 年同期は 28%まで増加した。この増加は主に、発電全体の 60%近くを占める石炭と天然ガスの発電コストに対する再エネのコスト優位性からもたらされた。2020 年第 1 四半期の自然変動再エネ（太陽光と風力）のシェアは 2019 年同期の 8%から 9%へ増加した。このため、送配電事業者は太陽光と風力の高シェアの中で系統運用を行うようになっている。

・2020 年第 1 四半期に、再エネ産業は、サプライチェーンの混乱とロックダウンに伴う設

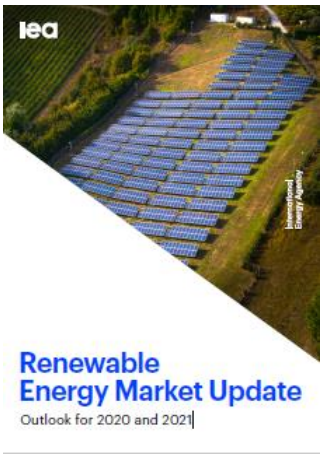
備器機の設置中止や遅延に直面した。世界の太陽光パネル生産の 70%以上を占める中国では一時的な生産中止や減産が発生していたが、既に生産が大きく回復してきており、長期的な影響は限定的と見られる。他方、風力のサプライチェーンの混乱は中国一国だけでなく欧州、インド、米国等世界各国に広がっており、生産中止や減産は 3 月まで続いている。特に 2 月から 3 月の混乱が大きかったが、いくつかの国ではロックダウンの緩和が始まっており、生産の回復が期待されている。

・バイオ燃料は輸送需要減少の影響を直接受けて、ブラジル、EU、米国におけるエタノールとバイオディーゼル生産量は減少している。特に米国のエタノール生産量は 2 月～4 月初旬にかけて約 50%減と大幅な減少となっている。バイオ燃料のストックが増加していることから、バイオ燃料の価格も下落し、バイオ燃料生産の収益性を大きく低下させている。

・2020 年 1 年間を通した世界の再エネ消費量は、対前年比で約 1%増加すると予測している。再エネ設備器機の設置中止や遅延をもたらすサプライチェーンの混乱が主要国で発生しているものの、太陽光、風力、水力発電の設備容量増加によって 2020 年の再エネ発電量は対前年比で 5%近く増加すると想定される。Covid-19 による混乱が発生する以前に発表した増加予測量と比較すると低い値となるが、2016 年以降の落ち着いた増加トレンドと概ね同じラインである。結果として、2020 年の発電量全体に占める再エネ発電のシェアは 30%近くまで達すると見られる。

・2020 年には太陽光発電はどの再エネよりも高い増加が予測される。しかし、ロックダウンによって建築物へのアクセスが制限されることで新規設置の中止や遅延が多発している分散型太陽光の増加量には不確実性が伴う。2019 年に新規設置された再エネ発電設備容量の 1/5 は分散型太陽光でありその不確実性の影響を注視する必要がある。

4. IEA “Renewable Energy Market Update Outlook for 2020 and 2021”（2020 年 5 月発刊）



・2019 年 10 月に発刊された IEA の再エネ市場レポート“Renewables 2019”における 2020 年と 2021 年の再エネ市場予測を Covid-19 による影響を踏まえて改定した臨時報告書。概要は以下の通り。

・Covid-19 は世界の再エネ発電容量に痛み（Hurting）を与えたが停止（Halting）はもたらさない[43]。Covid-19 の影響で、2020 年の再エネ発電設備の年間の新規設置容量はここ 20 年間で初めて減少に転じる。しかし、各国政府による支援政策が維持されることを前提とすると、2021 年には遅延していた新規プロジェクトが回復してくることで再び増加に転ずると想定される。

・2020 年の再エネ発電の新規設置容量（年間増加量）は 2019 年比で 13%減少すると推計さ

[43] エネ研注：英語特有の韻（Hurting と Halting）を踏んだ表現。

れる。この減少は、サプライチェーンの混乱、設置工事の遅延、都市のロックダウン、ソーシャルディスタンス、ファイナンスの混乱等によって引き起こされる。年間増加量は 2019 年比で減少するものの、2020 年末時点の再エネ発電容量の累積値は 2019 年比で 6%増加する。

・2021 年には再エネはそのレジリエンスを発揮する。遅延していた多くの再エネプロジェクトが再び正常ラインに復帰し、2021 年の新規設置量のリバウンドが起きる。その結果、2021 年の再エネ発電容量の年間増加量は概ね 2019 年の水準に復帰する。このリバウンドにも拘らず 2020 年と 2021 年の合計した 2 年間の再エネ発電容量の増加量合計は、2019 年 10 月時点での予測値と比較すると約 10%の減少となる。

・2020 年の再エネ発電容量の 88%は太陽光と風力によって占められるが、年間増加量は 2019 年比でそれぞれ 18%と 12%減少する。計画されている大規模太陽光発電と風力の多くは既にファイナンスが完了し建設の準備が開始されているので早期に正常ラインに復帰してくると見られる。他方、2020 年にファイナンス・クローズが予定されていたり、2021 年以降に運用開始だったプロジェクトの予測には不確実性が伴う。加えて、2021 年の太陽光発電容量の増加は、分散型太陽光の復帰が大幅に遅れると見られることから、2019 年の水準に接近はするがわずかに及ばないと想定される。分散型太陽光の主たる設置主体である家庭と中小企業は、Covid-19 の影響から投資判断を再考する可能性が高いからである。

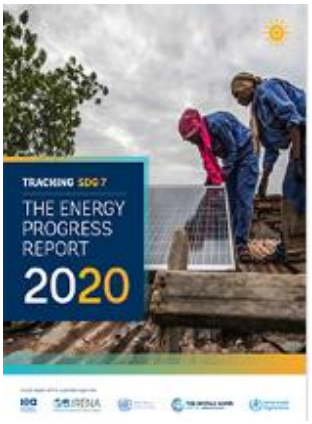
・水力、洋上風力、地熱といったリードタイムの長い再エネ発電への Covid-19 の影響は限定的である。例えば、洋上風力の多くは既にファイナンスが付いており、建設に着手していることから、その予測値は 2019 年 10 月時点の予測からほとんど変化しない。

・再エネ発電とは対照的に、Covid-19 はバイオ燃料に大きな悪影響を及ぼしている。運輸用バイオ燃料の生産量は 2020 年に 13%減少すると見られる。過去 20 年間で生産量の減少は初めてのこととなる。ガソリン需要と軽油需要は 2020 年にそれぞれ 9%と 6%程度減少する見込みであり、これらに混入義務のあるバイオ燃料消費量の減少に直結する。輸送用燃料の需要が 2021 年にリバウンドすればバイオ燃料の消費量も 2019 年の水準まで復活する。しかし、その場合でも 2021 年のバイオ燃料の生産量は Covid-19 以前と比較して 5%程度低い水準に低迷すると想定される。

・2020 年の年初時点で、ファイナンス、政策の不確実性、系統統合といった様々な課題に再エネは既に直面していたが、Covid-19 はこれらの課題に一層の拍車をかけた。しかし、Covid-19 に対する経済対策のメニューに再エネへの投資促進を効果的に盛り込むことで、政府はこの事態の収拾に適切に対応することができる。CO2 排出削減やイノベーションの促進と共に新たな雇用の創出や経済的発展といった再エネのもたらし得る便益を最大限引き出すことが期待される。

IEA/IRENA 発刊の再エネ関連主要レポートの要約（2020 年 5 月～2020 年 7 月分）

1. IRENA “Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2020”（2020 年 5 月発刊）



・SGD7（2015 年に国連総会で採択された A/70/L.1 ”Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development”に列挙されている 2030 年 SDG のうちの目標 7:Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all のことを指す）の進捗状況について評価する年次報告書である。2018 年以来この時期に定期的に発刊されている。目標：7.1 ユニバーサルアクセス、目標 7.2：再エネ、目標 7.3：エネルギー効率、目標 7A：国際公的金融のうち、目標 7.2 再エネ（By 2030, increase substantially the share of renewable energy in the global energy mix）に関連する部分の概要は以下の通り。なお、本報告書に提示されたデータと分析は Covid-19 パンデミックが発生する前の状況を前提としてまとめられている。

・世界の最終エネルギー消費量に占める再エネシェアは 2017 年には 17.3%となり、2010 年の 16.3%、2016 年の 17.2%からそれぞれ増加した（下図参照）。世界の再エネ消費量の増加率（2017 年 2.5%）が最終エネルギー消費量の増加率（2017 年 1.8%）を上回るトレンドが 2011 年以降継続しているからである。この再エネシェア増加は近代的再エネ（Modern Renewables：薪炭等伝統的バイオマスを除く再エネ）の消費量の増加に牽引されている。近代的再エネの最終エネルギー消費に占めるシェアは 2010 年の 8.6%、2016 年の 10.3%から、2017 年には 10.5%まで増加している。図 1 において 2000 年から 2007 年にかけて観測される再エネシェアの低下トレンドは、同時期に主要な新興国で石炭を中心とする化石燃料消費が急増する中で相対的に再エネが伸び悩んだ結果である。2011 年以降再エネ発電の増加によって再エネシェアは上昇トレンドに変わったことが示されている。

・再エネ消費の増加の最大要因は発電部門である。世界の発電部門の再エネシェアは 2017 年に 24.7%に達し、熱部門の再エネシェアを初めて超えた。2017 年の再エネ発電量の 6%近い成長率は太陽光と風力発電の拡大によってもたらされた。2017 年は世界的に水力の発電量が少なく 6%の成長率となったがその前年は 2016 年は 8%と高い成長率であった。

・世界の熱部門の最終エネルギー消費に占める再エネシェアは 2017 年に 23.5%に達した。この増加は主に近代的再エネの拡大によるが、伝統的バイオマスは依然として世界の熱消費の 14%を占めている。

・世界の運輸部門の最終エネルギー消費に占める再エネシェアは 2017 年に 3.3%であり、そのほとんどはバイオ燃料（メタノールとバイオディーゼル）である。同部門の再エネ電力のシェアはわずか 0.3%であった。

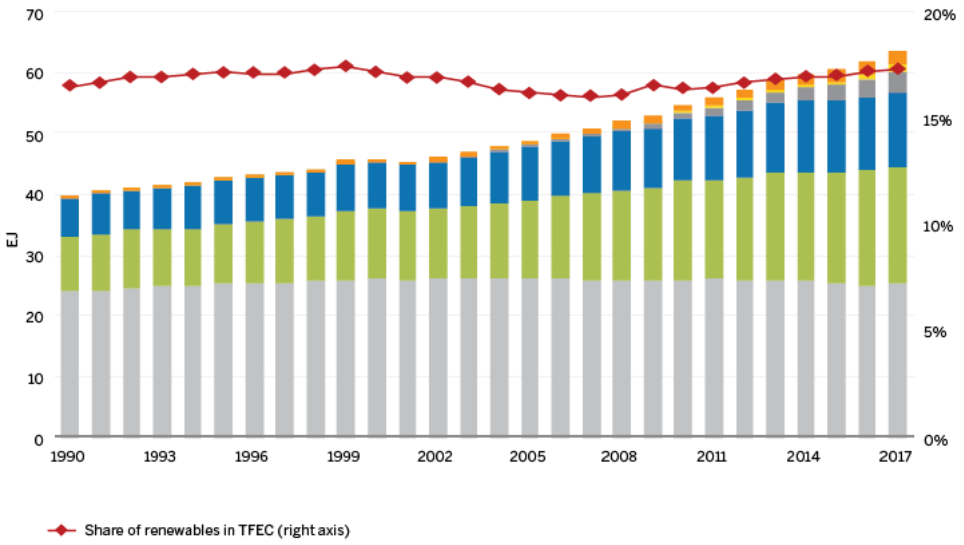


図１　再エネ消費量（左軸）と最終エネルギー消費全体に占める再エネのシェア（右軸）

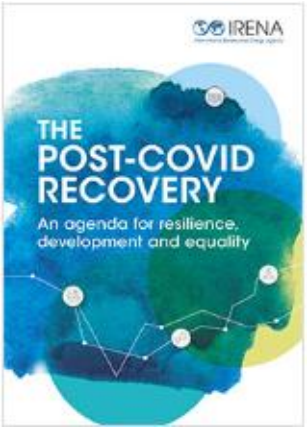
・再エネ消費にはいくつかの重要な地域差が見られる。2017 年の最終エネルギー消費に占める再エネシェアが著しく高かったのはサブサハラ・アフリカである。しかしながら、このエリアの再エネ消費の約 85%は伝統的バイオマスに依存している。伝統的バイオマスは室内大気汚染による深刻な健康被害をもたらしており持続可能ではない。他方、南米とカリブでは、発電、熱、運輸の各部門で近代的バイオマスの利用が定着しており、近代的再エネのシェアが世界で最も高いエリアとなっている。

・国レベルに目を向けると、最終エネルギー消費に占める再エネシェアは、再エネ資源賦存量、再エネ支援政策、エネルギー需要に対するエネルギー効率の進展等によって各国で大きく異なっている。2010 年から 2017 年の間に、世界のエネルギー消費量上位 20 ヵ国のうち 13 ヵ国で最終エネルギー消費に占める再エネシェア（伝統的バイオマスを含む）が拡大した。とりわけ英国では 3 倍と劇的な増加となった。20 ヵ国のうち先頭を走るのはブラジルであり、最終エネルギー消費に占める近代的再エネのシェアは 45%であり、次いでカナダの 23%である。中国は再エネ消費量の絶対値では圧倒的な 1 位であるが、再エネシェアで見ると 13%と中位クラスである。中国の最終エネルギー消費に占める再エネシェアは減少傾向であるが、これは同国での伝統的バイオマスの利用が減少していることが主因である。

・2030 年までに SDG7 を達成するために十分な水準まで最終エネルギー消費に占める再エネシェアを高めるために、最終需要の脱炭素化、とりわけ熱と運輸部門での電力化の加速が必要である。適切な支援政策の下での IEA の持続可能シナリオ（SDS）は、発電部門の再エネシェアを 50%まで高めることで、最終エネルギー消費に占める近代的再エネのシェアを 2030 年までに 23%まで増加させることができることを示唆している。IRENA の 2030 年エネルギー転換シナリオは、最終エネルギー消費に占める再エネシェアを 28%、そして、発電に占める再エネシェアを 57%と一層高い再エネの拡大を描いている。

・再エネの展開のための政策的支援は世界各国における共通の取り組みとして定着してきた。特に、競争的入札を通じた低価格での再エネ電力の調達は 2014 年以降各国で急速に拡大し、雇用拡大や地場産業の育成といった社会経済的政策にも有用であることが明らかとなった。2018 年までに 106 ヵ国が再エネ入札を導入している。適切な政策が実施されれば、再エネは SGD7 の達成だけでなく、SGD8（Decent work：十分な収入を生み、適切な社会保護が供与されたやりがいのある生産的仕事）といった他の SGD の達成にも資する。IRENA の分析によれば、再エネに関連した雇用は 2012 年の 7.3 百万人から 2018 年 11 百万人に増大し、2030 年までにさらに 3 倍に増加すると推定されている。

2. IRENA “Post-COVID recovery: An agenda for resilience, development and equality”（2020 年 6 月発刊）



・Covid-19 パンデミックを踏まえて、今後各国政府によって実施される短中期的な景気刺激策、そして、2030 年までの中期的な経済回復を目的とする投資と政策決定について、脱炭素エネルギー転換を進める観点からの提言をまとめた報告書である。概要は以下の通り。

・Covid-19 がもたらしたグローバル経済への悪影響は再エネにも及んでいるが、それでも再エネは他のエネルギーと比較すると相対的にレジリエントであることが明らかとなった。運輸と産業部門のエネルギー需要が大きく減少したことで、化石燃料はもっとも大きな打撃を受け、石油価格は急落した。その後石油需要は回復の傾向を見せているが、価格のボラティリティと長期的な投資計画の実行可能性について不安が高まったままである。他方、再エネのシェアが高まっている電力システムは効率的な運営が継続されている。

・経済復興刺激策に効率的に取り込まれることによって、エネルギー転換は先見の明のある投資となる。今回の Covid-19 禍によって、化石燃料への依存とエネルギーアクセスへの著しいギャップに代表されるように現状のシステムが既に時代に適合していないことが明らかとなった。エネルギー転換に焦点を当てた投資パッケージは、短期そして長期にわたる経済的停滞の打破と多様な雇用の創出に有用である。

・短期的な経済回復と中長期的な戦略とのリンクが SDG とパリ協定の目標達成のために非常に重要となる。本報告書で提示したポスト Covid-19 における復興策は、国連の 2030 年 SDG 達成に歩調を合わせており、気候変動による大災害を回避するための CO2 排出削減の決定的なフェーズとなる。それは我々のエネルギー生産・消費の在り方の根本的なシフトを促し、長期的なエネルギー転換をもたらす。

・経済復興や刺激策としての政策や投資は、レジリエントな経済や社会を構築するためのステップとして国のエネルギー転換を促し、戦略の広範な構造的シフトをもたらす。エネルギ

ー転換の影響を十分に理解するために、そして、エネルギー転換のタイミングと公正さを確実なものとするため、エネルギーは経済全体の中心的な部分として捉えなければならない。
・エネルギー転換への投資は、2021 年～23 年のポスト Covid-19 回復期を通じて経済を活性化させ、広範な雇用を増大させる。経済刺激策は既に動き出している前向きなトレンドを加速させることができる。再エネそしてエネルギー転換に関連した技術は 2019 年には 8,240 億ドルの投資を集めた。このような投資は 2021 年～23 年の景気回復期には 2 倍以上の 2 兆ドル近くに達し、2030 年までの 10 年間では年平均で 4.5 兆ドルまで増加し続けると見られる。政府ファンドには民間投資を 3～4 倍程度増加させるレバレッジ効果があり、適切な方向でのファイナンス決定への誘導を戦略的に行うべきである。
・投資プログラムやファンドプロジェクトと並んで機関投資やグリーンボンドも不可欠となる。Covid-19 パンデミックは持続可能な資産に対する投資家の関心を鋭敏にさせた。機関投資家は今後の回復期あるいはそれ以降も再エネに投資を集中させる傾向を強めると見られる。気候変動の回避と投資ポートフォリオを整合させるため、新たな規制需要と信託基準を踏まえた投資への準備を投資家は進めてゆくことだろう。
・最初の 3 年間の経済復興策の中で社会経済的な便益が増大するのと並行して、エネルギー転換が加速されることになる。必要な投資と機敏な復興策が適切に実行されれば、エネルギー転換によって世界の GDP を今後 3 年間にわたって（現状の計画と比較して）平均 1%以上押し上げる効果が期待できる。
・2030 年までの再エネあるいは電力系統＋柔軟性に対する百万ドルの投資は少なくとも 25 人の雇用を生み出す（正確には再エネ 28 人/百万ドル、電力系統＋柔軟性 26 人/百万ドル）。同様に、エネルギー効率改善への投資は約 10 人の雇用を生み出すと推定される。IRENA のエネルギー転換シナリオの下での追加的な投資刺激によって、エネルギー転換関連技術は 2023 年までに、BAU シナリオと比較して世界で 5.5 百万人以上の追加的な雇用を創出すると見られる。追加的な雇用の内訳は再エネ 2.46 百万人、エネルギー効率改善 2.91 百万人、電力系統＋柔軟性 0.12 百万人である。これらの雇用創出は化石燃料と原子力部門での雇用減少 1.07 百万人を補って余りある水準である。
・エネルギー転換は、現在化石燃料関連の雇用が集中している国々を含めて世界のすべてのエリアで雇用の純増をもたらす。エネルギー転換は、化石燃料関連の雇用を他に切り替えてゆく有効なオプションであると共に、他の産業の熟練及び非熟練労働者の双方に新しい雇用機会を提供することができる。このような便益は、地場産業のキャパシティとサプライチェーンの強化、適切な教育とトレーニングプログラム、適切な労働市場の形成如何にかかっている。前向き（Forward-looking）な産業政策は先進国・途上国問わずにグリーン産業を形成することができる。
・投資を今開始すれば、再エネ発電を従来の計画値と比較して 5 倍速く増大させることができる。このような再エネ発電の急増には、巨大なアップフロント支払いや既存アセットの費用効率的な再評価が求められる。例えば、競争力が最も低い 500GW 分の石炭火力発電所を

廃止し、大型太陽光と陸上風力に代替することで、年間のシステム全体の発電費用を 230 億ドル削減することができることを IRENA の費用分析は示唆している。

・レジリエントなエネルギーシステムへの決定的な移行か、あるいは持続可能ではない慣行の永続的なロックインに耐えてゆくのか、向こう 3 年間にわたる Covid-19 からの復興策はそのいずれかの方向のトリガーとなる。短期的な緊急事態にも焦点を当てつつ気候変動に対応した全体的アプローチは、複数の便益をもたらす公正なエネルギー転換への準備ともなる。

・既存あるいは建設中の大規模再エネ発電設備や分散型再エネ発電への投資、再エネ大量導入を踏まえた系統インフラといった再エネ発電関連プロジェクトは保護されなければならない。再エネ発電と並んで、供給側産業（蓄電池工場等）、Enabling インフラ（スマートグリッド、グリッド増強、EV チャージャー、地域冷熱供給、水素等）、エネルギー効率改善、最終エネルギー需要の電力化は経済復興策によって活性化される。

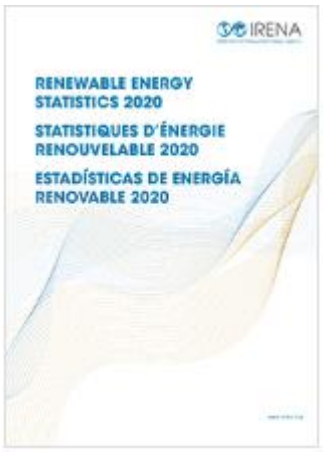
・Covid-19 パンデミックに対する短期的な対応として実施されるエネルギー投資は、再エネとエネルギー効率改善の野心的な長期目標に対する強力な支援となり得る。現在提出されている各国の NDC における再エネ目標は、既に顕在化している再エネの市場トレンドと比較して遅れている。再エネ発電容量が 2015～18 年と同じペースで継続的に増加したとするなら、その蓄積量の 2030 年目標は 2022 年には達成されてしまう。市場の成長と再エネベースの Covid-19 経済復興策は次回 NDC 更新の際に反映されることが望ましい。

・短期的な経済復興策は、エネルギー需要の大きなシェアを占める熱や運輸部門のエネルギー転換も促進することができる。ポスト Covid-19 経済復興パッケージは、建築物におけるエネルギー効率改善と並行して、再エネベースの冷熱システムや電動化モビリティ、バイオマスやグリーン水素をベースとした輸送用燃料を包含することができる。EV チャージングや水素製品のための電解を含む最終エネルギー消費インフラの急速な電力化もまたエネルギーシステムの脱炭素のための必要条件でもある。

・経済復興やエネルギー転換の目的と産業界の経済的能力との整合を確実なものとするために、投資決定は政策と手を取り合って実行されなければならない。投資の増大と並行して、熟練労働者プールの拡大、サプライチェーンの構築、既存の製造能力を拡大させるように慎重な政策的配慮が必要である。

・公正なエネルギー転換とするため、労働政策や社会的保護政策は各国の国情に応じて適切に選択され実行されなければならない。労働市場への介入は、雇用サービス（資格のある求職者に対する雇用マッチング、職業訓練、セーフティネットの拡充）その他労働市場の流動化促進に必要な諸政策を含む。雇用促進プログラムは、エネルギー転換に有効活用が可能な化石燃料従事者のスキル維持の支援にも向けられる。社会のポテンシャルを最大限引き出し、置き去りにされる者がいないことを確実にするため、社会的公平性、とりわけジェンダーに係る諸課題は政策設計の中心的課題として位置づけられなければならない。

3. IRENA “Renewable energy statistics 2020”（2020 年 7 月発刊）



・2020 年 3 月に発刊された IRENA“Renewable Capacity Statistics 2020”は 2019 年末までの世界各国の再エネ発電容量をまとめた統計だが、それに各国の再エネ・エネバラ表（2017 年と 18 年）、SDG7.a.1 指標を含む再エネへの公費投入量を加えて再編した統計資料。日本の再エネ・エネバラ表は未掲載。概要は以下の通り。

・2018 年の世界の再エネ発電量は 6,586TWh であった。うち 62.9%を水力が占め、風力（19.2%）、太陽光（8.5%）、バイオマス（7.9%）、地熱（1.3%）、海洋（0.02%）と続く。バイオマスのうち 70%は固形バイオマスで占められ、17%はバイオガス、12%はプラスチックを除く都市廃棄物、1%が液体バイオ燃料である。

・2018 年の再エネ発電量は 2017 年の 6.1%に相当する 376TWh 増加した。太陽光と風力の発電量は対前年比でそれぞれ 28%と 11%増加した。2018 年には太陽光発電量が初めてバイオマス発電量を抜いて、水力、風力に続く 3 番目に大きな再エネ発電源となった。近年の太陽光と風力の増加の勢いは目覚ましく、2014 年以降の再エネ発電量の増加の 73%はこの 2 つの再エネ電源によって占められている（下図参照）。

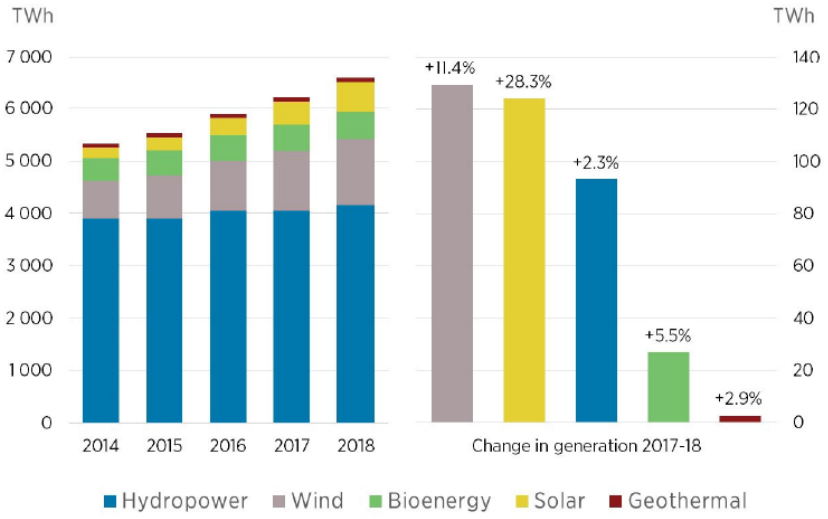


図 2　世界の再エネ発電量（左図）と 2018 年の再エネ発電増加量（右図）

・ここ近年、再エネ発電量の増加で世界を圧倒しているのが 2018 年に 219TWh 増加したアジアで同年増加量の 58%を占めた。世界の再エネ発電量に占めるアジアのシェアも 40%近くに達している。欧州と北米はそれぞれ 20%のシェアで、続いて、水力が比較的多い南米の 12%、ユーラシア（＝ロシア、トルコ等）の 5%と続く。世界の太陽光発電量の半分以上

を占め、2018 年には風力発電量でも欧州を 56TWh 上回ったアジアは、世界の風力と太陽光の発電量の拡大を牽引し続けている。

・世界の発電量に占める再エネのシェアは 2017 年 24.4%から 0.5%ポイント高い 24.9%であった。この再エネシェア増加は過去数年と比較すると低いペースであるが、これは 2018 年に北米とアジアで火力発電が比較的大きく増加したことに起因する。

・2018 年の再エネへの公費投入量は、2017 年比で 31.2%低い 210 億ドルとなった。2017 年にいくつかの単年の大規模公的投資があったことがこの前年比減少をもたらした。途上国の再エネ及びクリーンエネルギー投資を含む SDG7.a.1 指標額は 2017 年に 214 億ドル達し、前年比で 13%増加した。

4. IEA “World Energy Investment 2020” （2020 年 5 月発刊）

・Covid-19 の影響を踏まえた 2020 年のエネルギー分野への投資動向について分析した報告書。化石燃料のアップストリープから省エネまでエネルギーの多岐にわたる分野をカバーしている。再エネ発電に関連する部分の概要は以下の通り。

・2019 年の小幅な減少に続いて、2020 年の世界の発電部門への投資額は Covid-19 の影響を受けて 2019 年比で 10%の減少と過去 10 年間で最大の落ち込みとなる見込み。特に火力発電への投資は、卸電力価格の低下と電力需要減少によって、世界全体で 2019 年比 15%減と特に大きく落ち込むと見られる。

・新規の再エネ発電設備への投資額も、ロックダウンが発電設備のサプライチェーンや建設計画、需要予測に影響を与えた結果、2019 年比で 10%減少すると予測される（下図左図参照）。但し、再エネ発電（特に太陽光発電）のコストが継続的に低下していることから投資額の減少は必ずしも設置される発電容量が減少することに直結しない（下図右図参照）。

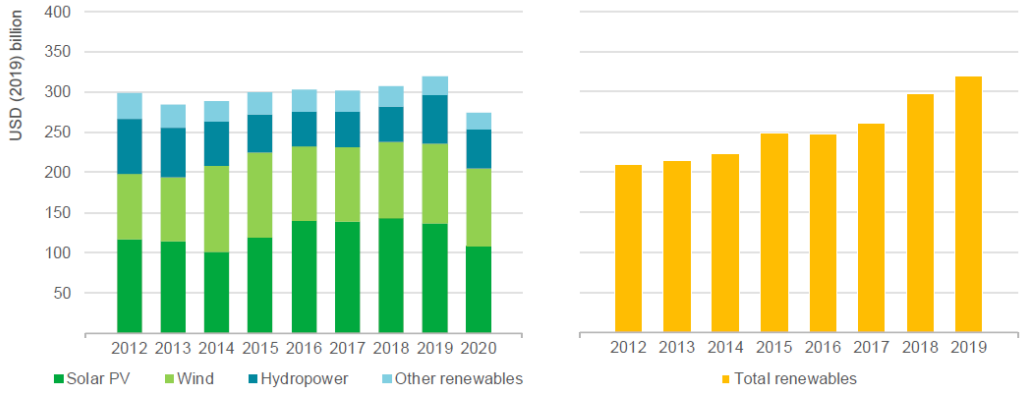


図 3　再エネ発電への投資額（左図）と同 2019 年水準コスト固定ケース（右図）

・再エネの中でも Covid-19 の影響が特に深刻なのが分散型太陽光発電である。分散型太陽光の主な投資主体である一般世帯や企業が支出を大きく削減したこと、ロックダウンによって建物にアクセスすることができず設置工事の大きな混乱に直面したことがその理由である。他方、大規模太陽光や風力発電プロジェクトへの影響は比較的軽微であり、その投資額は太陽光発電の継続的なコスト低下の影響を受けた減少となる。いずれにしても、2020 年 Q1 の大規模太陽光と風力発電への最終投資決定額（FIDs）は 2017 年 Q1 の水準まで低下した。リードタイムが長い再エネ技術、すなわち洋上風力や水力への投資額は（いくつかの国では遅延リスクがあるものの）世界中で既に進行しているプロジェクトに喚起される形で増加が想定されている。例えば、中国では 2 つの大規模な水力発電プロジェクトが竣工する予定である。

・電力系統への投資額も 2020 年には 9%の減少が見込まれる。国営企業による投資が大多数を占める途上国では Covid-19 による減少が一層顕著である。なぜなら多くの国営企業の経営基盤は Covid-19 危機以前から相当に弱体化しており、今回の危機で一層の悪化が確実だからである。しかしながら、レジリエンスや信頼性を維持するために米国や欧州において継続的な系統増強が実施されていることや中国での新たな支援が開始されることに牽引されて、世界全体での電力系統への投資額減少は発電と比較して軽微と想定される。

・長期的な目標達成への発電分野の貢献を評価する場合に、発電投資のエネルギー全体へ影響を理解することが重要である。2019 年には、低炭素電源への投資から想定される発電量の増加が電力需要の増加を過去 5 年間で初めて上回った。この現象の背景には 2019 年の世界的な電力需要の伸び悩みがある。しかし、2020 年には、Covid-19 パンデミックによって電力需要がさらに 5%減少することが見込まれる。同時に、大量に新規導入されている太陽光と風力といった低炭素電源からの発電量の増加も想定される。2020 年に同時に顕在化すると見られる電力需要減少と低炭素電源からの発電量の増加については慎重に捉える必要がある。

・なぜなら現在の投資水準は持続可能な長期的パスと整合していないからである。IEA の持続可能シナリオ（SDS）の下で今後 10 年間にわたって必要とされる年間平均投資額と比較すると、発電部門への 2019 年の投資額は約 35%低い水準にとどまる。エネルギーセキュリティを維持しつつ持続可能な目標を達成するためには、より一層多くの低炭素電源への投資を確保しなければならない。再エネが大量導入されたシステムが十分な柔軟性をもって運用されること確実にするためには継続的な資本の再配分が必要である。このような長期的なパスの中で想定される投資額の最大の増加は太陽光と風力発電に投入されることになる。その追加的な平均投資額は毎年 1,600 億ドルが必要である。電力系統へ必要とされる追加的な投資額も現状と比較して 1,500 億ドル高い水準となる。

・現状のトレンドを持続可能シナリオ（SDS）と比較すると、途上国では再エネへの投資の拡大と並んで、火力発電の柔軟な運用、CCUS を伴う化石燃料、電力系統、エネルギー貯蔵、DR といった電力システムの柔軟性と脱炭素を高めるための投資が必要である。先進国につ

いては、太陽光と風力発電への投資額についてはギャップが比較的少ないが、それでも欧州と米国で 20～30%程度の追加的な増加が必要である。水力、そしてその他の再エネ、原子力が、持続可能な目標の達成と供給セキュリティを保証するための鍵となる技術である。しかし、2019 年のこれらの技術への投資額は SDS シナリオでの想定をはるかに下回る水準にとどまっている。

IEA/IRENA 発刊の再エネ関連主要レポートの要約（2020 年 7 月～2020 年 9 月分）

1. IRENA “Aggregators: Innovation Landscape Brief”（2020 年 7 月発刊）

・2019年2月に発刊された統合報告書「IRENA Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables」に示された「高シェアのVREを電力システムへ統合してゆくのに必要となる30のイノベーション」を個別に取り上げるBusiness Models: Innovation Landscapeシリーズの一つ。「アグリゲータ」「P2P電力取引」「Energy-as-a-Service (EaaS)」「コミュニティ所有モデル」「Pay-as-you-goモデル」の5つをひとまとめにしている。第1章「アグリゲータ」の概要は以下の通り。

・アグリゲータは、消費者、発電事業者、プロシューマーといった電力システムにおける各エージェント（行為主体）を卸電力市場及び小売電力市場に対して単一の統一体として機能させたり、系統運用者へサービスを提供するグルーピングである。このブリーフの中では、アグリゲータは、分散したDER（分散型エネルギー資源）をアグリゲートして電力系統へサービス提供を行うVPPを運用する企業を指すこととする。VPP運用者はDERをアグリゲートして、伝統的な発電所の基本的属性と同様の動きをさせて、電力やアンシラリーサービスを販売する。VPPは、包含するDERの運用を最適化するための天候予測、卸電力価格、電力供給、消費トレンドといったデータ解析を行うITシステムによって制御されている。

・需要側と供給側双方の柔軟性サービスを電力系統に提供することで、アグリゲータは再エネの円滑な統合をサポートすることができる。需要側の柔軟性は、系統から要求に応じたDR 資源やエネルギー貯蔵のアグリゲーションから、供給側の柔軟性はコジェネ、バイオガス発電といった柔軟性資源による発電の最適化から得られる。最適化運用は需要、発電、価格の過去データや需要予測データに基づいて行われる。

・アグリゲータが電力系統に提供できるサービスには、負荷シフト、調整力サービス、配電運用者に対する地域柔軟性（柔軟性を取引する地域市場がある場合に限る）等が挙げられる。わずかな時間の特定のピーク需要に対応するために大規模な火力発電所による給電を行うと電力システムの限界費用が増加するが、アグリゲータによる負荷シフトで負荷を低減させることで限界費用を下げることができる。アグリゲートした DER や蓄電池を活用することでピーク対応用の発電設備を代替することも可能である。また、アグリゲータは必要とされれば、DER を制御することでアンシラリー市場に参加できるリアルタイムの予備供給力を提供することもでき、DER 所有者の経済的利益を増加させることができる。さらに、既存 DER の有効活用による予備設備容量の提供によって、ピーク発電容量への投資を回避することができる。

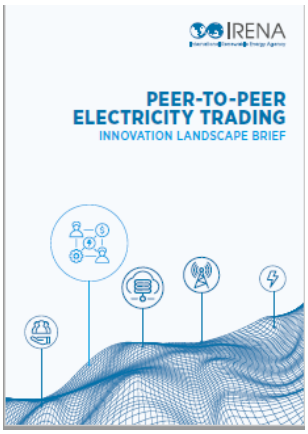
・アグリゲータを広範に運用するために必要な要件の一つは規制の枠組みである。自由化さ

れ、価格上限のない卸電力スポット市場はアグリゲータの展開に不可欠である。アグリゲータ設立の主なインセンティブは、卸電力市場でのピークとオフピーク価格の差、そして調整力やアンシラリーサービスを必要とする送電システム運用者からのシグナルによって形成される。アグリゲータが積極的に卸電力市場やアンシラリーサービス市場に参加できるような規制の枠組みとするべきである。例えば、米国の NYISO ではアグリゲートされた DER を大規模送電ノードへ接続し、DER の価値を各ノードの地点・時間によって評価することを提案している。

・先進型メータ（AMI: Advanced metering infrastructure）の普及もアグリゲータ展開の要件となる。 VPP の形成と運用のために、スマートメータ、ブロードバンド通信インフラ、遠隔自動制御システム（ネットワークのデジタル化）を通じた DER からのリアルタイムデータの取得は不可欠である。DER から VPP 側への一方向の通信ではなく、双方向通信のためのネットワークデバイスが必須である。

・アグリゲータ展開のための要件として VRE 発電予測技術の進展も重要である。先進的な予測技術と需要予測は、電力システムのための DER の最適な給電計画を可能とする。分散型発電量の予測は負荷予測の中に統合されることでネット負荷が予測でき、需要側の変動の可視化が可能となる。

2. IRENA “Peer-To-Peer Electricity Trading: Innovation Landscape Brief”（2020 年 7 月発刊）



・2019年2月に発刊された統合報告書「IRENA Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables」に示された「高シェアのVREを電力システムへ統合してゆくのに必要となる30のイノベーション」を個別に取り上げるBusiness Models: Innovation Landscapeシリーズの第2章。概要は以下の通り。

・本ブリーフで概要説明するP2P（Peer-To-Peer）電力取引のビジネスモデルは、DER（分散型エネルギー資源）の電力システムへの統合拡大の中で、プラットフォームベースのスキームとして注目されている。電力システム運用者から見て、従来のDERは「受け身」の消費者であったが、プロシューマと呼ばれる「アクティブ」な消費者に変わりつつある。

・P2P電力取引によって、プロシューマは彼らが居住するコミュニティ内での発電による便益を共有することができ、分散型再エネ発電を一層拡大するインセンティブを有するようになる。本ブリーフでは、なぜP2Pビジネスモデルが消費者の参加意欲を高めつつ電力システムのニーズに貢献できるのかに焦点を当てる。

・P2P 電力取引は、消費者と生産者が仲介者なしで電力の直接取引を行うオンライン市場と相互接続されたプラットフォームをベースとしたビジネスモデルである。換言すれば、地域の分散型発電事業者が当該地域の消費者に対して、その消費者が支払ってもよいと考える価

格で電力を販売することができるプラットフォームが P2P 電力取引である。この場合、電力は、プラットフォームの参加者である消費者（買電者と売電者）間で、例えば、所定の毎月の加入費用で取引される。通常の市場と同様に、供給者は可能な限り高い価格と収益での売電を目指し、消費者は可能な限り低価格での買電を目指す。双方の需給がマッチすれば取引が実行される。

・消費者が電力を一般電気事業者か小売電気事業者から固定価格で購入するのが伝統的な電力供給である。この場合、プロシューマ又は自家消費発電者は余剰電力を電力系統へ「買戻し価格」（Buy-back rate）で逆潮させるが、通常はこの買戻し価格よりも家庭用小売電力価格は相当に高い水準に設定されている。また、「買戻し価格」には分散型発電が電力システムにもたらす便益は反映されていない。例えば、あるプロシューマの隣人の EV は系統を通じて遠方の火力発電からの電力をチャージしているかもしれないが、プロシューマがそのタイミングで余剰電力を逆潮させていればその逆潮電力が隣人の EV にチャージにされている可能性がある。この場合、太陽光発電を持つプロシューマの系統への逆潮は買戻し価格での売電となるが、その買戻し価格には、分散型電力が遠方から送電された電力を置き換えたことによってもたらされた送電・混雑ロス緩和への貢献は反映されていない。電力のコストの 4 割を占めるとされる送配電管理コストの一部が P2P モデルによって節約されるのである。

・P2P 電力取引モデルは配電系統に接続された DER 拡大とその活用促進の流れの中で生み出された。この取引によって、プロシューマは消費者と直接取引を通じて、系統への買戻し価格よりも高い価格での売電を行い、他方、消費者は系統からの小売電力価格よりも安く電力を購入することができる Win-Win 関係を達成することができる。

・P2P 取引モデルは、狭い範囲での特定の配電系統やミニグリッド内の地域コミュニティの中での隣人同士、あるいはより広範に拡大した地域内の別のコミュニティとの間で構築することができる。P2P 取引スキームにはある程度の参加者数が必要である、電力を取引したい十分な参加者数が確保されて初めて実行可能となる。P2P プラットフォーム運営者が（独立したミニグリッドの範囲を超えて）主要な配電系統システムの一部において参加者間での P2P 取引を運営する場合は、電力システム運営者と電力市場との間のインタラクトが求められる。この場合は、P2P 取引参加者間の電力フローが配電系統に影響を与えるため、地域の配電系統が適切に維持・運用されることに対して適切な報酬が支払われるべきだからである。

・P2P プラットフォームの運用が独立したミニグリッド内に限定されている場合（すなわち、P2P プラットフォーマが系統運用者の機能も満たさなければならない場合は）系統運用者には需給バランス確保と高速度スケールでの系統安定性の維持が求められる。

・P2P 電力取引モデルは再エネへのアクセシビリティや消費者の活動力を高めつつ、DER の一層の活用を促し、コミュニティのレジリエンスを向上させる。電力系統が分散型の P2P 電力取引から得られる電力部門の転換のための主要な便益は以下の 4 点である。

・消費者・プロシューマによる再エネと系統柔軟性の拡大

・DER の活用による需給調整と混雑管理
・電力系統へのアンシラリーサービスの提供
・（主として途上国における系統から独立した）ミニグリッド内の消費者のエネルギーアクセス改善

・P2P 電力取引プラットフォームを展開させるための成功要因は以下の 4 点である。
・デジタル技術を活用した高い信頼性のプラットフォームの確立：配電系統等の物理的な電力システムに加えて、P2P 電力取引はデジタルで実施されるため、EMS（エネルギーマネジメントシステム）がデジタル部分の中心的な役割を演ずる。発電事業者やプロシューマからの大量のデータを収集して電力システムの信頼性を分析する必要があるため、スマートメータ、ブロードバンド通信インフラ、ネットワーク自動遠隔制御（ネットワークの自動化）はプラットフォームベースのビジネス、すなわち P2P 電力取引モデルの基本的な enabler となる。
・有効な規制枠組みの確立：P2P 電力取引の便益を享受するために、規制当局にはプラットフォームビジネスと従来型電力ビジネスモデルとの公平なフィールドの確保が求められる。
・良好な顧客サービス
・信頼できる電力系統

3. IRENA “Energy as a Service: Innovation Landscape Brief”（2020 年 7 月発刊）

・2019年2月に発刊された統合報告書「IRENA Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables」に示された「高シェアのVREを電力システムへ統合してゆくのに必要となる30のイノベーション」を個別に取り上げるBusiness Models: Innovation Landscapeシリーズの第3章。概要は以下の通り。

・分散型発電と蓄電池の増加とスマートITデバイスの活用拡大が電力部門における新たなビジネスモデルに道を開いた。デジタル化とスマートメータの増加によって自動化を可能とする大量のデータセットの取得が可能となった。こうしたデータを電力システムの管理のために価値あるデータへ変換させて提供するという新たなエネルギー関連サービスがエネルギーサービスプロバイダー（ESP）である。

・エネルギー分野の既存企業や IT 企業のような新規参入者によって、ESP の革新的かつ顧客中心主義のビジネスモデル開発が牽引されている。デジタル化の進展と共に、電力消費者は電力消費と電力コストの最適化を探り始めた。一般世帯の場合は、スマートホーム・デバイスによって連続的な消費のモニタリングと電力消費の制御が可能である。単に電気代を安くするといった内容のサービスの提供だけでなく、一層持続可能な電力供給のためのソリュ

ーションといった様々なオプションを ESP は評価する。消費者のいくつかは自家消費への切り替えに関心を持つようになり、太陽光発電や蓄電池の設置を行い、スマートデバイスの設置によるモニタリング・遠隔制御への関心も高まる。このような新たな消費者のニーズや再エネを中心とする分散型デジタルシステムへのパラダイムシフトに応えるために、新しいエネルギーソリューションやサービスの統合的なアプローチが求められるようになってきた。

・Energy-as-a-Service（EaaS）は、kWh の電力供給だけでなく、エネルギーに関連した各種サービスを提供するエネルギーサービス・プロバイダーの革新的なビジネスモデルである。ESP は、最終エネルギー消費者に対する一連のサービス、具体的には、エネルギー・アドバイス、エネルギー・アセット設置、ファイナンス、エネルギーマネジメント・ソリューション等をまとめて提供する。

・エネルギーアドバイスとは、「信頼できるエネルギー・アドバイザー」として顧客のエネルギーニーズを踏まえてカスタマイズされた戦略の策定を行うことである。ESP は消費者の負荷データ、電力価格の予測及び過去データ、先進的なエネルギーモデルソフトウェアを用いて、市場価格をにらみつつエネルギー消費のコストを最適化するためのアドバイスを行う。

・エネルギー・アセット設置とは、ESP が 再エネ発電＋蓄電池システムの設置について EPC（設計（Engineering）・調達（Procurement）・建設（Construction））等の一貫した end-to-end サービスを提供するものである。このサービスはさらにマイクログリッド敷設やスマートメータ、エネルギー効率機器の設置まで拡張することができ、電気料金の節約や自家消費から収益を得るような新たな機会を消費者が得ることになる。場合によっては、ESP は再エネ発電設備設置のためのファイナンスのサポートを行うこともある。

・エネルギー・マネジメントとは、モニタリング、遠隔制御、負荷最適化を通じて、サービス水準を損なうことなく、エネルギー・マネジメント・ソリューションを顧客に提供するものである。エネルギー消費量のモニタリング、自動制御、最適化といったスマートホーム・ソリューションは統合されたソリューションとして一括して提供されることもある。ESP は顧客に対して発電源について再エネか火力かといった選択オプションも提供できる。また、顧客は、常時監視している電力価格に基づいて自らの負荷を制御することも可能となる。

・EaaS は分散型発電や DR の拡大を支える機能がある。これまで活用が少なかった需要側の柔軟性を開放させる大きなインパクトがあり、これによって高いシェアの VRE や DER の電力システムへの円滑な統合を進めることができる。ESP によるエネルギー・アセット設置は、再エネ発電と蓄電池設備の設置を希望する顧客への不可欠なサポートを提供することで DER の一層の展開を促進する。

・EaaS の下でのエネルギー・マネジメント・モデルは DR を促進する。ESP はスマートメータを介したリアルタイム・データを活用して数時間後のピーク需要を予測し、ピーク需要時間帯の消費最適化のための負荷制限のトリガールールを設定するインテリジェンス・システムを実装することができる。

・EaaS を展開するために必要な条件は、配電レベルでの電力システムのデジタル化、時間帯別電力料金の導入、そして、需要側の柔軟性活用に向けた配電系統運用の見直しである。

4. IRENA “Community Ownership Models: Innovation Landscape Brief”（2020 年 7 月発刊）

・2019年2月に発刊された統合報告書「IRENA Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables」に示された「高シェアのVREを電力システムへ統合してゆくのに必要となる30のイノベーション」を個別に取り上げるBusiness Models: Innovation Landscapeシリーズの第4章。概要は以下の通り。

・世界的なエネルギー転換と電力システムの脱炭素化の文脈におけるコミュニティ所有構造（Community-ownership structures）とは、DER（分散型エネルギー資源）を主としたエネルギー関連アセットの共同所有と運用のことを指す。コストの共同負担によって個々人の投資負担額を低下させることで、個々人のエネルギー関連アセットへの投資参加を可能とする。コミュニティ所有プロジェクトには、実施状況によって様々な規模があり得るが、5KW～5MW程度までの規模が多い。発電プロジェクトが最も一般的だが、エネルギー貯蔵、エネルギー効率改善、分散型ネットワーク、地域冷熱供給にも利用されている。

・コミュニティ所有プロジェクトは、プロジェクトを所有し経営に関する投票権を有している地域のステークホルダーとコミュニティベースの組織によって特徴づけられている。多くの場合、プロジェクトから生じる利益は地域のコミュニティにおいて分配される。

・コミュニティ所有ビジネスモデルの革新的な側面は、再エネ発電ビジネスを超えたコミュニティの役割と参加形態である。今日ではコミュティ所有モデルは、地域の発電、熱供給、蓄熱、EV チャージ、近隣コミュニティとのエネルギー取引、エネルギー効率改善、電力システムへの柔軟性提供サービスといったエネルギー・バリューチェーンのほぼすべてをカバーしている。

・コミュニティ所有モデルは一般に以下の事業を運営している。

・コミュニティ所有の発電プラント（太陽光、風力、バイオマス発電等）：地域のエネルギー需要を満たすことが主目的。コミュニティ内でまとめられた消費者は、そこで発電された電力を自家消費することで共同プロシューマーとなる。余剰電力は系統へ給電・第三者へ売却されるか、ストレージが併設されている場合はコミュニティのメンバーに後日供給される。

・コミュニティ所有熱供給システム（バイオマス、木質ペレット、地熱、コージェネ等）：地域コミュニティの熱需要を満たすことが目的。

・コミュニティ所有エネルギーストレージ・システム：地域で発電された電力（あるいはコミュニティのピーク需要を満たすために系統から購入した電力）を蓄電する蓄

電池システムのコミュニティによる展開と運営。

・コミュティ・エネルギー効率プログラム：コミュニティ参加メンバーに対してエネルギー消費の削減や建物の省エネを進めるような改修を推奨する活動（他の活動との組み合わせもあり）。

・コミュニティ電力小売事業：コミュニティが所有する発電所からの電力を卸電力として購入して、コミュニティのメンバーにエネルギーサービスを提供する事業。

・コミュニティ所有プロジェクトは一般的にコミュニティへの金銭的収益に加えて、経済面、社会面、環境面の便益をもたらすことが期待されている。エネルギー関連のコミュニティ所有モデルの実施形態は、所有形態、収益配分方法、民主的なガバナンスのレベル等によって多様なパターンがある。

・コミュニティ所有モデルは、コストの分担によって前払いコストの負担を軽減させ、地域レベルでの分散型再エネ発電設備の拡大を可能とする。加えて、コミュニティ所有のプロジェクトは、送電系統への柔軟性（柔軟性の増大、系統レジリエンスの強化）と、電力部門の転換に向けた貢献（分散型再エネ発電の拡大、再エネへのアクセスの拡大、コミュニティへの低コストエネルギーの提供）といった副次的便益をもたらす。

・卸電力市場への直接販売、FIT、ネットメータリング、ネットビリング等の仕組みを通じて報酬を得るようにすることで、コミュニティ構成メンバーは追加的な収益を得るとともに系統の柔軟性を高める効果を持つ。また、DR を通じて、コミュニティが需要側の柔軟性を引き出すことや、コミュニティ所有ストレージ・システムによってピーク需要カットも可能となる。また、蓄電池と太陽光発電がセットになったコミュニティ所有プロジェクトは、周波数制御、電圧調整、混雑処理といったサービス提供をすることで系統のバランス維持にも貢献できる。

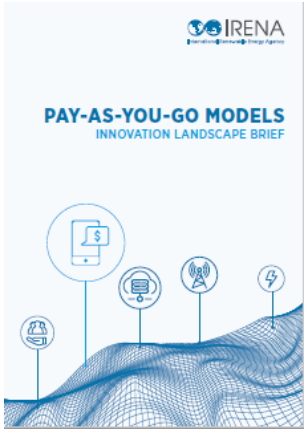
・一般に集中型の電力システムは自然災害やテロといった突発的事象に脆弱である。分散型かつ地域型の小規模再エネ発電設備と他の DER との組み合わせはエネルギー供給を多様化させ、広域停電のリスクを低下させる。分散型発電は独立した運用が可能であり、激甚災害に対するレジリエンスを高める。また、蓄電池併設によるコミュニティ内での自家消費の拡大はレジリエンスとエネルギーセキュリティを一層強化し、広域停電時のコミュニティ機能の維持に役立つ。コミュニティ所有モデルは規模が小さいことが幸いして、大きな投資を伴わずに、主要な電力系統がダウンした場合でも機能を維持し続けることが可能である。

・コミュニティ所有プロジェクトはコミュニティのエネルギーコストを大幅に低減させることもできる。一般に地域で発電された電力は系統電力よりも低価格である。また、蓄電池が併設されていればピーク需要を低減させることで基本料金を大きく下げることができる。さらに、系統への売電によってコミュニティは追加的な収益を得ることができる。

・米国では、コミュニティ所有モデルの事例として、カリフォルニアなど 7 つの州において、特定のコミュニティ・エリアに限定して CCA（Community Choice Aggregation）と呼ばれる地方自治体組織を形成して、小売電力事業者に代わって電力供給を行う取り組みが開始され

ている。
・コミュニティ所有モデルを実施するためには、それを可能とする政策的枠組み、コミュニティの電力市場への参加に関する規制枠組みの明確化、行政手続きの簡素化と規制緩和、コミュニティ所有プロジェクトへのファイナンスの拡大、コミュニティ内での能力構築と技術的サポートの拡大が求められる。
・2018 年時点でコミュニティ所有イニシアティブは世界で 4,000 件以上あり、特に豪州、デンマーク、ドイツ、オランダ、英国、米国に多く見られる。ドイツではその設備容量は合計 1GW で総発電容量の 1%を占めている。典型的な容量は 50KW から 10MW であり、太陽光発電、風力発電、エネルギー効率、地域熱供給システムが主たる技術である。

5. IRENA "Pay-As-You-Go Models: Innovation Landscape Brief" （2020 年 7 月発刊）



・2019年2月に発刊された統合報告書「IRENA Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables」に示された「高シェアのVREを電力システムへ統合してゆくのに必要となる30のイノベーション」を個別に取り上げるInnovation Landscape Briefシリーズの第5章。概要は以下の通り。
・Pay-As-You-Go（以下、PAYG）モデルは非電化エリアにおいて、再エネからの電力を手ごろな価格で提供し、支払いにモバイル技術を活用することでエネルギーアクセスを向上させるための革新的なビジネスモデルである。モバイル支払い技術利用の広範な拡大、豊富な太陽光資源、太陽光発電システムと蓄電池のコスト低下等によってこのようなビジネスモデルが実現可能となった。また、PAYGシステムを提供する企業数が増加して競争が加速した結果、サービス価格も大きく低下した。
・PAYG モデルはどの再エネにも適用することが可能だが、現在のところほとんどの事例は太陽エネルギーである。このブリーフでも主として太陽エネルギーへの適用事例について述べる。PAYG モデルに基づくソーラー・ホームシステムは、分散型小型太陽光発電に蓄電池、モバイル支払いシステム、IT 制御ユニット、LED 照明等を併設したものである。必要に応じてラジオ、携帯電話への充電も可能である。
・エネルギーサービスプロバイダー（ESP）は、照明と携帯電話充電といった 50W 程度までの基本的な電力供給サービス（Tier 1）から、複数の電気製品への電力供給を可能とする 200～800W 程度までのサービス（Tier 3）まで様々な PAYG パッケージを提供している。潜在的には 800W 以上の事業用電力を提供する Tier 4 や Tier 5 のサービス提供も可能であるが、現時点ではそこまでは拡大していない（下図参照）。

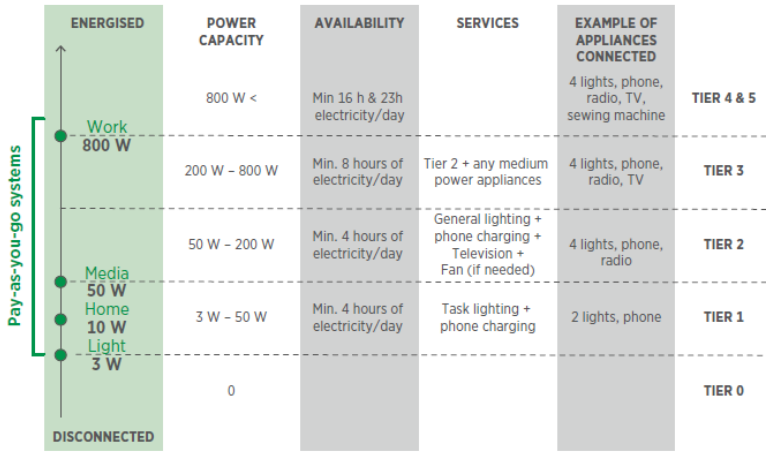


図 1　PAYG モデルによるエネルギー提供サービスの各 Tier 分類

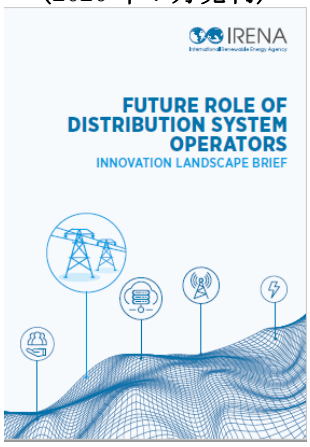
・PAYG モデルは、支払いルールと所有形態によって、Lease-to-own モデル（消費者が半年から数年かけて分割して発電設備器機の設置費用を支払うモデルで太陽光発電システムの90%以上が該当）と Usage-based payment モデル（消費者はプリペイド・メータに電気料金を事前支払いし、その量に応じて電力供給を受けるモデルで、設備器機の設置費用の負担はなし）に大別される。

・支払いは通常、テキストメッセージの送付によるモバイル・クレジットを通じて決済され、遠隔モニタリングシステム機能を持っているものも多い。遠隔モニタリングシステムのないソーラー・ホームシステムも存在するが、その場合でも SIM カードを用いて、支払い不履行時には ESP がシステムを停止させる機能を持つ。

・PAYG モデルは個別の世帯レベルからコミュニティレベルまで実施可能である。また、蓄電池を併設したシステムとして、太陽光発電システムマイクログリッド・ソリューションも実施可能である。

・PAYG ビジネスモデルは非電化のエリアでのエネルギーアクセスを向上させる手段となり得るほか、費用の高い送配電網インフラ建設を遅延させることでエネルギーアクセスの目標達成に向けた政府の財政負担を軽減させることができる。再エネを用いた PAYG モデルは、分散型太陽光発電システムによるエネルギーアクセス改善、送配電インフラ投資の繰り延べ、他の革新的ビジネスモデル開発といった観点からエネルギー転換への貢献が可能である。

6. IRENA “Future Role of Distribution System Operators: Innovation Landscape Brief”（2020 年 7 月発刊）



・2019年2月に発刊された統合報告書「IRENA Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables」に示された「高シェアのVREを電力システムへ統合してゆくのに必要となる30のイノベーション」を個別に取り上げるSystem Operation: Innovation Landscapeシリーズの第1 章。概要は以下の通り。

・伝統的に電力システムは、発電、送電、配電、そして、サプライチェーンの末端に位置する消費者から構成される集中型の産業形態を有しており、そこでは電気は発電から消費者まで一方向に流れる構造となっていた。しかし、過去10年の間に、屋根置き太陽光発電、小型風力発電、蓄電池、EV、スマートホーム機器といった分散型エネルギー資源（DER）が急速に増大し、電力システムへ積極的に関与するようになってきた。

・DER の普及やプロシューマ、アグリゲータといった新しい参加者の増加は、電力システムに新しい可能性を切り開いた。この機会を活用して電力部門と消費者ニーズを転換するために、配電システム運用者（DSO）はその役割を変えてゆく必要がある。DER の有効活用を促すような配電系統運用への新たなインセンティブ付与といった DSO に対する規制の在り方を見直すことはエネルギー転換の成功のカギとなる。

・分散型発電、DR、蓄電池といった DER の発展によって、DSO の役割は大きく拡大する。規制が緩和されて DSO がその配電系統に接続された DER を積極的に運用することができれば自らの配電網と消費者の便益を拡大できる。DER へのアクセスを手にすることで DSO は既存の配電系統の最適運用と今後の配電系統インフラへの投資削減という一石二鳥を手にすることができる。

・DER の急速な普及は、電力システムに対して予測が困難な逆潮の増加をもたらし、伝統的な送配電計画と運用に影響を及ぼす。さらに、DER の拡大は配電系統の混雑を増加させるため、混雑処理への対応も求められるようになる。こうした変化が、従来の計画、維持、運用といった DSO の役割転換を求めるようになる。DSO は従来の単なる系統運用者としての役割から積極的なシステム運用者へと次第にその役割を深化させて、システム運用者として柔軟性サービスを系統利用者から調達するようになる。加えて、DSO は送電運用者（TSO）に対して reactive power support の提供も行うようになる。以上をまとめると、DSO の新たな役割として、DER を通じたピーク負荷運用、系統混雑管理、TSO に対する reactive power support、電力市場に対する技術的な検証が挙げられる。

・規制メカニズムの在り方次第では DSO の新たな役割を促進することができる。例えば、最終消費者とのノンファーム・アクセス合意（ピーク需要時に供給制約する代償として系統接続費用を割引する契約）、Bilateral flexibility contracts（柔軟性が提供できる DER の所有者と DSO との特別契約）、Local market（DER が参加可能な DSO エリアのための柔軟性を取

引する地域市場で、そこでの取引商品は TSO と DSO によって技術的に検証される）が挙げられる。

・DSO の新たな機能は、配電系統での柔軟性の向上、DER を活用することによる系統インフラへの投資削減、データ活用による再エネ受け入れ量の増加といった側面を持つことから、従来の電力システム運用に大きな影響を与える。

・DSO は、電圧サポート、混雑管理、ピーク負荷変動といった柔軟性サービスを配電系統に接続された DER から調達することができる。DER の増加によってこの機会は一層高まり、VRE の配電系統への統合を加速させることができる。配電系統の地点別価格シグナルの導入や地域市場の開設は、DER 所有者に対する追加的な収益のインセンティブを付与し、DER の利活用を促進させることができる。

・従来 DSO は、ピーク需要時に生じる系統混雑を緩和するための配電系統増強の投資を行う際に「最悪ケース」を想定した系統容量を想定してきた。しかし、この従来ルールは、a) 系統増強　b) 系統増強しない代わりにノンファーム・アクセスを消費者と発電事業者に提供　c) DER の柔軟性を活用、といったいくつかのオプション選択に代わられることになる。同様に、地域で発電あるいは蓄電されたエネルギーによってピーク需要に対応できれば、遠方から送電された電力で対応するよりも送電系統混雑を緩和でき、送電線への投資も削減することができる。

・DSO は電力需要、発電量、請求書内容、所在地等の消費者データを管理する中心的ハブとしても機能することができる。DSO は所定の規制に従って消費者のプライバシー保護に留意しつつ、これらのデータを収集・蓄積することができる。このデータを活用することで DSO は一層精緻な需要予測や計画、システム運用が可能となる。さらに、消費者自らの需要や分散型発電パターンへの理解を促進させ、配電系統の活用についての効率的な決定を促すことで、再エネの一層の拡大を可能とさせる。

・特に、Energy-as-a-Service（EaaS）プロバイダーは、これらのデータを活用して、最終需要家に対する最適化エネルギーマネジメントサービスを提供することが可能となる。これによって、最終エネルギー需要家は、電力システムに対する柔軟性提供の検討や彼ら自身のエネルギー効率を改善できるようになる。データの収集と共有化は、DSO の運用を改善できるだけでなく、EaaS のような第三者による新しいビジネスモデルの開発促進や DR を通じた最終需要家によるエネルギーシステムへの積極的な関与をも可能とする。

・配電系統所有者そして運用者としての伝統的な DSO の役割を配電システム運用者そして市場ファシリテーターとしての積極的な役割に変えてゆくためには、DSO の将来の役割を踏まえた規制の枠組み見直し、データ管理に関する標準化やガイドラインの策定、スマートグリッド・デジタル技術の開発、DSO と消費者とのコミュニケーションの改善が必要である。

7. IRENA “Co-Operation between Transmission and Distribution System Operators: Innovation Landscape Brief”（2020 年 7 月発刊）

・2019年2月に発刊された統合報告書「IRENA Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables」に示された「高シェアのVREを電力システムへ統合してゆくのに必要となる30のイノベーション」を個別に取り上げるSystem Operation: Innovation Landscapeシリーズの第2 章。概要は以下の通り。

・配電系統に接続された分散型の再エネ発電の拡大は、電力系統において双方向の電力の流れを生み出した。また、分散型のストレージやDRもネット負荷や電力システムの流れを変えた。こうした新たな状況の出現によって、新しい技術が提供する柔軟性を活用できるようにDSOの役割を拡張する必要がある。もし規制の枠組みが許容するなら、DSO自体がDERを運用することができるほか、DSOが中立な市場ファシリテーターとなり、柔軟性を提供するDER所有者に対して空間的に高い粒度に細分化された価格シグナルを提供することができる。

・DSO の役割そして TSO とのインタラクション、そして TSO の役割は、電力システムへの DER の統合を拡大するために再定義が必要である。分散型のシステムにおける DSO と TSO の責任分担が不明確になっている場合はこの必要性が特に高い。DSO は「connect and forget」として知られる伝統的な DER へのアプローチから、DER が卸電力市場への参加を通じてサービス提供できるような市場ファシリテーターに深化するべきである。DSO と TSO との協力強化は新しいパラダイムの中心的な意味を持つようになる。

・DSO と TSO との効率的な協力は DER の卸電力市場への参加のために決定的に重要である。TSO に対して DER の種類とアベイラビリティを伝達できるように、DSO は、TSO と DER 所有者とのデータ交換プラットフォームとして機能すべきである。

・以下のような事項において DSO と TSO との協力が期待される。

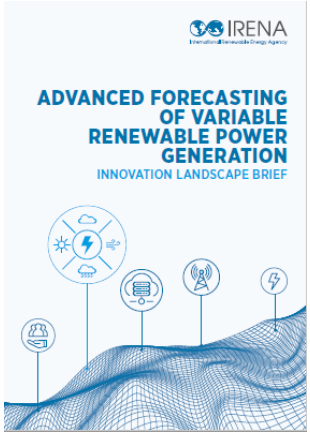
- 双方で交換すべきデータの定義、ネットワーク開発、需要・発電予測、アンシラリーサービス、エネルギー市場、容量市場
- DER の種類、特性、容量、発電量・消費量プロファイル
- システム計画情報の交換
- システム制約に関する技術研究の共同実施
- 混雑管理の協業
- 系統利用者と再エネ発電設備のための系統接続要件の定義
- 系統容量のアベイラビリティに関する情報の交換
- 新たな発電設備の接続は送電レベルか配電レベルかの情報
- 系統運用コードの定義
- 保護及及び復元スキーム

・DER の電力シェアが非常に高い系統の効率的な運用には、DER が提供できる便益を最大化するために TSO と DSO の情報共有が不可欠である。それによって、TSO と DSO は DER がどこに接続されて、電力システムのために必要なアクションはなにかを判断することができる。TSO と DSO の協力には市場設計やシステム運用の責任の違いからいくつかの異なるモデルが考えられる。
・DSO と TSO との強力なインタラクションは DER の有効な活用を可能とし、システムの柔軟性を高める一方、系統増強費用を低減できる。決定的に重要なファクターは、配電系統に接続された DER の能力に関するシステム運用者間でのデータ共有である。これは卸電力市場とアンシラリーサービス市場の効率的な運用に帰結する。TSO と DSO の協力は、柔軟性要件の合理化、系統計画と投資コストの低減には不可欠である。電力システム転換への主たる貢献として、DER の参加によるシステム柔軟性の向上と系統インフラ投資の最適化が挙げられる。
・一般に TSO は、配電系統に接続された DER に関する情報を持ち合わせていない。DER の急速な拡大は、TSO による負荷予測や再エネ発電量の予測エラーを引き起こすようになってきた。DSO とのデータ共有によって、TSO は DER についての視認性を常時高めることができ、アンシラリーサービスにも活用できるようになる。DSO は DER のための市場ファシリテーターとして、アグリゲータ等を通じて TSO のためにアンシラリーサービスを提供できる。DER の最適な運用によって TSO はシステム全体のバランスを維持することができる。DER から TSO または DSO へのアンシラリーサービス提供に対する報酬は、DER 所有者への追加的な収入源となり、DER 参加のインセンティブを高める。これが DER の設置意欲をさらに高めて再エネ拡大につながってゆく。
・DSO と TSO との協力は混雑管理のための DER の有効活用を可能とする。これによって、DSO と TSO は系統増強投資の繰り延べ、あるいは部分的に回避することも可能となる。
・DER のポテンシャルを最大限活用するために、DSO と TSO との協力を促すよう規制の枠組みを適切に変えてゆくことが必要である。データ収集、管理、異なるステークホルダーによるデータアクセスを促すために、DSO と TSO の役割を規制の中で再定義するべきである。データ交換プラットフォーム、コミュニケーション・プロトコル、DSO と TSO 間の明確な役割分担を通じて、規制当局と政策立案者は、DSO と TSO が中立かつ透明性が高い方法で行動することを確実にするべきである。配電系統に接続された新しい技術によって得られる柔軟性を活用できるように、DSO の役割それ自体も拡張されるべきである。
・適切に機能している電力市場において、市場の透明性を高める最も重要な課題は、消費者から得られた計測データのステークホルダー間での共有化である。DER 運用者、電力小売事業者、アグリゲータ、EaaS 等のステークホルダーが参加する競争市場を機能させるために計測データの共有化が不可欠である。デジタルデータのやり取りによって、DER の種類、容量、消費パターン、システム特性等のリアルタイム情報への平等なアクセスができる。
・デジタル化はスマートグリッド運用と市場を通じた柔軟性確保のための前提条件である。

IT 通信技術は DSO と TSO との協業の基礎となる。IoT、AI そしてビッグデータは、効率的かつ高速でのデータ交換と意思決定プロセスの中心的な技術となる。

・TSO と DSO の協力は、EU 規制に基づいて EU 各国で新たなイニシアティブとして取り組みが広がっている。

8. IRENA “Advanced Forecasting of Variable Renewable Power Generation: Innovation Landscape Brief” （2020 年 7 月発刊）



・2019年2月に発刊された統合報告書「IRENA Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables」に示された「高シェアのVREを電力システムへ統合してゆくのに必要となる30のイノベーション」を個別に取り上げるSystem Operation: Innovation Landscape シリーズの第3 章。概要は以下の通り。

・高いシェアのVREのシステム統合のために精緻な気象予測は不可欠である。再エネ発電事業者とシステム運用者に向けたコスト効率的なツールが決定的に必要になっている。気象条件に依存したVREの発電量予測は、発電設備のアベイラビリティとその地点での気象予測の組み合わせによって可能となる。

・先進的な気象予測手法は、リアルタイムと過去の気象データ分析から予測を行う AI やビッグデータ等のデジタル技術を応用している。先進的気象予測は VRE の統合改善のための AI の活用の中核である。アルゴリズムの改善による計算能力の拡大と高粒度のビッグデータの活用によって発電量予測は精緻になってきている。

・VRE発電量の予測の精緻化は、短期と長期の双方のタイムスケールにおいて電力部門の多様なステークホルダーに便益をもたらす。短期的には、正確なVRE発電予測があれば、再エネ発電事業者と市場参加者は正確な入札を電力市場に入れ、かつインバランスリスクを軽減させることができる。また、電力システム運用者にとっては、正確な発電量予測は発電所の発電計画と運用改善、給電効率向上、信頼性問題の軽減につながり、ひいては予備力を削減することができる。長期的（数日～季節間）にも、精緻な気象予測に基づく改善されたVRE発電量予測は、特に異常気象の際に適切な調整力を事前準備しておくなどシステム運用者に信頼性の高いシステム運用を可能とする。

・発電量予測は、ベースライン予測とその調整から成る numerical weather prediction（NWP）から始まる。NWP は多くの国では政府組織によって運用されている。NWP から気象予測をシミュレートして、さらに太陽光や風力発電量が予測される。NWP は通常 15 日間先まで予測である。しかし、これらのモデルは数時間以内の短期的予測には向いておらず、多くの場合、過去データの分析に基づく統計学的アプローチも併用して用いられる。日射量予測には、異なる空間における雲をトラックするためにデジタルカメラによる高解像度の空画像と衛

星画像も用いられる。これらを組み合わせたハイブリッド手法によって望ましい予測結果が得られる。大規模な発電設備と比較すると、分散型太陽光発電は小規模であることやサイト数が非常に多いために発電量予測の難易度が高い。

・異なる対象時間によって発電予測の手法は異なる。同じ手法を用いても予測対象期間が長いほど予測精度は低下してゆく。このため、予測モデルを組み立てる前に適切な予測対象期間の設定が重要になる。

・超短期（数秒～1 時間）の予測は、リアルタイムの給電、適切な予備力、VRE 発電量の平滑化に有用である。短期（1 時間～24 時間）の予測は、系統の安定性を高めるのに有用である。中期（1 週間～1 か月）の予測は、中期にアベイラブルな発電量を予測できることで電力システム計画や維持管理に役立つ。長期（1 か月～1 年）の予測は、送配電を管理する機関の発電計画、エネルギー入札、安全な運用に活かされる。

・予測精緻化の影響として、天然ガスや石油といった通常の火力発電の発電量が VRE 発電力予測の精緻化に伴って次第に減少してゆく可能性が示唆されている。

・VRE 発電量予測の精緻化を進めるには、発電量精緻化を促すインセンティブ付けの規制、気象データ収集と共有のためのオープン・データシステムの整備、先進的な気象観測デバイスの設置が必要である。

9. IRENA “Innovative Operation of Pumped Hydropower Storage: Innovation Landscape Brief”（2020 年 7 月発刊）

・2019年2月に発刊された統合報告書「IRENA Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables」に示された「高シェアのVREを電力システムへ統合してゆくのに必要となる30のイノベーション」を個別に取り上げるSystem Operation: Innovation Landscapeシリーズの第4章。概要は以下の通り。

・近年、揚水発電は系統に対する蓄電サービスを提供できる一次的な技術と認識されており、その設備容量は世界全体で161GWである。IRENAの2050年に向けたロードマップでは、2050年に水力発電は2,147GWに達し、そのうち揚水は325GWと現状の2倍の規模になることが想定されている。

・間欠性と季節変動を伴う VRE の増加は、需要を満たすためのストレージを確保するなど電力システムの柔軟性を高めることを求める。間欠性に対しては短期的なエネルギー・ストレージとして蓄電池が活用されている。しかし、季節間ストレージのような長期的なストレージについては、比較的低コストでかつ淡水貯蔵の副次的便益から揚水が最も有力な手段である。もう一つの手段である水素はコスト面からまだ競争性が低い。

・設計、機械、デジタル化のイノベーションは、遠隔監視や予測保全技術を通じて揚水の運用コストを大きく低減させている。加えて、VRE のシェア拡大によって、揚水は重要な柔

軟性技術と認識されるようになった。

・VRE を電力システムに統合するために、揚水システムには以下のように様々な構成スキームが考えられる。

・従来型の揚水：このタイプの揚水は、需要に対応して急速なランプアップや発電量の調整が確実である。VRE の余剰電力を吸収して損失を最小化することもできる。幅広い時間スケールに対応できる非常に用途の広いエネルギー・ストレージである。

・揚水＋VRE（オフサイト）：VRE 発電設備とセット（但し、物理的な近接性は問わない）になった揚水は出力抑制を最小化するために水をくみ上げる。この場合、揚水は、概念上 BTM（behind the-meter）蓄電池として機能することになる。

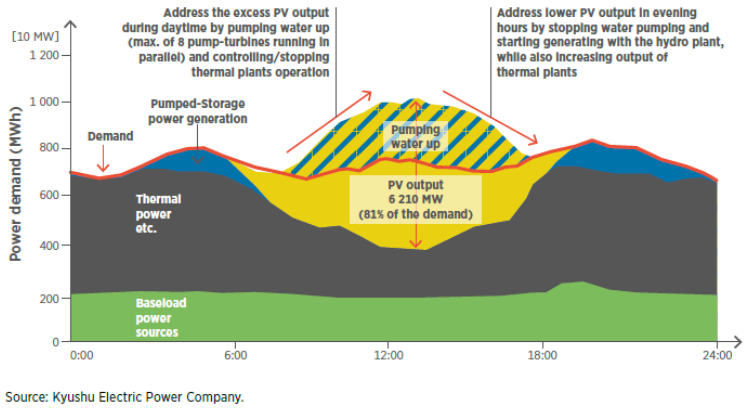
・VRE＋オンサイトでの揚水：このシステムでは VRE が揚水と物理的に近接して設置されており、揚水はオンサイトのストレージとして間欠性を補う供給機能を持つ。

・揚水設備と統合された VRE 技術：揚水発電設備の下部と上部の貯水池に浮体式太陽光発電を設置することで、既存の高圧送電線を活用したハイブリッドモデルとなる。このモデルは、土地と水面利用による効率性と生産性の向上、蒸発損失の減少、水面での冷却効果による太陽光発電効率の向上、既存送電インフラの利活用、ストレージとの容易な接続によるディスパッチャブルで非間欠性の柔軟な発電等の多くの利点を有する。

・揚水発電は電力システム運用のための新たな柔軟性オプションを提供できる。同期回転イナーシャ等の非常に速い応動が必要な運用から数分～数時間、そして、季節間ストレージといった長期に至るまで幅広い対応が可能である。

・革新的な揚水発電が電力システムへ提供できるサービスとしては、VRE の出力抑制の減少と負荷シフト、周波数調整、急速かつ柔軟なランピング、ブラックスタート、容量確保が挙げられる。

・VRE の出力抑制削減の事例として、九州電力の小丸川揚水発電所は、可変型発電システムを採用して揚水発電を効果的に活用している（下図参照）。



Source: Kyushu Electric Power Company.

図 2　2018 年 5 月 3 日の九州エリアにおける電力需給バランス

10. IRENA “Virtual Power Lines: Innovation Landscape Brief”　（2020 年 7 月発刊）

・2019年2月に発刊された統合報告書「IRENA Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables」に示された「高シェアのVREを電力システムへ統合してゆくの必要となる30のイノベーション」を個別に取り上げるSystem Operation: Innovation Landscapeシリーズの第5 章。

・再エネ、とりわけVREのシェア増加に伴って送配電系統の混雑処理が課題となっている中、コストのかかる送配電系統インフラ増強の代替手段として、送電線建設を伴わないバーチャル送電線（VPL）が広がってきている。VPLは、送配電系統を新設・増強する代わりに、混雑している系統の特定地点にエネルギー・ストレージ・システム（ESS）を設置することで既存の系統インフラの増強と同じような効果を持たせるものである。VPLは蓄電池の特別なアプリケーションの一種と見ることができる。通常、蓄電池は系統運用者が所有し運用することが多い。

・VPL には少なくとも 2 か所の地点に設置された ESS が必要である。一つは供給側である再エネ発電源の近傍に設置され､系統混雑によって送電できない余剰電力が発生した際に蓄電する。これによって出力抑制を回避することができる。もう一つの蓄電池は需要側に設置し､低負荷時や送電容量に余裕がある場合に充電しておいて､送電容量が不足した場合には蓄電池から放電を行うことで需要を満たす。

・VPL として利用される系統用大型蓄電池は、系統容量を増加させながらシステム安定性と信頼性を維持できる技術的な代替手段を提供する。VPL の主目的は、従来型の送配電インフラの増強･拡張と比較して低コストかつ早急に追加的な送配電容量を実現することである｡夏期の猛暑のように系統混雑が特定時期に低頻度で発生するような場合や建設費用が高い割に低利用率が想定される系統のような場合に、VPL は特にコスト効率的なソリューションとなる。さらに、規制が許容するなら、ESS は、周波数調整、電圧管理、瞬動予備力

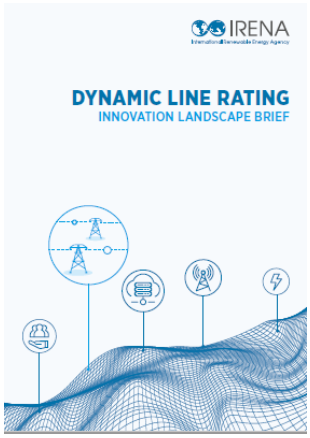
（Spinning Reserve）といったアンシラリーサービスを提供することで電力システムの安定性に寄与することもできる。このように VPL は、送配電インフラへの大規模な資本投資をすることなく高いシェアの VRE 統合を可能とする技術である。

・VPL の電力システムへの貢献をまとめると、系統混雑による VRE 出力抑制の低減、系統インフラ増強と比較して早期に実施可能で柔軟なソリューション、ESS を活用した系統への追加的なサービス提供の 3 点が挙げられる。

・VPL を拡大するために必要な措置は、ESS 所有と運用のための規制枠組みの整備、マルチサービス・ビジネスの実施（DSO/TSO による ESS の所有・運用に関する規制の整理）、IoT・AI 等デジタル化の進展である。

・VPL がパイロットプロジェクトとして実施されている国は、豪州、フランス、ドイツ、インド、イタリア、米国であり、合計の送電容量は 3GW である。これによって投資がり延べされた送配電インフラは 2026 年までに 14.3GW 分と推定されている。

11. IRENA “Dynamic Line Rating: Innovation Landscape Brief”（2020 年 7 月発刊）



・2019年2月に発刊された統合報告書「IRENA Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables」に示された「高シェアのVREを電力システムへ統合してゆくのに必要となる30のイノベーション」を個別に取り上げるSystem Operation: Innovation Landscapeシリーズの第6章。

・系統混雑は、送電線の電気抵抗によるジュール熱が高くなり限界値に達した時に発生する。Dynamic Line Rating（動的線路定格：以後、DLR）は、架空送電線の熱容量を、周囲温度、日射量、風力、風向等の環境変化に応じてリアルタイムで変化させる技術である。その目的は、あらゆる時点での送電容量を最大化することである。架空送電線の冷熱は熱容量の増減に影響を与える。例えば、風量が多く気温が低下すれば送電線の熱容量は増加する。

・電導体はある温度において所定の電流量（＝最大定格容量）だけを通すことができ、それ以上の電流を通しても抵抗熱となって送電ロスを発生させるだけである。その他最大定格容量に影響を及ぼすファクターは送電線の弛度・張力と絶縁体である。

・伝統的に系統運用者は、送配電導体に対して、実際の電流容量ではなく、当該エリアの異常気象の想定に基づいて算定された「固定熱定格」を用いてきた。しかし、実際の導体の電流容量は様々なファクター（電流量、送電線弛度、導体スペック、絶縁体、風量、風向、日射量、周辺温度等）によって常に変化する。「固定熱定格」は刻々と変化する電流容量の変化を考慮に入れることができない。DLR は、モニタリング・センサーを用いて周辺の気候条件を観測しながら、リアルタイムでの送電線の電流容量を推定する仕組みを持つ。

・DLR は 1990 年代に主としてフランスやベルギーで開発されたが、当時は全体的に送電容量に十分な余裕があったことから活用の必要性が低かった。しかし、近年の VRE 急増によ

って再エネのインフローが増加し、逆に火力発電からのインフローが減少する等、既存系統における電力フローが変わった。インフローとオフテイカーの特性の変化は、従来の送電ルートでは発生しなかったピークフローを形成するようになった。このような状況変化の中で、高いシェアの VRE を統合してゆくために、既存系統インフラを有効利用することができる DLR が注目されるようになった。

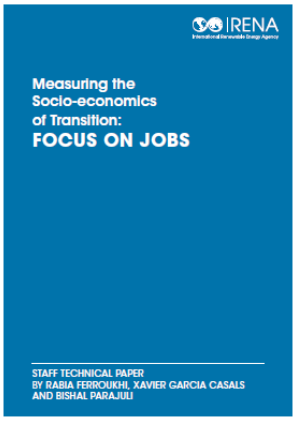
・例えば、風による冷却効果によって風力発電からインフィードと DLR による便益との間に強い相関がみられる風力発電については、欧州で商用化の成功事例がある。風量の多いエリアが大需要地から遠隔の場合、送電線による送電が必要となるが、他方で風量が多いことで送電線の周辺温度が低下し、DLR の活用によって既存送電線による電流容量が 100%～200%増加すると推定されている事例がある。

・多くの系統運用者が既存送電線の容量を増加させるために DLR の採用を検討し始めている。多くの場合、従来の固定熱定格に対して 5～20%程度の容量を増加させることで系統運用の改善に十分効果があることが明らかになった。DLR は、新規の送電インフラを建設することなく、早急に展開可能かつ低廉に定格容量を増加させるオプションとして系統運用者に認識されつつある。

・DLR は電力システムに対して広く適用可能で、系統混雑の減少やアセットの最適利用、既存発電設備からの収益増加、コスト効率性の改善、送配電線の新設回避といった多くの便益をもたらす。これらは最終消費者の電力料金低下や VRE や DER の統合に帰結する。DER は系統計画全体や系統のレジリエンスにも貢献する。系統混雑に起因する VRE の出力抑制の回避、そして送電容量増加によるコスト効率的なディスパッチが可能になることで、VRE の系統統合が促進される点も DLR の重要な貢献である。ベルギー、ドイツ、フランス、イタリア等 EU 各国と米国での DLR の取り組みによると、DLR の採用によって従来と比較して 10～40%程度の送電容量増加が確認されている。

・DLR 実施のためには、電流容量の算定アルゴリズムの再定義と標準化、送電線のリアルタイム・モニタリングを可能とするデジタル化技術、既存アセットの最適利用を促す規制の在り方（伝統的な総括原価方式は既存アセットの最適利用よりも新規建設を促す逆インセンティブを持つ）が必要である。

12. IRENA “Measuring the socio-economics of transition: Focus on jobs”（2020 年 8 月発刊）



・ 2050 年エネルギー転換による社会経済的便益、特に雇用創出に関する IRENA のスタッフ・テクニカル・ペーパー。概要は以下の通り。

・社会経済の各部門は相互にリンクしておりシナジーがあることから、エネルギー転換はエネルギー部門を超えた影響を社会にもたらす。エネルギー産業が世界の GDP と雇用に占めるシェアはわずかだが、エネルギー消費は経済にとって不可欠であり、エネルギー産業は他の様々な部門からのさまざまなインプットに依存している。

・再エネ、電化、エネルギー効率の改善への大規模なシフトはエネルギーシステムの根本的な再構築を促す。エネルギー転換はエネルギー部門だけでなく経済の他の部門にも影響を及ぼす。適切に計画された開発と統合的政策は、転換の推進と数百万人の新規雇用の達成を確実なものとする。IRENA の社会経済的分析は、エネルギー転換における異なるシステム間のインタラクションを考慮したエネルギー転換プロセスを包括的に評価している。予測される GDP、雇用、福利厚生への影響を統合モデルと指標を用いて示している。

・このテクニカル・ペーパーでは、再エネ、エネルギー全体そして経済全体の雇用の世界及び地域的な配分を提示、その上で、「現状＋」と「エネルギー転換」の 2 つのシナリオの下での新規雇用の創出を比較した。その結果、現状＋シナリオを比較して、エネルギー転換シナリオでは 2050 年の GDP は 2.5%高くなり、一層多くの雇用が創出されることが明らかとなった。

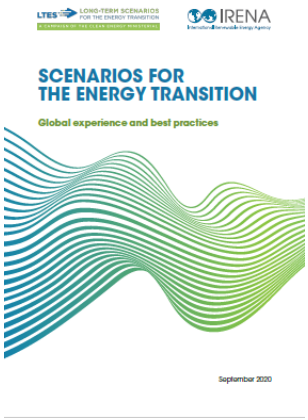
・エネルギー転換シナリオの下での再エネの加速度的拡大は、エネルギー関連の雇用全体を現在の 58 百万人から 2050 年には 100 百万人まで増大させる。エネルギー効率に関連した雇用は 21 百万人となり、現状計画から 21%高い水準となる。再エネ関連の雇用は 2050 年までに 42 百万人に達し、これは現状＋シナリオ（26 百万人）と比較すると 62%高い水準となる。中でも太陽光に関連した雇用は 19 百万人と最大であり、現状＋シナリオとの比較で 63%増である。太陽光に続いては、バイオマスの 14 百万人（現状＋シナリオ比で 101%増）、風力の 6 百万人（同 39%増）の雇用が推定されている。水力は 2050 年に 3 百万人と推定されるが、現状＋シナリオ比 7%増とエネルギー転換による雇用増は少ない。

・エネルギー転換による社会経済への影響は、世界全体の場合と比較して、投資額、社会経済の基本的構造の相違、実施あるいは検討されている政策、エネルギー転換によって誘発される複雑な動学的変化の多様性によって、国やエリアによる違いが大きい。例えば、アジアは再エネによって創出される 42 百万人の雇用の 64%を占めるのに対して、米国大陸全体は 15%、欧州は 10%にとどまる。エネルギー全体の雇用に目を向けると、2050 年の 100 百万人の雇用のうちアジアが 60%を占めて、米国大陸全体が 13%、欧州 12%である。

・エネルギー転換の雇用全体への影響はグローバルレベルではポジティブであるが、個別の

国やエリアについて必ずしも一様ではない。この結果は、エネルギー転換への野心度、化石燃料への依存度、制度面・産業面の基本構造、社会経済的構造に大きく影響を受ける多様なファクター間の相互作用に依存する。

13. IRENA “Scenarios for the Energy Transition: Global experience and best practices”（2020年9月発刊）



・CEMの下での長期エネルギーシナリオ・キャンペーン（LTES）における議論をベースとして、長期シナリオの活用とクリーンエネルギー転換計画策定に関するリコメンデーションをまとめた報告書。概要は以下の通り。

【長期シナリオ開発の強化】

＜強力なガバナンス構造の構築＞

・クリーンエネルギー転換には、関係府省や政府関係組織の幅広い参加と強い協力が求められる。強力なガバナンス構造は、参加型プロセスと長期シナリオに関連する政府組織間の協力の上に成り立つ。策定プロセスを開放し、幅広い政府組織の参加を促すことでコンセンサスは初めて得られる。参加型プロセスによって信頼できるシナリオ策定が可能となる。シナリオ策定には様々な政府組織が異なる計画ステージで関与する。エネルギー計画に関する組織だけでなく、気候変動コミュニティも含めた組織間での強い協力が必要である。

＜シナリオ・バウンダリの拡張＞

・モデルの推定結果は、モデルそれ自体のスコープに否応なく左右される。クリーンエネルギー転換の複雑さを適切に反映するために、モデルとシナリオは、新しい技術、ビジネスモデル、破壊的イノベーションを考慮する必要がある。クリーンエネルギー転換が経済成長、雇用、福利厚生に及ぼす影響について政策立案者が発する疑問を適切に調査することが不可欠である。逆にシナリオ開発者が政策立案者に発したい質問についてはその必要はない。包括的で公正な転換をどのように達成するかについてシナリオをガイドとして必要とするのは政策立案者だからである。クリーンエネルギー転換は、エネルギー部門に限らず経済のすべての部門で破壊的なイノベーションをもたらす。エネルギーシステムの非集中化、デジタル化、電力化は、再エネが主力となる将来へ向けた鍵となることから、クリーンエネルギー転換シナリオに確実に盛り込む必要がある。

【シナリオ活用の改善】

＜シナリオ策定の目的の明確化＞

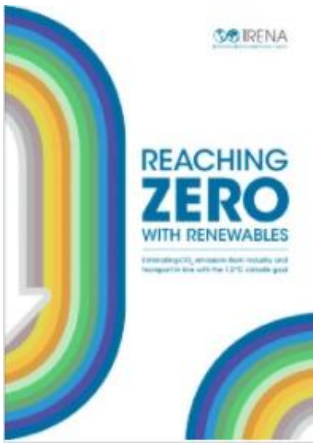
・シナリオはその内容や目指す政策的目標によって異なる目的に活用することができる。クリーンエネルギー転換シナリオの誤った解釈を回避するために目的を明確に区別化するべきである。

・予測は、将来の発生事象やトレンド、あるいは「今後何が発生するのか」という質問に答

えるために使われる。あらかじめ設定された目標から引き戻して将来への潜在的パスを描き、目標達成に向けた政策決定をサポートして「どのように目標を達成するのか」という質問に答えるためにバックキャスティングが手法として用いられる。
・将来のあり得る姿についてステークホルダーとの間で大まかなコンセンサスを得るためのツールとしてシナリオが用いられる。脱炭素を達成するための将来パスの検討に当たって野心度を高める議論のベースとしてもシナリオは活用される。
・クリーンエネルギー転換に求められる送配電系統の開発・増強と規制の在り方はある程度の確実性が必要である。このため、シナリオは現実的で保守的であることが好まれる。しかし、モデル分析はしばしば頑強な BAU シナリオに基づく結論を導出しがちである。この状況を回避し、クリーンエネルギー転換に伴う不確実性やリスクを同定して、将来の危機や課題、機会に対する認識を明らかするために探索的分析（はじめからモデルありきではなく、データの持つ意味を現実的かつ多面的に把握した上で分析を行う手法）が有用である。
＜高い透明性効果的なコミュニケーション＞
・透明性はシナリオの品質を確実にして信頼性を高める。複雑なクリーンエネルギー転換に関するシナリオの仮定と結果については、明確なコミュニケーションが求められる。コミュニケーションは、長期エネルギーシナリオの参加型プロセスを促進し、クリーンエネルギー転換の達成に協力が必要となる重要なアクターのシナリオ策定への関与を確実にする。シナリオから得られる見識は、シナリオ策定に日常的に関与していない非専門家にも理解できるようにシンプルなメッセージによって伝達されるべきである。シナリオに用いられたデータ、手法、仮定に関しては高い透明性が求められる。これによってシナリオが多方面から精査され、シナリオから導出された結果について政策決定者がトレースすることも可能となる。

【シナリオ策定能力】
＜政府内でのシナリオ策定能力
シナリオ策定作業を内製化するためにモデリングとシナリオ構築のための専門チームを持つことは非常に重要である。長期シナリオの定期的な更新のためのプロセスを制度化することや外部ステークホルダーを巻き込むことで、政府内のシナリオ策定能力の成長と継続を支えることができる。成功かつ卓越した長期シナリオは、モデル結果を理解するための absorptive capacity（新たな情報の価値を理解・認識して目的に適用させてゆく能力）を政府内に必要とする。アウトソーシングは高度なシナリオ構築を可能とする技術へのアクセスを可能とするが、政府内でシナリオ結果を理解するためには、シナリオデータとモデリング手法の完全な開示が求められることになる。

14. IRENA “Reaching zero with renewables: Eliminating CO2 emissions from industry and transport in line with the 1.5ºC climate goal”（2020 年 9 月発刊）



・2050 年のゼロエミッション達成に際して、最後まで CO2 排出削減が困難とされる産業部門と運輸部門の 7 部門の対策について焦点を当てた報告書。IRENA が従来発表してきた「2050 年エネルギー転換シナリオ」においてもこの 7 部門の排出削減対策は課題として残されていた。概要は以下の通り。

・世界平均気温の上昇を産業革命以前の水準から 1.5℃以下に抑制するには、今世紀後半の早い段階で、経済のすべての部門の CO2 排出量をゼロにする必要がある。これを実現するには、特に一部の主要産業や運輸部門において非常に困難を極めることになる。ゼロエミッションを達成するためには、従来採用されてきた考え方とは全く異なる考え方が必要となる。部分的な排出削減だけでは十分ではなく、ゼロエミッションの達成を妨げるアクションもある。政策立案者や産業界の投資家の焦点は、ゼロエミッション目標の達成と整合性を持ったオプションを段階的に拡大していくパス上になければならない。

・この報告書で提示しているオプションの多くは、20 年以上前から認識されていて、議論や実験がなされてきた。その多くは研究段階にとどまったままで導入には至らず、比較的小さな改善しか行われてこなかった。しかし、ごく最近になって、パラダイムを変える可能性のある 2 つの変化が起きて、今後 10 年そしてその後には、はるかに急速な進歩を遂げることが期待できるようになってきた。変化の第 1 は、CO2 排出量の大幅削減の重要性が社会的に強く広く認識され、政治的コンセンサスが高まっていることである。第 2 に、再エネと電池のようないくつかの実現技術（enabling technologies）が大きく発展し、現在ではすべての国と多くの用途で、信頼性が高くかつアフォーダブルな価格で利用できるオプションとなったことである。

・エネルギー用途そして原料用途のための再エネ利用は、ゼロエミッションへの道筋の中心となる。過去 10 年間で再エネのコストは急速に低下しており、今後一層のコスト削減やスケールアップの可能性がある。従来は見過ごされていた再エネ利用のオプションが広がってきている。この報告書が示すように、再エネの利用には、従来の分析で明らかにされてきたよりはるかに高い可能性がある。再エネ電気（太陽、風力、海洋、地熱）、再エネ熱、再エネ合成燃料（バイオマスあるいは再エネ電気による合成燃料製造）は、産業部門や運輸部門におけるエネルギー需要に対応することができる。また、バイオマスと再エネ合成燃料は、化石燃料の代替として、産業用原料を供給することができる。これらの再エネをベースとした産業用や運輸用のソリューションは、これまで緊急性をもって真剣に検討されてこなかった。

・発電や乗用車といったいくつかの部門では、ソリューションや政策措置は（依然として課題はあるものの）比較的明確となってきた。他方で、脱炭素化が非常に困難な以下の 7 つの

産業・運輸部門が存在する。

1. 製鉄
2. 化学・石油精製
3. セメント生産
4. アルミ生産
5. 貨物陸運
6. 航空
7. 海運

・今後大規模な政策変更が行われないと仮定すると、これらの 7 部門からは、2050 年までのエネルギー起源と工業プロセス排出量の 38%を占める排出が続き、最終エネルギー使用量の 43%を占めることになる。これらのすべてのケースに対して、再エネは今よりもはるかに大きな役割を果たすことができる。再エネは今後数十年の間にエネルギーと原料の主要な供給源となるように成長しなければならない。そうなれば、再エネはこれら 7 部門からの直接排出量の約 2/3 の削減を実現できる可能性がある。

・これらの各部門には潜在的なソリューションがアベイラブルであるが、商業的に成熟し、広い普及の準備ができているものはない。その可能性と最適な利用方法については多くの不確実性が残されている。これらのオプションの分析には、製品のライフサイクル全体が十分かつ適切に考慮されておらず、部門間の相互依存性、シナジー効果、トレードオフが十分に理解されていないことが多い。より深い分析と議論、そしてエビデンスと経験を構築するためには、より広範なパイロットプロジェクトが必要である。すべての利害関係者は、これらのプロジェクトを実現するためのアクションを優先付けして、今後 数十年間でのスケールアップに向けてより迅速に動かなければならない。

・本報告書では「何が可能なのか」を探求している。それは、2060 年頃までに主要な産業や運輸部門でどのようにしてゼロエミッションを達成できるかを検証すること、そして、そのために再エネをベースとした技術の潜在的な役割を評価することである。このトピックの概観と最新の主要検討結果やデータを提供することが本報告書の目的である。これまでの IRENA の技術分析から得られた検討結果に基づいて、現状、課題、コスト、オプションの可能性など、重要な詳細についての専門家の見解をまとめた。また、一層詳細な議論が必要な課題を示し、そうした作業の焦点となるべき知見のギャップを浮き彫りにした。本報告書が、政策立案者やその他の利害関係者の間で必要とされる包括的情報に基づいた議論の出発点となることを期待する。

・2020 年 4 月に発刊された IRENA 「Global renewables outlook report」は、世界の気温上昇を「2℃以下」に抑えるという目標を達成するための 2050 年までのパスに焦点を当てている。そこで提示された「エネルギー転換シナリオ」においても依然として残るとされるエネルギー起源や工業プロセスからの CO2 排出量を削減するために必要な追加的な削減について本報告書は検討している。ゼロエミッションを達成する DDP シナリオ（Deeper

Decarbonisation Perspective シナリオ）は、すべてを包括する完璧なシナリオではないが、2060年までにエネルギー起源及び工業プロセス関連の CO2 排出量をゼロにするためのアクションを加速させるための一助となり得る。下図は、DDP 分析で特定されたゼロエミッションに到達するためのさまざまな排出削減手段の削減量の組み合わせをまとめたものである。この分析をベースに、本報告書では、産業革命以前の水準からの気温上昇を 1.5℃に抑えるための前提条件である DDP をどのように実現できるかを探っている。

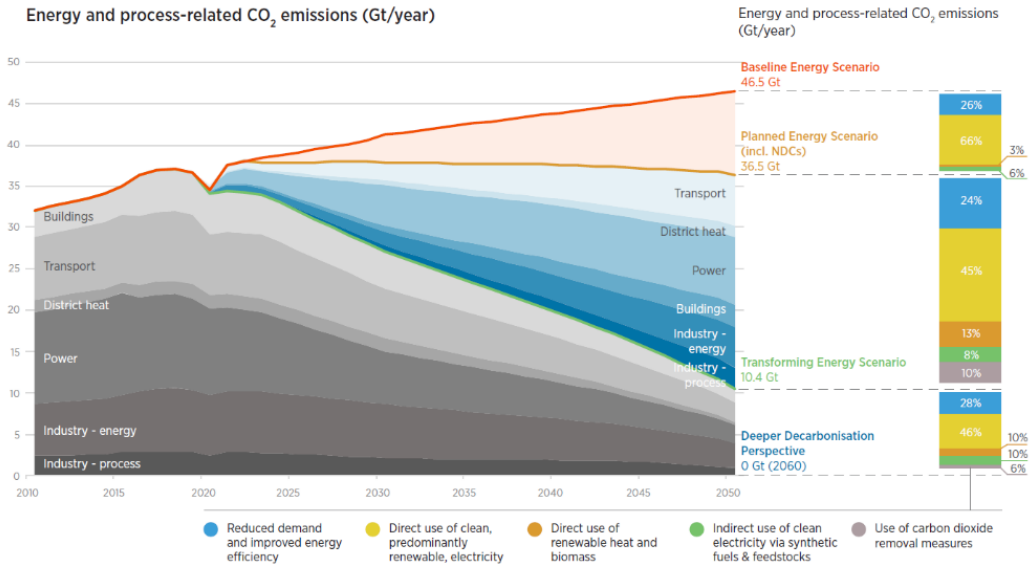


図 3　2050 年時点でのベースラインシナリオから DDP シナリオまでの各排出削減対策の貢献量

注：図中の 5 つの排出削減対策は次ページに列挙。

・本報告書で取り上げた各部門は、排出削減戦略の検討の初期段階にある。しかし、現在検討されている対策オプションの多くは、部分的な排出削減しか実現できず、最終的にゼロエミッションに到達しなければならないことと整合していない。資源と時間の浪費と排出のロックインを回避するために、最終的な目標である CO2 排出量のゼロ化に焦点を当てる必要がある。最終的にゼロエミッションまたはゼロエミッションに近い状況を実現できない技術や工業プロセスは、真のゼロエミッション・ソリューションの課題を大幅に縮小させることができるか、今後 40 年以内に代替されるか、あるいは、ゼロエミッション・ソリューションを成功させるための足がかりとなり得る場合にのみ追求する価値がある。

・この基準を適用した場合、各部門で現在検討されているオプションのごく少数だけがゼロ CO2 ゼロエミッション目標に合致する。部門ごとにアプローチは異なるが、大部分の排出削減は以下の 5 つの「排出削減対策」の組み合わせによって達成され、そのうちの 3 つは再エネに依存している。

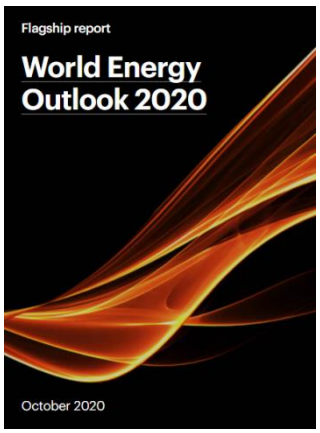
1. エネルギー需要の削減とエネルギー効率の向上：エネルギー効率改善、プロセス変更、行動変容、サーキュラー・エコノミー原則の適用など様々な行動を通じたエネルギーと物質への需要減少と原単位の改善
2. クリーンな電力の直接利用：最終需要の電化による既存化石燃料需要の代替と再エネ発電による電力の利用
3. 再エネ熱とバイオマスの直接利用 （太陽熱、地熱、バイオ燃料、バイオマス原料）：熱需要の一部に太陽熱や地熱を利用、熱のためのバイオエネルギーの直接利用、バイオ燃料やバイオマス原料の生産・利用を含む持続可能なバイオマス利用、バイオマス炭素回収・貯蔵（BECCS）の組み合わせ利用
4. クリーンな電力の間接的利用 による合成燃料や合成原料の利用（主に再エネ発電による電力の利用）：非化石燃料源（バイオマスまたは DAC：direct air capture ）から回収した CO2 を利用して、水素、または水素から生産された合成燃料や合成原料の供給、水素は「クリーン」で、望ましくは再エネ水素（グリーン水素）であるべき
5. CCUS を含む CO2 除去手段の利用：化石燃料をベースとしたエネルギー生産や工業プロセスから排出されるほとんどまたはすべての CO2 を回収し、回収した CO2 を永続的に貯蔵するか、または後で放出されないような方法での CO2 を回収利用（「ブルー水素」、化学原料・燃料生産プロセスや大気中からの DAC を含む）

・本報告書では全編にわたってこれらの削減対策の各部門への適用について検討している。しかし、いずれの場合も、様々な要因やトレンドがその活用を支えている。その中でも特に重要なトレンドは、再エネのコストが継続的に低下していることと、急速にその普及分野が拡大していること、電化の可能性が広がっていることである。同時に、高シェア VRE の実現技術としての需要側の柔軟性（≒DR）への理解が広がっていることも重要である。DR には産業部門と運輸部門の両方が貢献し得るし、同時に受益者になることもできる。このような柔軟性の可能性については、IRENA が 2019 年に発刊した報告書 「Innovation landscape for a renewable-powered future 」や近日中に発刊予定の報告書 「Electrification with renewables: Driving the transformation of energy services」においても詳細に検討されている。

・その他のポジティブな要因やトレンドの例としては、工業プロセスの工場立地が柔軟に検討されるようになり、低コストでの再エネ賦存量の多い場所に移転するオプションが広がっていること（≒アルミ精錬工場の移転等）、グリーン水素技術が着実に向上しコスト低下の可能性があること、蓄電池のコストが低下したことで EV 乗用車のサプライチェーンが急速に拡大し、貨物トラックにも EV 化が波及する可能性があることなどが挙げられる。本報告書では、このようなトレンドを通じて、ゼロエミッション目標を達成可能な見通しとするための産業部門と運輸部門の可能性を探索している。

IEA/IRENA 発刊の再エネ関連主要レポートの要約（2020 年 9 月～11 月分）

1. IEA “World Energy Outlook 2020”（2020 年 10 月発刊）



・IEAのフラッグシップ年次統合報告書で、再エネ関連は5.6 Renewables （Chapter 5 Outlook for energy demand）と 6.3.2 Renewables （Chapter 6 Outlook for electricity）の2章にわたる。

≪5.6 Renewables （Chapter 5. Outlook for energy demand）≫

エネルギー最終消費における再エネ利用に焦点を当てている。概要は以下の通り。

・COVID-19パンデミックによる一時的なプロジェクト遅延やサプライチェーン分断により2020年の再エネ普及の成長は鈍化するが、今後10年間において、風力と太陽光は年率10%で、再エネの最終消費は4%で、それぞれ成長が見込まれる。

・強力な支援策に支えられ、電気自動車（EVs）とヒートポンプのコスト低下が向こう 10 年の市場拡大を牽引するものと見られている。

〇発電部門：その他の電源とは異なり、「公表政策シナリオ（STEPS）」において COVID-19 パンデミック前と比べて再エネ発電の見通しはほとんど変わりなく、2019 年～2030 年にかけて年平均 5%で成長が見込まれている。世界の多数の国・地域において最も安価な電源となりつつあることと政策支援により太陽光の成長見通しは一層高まる。技術の進展とコスト低下により洋上風力が大きく貢献することで風力も成長見通しを維持する。

〇運輸部門： STEPS において、米国、中国、欧州を市場の牽引役として、向こう 10 年間でバイオ燃料の利用が年率 5%成長を続ける見通し。中国、欧州を市場の牽引役として、乗用車の電化の進展により再エネ発電の需要は 2019 年から 2030 年までに 2.5 倍に拡大する。インド、インドネシア、ブラジルでは 2030 年にかけてバイオ燃料の混合燃料の利用が増加する見通し。

〇熱部門：STEPS において、熱部門における全エネルギー需要に占める再エネ利用の割合は 2019 年の 10%から 2030 年には 14%にまで拡大する見通し。中国や欧州では産業政策によるガスネットワーク経由でのバイオメタンの供給が拡大し直接熱供給システムや建築物でのバイオ燃料の利用拡大に寄与する見通し。建築物部門では電化の進展、バイオ燃料利用の増加及び太陽熱拡大により、2030 年にかけて再エネの熱利用が拡大する見通し。

・STEPS において、COVID-19 パンデミックによる経済的困難や支出制約圧力の環境下、最終消費における再エネ利用の拡大如何は今後の政策導入に大きく依存する。支援政策は、農産物の生産と排出削減への支援にも結び付くことから、特に運輸部門におけるバイオ燃料の利用拡大に向けて大きな役割を果たすものと考えられる。

・安全な調理用ガスが利用できない人口はアフリカでは増加が続き、2030 年には全世界で約 23 億人が家庭におけるエネルギー需要を満たすために伝統的バイオマスに依存するもの

と見られている。

≪6.3.2 Renewables （Chapter 6. Outlook for electricity）≫
発電部門における再エネ（特に太陽光と風力）のトレンドについて詳述されている。概要は以下の通り。
・COVID-19 のロックダウン措置によっても再エネはレジリエントであることが証明され、2020 年も再エネ発電量、再エネ発電容量ともに成長した。STEPS においては、再エネ発電は 2030 年にかけて年率 5%で成長する見通しであり、その牽引役は太陽光と風力である。発電量は 12,500TWh 近くに達し 2018 年の石炭火力の発電量を 25%上回る見通し。SDS においては、再エネ発電は年率 8%の成長率で一層急速に増加する見通しにある。
・太陽光は最も大きく成長する再エネ源である。平均発電コストは 2010 年以降 80%も低下した。支援策によって低コストファイナンスの利用が可能となり、それが最低コストの実現を可能にした。太陽光発電設備の設置は 2021 年には COVID-19 以前の増加ペースに戻り、その後も継続して拡大する見通し。SDS においては、全世界の太陽光発電設備の年間増加量は 2030 年までに 280GW/年、2040 年までに 320GW/年に達する見通しにある。
・風力も大きく成長した。世界平均発電コストは過去 10 年間で 40%減少し、130 ヵ国で支援策が導入されている（うち 70 ヵ国は洋上風力を導入する意向あり）。技術の進展と低コストファイナンスにより洋上風力の発電コストは今後 5 年間で 50 ドル/MWh 程度となり、最近完工したプロジェクトの半分にまで低下する見通しにある。SDS では、風力発電設備の年間増加量は 2030 年までに 145GW/年、2040 年までに 160GW/年に達する見通しにある。
・インドの一人当たり消費電力量は 850kWh と全世界平均の 30%未満である。2020 年代に家庭での家電や空調の保有が急速に増えることで 2030 年までに 250TWh まで大幅に増加する見通し。再エネ発電設備容量が 2022 年までに 175GW 増加し総発電容量の 60%に達することにより石炭火力発電容量は 2025 年までに頭打ちとなる見通しにある。

2. IRENA “Reduce: Non-bio renewables”（2020 年 9 月発刊）

・Circular Carbon Economy をテーマとした統合報告書の一部で、Reuse、Recycle、Remove、Reduce のうち Reduce に焦点を当てている。2020 年 G20 議長国サウジと KAPSARC からの要請で IRENA が作成したもの。概要は以下の通り。

・COVID-19 パンデミックに端を発する健康・人権・社会及び経済危機は社会全体に計り知れないインパクトをもたらした。復興に向けた複数の経済刺激策を検討するに際しては、社会全体の脱炭素化を通じた世界の気候と持続可能性目標の達成の視点を念頭に置く必要がある。

・再エネ技術は、持続可能性とエネルギー安全保障、雇用創出とレジリエンス強化を満たしながらの経済的復興において重要な役割を果たし得る。省エネ戦略と相まった再エネソリューションの迅速な導入は、世界各国の約束目標の達成に必要とされる 90%超のエネルギー起源 CO2 削減を実現可能とする、安全で、信頼性が高く、受容可能な道程を描き得ると IRENA は分析している。

・多くの市場において、太陽光と風力は急激にコスト競争力を有するようになり、今後 10 年間でそのほかの大半の再エネ電源も完全にコスト競争力を得るようになるものと見られている。需要家による屋根置型太陽光発電、蓄電池や電動車の導入は、系統運用者にとり効率的で柔軟性があり予見性を有する利用可能なソリューションになりつつある。

・IRENA の Transforming Energy Scenario によれば、発電部門における再エネのシェアは 2017 年の 25%から 2050 年には 86%まで上昇する見通しであり、その牽引役は太陽光と風力である。技術進歩と支援政策により太陽光と風力は他電源に比して既にコスト競争力を有している。加えて、エネルギー最終消費における電化率は今日の 20%程度から 2050 年には 50%近くにまで高まる見通しにある（図 1）。

・産業、運輸、建築物部門では、現状より一層再エネ利用を促進する必要がある。重化学工業（セメント、化学及び石油化学、鉄鋼及び製鉄）、重量貨物輸送（航空、海運）といった GHG 削減が特に困難な産業分野における再エネ利用に向けた支援は不可欠である。電力の直接利用に加えて潜在的ゲームチェンジャーとして存在感を増しているグリーン水素や合成燃料の利用がそのような産業分野におけるソリューションになり得る。運輸分野ではバイオ燃料に高い関心が集まるものとみられる。

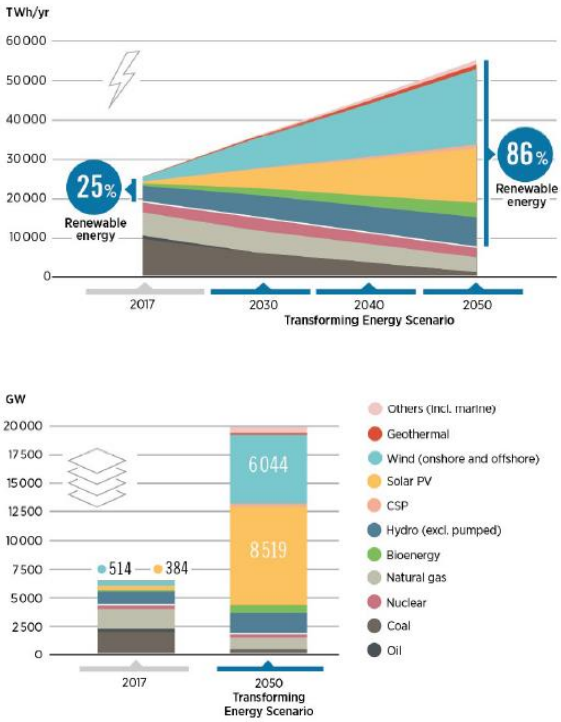


図 1　発電構成及び発電設備容量の内訳（2017 年～2050 年）

・インフラや効率化を含むエネルギーシステムに対する投資額は 2050 年までの累積で 110 兆ドルに達する。うち 80%が再エネ、エネルギー効率、エネルギー最終消費における電化、送電網及び柔軟性に関するものと見込まれている。この投資は、2050 年までに、再エネ分野での 42 百万人の雇用を創出し、累積で 98 兆ドル相当の経済効果により GDP を押し上げ、社会的幸福感をより早く深く改善させるであろう。

・世界中で再エネ導入を牽引する力強いファクターが存在しているにも拘わらず、先進国及び後進国ともに、再エネ導入を阻害する要因が存在する。それらは資金調達やコストから認知度や文化的背景など特定市場や再エネ技術により様々に異なる。

・市場とイノベーションを促進するため、各国政府は野心的目標を通じてエネルギー転換に向けたコミットメントの姿勢を発信する必要がある。G20 加盟国は再エネ技術の開発、導入及び普及の促進において重要な役割を担うことが可能である。目標、支援政策、組織的能力の構築及び製品・サービスの革新は政策立案者に求められる関わりの核となるものである。

3. IRENA “Recycle: Bioenergy”（2020 年 9 月発刊）

・Circular Carbon Economy をテーマとした統合報告書の一部で、Reuse、Recycle、Remove、Reduce のうち Recycle に焦点を当てている。2020 年 G20 議長国サウジと KAPSARC からの要請で IRENA が作成したもの。エネルギーシステムの転換と環境に配慮したサーキュラーエコノミーの形成にバイオエネルギーを組み込む重要性を主張している。概要は以下の通り。

・再エネ供給量全体に占めるバイオエネルギーの比率は 2017 年に 70%である。バイオエネルギー利用の最大部門は暖房・厨房を中心とする建築物で、次いで産業部門の熱利用、そしてバイオ燃料の運輸部門が続く。

・バイオエネルギーが一次エネルギー供給量全体に占める比率は 10%である。産業、運輸、建築物といった最終エネルギー消費の各部門において化石燃料を代替するエネルギー源や原料としてバイオエネルギーは重要な役割を果たす。一次エネルギーに占める近代的バイオマスの比率は 2050 年には 23%（現状の 5 倍）にまで拡大する。一方、現時点でバイオエネルギー利用の大部分を占める薪炭など伝統的バイオマスの利用は 2050 年までにフェーズアウトしなければならない。

・バイオ燃料は、運輸部門での化石燃料を代替し、電化（EV）を補完するものとして重要な役割を果たす。IRENA の分析では、2017 年に 1,530 億リットルであった液体バイオ燃料消費量は 2050 年には 6,520 億リットルまで 5 倍以上拡大する見込みである。建築物部門については、近代的バイオマスは地域熱供給システムや暖房そして熱供給やコージェネによる電気の供給で一層重要な役割を果たす可能性がある。産業部門においては、化石燃料を代替する原料として、あるいは低・中温熱を供給する燃料として役割を広げ、潜在的には同部門の最終エネルギー消費全体の 25%を満たす必要がある。

・他方、バイオマスの燃料・原料転換コストや環境や社会に悪影響を与えないかたちでの十分な量の供給など、バイオエネルギーには幾つかの大きな制約がある。しかし、バイオマスの利用が適切に管理・規制される場合においては大気中に排出される CO_2 排出量の削減に寄与する。

・バイオエネルギーが BECCS と合わせて利用される場合、ネガティブ排出（≒吸収）としてネットでの CO_2 排出削減に寄与する。

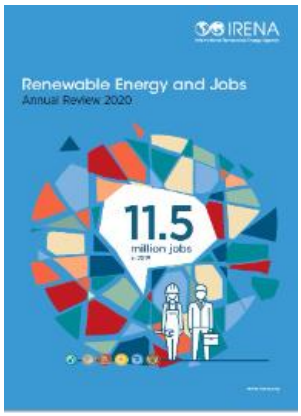
・バイオマスにはエネルギー環境問題へ貢献する大きなポテンシャルがあるが、環境面、社会面、経済面から持続可能な形で利用されなければならない。バイオマス利用の持続可能性を信頼することは利用拡大に際しての重要な要件である。特定のバイオエネルギーのサプライチェーンに関連したリスクを考慮するためには持続可能性に関するアセスメントが必要である。

・バイオエネルギー利用の拡大には強い複数の誘因が存在するもののグローバルでの一層の開発には多くの障壁が存在する。バイオエネルギーの高コスト、資金調達不足、適切な政策や規制の欠如等である。特にバイオ燃料の開発は石油価格変動の影響を強く受ける。これら

障壁を取り除くことが多くの国・地域におけるエネルギー転換の実現に欠かせない。各国政府は、明確な政策や規制の枠組み（市場を拡大するための野心的な目標、廃棄物やバイオ燃料混合比率に関する規制等）に加えて、補助金、固定価格買取制度及び認証スキームなどで重要な役割を果たす。

・相互に関連し合う世界において、国際協力と連帯は環境問題の解決そして経済的平等及び社会的不公正の是正に不可欠である。この点において G20 加盟国の果たす役割は大きい。

4. IRENA “Renewable Energy and Jobs Annual Review 2020”（2020 年 9 月発刊）



・毎年発刊されている再エネ産業の雇用動向に関する年次報告書の 2020 年度版。概要は以下の通り。

・再エネ部門の雇用者数は IRENA が調査を開始した 2012 年から世界的に拡大を続けており、2019 年には少なくとも 11.5 百万人が直接・間接的に雇用されている（図 2）。再エネ雇用者における女性比率は 32%にまで増加しており、エネルギー部門全体の 22%よりも高い。

・太陽光産業が全体の 33%に相当する 3.8 百万人と最大のシェアである。太陽光産業における雇用者数のうち 59%（2.2 百万人）が中国であり、中国を含む上位 10 ヵ国が雇用者総数の 87%を占める。オフグリッド分散型太陽光や自立型生産設備（太陽光による灌漑用ポンプ等）は、農業生産、健康管理から情報通信や商取引まで、特にアフリカやインド等の地方部において多くの雇用を創出している。

・エタノール（2%増）、バイオディーゼル（13%増）に支えられ、バイオ燃料関連の雇用は 2019 年に 2.5 百万人にまで増加した。労働集約型サプライチェーンのブラジル、コロンビア、マレーシア、フィリピン及タイではバイオ燃料の生産が増加した一方、米国や欧州では減少した。

・2019 年の風力産業の雇用者数は 1.2 百万人であり、うち 21%が女性である。太宗は陸上風力であるが、洋上風力を有する国は 2019 年には 18 ヵ国まで増加するなど（10 年前は 10 ヵ国）、洋上風力のサプライチェーンは拡大している。

・水力は稼働済みの設備容量で見ると最大の再エネであるが成長は鈍化している。水力産業では約 2 百万人が主に保守・運用業務に従事している。

・全世界での化石燃料から再エネへのエネルギー転換に向けて、職業訓練、充実した教育カリキュラム、講師トレーニング及び ICT 技術による遠隔授業のさらなる導入が不可欠である。

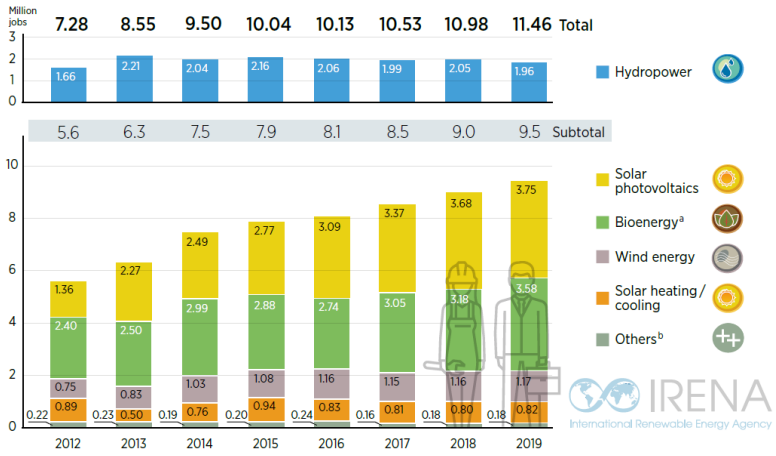
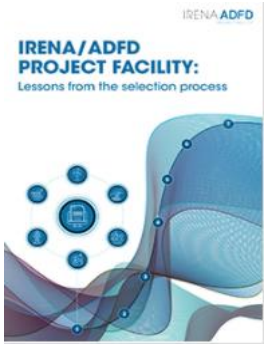


図 2　全世界の技術別再エネ分野の雇用者数（2012～2019 年）

5. IRENA “IRENA/ADFD Project Facility: Lessons from the selection process”（2020 年 10 月発刊）



・IRENA とアブダビ開発ファンド（ADFD）が共同で進めてきた再エネ開発への 7 年間の援助資金供与（全 7 サイクル）の完了を受け、得られた知見の共有を目的にまとめられた報告書。概要は以下の通り。

・7 年間における全 7 サイクルを通じて、今日までに太陽光発電、風力発電、バイオマス、水力発電、地熱発電及び蓄電池を含む複合技術（ミニグリッド、オフグリッド及び大規模発電等）を含む 26 プロジェクトが実施に向けた諸段階に進んでいる。計画上の発電設備容量は合計で 250MW に達し、アフリカ、アジア、ラテン・アメリカ、カリブ及び太平洋地域の 21 ヵ国、3.5 百人に恩恵をもたらすものと見込まれる。

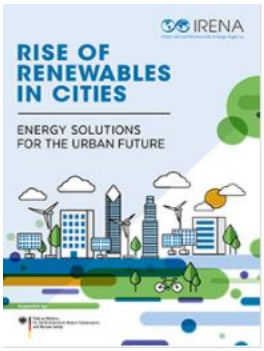
・途上国においては、持続可能な社会経済的開発の促進とエネルギー・アクセス改善のための再エネ技術導入に対する援助ファイナンスのニーズは一層高まっている。7 つのサイクルを通じて申請された 602 案件のコスト合計は 207 億ドルであり、それに対して ADFD からの 59 億ドルと協調融資先からの 148 億ドルの融資が必要とされた。最終的に世界中から 32 プロジェクトが選ばれ、ADFD より 3 億 5,000 万ドルとその他資金提供者より 5 億 6,700 万ドルの融資が行われた。

・得られた知見は以下の 5 点にまとめられる。

1. 途上国における再エネプロジェクト開発向けファイナンス援助の需要は依然として高い。
2. 資金調達サイクルを通じてのマーケティング機会の増加及び明確な借入条件は、後のサイクルにおいて良い結果をもたらした。

3. IRENA と ADFD が共同で開発して提供されたデジタルプラットフォームは案件審査を行う専門家間の効果的な協調をもたらした（資金調達先の 90%以上が利便性が高いと回答)。
4. ADFD による援助ファイナンスの提供によって、民間プロジェクトにおける政府保証の要求を乗り越えることが可能となった。
5. プロジェクトの開発促進及び専門家のプロジェクト評価への支援において IRENA は重要な役割を果たした。

6. IRENA “Rise of renewables in cities”（2020 年 10 月発刊）



・ドイツ連邦環境・自然保護・原子力安全省（BMU）からの支援によって作成された報告書。世界中の都市における再エネ資源のポテンシャル、選択可能な技術及びシステム計画の優先順位を強調している。概要は以下の通り。:

・都市（Cities）は気候変動の緩和と適応の観点で存在感を増している。グローバルレベルでの都市の CO2 排出量の大きさだけでなく、都市の排出削減ポテンシャルの大きさ、気候変動に対するレジリエンシーの高い都市インフラ構築の必要性の高まりからである。

・世界の都市は、居住に適した低炭素な環境を整備しつつ、2050 年までに世界人口の 2/3 を受け入れる必要がある。この実現に向けて、強い政治的意思と技術の進歩により、再エネ技術を地域のエネルギーシステムに統合させることがエネルギー転換の一部となっている。

・本報告書は、1）都市における再エネ資源ポテンシャルと再エネ導入目標、2）選択可能な再エネ技術、3）地域で利用可能な再エネ活用のスケールアップのための都市エネルギーシステム計画の 3 つの重要な知見について説明している。

≪都市における再エネ資源ポテンシャルと再エネ導入目標≫

・地域で利用可能な再エネ資源と都市近郊の再エネ発電に関連して都市レベルで設定された再エネ導入目標を分析した結果、以下のことが明らかになった。

・再エネ目標を設定している都市（全部で 671 都市）の 80%以上が経済的に裕福な温帯～寒帯気候の欧州と北米に集中している。他方、アジアやアフリカの都市は、エネルギー需要が今後高まることが予想されているにも関わらず、再エネ導入目標の設定が遅れている。

・再エネ導入目標を有する都市の多くは 10 万～50 万人の人口規模である。巨大人口を抱えるメガ都市の大半が再エネ導入目標を設定しているが､その目標となる再エネシェアは控え

めな数字にすぎない。
・水力発電、バイオマス、廃棄物からのエネルギー回収は、都市が再エネ導入目標の達成とエネルギーの脱炭素化を実現するうえで既に重要な役割を果たしている。太陽光と地熱利用については、その巨大なポテンシャルの未だ一部の利用に留まるものの、都市での利用が進みつつある。他方、風力の利用は一部で行われているがその規模は小さいままである。

≪選択可能な再エネ技術≫
・太陽光発電：2018 年における家庭用太陽光発電の個々の設備容量は平均で 6.4kW であった。都市における太陽光発電のスケールアップには、土地制約、地域系統における変動再エネ電源増加による潜在的影響、太陽光発電システムが地域系統やユーティリティにもたらす経済的示唆に対する理解不足といった特有の課題がある。
・太陽熱：建築基準によって新築建築物に対して太陽熱温水器の設置を義務付ける都市・国が増加している。太陽熱による地域熱供給は熱供給ネットワークを 60～70℃未満の低温地域温熱システムに転換することで可能となり「第 4 世代」と呼ばれている[44]。しかし、ガス供給ネットワークが形成されてガス価格が安価な国においては、太陽熱システムの競争力が弱く、経済的インセンティブや促進スキームが必要である。
・太陽熱冷房（Solar thermal cooling）： 2016 年に 2,000TWh であった世界の冷房需要は 2050 年には少なくとも 3 倍にまで増加する見通しである。猛暑期に停電を回避し系統増強費用を抑えるべく電力ピーク需要を下げることを目的に太陽熱は吸収式冷凍機と併せて利用されることが多い。
・バイオエネルギー及び廃棄物からのエネルギー回収 （Bioenergy and waste-to-energy）：バイオマス由来のエネルギー資源は太陽光と比較して安定的なエネルギー供給が可能であり、サーキュラー・エコノミーの形成にも寄与する。他方、持続的な資源確保の不確実性や廃棄物からのエネルギー回収に関する社会的許容度の醸成が課題となる。
・都市風力発電（Urban wind power）：都市環境における風力発電の利用は依然として研究開発段階にある。実験データの不足は都市風力発電開発の大きな制約となっている。
・地熱の直接利用：世界の各都市における地熱の直接利用は 2010 年より倍増し 2019 年には約 108$GW_{-thermal}$ に達した。新たな都市形成または既存都市の拡張に対する地熱エネルギーシステムの導入は、既に確立されている都市インフラへ地熱システムを統合する場合に比べてはるかに費用効率性が高い。
・再エネの都市インフラへの統合の促進に向けた EV、蓄電システム、AI によるエネルギー管理システムなどの革新的な技術によるスマートグリッド開発が重要である。

[44] エネ研注：初期の地域熱供給システムでは 200℃を超える高温蒸気を供給するのが一般的であったが、第 2 世代では熱媒体が高温蒸気から温水に代替され、その温水温度も第 3 世代では 70～80℃、第 4 世代では 60～70℃未満まで低下している。

≪都市エネルギーシステム計画≫

・再エネのエネルギーシステムへの統合に特化した都市エネルギーシステム計画は、世界のエネルギー転換を進めるうえで欠かせないものであり、適切なモデリング手法を計画策定に用いることが鍵となる。本報告書では、都市エネルギーシステム計画を支援するために広く利用されているモデリング手法と特に途上国における障壁について調査を行った。

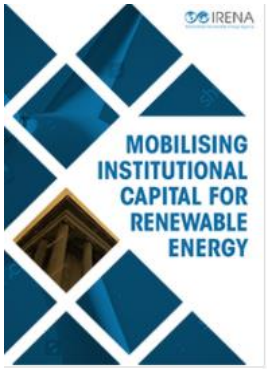
・エネルギーシステム計画策定における障壁として、都市レベルでのエネルギー需給データへのアクセシビリティとアベイラブルなデータ粒度の問題がある。

・本報告書を通じた全体的な結論として以下の 2 点を挙げることができる。

✓ 都市は域外からの再エネ供給を受ける前に、当該地域で利用可能な再エネの最大限の活用を追求すべきである。

✓ 未来の都市インフラ開発のために分散型エネルギー発電と統合されたアプローチを推奨すべきである。これは、一層高いシステム効率性と気候変動へのレジリエンシー強化を達成するための発電、ビル、 運輸、暖房、産業部門のセクターカップリングを意味する。

7. IRENA “Mobilising institutional capital for renewable energy”（2020 年 11 月発刊）



・再エネ拡大に対する機関投資家の役割についての報告書。概要は以下の通り。

・機関投資家は世界最大の資金プールの 1 つである。機関投資家は、持続可能かつ低炭素経済への転換に金融システムをいかに合わせてゆくか、といった現在進みつつある議論の一部に機関投資家も組み込まれるべきである。この観点から、本報告書は、年金基金、保険会社、政府系投資会社（Sovereign Wealth Fund, SWF）、基金・寄付といった投資家グループへの示唆を提供する。特に再エネ投資に対する機関投資家のポテンシャルと彼らが直面する困難に着目する。また、政策立案者やその他のステークホルダーに対して機関投資家の財務力をいかに利用していくべきかにつき実行可能な提言を行う。

・2004 年に 500 億ドル/年であった再エネ発電への投資額は 2019 年には約 3,000 億ドル/年に達し（図 3）、新設の火力発電への投資額を上回った。そのうち太陽光と風力への投資額が全体の約 9 割と圧倒的なシェアを占める。また、途上国や新興市場の影響力が増している。

・総じて前向きな再エネへの資金フローにも関わらず、気候変動目標の達成に必要な投資額と比較するとまだ絶対額は小さい。発電部門への資金フローは少なくとも現状の 2 倍程度の投資が必要である。

・現在機関投資家は 87 兆ドルの資産を運用している。その内訳は年金基金 51%、保険会社 38%、SWF 9%、寄付・基金 2%であり、セクターや国によって多様なグループを形成して

いる。IRENA が 5,800 の機関投資家をサンプリングし過去 20 年の投資行動を分析したところ、約 20%がファンドを通じて間接的に再エネに投資をし、1%だけが再エネプロジェクトに直接投資していることが明らかになった。機関投資家の 2018 年の再エネプロジェクトへの直接投資額は 60 億ドル弱と全世界の再エネプロジェクトへの投資額のわずか 2%であった。同様に、再エネファンドへの機関投資家の投資額も約 60 億ドルと、機関投資家が保有する資金総額と比べて極めて少ない額であった。

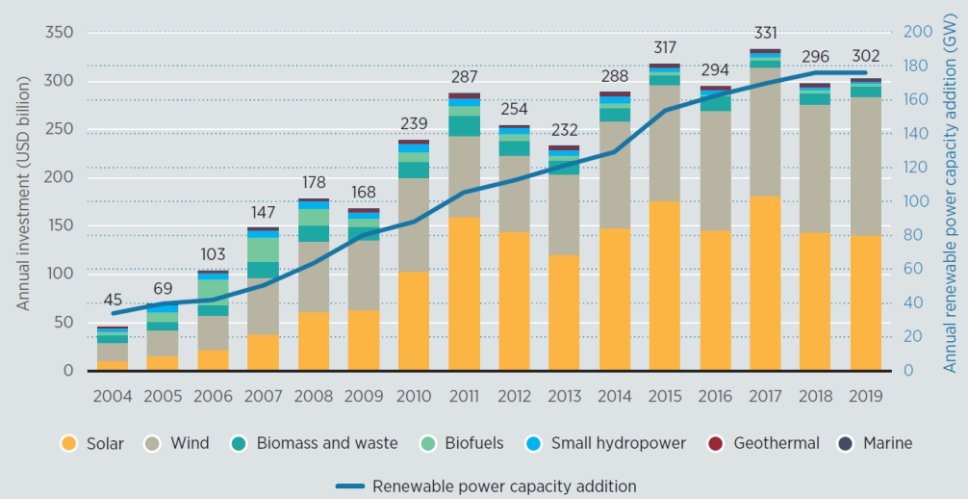


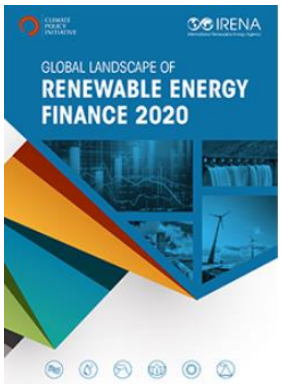
図 3　世界の再エネ技術別の投資額推移（50MW 以上の大規模水力を除く、2004～2019 年）

・機関投資家にとっての再エネ資産への投資機会は巨大であり拡大している。環境、社会及び開発の観点から、機関投資家の資金を再エネ投資に向けることは重要である。これはグローバルで見れば共通認識になっているが、グリーン・インフラへの資金調達に大きなギャップのある後進国や新興国においては深刻なギャップがある。

・再エネ投資に一層多くの機関投資家が参加すれば資金コストを下げる好循環が生まれ、それがさらに他投資家資金の呼び込みに繋がっていく。機関投資家にとっては、再エネに投資することによって、投資額に見合う強力で安定的かつ長期のキャッシュフローによる良好な経済機会をもたらすのと同時に座礁資産のリスク低減が可能となる。

・機関投資家を再エネ投資へ呼び込むための政策と規制が必要である。投資規制の見直し、長期持続可能性への配慮の義務化、持続可能な金融部門の開発、気候変動リスクの開示といった政策・規制によって、再エネ全体の拡大と拡大した再エネの経済への統合を促進することが可能となる。その他、グリーン債のような資本市場におけるソリューション、リスク緩和手法や契約合意の標準化等を通じた再エネプロジェクトへの障壁の低減、機関投資家におけるキャパシティ・ビルディングの支援を含む幅広い協調行動が求められる。

8. IRENA “Global Landscape of Renewable Energy Finance 2020”（2020 年 11 月発刊）



・2020 年発刊の“Global Landscape of Renewable Energy Finance”の第 2 版に相当する 2020 年版。IRENA と Climate Policy initiative の共著による本報告書は、地域・部門別の再エネへの投資トレンド、多様な資金調達手法の役割をマッピングするとともに、再エネへの投資拡大とスケールアップのための実務的なリコメンデーションを提示している。概要は以下の通り。

・全世界の再エネ分野への投資は累計 1.8 兆ドルに達するなど 2013-18 年にかけて飛躍的進歩を遂げた。技術進歩による再エネ設置コストの低減と市場条件変化に順応した再エネ調達メカニズム[45]の採用が再エネ設備容量の急速な増加の効率的な触媒として機能した。

・COVID-19 パンデミックの発生後、2020 年上半期の再エネへの投資は前年同時期と比べて 34%減少した。それにも拘わらず、再エネのような持続可能性の高い資産は、従来型資産と比較して COVID-19 よるボラティリティに対する強靭性を発揮したことから、投資家の再エネへの投資意欲をむしろ高める結果となった。

≪新たなトレンドと世界動向の概要≫

・再エネ投資は 2013 年以降安定的に増加しており、2017 年に 3,510 億ドルでピークに達した後、2018 年には 3,220 億ドルとなった。この投資額の減少は再エネコスト低下により投資額あたりの発電容量が低下したためである。2018 年の太陽光発電の均等化発電コスト（LCOE）は 2017 年比で 12%減少、風力発電は 14%減少した。このため、投資額の減少にもかかわらず、2018 年の太陽光と風力発電の新規設備容量は 149GW と 2017 年から 6%増加した（図 4）。

・再エネ分野への年間投資額は、気候安定化の 2.0℃目標あるいは 1.5℃目標の達成のために、2013～18 年の 3,000 億ドル /年であったものを 2050 年には約 3 倍の 8,000 億ドル /年に増加させる必要がある。

・再エネ投資の拡大は化石燃料への投資の削減と並行して進められなければならない。2018 年の再エネへの投資額（3,220 億ドル：そのほとんどは再エネ発電）である一方、化石燃料分野への投資額は 9,330 億ドル（うち火力発電は 1,270 億ドル）と再エネ投資を大きく上回っている。

[45] エネ研注：「再エネ入札」のことを指すと考えられる。

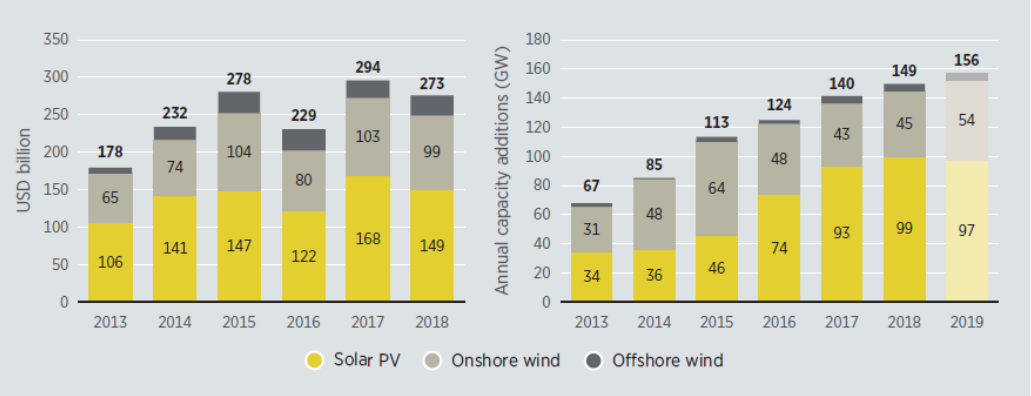


図 4　太陽光・風力発電向け年間投資額（10 億ドル、2013-18 年：左図）及び発電容量の年間増加量（GW，2013-19 年：右図）の推移

≪技術別の投資動向≫

・2017～2018 年に太陽光と陸上風力向け投資コミットメントは平均 77%と再エネ市場の大多数を占めた。モジュール化が可能であること、短いプロジェクトリードタイム、技術・製造の進歩による価格競争力向上と適切な政策が太陽光と陸上風力のシェア拡大に大きな役割を果たした。

・全世界の洋上風力への投資も 2013-18 年にかけて 210 億ドル /年と同期間に増設された再エネ発電容量全体の 8%を占めるまでに拡大した。将来にわたって洋上風力には大きな成長ポテンシャルがあり、低炭素型成長軌道の形成に重要な役割を果たすと見られる。

≪地域別投資動向≫

・2017～18 年に東アジア及び大洋州は全世界の再エネ向け投資コミットメントの 32%を占めた（2017 年の同地域のコミットメント額は 1,250 億ドル）。うち平均で 93%を中国が占めており、同地域全体の牽引役となった。

・米国とアメリカ大陸の OECD 諸国が全世界の再エネ投資の 22%（2018 年の投資額 820 億ドル）、西欧は同 15%（平均で 510 億ドル）であった。2017～18 年のアジア OECD 諸国の再エネ投資額は、日本での太陽光発電への投資額が減少したことを受けて 2015～16 年比で 53%減少した。

・中央アジア、東欧、ラテンアメリカ・カリブ、中東・北アフリカ、南アジア・サブサハラアフリカは合計で全世界の再エネ投資額の 15%（平均）、2013～18 年で 450 億ドル /年であった。

≪資金調達手法≫

・再エネプロジェクト向けファイナンスは主にプロジェクトレベルの従来型（非譲許型）債務で、2017～18 年に全再エネ投資額の平均 32%（ピークは 2017 年 1,190 億ドル）であった。

・貸借対照表ベースでの受取機関への直接債務および株式投資はそれぞれ27%（合計で54%）と大きな割合を占めた。このタイプの投資のほとんどはもっぱら太陽光と陸上風力プロジェクトに向けられている。他方、プロジェクトレベルの在来型債務は洋上風力を含む幅広い再エネ技術に用いられている。
・グリーンボンド（グリーン債）は、2013 年には 20 億ドルであったものが 2019 年には 380 億ドルと近年急速に拡大している。既存資産のリファイナンスにしばしば用いられており、額面金額の大きさから機関投資家の関心を引き付けている。

≪民間・公的ファイナンス≫
・2013～18 年に再エネプロジェクト向け投資の 86%を民間部門が占めた（2,570 億ドル年）。民間投資主体の中心はプロジェクト事業者で 2017～18 年に民間投資全体の 56%と大半を占めた。商業・投資銀行は全体の 25%で、しばしば太陽光と陸上風力といった成熟再エネ技術への非譲許型債務を提供している。これらに対して、機関投資家は再エネ向け民間直接投資のわずか 2%にとどまった。
・2017～18 年に民間ファイナンスの 6%を占めたエネルギー生産者以外の企業（non-energy producing corporations）の役割に近年注目が集まっている。エネルギー生産者以外の企業の再エネ投資の主な動機は、社会・環境面での高まる関心に加えて、次第に価格競争力を増す再エネ技術への投資によるコスト削減、長期安定的な価格でのエネルギー供給の確保である。
・2013～18 年にかけて公的ファイナンスは全投資額の 14%（平均）であり、2017 年には 19%とピークとなった。その牽引役は中国、コロンビア、メキシコ及びトルコの国営開発投資公社であり、2013～18 年の平均で 370 億ドル /年の公的ファイナンス資金を供与した。政府の直接投資は 9%（平均）で太陽光と陸上風力プロジェクト向けがその大半であった。公的部門は、地方におけるオフグリッド再エネなど、参入障壁が高い分野・市場におけるビジネスの可能性を示すことやリスク低減手段の提供などにおいて果たすべき役割は大きい。

≪オフグリッド・再エネ投資動向≫
・2018 年において、約 7 億 8,900 万人が電気にアクセスできていない。現行政策下では、2030 年においても約 6 億 2,000 万人が電気へアクセスできないものと推計されている。分散型再エネは電力系統の拡張が困難な未電化地域において経済的に電化を進める手法になり得る。
・2007～19 年にかけて、オフグリッド再エネには累計で 20 億ドルの投資が集まり、そのうち 7 億 3,400 万ドルは世界人口総数の 80%を占める「電気へのアクセスに支障のある国々」への投資であった。
・分散型再エネ向け投資は 2007 年にはわずか 25 万ドルであったものが 2019 年には 4 億 6,000 万ドルと拡大しているものの「電気へのアクセスに支障のある国々」における電化に必要な全投資額の 1%にも満たない。

≪提言・結論≫

本報告書の提言は以下 5 つにまとめられる。

✓ 一層の民間投資を呼び込むための公的ファイナンスの活用

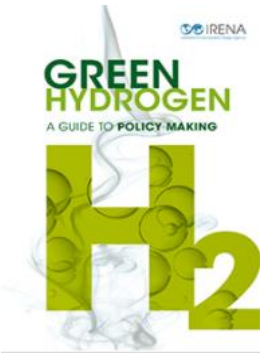
✓ 機関投資家の再エネ投資への導入

✓ 再エネ向けグリーンボンド利用の促進

✓ 再エネ投資への企業参加の促進

✓ オフグリッド再エネへのファイナンス拡充

9. IRENA “Green Hydrogen: A guide to policy making”（2020 年 11 月発刊）



・グリーン水素促進の政策実行のための政策立案者向けのブリーフ・シリーズの第 1 弾として企画されたもの。概要は以下の通り。

・本報告書は（1）グリーン水素の状況、推進要因と障壁 （2）グリーン水素の政策立案に必要な 4 本の柱（3） グリーン水素の支援政策の 3 章で構成されている。

≪グリーン水素の状況、推進要因と障壁≫

・水素は様々な製造工程とエネルギー源により製造することができ、議論を円滑化する目的でグレー（化石燃料の改質から水素生成）、ブルー（化石燃料の改質から水素生成＋CCS）、ターコイズ（天然ガスを熱分解して水素と炭素に分離、炭素はカーボンブラックとして再利用）、グリーン（再エネ電気＋水の電気分解で水素生成）といった色分けが一般的に使われている。政策立案者は、水素の LCA における GHG 排出量に基づく客観的評価手法を用いて政策を設計すべきである。

・グリーン水素の推進要因には、変動再エネコストの低下（例えば、太陽光：2019-20 年にポルトガルで 13.12 ドル/MWh、アブダビで 13.5 ドル/MWh、陸上風力：2019 年にサウジアラビアで 21.3 ドル/MWh、ブラジルで 20.5-21.5 ドル/MWh）、スケールアップ可能となった技術進歩、VRE シェアの高い電力システムに柔軟性を提供できる便益、政府によるネットゼロ排出エネルギーシステムの目標､水素の幅広い分野における活用といった様々なステークホルダーによる関心の高まりがある。

・他方、グリーン水素は、高い製造コスト、水素専用インフラの不足、エネルギーロス（製造過程において約 30-35%の投入エネルギーを損失）、水素価値の認識不足、持続可能性の確保（グリーン水素生成には電解槽に火力発電ではなく再エネ電力を用いる必要がある）といった障壁が存在する。

・2019 年までに少なくとも 15 か国（ベルギー、カナダ、中国、仏、独、アイスランド、伊、日本、オランダ、ノルウェイ、NZ、韓国、スペイン、英国、米国）と EU において水素が政策的に推進されている。それらの国では、直接・間接的に水素の最終消費利用を進めてい

るが、これまで陸上輸送にその焦点が当たっていたことから、掲げられている政策のうち 2/3 が運輸部門を対象（主として EV と FCV を組み合わせた FCEV）としている。
・しかし、過去 2 年間でグリーン水素政策を取り巻く状況は大きく変わった。オーストリア、豪州、カナダ、チリ、仏、独、伊、モロッコ、オランダ、ノルウェイ、ポルトガル、スペイン、EU を含む多くの国が、国家水素戦略やクリーン水素の支援策を含むポスト COVID-19 の復興パッケージを公表・採択した。

≪グリーン水素の政策立案に必要な 4 本の柱≫
・柱の 1 つが水素国家戦略の策定である。戦略の作成は研究・開発プログラム、ビジョン文書、ロードマップ、戦略の段階順に進められる。水素への関心の高まりを受けて、図 5 に示すように、過去 2 年間に多くの国々において、国家水素戦略や水素イニシアティブの策定に向けて進展が見られた。

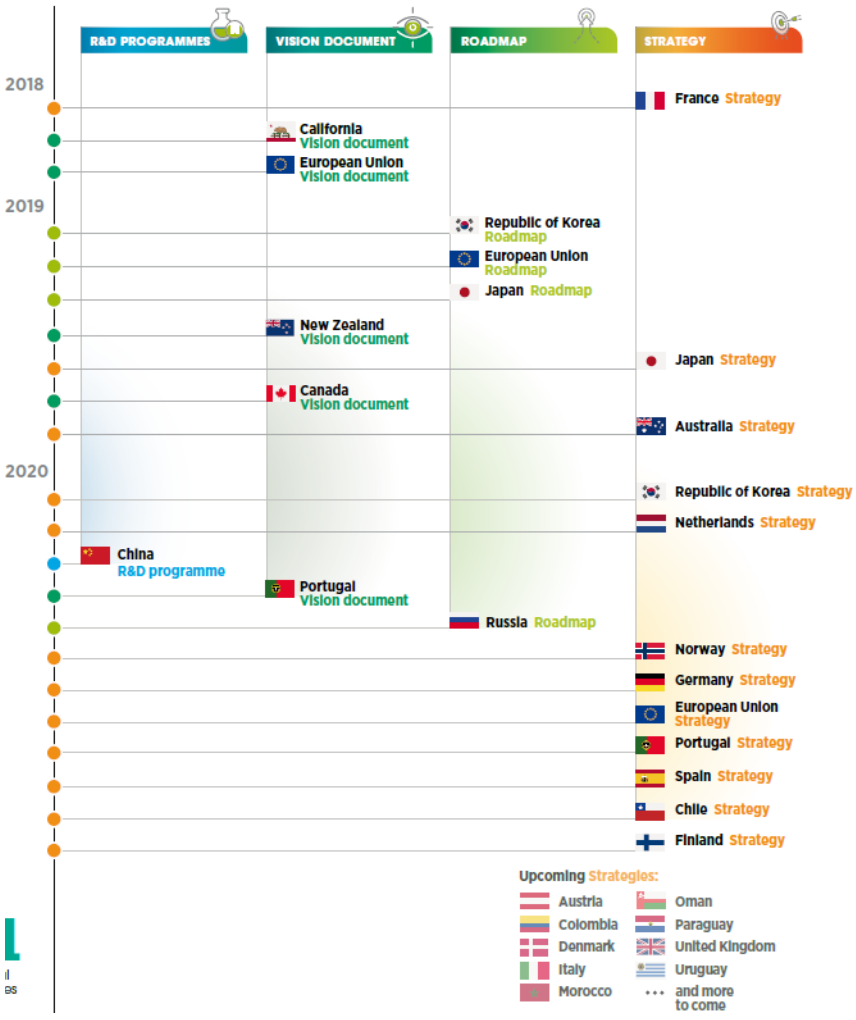


図 5　世界各国の水素関連のイニシアティブの公表と決定まで各段階（2018 年～2020 年 11 月）

・競合する脱炭素手法のコストと便益は刻々と変化することから、効果的な水素戦略を含む最適なゼロ・ネットゼロ CO_2 排出戦略の策定はチャレンジングなタスクである。

・柱の 2 つ目は政策の優先順位付けである。各国政府は、停滞を招くあるいは非効率な道程を選択してしまうといった落とし穴に陥ることのないように、国の将来にとって最適な技術の選択決定を迫られる。そのため、グリーン水素の政策立案においては、優先順位を付けることが最も重要である。

・優先順位付けにあたっては、以下の 3 つの基本コンセプトに留意する必要がある。

✓ 水素は化石燃料の完全な代替手段ではなく、いくつかの脱炭素手法のオプションの 1 つでしかない。

✓ グリーン水素は最も高い効果を得られる用途に適用される必要がある。

✓ グリーン水素は余剰再エネからの電力で製造されるべきである。

・柱の 3 つ目が水素の発生起源と質を明確化する認証スキームの確立である。水素それ自体の組成はグレー水素でもグリーン水素でも全く同じである。最終消費者と政府が水素の起源そして質を知るために、「Guarantee of Origin：GO」等の認証システムの確立が求められる。現在進められている水素の GO 認証の事例を図 5 にまとめる。

	BODY	REFERENCE	THRESHOLD	QUALIFIED PROCESSES
	AFHYPAC	None	100% renewable	All renewable-based solutions
	Low Carbon Fuel Standard	Well-to-wheel emissions from new gasoline vehicles	30% lower GHG, 50% lower NO_x	Green hydrogen, catalytic cracking of biomethane or thermochemical conversion of biomass, including waste
	CertifHy	Grey hydrogen	60% lower GHG than reference (36.4 gCO_2/MJ)	Two labels: • "Green hydrogen" if the hydrogen is made from renewable energy • "Low carbon hydrogen" otherwise Hydrogen must meet the threshold with 99.5% purity
	TÜV SÜD	Grey hydrogen	35-75% lower than reference depending on process	Renewable electrolysis; biomethane steam methane reforming; pyro-reforming of glycerine
	Clean Energy Partnership	Grey hydrogen	100% renewable	Renewable electrolysis; biomass
	REDII[12]	Transport fuels	70% reduction	Renewable transport fuels of non-biological origin
	Technical Expert Group on Sustainable Finance	None	5.8 tCO_2/tH_2 or 100 gCO_2/kWh used as input	Water electrolysis

Notes: REDII = Renewable Energy – Recast to 2030; NO_x = nitrogen oxides; gCO_2/MJ = grams of carbon dioxide per megajoule; gCO_2/kWh = grams of carbon dioxide per kilowatt hour; tCO_2/tH_2 = tonnes of carbon dioxide per tonne of hydrogen.

図 6　水素の認証 GO スキームの事例

・柱の 4 つ目がガバナンス・システムの確立と実行可能な政策である。グリーン水素事業者がエネルギー・社会システム全体に付加価値を提供できる環境が整備されるよう以下のような幅広い支援が求められる。

✓ 市民社会や産業界からのアドバイスの要請
✓ 産業競争力の維持と輸出機会創出に向けた手法の導入
✓ 経済成長と雇用創出機会の見極め
✓ エネルギー安全保障の一部としての水素の導入
✓ 国際コード・標準の確立
✓ インフラ構築・再定義
✓ 資金調達手法の確保
✓ 統計の収集
✓ 研究の優先順位付け
✓ カーボン・プライシングの導入
✓ 化石燃料向け補助金の廃止

≪グリーン水素の支援政策≫

・水素の各適用分野のバリューチェーンにおいて存在する様々な障壁を取り除くための政策手法の概要を図 6 にまとめた。

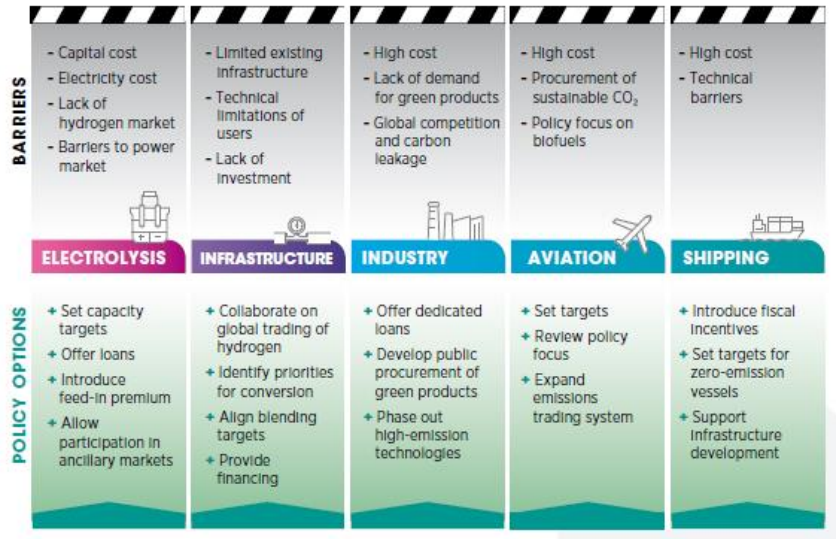


図 7　水素の適用分野別バリューチェーンにおける障壁と政策

10. IRENA “Innovation outlook: Thermal energy storage”（2020 年 11 月発刊）

・熱エネルギー貯蔵（Thermal Energy Storage, TES）の主な属性及び進行中の研究・開発における優先順位の特定に焦点を当てた報告書。作成にはドイツ連邦環境・自然保護・原子力安全省（BMU）からの支援を得ている。概要は以下の通り。

・熱エネルギー貯蔵には、緊急性を要する発電・給電から冷熱需要を切り離すといった独自のメリットがある。これによりもたらされる柔軟性は太陽光・風力といった変動再エネ電源（VRE）の信頼性を高める。また、高コストの系統増強の回避や季節需要変動のバランスを容易にすることで再エネ主力のエネルギーシステムへのシフトを促す。

・世界の熱エネルギー貯蔵市場は 2019 年の 234GWh から 2030 年の 800GWh へ 10 年間で 3 倍の拡大が見込まれている。冷房・発電向け熱エネルギー貯蔵機器への投資額は 2019 年の 130 億ドルから 2030 年には 280 億ドルに達するものと見込まれる。再エネへのシフト、省エネ、電化の一層の促進の観点から、熱エネルギー貯蔵への投資は長期的な気候変動対策に有効である。

・溶融塩貯留は、技術信頼性の向上と太陽熱発電への適用により発電分野において広く利用されており、2030 年までに 491～631GWh 分の設備容量の設置が見込まれている。近い将来には、太陽熱、太陽光、風力からの余剰エネルギーを貯蔵する固体・液体空気といった（溶融塩以外の）熱エネルギー貯蔵技術も商業化する可能性が高い。

・世界規模での冷房用途の熱エネルギー貯蔵容量は2030年には2倍に拡大する必要がある。これには、向こう 10 年間にわたって約 5 億 6,000 万ドルの投資が必要である。

・潜熱蓄熱材（Phase-change material: PCM）やその他の熱エネルギー貯蔵技術は、冷熱生成、貯蔵、輸送を通じて冷房負荷に柔軟性を持たせることができるためコールドチェーンを補完することが可能となる。

・熱エネルギー貯蔵を活用した地域熱冷システムは、季節間のエネルギー貯留を可能にするため冷熱供給と冷熱需要を効果的に分離できる。熱供給システムにおいては既にタンク（TTES）あるいは地中（UTES）での熱貯蔵技術が採用されている。

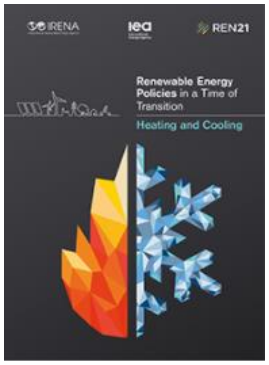
・温水タンク熱エネルギー貯蔵（WTTES）は既に全世界の建築物で広範に利用されている。それより数は少ないが、小規模の地中熱エネルギー貯蔵システムも利用されている。氷や固体熱電池は未だ開発の初期段階である。

・産業分野においては、太陽熱温水プラントとの組み合わせにより、水タンク低温熱生成・貯蔵の利用が広まっている。主に鉱業、食料、繊維産業分野で事例が見られる。潜熱及び熱化学的熱エネルギー貯蔵も高温熱を貯蔵できる革新的な技術として試験段階にある。

・顧客ニーズに基づくマーケットプル型技術開発への投資は熱エネルギー貯蔵の急速な普及を後押しする。再エネ、省エネ、電化の推進と一体となった熱エネルギー貯蔵への投資は、経済インフラを強化し、COVID-19 からの短期的な回復を促進し、エネルギー開発を世界の

気候・持続可能性目標と整合させることを可能とする。

11. IRENA “Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling”（2020 年 11 月発刊）



・2018 年に発刊された “Renewable Energy Policies in a Time of Transition”の続編。今回は再エネによる冷熱に焦点を当て、様々なエネルギー転換の過程において求められるインフラ及び政策を概説している。IRENA、IEA、REN21 の共著。概要は以下の通り。

・再エネをベースとした効率的な冷熱供給は、パリ協定と 2030 年 SDGs 目標の達成を目指す国々にとり優先度の高いニーズとなっている。

・冷熱需要は全世界の最終エネルギー消費の約半分を占める。そのうち、50%近くは工業プロセスにおいて消費され、46%は家庭・商業ビルにおける空調・温水用途と（量的には少ないが）厨房用途に消費されている。冷熱はエネルギー起源 CO2 排出の 40%以上を占め、大気汚染の主要な発生源ともなっている。

・化石燃料や薪炭等伝統的バイオマスの非効率な利用から近代的再エネによる冷熱利用へのシフトは、室内大気汚染による健康被害の低減、雇用の創出、生活の質の向上、地場生産の強化といった社会・経済的便益に寄与すると考えられる。しかし、2019 年時点で、再エネによる冷熱に関する目標を導入している国は、主として EU 加盟国の 49 ヵ国に留まる（対照的に再エネ発電の目標は 166 ヵ国で導入済）。冷熱の再エネへの移行を加速させるために必要となる政策に対する政策立案者の関心は限定的である。

・冷熱の脱炭素化に際しての共通した障壁として、（化石燃料ベースのものと比較して）高い導入コスト、税還付・融資・直接補助金・加速度償却といった政府支援の欠如、導入目標や義務化の欠如、化石燃料への補助金（2017 年に約 1,660 億ドルの補助金が直接・間接的に提供されている）、化石燃料価格の外部経済性、需要家の慣性（イナーシャ）と受容性の欠如、技術的障害（産業用高温熱には再エネの適用が技術的に困難）、建築基準等の厳格な省エネ基準の欠如が存在する。

・効率的な再エネ冷熱のインフラとしての地域冷熱に着目して、エネルギー転換の道筋として以下の 5 点を提示する。

(1) 再エネをベースとした電化

・2019 年の家庭部門における暖房需要全体におけるヒートポンプのシェアは約 5%と小さいが、この規模を数倍に高めることは建築物から排出される GHG 削減への最も有効な戦略の 1 つである。ヒートポンプの促進には財政・金融支援を含む政策支援が有効であり、省エネ基準の導入も有効である。冷熱の広範な電化により電力需要の大幅な増加が予想されるが、

ヒートポンプはDRによる柔軟性の提供が可能なため、高いシェアのVREの統合を促進することもできる。このため、遠隔モニタリング・管理技術の導入による電力ネットワークの強化も手法として考えられる。蓄熱は熱に関連した電力需要の時間シフトを可能とし、柔軟な電力供給に資する。

(2) 再生可能ガス（Renewable Gases）

・冷熱の最終消費をすべて電化することは経済面から不可能であり、化石燃料の代替としての再生可能ガス、すなわちグリーン水素、バイオガス、バイオメタンの役割は重要である。通常の化石由来ガスのために敷設された既存インフラネットワークをそのまま活用でき、転換のコストを下げることができるという大きな利点が再エネ可能ガスにはある。既に多くの国でガス系統へのバイオメタンの注入を行っており、いくつかの事例では水素の混入も開始されている。再生可能ガスの利用を高めるためには、ロードマップ・産業戦略の策定や導入目標といった野心的で明確な長期的な枠組みの提示が推奨される。その他、再生可能ガス利用の市場創出に向けては低炭素燃料の基準設定、投資に対する支援及び生産への補助金によるコスト低減、水素利用可否のためのガス・パイプラインの性能評価、排出削減のための規制枠組みや削減量認証メカニズムの導入といった政策支援も考えられる。

(3) 持続可能なバイオマス利用

・バイオエネルギーは最大の暖房用再エネ資源であり、2018年には全世界の熱消費の21%を占めた。そのうち2/3は未電化地域における厨房・暖房用途の木材、穀物残渣、家畜残渣といった非効率なバイオマス利用であり、一般的に森林破壊や屋内大気汚染を引き起こす。
・多くの国では持続可能なバイオマス利用の拡大に向けた政策導入が進んでおり、一例としてサブサハラ・アフリカ諸国における national cookstove programmes や West African Clean Cooking Alliance がある。融資、マイクロ・ファイナンスや pay-as-you-go ビジネスモデルを活用することによって持続的なバイオマス利用が促進されている。
・認証スキームは建築物におけるバイオエネルギーの熱利用の拡大に重要である。補助金等の金銭的インセンティブは、ガス・石油ボイラーに比べて導入コストの高い近代的バイオマスボイラーの導入促進に有効である。

(4) 太陽熱の直接利用

・家庭における太陽熱（solar thermal heating）利用全体のうち90%を占めるのは太陽温水システムである。これに対して、地域熱供給、工業プロセス、冷暖房への利用はわずか4%に過ぎない（いずれも2018年）。
・工業プロセスにおける太陽熱の利用に際しては、技術的障壁を乗り越えるための研究・実証プロジェクト向け支援が必要である。
・太陽熱の直接利用は多くの場合、ライフサイクルでのコスト競争力は高いが、導入時のア

ップフロント・コストが高いため、導入目標、導入義務化、建築基準と一体となった融資・助成金・税還付、補助金などの金銭的インセンティブが効果的な政策支援となる。太陽熱利用を高めるための社会的関心の喚起も重要である。

(5) 地熱の直接利用

・ポテンシャルは大きいものの、今のところ、地熱エネルギーは最も小さい再エネ熱源にとどまっており、世界の全設備容量が 30GW 程度である。そのうち 75%は中国、アイスランド、日本及びトルコの 4 ヵ国が占め、2019 年ではそのうち 44%が入浴と水泳（温水プール）に利用された。

・主な障壁は、高い導入コスト、地熱資源の規模、地熱資源の最適なロケーションに関する不確実性であり、これらを取り除くことができれば地熱の利用は促進されるものと考えられる。

・融資保証、助成金及び脱炭素プロジェクト向け直接支援同様、地熱資源の詳細かつ包括的なデータの収集、情報共有を促進する政府イニシアティブや計画は投資家の呼び込みに寄与する。

(6) 可能とするインフラ（Enabling Infrastructure）

・既存の地域冷熱供給ネットワークは、再エネ資源の大規模な利活用を可能とする重要な資産である。特に密集した市街地において、大半の分散型システムよりも大きな効率性と燃料節約をもたらす。従って、幅広いエネルギー転換において重要な役割を果たすものと期待されている。

・これまで大半の地域熱供給ネットワークは化石燃料で稼働してきたが、エストニア、フィンランド、ラトビア及びスウェーデンでは、政策によりバイオマス等の再エネを地域熱供給ネットワークに統合する動きが増えている。

・新しい地域インフラの導入や既存の地域ネットワークにおける再エネ利用の促進においては政策が重要な役割を果たす。具体的には、投資の不確実性を低減させるための熱需要マッピング、冷熱ネットワークへの接続義務化、潜在的投資家のリスク低減のための融資保証、地場金融の利用が困難な地域における開発銀行により援助ファイナンス供与、資本費削減のための補助金、助成金、税還付である

・地域ネットワークは業態の特性から自然独占を形成する。消費者の信頼を維持するため、価格統制、透明性のある価格設定、競争状態の監視が必要な場合がある。

・全体的な結論として以下の 3 点を政策的なアクションとして提言している。

✓ 再エネ冷熱の導入を可能にする主体的な政策立案

✓ 広範な社会・経済的政策・目標と整合した再エネ冷熱のスケールアップ政策

✓ 再エネシェアの拡大に順応可能な長期的な地域冷熱ネットワークの維持

12. IEA “Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025”（2020 年 11 月発刊）

・2020 年 5 月に発刊された「IEA Renewable Energy Market Update: Outlook for 2020 and 2021」によって提示された 2020 年と 2021 年の再エネ市場動向のアップデートに加えて、2025 年までの市場動向を予測している。5 月時点よりも再エネ発電設備の導入量等の予測値が大幅に上方修正されている。概要は以下の通り。

《再エネのレジリエンスは電力部門によって牽引されている》

・他のすべての燃料とは対照的に、再エネ発電量は 2020 年に約 7%増加する（図 1 参照）。2020 年の世界のエネルギー需要全体が 5%減少する中、優先給電や新規発電容量の増加によって再エネ発電量の力強い増加がもたらされた。経済活動停滞に伴って運輸部門と産業部門のバイオ燃料は減少したが、再エネ発電はそれを補って余りある勢いでの増加である。バイオ燃料の減少を含めた再エネ全体のネット需要も 1%増加する見込みである。

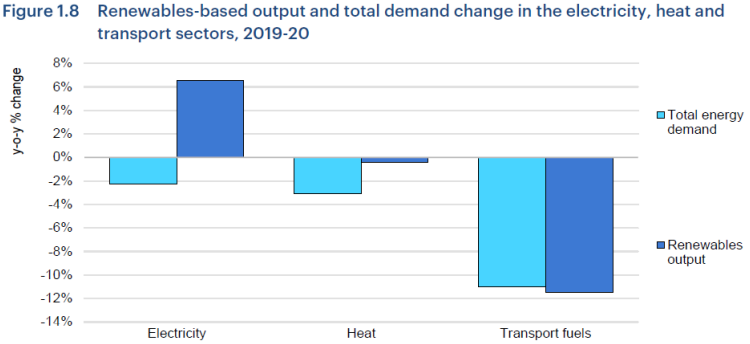


図 8　電力、熱、輸送部門での再エネベースのエネルギー供給量と全体の需要変動

・経済状況の不確実性にもかかわらず、再エネへの投資意欲は旺盛である。2020 年 1 月から 10 月までに入札された再エネ発電容量は 2019 年の同時期と比較して 15%増加し、過去最高を記録した。同時に、世界の主要株式市場において、再エネ発電設備の製造業や再エネプロジェクト事業者の公開株価は全エネルギー業種の中で例外的な上昇を見せている。再エネビジネスに中期的に健全な事業成長とファイナンスが見込まれているからである。2020 年 10 月の太陽光関連企業の世界の株価は 2019 年 12 月の 2 倍以上となった（図 2 参照）。

Figure 1.6 Indexed stock market prices for traded energy companies and major indices, 2018-20

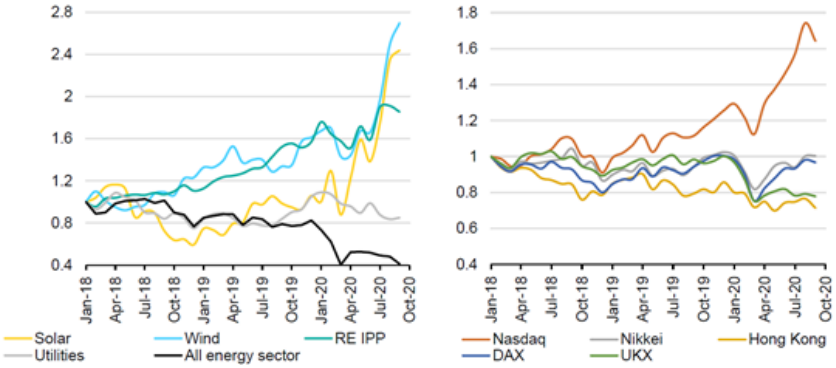


図 9　2018 年～20 年のエネルギー企業の株式インデックス

《再エネ発電容量の増加は COVID-19 をものともせず新記録を打ち立てた》

・中国と米国に牽引されて、世界の再エネ発電容量は（標準予測ケースで）2020 年に 4%近く成長して、200GW 近くに達する（図 3 参照）。風力と水力の高い増加がこの新記録をもたらした。2020 年の世界の発電容量増加分の約 90%を再エネが占める。家庭用・事業所用の屋根置き太陽光が COVID-19 の影響で減少したのを補う形で、大型太陽光が増加しており、太陽光発電の増加は全体として 2019 年と概ね同じ水準にとどまる見通しである。風力と太陽光発電は、中国と米国において 2019 年比 30%増と大きく伸びる。このうち米国の増加は PTC/ITC 等再エネ税制優遇のフェーズアウト前の完工駆け込みラッシュによる。

・再エネ産業は COVID-19 危機に対して素早く適応した。IEA が 2020 年 5 月に出した同年の再エネ発電容量増加量の予測値は、今回 18%も上方へ修正された。2020 年前半に発生したサプライチェーンの混乱と工事遅延は、再エネプロジェクトの進捗を停滞させた。しかし、その後、建設工事や製造現場は急速に回復して、5 月以降の国境開放に伴って物流の停滞も概ね解消された。2020 年 5 月に予測された再エネ発電容量の増加量は、同年 9 月の実績値で既に達成されてしまったことが月次データベースから明らかとなった。特に欧州、米国、中国で急速な回復が見られた。

Figure 2.1 Renewable electricity net capacity additions by technology 2013-22, main and accelerated case

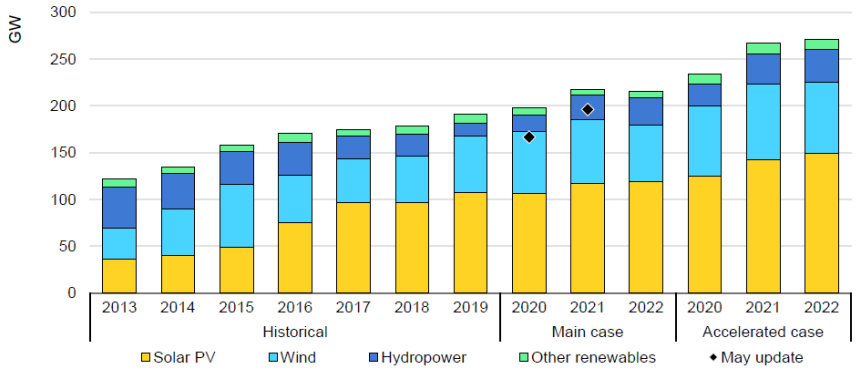


図 10　2013～22 年の再エネ発電容量の年間増加量（標準予測と加速予測ケース）

《2021 年の再エネ急増は欧州とインドが牽引する》

・再エネ発電容量は 2021 年にはさらに 10%近く増加して、新たな記録を更新することになる。2021 年の再エネの加速度的増加には 2 つの理由がある。一つは、サプライチェーンと建設現場の混乱によって遅延していたプロジェクトが 2021 年に続々と運転を開始することである。米国、インド、欧州のいくつかの国において、当初 2020 年末に設定されていた入札デッドラインが延長されたことで、数か月遅れでもプロジェクトを竣工することが制度上認められるなど各国政府による素早い措置も功を奏した。もう一つは、米国、中東、南米などの市場において 2021 年に再エネの持続的成長が確実なことである。再エネ発電コストの低下と政策的支援によって、これらの市場では COVID-19 以前から多くの再エネプロジェクトが組成されていた。

・2021 年の再エネ増加の最大の牽引国はインドになると予想される。2021 年のインドの再エネ発電容量の増加は、2020 年の約 2 倍の水準に達すると見られる。同年には、COVID-19 や土地取得問題によって遅延していた大量の風力・太陽光入札案件の運転開始が想定されているからである。

・EU でも 2021 年の再エネ発電容量の急増が予測される。フランスやドイツにおいて過去に入札された大規模太陽光や風力発電が次第に運転を始めるからである。再エネの増加は、EU の 2030 年再エネ目標を達成するための加盟各国の政策と EU 復興基金（低利融資と補助金）によってサポートされている。過去の競争入札において落札された再エネプロジェクトが運転を開始するため、中東、北アフリカ、南米においても再エネ増加が 2021 年にも回復する。

《主要市場での再エネ政策の確実性が高まれば再エネ開発がブーストアップされる》

・再エネは Covid-19 危機に対してレジリエントであったが、政策の不確実性には弱い。主要市場での FIT 等再エネインセンティブの終了やそれに伴う政策の不確実性は、2022 年の再エネ発電容量の増加を若干スローダウンさせるだろう。例えば、中国では、陸上風力と太陽光発電への補助金が 2020 年に終了し、洋上風力への支援も 2021 年に終了する予定である。2021 年～25 年の政策枠組みは来年末にはアナウンスされるが、現時点では中国の 2022 年と

それ以降の再エネの拡大ペースには不確実性が伴っている。陸上風力に対する PTC（Production Tax Credits）が失効する 2022 年以降の米国でも弱含みの再エネ拡大が予想されている。さらに、配電会社の財務問題が深刻化するインドや入札が遅延している南米でも同様に、2022 年には弱含みの再エネ増加が予想されている。特に 2022 年の世界の陸上風力の増加は、2021 年比で 15%低い水準になると予測されている。他方、洋上風力は世界各地で加速度的な増加を続けると見られる。

・以上の標準予測ケースに対して、政策的な不確実性が除去された場合が加速ケース（Accelerated Case）の予測である。加速ケースの下での世界の太陽光と風力発電の 2022 年増加量は、2021 年水準をさらに 25%上回る高い水準になると予測される。この場合、2022 年の再エネ発電容量の増加は過去最高水準の 271GW に達すると見られる（図 3 参照）。中国一国でこの増加の 30%を占める。太陽光の年間増加量は 150GW 近くなり、2020 年～22 年までのわずか 3 年間で約 40%拡大する。米国では、クリーン電力のための追加的な政策が実施されれば、太陽光発電と風力は一層速いスピードで増加し、米国の電力部門の脱炭素化が加速される。

《再エネが世界の電力部門を牽引することになる》

・コスト低下と持続的な政策支援によって、再エネは 2022 年以降も力強く増加すると想定される。Covid-19 危機によって様々な課題が浮かび上がったが、再エネ増加のファンダメンタルズに変化はない。ほとんどの国において、太陽光と陸上風力発電は既に最も低コストの新規電源となっている。良好な日照・風況条件があり、低コストで資金が得られる国では、太陽光と風力発電は既存の火力発電に挑戦できる力を持つ。今、太陽光発電は歴史上もっとも低コストでの発電が可能である。全体として、2025 年までの世界の発電容量の増加の 95%は再エネが占めることになる。

・太陽光と風力発電の合計発電容量は、2023 年には天然ガスを、2024 年には石炭を追い越すと見られる。2025 年までの再エネ発電容量の増加の 60%を太陽光発電が、30%を風力が占める。一層のコスト低下に伴って、洋上風力発電の年間増加量は急増が予測される。2025 年までの風力発電容量の増加分の 1/5 を洋上風力が占めることになる。洋上風力の増加は、従来の欧州を超えて、大きなポテンシャルを有する中国や米国などの新しい市場に波及してゆく。世界各国で VRE が急速に増加することになり、VRE を安全かつコスト効率的に電力システムへ統合してゆくための政策が必要となる。

・再エネは 2025 年までに石炭を追い越して最大の発電源となる。その時までには、再エネは世界の発電量の 1/3（33.3%）を占めると想定される。水力は再エネ発電量の約半分を占め続けるだろう。今のところ、再エネのうち最大の電源は水力であり、次いで、風力、太陽光の順である。

・低下し続ける再エネの発電コストは投資家の見方や政策の役割を変えた。再エネの増加のうち（入札や FIT といった政策プログラムではなくて）純粋に市場ベースで形成された案件のシェアは、現在の 5%未満から 2025 年には 15%以上へと 3 倍に拡大する。ここには企業による PPA（power purchase agreement）や卸電力市場での売電を主目的とした発電所などが含まれる。長期での収益安定化に政策や規制枠組みが決定的に重要であることは確かだが、

競争は価格低下を牽引し続ける。入札やグリーン証書スキームは、今後 5 年間の世界の再エネ発電容量の増加の 60%をカバーすると予測される。新規再エネ発電に対する大手石油・ガス会社の投資額は、2020 年から 25 年にかけて 10 倍になると見られる。

《Covid-19 危機によってバイオ燃料は過去 20 年で初めての減少局面》

・バイオ燃料産業は Covid-19 危機によって大きな影響を受けた。2020 年の世界の運輸用バイオ燃料需要は 2019 年実績比で 12%減少すると想定される（図 1 参照）。過去 20 年間で初めての減少である。運輸用燃料需要の減少と、化石燃料価格下落によるバイオ燃料の経済性の棄損がその理由である。米国とブラジルのエタノール生産量と欧州のバイオディーゼル生産量は前年比で過去最大の減少となった。

・燃料需要の回復と主要市場での強力な支援政策によって、2021 年のバイオ燃料生産量のリバウンドと 2025 年にかけての持続的な成長を促進することができる。この場合、生産量の増加が著しい国は、中国とブラジル（エタノール）と米国と東南アジア（バイオディーゼルと植物油）が想定される。

《需要の急速な減少は再エネ熱消費に冷や水を浴びせた》

・パンデミックによる経済活動の急減は、建築物での熱需要以上に産業部門での熱需要を低下させた。これは再エネ、特に産業部門のバイオマス利用への需要にも影響を与えている。産業部門以外では、Covid-19 による短期的な再エネ熱消費への直接的なインパクトは限定的である。熱利用のための世界の電力需要全体は産業部門と建築物部門で減少しているが、2020 年の熱利用のための再エネ電力需要は増加している。これは発電での再エネシェアが増加しているためである。

・今後 5 年間の再エネ熱のシェアは概ね変わらないと考えられる。世界の再エネ熱消費量は、産業部門よりも建築物部門での強い増加に牽引されて 2025 年には 2019 年実績比で 20%高くなると想定されている。この増加にもかかわらず、現状の増加ペースでは、再エネは 2025 年の世界全体の熱消費のうちの 12%を占めるに過ぎない。産業部門での熱消費が全体のパイを増加させると見られるからである。非再エネの消費に大きな変更がなければ、2025 年の熱に関連した CO_2 排出量は 2019 年比で 2%減少とわずかな削減しか実現できない。

《近年の政策モメンタムは再エネ利用の劇的な拡大のポテンシャルを持つ》

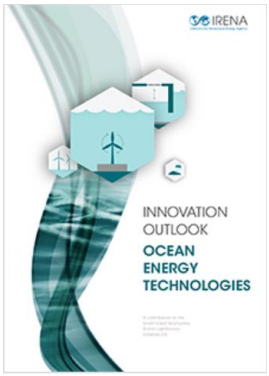
・クリーンエネルギーに焦点を当てた経済的復興政策は直接的あるいは間接的に再エネを支援できる。これまで各国よってアナウンスされたエネルギー関連の復興パッケージ 4,700 億ドルの大部分は短期的な経済支援を目的としているが、そのうち約 1,080 億ドルはクリーンエネルギーに焦点を当てた経済成長を目標としていると推定される。建築物、電力系統、EV、低炭素水素などに対する直接的あるいは間接的な追加の資金支援を通じて、復興政策は再エネを支援することができる。気候変動対策への 3,100 億ドルの支出を含むと見られる次の EU 経済復興計画はこうしたケースに該当する。

・Covid-19 による影響が深刻な輸送用の再エネ燃料は特に支援の余地がある分野である。もっとできるし、すべきである。例えば、Covid-19 危機後に政府からの経済的支援を得た世界の航空会社 30 社のうち、わずか 2 社だけに環境条件の縛りが課せられた。そして、わずか 2 社に持続可能な燃料の 2%混入義務が課されただけである。

・主要市場でのネットゼロ排出目標は再エネ展開の加速化をもたらすと考えられる。EU に続いて、3 つのアジア主要 3 か国が（日本と韓国が 2050 年までに、中国が 2060 年までに）ネットゼロ排出とすることを宣言した。これらの宣言の正確な影響を評価するにはまだ早過ぎるが、こうした明確化された野心的目標があらゆる部門での再エネ展開を一層加速化させ、世界の再エネ市場に大きな影響をもたらす可能性は非常に高い。

IEA/IRENA 発刊の再エネ関連主要レポートの要約（2020 年 12 月～2021 年 3 月分）

1. IRENA “Innovation Outlook: Ocean Energy Technologies”（2020 年 12 月発刊）



・潮力（潮流、潮力、波力、海洋温度差（OTEC: Ocean thermal energy conversion）、海洋濃度差（Salinity gradient energy）、海流等の海洋エネルギーのポテンシャルと商業化へ向けて必要とされるステップについて述べた報告書。概要は以下の通り。

【潮流エネルギー（Tidal stream）[46]と波力エネルギー】

・現在稼働している潮流エネルギーと波力エネルギーの合計容量は 12.91 MW で、内訳は波力 2.31MW、潮力 10.6MW である（図 1 参照）。両技術ともかなりの数の設備が迅速にスケールアップされており、既に 1MW 以上の設備の導入に成功している。潮流が一層進んでおり、いくつかの事例で商業化に近づいている。波力発電は未成熟であり、ほとんどが実証段階である。

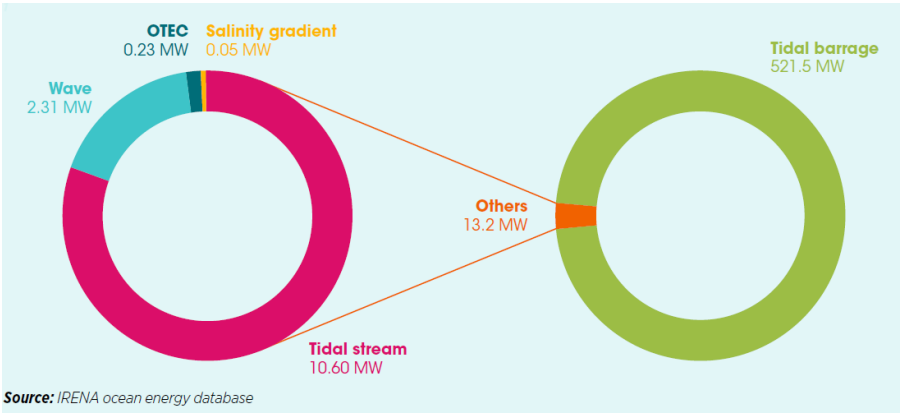


図 1　左：潮力以外の海洋エネルギーの発電容量　右：潮力と潮流の発電容量

【潮力エネルギー（Tidal barrage）】

・現在世界で稼働している海洋エネルギーの容量 521.5MW のうち、98%以上が潮力エネルギーである（図 1 参照）。これは主に 3 つの大型発電所、すなわち韓国の 254MW（2011 年稼働）、フランスの 240MW（1966 年稼働）、カナダの 20MW（1984 年稼働）で構成されており、残りの 750MW は中国（410MW）とロシア（340MW）の 2 つである。海洋エネルギーの中では比較的優位な潮力発電だが、ここ 10 年ほど大規模な発電設備は開発されておらず、資源のポテンシャルが十分に活用されていない。しかし、世界で 2.5 ギガワット（GW）以上のプロジェクト案件の計画があり、市場が機会を探っている状況である。

・今後数年間は、海洋エネルギーの増加が大きく増加する可能性がある。2020 年の時点で、

[46] Tidal stream：純粋に潮流によるエネルギーを指す。潮汐差の大きい湾口を堤防で仕切り水位落差を利用した水力発電を行う潮力エネルギー（Tidal barrage）とは区別している。

計画中の潮流と波力発電プロジェクトの合計容量が 2.83 GW あり、長期的には一層多くの容量の追加が考えられる。IRENA は 2030 年までに約 10GW の海洋エネルギー発電が商用化されると予測している。

・海洋温度差発電（OTEC）、塩分濃度差発電、海流発電は、いずれも依然として多くの障壁があり、主として研究機関や大学での研究開発段階にある。

・海洋エネルギーへの関心は世界的に高まっているが、その中でも欧州が群を抜いている。海洋エネルギー技術を導入済み、または導入を計画している国は世界 31 カ国に上るが、現在設置されている容量の 3/4、そして計画段階のプロジェクトの半分以上は欧州である（図 2）。

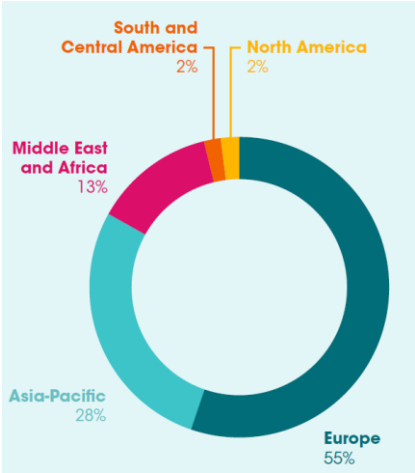


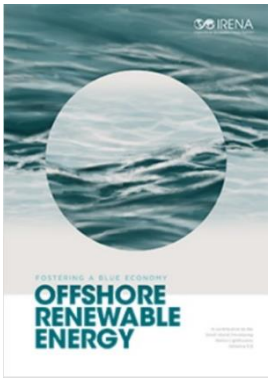
図 2　稼働中＋計画中の海洋エネルギー発電容量のエリア別シェア

・潮流エネルギーは採用技術が水平軸タービンに収束してきているが、技術的にはまだ確立されていない。さらに低速の潮流で稼働できる潮汐凧（Tidal kite）等の革新的な技術もあることから水平軸タービンが潮流エネルギーの主たる技術として確立されるかは不明である。波力エネルギーは潮流以上に技術的に未成熟であり、約 10 種類の波力エネルギー技術開発が同時に進行している。

・海洋エネルギーの LCOE は当初の予想以上に低くなる可能性がある。今のところ、海洋エネルギー技術は開発の初期段階のため、LCOE の推定には不確実性が伴う。潮力発電の現在の LCOE は 0.20～0.45 ドル/ kWh と考えられ、波力発電は 0.30～0.55 ドル/ kWh と推定される。

活発なプロジェクト開発を行っている事業者による最近のコスト見積もりから、今後は LCOE が低くなる可能性があることが示唆されている。

2. IRENA “Fostering a blue economy: Offshore renewable energy”（2020 年 12 月発刊）



・ SDGs の達成に貢献する洋上再エネのポテンシャルと島嶼・沿岸エリアの継続的な開発について説明した報告書。既に IRENA から発刊されている複数の洋上エネルギーに関する報告書の内容を再編集したもの。Covid-19 の影響で開催中止となった UN Ocean Conference 2020 へのインプットとして作成された。概要は以下の通り。

【洋上風力発電】

・洋上風力発電は、人口密度の高いエリアの沿岸部にギガワット級の発電所を建設することができ、エネルギー部門の脱炭素化に重要な役割を果たしている。洋上風力発電の商用化は 2002 年にデンマークで稼働した 160MW が世界で最初であったが、その後 2019 年末までに、世界の洋上風力発電の設置容量は 29GW 近くまで拡大した。そのうちの約 9 割は北海と大西洋付近での運用である。パリ協定に沿った IRENA のシナリオによると、洋上風力発電の容量は 2030 年までに 228GW に、さら 2050 年には世界全体で 1,000 GW に近づくと予想されている（図 3 参照）。その 60%以上を占めるアジアが今後の洋上風力をリードし、次いでヨーロッパ（22%）、北米（16%）と続く見込み。

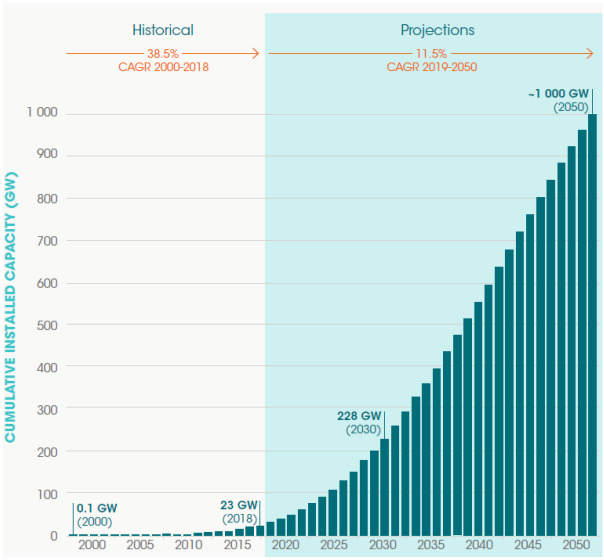


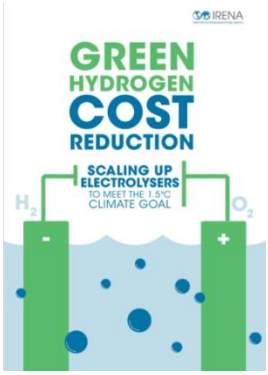
図 3　2002 年～2050 年の洋上風力の発電設備容量

・洋上風力発電市場の成長の加速要因は技術コストの急激な低下である。現在、洋上風力は他のすべての発電技術に対してコスト競争力を持ちつつある。洋上風力の世界加重平均 LCOE は 2010 年の 0.16 ドル/kWh から 2018 年の 0.13 ドル/kWh に低下した。LCOE は今後も低下を続け、2030 年には 0.05～0.09 ドル/kWh、2050 年には 0.03～0.07/kWh 程度になると IRENA は予測している。

・研究開発と技術革新により、洋上風力の風車の単機サイズは現在の約 9.5MW から 2030 年には 15～20MW まで大型化すると予想される。風車技術の向上、ハブの高度化、ブレード面積の大型化の組み合わせが設備利用率の向上につながっている。洋上風力の設備利用率は、2018 年の平均 43%から、 2030 年には 36%～58%、2050 年には 43%～60%まで向上すると予想されている。
・風車だけでなく、基礎構造物、設置技術、風車へのアクセス、運用、システム統合などの技術進歩によって、一層風況がよく海岸から遠く離れた深い海域に風車を設置することが可能になった。しかしながら、現在稼働中の洋上風力発電の多くは着床式（モノパイル式またはジャケット式）のため水深 50～60 メートル未満の海域に設置が限定されている。洋上風力の大きなポテンシャルのある日本や米国では水深の浅い海域が少ないため、これが大きな制約となっている。洋上風力を拡大するには一層風況の良い深海（水深 50 メートル以上）へ市場を拡大する必要があり、これを可能とする浮体式洋上風力は市場を大きく変える可能性がある。
・浮体式は 50m 以上の水深、そして離岸距離が 80km の場所での発電を可能にする。数年前からフルスケールのプロトタイプ浮体式洋上風力が稼働しており、スパーブイ（柱状型浮体）式、セミサブ（平面型浮体）式、テンションレグ（緊張係留型浮体）式の 3 つが主要な浮体形式である。ノルウェーの Equinor 社は水深 260～300 メートルの沖合 140 キロに、洋上での石油ガス生産への電力供給を目的とした 88MW の浮体式洋上風力 Hywind Tampen 発電所を 2022 年に操業開始の予定である。これは 8MW 風車×11 基の世界最大の浮体式洋上風力発電となる。
【浮体式太陽光発電】
・浮遊式太陽光発電は急成長の可能性を秘めた新興技術である。2018 年 9 月末時点で世界の浮体式太陽光の累積設置容量は 1.1GW である。一般に水面のコストは陸地のコストよりも低いため、特に島嶼エリア（及び土地に制約のある地域）において浮動式太陽光発電の需要が拡大している。世界の上位 10 件の浮体式太陽光発電所はアジア、すなわち中国、日本、韓国に集中している。特に韓国は黄海に 2.7GW の浮体式太陽光を建設することを発表している。その他のアジア諸国、すなわちインド、シンガポール、タイ、ベトナムでも浮動式太陽光発電プロジェクトの開発が積極的に進められている。
・現在、浮体式太陽光のほとんどは淡水の人工貯水池での設置されたものである。例えば、中国東部（淮南市潘記区）には 150MW の世界最大級の発電所が稼働中である。水力発電用のダム貯水池やその他の人工的な水域もまた浮体式太陽光の大きなポテンシャルを有している。
・北海では海水を利用した洋上浮体式太陽光発電所の運転を開始した。この 8.5kW のプロジェクトは、今後段階的に規模を拡大し、1 年後には 50kW、最終的には 100MW まで拡大する予定である。複数の洋上風力発電設備の間隙に太陽電池パネルを浮かべることで、洋上風力と太陽光のハイブリッドシステムとなり、一層安定した電力の供給が可能となる。

・（海洋エネルギーについては上記、“Innovation Outlook: Ocean Energy Technologies”と類似内容であり、重複するため省略）

3. IRENA “Green hydrogen cost reduction”（2020 年 12 月発刊）



・ 継続的な技術革新、性能向上、スケールアップを通じて、グリーン水素を製造するための水の電気分解コストを削減するための戦略を説明した報告書。概要は以下の通り。

・今後の脱炭素戦略の追求する中で、電化の難しい分野、特に製鉄、化学、長距離輸送、海運、航空など GHG 排出削減対策の困難な分野では水素が重要な役割を果たす。ここで使われる水素は低炭素（＝再エネ電力を使用した水の電気分解によって製造されたグリーン水素）である必要がある。

・グリーン水素普及の障害となっているのは、様々な規制や市場設計に加えて、製造コストの高さである。再エネの発電コストは低下しているが、現状ではグリーン水素の製造コストは、ブルー水素（化石燃料＋CCS による水素製造）と比較して 2～3 倍であり、一層のコスト削減が必要である。

・グリーン水素を製造する際の最大のコスト要因は、電解装置に必要な再エネ電力の発電コストである。再エネ発電コストが高い場合は、電解槽コストの多寡にかかわらず、グリーン水素の製造コストがブルー水素よりも高くなる。低コストの電力は競争力のあるグリーン水素を製造するための条件である。これによって、日照条件や風況など理想的な再エネ資源の賦存しているエリアで水素製造の機会が形成されることになる。

・しかし、競争力のあるグリーン水素製造のためには、電力コストが低いだけでは十分ではなく電解設備のコスト削減も必要である。電解槽はグリーン水素製造において 2 番目に大きなコスト要素である。電解設備の投資コストを短期的には 40%、長期的には 80%削減するための戦略を本報告書は明らかにしている。これらの戦略は、電解装置の基本設計からより広範なシステム全体の要素にまで及ぶ。電解槽の効率化と最適化に加えて、低コスト電力と電解槽の設備投資を組み合わせることで長期的にはグリーン水素の製造コストを最大 85%削減できると考えられる（図 4 参照）。

・図 5 は 2020 年から 2050 年にかけてのグリーン水素製造コストの削減ポテンシャルの推移を示している。最良のシナリオでは、低コストの再エネ電力（20 ドル/MWh）と電解槽（650 ドル/kW）を組み合わせることで、2020 年時点で既にグリーン水素はブルー水素に対してコスト競争力を持ち得る。

・もう一つ図 5 が示唆しているポイントは、電解槽のコスト削減では電力価格のコスト差を補うことはできず、やはり低い電力コストが競争性のあるグリーン水素の製造には決定的に重要という点である。低コスト電力と積極的な電解槽への投資を進めることで、2040 年までにグリーン水素は他のどの低炭素オプションよりも安価（≒1 ドル/kg 以下）で製造する

ことができる。今後 10 年間で急速なスケールアップが行われれば、電力価格が 30 ドル/MWh 程度の多くの国において、2030 年までにグリーン水素はブルー水素と競合性を有するようになると予想される。

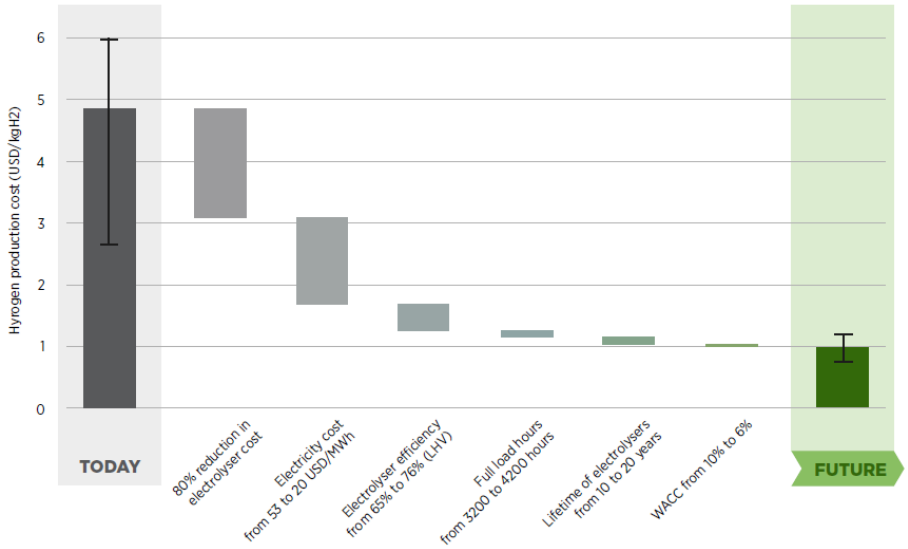


図 4　将来のグリーン水素製造コスト 80%削減の要因分解

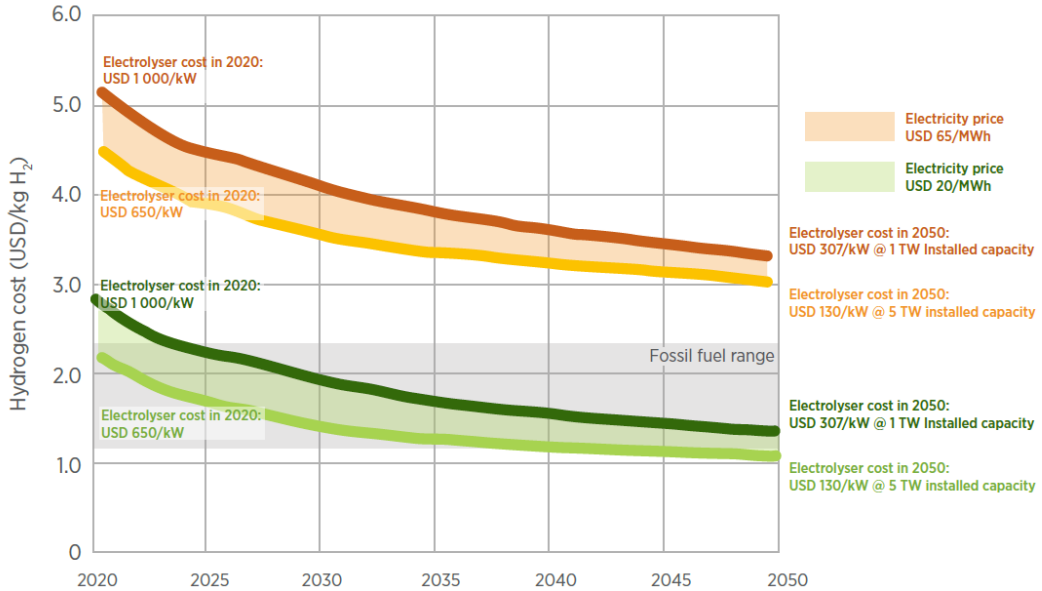
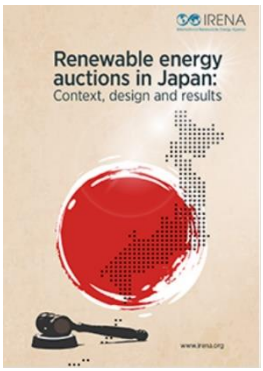


図 5　2 つの電力価格 65 ドル/MWh（上側）と 20 ドル/MWh（下側）を使用して、2020 年から 2050 年にかけて低下する電解槽コストとの関数で示されたグリーン水素製造コストのレンジ

・電解槽のコストと性能は技術で異なる。アルカリ水電解槽と PEM 電解槽が最も進んでおり既に商業化されている。アルカリ水電解槽は設置コストが最も低い一方、PEM 電解槽は設置面積が非常に小さくかつ電流密度と出力圧力が高いという利点がある。もう一つ、固体酸化物電解槽は最も高い電気効率を有しているなど、それぞれの技術に異なる利点がある。
・こうした各技術のコストと性能の差異は、電解槽の技術進歩と大量導入によりコストが次第に収斂してゆき時間経過とともに縮小していくと予想される。しかしながら、製造システムのコスト全体は設備規模、用途、納入品目に依存するため今後も大きなコスト差が出てくる。例えば、既存の施設内に設置されかつ既存の電力供給を受けられるコンテナ型のシステムであれば、グリーンフィールドから土地、水・電力供給システムの整備、高純度水素や高出力の圧力に対応した新しい設備を建設するよりも大幅に低コストで済む。
・2020 年の数字は（当然のことながら）2020 年にシステムを注文した場合のコスト見積もりである。市場が急速に拡大する中、開発初期段階では製造設備への投資を回収する必要があるため、コストと見積もり提示価格のギャップは、10 年後、20 年後よりも現在の方が大きくなる傾向がある。現時点では、1GW の製造能力に対して 4,500 万～6,900 万ユーロの投資が必要とされている。

4. IRENA “Renewable energy auctions in Japan: Context, design and results”（2021 年 1 月発刊）



・日本においてこれまでに実施された再エネ入札の結果についてまとめた報告書。概要は以下の通り。
・FIT スキームの維持が財政的に困難になったため、2017 年に日本は再エネの入札を導入した。2020 年 10 月までに太陽光 5 回、バイオマス 2 回の入札を実施し、洋上風力の入札を 2020 年 6 月に開始した。FIP 制度は 2022 年に導入される予定である。
・5 つの太陽光入札では、当初 競売にかけられた合計容量 1,663MW のうち、約 1/3 の 574MW が落札された。また、バイオマスについては入札を経た契約はゼロ件である。
・太陽光の入札では、入札者の多くが途中で脱落したため、適格な入札者を確保することが課題となっている。系統接続や土地利用に関する制約そして（第 1 回入札での）厳格な保証金没収ルールが事業者の入札への参加意欲を低下させたとの指摘がある。
・太陽光の入札では、第 1 回から第 5 回までの間に平均落札価格が 35%以上も低下した。2017 年 11 月の第 1 回では、加重平均落札価格が 19.64 円/kWh（174 ドル/MWh）だったものが、2020 年 1 月の第 5 回では加重平均落札価格が 12.57 円/kWh（115 ドル/MWh）となった。しかし、日本の太陽光発電の価格は世界平均の 56 ドル/MWh（2018 年）と比較すると

高い上に、マクロ的な経済条件や太陽光発電の開発水準が類似の他国と比較しても依然として高い。

・相対的に高い落札価格は、必ずしも入札の成功を棄損するものではない。落札価格の平均値は、日本の太陽光の発電コストに近く、入札の価格発見機能を裏付けている。一方で、落札価格は入札上限価格に近く、各入札での応札量不足の問題（いわゆる札割れ）が解決されれば、競争が促されて価格が一層下がる可能性がある。

・日本の太陽光発電の発電コストが高いのは、太陽光モジュールやインバーターのコストに加えて、設置・建設コストが比較的高いことが要因となっている。また、日本での再エネ開発に係る事業リスクも価格の高さを説明する要因として指摘されている。日本では、補償のない出力制御を受ける可能性の高さや系統連系の不確実性などのリスクを踏まえたリスク評価をしなければならない。

・日本では、系統連系や土地利用の制約が大きな障壁となって「規模の経済」が働かない状況にあると考えられる。例えば、太陽光の第 4 回と第 5 回入札では、2MW 以下の小規模な新規事業者の参加が大きく増えたが落札価格は低下を続けた。このことは、落札価格の低下が「規模の経済」によって引き出されていないことを示唆している。

・日本の再エネ入札が直面している課題の多くは、再エネの円滑な系統への統合、タイムリーな再エネプロジェクトの完工、公正で公平なエネルギー転換への支援など、価格の低下機能以外の入札の制度設計によって解決可能である。

5. IRENA “Innovation Outlook: Renewable Methanol”（2021 年 1 月発刊）

・メタノールに関する課題、政策勧告、合理的なコストでの再エネメタノールを製造についてまとめた報告書で、IRENA と Methanol Institute との共著。概要は以下の通り。

【メタノール】

・メタノールは重要な化学工業製品である。メタノールは主にホルムアルデヒド、酢酸、プラスチックなど他の化学物質の製造に使用される。世界で年間約 9,800 万トンが生産されており、そのほとんどが化石燃料（天然ガスまたは石炭）から生産されている。 現在のメタノールの生産・使用による LCA での排出量は、約 3 億 t-CO2（化学部門の総排出量の約 10%）である。

・メタノールの生産量は過去 10 年間で約 2 倍に増加しており、その増加の大部分は中国である。現在のトレンドが続くと、2050 年までに生産量が年間 500 百万トンに達する可能性があり、原料が化石燃料のままだとすると年間 1.5 百万トンの CO2 を排出することになる。化石燃料を使ったメタノールの現在の製造コストは 100～250 ドル/トンである。

【再生可能メタノール】

・再生可能メタノールは、再エネと再生可能な原料を用いて以下のいずれかの 2 つの方法で

製造することができる。

・ バイオメタノール:バイオマスから製造される。持続可能なバイオマス原料としては、林業廃棄物、農業廃棄物、農林業副産物、埋立地からのバイオガス、下水汚泥、都市廃棄物、パルプ・製紙業界からの黒液などが考えられる。

・グリーン e-メタノールは、再生可能な資源から回収した CO2（炭素回収・貯留付きバイオエネルギー（BECCS）および直接空気回収（DAC））と、グリーン水素（再エネ電力で製造した水素）を用いて製造される。

・このいずれの方法で製造されたメタノールも、化学組成的には化石燃料から製造されたメタノールと同じである。現在、再生可能メタノールの年間生産量は 0.2 百万トン以下でそのほとんどがバイオメタノールである。

・再生可能なメタノールへの関心は、CO2 排出量を大幅削減またはゼロにすることの必要性、特に世界の平均気温の上昇を 1.5℃以下に抑制することへの関心の高まりによって牽引されている。低排出のメタノールは、技術的選択肢が限られている特定の分野、特に化学工業の原料や陸運・海運用の燃料として、脱炭素化に大きな役割を果たすことが期待されている。

【バイオメタノールの生産コスト】

・バイオメタノールの生産コストは、バイオ原料コスト、投資コスト、変換プロセスの効率に依存する。原料コストを 6 ドル/GJ 程度とすると、320～770 ドル/トンの範囲になると推定されるが、CAPEX、OPEX、変換効率の違いなどに影響される。プロセスの改善により、この製造コストは 220～ 560 ドル/トンの範囲にまで削減できる可能性がある。 特に、工業プロセスの廃棄物（製紙工場の黒液や廃棄物）からバイオメタノールを生産することは、原料の物流を簡素化し、プラント全体の経済性を向上させる機会となる。また、熱や電気、その他の化学物質を同時に生産することで、バイオメタノール生産の経済性が向上する可能性もある。

【グリーン e-メタノール】

・e-メタノールの生産コストは、水素と CO2 のコストに大きく左右される。CO2 のコストは、バイオマス、工業プロセス、DAC など回収方法によって異なる。

・ 現在の e-メタノールの製造コストは、CO2 を BECCS から 10～50 ドル/トンで調達した場合、800～1,600 ドル/トンの範囲になると推定されている。CO2 を DAC で調達した場合、現在のコストは 300～600 ドル/t とされることから、e-メタノールの製造コストは 1,200～2,400 ドル/トンの範囲と推計される。

・グリーン水素の将来的な生産コストは、再エネ発電や電解槽のコストの一層の削減と効率性や耐久性の向上の組み合わせに大きく依存する。再エネ発電価格の低下に伴い、e-メタノールのコストは 2050 年までに 250～630 米ドル/トンの水準まで低下すると予想される。 バイオメタノールの場合と同様に、化石燃料を原料とするブラウンあるいはグレーとグリーン e-メタノールを同時生産することで、グリーン e-メタノールを合理的なコストで段階的に導

入することができる。

【再生可能メタノールのメリットと課題】

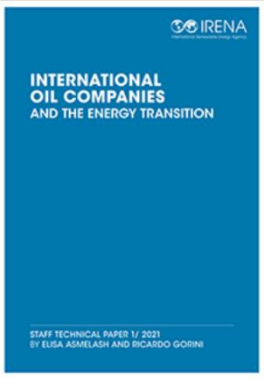
・再生可能メタノールは、バイオマス、廃棄物、CO2、水素といった様々な持続可能な原料から製造できる。化石燃料の代替として使用することで GHG 排出量を削減できるだけでなく、SOx、NOx、PM 等の他の有害物質の排出も減らすこともできる。

·再生可能メタノールは、内燃エンジンで使用できる他、ハイブリッド車や FCV、船舶でも使用できる多用途の燃料である。通常温度・気圧下で液体であることから保管、輸送、配送が容易である。加えて、既存燃料の流通インフラと互換性がある上、従来型化石燃料との混合も可能である。

·バイオマス及び CO2 と水素からのメタノール生産には、実験技術は含まれていない。化石燃料ベースの合成ガスからメタノールを製造するのと概ね同一の商用化技術が使用されており、バイオエタノールと e メタノールの製造にそのまま適用できる。現在、再生可能メタノールの利用拡大に対する主たる障壁は、化石ベースの燃料と比較してコスト高であることであり、そのコスト差は当面継続すると考えられる。しかし、その価値は既存燃料と比較した CO2 排出削減の可能性に見出すことができる。

·生産と使用のスケールアップを促進することでコストを削減することは可能だが、それには多面的な政策の介入が必要になる。適切な支援メカニズムとベストな生産条件が整えば、再生可能メタノールの生産コストが、化石燃料からのメタノール生産のコストに近づく可能性がある。

6. IRENA “Oil companies and the energy transition”（2021 年 2 月発刊）



・エネルギー転換に対する 7 つの国際石油企業（BP、シェブロン、Eni 、エクイノール、エクソンモービル、シェル、トタル）の戦略を分析し、これらの企業の進行中のエネルギー転換への適応と気候変動対策を評価した報告書。IRENA 本体ではなく、IRENA のスタッフによる技術ペーパー。概要は以下の通り。

・再エネの増加、気候変動に配慮した取り組みの急増、投資家からのエネルギー転換を加速させる圧力の高まり、世界各国による脱炭素宣言、パンデミックに伴う景気の悪化（と原油価格の下落）は、国際石油企業の活動に大きな課題と脅威をもたらしている。これらの企業は、再エネソリューション、エネルギー効率改善、その他のクリーンテクノロジーへの投資を行い、野心的な排出削減目標を定めることで、エネルギー産業における自らの地位を徐々に回復しつつある。しかし、こうした気候変動対策へのコミットメントやクリーンテクノロジーへの投資を行うことで、国際石油企業が（地球温暖化を抑制するために必要なスピードで）GHG 排出を削減するエネルギー企業へと本当に転換しているのか、という疑問が出てきている。

・この疑問を踏まえて、本報告書では石油会社のクリーンエネルギー戦略と投資、気候変動対策の目標を分析した。その結果、石油各社が排出削減目標や再エネプロジェクトへの参画を表明したにもかかわらず、各社の再エネへの実際の投資額は、化石燃料への投資額に比べてまだ低いことが明らかとなった。
・石油会社は、成熟した再エネ産業と競合しており、再エネについては競争力を持たない小さなプレーヤーに過ぎない。また、石油会社は石油需要の減少、投資家の懐疑的な見方、気候や環境の保護に対する社会の圧力にも直面している。加えて、近年の原油価格の低迷は、石油その他の化石燃料市場のボラティリティやエネルギーシステムの地政学的問題をリマインドさせた。多くの石油会社はこうした課題を認識し、新しい事業活動を積極的に展開している。しかし、それらは予想されるエネルギー転換のニーズに沿ったものではない。
・IRENA の「エネルギー転換シナリオ」によると、世界のエネルギーシステムは、発電だけでなく産業や輸送部門などの最終エネルギー消費分野においても、化石燃料に大きく依存した現在のシステムを再エネベースのシステムに置き換えて大きな転換を遂げる必要がある。このことを石油会社は認識した上でビジネス上の投資決定を行うことができる。例えば、石油ビジネスは資本集約的な産業であり、気候目標を達成するために今後数年間で必要とされる再エネ投資のギャップを埋めるために重要な役割を果たすことができる。
・課題は 2 点ある。一つはエネルギー転換に適応すること、もう一つは、エネルギーシステムの脱炭素化を単に支援するだけでなく、むしろリードするような方法で進化することである。
現在、各国が優先的に取り組んでいる主要な脱炭素ツールの中には、石油会社が競争力を発揮できる選択肢が以下のようにいくつかある。
【水素】
・魅力的な燃料であり、輸送、重工業、電力や暖房など多様な用途に利用可能。石油会社がガスの輸送・販売で培った専門的知見を活用して参入できる新しい市場の一つである。
【洋上技術】
・半世紀以上にわたって洋上で操業してきた石油・ガス業界は、得られた知見を洋上風力発電に移転することで相乗効果を得ることができる。例えば、洋上石油・ガス産業や海運産業の既存のインフラをアップグレードして、洋上風力用に変換することができる。
【電化】
・IRENA のエネルギー転換シナリオでは、再エネ電力が主要なエネルギーキャリアになると予測している。欧州の石油会社には、再エネ発電と小売りで国際的に重要な役割を果たすことを目指して既に電力部門に参入している。そうした企業は、発電（太陽光、陸上および洋上風力発電）や EV 充電設備へ集中的に投資を行っている。
【液体バイオ燃料】
・多くの石油会社は、数十年前からバイオ燃料の研究活動やベンチャーキャピタルに投資している。そうした企業は、電化が困難とされている運輸部門、特に大型トラックや航空機の

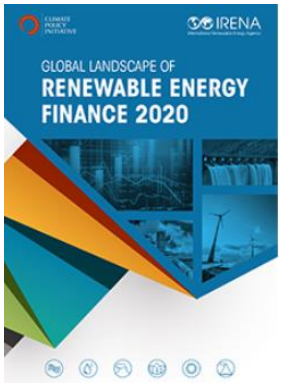
燃料需要が将来も続くことに賭けている。多くの政府が内燃エンジン自動車の廃止を計画していることから、原油価格が低い状況下でも液体バイオ燃料への投資は戦略的なものとなる。

【CCS】

・すべての石油会社がすでに投資している技術で、様々な側面から彼らの既存ビジネスを（少なくとも短期的には）維持することに役立つ。これには、事業活動からの GHG 排出の削減、カーボンフットプリントの縮小、そして、クリーンな水素製造などの新しいビジネス分野も含まれる。エネルギー部門の脱炭素化には水素が重要な役割を果たす。IRENA の分析では水素生産量の 2/3 がグリーン水素、1/3 がブルー水素となると予測している。ブルー水素の場合、天然ガスが主役になるため、クリーン水素であることを確保するために CCS が重要な技術となる。

・各国政府の低炭素エネルギーやネットゼロ政策への移行に合わせて、このような代替ビジネスの機会を追求することで、石油業界は未来のエネルギー企業として持続可能な成長の最前線に立つことができる。

7. IRENA “Integrating low-temperature renewables in district energy systems: Guidelines for policy makers”（2021 年 3 月発刊）



・新規および既存の地域エネルギーシステムにおける低温の再エネ熱源の利用を促進するための情報と利用可能なツールやソリューションを例示した政策立案者向けガイドブック。IRENA とデンマークの Aalborg 大学との共著によるガイドブック。ドイツ環境省がスポンサー。概要は以下の通り。

・冷熱部門の GHG 排出量を削減することは、気候変動を緩和し大気汚染を抑制するために重要である。この点において、地域冷熱システムは、再エネの利用拡大、エネルギー効率の向上、冷熱分野における化石燃料の利用削減、都市部の大気環境の改善に役立つ。

・従来、地域熱供給システムは、断熱性の低い建物による高温の熱需要を満たすために高温での運用を前提に構築されてきた。その多くでは、高温熱を供給するために化石燃料を使用する必要がある。しかし、技術革新、デジタル化、そしてエネルギー効率の高い建物の増加によって、新世代の地域エネルギーシステムでは、低温の地熱、太陽熱、河川水熱、低温の廃熱源などのクリーンエネルギー技術を幅広く導入することが可能になるかもしれない。

・これら低温のクリーンエネルギー源は、多くのエリアの地域レベルで広範に賦存している。しかし、地域エネルギーのインフラや既存の建築物での利用にはすぐに対応できないため、現状ではほとんど未利用のままとなっている。具体的には以下のような障壁に阻まれることが多い。

- 未利用の低温クリーンエネルギーに関するデータの不足

- ベストアベイラブルな技術に関する知見と認識の不足
- 建物のリノベーション戦略との連携の欠如
- 化石燃料を使った暖房システムや電気冷房システムとの不公平な競争
- 高い初期費用
- 自治体レベルの予算不足
- 不適切な規制と長い許認可手続き

・このような背景を踏まえて、本報告書では、地域エネルギーシステムにおける低温の再エネ熱源の利用を促進するための利用可能なツールやソリューションの事例を紹介している。また、地域冷暖房の適用や低温の再エネ熱を利用した実現技術の概要も提示している。なお、本報告書は、太陽熱、地熱、河川水熱など低温エネルギーを利用したエネルギーシステムやヒートポンプを利用したシステムに焦点を当てている。地域熱供給に対する再エネの代表格であるバイオマスは（高温で稼働するため）本報告書の焦点である低温エネルギーには含まれず対象外としている。

【主な提言は以下の通り】

・明確な政治的意思に基づいて戦略的な冷熱計画を策定し、そのプロセスに関与する主要なステークホルダーを特定する。このプロセスは、地方自治体が主導することも可能だが、野心的な目標と実現可能な枠組みの提供には国による支援が求められる。

・冷熱需要と資源マッピングに基づいた技術シナリオを作成する。

・技術的かつ社会経済的に最適なパフォーマンスレベルを達成し、ロックイン効果やエネルギー供給の遮断を避けるために、エネルギー供給の変更、熱系統の近代化、建物の改築計画を統合する。

・根源的な課題に取り組むことで、各地域でアベイラブルな再エネ熱資源の活用を促進する。

・実現可能（enabling）な規制条件の整備、資金調達方法の支援、ビジネスモデルの確立を確保する。

令和２年度新興国等におけるエネルギー使用合理化等に資する事業
（マルチ枠組における国際動向調査）

一般財団法人　日本エネルギー経済研究所

頁	図表番号	タイトル
44	1.1	乗用車における電気自動車のストック台数の推移（2010-2019）
45	1.2	電気自動車の販売台数 と市場シェア(トップ10位、2013-2019）
46	1.4	電動バスの販売（国・地域、2015-2019）
47	1.5	中型、大型電動トラックの販売（国・地域、2010-2019）
48	1.7	世界の乗用車向け電気自動車の充電設備ストックの推移（2013-2019）
48	1.8	国別アクセス可能な充電設備の割合（2010-2019）
49	表2.3	NEVプログラムにおける自動車技術別のクレジット取得ポイント
51	表2.2	主要国におけるEV導入に向けた助成措置のまとめ
54	図4.3	2019-2030年における自動車用バッテリーのリユースまたはリサイクル可能な容量
55	表4.1	リユースバッテリーを採用したプロジェクトの例
56	表4.2	リチウムイオン電池のリサイクル施設の例
57	表4.3	リチウムイオン電池のリユース・リサイクル政策
61	図1.1	世界の一次エネルギー需要、人口とGDP （1950年から2019年）
62	図1.3	世界の一次エネルギー供給(燃料源別)(1925年から2019年)
64	図1.12	エネルギー部門の設備の典型的寿命
65	図1.14	主要産業サブセクターの世界的な生産設備能力の経年プロファイル
67	図2.1	持続可能な開発シナリオにおける世界のエネルギー部門からの燃料および技術別CO2排出量(2019年から2070年)
68	図2.2	持続可能な開発シナリオにおける公表政策シナリオからの世界のエネルギー部門からの対策別CO2削減量(2019年から2070年)
69	図2.3	持続可能な開発シナリオにおける世界のエネルギー部門からの部門別・サブセクター別CO2排出量(2040年と2070年)
70	表2.1	一次エネルギー需要(燃料別・シナリオ別)：単位Mtoe
71	表2.2	一次エネルギー需要(地域別・シナリオ別)：単位Mtoe
72	表2.3	最終エネルギー消費(部門別・シナリオ別)：単位Mtoe
73	図2.6	持続可能な開発シナリオにおける最終エネルギー消費の変化量(燃料別・部門別) (2019年から2070年)
74	図2.7	持続可能な開発シナリオにおける公表政策シナリオからの材料効率による世界の鉄鋼とセメントの削減量(サプライチェーンのステージ別)(2070年)
75	図2.8	持続可能な開発シナリオにおける世界の電力消費の成長(部門別・シナリオ別)と最終消費における電力シェア

77	図2.10	世界の銅およびリチウムの需要(部門別・シナリオ別)
78	図2.11	低炭素電力バリューチェーンに沿った技術の技術準備レベル
79	図2.12	持続可能な開発シナリオにおける世界のCO2回収の成長 (部門別・燃料別)(2017年から2070年)
80	図2.13	持続可能な開発シナリオにおける燃料用および原料製造用の 世界のCO2利用量(2017年から2070年)
82	図2.14	CO2バリューチェーンに沿った技術の技術準備レベル
83	図2.15	持続可能な開発シナリオにおける世界の水素製造量 (燃料別・部門需要別)(2019年から2070年)
84	図2.16	持続可能な開発シナリオにおける世界の最終エネルギー需要での水素(部門別)と主要部門での水素のシェア(2019年から2070年)
85	図2.18	低炭素水素バリューチェーンに沿った技術の技術準備レベル
86	図2.19	持続可能な開発シナリオにおける世界のバイオエネルギー需要(部門別)と主要部門でのバイオエネルギー利用のシェア(2019年から2070年)
87	図2.21	発電とバイオ燃料でのバイオエネルギーの競争力(2050年)
88	図2.22	バイオエネルギーバリューチェーンに沿った技術の技術準備レベル
90	図3.1	持続可能な開発シナリオにおける世界の需要部門別のCO2排出量 (2019-2070)
91	図3.2	持続可能な開発シナリオにおける発電燃料/技術別のCO2排出量 (2019-2070)
92	図3.3	シナリオ別の各発電技術によるCO2排出量および即応性レベル別のCO2排出量
93	図3.4	地域別の発電構成、燃料/技術およびシナリオ(2019年から2070年)
94	図3.5	シナリオ別の石炭火力発電所の発電量(2019年から2070年
96	図3.6	持続可能な開発シナリオにおける水素と液体および気体のバイオ燃料の役割
97	図3.7	持続可能な開発シナリオにおける技術別バイオ燃料生産量推移 (2019年から2070年)
98	図3.8	持続可能な開発シナリオにおける世界の水素生産と需要(2070年)
99	図3.9	持続可能な開発シナリオにおける世界の技術別の水素生産量 (2019年から2070年)
100	図3.10	持続可能な開発シナリオにおける地域別の電解槽容量と水素からのCO2回収(2019年から2070年)
101	図3.11	持続可能な開発シナリオにおける水素製造コスト(2019年および2050年)
102	図3.12	持続可能な開発シナリオにおける水素ベース燃料の生産(2019年から2070年)
104	図3.13	さまざまな要因別の合成灯油製造コストの予測と、 電気料金と全負荷時間の影響(2050年)
105	図3.14	持続可能な開発シナリオにおける業種および 地域別の産業CO2排出量(2019年から2070年)
105	図3.15	持続可能な開発シナリオにおける全産業および3業種の最終エネルギー需要に対する燃料シェア (2019年から2070年)

107	図3.16	持続可能な開発シナリオにおける輸送方式別の世界のCO2排出量 (2000年から2070年)
108	図3.17	持続可能な開発シナリオにおける世界の運輸部門のエネルギー消費の燃料割合(2019年から2070年)
109	図3.18	持続可能な開発シナリオにおける用途別および地域別の建築物使用段階からのCO2排出量 (2019年から2070年)
110	図3.19	持続可能な開発シナリオにおける暖房機器の販売シェアと 地域別のニアリーZEBのシェア
111	図3.20	持続可能な開発シナリオにおける排出量削減策 および即応性レベル別のCO2排出削減量(2019年から2070年)
112	図3.21	公表政策シナリオとの比較による持続可能な開発シナリオにおける部門別10年平均年間エネルギー関連投資額の推移
114	図3.22	持続可能な開発シナリオにおける技術準備レベル別の技術への 平均年間投資
116	図4.2	持続可能な発展シナリオにおける産業部門のエネルギー消費と CO2排出量(2019年から2070年)
117	図4.3	直接CO2排出削減に関わる技術のポートフォリオ(2040年と2070年)
119	図4.5	世界の化学部門における直接排出削減とエネルギー消費、 持続可能な発展シナリオ(2019年から2070年)
119	図4.6	世界の化学部門における直接排出削減と技術の成熟度 (2019年から2070年)
121	図4.10	持続可能な発展シナリオにおける世界の鉄鋼部門における直接排出削減とエネルギー消費量(2019年から2070年)
122	図4.12	持続可能な発展シナリオにおける技術別の鉄鋼生産(1990年から2070年)
124	図4.16	持続可能な発展シナリオにおけるセメントのCO2排出および エネルギー消費量(2019年から2070年)
125	図4.17	持続可能な発展シナリオにおけるセメントのCO2排出削減と 適用技術の成熟度(2019年から2070年)
126	図4.20	セメントと鉄鋼部門のCO2排出に関する建築の影響 (2000年から2020年)
127	図4.22	持続可能な発展シナリオにおける建築物と建設に関わる バリューチェーンのCO2排出見通し(2010年から2070年)
127	図4.23	建築物と建設におけるセメントと鉄鋼に関連するCO2排出(2019–2070年)
128	図4.24	持続可能な発展シナリオにおける建築物の建設に関わる材料の効率的利用に関する貢献(2019年から2070年)
130	図5.1	持続可能な開発および公表政策のシナリオにおける長距離輸送部門別の世界のエネルギー消費とCO2排出量
132	図5.2	中/大型トラックの割合と自動車燃料消費(2019年)
134	図5.4	公表政策シナリオと持続可能な発展シナリオにおける削減措置(左)と技術
134	図5.5	持続可能な発展シナリオにおける燃料と平均車両効率による 世界の中/大型トラック輸送のエネルギー需要(2019年から2070年)
136	図5.7	長距離輸送大型トラックの所有コストに対する蓄電池と 燃料電池の価格の影響
137	表5.2	大型トラック輸送における主要新技術の状況

142	表5.3	貨物海運における大気汚染とGHG排出を対象とする主な国際規制
143	図5.9	世界の貨物海運における船舶の種類と燃料別の輸送量、 エネルギー消費、CO2排出量(2019年)
144	図5.10	公表政策シナリオと持続可能な発展シナリオにおける排出量削減策(左)と技術の即応性レベル(右)による貨物海運のCO2排出削減量(2019年から2070年)
144	図5.11	持続可能な発展シナリオにおける国際貨物海運における世界のエネルギー消費とCO2排出量(2019年から2070年)
146	図5.12	船種別の水素、アンモニア、電気推進船の総所有コスト(2030年)
147	表5.4	海上輸送における主要な新技術の状況
149	図5.14	持続可能な発展シナリオにおける地域別の有償旅客キロ (2019年から2070年)
150	図5.15	持続可能な発展シナリオにおける世界の航空燃料消費量と 公表政策シナリオにおける総燃料使用量(2019年から2070年)
151	図5.16	公表政策シナリオと比較した持続可能な発展シナリオにおける削減措置(左)と技術準備レベル(右)による航空のCO2排出量
153	表5.5	航空部門の主要な新技術の状況
154	図5.17	民間旅客航空全体におけるフライトと燃料使用のシェア(2017年)
155	図5.18	持続可能な航空燃料の生産コスト(2050年)
158	図6.1	次世代の設計を改善する技術革新、フィードバック、波及効果の4つの段階
160	図6.2	IEA加盟国政府による技術別公的エネルギー技術開発と 実証への支出の推移(1977年から2019年)
161	図6.3	特定セクターごとの収益に占めるグローバルな企業の 研究開発投資の割合(2007年から2019年)
162	図6.4	エネルギー技術スタートアップへのグローバルな アーリーステージベンチャーキャピタル取引
163	図6.5	特定の国・地域別の低炭素エネルギー技術特許の発行数
165	図6.6	特定のセクターにおける収益と研究開発投資の成長率 (2007年から2012年)
166	図6.7	半期ごとの世界のエネルギー関連ベンチャーキャピタル取引 の価値と数(初期及び後期)
167	図6.8	公表政策シナリオに対する持続可能な発展シナリオの技術成熟度別エネルギー部門からの世界のCO_2排出削減量(2019年から2070年)
168	図6.9	公表政策シナリオに対する持続可能な発展シナリオの現在の 技術成熟度・セクター別の世界のCO_2排出削減量(2040年および2070年)
170	図6.10	公表政策シナリオにおける技術が成熟するまでの期間
171	図6.11	持続可能な発展シナリオにおける技術の単体コスト低減見通し(2020–70年)
172	表6.1	より迅速なイノベーションサイクルまたはより迅速な学習を可能にする エネルギー技術の特性
174	図6.12	世界の部門別CO_2排出量(2019年および2050年)

175	図6.13	近年の最も迅速な開発例を含む、最初のプロトタイプから 市場に投入されるまでの技術別の期間
176	図6.14	現在の技術成熟度別の2050年における世界のエネルギー部門の 年間CO2排出削減量への貢献度
177	図6.15	シナリオ別の脱炭素化指標(2050年)
177	図6.16	世界のエネルギー部門の年間CO2排出削減量 (削減策の種類別および総一次エネルギー需要別)(2050年)
180	図6.17	最終エネルギー需要における水素と電力の世界シェア(左)と 水素技術の採用基準(右)(2019年および2050年)
181	図6.18	2050年の世界のソース別CO_2回収量
182	表7.1	政府のカーボンニュートラル目標と法律整備に関わる進捗状況
183	表	EUの経済復興計画における低炭素化に向けた手段
184	図7.2	持続可能な開発シナリオ及びFaster Innovation Caseにおける 世界のCO2排出削減と技術の発展段階別貢献(2050年)
185	図7.6	持続可能な発展シナリオにおける資本コストの削減見通し(2019年から2030年)
186	図7.7	持続可能な発展シナリオにおける世界の特定技術に対する 累積エネルギーインフラ投資
190	図1	燃料別の最終エネルギー消費に占める割合 (公表政策シナリオ・持続可能な開発シナリオ)
191	表1	主要な電力セキュリティの用語と定義
193	表2	近年の電力危機の事例
195	表3	電力システムの動向が電力セキュリティのさまざまな側面に及ぼす潜在的な影響
197	図2	世界の電源構成における変動性再生可能エネルギーの割合
198	図3	米国におけるシナリオ別の発電設備容量(2000～20年および2040年までの予測)
198	図4	インドにおけるシナリオ別の発電設備容量(2000～20年および2040年までの予測)
199	図5	新政策シナリオと原子力縮小ケースにおける、世界の原子力発電容量の推移
200	図6	中国におけるシナリオ別発電の燃料比率(2000～20年および2040年までの予測)
201	図7	EUにおけるシナリオ別発電の燃料比率(2000～20年および2040年までの予測)
202	図13	北西欧州のピーク供給時における発電電力量(2018年および2030年)
206	図14	世界の重大なサイバー事件件数(2006年から2019年)
207	表4	サイバーレジリエンスを強化するための潜在力が高い取り組みの概要
208	図15	サイバーレジリエンスに対するアプローチの強度
211	図16	IEAシナリオにおける住宅用冷房需要の増加(2018年から2030年)

211	表5	長期的な気候変動と異常気象による電力システムへの影響の概要
212	図17	電力システムにおける気候レジリエンスの概念的枠組
214	図18	IEA加盟国の国家適応計画における電力システムの気候レジリエンスの範囲
219	図1	乗用車の販売台数の推移 (2010-2019)
222	図2	世界の主要地域における電気自動車の販売台数推移 (2010-2019)
226	図1.1	一次エネルギー原単位の年平均改善率(経緯およびIEAのSDS)
227	図1.2	世界の一次エネルギー需要とその要因(2019年を2018年と比較)
228	図1.3	各国のロックダウンの直接的・非直接的な部門別の影響
229	図1.4	GDPとエネルギー原単位改善の相関(2000年から2020年)
232	図2.1	平均的な在宅時間の変化(左)と職場への出勤回数の変化(右)
233	Box 2.1	在宅勤務シナリオにおける最終エネルギー消費の変化とCO2排出
234	図2.2	米国の二地域におけるエネルギー需要の低減
235	図2.3	英国のスマートメーターの設置件数の推移
237	図3.1	オランダの1電力会社圏内におけるエネルギー使用量の変化 (ロックダウン前後)
238	図3.2	生活家電のオンラインショッピング検索数 (2018-2019年を2019-2020年と比較)
239	図	ベトナムにおけるエアコンの購入価格 (左) とライフサイクルコスト (右) 対技術レベル (CSPF) 、2019年
242	図4.1	一部の産業部門における生産量の変化 (2020年上半期 / 2019年上半期)
243	図4.2	米国の産業部門による月間天然ガス消費量 (2018年1月から2020年6月)
244	図4.3	EU27ヶ国および米国における産業サブセクター毎の生産量の変化 (2020年上半期 / 2019年上半期)
245	図4.4	主要国の産業用電気料金の変化 (2020年上半期 / 2019年上半期化)
246	図	中国の2009年の景気刺激策が製造業の構造に与えた影響に関する推定
247	図	製造業および経済全体に対する中国の構造的影響、エネルギー使用およびエネルギー原単位の指標 (2005年から2015年)
248	図5.1	職場への移動に関わる変化(2020年3月から10月)
249	図5.2	乗用車での移動距離の変化(2020年3月から10月)
249	図5.3	米国モード別の平日における輸送回数 (2020年2月から10月)
250	図5.4	国別、モード別の平日における輸送回数指標 (2020年1月13日から10月31日)

250	図5.5	週別のバイク利用の変化 (2020年と2019年の比較)
252	図5.6	乗用車とEVの販売台数の推移 (2015年から2020年)
254	図6.1	世界の航空便旅客数の推移 (1980年から2020年)
256	図6.2	スクラップまたは長期保管された4発エンジン搭載の航空機数 (2020年3月以降)
257	図6.3	世界の航空燃料使用量の推移 (2013年から2021年)
258	図6.4	ユーラシア大陸鉄道貨物の売上げ高 (2019年と2020年の比較)
260	図	原油タンカーの輸送ルートの例:2020年3月から4月にかけて利用されたルートと一般的なルート
261	図7.1	持続可能経済復興プランにおける対策別の政府支出
262	図7.2	持続可能経済復興プランにおける対策別のCO2削減費用
262	表7.1	公表されたクリーンエネルギー関連の政府支出の分野別割合
263	図7.3	省エネ関連の景気刺激策に関する政府支出(2020年10月末)
264	図7.4	地域別省エネ関連の景気刺激策に関する政府支出(2020年10月末)
264	図7.5	IEAの持続可能経済復興プランとクリーンエネルギー関連の景気刺激策比較(左)および省エネ関連の景気刺激策 との比較(右)(2020年10月末)
266	表8.1	各国・地域におけるエネルギー関連の雇用の推計
267	図8.1	米国におけるエネルギー効率関連の雇用状況(2020年3月から7月)
267	図8.2	持続可能な回復計画における設備投資100万＄あたりの設置と製造の雇用創出数
268	図8.3	持続可能な回復計画および2020年10月末までの約束された刺激策によるエネルギー効率関連の雇用創出ポテンシャル
268	表8.2	産業、建物、輸送における刺激策の発表から現在までの地域別の エネルギー効率関連の推定総雇用数
269	表8.3	これまでに発表された効率関連の刺激策および効率改善の対策により創出される可能性のある推定総雇用数
270	図9.1	世界のエネルギー起源CO2排出量と削減貢献量
271	図9.2	公共部門による省エネルギー技術の研究開発費の推移
271	図9.3	スタートアップ企業への省エネルギー技術の研究開発投資の推移
272	図9.4	2019年における地域・技術別の省エネルギー投資
273	図9.6	建築部門における地域・技術別の省エネルギー投資
275	図	2018年におけるG20諸国の鉄鋼業最終エネルギー消費量平均と転炉鋼の割合

276	図9.10	ISO50001の地域別認証数
277	図9.11	産業別ISO50001認証数
282	図1	機関投資家が関与した再エネプロジェクト数（2009年から2019年Q2）
283	図2	グリーンボンドの年間発行額（地域別）2014～18年
289	図3	再エネ発電容量の累積値（左図）と2019年の増加量（右図）
291	図4	世界の発電容量（再エネと非再エネ）の年間増加量と再エネシェアの推移
295	図1	世界各国の化石燃料への補助金額
296	図2	世界全体のエネルギー分野への補助金と気候変動、健康コスト（2017年）
301	図1	再エネ消費量（左軸）と最終エネルギー消費全体に占める再エネのシェア（右軸）
305	図2	世界の再エネ発電量（左図）と2018年の再エネ発電増加量（右図）
306	図3	再エネ発電への投資額（左図）と同2019年水準コスト固定ケース（右図）
317	図1	PAYGモデルによるエネルギー提供サービスの各Tier分類
325	図2	2018年5月3日の九州エリアにおける電力需給バランス
333	図3	2050年時点でのベースラインシナリオからDDPシナリオまでの各排出削減対策の貢献量
338	図1	発電構成及び発電設備容量の内訳（2017年～2050年）
341	図2	全世界の技術別再エネ分野の雇用者数（2012～2019年）
345	図3	世界の再エネ技術別の投資額推移（50MW以上の大規模水力を除く、2004～2019年）
347	図4	太陽光・風力発電向け年間投資額（10億ドル、2013-18年：左図） 及び発電容量の年間増加量（GW, 2013-19年：右図）の推移
350	図5	世界各国の水素関連のイニシアティブの公表と決定まで各段階（2018年～2020年11月）
351	図6	水素の認証GOスキームの事例
352	図7	水素の適用分野別バリューチェーンにおける障壁と政策
357	図8	電力、熱、輸送部門での再エネベースのエネルギー供給量と全体の需要変動
358	図9	2018年～20年のエネルギー企業の株式インデックス
359	図10	2013～22年の再エネ発電容量の年間増加量（標準予測と加速予測ケース）
363	図1	左：潮力以外の海洋エネルギーの発電容量　右：潮力と潮流の発電容量

364	図2	稼働中＋計画中の海洋エネルギー発電容量のエリア別シェア
365	図3	2002年～2050年の洋上風力の発電設備容量
368	図4	将来のグリーン水素製造コスト80%削減の要因分解
368	図5	2つの電力価格65ドル/MWh（上側）と20ドル/MWh（下側）を使用して、2020年から2050年にかけて低下する電解槽コストとの関数で示されたグリーン水素製造コストのレンジ