IRENA
International Renewable Energy Agency

世界エネルギー転換展望 2023

1.5°Cへの道すじ

第1巻

© IRENA 2023
別途規定がない限り、本刊行物に記載された資料は自由に使用、共有、複写、複製、印刷および／または保存することができる。ただし、情報の出所および著作権者として IRENA を適切に明記する場合に限る。本刊行物に記載された資料のうち第三者に帰属するものには、別段の使用条件および制限が適用される可能性があり、かかる資料を使用する前に、かかる第三者から適切な許可を得る必要がある可能性がある。
ISBN: 978-92-9260-527-8

引用時の表記

IRENA (2023)、*世界エネルギー転換展望 2023: 1.5°C への道すじ*、 第 1 巻、国際再生可能エネルギー機関、アブダビ
本報告書はオンラインでダウンロードできる： www.irena.org/publications
ご意見・お問い合わせ： publications@irena.org

IRENA について

国際再生可能エネルギー機関(IRENA)は、世界のエネルギーシステムの転換を前進させるために、国際協力の重要な基盤として、中核的研究機関として、政策、技術、資源、財務に関する知識の保管庫として、また実地の取り組みの推進力としての役割を果たしている。2011 年に設立された政府間組織である IRENA は、持続可能な開発、エネルギー利用、エネルギーの安定供給、および低炭素の経済成長と繁栄を追求するため、バイオエネルギー、地熱、水力、海洋、太陽光、および風力エネルギーを含むあらゆる形態の再生可能エネルギーの幅広い普及と持続可能な利用を促進している。

www.irena.org

免責

本報告書およびこれに含まれる内容は、「現状のまま」提供される。本報告書に含まれる内容の信頼性を確認するため、IRENA はあらゆる合理的注意を払っている。しかし、IRENA も、またそのいかなる職員、代理人、データまたはその他の第三者資料提供者も、明示的、暗示的に関わらず、いかなる保証を提供するものではなく、本報告書またはその内容の使用の結果に対していかなる責任も引き受けない。

本報告書に含まれる情報は、必ずしもすべての IRENA 加盟国の見解を代表するものとは限らない。特定の企業やプロジェクト、製品に対する言及は、類似の特徴を持つが言及されていない他のものと比較して IRENA がこれを認証または推奨することを意味するものではない。本報告書で使用している名称や内容の提示方法は、いかなる地方、国、領土、都市、または地域、もしくはその機関の法的地位、または境界線や国境の画定に関連した IRENA 側の見解を表明するものではない。

日本語版（2024 年 3 月）
翻訳者：安田　陽（京都大学大学院経済学研究科 再生可能エネルギー経済学講座 特任教授）
本翻訳は環境省「令和 5 年度 2050 年カーボンニュートラルに向けた中長期的な温室効果ガス排出削減達成のための再生可能エネルギー導入拡大方策検討調査委託業務」の一環で（株）三菱総合研究所の協力の下に行われた。
本報告書は “World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway Volume 1”（© IRENA 2023）の非公式な翻訳物であり、英語の原文が優先される。

世界
エネルギー
転換
展望 2023

謝辞

本報告書の作成は Rabia Ferroukhi および Roland Roesch が**指導し、**Ute Collie および Ricardo Gorini が指揮を執った。エグゼクティブサマリーは、Elizabeth Press が指揮を執った。

各章の執筆は、Sean Collins、Jinlei Feng、Maria Vicente Garcia、Krisly Guerra、Diala Hawila、Melda Jabbour、Maisarah Abdul Kadir、Rodrigo Leme、Gayathri Prakash、Faran Rana、Nicholas Wagner、Mengzhu Xiao が行った。モデリングの調整は Rodrigo Leme が、各章の草稿作成は Mengzhu Xiao が行った。

IRENA の同僚やコンサルタントである Emanuele Bianco、Ines Jacob、Stuti Piya、Gandhi Pragada（元 IRENA）、Pablo Rimancus、Michael Taylor からは、**多大なる貢献**をいただいた。

IRENA の同僚、コンサルタント、アドバイザーである Abdullah Abou Ali、Arina Anisie、Simon Benmarraze、Francisco Boshell、Yong Chen、Isaline Court、Jaidev Dhavle、Nazik Elhassan、Gerardo Escamilla、Isaac Elizondo Garcia、Dolf Gielen（元 IRENA）、Luis Janeiro、Karan Kochhar、Martina Lyons、Asami Miketa、Raul Miranda、Paula Nardone、Athir Nouicer、Juan Pablo Jimenez Navarro、Pablo Ralon、Michael Renner、Daniel Russo、Danial Saleem、Lucio Scandizzo、Gondia Sokhna Seck、Aakarshan Vaid（元 IRENA）、Iris van der Lugt、Adrian Whiteman、Badariah Yosiyana からは、**貴重な情報、支援、意見**をいただいた。

Francis Field、Stephanie Clarke、Nicole Bockstaller、Daria Gazzola、Manuela Stefanides は、**編集や連絡の支援**を行った。校正は Steven B. Kennedy が、テクニカルレビューは Paul Komor が行った。グラフィックデザインは、weeks.de Werbeagentur GmbH が担当した。

IRENA は、ドイツ連邦経済・気候保護省の惜しみない支援に心より感謝する。

序文

最新の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第 6 次評価報告書統合報告書は、1.5°C への道すじを維持しようとする我々の集団的努力が危うい状況にあるという、厳しいメッセージを発している。地球の気温上昇を 1.5°C に、あるいは 2°C にさえ抑えることができるかどうかは、2020 年代に温室効果ガス排出量の削減に成功するか否かにかかっている。気温がほんのわずかに変わることによる影響は、どんなに強調してもしすぎることはない。世界で最も脆弱な人々にとっては特にそうであり、彼らはすでに気候変動の破壊的影響を被っている。洪水、干ばつ、火災など、気候に起因する災害が至る所で発生している状況は、軌道修正が緊急に必要であることを示している。

2030 年までの間に、我々は、持続可能な開発アジェンダの目標を達成し、同時に二酸化炭素排出量を大幅に削減しなければならない。気候の軌道を修正し、持続可能な開発を実現するうえで、エネルギーは極めて重要な役割を果たす。『世界エネルギー転換展望』に示した IRENA の 1.5°C への道すじは、再生可能エネルギー、クリーン水素、持続可能なバイオマスによって電化(エレクトリフィケーション)とエネルギー効率化をエネルギー転換の鍵となる促進要因と位置づけ、再生可能エネルギー、クリーン水素、持続可能なバイオマスによってそれを実現する必要があることを示している。各国は次第に、これらの技術的手段を気候行動の中心に、また、経済、エネルギー安全保障、ユニバーサルアクセス戦略の中心に据えつつある。

『世界エネルギー転換展望 2023』の本巻は、全てのエネルギー部門にまたがる実施状況とギャップを追跡することによって、進捗状況の全体像を提供する。そこから、これまでに達成された進展のほとんどは電力部門におけるものであることが分かる。電力部門では、技術、政策、イノベーションの好循環によって大きな進展が見られた。しかし、実施の規模と範囲は、1.5°C への道すじに留まるために必要なレベルにははるかに及ばない。同様に懸念される傾向は、これらの導入事例が地理的に集中しており、依然として少数の国や地域に限られていることである。このパターンは過去 10 年続いており、世界の人口のほぼ半分、特にエネルギーを切実に必要としている国の人々が排除されている。

再生可能エネルギーの事業性は高いが、化石燃料時代に構築された電力システムや構造に起因する根強い障壁が依然として進捗の妨げになっている。『世界エネルギー転換展望』では、このような障壁の克服に向けたビジョンが示され、今後に向けた基盤を構築する三本の柱が想定されている。第一は、新たな生産地、取引パターン、需要中心地に対応するために、必要なインフラを構築し、電力システムや陸海両ルートへの大規模な投資を行うことである。第二は、目的を絞った投資を促進することができる進歩的な政策や規制を推進することである。最後に第三は、我々が生み出したいと願うエネルギーシステムに見合う技能や能力を確保するために、制度面の能力を戦略的に再編成することである。



世界エネルギー転換展望 2023

そのためには、国際協力のあり方を再編成することも必要である。多国間金融機関は、新たなエネルギーシステムを下支えするインフラの構築を優先することが望ましい。それが、開発と気候に関する優先事項を論理的かつ同時に実現し、経済と社会の良好なダイナミクスを誘発すると考えられる。重要なことは、それによって、高い資本コストのような障壁に現在直面している国や地域にも民間部門からの投資が可能になることである。このような資金の大部分は譲許的融資として提供されることが望ましいが、後発開発途上国(LDC)や小島嶼開発途上国(SIDS)のような最も脆弱な国々に対しては、助成金がある程度必要である。

我々の集団的誓約は、現在と将来の世代が安全な気候の下で生活できるようにすることである。徐々に変えるといったやり方をこれ以上続けるわけにはいかない。化石燃料に基づくシステムがそうだったように何世紀もかけて徐々に発展するような時間的余裕は、新たなエネルギーシステムにはないのである。

また、エネルギー転換を、より公平で包摂的な世界を築くための戦略的手段ともしなければならない。今後開催される第 28 回国連気候変動枠組条約(UNFCCC)締約国会議(COP28)とグローバル・ストックテイクでは、1.5°C への道すじからの乖離状況を確認するだけでなく、軌道に戻るための戦略的で詳細な計画を提示しなければならない。この重要な気候行動の節目を迎えた後に我々の集団的行動を形成するうえで、『世界エネルギー転換展望』が重要な見解を提供できるものと確信している。





フランチェスコ・ラ・カメラ

IRENA 事務局長

目次

第1巻

図一覧 08
表一覧 10
ボックス一覧 11
略語一覧 12

要約 14
はじめに 26

参考文献 166

01

第 1 章

1.5°C 気候への道すじと
エネルギー転換に向けた進展状況

第1章の要点 29

1.1 世界のエネルギーシステムの転換 30

1.2 1.5°C シナリオ：グローバルな視点 33

1.3 各国が決定する貢献(NDCs)およびその他の約束の改訂が1.5°C シナリオに及ぼす影響 42

1.4 エネルギー危機およびそのエネルギー転換への影響 47

1.5 結論 51



02

第 2 章
部門別の転換の道すじと支援政策

第2章の要点 53

2.1 はじめに 56

2.2 電力部門 56

2.3 新興燃料：クリーン水素およびその派生物 76

2.4 バイオエネルギーの供給および消費 84

2.5 産業部門 92

2.6 家庭・業務部門 108

2.7 運輸部門 117

2.8 結論 129

03

第 3 章
投資ニーズ、資金調達、実現支援政策の枠組み

第3章の要点 131

3.1 はじめに 133

3.2 エネルギー転換を加速する投資 133

3.3 再生可能エネルギー投資と再生可能エネルギー政策 143

3.4 公正かつ包摂的なエネルギー転換のために公的資金と政策が果たす役割 156



図一覧

第1巻

図 S1 エネルギー転換の主な障壁とソリューション 21

図 1.1 1.5°C シナリオでは、発電電力量を 2050 年までに 3 倍以上に拡大する必要がある..... 35

図 1.2 1.5°C シナリオにおける 2020 年と 2050 年の総最終エネルギー消費量の
エネルギーキャリア別構成..... 36

図 1.3 1.5°C シナリオにおける 2020～2050 年の一次エネルギー総供給量の
エネルギーキャリア別構成..... 37

図 1.4 現行計画シナリオおよび 1.5°C シナリオにおける 2023～2050 年の
世界の CO_2 排出量の動向予測..... 39

図 1.5 1.5°C シナリオによる 2050 年における二酸化炭素排出量の削減..... 40

図 1.6 COP 宣言と 1.5°C シナリオに基づく CO_2 排出量の道すじ..... 43

図 2.1 2002～2022 年における発電設備容量の年間増加量..... 57

図 2.2 2020～2021 年における発電方式別の世界加重平均均等化発電原価の変化..... 59

図 2.3 世界の電源構成とエネルギー源別発電設備容量：
2020 年、2030 年、2050 年における現行計画シナリオ(PES)と 1.5°C シナリオ..... 63

図 2.4 1.5°C シナリオを実現するために 2030 年と 2050 年までに必要な
世界の総設備容量の増加..... 67

図 2.5 1.5°C シナリオにおける 2020 年、2030 年、2050 年における世界のクリーン水素供給量..... 77

図 2.6 G7 加盟国に向けた提案..... 83

図 2.7 現行計画シナリオと 1.5°C シナリオにおける 2020 年、2030 年、2050 年の
エネルギーキャリア別一次バイオエネルギー供給量..... 84

図 2.8 現行計画シナリオと 1.5°C シナリオにおける 2020 年、2030 年、2050 年の
バイオエネルギーの部門別最終エネルギー消費量..... 86

図 2.9 持続可能なバイオエネルギー開発のための政策枠組み 90
図 2.10 産業部門：現行計画シナリオおよび 1.5°C シナリオにおける
2020 年、2030 年、2050 年の最終消費量と対応する排出量 93
図 2.11 産業部門で用いられる温度の範囲と技術 102
図 2.12 家庭・業務部門：現行計画シナリオと 1.5°C シナリオにおける
2020 年、2030 年、2050 年の最終エネルギー消費量と対応する排出量 108
図 2.13 EU21 カ国における 2014～2022 年のヒートポンプ販売数 112
図 2.14 運輸部門：現行計画シナリオと 1.5°C シナリオにおける
2020 年、2030 年、2050 年の最終エネルギー消費量と対応する排出量 118
図 2.15 輸送戦略を強化する施策 124

図 3.1 世界の投資額と技術別構成：2023～2050 年の現行計画シナリオと 1.5°C シナリオ 134
図 3.2 2015～2022 年におけるエネルギー転換技術への世界の投資額 145
図 3.3 2013～2022 年における再生可能エネルギーへの世界の年間拠出額の技術別内訳 146
図 3.4 2013～2022 年における再生可能エネルギーへの世界の年間投資額の用途別内訳 148
図 3.5 2013～2022 年における再生可能エネルギー投資の投資先地域別内訳 149
図 3.6 2013～2022 年における世界の再生可能エネルギー投資の資金調達手段別内訳 151
図 3.7 2013～2020 年における再生可能エネルギー投資の地域および
投資タイプ（デット、エクイティ）別内訳 152
図 3.8 2013～2020 年に DFI が助成金および低コスト融資として提供した資金 153
図 3.9 2000～2020 年におけるアフリカと世界の再生可能エネルギー投資の累積額 154
図 3.10 2013～2021 年におけるオフグリッド再生可能エネルギーへの年間拠出額の
世界比率の資金調達手段別内訳 159
図 3.11 公正かつ包摂的なエネルギー転換を促す公的資金の流れ 162

表一覧

第1巻

表 S1 1.5°C シナリオ達成に向けた主要なエネルギーシステム構成要素の進捗状況 16

表 1.1 1.5°C シナリオおよび現行計画シナリオにおける
2030 年と 2050 年の主要業績指標の比較 34

表 1.2 エネルギー転換を加速する主要対策 49

表 2.1 電力部門の主要業績指標：
2030 年と 2050 年における現行計画シナリオと 1.5°C シナリオ 65

表 2.2 クリーン水素および派生物の主要業績指標：
2030 年と 2050 年における現行計画シナリオと 1.5°C シナリオ 79

表 2.3 バイオエネルギーの供給と消費に関する主要業績指標：
2030 年と 2050 年における現行計画シナリオと 1.5°C シナリオ 88

表 2.4 産業部門の主要業績指標：
2030 年と 2050 年における現行計画シナリオと 1.5°C シナリオ 94

表 2.5 家庭・業務部門の主要業績指標：
2030 年と 2050 年における現行計画シナリオと 1.5°C シナリオ 111

表 2.6 運輸部門の主要業績指標：
2030 年と 2050 年における現行計画シナリオと 1.5°C シナリオ 121

表 3.1 現行計画シナリオおよび 1.5°C シナリオにおいて
2023～2050 年に必要な年間投資額 136

ボックス一覧

ボックス 1.1 エネルギー転換の主要な柱 31
ボックス 1.2 IRENA の地域研究 41
ボックス 1.3 パリ協定のグローバル・ストックテイク 44
ボックス 1.4 長期エネルギーシナリオ(LTES)と長期低排出発展戦略(LT-LEDS)の整合状況の分析から得られた知見 46

ボックス 2.1 柔軟性と国際電力取引の重要性 69
ボックス 2.2 洋上風力発電の許認可プロセス加速を実現する措置 72
ボックス 2.3 再生可能エネルギー時代の電力部門 – 組織構造の構築 75
ボックス 2.4 水素導入を加速するための推奨事項 82
ボックス 2.5 鉄鋼分野の脱炭素化に向けた転換を加速する：ブレークスルー・アジェンダ報告書が示す主要施策 98
ボックス 2.6 産業部門の加熱工程を脱炭素化する新技術 102
ボックス 2.7 循環経済と産業部門の脱炭素化 106
ボックス 2.8 建物における温熱・冷熱供給の電化 112
ボックス 2.9 電気モビリティ分野の新興技術 123
ボックス 2.10 道路輸送分野の「回避・転換・改善」戦略 124

ボックス 3.1 地域別および資金源別のアフリカへの再生可能エネルギー投資 154
ボックス 3.2 途上国におけるオフグリッド再生可能エネルギー投資 159
ボックス 3.3 短期投資の優先事項（2030 年まで） 163
ボックス 3.4 IRENA 投資フォーラム 165

略語一覧

ASEAN	東南アジア諸国連合
BECCS	二酸化炭素回収・貯留を組み合わせたバイオエネルギー
BF	溶鉱炉
BOF	塩基性酸素転炉
CAGR	年平均成長率
CCS	二酸化炭素回収・貯留
CCU	二酸化炭素回収・有効利用
CCUS	二酸化炭素回収・有効利用・貯留
CFOR	Collaborative Framework for Offshore Wind
CNY	中国元
COP	国連気候変動枠組条約締約国会議
CO_2	二酸化炭素
CSP	集光型太陽熱発電
DC	直流
DFI	開発金融機関
eCF	電気分解炉
EEA	欧州経済圏
EJ	エクサジュール
EU	欧州連合
EUR	ユーロ(通貨)
EV	電気自動車
FiT	固定価格買取制度
GBP	英国ポンド
GCF	緑の気候基金
GHG	温室効果ガス
GIZ	ドイツ国際協力公社
GLAD	世界ライフサイクルアセスメント・データアクセス
GOWA	世界洋上風力連合
Gt	ギガトン
GW	ギガワット
GWEC	世界風力エネルギー協会
HVAC	暖房・換気・空調
IATA	国際航空運送協会
ICAO	国際民間航空機関
ICE	内燃機関
IDDI	産業高度脱炭素化イニシアティブ
IEA	国際エネルギー機関
ILO	国際労働機関
IMO	国際海事機関
IPCC	気候変動に関する政府間パネル
IRENA	国際再生可能エネルギー機関
JETP	公正なエネルギー転換パートナーシップ
KPI	主要業績指標
LCOE	均等化発電原価
LNG	液化天然ガス
LTES	長期エネルギーシナリオ
LT-LEDS	長期低排出発展戦略
MEPS	最低エネルギー消費効率基準
NDC	国が決定する貢献
NGO	非政府組織
OECD	経済協力開発機構
PES	現行計画シナリオ
PJ	ペタジュール
PPA	電力購入契約
PV	太陽電池
PWh	ペタワット時
RD&D	研究・開発・実証
SDG	持続可能な開発目標
SIDS	小島嶼開発途上国
SOE	国有企業
SOFI	国有金融機関
TFEC	総最終エネルギー消費量
TPES	一次エネルギー総供給量
TW	テラワット
UAE	アラブ首長国連合
UK	英国
UN	国際連合
US	米国
USD	米ドル
VRE	変動性再生可能エネルギー
WEF	世界経済フォーラム
ZEV	ゼロ排出車

世界エネルギー転換展望 2023

『世界エネルギー転換展望』は、エネルギー情勢を転換するための見通しを概説するもので、パリ協定の目標を反映している。また、地球の気温上昇を 1.5°C に抑え、21 世紀半ばまでに CO_2 排出量をネットゼロにするための道すじを提示する。
本報告書は、1.5°C の気候目標達成に向けた世界の進展をとらえるために IRENA が作成した二つの主要なシナリオに基づいている。

現行計画シナリオ

現行計画シナリオは、本研究の主たる参照ケースであり、G20 加盟国に重点を置いて、本分析時点で施行されていた各国政府の現行のエネルギー計画と他の計画目標および政策に基づいたエネルギーシステムの情勢の見通しを提供するものである。

1.5°C シナリオ

1.5°C シナリオは、今世紀末までの地球の平均気温の上昇を産業革命前の水準と比較して 1.5°C に抑えるという「1.5°C 気候目標」に沿ったエネルギー転換の道すじを記述するものである。このシナリオでは、直ちに利用可能で、1.5°C 目標を達成するために規模を拡大することができる技術ソリューションを優先している。



要約



エネルギー転換は、目標の道すじから外れている。新型コロナウイルス(COVID-19)流行の余波とウクライナ危機の波及効果により、エネルギー転換が直面している問題はいっそう悪化している。危機はこれ以上ないほど迫っており、地球の気温が 0.1°C 上昇するごとに、自然環境や人間の社会・経済に重大かつ広範な影響を及ぼすおそれがある。

地球の気温上昇を 1.5°C 以内に抑えるには、二酸化炭素(CO_2)排出量を 2022 年の水準から約 37 Gt 削減し、2050 年までにエネルギー部門からの排出量をネットゼロにする必要がある。多少の進展はあるものの、エネルギー転換技術の現在の導入状況と、今世紀末の地球の気温上昇を産業革命前の水準から 1.5°C 以内に抑えるというパリ協定の目標を達成するために必要なレベルとの間には、依然として大きなギャップがある。1.5°C 目標と調和した道すじを実現するには、社会におけるエネルギーの消費や生産のあり方を全面的に転換する必要がある。

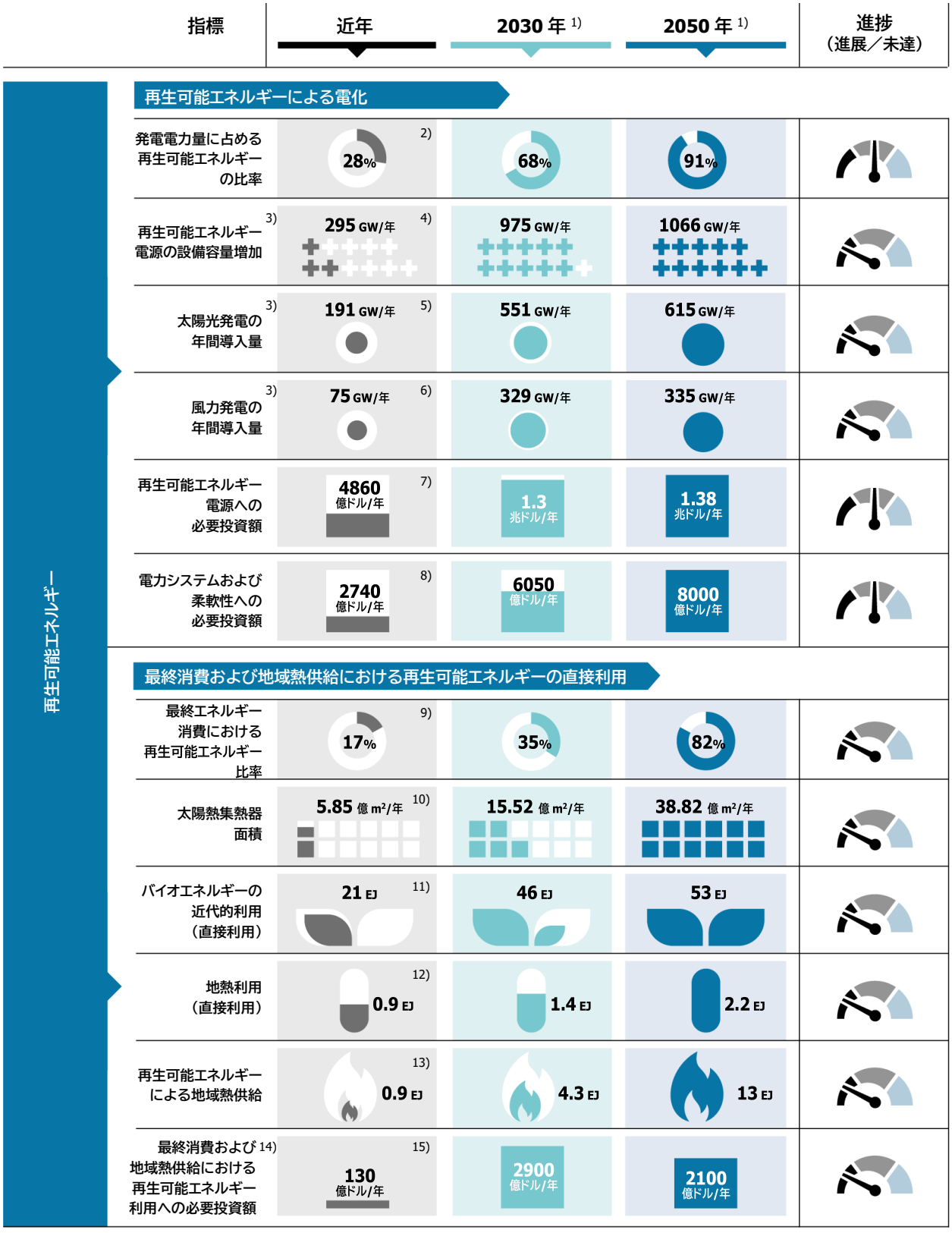
現行の約束や計画は IRENA が作成した 1.5°C の道すじには遠く及ばず、2050 年の排出ギャップは 16 Gt に上ると予想される。各国が決定する貢献(NDCs)、長期的な温室効果ガスの低排出型の発展のための戦略(LT-LEDS)、各国のネットゼロ目標のすべてが完全に実現すれば、2022 年の水準と比較して CO_2 排出量を 2030 年までに 6%、2050 年までに 56%削減することができる。しかし、ほとんどの気候変動に関する約束はまだ詳細な国家戦略や国家計画に反映されても(すなわち政策や規制を通して実施されても)、十分な資金を充てられてもいない。IRENA の現行計画シナリオ(Planned Energy Scenario)によれば、エネルギー関連の排出ギャップは 2050 年に 34 Gt に達すると予想されており、転換を加速する包括的措置の喫緊の必要性が浮き彫りになっている。

1.5°C の道すじに沿って進むためには、再生可能エネルギー電源を年間約 1,000 GW 導入する必要がある。2022 年、再生可能エネルギー電源の設備容量は世界で約 300 GW 増加し、新規設備容量全体の 83%を占めた。これに対し、化石燃料発電と原子力発電の新規設備容量を合わせた割合は 17%だった。再生可能エネルギーは、導入量も導入率も大幅に拡大する必要がある。それは技術的に実現可能であり、経済的にも存続可能である。

政策や投資は、一貫して正しい方向に進んでいるわけではない。2022 年は再生可能エネルギー電源の設備容量の増加が過去最大となったが、その一方で、多くの国の政府がエネルギー価格高騰による消費者や企業への打撃を緩和しようとしたため、化石燃料補助金も過去最高となった。エネルギー転換技術全体への世界の投資額は、2022 年に過去最高の 1 兆 3,000 億ドルに達したが、化石燃料への設備投資額は、再生可能エネルギーへの投資額のほぼ 2 倍だった。気候変動抑制目標を達成するため、また、エネルギー安全保障目標や安価なエネルギー供給目標を達成するためには、再生可能エネルギーとエネルギー効率化が最も有効な戦略である。そのため、各国政府は投資が正しい軌道に乗るよういっそうの努力を行う必要がある。

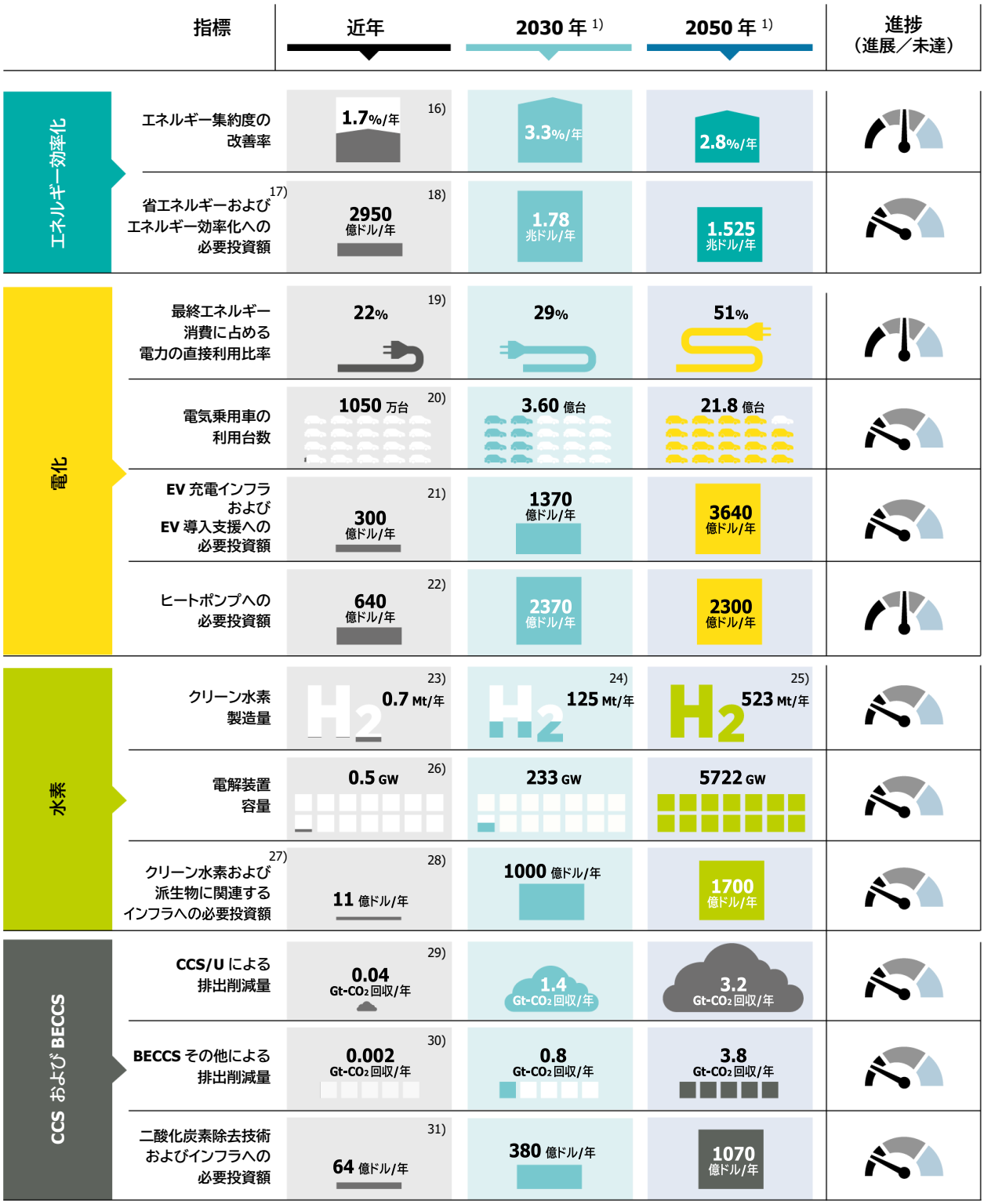
現実に達成されたことと求められることのギャップが、年々広がり続けている。IRENA のエネルギー転換指標(表 S1)を見ると、運輸部門や熱供給部門における最終消費の電化(エレクトリフィケーション)拡大から、再生可能エネルギーの直接利用、エネルギー効率化、インフラ増強まで、エネルギー部門やエネルギー技術全般にわたる大幅な加速が必要であることが分かる。遅延すれば、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が 1.5°C 目標達成に向けて定めた 2030 年および 2050 年までの排出削減水準を満たすというただでさえ難しい課題が、いっそう困難になるばかりである(IPCC, 2022a)。また、このような進捗の遅れは、将来必要となる投資額や悪化する気候変動の影響によるコストの増大にもつながる。

表 S1　1.5°C シナリオ達成に向けた主要なエネルギーシステム構成要素の進捗状況



▸続く

(続き)表 S1　1.5°C シナリオ達成に向けた主要なエネルギーシステム構成要素の進捗状況



▸注は次ページ参照

表 S1 注: [1] 2023～2030 年および 2023～2050 年の期間に 1.5°C 目標を達成するために必要な平均年間投資額を、2030 年と 2050 年それぞれの投資額の欄に示す。近年の投資額は全て現行米ドルで表記しており、指標に用いた近年の具体的な年次は以下の通り。[2] 2020 年。[3] 2030 年と 2050 年の設備容量純増分には、老朽ユニットの交換を含まない。[4] 2022 年。[5] 2022 年。[6] 2022 年。[7] 2022 年。[8] 2022 年。[9] 2020 年。[10] 2021 年。[11] 2020 年 - 非エネルギー利用は含まない。[12] 2020 年。[13] 2020 年。[14] 最終消費、地域熱供給、バイオ燃料およびバイオ由来の革新的燃料への再生可能エネルギー利用に必要な将来の投資額。[15] 2022 年。[16] 近年の値は 2010～2020 年の平均。[17] 省エネルギーおよびエネルギー効率化への将来投資額は、バイオ由来プラスチックおよび有機材料、ケミカルおよびメカニカルリサイクル、エネルギー回収への投資を含む。[18] 2021 年。[19] 2020 年。[20] 2022 年。[21] 2022 年。[22] 2022 年。[23] 2021 年。[24] グリーン水素の比率は 2030 年に 40%。[25] グリーン水素の比率は 2050 年に 94%。[26] 2022 年。[27] 電解装置、インフラ、H_2 ステーション、燃料補給施設、長期貯蔵に必要な将来投資額。[28] 2022 年。[29] 天然ガス精製、水素、その他の燃料供給、電力および熱供給、産業、稼働中の直接空気回収設備による CO_2 回収を含む、2022 年。[30] 現在の総回収量は燃料供給にかかるもの、2022 年。[31] 2022 年。
CCS/U = 二酸化炭素回収・貯留／有効利用、BECCS =二酸化炭素回収・貯留を組み合わせたバイオエネルギー、EV = 電気自動車、m^2 = 平方メートル、EJ = エクサジュール、Gt = ギガトン



IRENA の 1.5°C シナリオでは、世界のエネルギー構成に占める再生可能エネルギーの比率は、2020 年の 16%から 2050 年までに 77%に増加する。エネルギー効率の向上や再生可能エネルギーの導入拡大により、一次エネルギー総供給量は現在の水準を保つ。再生可能エネルギーは全ての最終消費部門にわたって拡大するが、運輸部門や家庭・業務部門などで高い電化率を達成するためには、2050 年までに再生可能エネルギー電源の設備容量を 2020 年の水準の 12 倍に拡大する必要がある。1.5°C シナリオでは、世界の再生可能エネルギー電源の設備容量は、2023 年から 2050 年にかけて、年平均 1,066 GW のペースで増加させる必要がある。

1.5°C シナリオでは、電力は最大のエネルギーキャリアとなり、2050 年には最終エネルギー消費量の 50%以上を占める。再生可能エネルギーの導入、エネルギー効率の向上、最終消費部門の電化がこの移行に貢献する。また、近代的バイオマスと水素もこれまで以上に重要な役割を果たし、2050 年までに最終エネルギー消費量のそれぞれ 16%と 14%を占めるようになる。

1.5°C シナリオでは、2050 年までに水素の 94%が再生可能エネルギー由来のものになる。水素は、最終消費部門の脱炭素化と電力システムへの柔軟性供給に重要な役割を果たす。1.5°Cシナリオでは、エネルギー効率の向上、再生可能エネルギーの導入、行動や消費パターンの変化により、最終エネルギー消費量が 2020 年から 2050 年までの間に 6%減少すると想定されている。

根強い投資ギャップ

2050 年までに 1.5°C 目標を実現するためには、累計 150 兆ドル、年間平均 5 兆ドル以上の投資が必要である。エネルギー転換技術全体への世界の投資額は 2022 年に過去最高の 1 兆 3,000 億ドルに達したが、1.5°C の道すじに沿って進むためには年間投資額を 4 倍以上に増やす必要がある。現行計画シナリオでは累計 103 兆ドルの投資が必要であるのに対し、1.5°C の道すじに沿って進むためには 2050 年までにさらに累計 47 兆ドルの追加投資が必要である。したがって、現行計画シナリオで現在想定されている化石燃料技術への年間約 1 兆ドルの投資を、エネルギー転換技術および関連インフラに振り替えなければならない。

再生可能エネルギー投資は限られた数の国々に集中し、少数の技術のみに重点が置かれている。再生可能エネルギー（電力と最終消費のいずれも含む）への投資は 2022 年に 5,000 億ドルに達した(IRENA and CPI, 2023)。しかし、これは、1.5°C シナリオで必要とされる再生可能エネルギーへの年間平均投資額の約 3 分の 1 である。さらに、2022 年に世界の再生可能エネルギー投資の 85%による便益を享受したのは世界人口の 50%に満たず、設備容量増加分に占めるアフリカの比率はわずか 1%だった(IRENA, 2023a; IRENA and CPI, 2023)。2021 年におけるオフグリッド再生可能エネルギーソリューションへの投資は 5 億ドルで、2030 年までに毎年必要な 150 億ドルをはるかに下回った(IRENA and CPI, 2023)。多くの技術的選択肢が存在するものの、ほとんどの投資は太陽光発電と風力発電に集中しており、投資額全体の 95%がこれらの技術に向けられた(IRENA and CPI, 2023)。バイオ燃料、水力発電、地熱エネルギーといった他のエネルギー転換技術、また、電力部門以外で最終エネルギー消費量に占める再生可能エネルギー比率が比較的低い部門（熱供給部門、運輸部門など）に、より多くの資金を流入させる必要がある。

2013～2020 年における世界の再生可能エネルギー投資の約 75%は、民間部門によるものだった。しかし民間資本は、それが現実のものであれ認識上のものであれ、関連リスクが最も低い技術や国に流入する傾向がある。2020 年における太陽光発電への投資の 83%が民間資金によるものだったが、地熱エネルギーと水力発電への投資は主に公的資金に依存しており、2020 年における両技術への投資に占める民間投資家の割合はそれぞれ 32%と 3%のみだった(IRENA and CPI, 2023)。より公平な形で投資を国や技術に誘導するためには、公共部門のより強力な介入が必要である。

公的資金や公共政策は民間資本を呼び込むことが望ましいが、投資の地理的・技術的多様性を高めるためには公的寄与の目標を明確にし、規模を拡大する必要がある。長年にわたり、政策の重点は民間資本を動員することにあった。開発途上国における基本的なエネルギーインフラへの投資、および成熟度の低い技術(特に熱供給や運輸などの最終消費や合成燃料製造)や民間投資家が冒険することがほとんどない分野の開発を促進するために、公的資金提供が緊急に必要である。そうでなければ、グローバルノースとグローバルサウスの投資格差は広がり続けると考えられる。

転換を妨げる障壁を乗り越える

政策立案者は、気候に影響をおよぼさないシステムを促進するより包摂的でレジリエンス(強靭性)のある能動的なエネルギー転換戦略と受動的対策との間で、適正なバランスを取る必要がある。現在の危機をもたらした根本原因のいくつかは、化石燃料に基づくエネルギーシステムに起因している。限られた数の燃料輸出国への過度の依存、非効率的で無駄の多いエネルギー生産と消費、環境や社会への悪影響の軽視などがその例である。再生可能エネルギーに基づくエネルギー転換によって、こういった原因の多くを削減あるいは除去することができる。したがって、国家レベルのエネルギー安全保障や経済的・社会的レジリエンスの度合いを決定し、世界中で人間の福祉を向上させる機会をもたらすのは、変化のスピードであると考えられる。

世界中で前進を加速するためには、化石燃料時代に合わせて構築された構造やシステムから脱却する必要がある。エネルギー転換は、より平等で包摂的な世界を積極的に形作るツールとなり得る。つまり、インフラ、政策、労働力、制度全般において、前進を妨げ、包摂的な世界の構築を阻害する既存の障壁を克服するということである(図 S2)。

短期間のうちに、より多くを実現することが可能である。エネルギー転換に時間がかかることは間違いないが、現在利用可能な技術的選択肢の多くを導入する余地は大いにある。これらのソリューションの導入が増加傾向にあることは、それが技術的・経済的に妥当であることを示している。しかし、導入を加速し、気候目標や開発目標の実現に必要な体系的かつ構造的な改革を促すためには、全ての部門に亘る包括的政策が必要である。

図 S1 エネルギー転換の主な障壁とソリューション



障壁

- エネルギー貯蔵インフラ、系統連系インフラなど、**再生可能エネルギーを市場に接続するインフラが不十分。**
- 電力、ガス、燃料の**供給インフラの即応性が不足。**
- 再生可能エネルギーへの切り替えに対し、**最終消費部門の設備が準備不足。**

- **政策や規制の枠組みが依然として化石燃料を中心に策定されており**、エネルギー転換を支援する公的資金提供が不十分。
- **エネルギーの生産と消費に関する統合的計画立案の欠如。**
- 存続可能なサプライチェーンを実現する産業政策の欠如など、**社会経済的側面の考慮が不十分。**

- **化石燃料関連雇用の減少と再生可能エネルギー関連雇用の増加の不均衡**（技能関連、部門、場所、時間の不均衡）。
- 教育・訓練機会の不足、女性・若者・マイノリティの機会不均等、リスキリングやスキルアップのニーズの不充足による、**技能ギャップ**。また、機会への認識不足もある。
- 賃金、労働安全衛生、全体的な労働条件など、**雇用の質の問題。**

ソリューション

再生可能エネルギーの開発、貯蔵、配電、送電、消費を促進する陸上および洋上の支援インフラを、先を見越して計画、現代化、拡張する。

インフラは、新たな需給ダイナミクスに即した国家、地域、グローバル戦略を後押しすることが望ましい。

再生可能エネルギーの導入、統合、取引を促進し、社会経済面・環境面の成果を改善し、公平性および包摂性を促進する政策および規制の枠組みを策定する。

これらの枠組みは、ローカルからグローバルまでさまざまな規模においてエネルギー転換を可能にし、新たな需給ダイナミクスを反映する必要がある。

エネルギー転換を促進し、持続させるために必要な技能や知識を獲得するため、制度、コミュニティ、個人の意識と能力を高める。

これには、教育機関と産業との調整も含まれる。制度、社会的対話、集団交渉の強化は、より大きな社会経済的便益をもたらすために役立つこととなる。

世界のエネルギーシステムの大規模かつ体系的な変革が30年以内に起こらなければならない



2023 年の国連気候変動会議(COP28)では、グローバル・ストックテイクが、2030 年までに既存のエネルギー転換策の導入を拡大する触媒の役割を果たさねばならない[訳注 1]。計画立案においては革新技術や追加的政策措置を取り入れる余地を作る必要があるが、既存ソリューションの大幅な拡大が何より重要である。例えば、エネルギー効率化や再生可能エネルギーによる電化の推進は、電力部門、さらには運輸部門と家庭・業務部門にとって、コスト効率の高い方法である。クリーン水素とその派生物や持続可能なバイオマスソリューションも、最終消費におけるさまざまなソリューションを提供する。

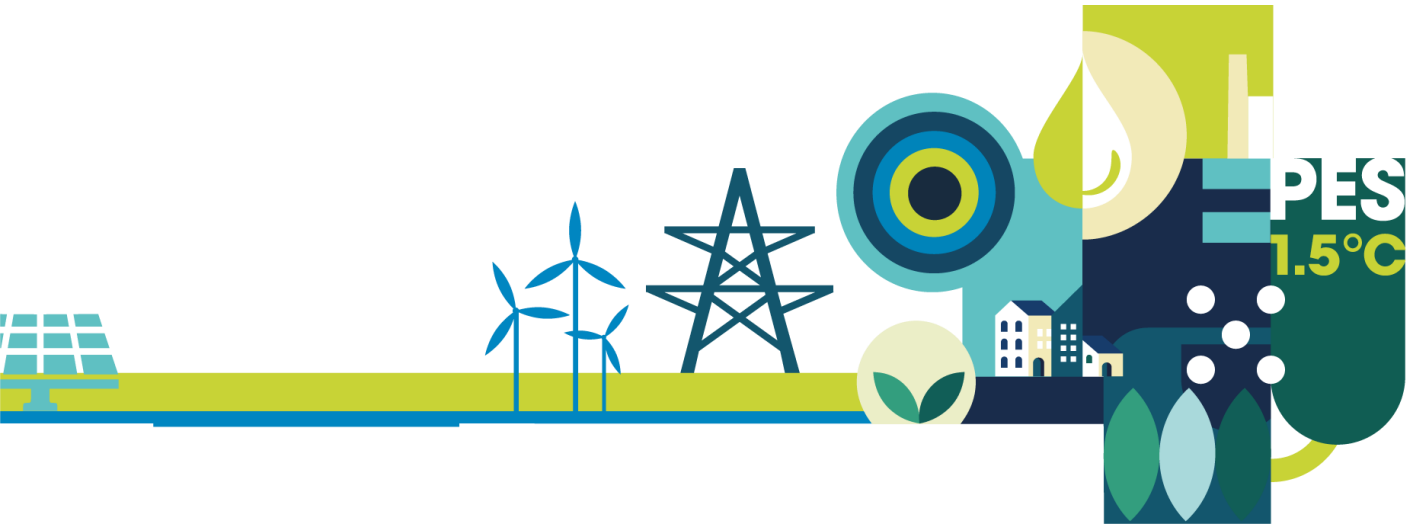
気候変動を抑制し、2030 年アジェンダに定める持続可能な開発目標を達成するためには、COP28 後の期間が極めて重要である。エネルギー転換は、経済・社会・環境面の優先事項を実現するために欠かすことはできない。エネルギー転換を意図された通りに軌道修正するためには、政府や金融機関や民間企業が緊急にその目標、戦略、実施計画を再検討する必要がある。

再生可能エネルギーに基づくエネルギーシステムの構造を開発する

世界のエネルギーシステムの大規模かつ体系的な変革が、30 年以内に達成されなければならない。このように短い期間しかない場合、戦略的転換が必要である。それは、エネルギー供給とエネルギー消費の脱炭素化に重点を置くだけに留まらない。二酸化炭素排出量を削減することだけでなく、包摂的でレジリエンスのある世界経済を支えるエネルギーシステムを設計することを目指す転換である。その結果、計画立案にあたっては、国境や燃料という狭い領域を超え、新たなエネルギーシステムとそれが支える経済の要求に目を向ける必要が生じる。

再生可能エネルギー中心のシステムを実現する手法に重点を置くことは、エネルギー転換の前進を妨げる構造的障壁への対処に役立つ。燃料や部門ごとの排出削減対策の追求は必要だが、再生可能エネルギー中心のエネルギーシステムに移行するには不十分である。エネルギーの生産や輸送から石炭、石油、ガスの精製に至るまで、世界のエネルギーインフラに変化が必要になる。これは、発電、工業生産、製造、さらには鉄道、パイプライン、造船所、その他の化石燃料供給手段にも影響を与える。システムの設計にいっそうの重点を置くことは、新たなエネルギーインフラの開発を加速し、継続的に導入するために役立つこととなる。

訳注 1　原文は COP28 開催前の 2023 年 6 月に公表された。2023 年 12 月には、COP28 において、グローバルストックテイクに関する文書が合意された。https://unfccc.int/documents/636584



各国政府は、再生可能エネルギーに基づくエネルギーシステムを積極的に構築し、現在の構造の欠陥や非効率性を克服することで、より効果的に成果に影響を及ぼすことができる。物理的、政策的、制度的構造を並行して積極的に形成することが、開発目標や気候目標を達成し、よりレジリエンスのある公平な世界を実現するために不可欠となる。こういった土台は、エネルギー転換を支える構造の支柱となるべきものである。

物理的にインフラを改良、近代化、拡張することによって、多様で相互接続されたエネルギーシステムのレジリエンスを高め、柔軟性を強化することができる。送電および配電は、多くの再生可能燃料が持つ高い局在性と分散性の両者に適応するとともに、多様な取引経路にも対応する必要がある。電力取引を可能にする連系線や水素およびその派生物を運搬する航路を計画する際は、極めてさまざまな世界の情勢を考慮に入れながら、エネルギーシステムの多様性とレジリエンスを促進するために積極的に国同士を結び付けなければならない。貯蔵技術のソリューションは、地理経済的影響を念頭に置いた上で設計し、広く普及させる必要がある。また、社会受容性は大規模事業にとって極めて重要であり、プロジェクトの透明性向上やコミュニティの意見表明機会を通じて実現することができる。

政策や規制に関連する実現手法は、一貫してエネルギー転換の促進と化石燃料の役割縮小を優先する必要がある。現在もなお、基本的な政策や規制制度は化石燃料を中心として作られている。当面の間、化石燃料がエネルギーミックスの一部を構成し続けることは避けられないが、21 世紀半ばにかけてその比率を大幅に減らさなければならない。したがって、政策枠組みや市場はエネルギー転換に重点を置き、包摂的でレジリエンスのあるシステムに不可欠な土台を提供することが望ましい。

熟練した労働力は、エネルギー転換を成功させる要となる。IRENA と国際労働機関(ILO)の共同研究では、再生可能エネルギー部門で雇用されている世界の労働者数は 2022 年に約 1,270 万人となり、2012 年の約 730 万人から増加したことが示されている。エネルギー転換モデルによれば、投資増加や設備容量拡大により、今後数十年間で何千万もの新たな雇用が創出されると見込まれる。幅広い職種の労働者が必要とされる。これらの雇用を確保するためには、教育と技能構築のための協調した行動が必要である。職業訓練であれ大学課程であれ、教育部門が提供する内容と産業界で将来必要となる能力を一致させるために、政府は極めて重要な調整役を務める。再生可能エネルギー部門に人材を誘致するためには、それが十分に良い仕事であることと、女性や若者やマイノリティの人々が職業訓練、求人ネットワーク、キャリア機会に平等にアクセスできることが不可欠である。

将来に向けて：大胆かつ変革的な行動を優先する

エネルギー転換において必要な軌道修正を達成するためには、現在の状況の緊急性を反映した大胆かつ変革的な対策が必要となる。実現支援インフラへの投資と密接に連携して、再生可能エネルギーの大幅な拡大を行う必要がある。導入を促進するだけでなく、エネルギー転換によって幅広い社会経済的便益がもたらされるようにする、包括的な政策が必要である。

ネットゼロ誓約を法律に組み込むとともに、十分な資源に裏付けられた実施計画につなげなければならない。この不可欠な段階を踏まなければ、気候宣言は願望のまま終わり、必要な前進を達成することはできない。現行のエネルギーシステムは、数世紀かけて発展してきた社会経済構造に密接に組み込まれている。それはつまり、パリ協定の目標を達成するためには、30 年以内という短い期間内に大きな構造的変化が起こらなければならないことを意味する。

今日におけるエネルギーインフラに関する全ての投資決定や計画決定は、将来の低炭素経済の構造や地理を考慮に入れることが望ましい。エネルギーインフラは寿命が長いため、固定インフラに投資する際は長期的な視点で検討を行うことが望ましい。最終消費の電化は、需要のあり方に変化をもたらす。再生可能エネルギー電源を拡大するには、既存インフラを近代化し、陸上と洋上の両方で電力システムの増強および拡張を行う必要がある。グリーン水素製造は、現在の油田やガス田以外の場所でも行われるようになる。インフラの再設計にあたっては、技術的課題や経済的コストを考慮し、環境面や社会面の問題に当初から取り組むことが望ましい。

公正かつ包摂的なエネルギー転換は、何億人もの生活の質に影響を及ぼしている深刻な格差を克服するために役立つことになる。エネルギー転換政策は、より広範な体系的変化と足並みを揃えなければならない。その変化とは、人間のウェルビーイング（社会的、経済的、環境的なよい状態）を守り、国やコミュニティ間の公平を推進し、気候やより広範な環境や資源の制約に配慮したグローバル経済を実現することを目指すものである。

途上国がエネルギー転換を加速できるよう支援することによって、エネルギー安全保障を強化するとともに、脱炭素化をめぐる世界の分断が広がるのを防ぐことができる可能性がある。エネルギー市場の多様性を高めることによって、サプライチェーンリスクを低減し、エネルギー安全保障を強化し、一次産品生産者のための価値創出を現地で行うことができる。技術、訓練、能力形成、手頃な資金調達へのアクセスは、各国がグローバルなエネルギー転換に活用できる潜在力を十分に発揮するために不可欠である。特に、再生可能エネルギー資源や関連資源が豊富な国々についてそれが言える。

人間の福祉と安全保障をエネルギー転換の中心に置かなければならない。人間の福祉と安全保障、さらには根強い不平等に関連して蔓延する問題を克服するためには、エネルギー部門を超えた体系的変化が必要である。再生可能エネルギーを基本とするエネルギー転換は、これらの問題の根底にある状況の一部を軽減するために役立つ。これらの広範な課題の解決に貢献するほど、エネルギー転換は人々によって受け入れられ、その正当性が高まる。ただし、エネルギー転換計画にコミュニティの要求と利益が反映され、盛り込まれている必要がある。

国際協力を見直す

エネルギー部門と地政学的情勢の動向を考えると、国際協力の妥当性、影響力、機敏性を確保するためには、国際協力のあり方や手段や方法論をより大きく再考する必要がある。エネルギー転換を成功させるためには、国際協力をいっそう強化し、見直す必要がある。エネルギーが国際開発や気候アジェンダの中心であることは疑う余地がない。近年では、エネルギーに関する国際協力が飛躍的に増加している。このような協力はエネルギー転換の成果を左右する決定的な役割を果たすとともに、いっそうのレジリエンス、包摂性、公平性を達成するための極めて重要な手段となる。

エネルギー転換に関与する行動主体の多様化が進んでいるため、それぞれの強みを生かし、限られた公共資源を効率的に配分するためには、役割の評価を行う必要がある。開発と気候変動に対する行動の必要性、さらにはエネルギー需給ダイナミクスの変化を考えると、優先度の高い行動には一貫性と整合性を持たせる必要がある。例えばエネルギー商品の国際取引やグローバル取引を行うシステムへの投資には、かつてない規模の国際協力が必要になる。したがって、国家機関および地域機関、国際組織、国際金融機関および多国間開発銀行の役割や責任を再検討し、それぞれがエネルギー転換に最適の貢献をできるようにすることが不可欠である。

エネルギー転換を実現するためには、グローバルサウスに資金を振り向ける集団的努力が必要とある。2020 年における再生可能エネルギーへの投資額全体のうち、開発金融機関(DFI)による多国間および二国間の投資は 3%に満たなかった。今後これらの金融機関は、より多くの資金を、より良い条件で、大規模なエネルギー転換プロジェクトに提供する必要がある。また、開発金融機関からの資金は主に市場金利での融資（市場利率で課せられる利息とともに返済する必要がある）であり、補助金や譲許的融資は再生可能エネルギーへの資金提供全体のわずか 1%である(IRENA and CPI, 2023)。これらの金融機関は、世界のエネルギー転換を大幅に加速させうる大規模な越境プロジェクトを支援できる独自の立場にある。



はじめに



『世界エネルギー転換展望』2022 年版が発行されて以来、この 1 年は意思決定者にとって厳しい 1 年だった。世界が今なおパンデミックの経済的影響に揺れる中、ウクライナにおける事象の影響は過去数十年間で最悪のエネルギー危機にまで発展している。同時に、世界の気候関連非常事態の規模は、これまで以上に明白になっている。欧州を見舞った前例のない熱波、パキスタンで起きた大規模な洪水、「アフリカの角」を襲った過去最悪の干ばつなど、気候変動に関連して近頃発生している極端な気象現象は枚挙にいとまがない。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は、2023 年 3 月に発表した統合報告書において、全ての部門およびシステムにまたがる迅速かつ広範囲に及ぶ転換の必要性を強調している(IPCC, 2023)。

国際再生可能エネルギー機関(IRENA)が『世界エネルギー転換展望』2022 年版で訴えたように、再生可能エネルギーを基とした電化、エネルギー効率化、運輸、産業、家庭・業務部門における再生可能エネルギーの直接利用といった一連の補完的転換策を実施することによって、おおむねすでに利用可能な技術や対策を用いて IPCC が掲げる 1.5°C の気候目標を達成する道すじが開ける。この 1 年、このような再生可能エネルギーを基本とする道すじが、エネルギー安全保障の強化、化石燃料価格の乱高下による悪影響の低減、エネルギーの低廉性の向上において明らかな便益をもたらすことが示された。再生可能エネルギーによって、多くの場合で化石燃料と比較してますます競争力が強められ、エネルギーコストが引き下がる可能性とともに各国の輸入依存度を低減する可能性がもたらされる。

この 1 年間各国が直面してきたエネルギー価格の高騰、インフレ、資本コストの上昇、エネルギー安全保障の欠如といったエネルギー関連の世界的な課題は、もし各国がもっと早くから電力部門や熱供給部門においてエネルギー転換技術や関連インフラに投資していたら、これほどひどくはならなかったと考えられる。これ以上の遅れは、これらの課題をいっそう悪化させる。とはいえ、今からでもまだ方向転換をするには遅くはない。

いくつかのエネルギー転換指標からは、危機にもかかわらず、エネルギー転換を構成するさまざまな要素にレジリエンスが見られ、その一部は対応速度を上げてさえいることが分かる。しかし、全体的には、エネルギー転換は道すじから外れており、達成されつつあることと必要なことのギャップは、年々広がり続けている。長期的にはエネルギー部門だけでなく経済や社会において大規模な転換をもたらす必要があるが、あまりにも多くの意思決定者が、それとは相容れない方法でエネルギー危機に対処している。現在のように進捗が遅いままであれば、将来、必要なエネルギーを生産し、悪化する気候変動の影響に対処するための投資の必要性は増大する。物理的、政策的、制度的構造を並行して積極的に再構築することが、より強靭で生産的かつ公平な世界を実現するために不可欠となる。

本報告書『世界エネルギー転換展望 2023』第 1 巻では、2050 年に向けて 1.5°C 目標と調和した道すじを提示するとともに、投資やエネルギー転換ソリューションの導入においてこれまでに達成された進展を報告する。本報告書では、エネルギー転換の道すじに沿って進みつつ短期的エネルギー危機に対処する方法、新たな分析結果と情報、エネルギーシナリオやエネルギー投資における最新情勢や進展に関する知見、実効性のある資金提供や枠組みについての新たな見解を提示する。2023 年後半に発行予定の本報告書第 2 巻は、エネルギー転換の社会経済的影響について検討するものとなる[訳注2]。

訳注 2　第 2 巻は 2023 年 11 月に公開された（未邦訳）。
https://www.irena.org/Publications/2023/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2023-vol2

この巻は、3 つの章から構成される。

第 1 章

第 1 章は、現行計画シナリオと 1.5°C シナリオにおける 2030 年と 2050 年に向けた転換の道すじを示し、1.5°C のパリ気候目標を達成するために必要な技術的選択肢と排出削減策を検討する。グローバルな視点に加え、第 1 章では G20 レベルでの転換の道すじを提示し、排出量の削減や低炭素技術導入の加速における G20 の役割を強調する。2022 年国連気候変動会議(COP27)で得られた「各国が決定する貢献」に関する最新情報とともに、1.5°C 目標との排出ギャップについて論じる。また、現在のエネルギー危機への対応と、それらがエネルギー転換に及ぼす影響についても検討する。章の最後に、現在のエネルギー危機とより長期的な気候目標に対応する政策措置に関する提言をまとめる。

第 2 章

第 2 章は、部門別、技術別の 2030 年と 2050 年に向けたエネルギー転換について詳細に論じる。幅広い技術や戦略を導入しなければならないことを、分析によって示す。再生可能エネルギーは、全ての最終消費部門において主要な役割を果たす。これには特に、電力、再生可能エネルギー由来電力によって製造されたグリーン水素や合成燃料がある。バイオエネルギーとバイオマス原料が果たす役割も、特に産業部門と運輸部門において拡大している。また、電力部門、新規燃料の供給、最終消費部門について、エネルギー転換を推進する制度的・規制的枠組みや政策を検討する。

第 3 章

第 3 章は、1.5°C シナリオにおいて 2030 年と 2050 年までに必要な投資額を明らかにし、現在の水準と比較する。第 3 章では、政府が短期的および長期的エネルギー転換に向けた投資のバランスをいかに取ることができるかを検討した後、インフラ投資を加速させる喫緊の必要性を精査する。エネルギー転換に向けた投資の最新動向を、技術、地域、資金源ごとに分析する。再生可能エネルギーの導入規模の拡大および真に世界的なエネルギー転換の両者を達成するために、公的資金(国家、国際)、協調的規制、政策支援が極めて重要な役割を果たす。特に、民間資本を誘致できずにいる地域や国においてその役割は大きい。

それぞれの転換の道すじがもたらす社会経済的影響を理解することは、適切な計画や政策を立案するうえで基本的な要素である。政策立案者は、その選択が人々のウェルビーイングと福祉全般にどのような影響を及ぼすかを知る必要があると同時に、進捗に影響を及ぼし得るギャップや障壁の可能性を認識する必要がある。エネルギー転換が最大限の便益をもたらすためには、エネルギーシステムを転換するのみならず、人々、暮らし、雇用も守る包括的な政策枠組みが各国に必要である。

IRENA のマクロ計量モデルの土台となる気候政策パッケージについては、その分析結果を発行予定の『世界エネルギー転換展望 2023』第 2 巻に記す。気候政策パッケージには、エネルギー転換技術を導入、統合、促進する政策に加え、公正かつ包括的な転換を支援する幅広い施策(公共インフラへの投資、社会的支出の増加、部門横断的なカーボンプライシングや補助金)が含まれる。

第 1 章

1.5°C 気候への道すじとエネルギー転換に向けた進展状況



第1章の要点

- これまでに達成された進展はあるものの、エネルギー転換技術の導入状況は今のところ、1.5°C のパリ気候目標を達成するために必要な水準にははるかに及ばない。1.5°C 目標と調和した道すじを実現するには、社会のエネルギー消費や生産のあり方を全面的に転換する必要がある。このシナリオの成果達成のために、世界のエネルギー部門は 2050 年までに排出量を実質ゼロ（ネットゼロ）にする必要がある。そのためには、エネルギー関連の年間二酸化炭素(CO_2)排出量を、過去最高水準になることが予想されている 2022 年の推定値と比較して毎年約 37 Gt 削減する必要がある。世界のエネルギー消費量は、エネルギー効率を大幅に高めることにより、2050 年までに 2020 年の水準から 6%削減する必要があり、他方、世界のエネルギーミックスに占める再生可能エネルギー比率は、2020 年の 16%から 2050 年までに 77%に拡大しなければならない。全ての最終消費部門で再生可能エネルギーの利用を増加させなければならず、運輸部門と家庭・業務部門で必要な規模の電化を実現するためには、2050 年までに再生可能エネルギー電源の設備容量を 2020 年の水準の 12 倍に増加させる必要がある。

- エジプトで開催された第 27 回国連気候変動会議(COP27)において、締約国は称賛に値するコミットメントを打ち出した。各国が決定する貢献(NDCs)、長期低排出発展戦略(LT-LEDS)、ネットゼロ目標などである。しかし、これらは 2050 年までに 1.5°C の気候目標を達成することはできず、2050 年における CO_2 排出ギャップは 16 Gt に上ると予想される。 また、NDCs をはじめとする気候変動に関する誓約は、国家戦略や計画に具現化しなければならない。そしてこうした戦略や計画は、目標（再生可能エネルギー目標など）を設定し、十分な資金を誘致するために、エネルギー部門のあらゆる側面を包括する政策、規制、その他の対策を通して実施されなければならない。これらの取り組みを急速に推進することが、このギャップを解消し、パリ協定で掲げた気候目標を達成するために必要である。

- エネルギー危機を受け、多くの政府がエネルギー供給を確保し消費者を守るために、化石燃料インフラへの新規投資（液化天然ガス(LNG)ターミナルなど）や消費者への補助金といった短期的措置を実施している。各国政府は、エネルギー効率化や再生可能エネルギーの導入を達成する努力を再構築することによって、短期的措置をエネルギー転換という長期目標と整合させる必要がある。それに対する潜在的利益に説得力を持たせることが望ましい。1.5°C 目標と調和したエネルギーシステムは、長期的なエネルギー安全保障や価格安定性が期待できる。エネルギー効率化を再生可能エネルギーと組み合わせることによって、各国は化石燃料への依存度を引き下げ、供給オプションを多様化し、エネルギー取引やエネルギー協力を促進し、国際的な化石燃料価格の変動から経済を切り離すことが可能になる。

1.1　世界のエネルギーシステムの転換

世界が気候変動による壊滅的な影響とエネルギー安全保障の着実な崩壊を回避するためには、今後 30 年以内に世界のエネルギーシステムの大規模かつ体系的な転換が起こらなければならない。このような短期間においては、供給の脱炭素化だけに留まらず、二酸化炭素排出量を削減しつつ包摂的でレジリエンス（強靭性）のあるグローバル経済を支えるようなエネルギーシステムの構築に向けた、戦略的移行が必要となる。したがって、計画立案にあたっては、技術の垣根を超え、新たなエネルギーシステムとそれが支える経済の様々な要件に注意を向けなければならない。

物理的、政策的、制度的構造を同時に積極的に再構築することが、よりレジリエンスがあり生産的かつ公平な世界の実現に不可欠となる。そのような世界を実現するために必要となるエネルギー転換の柱は、(1) 物理的インフラ、(2) 政策および規制による実現要因、(3) 技能および能力である（ボックス 1.1 を参照）。

現行の構造には、転換を妨げる多くの障壁が内在する。多様で相互接続されたエネルギーシステムを実現するには、インフラの近代化と拡張が必要である。送配電システムは、多くの再生可能エネルギー資源の非常に局在的かつ分散的な性質、そしてそれに伴う多様な取引経路に対応する必要がある。電力取引に必要な連系線、水素および派生物の運搬航路については、世界情勢における無数の要因を考慮に入れ、多様かつレジリエンスのあるエネルギーシステムを促進するために各国の連携を積極的に図らなければならない。社会受容性は大規模事業にとって極めて重要であり、計画および実施段階での透明性を通じて、また、コミュニティに意見表明の機会を提供することによって実現することができる。

2050年までに
エネルギーシステムの
急速な転換が必要

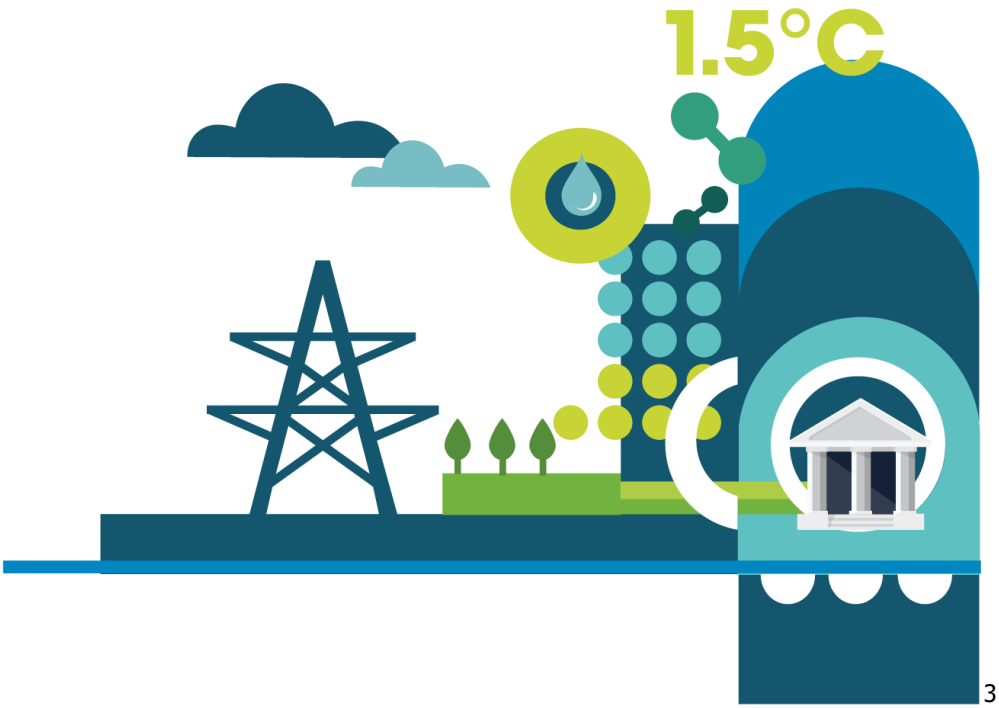


ボックス 1.1　エネルギー転換の主要な柱

物理的インフラ: 再生可能エネルギーの開発、貯蔵、送配電、消費を促進する陸上および洋上の支援インフラを、先見的に計画、現代化、拡張する。インフラは、新たな需給ダイナミクスに即した国家、地域、グローバル戦略を後押しすることが望ましい。

政策および規制による実現要因: 再生可能エネルギーの導入、統合、取引を促進し、社会経済面・環境面の成果を改善し、平等と包摂性を促進する政策および規制の枠組みを策定する。それらの枠組みは、ローカルからグローバルまでさまざまなレベルにおいてエネルギー転換を可能にし、新たな需給ダイナミクスを反映する必要がある。

技能および能力: エネルギー転換を推進し、持続させるために必要な技能や知見を獲得するため、制度、コミュニティ、個人の意識と能力を啓発する。制度、社会的対話、集団交渉の強化は、より大きな社会経済的便益をもたらすために役立つ。



今日、再生可能エネルギー源の利用推進と温室効果ガス排出量の削減を目指す政策イニシアティブや規制措置は増加しているが（以降の章に記す通り）、基本的な政策・規制システムは今なお化石燃料を想定したものとなっている。化石燃料が当面の間エネルギーミックスに残ることは避けられないが、21 世紀の中間点が近づくに伴い、その比率は大幅に減らさなければならない。したがって、政策枠組みや市場は、この転換を加速し、包摂的でレジリエンスのあるシステムの土台の確立に重点を置くことが望ましい。

熟練した労働力は、エネルギー転換の要である。IRENA と国際労働機関が 2016 年から実施している一連の社会経済学的研究(IRENA, 2016a, 2020a, 2021a, 2022a)によれば、世界の再生可能エネルギー部門の雇用者数は 2012 年に 730 万人であったが、2022 年には約 1,270 万人となった。民間部門と公共部門のいずれにおいても、幅広い職種の人材が求められることが予想されており、これには、転換計画の立案と適切な規制の策定を担うための公共部門（行政、機関、規制機関）の熟練スタッフも含まれる。公共部門に人材を誘致するために、適正な賃金と、女性、若者、マイノリティが訓練、求人ネットワーク、キャリアの機会への平等なアクセスを得る機会を提供しなければならない[原注1]。

エネルギーに関する国際協力についても、強化および見直しを行う必要がある。世界の開発と気候アジェンダにおけるエネルギーの重要性は疑う余地がなく、近年、国際協力は拡大しており、エネルギー転換のかじ取りに貢献している。エネルギー部門が地政学的情勢に素早く反応するためには、協力のあり方、手段、アプローチを迅速かつ適切に保つことが必須である。世界の排出量の大部分を占めている G20 各国は、自らのために、また開発途上各国のためにも、協調して行動し、気候対策の意欲を引き揚げ、誓約を実行しなければならない。開発途上国が、先進国ですでに陳腐化しつつあるシステムを飛び越し無駄な投資を回避するために、各国の協力が不可欠である。

特定の国や制度的環境における特定の技術の組み合わせによって、最終消費部門のエネルギー転換を促進することが可能である。また、制度的条件、資源の利用可能性やインフラによっては、こうした組み合わせが供給側にも変化を起こし、転換的プロセスをもたらすことも可能である。しかし、全ての国に共通する要素は、再生可能エネルギー源、エネルギー効率化政策、再生可能エネルギーの直接利用（バイオエネルギー、太陽光、水素）を用いた熱供給部門と運輸部門の電化（エレクトリフィケーション）の必要性である。

本章では、2050 年までに地球温暖化を 1.5°C 以内に抑えることに関する IPCC 特別報告書(IPCC, 2022a)に沿った「1.5°C シナリオ」のもとで考えられるエネルギーシステムの転換の道すじを提示する。2030 年から 2050 年にかけて必要となる技術革新や緩和策を検討する。また、本章では昨今のエネルギー危機の影響を探り、各国政府が危機の影響を軽減しつつエネルギー転換を加速するために講じることができる一連の対策を提案する。

この『世界エネルギー転換展望』2023 年版は、G20 諸国における転換の道すじに特に重点を置き、排出削減や低炭素技術導入の強化におけるその役割を強調する。

原注1 2023 年に追って発行予定の『世界エネルギー転換展望 2023』第 2 巻では、エネルギー転換の社会経済的影響と国際協力の役割についてさらに詳しく検討する。

1.2　1.5°C シナリオ：グローバルな視点

2022 年版と同様、IRENA では、1.5°C の道すじに向けた進展状況を追跡するために 6 つの評価指標を用いている。

- 再生可能エネルギーを用いた発電：二つのサブ指標から成る。1）再生可能エネルギーによる発電電力量、2）総発電電力量に占める再生可能エネルギーの比率
- 再生可能エネルギーの直接利用：二つのサブ指標から成る。1）総最終エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの比率、2）近代的バイオエネルギーの消費量
- エネルギー強度の改善
- 最終消費部門の電化
- クリーン水素および派生燃料の製造と供給
- さまざまな手法により回収・除去された二酸化炭素量

表 1.1 は、世界およびG20 における 6 つの指標の状況について、2020 年の実績値、1.5°C シナリオおよび現行計画に基づく参照シナリオにおける 2030 年と 2050 年の予測値を比較したものである。



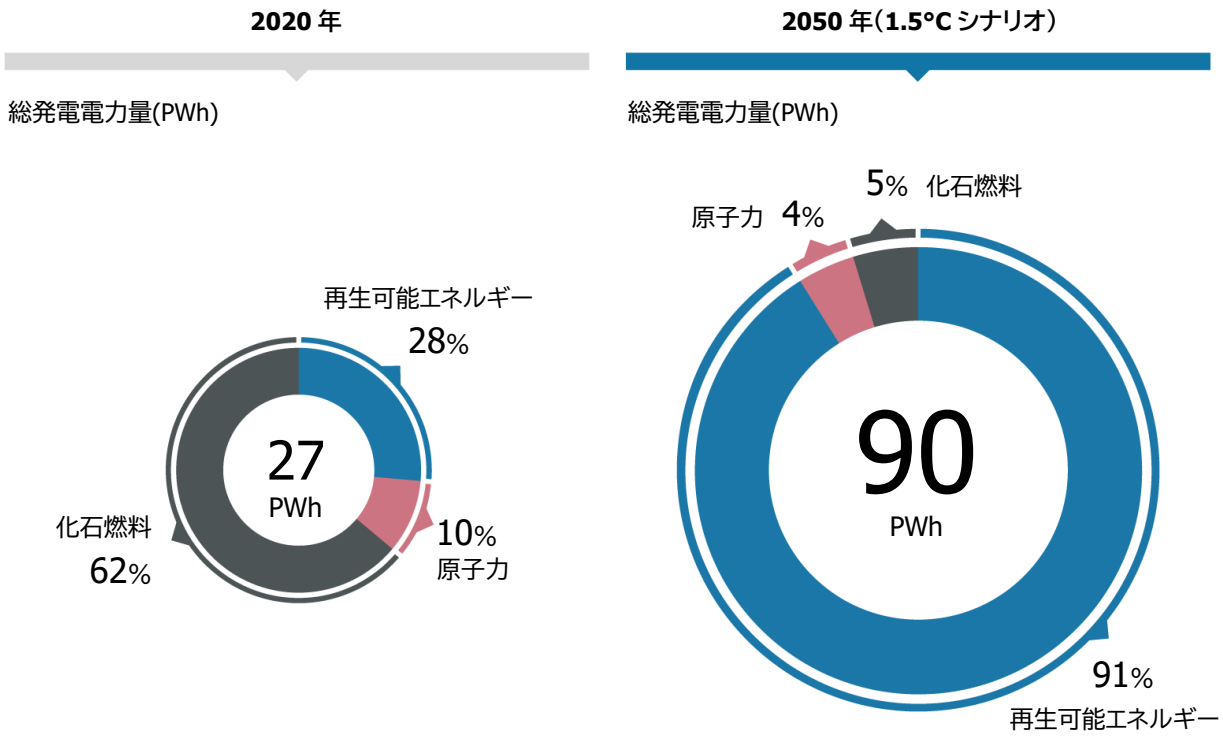
表 1.1　1.5°C シナリオおよび現行計画シナリオにおける 2030 年と 2050 年の主要業績指標の比較

			近年	2030 年		2050 年	
			2020 年	PES	1.5°C シナリオ	PES	1.5°C シナリオ
KPI.01 再生可能エネルギー（電力）	発電（TWh/yr）	世界	7 468	16 504	27 358	38 118	82 148
		G20	6 237	14 269	22 397	31 071	60 547
	発電電力量に占める再生可能エネルギー比率（%）	世界	28%	46%	68%	73%	91%
		G20	28%	48%	69%	74%	91%
KPI.02 再生可能エネルギー（直接利用）	TFEC に占める再生可能エネルギー比率（%）	世界	18%	23%	35%	33%	82%
		G20	16%	22%	36%	35%	82%
	バイオエネルギーの近代的使用（EJ）[1]	世界	21	30	50	41	64
		G20	19	26	36	33	42
KPI.03 エネルギー強度	エネルギー強度の改善率（%）	世界	1.7%	1.8%	3.3%	2.0%	2.8%
		G20	2.1%	2.1%	3.6%	2.3%	3.1%
KPI.04 最終消費部門の電化（直接）	TFEC における電化率（%）	世界	22%	23%	29%	28%	51%
		G20	24%	26%	31%	32%	55%
KPI.05 クリーン水素および派生物	クリーン水素製造(Mt)	世界	0.7 Mt/yr[2]	2	125	21	523
		G20	0.5 Mt/yr[2]	2	94	20	373
KPI.06 CCS、BECCS、その他	CCS、BECCS、その他の除去方法による CO_2 回収量（Gt）	世界	0.04 $GtCO_2/yr$[3]	0.1	2.2	0.5	7.0
		G20	0.03 $GtCO_2/yr$[3]	0.1	2.1	0.4	4.9

注:「現行計画シナリオ」は本展望 2023 の参照ケースであり、各国の現行計画に基づく。
1.非エネルギー利用も含む。
2.2022 年 10 月までの操業プロジェクトの処理能力(IEA Hydrogen Project Database)。
3.2023 年 3 月までの操業プロジェクトの処理能力(IEA CCUS Database)。
BECCS = 二酸化炭素回収･貯留付バイオエネルギー、CCS = 二酸化炭素回収･貯留、CO_2 = 二酸化炭素、EJ = エクサジュール、G20 = Group of Twenty、Gt = ギガトン、KPI = 重要業績指標、Mt = メガトン、PES =「現行計画シナリオ」、TFEC = 総最終エネルギー消費量、TWh/yr = テラワット時／年。

1.5°C シナリオでは、2020 年から 2050 年までの間に発電電力量が 3 倍以上に増加し、総電力供給量に占める再生可能エネルギー源の比率は 2020 年の 28%から 91%に拡大する（図 1.1 を参照）。石炭・石油による発電電力量は、今後 10 年の間に急激に減少した後、21 世紀半ばまでに完全に段階的消失する。2050 年までに、総消費電力量の 5%を天然ガス、残りの 4%を原子力が担う。この転換の特徴は、再生可能エネルギー発電技術の低廉性の向上と、最終消費用途、特に運輸部門と熱供給部門における電化技術の導入拡大が相乗効果を発揮することである。1.5°C 目標を達成するには、運輸、熱供給、その他の最終消費部門を電化が、世界の再生可能エネルギー電源の容量を 2050 年末までに 2020 年水準のほぼ 12 倍に拡大する必要があることを示唆している。詳細な分析は第 2 章に記載する。

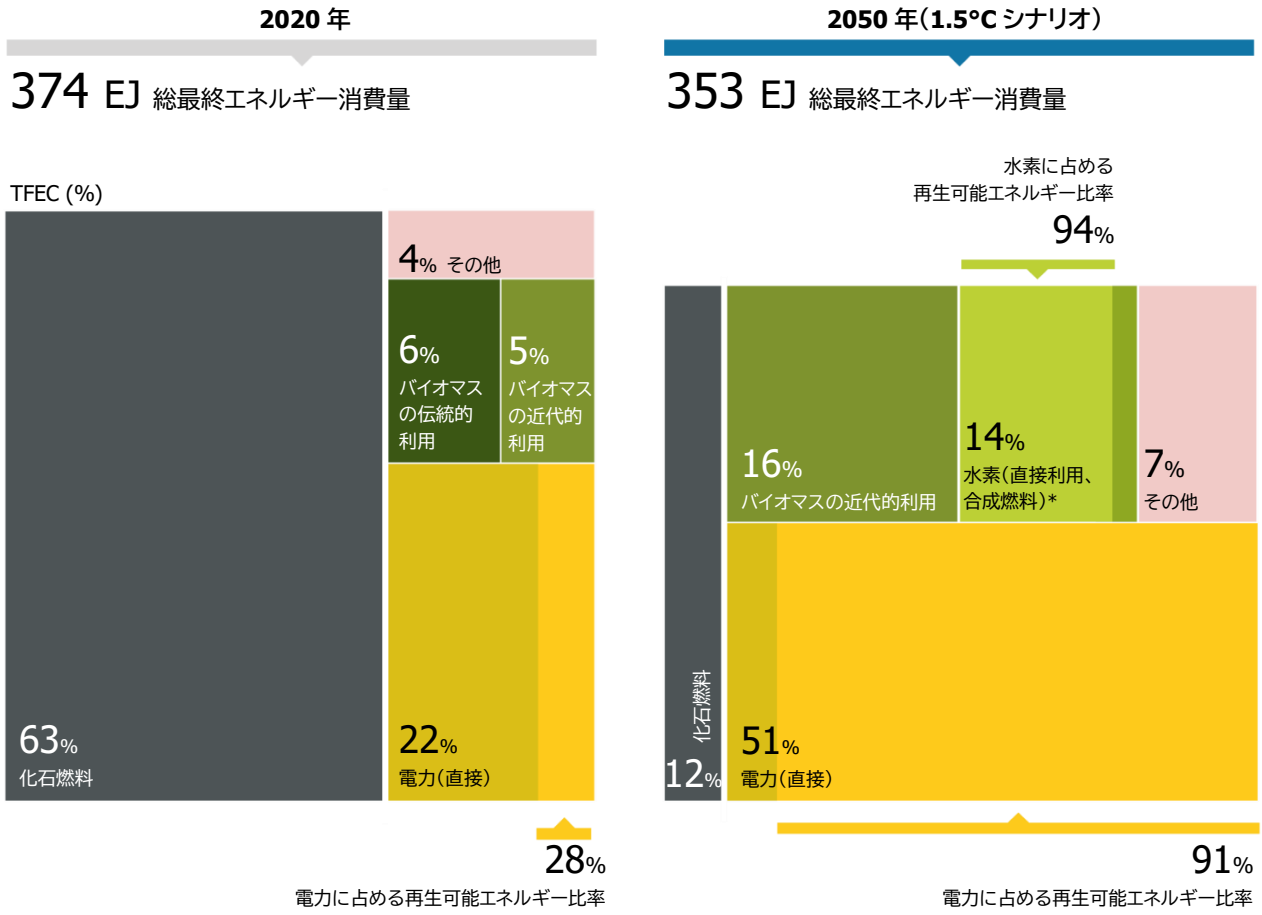
図 1.1　1.5°C シナリオでは、発電電力量を 2050 年までに 3 倍以上に拡大する必要がある



注：PWh = ペタワット時

規模拡大により、総最終エネルギー消費量(TFEC)に占める再生可能エネルギーの比率は、2020 年の 18%から 2050 年までに 82%に拡大する。1.5°C シナリオでは電力が最大のエネルギーキャリアとなり、総最終エネルギー消費量の 50%以上を占める(図 1.2 を参照)。再生可能エネルギーの導入、エネルギー効率の向上、最終消費部門の電化が、この移行に貢献する。また、近代的なバイオマスおよび水素が果たす役割も拡大し、総最終エネルギー消費量に占める比率は 2050 年までにそれぞれ 16%と 14%になると予測される。注目すべきは水素製造の 94%が再生可能エネルギー由来となることが予測されることで、クリーンなエネルギー源への寄与度が拡大することを示唆している(IRENA, 2022b, 2022c, 2022d)。この道すじでは、2020 年から 2050 年までの間に総最終エネルギー消費量が 6%減少する可能性も示されており、脱炭素化とより持続可能なエネルギーの未来に向かうトレンドの可能性が示唆されている。

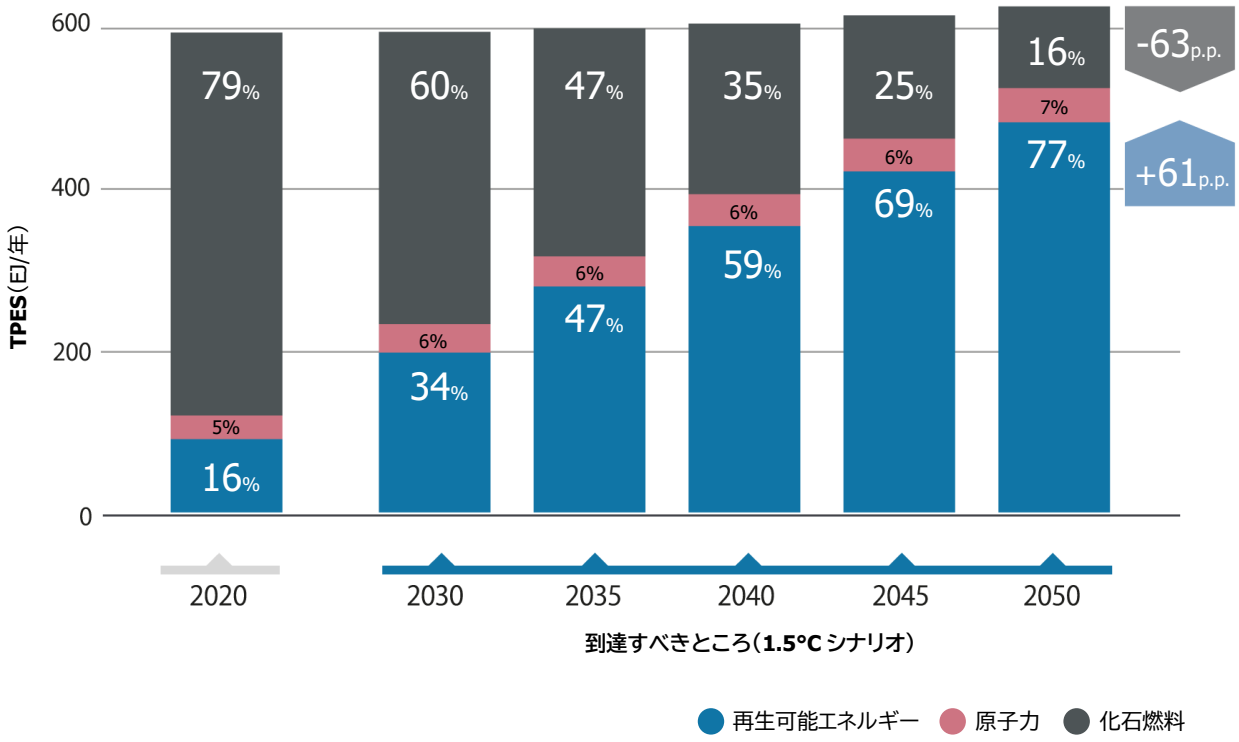
図 1.2　1.5°C シナリオにおける 2020 年と 2050 年の総最終エネルギー消費量のエネルギーキャリア別構成



注:上記の数字はエネルギー消費量のみを含み、非エネルギー利用は含まない。電力利用のうち再生可能エネルギー由来は 2020 年に 28%、2050 年に 91%である。地域熱供給ではそれぞれ 7%と 84%である。水素(直接利用と合成燃料)のうち再生可能エネルギー比率(グリーン水素など)は 2050 年までに 94%に達する。水素(直接利用と合成燃料)は総水素消費量(グリーンとブルー)およびその他の合成燃料(合成アンモニアと合成メタノール)からなる。電力(直接)は全ての発電方法(再生可能エネルギー、原子力、化石燃料)による電力消費を指す。バイオマスの伝統的利用とは、非 OECD 諸国における固形バイオ燃料の家庭部門総最終エネルギー消費量を指す。近代的バイオエネルギーの利用は、家庭・業務部門や産業部門で使用される固形バイオマス、バイオガス、バイオメタンを含み、液体バイオ燃料は運輸部門を中心として、家庭・業務部門、産業部門、その他の最終消費部門でも使用されるものである。2050 年に残存する化石燃料は、天然ガス(主に産業部門と運輸部門であり、家庭・業務部門ではあまり使用されていない)、石油(主に産業部門と運輸部門であり、家庭・業務部門ではあまり使用されていない)、石炭(セメント、化学、鉄鋼などの産業部門での使用に関連)である。その他は、地域熱供給とその他の再生可能エネルギー消費量である。EJ = エクサジュール、OECD = 経済協力開発機構、TFEC = 総最終エネルギー消費量。

一次エネルギー総供給量は、エネルギー効率の向上と再生可能エネルギーの拡大により安定している（図 1.3 を参照）。一次エネルギー供給量に占める再生可能エネルギー比率は、2020 年の 16%から 2050 年の 77%に拡大する。その過程でエネルギーミックスは劇的に変化し、一次エネルギー総供給量に占める再生可能エネルギー比率は、最終消費の電化、再生可能エネルギー燃料、直接利用の組み合わせを原動力として 61 パーセンテージポイントの純増となる。世界の気候目標達成のために再生可能エネルギーがこの水準まで普及することは不可欠であり、多額の投資や政策支援、ならびに継続的なイノベーションが必要となる。

図 1.3　1.5°C シナリオにおける 2020～2050 年の一次エネルギー総供給量のエネルギーキャリア別構成



注：世界の一次エネルギー供給量は、世界中でさまざまな形で生産・消費されるエネルギーの総量を指す。これには、発電、運輸用電力、家庭・業務用暖房、産業プロセス用電力に用いられる全てのエネルギー源が含まれる。再生可能エネルギーには、水力、太陽光、風力、バイオエネルギー、地熱、海洋エネルギーが含まれる。EJ/yr = エクサジュール/年、TPES = 一次エネルギー総供給量。



1.5°Cシナリオでは、2050年までに
再生可能エネルギーが
一次エネルギー供給量の77%に

エネルギー効率の大幅な向上、構造改革、行動変容の全てが1.5°Cシナリオのもとで必要に

エネルギー転換は、エネルギー効率化のさまざまな技術とそれを補足する構造改革や行動変容を通じて、経済全体にわたってエネルギー強度の改善を実現することが望ましい。エネルギー強度の改善は、最終消費部門における再生可能エネルギーや効率化技術の導入の組み合わせと、それに加えて広範な電化が関連する。

電力需要は、最終消費部門の広範な電化（そのうち 37%は太陽光発電、36%は風力発電により供給）により、2050 年までに 3 倍以上に拡大する必要がある。再生可能エネルギー発電の設備容量は、世界を転換の軌道に乗せるために、2030 年までにほぼ 4 倍に拡大する必要がある。具体的には、電源構成における変動性再生可能エネルギー(VRE)比率を現在の 9%から 2030 年までに 46%に拡大する必要があり、そのためには、経済面と安全保障面の理由からエネルギーシステムの運用における柔軟性を高めなければならない。

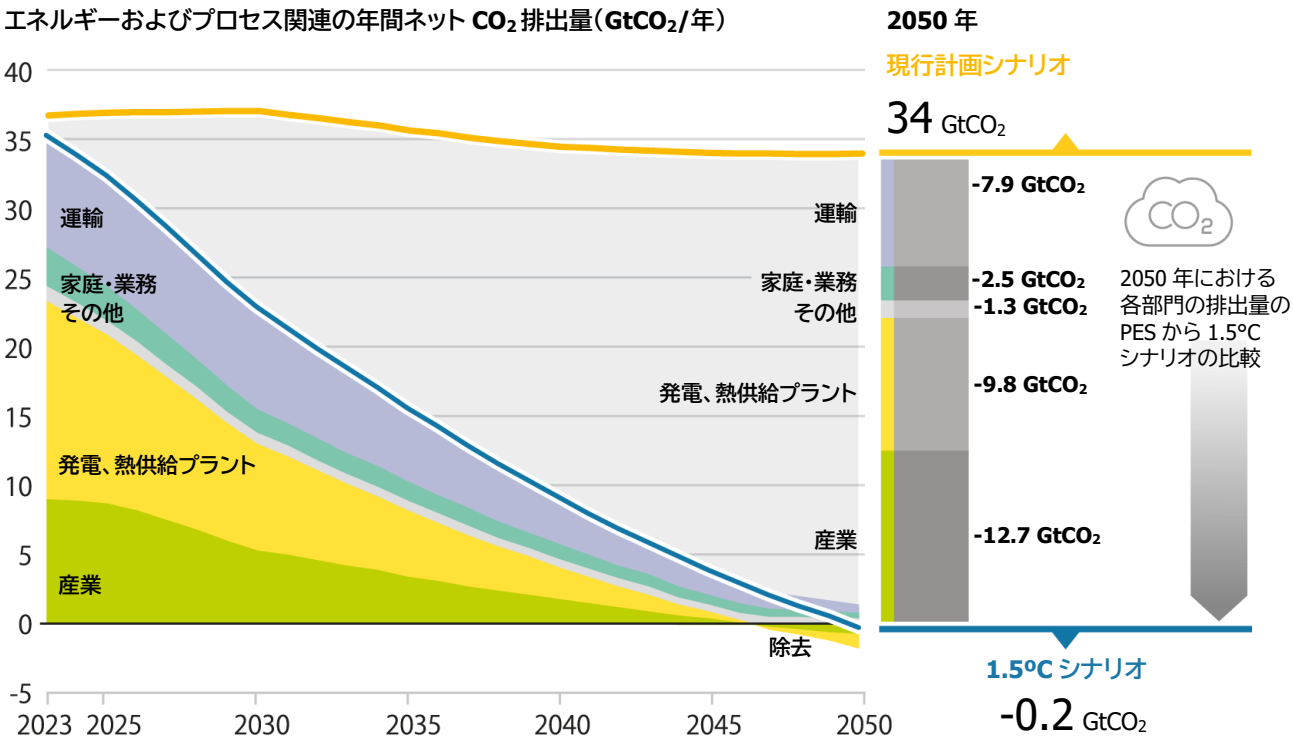
バイオエネルギーの多様な形態における近代的利用（固形バイオマス、バイオガス、バイオメタン、液体バイオ燃料）は、2050 年までに一次エネルギー総供給量の 22%を占め、現行水準の 2.5 倍に増加する。運輸部門では、2050 年までに持続可能なバイオ燃料が総最終エネルギー消費量の 13%を満たすようになる。

直接利用および派生燃料としてのクリーン水素の製造は、2020 年には極めて少量だったが、2050 年までに 523 Mt まで拡大することが望ましい。水素とその関連化合物（アンモニア、メタノール、ケロシン）は、2050 年までに最終エネルギー消費量の 14%を占める見込みである。グリーン水素のサプライチェーン（電解装置、燃料電池、輸送パイプライン、貯蔵洞窟など）への早期投資は、最終消費部門における水素利用の普及や炭素削減目標のために不可欠である。これは特に、航空、船舶、大型トラック輸送のような脱炭素化が困難な部門や一部の主要産業プロセスに当てはまる。2030 年までに 50 Mt のグリーン水素が必要とされるようになり、2050 年までにその 10 倍の拡大が必要になると IRENA は予想する。

2020 年に二酸化炭素回収量はわずか 0.04 Gt であるが、二酸化炭素回収・貯留(CCS)、二酸化炭素回収・貯留付バイオエネルギー(BECCS)、その他の方法などの除去・貯留策の拡大により、2050 年までに 7 Gt 除去できるようにすることが望ましい。排出削減の大部分を担うのは再生可能エネルギーや効率化政策の意欲的拡大であるが、主に産業プロセスや一部の運輸部門に残存する化石燃料からの二酸化炭素(CO_2)排出量を削減するには、CCS 技術と CO_2 除去手段の併用が必要とされる。2023 年から 2050 年までの間に合計 109 Gt の CO_2 を除去することが必要になる。電力、熱供給、コジェネプラントのほか、一部の産業用途においては、バイオエネルギーと CCS の併用が重要になる。一方、セメント、鉄鋼、化学品製造における排出の除去には、化石燃料由来の二酸化炭素回収・有効利用(CCU)や CCS が不可欠なプロセスである。二酸化炭素の回収量は現在極めてわずかな量であるが、産業プロセスに重点を置き 2030 年までに 2.2 Gt に達する必要がある。

本研究の参照ケースである「現行計画シナリオ」では、年間排出量は 2050 年に 34 $GtCO_2$ となり、削減はわずかである（図 1.4 を参照）。それに対し、IRENA の「1.5°C シナリオ」では、パリ協定のコミットメントを実現するため、CO_2 排出量を急速かつ持続的に削減して 2050 年までにネットゼロを達成することを想定している。このシナリオは、世界の CO_2 排出量を 2030 年まで急速に削減した後、下降軌道を持続し、2050 年までにネットゼロに到達することができるかどうかにかかっている。これを達成するためには、電力、熱供給、産業などの部門において既存の計画を上回る多大な努力を行うとともに、必要な追加的な二酸化炭素の削減を実現する炭素吸収を行う必要がある。

図 1.4　現行計画シナリオおよび 1.5°C シナリオにおける 2023～2050 年の世界の CO_2 排出量の動向予測

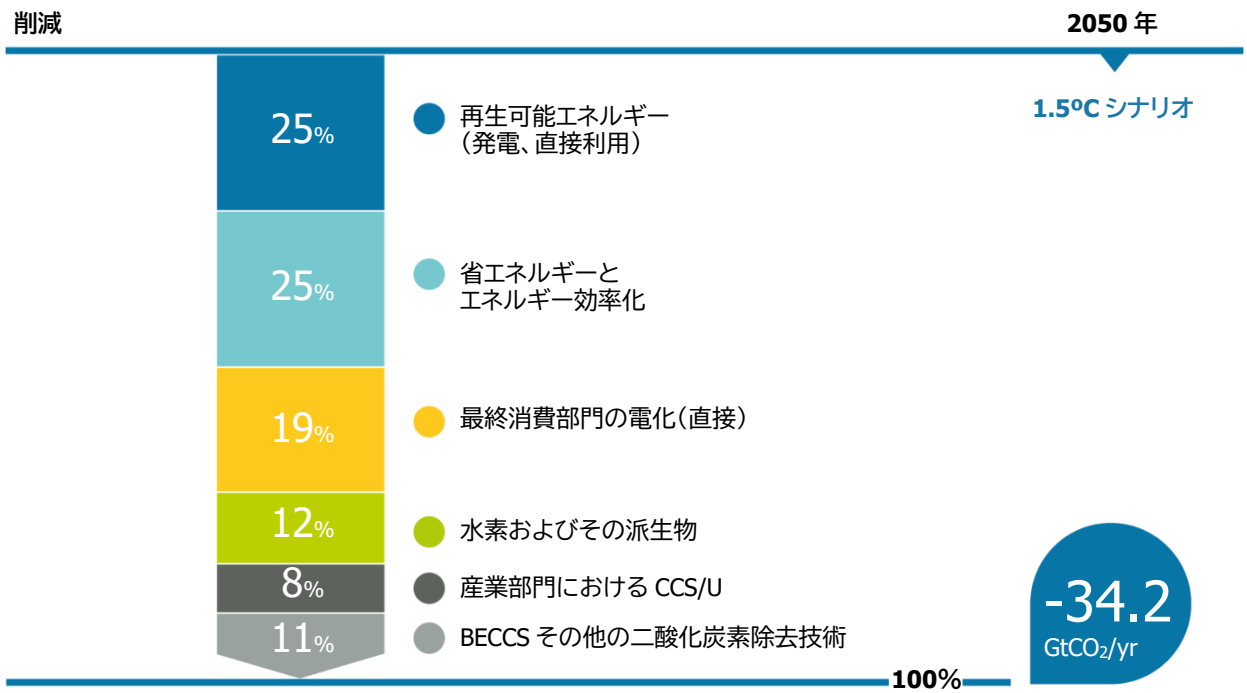


注：$GtCO_2$ = ギガトン（二酸化炭素換算）、PES = 現行計画シナリオ

上記の技術や対策が全て実現されれば、世界の CO_2 排出量は劇的に減少し、2050 年までに 0.2 $GtCO_2$/年の炭素吸収を達成する（すなわち、CO_2 除去量が発生量を上回る）可能性がある。最も削減量が大きいのは、再生可能エネルギーの発電利用と熱供給・運輸部門における直接利用、これらと併せた省エネルギーおよびエネルギー効率化で、これらを合わせると世界の CO_2 排出削減量の半分以上を占める。次いで、各最終消費部門における直接電化による 19%、水素およびその派生物の利用（合成燃料や原料としての利用を含む）による 12%である（図 1.5 を参照）。上述の通り、2050 年までの間の残余 CO_2 は、CCS/CCU、BECCS、または直接空気回収、土壌炭素隔離、鉱物化促進、海洋ベースの CO_2 除去、植林または再植林といったその他の二酸化炭素除去対策によって、回収、貯留する必要がある。

また、IRENA は、再生可能エネルギーとエネルギー転換に関するいくつかの地域展望もまとめた。これらの研究は、エネルギー転換に関連する技術、対策、政策、影響について、より詳細な地域別、国別の知見を提供するものである。また、地域の協力や共同行動についても見解を示す（ボックス 1.2 を参照）。

図 1.5　1.5°C シナリオによる 2050 年における二酸化炭素排出量の削減



注：BECCS = 二酸化炭素回収・貯留付バイオエネルギー、CCS/U = 二酸化炭素回収・貯留/有効利用、$GtCO_2$/yr = ギガトン/年（二酸化炭素換算）

ボックス 1.2　IRENA の地域研究

IRENA は、再生可能エネルギーとエネルギー転換に関するいくつかの地域展望をまとめている。これらの研究は、エネルギー転換に関連する技術、対策、政策、影響について、より詳細な地域別、国別の知見を提供している。また、地域の協力や共同行動についても見解を示している。

Renewable energy roadmap for Central America: Towards a regional energy transition (IRENA, 2022l) は、ベリーズ、コスタリカ、エルサルバドル、グアテマラ、ホンジュラス、ニカラグア、パナマにおける今後のエネルギー情勢に関する技術評価書である。報告書は、中米におけるエネルギー部門の脱炭素化をめぐる議論に貢献している。エネルギー政策と気候政策が国別コミットメントに連動している統合的地域計画は、エネルギー転換に不可欠である。この前提を念頭に置いて、本ロードマップでは、地域の最終消費部門や電力部門において再生可能エネルギー技術や低炭素技術がどれほど適切に導入されているかが評価されており、地域電力システムに対する「柔軟性」分析も行われている(IRENA, 2022l)。主な分析結果のひとつは、エネルギー転換の重点を運輸部門と発電部門に置くことが望ましいというものである。最も意欲的なシナリオにおいて、エネルギーシステムの脱炭素化にかかる総コストは、新規発電容量や電力システムの設置、運用・保守、燃料費、最終消費技術など、推定 1 兆 9,300 億ドルに上る。現行のエネルギー政策が 2018 年から 2050 年までの間に実施された場合は 1 兆 9,500 億ドルという、さらに多額の投資が必要になる。

Renewable energy outlook for ASEAN: Towards a regional energy transition (IRENA, 2022m) では、東南アジア諸国連合(ASEAN)における将来のエネルギー情勢について評価がなされている。ASEAN 加盟国のブルネイ・ダルサラーム、カンボジア、インドネシア、ラオス人民民主共和国、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、シンガポール、タイ、ベトナムは、エネルギー転換に向けた統合的地域計画を進めており、エネルギー政策と気候政策を実際の国別コミットメントに連動させている。その一方で加盟国は、再生可能エネルギー、効率性の向上、関連する転換技術や政策による低炭素エネルギーの道筋を明らかにしつつある。今後 30 年間に世界のエネルギー需要に拡大をもたらす ASEAN 地域は、気候変動対策の努力における重要なパートナーとなる。1.5°C シナリオのもとでは、ASEAN の統合的地域アプローチによって、再生可能エネルギー電源の容量は現在の 2,770 GW から 2050 年までに 3,400 GW に拡大する見込みである。アセスメントによれば、1.5°C シナリオにおいては、エネルギー供給の総コストを 2050 年までに累積 1,600 億ドルも削減することができる。さらに、1.5°C シナリオにより回避される外部性は、2050 年までの累積で 508～1,580 億米ドルに及ぶ。この展望では、1.5°C シナリオをより低いコストで実現するとともに、エネルギー関連排出量も削減できると結論付けている。

IRENA では、アフリカ、南アジア、欧州に関する地域展望にも取り組んでおり、エネルギーシステム全体を分析し、開発目標や気候目標などの観点を含めたエネルギー転換のマクロ経済的影響に関する実証的な証拠を提供している。

1.3 各国が決定する貢献(NDCs)およびその他の約束の改訂が 1.5°C シナリオに及ぼす影響

世界のエネルギー関連の CO_2 排出量は、2022 年に 0.9%、数値にして 321 Mt 増加し、過去最高の 36.8 Gt に達した(IEA, 2023a)。上述の通り IRENA の 1.5°C シナリオでは、CO_2 排出量が急速かつ継続的に減少し、2050 年までにネットゼロに達することを想定している。2050 年に向けたアプローチでは、残されたカーボンバジェットの全体的負荷が少なくとも中立になるよう、エネルギー関連排出量だけでなく土地利用に関連する排出量も削減し、負にしなければならない。COP27 で緩和目標の引き上げが決定されたものの、1.5°C 目標とのギャップを埋めるためにはそれ以上の努力が必要である。COP の声明が定める軌道と 1.5°C シナリオの排出ギャップは、2050 年時点で 16 Gt も残る。

改訂強化版 NDC、LT-LEDS(パリ協定第 4 条第 19 項に規定)、ネットゼロ目標が完全に実施されれば、CO_2 排出量は、2022 年の水準と比較して CO_2 排出量を 2030 年までに 6%、2050 年までに 56%削減することができる。しかし、ほとんどの気候変動に関する誓約はまだ、詳細な国家戦略や国家計画に具現化されておらず、政策や規制を通して実施されてもおらず、十分な資金を充てられてもいない。いくつかの国は自国の NDC において、排出削減目標を実施する措置が緊急に必要であることを明らかにしているが、現在のエネルギー危機はそれをいっそう困難にしているおそれがある。

2030 年以降に関する NDC プロセス以外のコミットメントも浮上しつつある。2023 年 4 月までに 130 カ国、126 地域、246 都市が、2050 年に向けたネットゼロ・コミットメントを表明している(Net Zero Tracker, 2022)。民間企業も約束を行っている。世界の上場企業上位 2,000 社のうち 900 社近くが、ネットゼロ目標を検討していると言われる(Net Zero Tracker, 2022)。しかし、その多くは目標を裏付ける業務計画や戦略をまだ策定しておらず、達成できる成果については疑念がある(Energy Tracker Asia, 2022)。

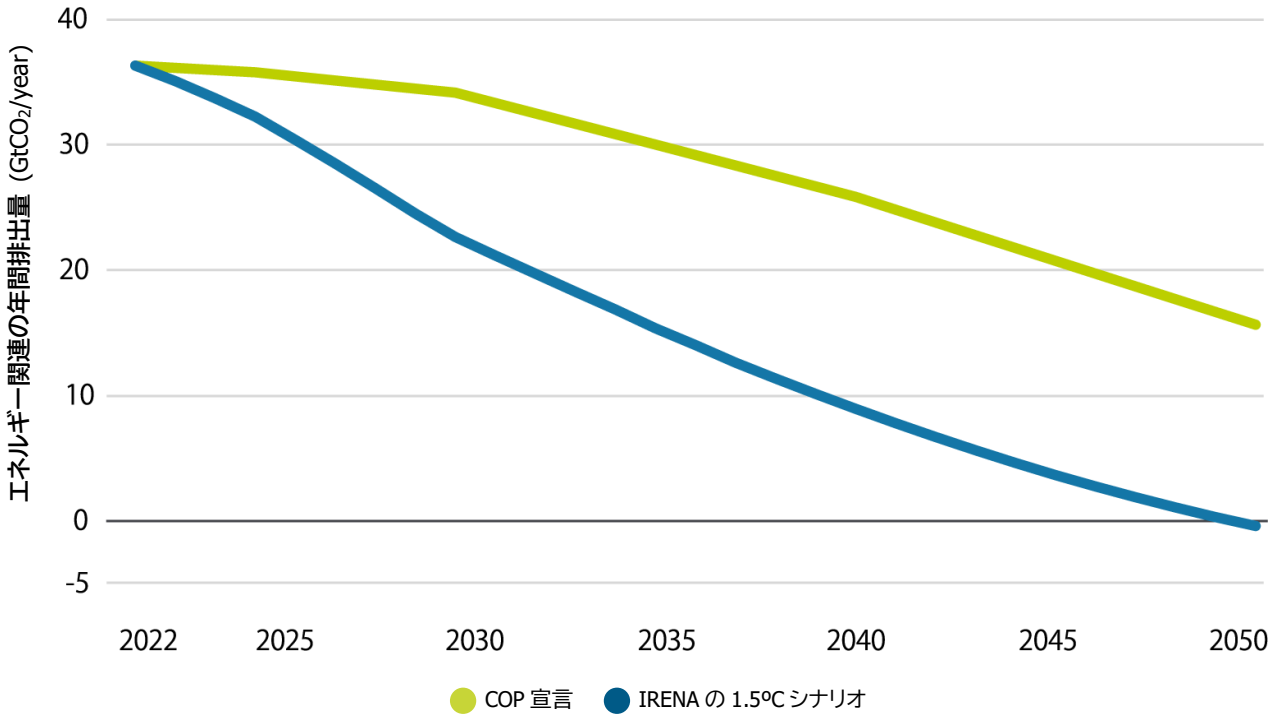
パリ協定については、2023 年 5 月までに 193 か国が批准し、194 か国が NDC を提出している[原注2]。NDC を新規提出または改訂した 166 か国のうち 99 か国(世界の GHG 排出量の 81%を占める)が、その意欲を引き上げ、目標を上方修正している。残りの 67 か国(世界の排出量の約 14%を占める)は、初回 NDC と同じ排出量削減目標、それを下回る目標、または初回 NDC と容易に比較しにくい目標を設定した NDC を提出した(Climate Watch, 2022)。強化はされたものの、新たな気候変動に関する約束は現行約束の予想排出量を大きく変えるものではなく、COP28 を前に発表された気候変動に関する約束と 1.5°C 目標の達成に必要なものとの間には依然として大きなギャップがある。図 1.6 は、1)COP27 に合わせて打ち出された宣言に沿った道すじ、および 2)IRENA の 1.5°C シナリオに基づき、世界の CO_2 排出量の将来予測値をギガトン(Gt)単位で示したものである。IRENA の 1.5°C シナリオと整合するためには、2030 年の CO_2 排出量は約 23 $GtCO_2$ である必要があり、それに対して、COP 宣言の道すじでは 34 $GtCO_2$ となっている。

図 1.6 COP 宣言と 1.5°C シナリオに基づく CO_2 排出量の道すじ

原注2 2022 年 10 月 16 日時点で、エリトリアはパリ協定を批准していないものの、NDC を提出している。

ネットゼロ・コミットメントは、
行動計画や戦略として
具現化する必要がある





注：COP 宣言の道すじは以下のデータに基づいて算定：(Meinshausen *et al.*, 2022)
COP = 締約国会議（国連気候変動会議）、$GtCO_2$ = ギガトン（二酸化炭素換算）

COP 宣言の道すじには、それぞれ 2022 年 10 月と 11 月の時点で締約国により伝達されている全ての NDC、LT-LEDS、ネットゼロ目標が含まれる。この軌道は、条件付きおよび無条件の貢献を含めた NDC の完全実施という最も高い意欲（すなわち、最も低い排出水準）について評価を行う「楽観的」な気候分析に基づいている。

再生可能エネルギーがエネルギー転換に不可欠であることは明らかだが、全ての NDC に再生可能エネルギー導入目標が盛り込まれているわけではない。2022 年 10 月半ば時点で、183 か国が NDC に再生可能エネルギーに関する要素を盛り込んでおり、そのうちの 143 か国が数値目標を掲げている。全ての目標のうち、電力に重点を置いているものが 108 件、温熱・冷熱供給、運輸、または調理に重点を置いているものが 31 件である。エネルギーミックス全体に占める再生可能エネルギー比率についてコミットメントを打ち出しているのはわずか 12 か国である。電力部門における再生可能エネルギーについて明確な目標を掲げている 108 か国のうち、47%は増加目標のみを掲げ、ほとんどの場合は設備容量(GW)で示しており、発電電力量(GWh)を目標に掲げているのはわずかである。電源構成に占める比率として目標を定義している 61 か国のうち、13 か国は達成を公約した再生可能エネルギー導入率が 25%未満であり、23 か国は 25～59%、13 か国は 60～89%、12 か国は 90～100%である(IRENA, 2022e)。

ボックス 1.3　パリ協定のグローバル・ストックテイク

グローバル・ストックテイクとは、温室効果ガス排出量の削減、気候影響への適応と強靭性の構築、気候危機への取り組みに必要な規模や範囲に合わせた資金援助を目指す世界的な努力の進捗状況を評価するものである。その成果は、パリ条約の目標達成のために、残余ギャップとそれを埋める機会に関する貴重な情報をもたらすと考えられる。

IRENA の『世界エネルギー転換展望』(WETO)では、「現行計画シナリオ」と「1.5°C シナリオ」における 2030 年に向けた目標のギャップを追跡し、技術的手段(第 1 章第 2 節)、政策(第 2 章)、投資(第 3 章)に関する詳細な分析によって、グローバル・ストックテイクの議論に貢献するものとなり得る。

IRENA はまた、各国と緊密に協力し、再生可能エネルギーに関する政策や戦略の策定や実施を支援している。これには、各国がエネルギーミックスに占める再生可能エネルギーの比率を高めるための技術支援や能力構築の提供(第 1 章第 4 節)などがある。この取り組みは、グローバル・ストックテイクをはじめとする多くの国際プロセスにとって有益となり得る。

IRENA のロードマップは、各国が特定の再生可能エネルギー技術の導入に関する目標を設定し、政策を策定するための枠組みを提供する。例えば、IRENA は、風力発電、太陽光発電、水力発電、バイオエネルギーなど、幅広い再生可能エネルギー技術について技術ロードマップを策定している。これらのロードマップは、そうした技術の現状について、さらにはその成長と発展の可能性について、包括的なアセスメントを提供する。また、そうした技術の導入を支援し得る政策および規制枠組みのほか、技術的・制度的障壁への対策についても手引きを提供する。

これらの技術ロードマップを提供することにより、IRENA は、各国の再生可能エネルギー技術の導入のための効果的な政策や戦略の策定を支援し、ひいてはそれがエネルギー転換の加速と温室効果ガス排出量の削減に役立つ。また、これらのロードマップは、さまざまな再生可能エネルギー技術がパリ協定の目標達成に貢献する可能性を示すことによって、グローバル・ストックテイクのプロセスに貴重な情報を提供している。

全体的に、IRENA はパリ協定の目標達成に向けた進捗状況を評価し、再生可能エネルギーに関するさらなる行動をとる機会を明らかにすることによって、グローバル・ストックテイクのプロセスに重要な貢献を行うことを目指している。



NDC に盛り込まれた再生可能エネルギーに関する誓約や目標を実現するためには、国家エネルギー計画や法律など、各国それぞれのエネルギー制度の枠組みにおいて設定したエネルギー目標と整合させる必要がある。2022 年 10 月半ばの時点で、国の政策や計画に再生可能エネルギー電力の目標を盛り込んでいる国は 149 か国であるが、そのうち NDC に同等の目標を盛り込んでいるのは 82 か国のみである。ほとんどの国では、NDC の再生可能エネルギー目標は国家エネルギー計画に盛り込まれた目標と整合していない(IRENA, 2022e)。NDC の再生可能エネルギー目標と国家エネルギー計画を整合させることによって、目標がより有効で信頼性の高いものとなる。そうすることで、それらの目標は、投資家、開発者、その他サプライチェーン全体に亘る関係者に向けて意図されたシグナルを増強し、再生可能エネルギー部門を強化することができる。場合によっては、国家目標を設定または改訂する必要がある。別の場合には、次回の NDC 提出時に反映させる必要がある。

世界が IRENA の「1.5°C シナリオ」に基づくエネルギー転換を 2050 年までに実現する道すじを進み続けるためには、2030 年に向けた国家計画や戦略で定めた再生可能エネルギー電力目標の意欲レベルをほぼ 2 倍に引き上げる必要がある。実際、意欲的でない目標は実質的に再生可能エネルギーを制限する役割を果たし、その導入を促進するのではなく妨げる可能性がある。現行目標は市場ペースを下回っており、最近の導入レベルは停滞している状況であるため、より高い目標でも十分に達成可能である。

現在、各国が国家目標として 2030 年までに目指している再生可能エネルギー電源の年間導入量の増加は、平均して 262 GW である。これは過去 2 年間の導入量を下回っている。COVID-19 パンデミックやそれに伴うサプライチェーンの寸断、ウクライナ危機、世界的なインフレといった状況にもかかわらず、2022 年と 2021 年の新規設備容量はそれぞれ 294 GW と 264 GW であった。

多くの途上国は NDC に意欲的な再生可能エネルギー目標を掲げているものの、そのほとんどは先進国による外部支援を条件としている。例えば、小島嶼開発途上国(SIDS)は 2030 年までに 11.5 GW の容量を達成することを目標としているが、その半分以上は、融資、技術支援、技術移転、能力構築、その他の各国の状況に応じた支援という形で国際支援を受けることを条件としている(Rana and Abou Ali, 2022)。そのような支援の提供により、途上国は再生可能エネルギー源を活用して、気候変動による脆弱性を緩和し適応するとともに、エネルギー安全保障と持続可能な社会経済的成長を確保することができる。



NDCと国家エネルギー計画の再生可能エネルギー目標を、より整合させる必要がある

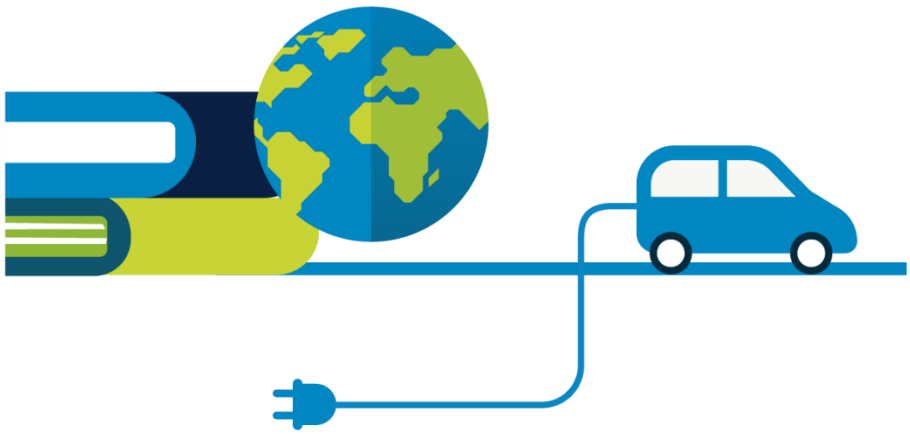
ボックス 1.4　長期エネルギーシナリオ(LTES)と長期低排出発展戦略(LT-LEDS)の整合状況の分析から得られた知見

気候および再生可能エネルギーのコミットメントは、実行を伴わなければならない。約束と国家エネルギー計画との整合が優先課題であるのは、NDC だけでなくより長期の戦略についても同様である。IRENA(2023d)の報告書 *"Long-term energy scenarios and low-emission development strategies: Stock-taking and alignment"* では、45 か国を対象に、24 件の公式な長期エネルギーシナリオ(LTES)文書と 36 件の長期低排出発展戦略(LT-LEDS)を比較し、この二つのプロセスが制度面と技術面でどれほど整合しているかを評価し、改善点を調査した。

この報告書は、調整、ステークホルダーの協議、刊行形態など、LTES と LT-LEDS の報告のために策定されたガバナンス枠組を検証している。また、インフラ、社会的要因、その他の制約など、シナリオを補足する要素にも着目している。

この報告書によると、LTES と LT-LEDS のプロセスを整合させることによって緩和計画の堅牢性を向上させることができる。複数の省庁あるいは省庁横断的な取り組みによって策定された計画書は、転換にかかわるより多くの要素を考慮したシナリオを提示することができる。 また、LTES と LT-LEDS のプロセスは、さまざまな形で補足し合うことができる。LTES は、エネルギーの生産、送配電、貯蔵に関する定量的表現が LT-LEDS より 10～20%多く、LT-LEDS は、社会経済的要素に関する定量的表現が LTES より約 10～15%多い。LTES と LT-LEDS のいずれも、シナリオにおける水素と合成燃料に関する表現を改善する必要があるが、これらの要素について定量的表現を行っているのは全てのシナリオのうち 50%未満である。そのため、これらの技術の適用可能性が過大評価され、投資配分が不適切になるリスクもある。

少なくとも、気候変動緩和戦略はシナリオに基づいて策定することが推奨される。なぜならば、これにより計画とその結果生じる提案の調整を科学的により堅牢に行うことができるためである。2022 年 10 月時点で公表されている 53 件の LT-LEDS のうち 36 件が、代替可能な道すじや目標を説明し、長期目標を達成するために必要な短期的・中期的な政策を定量的に評価する主なツールとして、シナリオを用いている。



1.4 エネルギー危機およびそのエネルギー転換への影響

ここ数年、世界的な事象がエネルギー転換と気候行動に複雑な作用を及ぼしている。COVID-19 パンデミック後の需要回復、悪天候、化石燃料供給の減少によりもたらされた世界的なエネルギー危機は、ウクライナ危機の影響により 2022 年初めに悪化した。エネルギー価格の急上昇は、世界中の国々に直接的または間接的に影響を及ぼした。欧州ではエネルギー供給が逼迫、特にロシアからの天然ガス供給が逼迫した。それに続く物価高は欧州全体の家庭と企業に影響を及ぼし、食料生産やその他の産物にも波及し、脆弱な家庭や途上国に影響を及ぼした(UN, 2022)。世界で最も脆弱な地域のうち、サハラ以南アフリカでは、2022 年に極度の貧困が 6%増加しており(IEA, 2022a)、エネルギー危機が地域の経済的圧迫に輪をかけている。

このエネルギー危機を受け、多くの国々の政府が供給不足に対応し、値上がりを緩和する対策を発表した。需要削減、再生可能エネルギー導入の加速、グリーン水素への支援に重点を置いた対策もあるが、さらなる化石燃料投資の呼びかけや、エネルギー転換とは相容れない他の措置を講じた対策もある。

欧州委員会は、2022 年 5 月に REPowerEU 計画を提示した。多様性、省エネルギー、クリーンエネルギーの加速に重点を置いたこの計画は、2030 年より十分前に、欧州連合(EU)がロシア産化石燃料への依存を脱却できるようにすることを目指している。欧州グリーンディールと REPowerEU 計画の一環として、EU は 2023 年 3 月、より強力な法整備によって再生可能エネルギーの導入を加速することで暫定合意した。この合意により、EU の 2030 年に向けた拘束力のある再生可能エネルギー目標は 42.5%に引き上げられ、意欲的な目標は 45%となった(European Commission, 2023)。また、EU は水素インフラも推進しており、2030 年までに 10 Mt のグリーン水素を製造し、さらに 10Mt を輸入することを計画している。スペイン、フランス、ポルトガルは、イベリア半島からフランスやその他の欧州諸国に水素を輸送する海底パイプラインを敷設し、EU のエネルギー独立性を強化することで合意している(Sullivan, 2022)。

途上国が意欲的な
再生可能エネルギー目標を
実現できるよう、
支援が必要である



同時に、2022 年 2 月にウクライナ危機が勃発して以来、浮体式および固定式ターミナルや新規パイプラインなど、液化天然ガス(LNG)の新規インフラへの少なくとも 500 億米ドルの投資が発表されている。このような輸入多様化への投資のほとんどは、欧州諸国、とりわけフィンランド、ドイツ、ギリシャ、イタリア、オランダ、スペインにおいてなされている。NLG 貯蔵ターミナルの新設により、EU は少なくとも 600 億 m^3 の年間容量を獲得する(Aposporis, 2022; Bloomberg, 2022; Esau, 2022; Habibic, 2022; Jewkes, 2022; Karres, 2023; Kurmayer, 2022; Landini, 2022; Reuters, 2022a, 2022b; Sharma, 2022)。さらに EU は、天然ガスを持続可能な開発のための「過渡的」エネルギー源と分類し、該当プロジェクトについて技術的基準と排出基準を定める法案を可決した。

欧州では、家庭や企業を支援するため、数か国の政府がエネルギー価格の上昇を緩和する消費者補助金を提供した。その結果、2022 年における化石燃料補助金の推定額は過去最高となった(IEA, 2023b)。例えばフランス政府は、石油価格の上昇を緩和するために農家に補助金を支給した。2023 年には、家庭向け電気・ガス料金の上昇に 15%の上限を設置すると発表した(Struna, 2022)。英国政府は、「光熱費支援制度」と「光熱費支援制度代替給付金」を導入し、2022～2023 年冬期の光熱費を補助する一時金 400 ポンドを家庭に支給した(Mawhood, Bolton and Stewart *et al.*, 2022)。ドイツ政府は、エネルギー価格高騰の影響を緩和するため、2024 年まで最大 2,000 億ユーロ相当の救済パッケージを導入することで合意した(Amelang and Wettengel, 2022)。

多くの国々では再生可能エネルギーを投資リストの筆頭に位置付けているものの、最終的に LNG 契約やインフラに関連する座礁資産を抱えるリスクがあり、いずれの場合も天然ガスの「フェーズアウト(段階的廃止)」がより難しくなる。各国政府は当然ながらエネルギー危機への短期的対応を優先するだろうが、同時に戦略的方向を維持する必要がある。導入を拡大し、長期的な転換目標の達成を支援するためには、包括的な対策が必要である(表 1.2 を参照)。再生可能エネルギーとエネルギー効率化は気候コミットメントと調和し、全ての人にとってエネルギー安全保障とエネルギー低廉性の両方を高めるものである。多国間行動は不可欠であるが、それぞれの国や地域が現行の資源、インフラ、資金アクセス、現地固有の課題に合わせて独自の対応を策定する必要がある(UN, 2022)。

再生可能エネルギーと
エネルギー効率化は、
エネルギー危機の緩和にも
エネルギー転換の実現にも役立つ



表 1.2　エネルギー転換を加速する主要対策

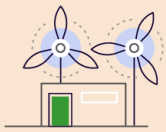
支援的な物理インフラ



- エネルギー転換に向けた統合的かつ部門横断的なインフラ計画に取り組み、意欲的な拡大目標を掲げる（例：電力システム、電気自動車(EV)充電インフラ、熱供給ネットワークの全てを連携させ、変動性再生可能エネルギー電力の最適化を図る）。
- 市場の障壁がある場合、インフラ投資を促すインセンティブを提供する。
- 環境・社会影響評価に支障をきたすことなく大規模インフラ事業の許可手続きを簡素化し、社会的受容が醸成されるようにする。
- 新築または改築建築物について義務的または強制的な目標を設置する（例：EV 充電器の数、温熱・冷熱供給ネットワークへの接続）。
- 必要なインフラ開発により多くの公的資金を提供する（例：送電線のような資産の直接所有などによって）。

政策および規制

電力部門



- 変動性再生可能エネルギーの大量導入を可能にする電力システムを、その技術的・経済的特性を認識したうえで採用する。それには、オークション方式の長期調達と短期柔軟性市場による電力の二方式調達などが考えられる。
- 環境・社会影響評価に支障をきたすことなく再生可能エネルギー電力プロジェクトの許可手続きを簡素化し、社会受容性が醸成されるようにする。
- 電力システムの拡張やその他のインフラ開発と再生可能エネルギー電力の導入のタイミングを合わせ、ボトルネックが生じないようにする。
- 再生可能エネルギー調達プロセスの設計（例：オークション）を、最低価格に留まらない目的（例：現地産業の発展）のために行い、サプライチェーン断絶のリスクをステークホルダー間に分散する設計要素（例：構成要素の指数化）を検討する。
- 導入したソリューションへの公平なアクセスと社会経済的便益の配分を支える先進的な方法で、自家消費に関する政策を策定する。

最終消費部門 – 家庭・業務、産業、運輸



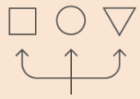
- 運輸部門の燃料効率基準、産業および家庭・業務部門の最低効率基準など、エネルギー効率化を図るプログラムや対策を設計する。エネルギー充足度向上策を通して行動変容を促す。
- 公共、商業、家庭用建築物における再生可能エネルギー利用を促進するよう、建築法規を適用または改定する。
- 行動変容を促進する（例：交通需要を低炭素輸送モードにシフトする、室温を調整する）。
- 低炭素の工業製品や原料を調達するよう、公的資金を動員する。

▸続く

(続き)表 1.2　エネルギー転換を加速する主要対策

政策および規制(続き)

部門横断的・分野横断的政策



- 化石燃料電力収益の棚ぼた利益をエネルギー転換技術に再投資の義務付け、化石燃料への補助金の削減、化石燃料価格が下落した場合の CO_2 価格の引き上げ／新規導入などの財政政策を導入する。そのような施策による社会経済的便益が公平に分配されるようにする。暖房用燃料の課税改革、再生可能エネルギーの VAT(付加価値税)免除などを実施する。
- 公的資金(国内および国際レベル)を増加し、その配分手段を戦略的に策定、選定、実施する。これには、(1)助成金、還付金、補助金などの政府支出、(2)既存および新規発行の債券、信用証券、譲許的融資やブレンドファイナンス、保証、(3)株式や直接的資産所有(送電線やプロジェクト建設用地など)などがある。
- 「リスク」をより包括的に定義し、投資家中心の狭義の定義(例:採算の取れないエネルギー資産への投資リスク)から脱して、より幅広い環境的・社会的リスクを含める。
- 引き続き公的政策や公的資金を活用して民間資本を呼び込む。
- 持続可能なガバナンス、エネルギー資金と気候資金、技術とイノベーション、地域電力システム、グリーン水素開発など、広範な関連分野にまたがる国際協力を強化する。
- 国家バイオエネルギーおよび／または水素戦略(部門別優先事項など)を策定し、バイオエネルギーと水素が脱炭素化において最も適切な役割を果たせるようにする。
- 鉄鋼のようなエネルギー集約型製品、再生可能エネルギー技術、蓄電池、自動車などについて、循環経済アプローチ(リデュース、リユース、リサイクル)を奨励する／義務付ける。これにより、エネルギー需要もクリティカルマテリアルへの需要も削減することができる。
- SDGs の目標 7 の普遍的アクセス目標を達成することに、より大きな重点を置く(国際協力によるものを含む)。
- 開発金融機関の既存の融資業務を改革し、より多くの助成金や譲許的融資を、特に過少投資に直面し債務支払い困難に陥っている可能性がある国に提供する。

雇用および技能



- 再生可能エネルギーを教育課程に取り入れ、技術教育、職業教育、訓練機会を拡大する。
- 各再生可能エネルギー部門における将来の職業ニーズを予見した努力を強化し、業界団体や訓練機関と協力して計画の連携を図る。
- 女性、若者、マイノリティの訓練機会へのアクセス拡大を担保する。
- 化石燃料産業の労働者を再生可能エネルギー部門で再訓練または再認定する道すじを策定する。この訓練のために公的資金を投入する必要がある。

1.5 結論

本章では、1.5°C の気候目標が多くの既存ソリューションを含む幅広い政策や技術的戦略によって達成可能であることが示されている。再生可能エネルギーやクリーン水素、持続可能なバイオマスによる発電や、電化、エネルギー効率化は、転換の推進力となっているが、転換の規模と範囲は、エネルギーシステムの急速かつ体系的な転換によってのみ達成可能である。現行の化石燃料に基づくシステムから迅速に脱却することは明らかに不可欠である。電力部門における再生可能エネルギーの大規模な拡大に加え、すべての最終消費部門において、再生可能エネルギーの直接利用だけでなく、大幅な効率向上、プロセス変更、循環経済のアプローチ、行動変容についてコミットする必要がある。

第 2 章では、エネルギー転換によって個々の部門がどのように変化を遂げるかを検討し、それを実現し得る政策アプローチについて論じる。



第 2 章

部門別の転換の道すじと支援政策



第2章の要点

電力部門

- 再生可能エネルギー電力のコストは世界的に低下し続けており、今や再生可能エネルギーはほとんどの地域で最も安価な発電方式となっている。2021 年には、発電コストが化石燃料電源の新規設備容量のうち最も安価な電源を下回った再生可能エネルギー電源の設備容量は 163 GW に達した。これは、世界全体の再生可能エネルギー電源の新規設備容量の 73%を占める。新たに運用を開始した系統用太陽光発電(PV)プロジェクトの世界加重平均均等化発電原価(LCOE)は、2010 年から 2021 年までの間に 88%低下した。集光型太陽熱発電(CSP)の LCOE は 68%低下し、陸上風力発電と洋上風力発電ではそれぞれ 68%と 60%低下した。再生可能エネルギーは今や電力部門における容量を増加させるための標準的な選択肢であり、投資の大部分を占めている。

- エネルギー転換には再生可能エネルギー発電の急速な拡大が必要である。1.5°C シナリオにおいては、2050 年までに最終消費部門の急速な電化(エレクトリフィケーション)が起こり、その結果、世界の電力需要は 2020 年の水準の 3 倍に増加して 87,000 TWh 以上に達する。1.5°C シナリオでは、世界の電源構成に占める再生可能エネルギーの比率は、2020 年から 2050 年までの間に 28%から 91%(7,468 TWh から 82,148 TWh)へと増加する。再生可能エネルギー電源設備容量は、同じ期間に 2,813 GW から 33,216 GW へと拡大することになり、2030 年から 2050 年まで年間 1,066 GW の新たな再生可能エネルギー電源の容量増加が必要になる。変動性再生可能エネルギー(太陽光発電、風力発電)は世界の電力部門の転換の主役となり、発電電力量の 70%を占める。日ごとの変動や季節間変動に対応するために、スマートでデジタル化した柔軟性強化策が必要になる。

- 1.5°C シナリオを実現するために必要な再生可能エネルギー電力の大幅な増加を支えるため、各国は意欲的な目標や政策を採用し、実施することが求められる。入札は、競争を活用すると同時に、システム統合、社会経済的便益、ローカルサプライチェーンによるエネルギー安全保障と独立性の強化といった、より幅広い政策目標を追求するためにも良い方法である。再生可能エネルギー拡大を支援する政策手段のほか、エネルギー転換には、環境的影響や社会的影響に対処する一方でプロジェクト実施の遅れを最小限にする許認可プロセスなど、関連プロジェクトの実現を支援する環境も必要である。

▸続く

第2章の要点

エネルギー転換の燃料

- 水素およびその派生物(アンモニア、メタノールなど)のような燃料は、エネルギー転換において、とりわけ産業プロセスや特定の輸送方法において、独自の役割を果たす。1.5°C シナリオでは、これらの燃料の総需要を 2030 年までに 15 EJ に、そして 2050 年までに 63 EJ に増やす必要がある。2050 年までに水素の総需要はクリーン水素のみで満たされる必要があり、その大部分はグリーン水素である。そのためには、再生可能エネルギー電源と電解装置の両者の容量を急速に拡大する必要がある。グリーン水素はまだ揺籃期にあり、ニッチから主流のエネルギー源へと規模を拡大するには政策支援が必要である。政策支援には、事前の計画立案、目標設定、金融・財政支援、グリーン水素割当などが含まれる。

- バイオエネルギーは、エネルギー転換において主要な役割を果たす。IRENA の 1.5°C シナリオでは、一次エネルギー供給量に占めるバイオエネルギーの比率は 2050 年までに 22%に拡大する。総最終エネルギー消費量(TFEC)に占めるバイオエネルギーの比率も、2050 年までに世界で 15%まで拡大する。この消費量のうち、産業部門が大部分を占め(52%)、運輸部門(23%)、家庭・業務部門(18%)、その他のカテゴリー(8%)がこれに続く。バイオエネルギーには、バイオ燃料混合の割当、指令、義務化、バイオエネルギー関連のプロジェクトやインフラへの助成金、補助金、税金還付、新技術の研究、開発、実証(RD&D)といった形の政策支援が必要である。バイオエネルギーの環境的、社会的、経済的便益を最大化するために、各国は、バイオマス原料やサプライチェーン全体の持続可能性を確保する規則や認証を実施し、パートナーシップを促進しなければならない。より広範な視点では、地域の状況に基づき、他部門の戦略との調整を図ったうえでバイオエネルギーの導入を行うことが望ましい。

02

▸続く

第2章の要点

最終消費部門

- 脱炭素化が困難な産業部門では、幅広いソリューションを 1.5°C 目標に整合させる必要がある。これには、グリーン水素、バイオエネルギー、直接電化、CCS と BECCS の統合による残余排出対策、さらにはエネルギー効率化と循環経済の原則といった選択肢がある。これらの取り組みにより、部門のエネルギー消費量は 2050 年までに約 180 EJ まで減少し、主なエネルギーキャリアは電力(27%)、次いでバイオエネルギー、地域熱供給、その他の再生可能エネルギー(27%)、グリーン水素(22%)となる。これらのソリューションを拡大するには、再生可能エネルギーに基づく低炭素の材料や製品に対する初期の市場需要を生み出し、それらのコスト競争力を向上させ、新技術の進展を加速し、知識と経験の共有を促進するさまざまな政策が必要になる。主な政策手段には、産業別の脱炭素化ロードマップ、グリーン公共調達、研究開発への支援、循環経済アプローチなどがある。途上国の産業脱炭素化プロセスを支援するには、技術移転や技術投資における国際協力が緊急に必要とされる。
- 家庭・業務部門では、エネルギー効率化がエネルギー転換の主要な実現要因である。効率の高い電化製品の普及を拡大し、既存建物の改修・改築を急速に進める必要がある。また、ヒートポンプは、暖房や温水供給の脱炭素化および冷房の効率化に重要な役割を果たす。調理は、世界的に化石燃料や伝統的バイオマスに大きく依存しているが、効率の高い電気調理器や持続可能なバイオマスの導入を急速に進める必要がある。1.5°C 目標に調和する道すじでは、同部門における再生可能エネルギーの比率を 2050 年までに 86%に拡大する必要があることが予測されている。これには、発電や地域温熱・冷熱供給の大幅な脱炭素化、バイオエネルギー、再生可能エネルギーの直接利用(太陽熱、地熱)などがある。ネットゼロ建物への転換には、既存建物と新規建物の両者におけるエネルギー需要を削減する対策や、温熱・冷熱供給における電化や再生可能エネルギーの直接利用を促進する政策が必要になる。この部門で広く採用されている政策には、建築法規、熱供給のために化石燃料を利用することの禁止、改修、効率化、再生可能エネルギー利用を促進する金銭的・財政的インセンティブ、ネットゼロ建物に関する目標設定、電化製品に関する最低エネルギー消費効率基準、公共建築物における太陽熱温水利用の義務付けなどがある。
- 運輸部門では、直接電化が道路輸送と鉄道輸送の主流となり、グリーンアンモニアとグリーンメタノールが海運分野の鍵となる。一方、航空輸送分野では合成燃料とバイオ燃料の組み合わせが必要になる。2050 年までに、運輸部門の最終需要の 52%を電力が占め、次いで水素とその派生物が 23%、バイオ燃料が 13%を占める。全体として、運輸部門の最終消費量に占める再生可能エネルギーの比率は、2050 年までに 84%に拡大する。道路輸送に関する政策は、電気自動車と充電インフラの規模の拡大を支援する必要がある。これに関連する政策手段としては、内燃機関(ICE)自動車の段階的廃止、ゼロ排出自動車に関する目標、ゼロ排出ゾーン、都市の規模での優遇措置などが考えられる。海上輸送と航空輸送については、政策立案者や産業は、国際プラットフォームを通してパリ協定に整合する目標を採用することが望ましい。国家は、再生可能エネルギーを基本とする燃料を促進するための研究開発への財政支援や混合の義務付けといった取り組みによって、これらの目標を支えなければならない。

02

2.1 はじめに

エネルギー転換には、供給側の変化（第 2 章第 2～4 節で論じる）、そして需要側の変化（第 2 章第 5～7 節で論じる）が必要である。本章では、部門別および技術別に転換の詳細を論じ、2030 年と 2050 年までの将来的な見通しを提供する。分析により、エネルギー転換には多様な技術や戦略が必要となり、それには政策支援や実現支援策の実施が必要であることを示す。グリーン電力、グリーン水素、またはグリーン水素由来の合成燃料のような再生可能エネルギーは、全ての最終消費部門で中心的な役割を果たす。バイオエネルギーやバイオマス原料が果たす役割は、特に産業部門と運輸部門において拡大する。

2.2 電力部門

2.2.1 現状と傾向

再生可能エネルギー電源の設備容量と発電電力量

電力部門では、再生可能エネルギー電源の設備容量と発電電力量が順調に伸びている。2022 年には全世界で、再生可能エネルギーが新規設備容量の増加の 83%を占め、累積設備容量は 40%に達した。再生可能エネルギー電源の設備容量の増加は 295 GW に上り、再生可能エネルギー電源の設備容量の年間増加量としては過去最大となった(IRENA, 2023a)。再生可能エネルギーの優れた事業性に加えて政策の支援もあり、世界のエネルギー構成に占める再生可能エネルギーの比率は拡大傾向を維持している。とはいえ、概して導入は少数の国と地域に集中しており、中国、EU、米国が容量増加の 75%を占める。一般に再生可能エネルギーの大規模導入は電力システムが十分に発達した国々に関連しているが、それ以外の場所、特に電力へのアクセスが不十分な途上国においても導入を拡大する必要がある。

再生可能エネルギー電源の設備容量の急速な拡大を必要とするエネルギー転換において、電力部門は極めて重要である

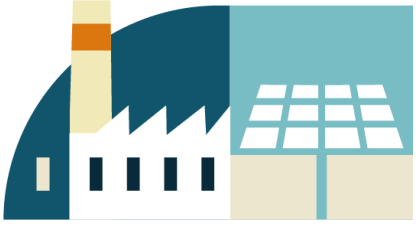
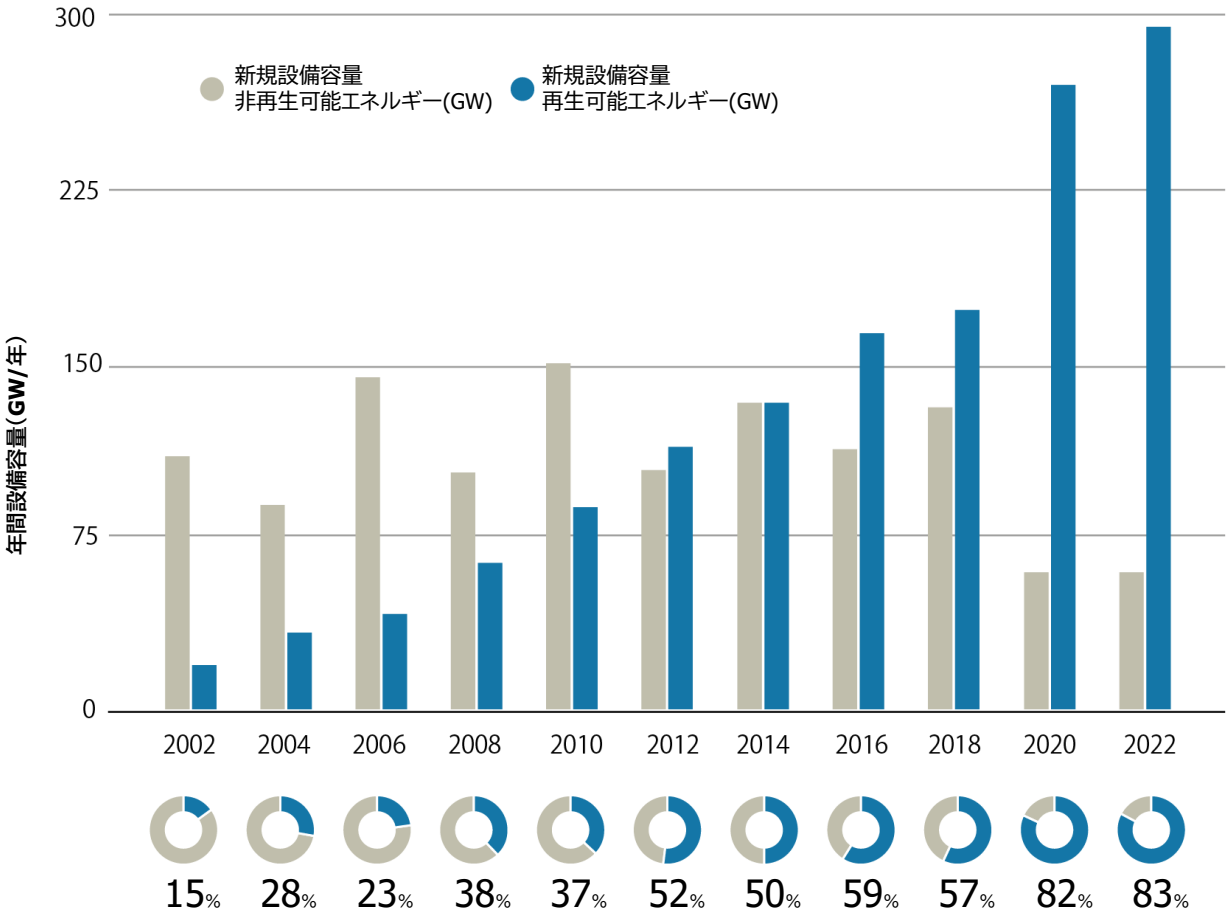


図 2.1　2002～2022 年における設備容量の年間増加量



注： GW = ギガワット

再生可能エネルギー技術の中でも、太陽光発電の設置が最も急速に伸びており、2010 年から 2022 年までの 13 年間で 26 倍に拡大した。これは、技術的進歩、高い学習率、政策支援、革新的な資金調達モデルに支えられた大幅なコスト削減による。2022 年末までに世界の太陽光発電の累計設備容量は 1,047 GW に達し、そのうちの 191 GW は 2022 年単独の増加量で、新規設備容量の 59%をアジアが占める(IRENA, 2023a)。

再生可能エネルギーは2010年以降大幅に拡大し、太陽光発電の設備容量は26倍に拡大した



風力発電は、2010 年から 2022 年までの 13 年間で 5 倍以上に拡大した。2022 年における世界の陸上風力発電の累計設備容量は、約 836 GW に達した。太陽光発電と同様、陸上風力発電市場でもアジアが累計設備容量 393 GW で首位に立ち、2022 年における新規設備容量の 55%超を占めた。洋上風力発電市場は依然として陸上風力発電市場より小規模で、2022 年末までの累計設備容量は 63 GW である。この総設備容量のうち、アジアと欧州が 50%ずつを占める(IRENA, 2023a)。

水力発電は引き続き、設備容量の点で最大の再生可能エネルギー電源である。2022 年における世界の水力発電設備容量(揚水発電を除く)は 1,256 GW(再生可能エネルギーの総設備容量の 37%)に達した。バイオエネルギー、地熱、太陽熱、海洋エネルギーといったその他の再生可能エネルギー発電技術も、元の規模は小さいが、過去 10 年間で急成長している。その他の再生可能エネルギー総設備容量は 2022 年に 171 GW に達し、そのうちバイオエネルギー発電が 87%を占める(IRENA, 2023a)。

オフグリッド再生可能エネルギー電源は、累計設備容量(ユーラシア、北米、欧州を除く全地域)が 2022 年に 1,237 MW 増加して 12.4 GW に達し、2021 年の水準から 11%増加した。太陽光発電は 478 MW 増加して 5.1 GW に達し、オフグリッド水力発電設備容量は 2021 年の水準と同程度に留まり、残りの増分は各種バイオエネルギー発電の拡大によるものである(IRENA, 2023a)。

再生可能エネルギーによる発電コストとエネルギー価格の変動性

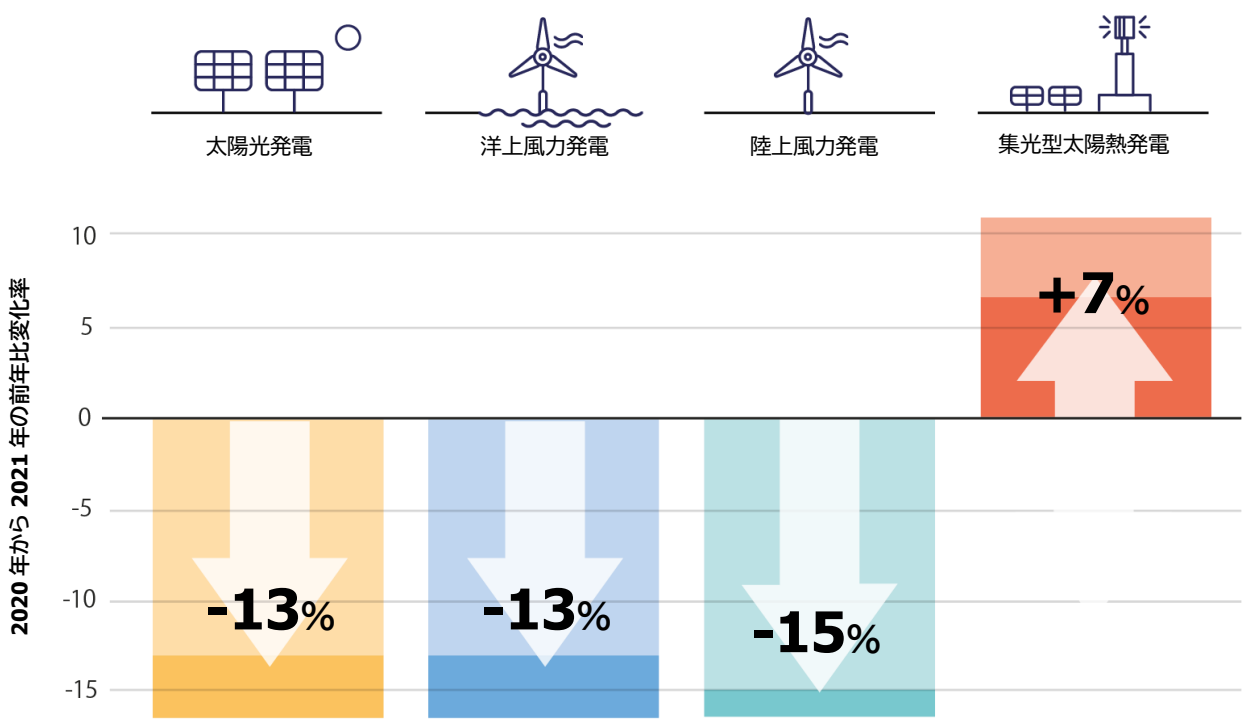
再生可能エネルギーは、化石燃料の使用を削減して最終的には廃止し、化石燃料の価格変動に対する各国のレジリエンス(強靭性)を高めるための世界的努力において、極めて重要な柱となっている。2021 年と 2022 年における石炭と化石燃料ガスの価格高騰により、化石燃料の競争力はさらに低下し、太陽光発電と風力発電への関心がさらに高まった。

再生可能エネルギー発電は、コストの低下により多くの地域で最も経済的な発電の選択肢となっている。2021 年には、発電コストが新規化石燃料発電の設備容量のうち最も安価な電源を下回った再生可能エネルギー電源の設備容量は 163 GW を超えた。これは、世界全体の新規再生可能エネルギー電源の設備容量の 73%を占める。2021 年に導入された新規プロジェクトが寿命全体に亘ってもたらす累計節減額は、割引前の額で少なくとも 1,490 億ドルに上る。このような直接的なコスト節減に加え、再生可能エネルギーの導入により、CO_2 排出量や局地的大気汚染の削減による大きな経済的便益も得られる。これらについても、エネルギー安全保障上の利点と同様、全体的便益を検討する際に考慮に入れる必要がある。

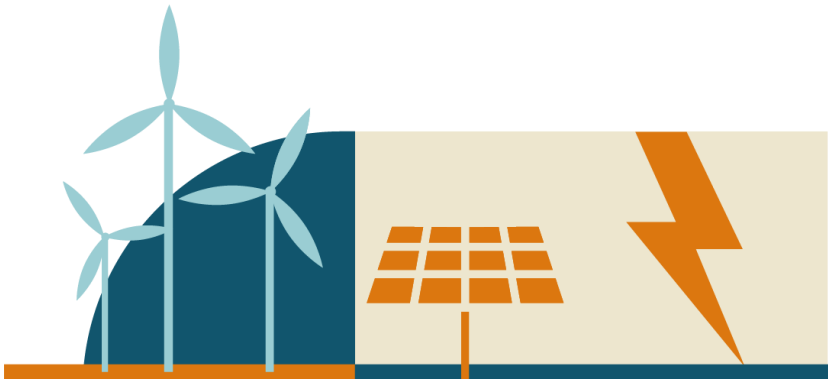
G20 諸国では、2010 年から 2021 年までの 12 年間で、最も安価な化石燃料電源よりも低コストの再生可能エネルギー電源の導入容量は全体として 786 GW に上った。

2010 年以降、再生可能エネルギー発電方式の競争力に劇的な変化が生じている。新たに運用を開始した系統用太陽光発電プロジェクトの世界加重平均均等化発電原価(LCOE)は、2010 年から 2021 年までの 12 年間で 88%低下した。一方、陸上風力発電、集光型太陽熱発電、洋上風力発電の LCOE は、それぞれ 68%、68%、60%低下した。2021 年における系統用太陽光発電の LCOE は前年比で 13%低下し、陸上風力発電と洋上風力発電の LCOE はそれぞれ 15%と 13%低下した（図 2.2）。

図 2.2　2020～2021 年における発電方式別の世界加重平均均等化発電原価の変化



再生可能エネルギーの発電コストは、
パンデミックにもかかわらず、
歴史的低下傾向を持続



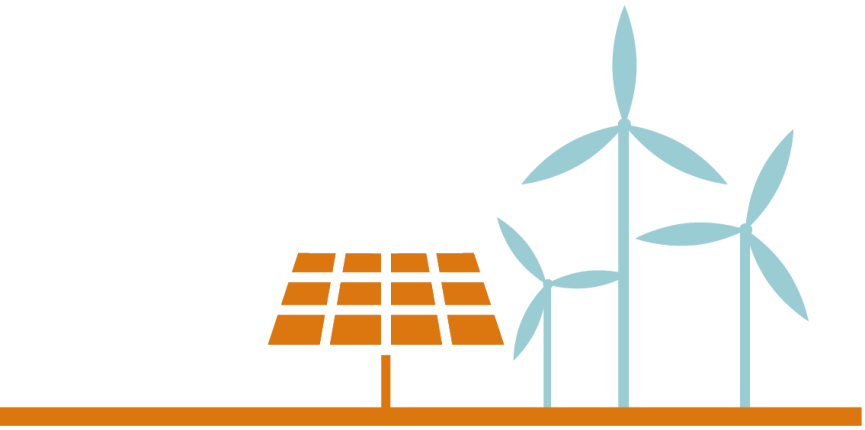
太陽光パネルと風車の価格

金銭的投資決定とプロジェクトの運用開始には時間差があるため、コモディティや再生可能エネルギー発電設備の価格高騰がプロジェクト費用に及ぼす影響は遅れて発生する。したがって、太陽光発電の世界加重平均原価は、陸上風力発電や洋上風力発電と同様、2021 年に低下した。しかし、2021 年に浮上したサプライチェーンの問題やコモディティコストの上昇にもかかわらず、同年 2021 年に運用を開始したプロジェクトの平均的な総設置コストには大きな増加は見られない。これは、運用を開始したプロジェクトごとに設備コストの増加が反映されるまでの時間差があるためである。

2021 年に運用開始した陸上風力発電プロジェクトの世界加重平均 LCOE は 0.033 ドル/kWh で、2020 年の 0.039/kWh より低下した。

新たに運用を開始した系統用太陽光発電プロジェクトの世界加重平均 LCOE は、2021 年に 0.055 ドル/kWh から 0.048 ドル/kWh へと低下した。その要因として、太陽光発電の世界加重平均総設置コストが 2020 年の 916 ドル/kW から 6%低下し、2021 年に運用を開始したプロジェクトでは 857 ドル/kW となったことがある。これは 2020 年に見られた 12%の低下より小幅であり、その理由は、2020 年末の太陽光パネル価格上昇がかなりの数のプロジェクトの総コストに多少の影響を及ぼしたためと思われる。総じてその影響は限定的であり、2021 年の新規設置プロジェクトについて国全体の加重平均総設置コストが上昇したのは、上位 25 市場のうち 3 市場のみである。

2022 年以降は多くの国で、太陽光発電と陸上風力発電による平均発電原価が増加している。陸上風力発電のほうが太陽光発電よりも原価の増加が広く見られ、増分も大きい。2020 年に始まったサプライチェーンの制約や 2022 年に始まったコモディティ価格のインフレはいずれも、現在、少なくとも陸上風力発電において、2021 年よりもはるかに広い範囲で影響が感じられる。世界規模で見ると、太陽光発電と陸上風力発電の導入率における中国の優位性とそれらの発電コストの継続的低下により、影響は弱められている。



しかし、上記の通り、これらの要因が 2021 年に運用を開始したプロジェクトに及ぼした影響は、多くの個別市場や世界全体において年間を通した加重平均 LCOE を引き上げるほど大きくはなかった[原注3]。2021 年末頃までに運用を開始した個別のプロジェクトのコストが 2020 年よりも高くなかったという訳ではないが、2021 年の全てのプロジェクトを平均した発電原価が 2020 年よりまだ低かったということである。IRENA のデータから推定できることには限界があるが、主に六つの要因に着目できると考えられる。

- 2021 年に運用開始した多くのプロジェクトの発注が行われたと考えられる 2020 年後半から 2021 年前半にかけて、全体的な設備コストの増加は緩やかであった。
- プロジェクトの規模が大きいほど購買力が大きく、リードタイムも長くなるため、値上がりが鈍化し、その影響が先送りされる。欧州以外でも、そのような大規模なプロジェクトがますます新規電源の中心となりつつある。
- ほとんどのプロジェクトに予備費があり、多くの場合、コスト増加の一部または全部を吸収していると思われる。
- 技術の向上（太陽光パネルの効率向上、風車の大型化など）と製造効率や規模の向上が続き、コモディティ価格上昇の影響が緩和されている。
- 中国は依然として太陽光発電と風力発電の新規電源の支配的市場であり、コモディティ価格と輸送コストは他国より低く、また、2021 年中は国内市場や政策の情勢も、少なくとも陸上風力発電に関しては、より低い価格設定に有利に働いていた。
- 再生可能エネルギー技術による発電コストの重要な決定要因である資本コストを分析したところ、2020 年と 2021 年に再生可能エネルギー発電プロジェクトの資金調達コストが非常に低かった。このことも、設備コストの上昇にもかかわらず 2022 年の LCOE が低かったことに貢献しており、プロジェクトの大部分は無リスク金利が急上昇する前の 2021 年に資金調達したものと考えられる(IRENA, 2023b)。

原注3 世界加重平均は、基本的な原価の変動がなくても変動する可能性がある。市場が異なれば原価構造が異なるからである。原価または性能に変動がなくても、新規電源における「高コスト」市場と「低コスト」市場の比率が変われば、世界加重平均原価が変動する可能性がある。

2050年までに電力部門を脱炭素化することが、1.5°C目標を達成するために不可欠である

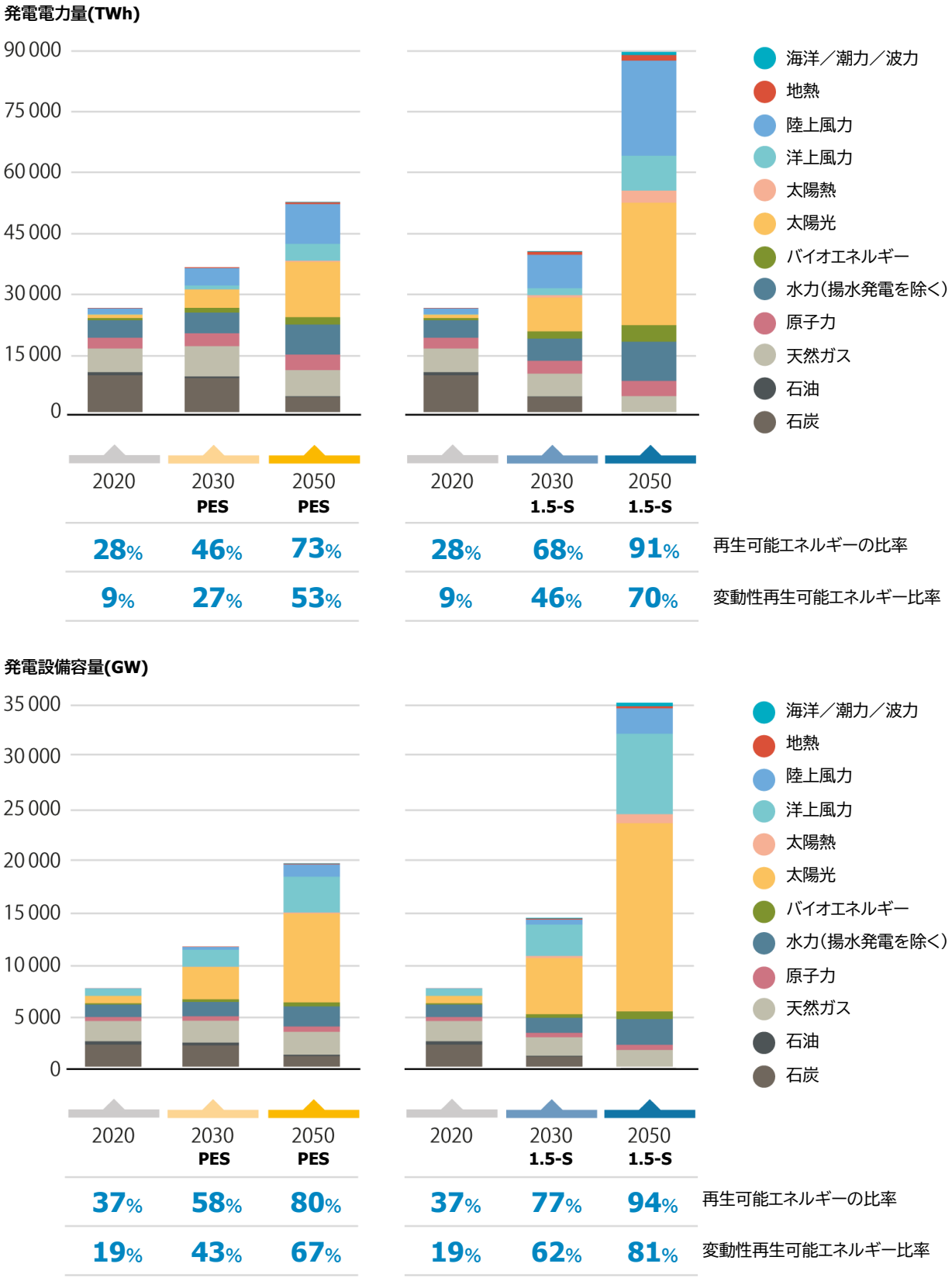
2.2.2 電力部門の転換：主要指標

電力部門は、世界の排出量の最大要因のひとつで、2022 年における CO_2 排出量の 40%を占める(IEA, 2023a)。2050 年までに電力部門を脱炭素化することは、気候変動に対応し、世界の温室効果ガス(GHG)排出量を削減するために、意欲的ではあるが不可欠の目標である。電化は電力部門の脱炭素化の主な実現要因であり、1.5°C 目標の達成のためにも、化石燃料発電から再生可能エネルギー発電への転換が必要である。

再生可能エネルギー技術の技術的ポテンシャルは、現在の世界の発電電力量をはるかに上回る(IRENA, 2022a)。実際、本報告書が展望する期間中の新規電源のほとんどは、再生可能エネルギーによるものと予測される。再生可能エネルギー電源の拡大を支援するため、それに適した発電プロジェクトのデータベースを今後 10 年間で作成し、その後は 2050 年までの数十年に亘る一連のプロジェクトを構築することが望ましい。現行計画シナリオ(PES)では、再生可能エネルギー電源の設備容量は 2030 年までに 6,773 GW、2050 年までに 15,835 GW に拡大する（図 2.3 および表 2.1 を参照）。電源構成に占める再生可能エネルギーの比率は 2020 年に 28%であったが、2030 年に 46%、2050 年に 70%以上に拡大する。しかし、現行計画シナリオにおいて想定される現行の計画は世界の気温上昇を 1.5°C 以内に抑えるには程遠い。我々が到達するべき場所と我々が向かいつつある場所のギャップは、年々広がっている。



図 2.3　世界の電源構成とエネルギー源別発電設備容量：2020 年、2030 年、2050 年における現行計画シナリオ(PES)と 1.5°C シナリオ



注:1.5-S = 1.5°C シナリオ、CSP = 集光型太陽熱発電、GW = ギガワット、PES = 現行計画シナリオ、TWh = テラワット時。バイオエネルギーには、バイオガス、バイオマス廃棄物、バイオマス固形燃料、バイオマス固形燃料＋CCS を含む。CCS = 二酸化炭素回収･貯留。

IRENA の 1.5°C シナリオにおいて、最終消費部門の消費電力量は、2020 年と比較して 2050 年までに 3 倍に増え、87,000 TWh を上回る。需要拡大に対応するため、電力部門では他のほとんどの部門よりさらに大規模な脱炭素化が行われ、総発電電力量に占める再生可能エネルギーの比率は 2030 年に 68%、2050 年に 91%に達する（表 2.1 を参照）。再生可能エネルギー電源の総設備容量は、2020 年の水準と比較して 2030 年までに 4 倍(11,174 GW)に、2050 年までに 12 倍(33,216 GW)に増やす必要がある。それは、再生可能エネルギー電源の設備容量の年平均増加量を 2020 年代では約 1,000 GW とし（2022 年における再生可能エネルギー電源の設備容量増加の 3 倍）、2050 年までに 1,100 GW に近づけることを意味する。

電力部門の大規模な脱炭素化とともに、発電電力量全体に占める石炭・石油火力発電の比率はこの 10 年で急速に減少し（石炭は 2020 年の 34%から 2030 年の 9%へ、石油は 2020 年の 3%から 2030 年の 0%へ）、2050 年までには完全に廃止される。2050 年までに、総発電電力量に占める天然ガスによる発電電力量は 5%、原子力による発電電力量は残りの 4%となると考えられる。

1.5°C 目標を達成するためには、世界中の全ての国で幅広い技術による再生可能エネルギー電源の設備容量を拡大することが求められる。各国におけるさまざまな再生可能エネルギー技術の浸透の度合いは、技術資源のポテンシャルや市場のコスト競争力によって異なる。導入の大部分が G20 諸国で行われると予想され、2030 年までに世界の再生可能エネルギー電源の設備容量の 80%以上を G20 が占めると考えられる。1.5°C の道すじに沿って進むためには、G20 諸国の再生可能エネルギー電源の設備容量を、2020 年の水準と比較して 2030 年までにほぼ 4 倍の 9,400 GW に、2050 年までに 10 倍近い 24,900 GW に拡大する必要がある。

太陽光発電と風力発電を中心とする変動性再生可能エネルギーは、世界における電源導入の主流となり、新規電源の大部分を占め、電力システムと市場に転換をもたらす。それは、発電電力量に占める変動性再生可能エネルギーの比率を 2020 年の合計 9%から、2030 年までに 46%、2050 年までに 70%に増やすということである（表 2.1 を参照）。この拡大を促すのは、豊富な資源の利用可能性、技術コストの削減、これらの技術の分散型設置特性、エネルギー貯蔵技術の進化、再生可能エネルギーの開発を支援する政府の政策である。

これらのエネルギー源の特性を考えると、電化率の向上を促進し、再生可能エネルギー電力を需要中心地に送るため、送電・配電系統の規模拡大と管理強化が必要である。電力貯蔵やスマート電化と併用することで、需要に柔軟に応えるとともに、非常に広範囲の地域にわたって再生可能エネルギーの出力抑制を最小限にすることができる（電力システムの柔軟性による便益に関する詳しい説明はボックス 2.1 を参照）。

電力システム全体にわたる有効な統合対策を講じることなく変動性再生可能エネルギー(VRE)を大量導入した場合、電力供給コストの上昇につながるため、両者を併せて拡大する必要がある。VRE 供給が低下する期間に容易にディスパッチ（給電）できる電源（貯水池式水力発電など）も非常に重要であり、最小コストで電力システムを設計するための鍵となる要素である。

現行計画シナリオに盛り込まれた既存の VRE 目標は、VRE の総設備容量を 2030 年までに 5,071 GW に増やすことである。これは、1.5°C 目標を達成するために必要な設備容量(8,990 GW)の半分をやや上回る程度である。IRENA の 1.5°C シナリオでは、太陽光発電の設備容量は 2030 年までに 5,400 GW、2050 年までに 16,200 GW を超える。風力発電の設備容量は、2030 年までに 3,500 GW を超え、2050 年までにほぼ 10,300 GW に達する。

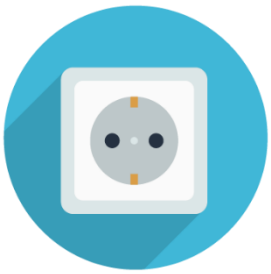
表 2.1　電力部門の主要業績指標：2030 年と 2050 年における現行計画シナリオと 1.5°C シナリオ

KPI.01 再生可能エネルギー（電力）

		従来	2030 年		2050 年	
		2020 年	PES	1.5°C シナリオ	PES	1.5°C シナリオ
総発電電力量 (TWh)	世界	26 991	36 119	40 140	52 436	89 878
	G20	22 616	29 560	32 408	41 867	66 273
総設備容量(GW)	世界	7 694	11 670	14 462	19 748	35 339
	G20	6 495	9 575	11 746	15 734	26 098
再生可能エネルギーの総設備容量(GW)	世界	2 813	6 773	11 174	15 835	33 216
	G20	2 435	5 959	9 359	13 144	24 868
総発電電力量に占める再生可能エネルギーの比率(%)	世界	28%	46%	68%	73%	91%
	G20	28%	48%	69%	74%	91%
総発電電力量に占める変動性再生可能エネルギーの比率(%)	世界	9%	27%	46%	53%	70%
	G20	10%	31%	50%	59%	76%
設備容量に占める再生可能エネルギーの比率(%)	世界	37%	58%	77%	80%	94%
	G20	37%	62%	80%	84%	95%
蓄電池貯蔵(GW)	世界	17	227	359	1 583	4 098
	G20	16	172	278	1 181	2 925
PES と比較して 1.5-S で回避された CO_2 排出量（2023～2050 年の累計排出量）						
排出量	世界	155 $GtCO_2$				
	G20	113 $GtCO_2$				

注： 1.5-S = 1.5°C シナリオ、G20 = 主要 20 カ国、$GtCO_2$ = ギガトン（二酸化炭素換算）、GW = ギガワット、KPI = 主要業績指標、PES = 現行計画シナリオ、TWh = テラワット時

今後数十年間、電力部門における再生可能エネルギー拡大の主役は太陽光発電と風力発電



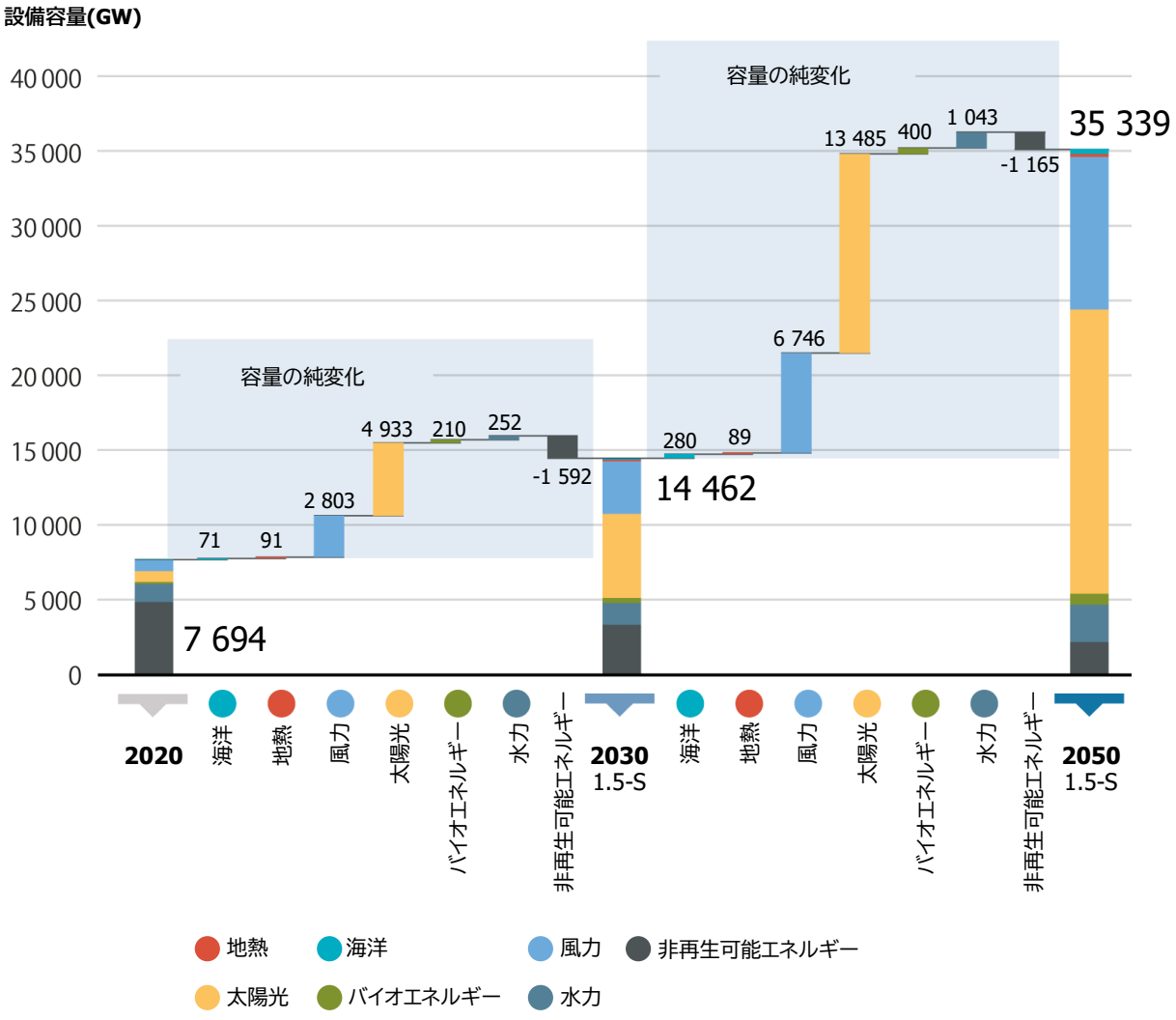
太陽光発電の設備容量は近年大幅に拡大しており、引き続き増加傾向を示している。先に述べたように、IRENA の 1.5°C シナリオでは、世界の太陽光発電の設備容量は 2020 年の水準と比較して 2030 年までにほぼ 8 倍に増加して 5,400 GW を超え、2050 年までに 18,200 GW を超える。これを実現するため、太陽光発電の設備容量の年間増加量は 2022 年に 191 GW だったが、2050 年までの間は平均 615 GW に増えることになる。太陽光発電のポテンシャルは、地域によって大きく異なる。この差異は、日射量のほか、土地の利用可能性や政策支援などの要因によるものである。世界の太陽光発電市場は G20 諸国が大部分を占め、市場規模は 2020 年の水準と比較して 2030 年までに 7 倍に増え、累計設備容量は約 4,530 GW に達し、2050 年までに 12 倍に増え、累計設備容量は 13,315 GW に達する。これらの目標を達成するには、2023 年から 2050 年までの 28 年間における設備容量の年平均増加量をほぼ 450 GW にする必要がある。

風力発電は過去 10 年間に急速に拡大し、設備容量は 2012 年から 2022 年までの間に 3 倍に増えた(IRENA, 2023a)。IRENA の 1.5°C シナリオによれば、風力発電は世界で最大の電源のひとつになり、設備容量は 2050 年までにほぼ 10,300 GW まで拡大する。過去 10 年間における風力発電の設備容量の年平均増加量は 55 GW で、2022 年の増加量は 75 GW だった。一方、本展望期間全体では、風力発電の設備容量の年平均増加量は 335 GW になる。世界の陸上風力発電は大幅に拡大し、設備容量の年平均増加量は 280 GW 近くになり、2020 年代中に 3,040 GW に達する必要がある。この拡大はさらに加速し、2050 年までに 7,820 GW 近くに達する必要がある。これは、2020 年の水準の 11 倍以上である。中国、米国、カナダ、ブラジル、そして多くの欧州諸国は、陸上風力発電の高いポテンシャルを有している。

1.5°C シナリオでは、世界の洋上風力発電の設備容量は 2030 年にほぼ 500 GW に達し、2020 年の水準のほぼ 14 倍に増加する。この目標を達成するため、設備容量の年間増加量が 2010 年代にはわずか 3 GW だったのに対し、2020 年代には大幅に拡大する(54 GW)必要がある。2050 年までに、世界で合計設備容量が約 2,500 GW となる洋上風力発電所を設置する必要がある。G20 諸国は洋上風力発電の総設備容量に占める比率が最も大きく、2030 年に 94%(約 460 GW)、2050 年には 95%(約 2,300 GW)に達する。拡大の大部分を上位 4 市場(中国、EU27 カ国、米国、インド)が担い、2030 年までに市場全体の 60%以上を占める。

将来の電力システムは、変動性再生可能エネルギー電源を非常に高い比率で導入する必要がある。これは大きな課題であるが、新たな運用戦略とメカニズムによって達成することが可能である。しかし、1.5°C 目標を達成するためには幅広い再生可能エネルギー源が必要であり、電力需要を満たすために個々の技術が重要な役割を果たす。図 2.4 に示すように、VRE は、短期的にも長期的にも電源容量拡大の主流となると予想される。これは、需給が動的に変化する電力システムの転換的な移行を表しているといえる。この拡大を蓄電池容量と連動させることによって、徐々に VRE をより円滑に導入し、電力システムにおける送電ボトルネックの影響を低減することができる。

図 2.4　1.5°C シナリオを実現するために 2030 年と 2050 年までに必要な世界の総設備容量の増加



注： GW = ギガワット、1.5-S = 1.5°C シナリオ

1.5°C シナリオでは、蓄電池貯蔵によって電力システムに大きな柔軟性がもたらされる。その容量は 2030 年までに約 360 GW、2050 年までに 4,100 GW に達し、その 3 分の 2 を G20 が占める。揚水発電も、大いに必要とされる短期的・長期的な系統柔軟性を提供する。一方、水素を利用した長期貯蔵は、効率が非常に低いため、選択肢がほとんどない非常に少数の用途に限定されると予想される。

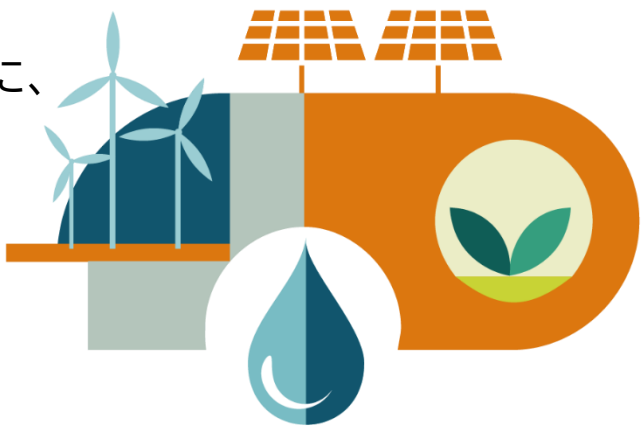
また、固有の柔軟性とディスパッチ能力を備えたクリーンな再生可能エネルギー源も重要である。1.5°C シナリオでは、2030 年までに世界の水力発電の設備容量(揚水発電を除く)は 2020 年の水準からほぼ 21%増加し、1,465 GW に達する。2050 年までに、世界の水力発電の設備容量は 2020 年の水準から 2 倍に増加し、2,500 GW を上回る。1.5°C シナリオを達成するためには、世界の年平均増加量を本展望期間中ほぼ 50 GW に増加させる必要がある。世界の水力発電の設備容量のうち G20 諸国の総量が占める比率は、2030 年までに 79%(1,100 GW 以上)となる。世界各地域の中でも、アジア諸国は水力発電を拡大する大きな技術的ポテンシャルを有している。このような水力発電は全て、『水力発電持続可能基準』に準拠しなければならない。これは、世界の水力発電プロジェクトに対する持続可能性に関する期待事項を詳述する世界規模の認証制度である。また、大量の水力発電が必要とされるが、もしそれが得られない場合、エネルギーの不足を補うために他の再生可能エネルギー電源をはるかに大きな規模で導入しなければならないことも特筆すべきである。さらに、年間を通した電力供給を確保するために、大規模な長期および短期貯蔵も必要になる。

バイオエネルギー、地熱発電、集光型太陽熱発電、海洋エネルギーは、電力部門のエネルギー転換において、特に後の年代に重要な役割を果たし、多くのプロジェクトが、大いに必要とされる運用時の系統柔軟性を提供することができ、また提供すると考えられる。図 2.4 に示す通り、これらを合計した設備容量は 2030 年までに 2020 年の水準のほぼ 5 倍に増加し、約 720 GW に達すると予想される。そのためには、2020 年代に設備容量の年平均増加量を約 70 GW にする必要がある。これらの技術は力強い成長を遂げ、その設備容量は 2050 年までに 2,200 GW 近くに達すると考えられる。2030 年から 2050 年までの間に世界の設備容量の半分以上を G20 諸国が占める。

電力貯蔵は、より広範囲の時間にわたる電力利用の柔軟性を可能にする。一方、送電は、より広範囲の距離にわたる柔軟性を可能とする。また、送電によって、より広範囲の地域にわたり、よりコスト効率の高い方法で発電設備を利用することができるようになる。これは VRE 電源にも非 VRE 電源にも適用されるが、これらの地域で効率的な系統運用と組み合わされ、全体的な発電原価が最小化される場合に限る。

最終的には電力部門を転換する構成要素のそれぞれが重要であり、現存技術を用いて、有効性、信頼性、および再生可能エネルギーの導入率が高く、脱炭素化した電力部門を実現するためには、全てを組み合わせる必要がある。再生可能エネルギーがそのような形で世界的に普及すれば、1.5°C シナリオでは現行計画シナリオと比較して 155 $GtCO_2$ が削減され、再生可能エネルギーは気候と調和した世界において形成的役割を果たす。

効果的で信頼度を維持し、再生可能エネルギーの導入率が高く脱炭素化された電力システムを実現するために、電力部門の全ての構成要素を組み合わせなければならない



ボックス 2.1　柔軟性と国際電力取引の重要性

エネルギーシステムを再生可能エネルギー中心のシステムに転換することには、課題が伴う。電力システムの柔軟性は、エネルギー転換を成功させるために不可欠である。なぜなら、それによって、今日利用できる最も低コストのエネルギー電源のいくつかを用いて電力部門を脱炭素化することが可能になるからであり、気候目標を効果的に達成するためにはそれが不可欠だからである。実際、柔軟性を持たせることによって、需給バランスと系統安定度を維持できるため、太陽光発電や風力発電を円滑に統合することが可能になる。

1.5°C シナリオでは、再生可能エネルギーは 2050 年に一次エネルギー総供給量の約 77%を占め、また、発電電力量の 91%を占める。太陽光発電と風力発電を合わせると、2050 年の電力供給量の 70%を占める。変動性再生可能エネルギーをこれほど高い比率で導入するためには、系統柔軟性を高める必要がある。柔軟性は短期および長期貯蔵やデマンドレスポンスから供給されることができ、これにより電力部門と熱供給、電気自動車の充電、グリーン水素の製造とのセクターカップリングが可能となる。また、堅牢な国内送電システムを構築することで、最も必要とされている場所に電力を送ることができ、国際電力取引機関を設置することによって、地域全体で柔軟性を共有することができる。蓄電池は、発電と電力消費のタイミングに起こりうるミスマッチに対処できるため、時間的な柔軟性を提供することができる。また、適切な電力網を構築し、地域全体で各国設備の能力を共有することにより、空間的な柔軟性を実現することができる。

どの国にも、それぞれ独自の再生可能エネルギーの電源構成と需要パターンがある。国同士を連系することによって、国家間の発電と消費のパターンを最大限相互補完することができる。それに加え、再生可能エネルギー、特に太陽光発電と風力発電の発電超過を輸出することも可能になる。例えば、ドイツは近隣国に電力を輸出することにより、風力発電の出力抑制を回避している。同様に、際立った貯蔵設備を持たない地域は、水力発電用貯水池などの貯蔵能力を備えた近隣国に頼ることができる。このように、国際連系の容量を増やすことによって、実質的に貯蔵その他の柔軟性供給源がより利用できるようになる。同様に、国内資源だけで需要を満たせない場合や国内で発電するより輸入したほうが安価な場合は、各国が電力を輸入することができる。したがって、国際連系により、再生可能エネルギー発電の出力抑制や化石燃料による補完の必要性を減らすことができる。

IRENA Flextool は、特定の国や地域の状況に応じて電力システムの導入状況を評価し、政策立案者、規制当局、その他のステークホルダーに知見を提供するツールである(IRENA, 2018a)。IRENA の分析では、連系容量をその国の設備容量の 15%まで拡大すれば、2030 年の抑制電力量を 86%削減しうることが明らかになっている。このような方法論は、EU が加盟国間の電力取引を促進するために設定した目標と同様である。各国が連系されれば、輸出超過傾向がある国や、輸入超過傾向がある国が生じる。しかし、その立場は年間を通して、また 1 日を通して絶えず変化する。その結果、全ての国が時には輸出国として、時には輸入国としての役割を果たすことになる。国際連系は輸出国にも輸入国にも便益をもたらす。輸出国は、自国の再生可能エネルギー電源の容量を最大限に活用して収益性を高めることができる。輸入国は、稼働しない期間が生じ得る設備容量に過剰投資する損失を回避することができる。

柔軟性を強化するうえでの重大な課題には、投資コスト、規制障壁、システム統合、データとモデル化、社会受容性などがある。普及を可能にするために、インセンティブ、規制枠組み、教育や啓蒙キャンペーンなど、柔軟性技術の導入を支援する幅広い政策が必要である(IRENA, 2018b)。高度なデータ分析、人工知能、機械学習といったデジタルイノベーションによって、系統運用の有効性を高め、柔軟性を強化することができる。(IRENA, 2020b)。



2.2.3 電力部門の転換に向けた政策

各国は、発電設備容量と発電電力量を 1.5°C シナリオにおいて 2030 年や 2050 年までに必要とされる水準まで拡大する導入政策を実施する必要がある。政策は、それぞれ異なる状況に合わせて策定しなければならない。政策手段やその設計を選択する際は、そのソリューション案の性質（電気事業者規模、分散型、オフグリッドなど）、部門の発達レベル、電力システムの組織構造、より広範な政策目標などを考慮することが望ましい。

政府は、測定可能な目標を設定し、短期的には即時の行動を喚起する電力部門計画を策定し、長期的には電力部門と最終消費部門の双方で再生可能エネルギーに基づくソリューションをまとめなければならない。また、エネルギー効率を向上し、必要なインフラを開発する方策を、導入計画と併せて策定し、これと整合させなければならない。同時に、さまざまな道すじ同士の対立や資産の座礁を防がなければならない。海洋エネルギーや集光型太陽熱発電のような成熟度の低い技術を電源構成に組み込むのを支援するため、技術ごとの目標を設定することも考えられる。

再生可能エネルギー電源が主流となる電力部門への転換を実現するためには、目標を政策や対策に具現化する必要がある。再生可能エネルギー電源の数値割当とともに、エネルギー属性証書の発行・トラッキング制度を検討することも考えられる。固定価格買取制度(FIT)、プレミアム、入札といった構造化された調達政策は、状況特有の障壁やリスクに対処するために役立ち、特定の目標に貢献する。市場の状況は変化し、技術の導入が進めばその価格は低下することから、行政が設定する価格制度はコスト低下を反映するよう修正しなければならない。あるいは、競争によって価格を決定することも考えられる。

入札の設計の際は、業界の持続可能性を支える形でリスク(サプライチェーンリスクなど)をステークホルダー間に配分することが望ましい

技術コストと人件費や資金調達コストといった他のコストとの整合を図るため、入札を通した価格競争を検討することも考えられる。ただし、2021～2022 年に生じたような急激なコスト変動(原材料、輸送、資金調達など)のリスクをさまざまな市場参加者の間に配分する規定を定め、適性価格での導入を持続させることが望ましい。入札は、競争を活用しつつ、同時にシステム統合、社会経済的便益、さらにはエネルギー安全保障や自立を強化する国内サプライチェーンの開発といった、より幅広い政策目標を追求するために良い方法である。入札の設計は、入札の便益を最大化し、その弱点に伴うリスクを最小化するため、個別の国の状況やより広範な目標に合わせて策定することが望ましい[原注4]。

再生可能エネルギー導入を義務付ける、あるいは支援する政策手段に加え、エネルギー転換にはプロジェクト開発の実現を支援する環境が必要である。特に風力発電プロジェクトの場合、関連する一連の規則や規制のために許可プロセスに時間がかかることが導入を遅らせる恐れがある。許可に関する規則や手順は、プロジェクトの環境的・社会的持続可能性を確保するうえで極めて重要であるが、(その完全性を維持しつつ)それらを合理化することによってエネルギー転換の加速を後押しすることができる。ボックス 2.2 に、洋上風力発電の許認可プロセスを加速するための世界の実践例を示す。



原注4 IRENA は、エネルギー転換のための政策枠組み(Policy Framework for the Energy Transition: PFET)を通じて、再生可能エネルギー入札を設計しようとする国に対し、能力向上や政策助言を提供している。

ボックス 2.2　洋上風力発電の許認可プロセス加速を実現する措置

気候変動、そして地政学的事象に起因して目下進行中の世界的エネルギー危機に対処することが緊急に必要とされるなか、多くの国は、鍵となる技術として洋上風力発電の開発を加速するために注力している。洋上風力発電は、価格を低下させ、エネルギー安全保障を支援し、現地雇用を生み出し、大規模なエネルギー転換を推進する効率的手段である。また、パリ協定の長期的な気温目標の達成にも調和するため、世界の気候目標の達成に貢献することができる。

2022 年、世界の洋上風力発電の設備容量は 63 GW に達した。この容量の 70%は、中国と英国のわずか 2 カ国によって占められている。1.5°C シナリオによれば、洋上風力発電の設備容量は 2030 年に 500 GW、2050 年に 2,500 GW に達すると予想される。そのためには、同技術の導入を早急に加速する必要がある。

一方、洋上風力発電の導入加速を阻む大きな障壁は、関連プロジェクトの許認可プロセスに時間がかかることに関係している。IRENA と世界風力エネルギー会議(GWEC)の支援を受けた IRENA の海洋エネルギーおよび洋上再生可能エネルギーに関する協働枠組み(Collaborative Framework for Ocean Energy and Offshore Renewables: CFOR)では、世界の許認可プロセスをどのように修正し、目的を再設定すれば、要請に対し迅速に対応可能なものにできるかを解明するために、この問題が論じられている。

許認可プロセスには、洋上風力発電プロジェクトを設置し、運用するための環境面その他の全ての許認可が含まれる。ほとんどの国において、最初のステップは一般的に、予備調査を実施する許可を取得することである。それに続いて、海底リース権の許可、エネルギー資源の利用または発電の認可、系統連系の合意、洋上風車設置を支援するために陸上で行うべき作業の許可など、いくつかの許認可が必要になる。許認可プロセスは、大きく二つの方式がある。セントラル方式と分散方式である。第 3 のハイブリッド方式は、上記の方式の要素を組み合わせたものである。

セントラル(1 段階)方式では、環境影響評価、現地での実現可能性研究(地理的／地質工学的調査)、ステークホルダーとの協約、洋上風力発電開発への同意に関して、政府に全面的な裁量が与えられる。分散(2 段階)方式では、開発者がプロセスの大部分の段階を引き受け、主導する機会を与えられる。

許認可プロセスは、いくつかの課題によって妨げられている。これには、多種多様な許認可(1 プロジェクトあたり平均 7 件)を取得しないとプロジェクトに着手できないこと、許認可に必要なリードタイムが長いこと(平均 2.25 年)、一部のステークホルダーが懸念を提起することでプロジェクトへの反対が起こることなどがある。多くのプロジェクトが、長いリードタイムのために準備段階で足止めされている。





洋上風力発電の許認可プロセスを加速するために、CFOR、IRENA、GWEC が検討している主なソリューションのいくつかを以下に挙げる。

(1) 集約的な専任機関と一元的な担当窓口を設け、洋上風力発電開発事業者と協力を行って立地選定プロセスや許認可プロセスの合理化を図る。例えばフィリピンでは 2021 年に、再生可能エネルギープロジェクトに関連する全ての申請手続きができるようデータや情報を調整するオンラインプラットフォーム、エネルギー仮想ワンストップ窓口を実施する作業グループの設置を促す行政命令が出された。

(2) 風力発電プロジェクトの合意形成段階および建設段階における優先順位の理解を共有するため、さまざまな経路を通じて積極的な対話を促進する。その 1 例として、韓国の統営(トンヨン)市で計画されていた洋上風力発電プロジェクトがある。2021 年、プロジェクトの開発事業者は、さまざまなステークホルダーを集めた官民協議会の会合を開き、プロジェクトの計画プロセスに民間の意見が考慮され、全ての者の利益が守られるよう図った(Park *et al.*, 2022)。

(3) 洋上風力発電所に関する許認可プロセスのリードタイムに上限を義務付け、特別な事情がある場合に裁量により期間の延長を認める法律を導入する。例えば、欧州委員会は、REPowerEU 計画における再生可能エネルギー関連の許認可プロセスに関する新たな法案を提出した。法案では、許可を付与する期限はこれまで通り、通常の新規プロジェクトについては 2 年、リパワリングプロジェクトについては 1 年としている。また、この法案では、これらの期限までにどの許可を交付し、どの手順を実施しなければならないかも明確にしている(WindEurope, 2022)。

これらの推奨事項は、世界洋上風力連合(GOWA)で用いられている。GOWA は、IRENA、デンマーク、GWEC によって設立された包括的な多国籍プラットフォームで、洋上風力発電の導入を促進するため、各国政府、民間部門、国際機関、その他のステークホルダーが結集している。GOWA の包括目標は、目標と現状のギャップを埋めることによって再生可能エネルギー目標の実現を支援するとともに、経済、エネルギー安全保障、気候に関連する差し迫った懸念に対処することである。『世界エネルギー転換展望』を基盤とする GOWA の加盟国は 30 カ国を超え、洋上風力発電の導入を推進するとともに、参入障壁を取り除くため、国内、地域、国際レベルで協力を行っている。洋上風力発電は、再生可能エネルギー目標を達成すると同時に実際の進度を加速するポテンシャルを有しており、GOWA は持続可能なエネルギーソリューションを世界中で実現するため、洋上風力発電の導入においていっそう意欲的に取り組んでいる。

出典：（IRENA and GWEC, 発刊予定）.

系統連系した分散型ソリューションのような小規模のプロジェクトは、それに合わせた規制手段や価格設定方式を必要とする

電源構成に占める VRE の比率が拡大すれば、電力システムへの VRE 統合を支援するために補完的対策が必要になる。そのような対策の例として、電力システムの再編成とグリッドコードの改訂によるそれらの適正化、計画立案プロセスの集約化、許認可手続きを行うワンストップ窓口の設置、柔軟な電力システムや揚水発電への財政支援の提供、スマートメーター、蓄電池、その他の貯蔵技術への補助金などの金銭的インセンティブがある。

今日の電力システムのほとんどは、化石燃料時代に設計され、変動費が高い、中央集権型のディスパッチ可能な発電所を想定している。これは、再生可能エネルギー時代の基準とはならない。長いリードタイムが伴うことを考えると、新たな設計を行い、早期に実施する必要がある（ボックス 2.3 を参照）。

系統連系した分散型ソリューションのような系統用太陽光発電よりも小規模なプロジェクトの場合、それに合わせた規制手段や価格設定方式が必要である。分散型電源は、ネットメータリング制度やネットビリング制度によって支援することができる。ただし、電力システムの原価回収能力を損なわないようにするとともに、自家消費の有無による需要者間の内部補助[原注5]が生じないよう、注意を払わなければならない。政策手段を設計する際は、市場の動きに対応する革新的手段を備えなければならない。実際、電力システムの組織構造を再設計する措置が取られない限り、電力システムに関する政策や規制について予想された成果と実際の成果の乖離は、エネルギー転換の進行に伴って拡大する可能性がある。市場設計と並行して価格設定メカニズムを適切に策定し、特定技術の便益や全体的コスト、さらにはシステムコストを反映するようにしなければならない。

優遇税制、補助金、助成金のような財政的・金融的インセンティブは、規制メカニズムや価格設定方式を補完するもので、資金調達を容易にし、資金調達コストを低減し、最終消費者がエネルギー転換技術を広く利用できるようにするために必要である。



原注5 ある需要家グループに補助付き価格（または助成金その他の支援制度）を提供するために、別の需要家グループが製品やサービスに対して割高な価格を課される状況。

ボックス 2.3　再生可能エネルギー時代の電力部門 – 組織構造の構築

再生可能エネルギー政策は技術の成熟に伴って進展を遂げ、かつて支援制度だったものが電力調達システムへと変化している。今こそこれまでの経験を検討し、電力システムの組織構造、具体的には電力サービスの取引や報酬提供が行われる制度、手順、社会的関係[注a]の再設計を始めるべき時である。

バイオエネルギーを除き、再生可能エネルギー技術は資本コストに支配されおり、支出のほとんどは発電所が運用を開始する前に発生する。さらに、変動性再生可能エネルギー(VRE)技術はディスパッチ可能ではなく、価格シグナルに従うことができない[注b]。今日の電力市場において VRE 発電所を開発することは可能であるが(マーチャントプラントなど)、これらの市場の構造自体が VRE にとって課題となっている。例えば、電源構成に占める VRE の比率が高くなるほど、電力市場価格が低下し、新規投資の魅力が減少して、既存の VRE 発電事業者が初期投資を回収できなくなるリスクが高くなる。入札(または行政が定める固定価格買取制度)を導入すれば対価が調整され、これらの問題の一部が解決される。それによってリスクを低減し、VRE 導入コストを抑えることができる。

しかし、最終的には、VRE の比率が高くなれば系統柔軟性を強化する必要がある。柔軟性は、供給側(系統用蓄電池、ディスパッチ可能な電源など)からでも需要側(電気自動車、ヒートポンプ、デマンドレスポンスなど)からでも供給することができる。ますます多くの柔軟性が電力システムにおいて必要とされるようになるため、政策立案者はそれを実現する環境を生み出すために今すぐ行動しなければならない。それと同時に、最終消費部門の脱炭素化への取り組みをさらに強化することが望ましい。例えば、直接電化と間接電化を統合することによって、最終消費部門が自ら柔軟性を生み出すことができるようになる。

「デュアル調達」を採用することで、エネルギー転換に必要な二つの要件、すなわち VRE の拡大と柔軟性の強化を実現するとともに、どうすれば電力システムの構造をエネルギー転換に適した形にできるかという全体的なビジョンに重点を置くことができる。デュアル調達は、(IRENA, 2022f)で概説されている通り、再生可能エネルギー電源の長期調達と柔軟性供給源の短期調達からなる。

デュアル調達の設計案のもとでは、長期契約は、入札と同じようにエネルギー市場の屋台骨となる。電力は、資本集約型技術の要件を適切に満たす長期契約によって取引される。長期調達メカニズムは最低限の資本コストで VRE 投資を促進するため、再生可能エネルギーの発電コストを最小化するとともに容量拡大を可能にする[注c]。それに対し短期柔軟性市場は、再生可能エネルギー中心の電力システムの信頼度確保に必要な柔軟性供給電源を調達し、安価にディスパッチすることを目的としている。今日の卸市場と同様、短期柔軟性の調達は限界価格に基づいているが、柔軟性を提供する技術のみを対象としている。調達システムのこの部分については、より細分化された入札方式を取り入れ、希少価格に上限を設定しない。上限を設けた場合、柔軟性への投資の経済的実現可能性が制約されるおそれがある。

注 a 例えば、自由化された電力システムにおける「電力市場」

注 b 利用可能な再生可能エネルギーの時間的変化(風況、日射)を電力需要に合わせることはできない。したがって、需要と発電を一致させる努力の重点は、ほとんどがデマンドサイドや他の柔軟性供給源に置かれる。

注 c 規制されたシステムでは、直接公共投資も長期電力調達において役割を果たし得る。

再生可能エネルギー技術は、世界の新規電源容量に関して、市場の主流となりつつある。エネルギー転換を実現するためには、電力部門だけでなく、燃料構成においても、最終消費部門(産業、家庭・業務、運輸)においても、再生可能エネルギーの導入を加速する必要がある。これについては以下で論じる。

2.3 新興燃料: クリーン水素およびその派生物

2020 年に消費された 87 Mt(10,440 ペタジュール)の水素のうち、ほぼ全てが化石燃料由来であった(IRENA, 2022g)。未来のエネルギーシステムで極めて重要な役割を果たすはずのクリーン水素の製造を拡大するためには、どのようなステップが必要だろうか? 世界経済がカーボンニュートラルを目指すなか、競争力のある水素や水素由来合成燃料(アンモニア、メタノール、ケロシンなど)がエネルギー構成の重要な構成要素として浮上している。これらの燃料は、直接電化による脱炭素化が難しい産業プロセスや運輸プロセスに対して排出緩和策を提供する。

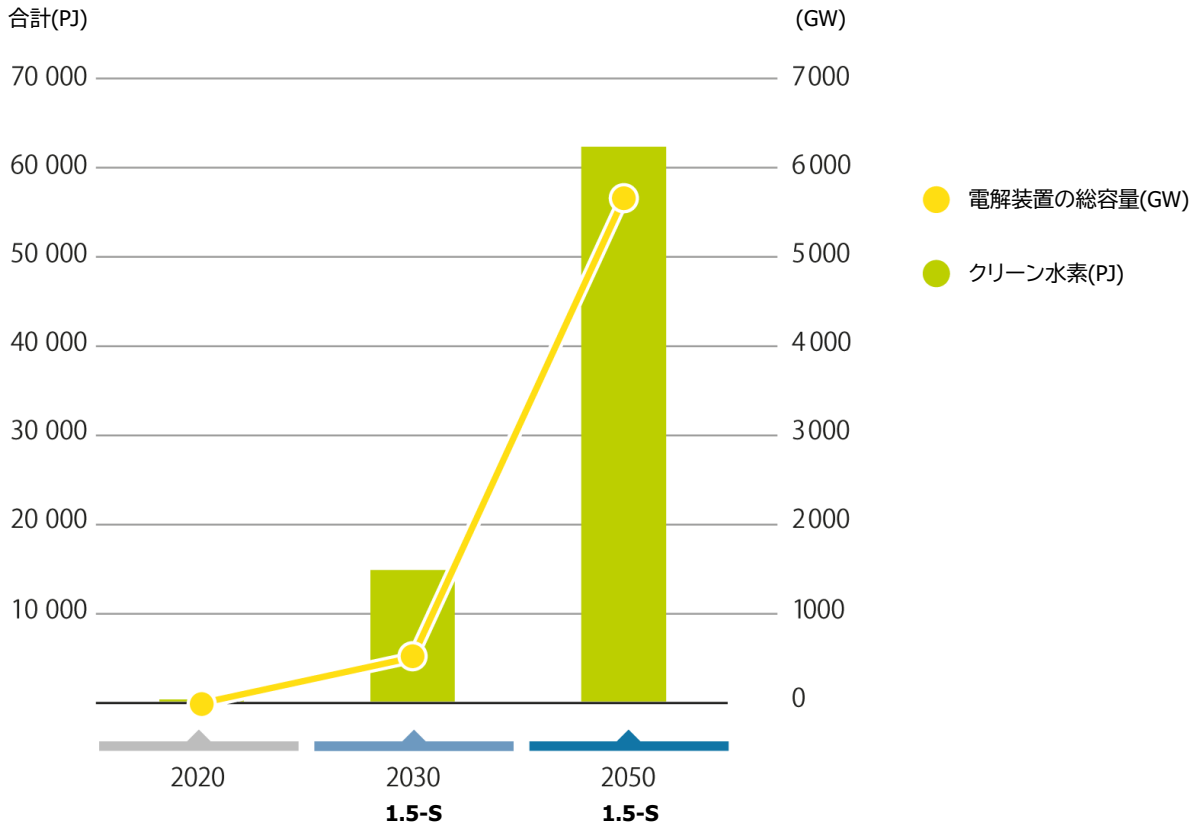
1.5°C 目標を達成する未来において、水素には、物理インフラ(製造設備、貯蔵システム、パイプラインなど)、政策、技術など、大幅な支援を行う必要がある。グローバルな水素市場を確立するためには国際貿易協定が必要であり、各国政府は、アーリーアダプターが初期需要を牽引するよう拍車をかける役割を果たす。認証制度は、低炭素な水素製造の持続可能性を確保し、排出を最少化するために役立つ。革新的ソリューションや技術進歩も、水素の製造、貯蔵、分配の効率性を高め、コストを削減するために必要である。研究開発で検討するべき主な分野には、電気分解、CCS、水素貯蔵用の先進材料、燃料電池技術などがある。天然ガス由来で CCS を利用するブルー水素は、再生可能エネルギーを用いたグリーン水素製造が拡大する間の暫定的ソリューションとしての役割を果たし得る(ただし、CCS 技術が引き続き進歩することを前提とする)。

ガスの有効エネルギーへの変換効率を考慮すると、可能であれば直接電化の方が水素利用よりも好ましい。変換損失があるため、水素によって直接電化と同じサービスを提供するには約 2~3 倍の電力が必要になる。経済効率性は、一次エネルギー源の利用可能性やコスト、発電技術や貯蔵技術のコスト、水素の製造、貯蔵、輸送のコストなど、さまざまな要因によって決定される。つまり、水素の利用は、他の実用的選択肢がない場合に限り、慎重に検討し、実施する必要があるということである。前節で概説したように、エネルギー転換を支えるためには、世界の電力システムの設備容量を 5 倍に拡大する必要があり、その容量のかなりの部分が水素製造に充てられる。2050 年までに、水素製造に必要な電力は世界の発電電力量の 4 分の 1 にまで達し、一部の国ではさらにそれを上回る可能性がある。水素やさらには電解装置の需要拡大に応えるための、収益性の見込める一連の再生可能エネルギー発電プロジェクトを確保するためには、統合的計画立案が必要である。

クリーン水素は低炭素の未来にとって不可欠であり、インフラ、政策、国際協力を必要とする



図 2.5　1.5°C シナリオにおける 2020 年、2030 年、2050 年における世界のクリーン水素供給量



注： 1.5-S = 1.5°C シナリオ、GW = ギガワット、PJ = ペタジュール

水素およびメタノールやアンモニア（こちらのほうが一部の用途には適しており、液体燃料としては長距離輸送がより容易である）のような派生燃料は、現状の世界のエネルギー構成に占める比率は極めて少ないが、1.5°C シナリオでは 2050 年までに大幅に増加し、最終エネルギー消費量の 14%を占めるようになる。排出量削減を実現するためには、水素の製造方法を大幅に変革する必要がある。2050 年までにほとんどをグリーン水素とし、再生可能エネルギー電力を用いた電気分解によって製造する必要がある。化石燃料を用いて製造するが、排出される二酸化炭素を回収する「ブルー」水素も必要となる。

IRENA の 1.5°C シナリオでは、グリーン水素とブルー水素の製造を現在の極めてわずかな量から 2030 年までに約 15 EJ (125 Mt)、2050 年までに 63 EJ (523 Mt)に増やす必要がある(図 2.5 を参照)。より長期的に見ればグリーン水素が中心的な役割を果たし、2030 年の 40%から 2050 年の 94%へと拡大する。これに関連して、水素は最初から低炭素でなければならず、最終的にはグリーン水素(再生可能エネルギー電力を用いて電気分解により製造される)となる必要がある。現在、グリーン水素はブルー水素より 2～3 倍のコストがかかる可能性があり、設備が初期段階にあるため基準原価を推定することが難しい。再生可能エネルギーの発電コストが低減し、電解装置が改良されることによって、グリーン水素は 2030 年かそれ以前までにコスト競争力を持つようになる可能性がある。グリーン水素用電解装置の累計設備容量は、2030 年までに 233 GW に、2050 年までに 5,722 GW に拡大する必要があり、その頃には世界中で水素製造が広く普及すると予想される(IRENA, 2022b)。それは、これらの電解装置の十分なサプライチェーンと製造設備、さらには水素ガスを輸送する水素インフラを開発する必要があることも意味する。水素パイプラインの建設プロジェクトは、高圧に耐え、脆化耐性のある材料が必要であることから、特に課題となる。また、水素の純度維持、安全な運用、さらには材料適合性を確保するために、慎重な設計も必要である。現行の価格では、費用便益比は概して不利である。IRENA の 1.5°C シナリオにおいて、グリーン水素およびアンモニアやメタノールのような関連するエネルギーキャリアの利用を 2030 年までに最終エネルギー消費のほぼ 1%に、2050 年までに 13%に拡大するためには、これらの障壁を克服する必要がある。

クリーン水素は、直接還元鉄を用いたグリーン製鋼、化学品や石油化学品原料など、産業部門で重要な役割を果たす可能性が高い。その総使用量(非エネルギー用途も含む)は、それらの分野で 2030 年までに 14 EJ に、2050 年までに 40 EJ に増加する。水素は、再生可能エネルギー電力の需給バランスを調整する基本的な役割も果たし、短期的変動を吸収するとともに、長期貯蔵を提供することで再生可能エネルギーの季節変動を調整するために役立つ。1.5°C シナリオでは、再生可能エネルギー由来水素の超大量生産と水素貯蔵を組み合わせることによって、2030 年以降の長期的な季節間の柔軟性を確保し、2050 年までに推定 800 TWh の貯蔵容量を提供することができる。

他の最終消費部門においては、クリーン水素およびメタノールやアンモニアのような派生物は、特定の輸送方法において重要な役割を果たす。1.5°C シナリオでは、それらは 2030 年に運輸部門で消費されるエネルギーの 1%にも満たないが、2050 年までにほぼ 25%に達する。家庭・業務部門におけるクリーン水素の利用は、直接電化より利用効率が低いことが主な理由で、2030 年までに約 0.15 EJ と少量に留まる。表 2.2 は、1.5°C シナリオにおける 2030 年と 2050 年の水素利用の主要指標をまとめたものである。

1.5°Cシナリオにおける部門にまたがる幅広い利用を支えるため、クリーン水素製造を大幅に拡大しなければならない

表 2.2　クリーン水素および派生物の主要業績指標：2030 年と 2050 年における現行計画シナリオと 1.5°C シナリオ

KPI.05 クリーン水素および派生物

		従来	2030 年		2050 年	
		2020 年	PES	1.5°C シナリオ	PES	1.5°C シナリオ
クリーン水素生産量 (EJ)	世界	<1	<1	15	3	63
	G20	<1	<1	11	2	45
最終エネルギー消費量に占めるクリーン水素（直接利用と合成燃料）の比率(%)	世界	<1%	<1%	2%	<1%	14%
	G20	<1%	<1%	2%	<1%	15%
運輸部門の最終エネルギー消費量に占めるクリーン水素（直接利用と合成燃料）の比率(%)	世界	<1%	<1%	<1%	2%	24%
	G20	<1%	<1%	<1%	2%	17%
産業部門の最終エネルギー消費量に占めるクリーン水素（直接利用と合成燃料）の比率(%)	世界	<1%	<1%	5%	<1%	17%
	G20	<1%	<1%	6%	<1%	17%
家庭・業務部門の最終エネルギー消費量に占めるクリーン水素（直接利用と合成燃料）の比率(%)	世界	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%
	G20	<1%	<1%	<1%	<1%	<1%

注： EJ = エクサジュール、G20 = 主要 20 カ国、KPI = 主要業績指標、PES = 現行計画シナリオ
表は、クリーン水素（直接利用、合成燃料）の比率を示し、エネルギー用途のみを対象とする。

グリーン水素は、近年、政策課題として急速に重要性を増している

2.3.1 グリーン水素および派生物の普及を促すインセンティブ政策

グリーン水素は依然としてその初期段階にあり、ニッチから主流へと成長するためには政策立案者の積極的な支援が必要である。政策立案者は、グリーン水素の拡大とそのような拡大を可能にする環境を支援するうえで重要な役割を果たす。第 1 章で詳述したように、グリーン水素は非常に大規模かつ迅速に拡大する必要があるため、協調の取れた政府の取り組みが必要である。

水素戦略を策定するにあたって、政策立案者は水素の未来に関するさまざまな問いに答え、エネルギー部門を新たな視点から再評価し、一般の議論で看過されがちなエネルギー利用（化学プロセスで原料として使用される化石燃料など）に目を向ける。公表された戦略は、政府が水素分野をどのように支援するかについて、産業部門や一般の人々に回答を提供するものである。『世界エネルギー転換展望 2022』の刊行時、水素戦略を策定済みまたは策定中の国は 30 カ国であった。本稿執筆時点では、60 カ国以上がこの課題に取り組んでいる。なかでも米国は、水素およびその派生物に関するロードマップをすでに策定している。

政策立案者が取り得る短期的対策は、認証の取り組みを連携させることである。2022 年 8 月の時点で、水素を認証する、またはその排出を規制することを目指す 15 の異なるイニシアティブが存在している。これらのイニシアティブは、対象システム、排出基準値、ラベル表示、製造経路、管理チェーン・モデル、条件などのパラメーターが異なっている。水素製造が気候緩和に貢献し、国際貿易規則に準拠したものとなるようにするため、認証は極めて重要である。また、認証に基づいて、水素製造に伴う温室効果ガス排出量により水素フローを差別化することもでき、それが価格、経済的インセンティブ、利用者間の排出割当の設定に役立つ。水素は他の材料やコモディティに変換できるため、水素の認証はモジュール式で、変換の各ステップに個別に対応できることが望ましい。また、認証は、水素関連のコモディティを支援する既存の取り組みとも整合することが望ましい。



最後に、政策立案者にとって、水素に関する個別の課題を理解することが重要である。なかでも、オフテイク（商品の購入・引取り）リスクに関して、水素はエネルギー転換に必要な他の製品と明確な違いがある。電力部門のオフテイクは当然ながら電力市場のルールによって保証されているが、水素の場合、政策立案者はまず、グリーン水素への需要が存在することを確認しなければならない。各国政府による供給コミットメント（約束）は合計で 140 GW から 150 GW に上り（設備利用率によって異なるが、およそ 15 MtH_2/年を製造できると考えられる）、欧州連合だけでも 2030 年の目標は 20 MtH_2/年であるが、デマンドサイドのコミットメントは合計しても 3 MtH_2/年に満たない。

水素分野では、オフテイカー（引取り先）候補はサプライヤー候補が提供する低炭素水素の価格、物理特性、数量を知る必要があり、一方、サプライヤー候補はオフテイク契約を結ばなければ電解装置の導入に着手できない。全ての関係者が、事業を行う地域で施行されている政策や該当する基準や規制を知る必要がある。政策立案者が水素技術に関する経験がない場合、政策の策定はより困難になる。さらに、供給点と需要点が決まらなければインフラを開発することができない。最後に、金融機関がリスクを評価し、情報に基づく決定を行うためには、プロジェクトに関する明確な情報を得る必要がある。

行き詰まりを打開するために、IRENA が最新の報告書で先進 7 カ国(G7)に向けて提案したように、政策立案者はグリーン水素の供給と需要を調整する新たな政策を定めることができる（ボックス 2.4）。これまでに実施されてきた政策のほとんどは、供給側に重点を置くものである。特に水素の基礎需要の創出に重点を置いた政策は、今のところごくわずかである。政策立案者は、供給と需要を同時に拡大するソリューションを明らかにする努力をすることが望ましい。オフテイク契約を支援することは、水素市場に弾みをつけるために役立つと考えられる。

水素の需要と供給に関する政策を並行して策定する必要がある

ボックス 2.4　水素導入を加速するための推奨事項

クリーン水素は、エネルギー転換において重要な役割を果たす。1.5°C シナリオでは、2050 年における総最終エネルギー消費量の 14%をクリーン水素が占める。これは、年間 5 億 2,300 万 t の水素に相当し、そのほとんどがグリーン水素である。

特筆すべきは、クリーン水素の利用に関して特定産業に焦点を当てることが望ましいという点である。鉄鋼や肥料の製造、長距離海上輸送、航空輸送はいずれも、クリーン水素を利用することで便益を得る立場にある。需要の増加に応えるため、クリーンエネルギーの製造を 2020 年の 80 万 t から大幅に拡大させる必要がある。

IRENA の報告書 *Accelerating hydrogen deployment in the G7: Recommendations for the Hydrogen Action Pact* では、G7 加盟国がそれぞれの国内で低炭素水素のバリューチェーン構築を加速するための具体的な提案を行っている(IRENA, 2022i)。提案は、以下の通りである。

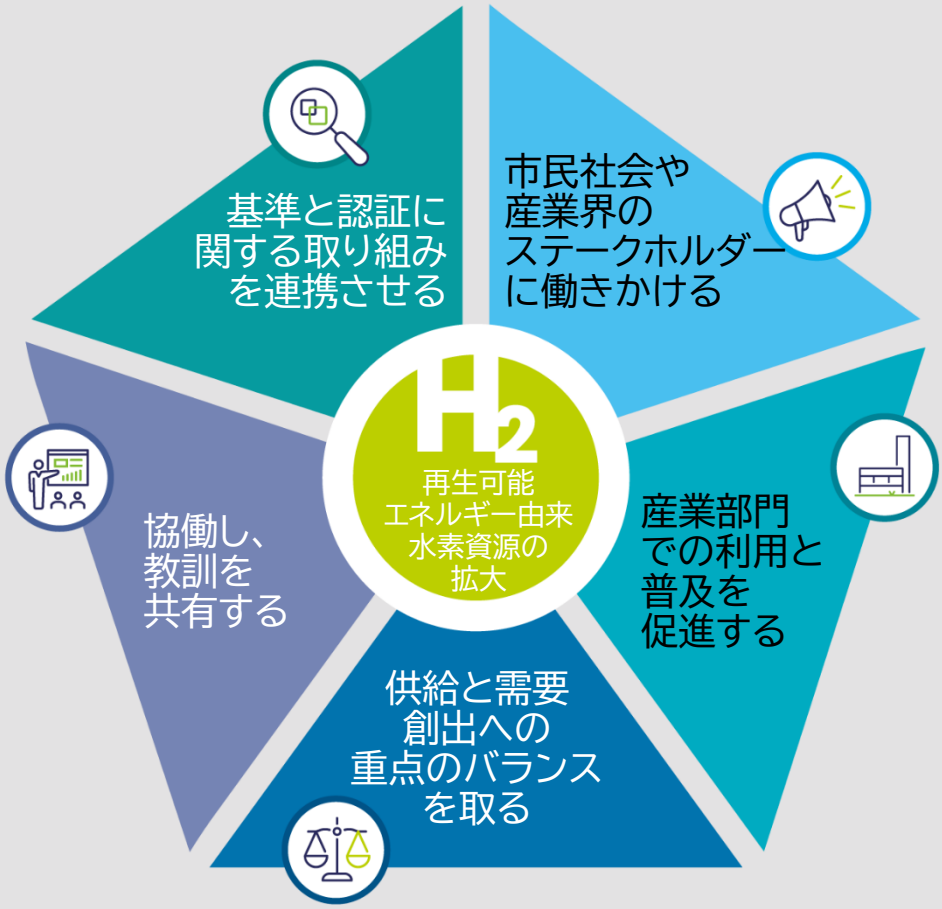
- 基準と認証に関する取り組みを連携させる。
- 協働し、教訓を共有する。
- 供給と需要への重点のバランスを取る。
- 産業部門での利用と普及を促進する。
- 市民社会や産業界のステークホルダーに働きかける。

これらの提案は、国同士の協働の重要性を強調している。2050 年には、クリーン水素需要の実に 4 分の 1 を国際貿易で満たす必要がある(IRENA, 2022b)。クリーン水素製造に重点を置いた政策と併せて、デマンドサイド政策、特に産業利用に関する政策が必要である。

水素貿易を推進するためには、標準化と認証を目指す取り組みを連携させるということでもある。水素は「代替可能な」コモディティであるため、認証があれば、オフテイカーに製造情報を提供することができる。認証には、製造方法、温室効果ガス排出会計、透明な監査基準、クレジット発行・償却の登録を含めることが望ましい。

IRENA の報告書 *Creating a global hydrogen market: Certification to enable trade* では、堅牢な認証制度とはどのようなものかを詳細に検討している(IRENA, 2023c)。同報告書は、水素の国際貿易を可能にするために世界中の基準を調和させることを求めている。認証制度は、それだけではそのような貿易を促進することはできないが、1.5°C シナリオにおける水素需要を確保するためには不可欠である。

図 2.6　G7 加盟国に向けた提案



出典：(IRENA, 2022i).

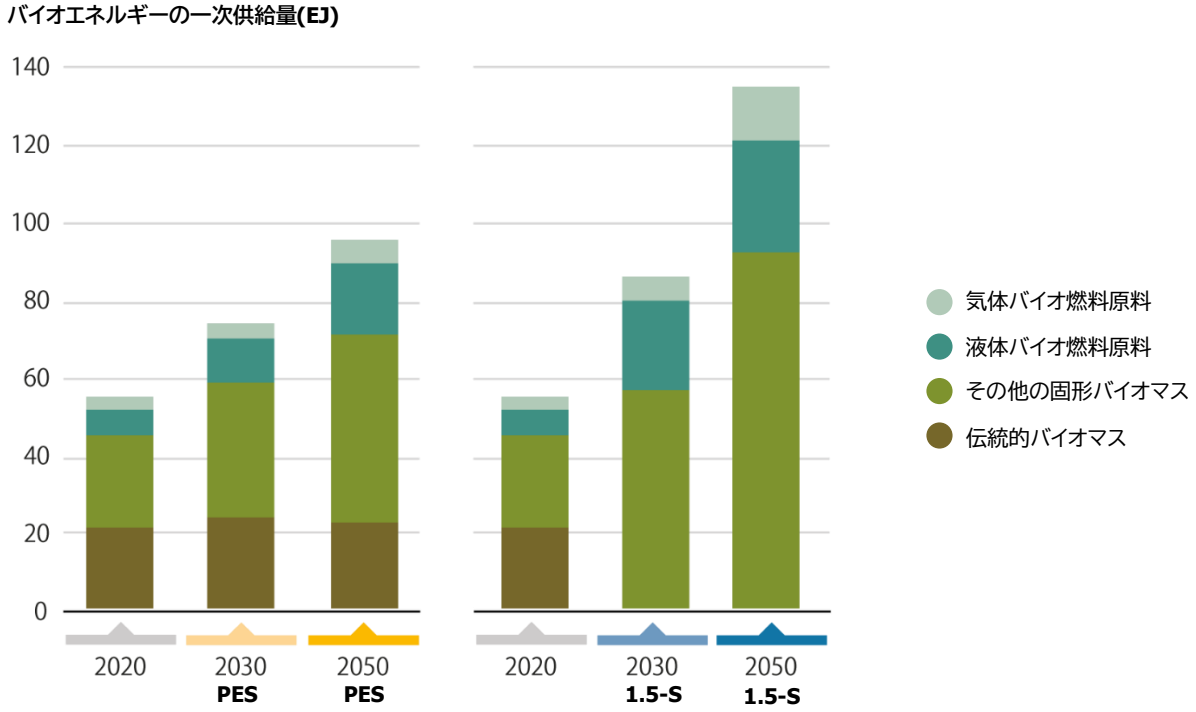
2.4 バイオエネルギーの供給および消費

2.4.1 バイオエネルギーの供給および消費の主要指標

バイオエネルギーは、1.5°C の気候目標を達成するために重要な役割を果たす(IRENA, 2021a)。発電、産業部門における最終消費、家庭・業務、運輸、化学品原材料など、全てのエネルギー部門で化石燃料に代わるポテンシャルを持つことを考慮すると、再生可能エネルギー中心のエネルギー構成に向けた転換において、バイオエネルギーは重要である。2020 年、バイオエネルギーは一次エネルギー総供給量の 9.5%を占めた。バイオエネルギー供給の大部分を占めるのは固形バイオマスの近代的利用(43%)で、次いで途上国における伝統的な調理・暖房用途のバイオマス利用(39%)、バイオガスおよびバイオ燃料原料(18%)である。

図 2.7 に示す通り、1.5°C シナリオでは、バイオマスの供給量を 2020 年の水準(56 EJ)から 2030 年までに 86 EJ に、2050 年までに 135 EJ に増やす必要がある。これには、現在調理用や暖房用の燃料として利用されている伝統的バイオマスの非効率な利用を削減することも含まれる。近代的バイオエネルギーは、現行の 33 EJ を 2030 年までに約 2.5 倍に、2050 年までに 4 倍に増やす必要がある。IRENA その他の機関による 2050 年に向けた予測によれば、持続可能と思われるバイオマス供給の上限量は約 135 EJ と推定されるが(Faaij, 2018; IRENA, 2014, 2016b, 2016a)、その程度の水準であれば、基本的に土地利用にネガティブな変化を及ぼすことなく持続的に供給することができる。しかし、バイオマス生産をこの水準まで拡大しつつ、環境または社会に悪影響を及ぼさないようにするためには、大きな課題になると考えられる。

図 2.7 現行計画シナリオと 1.5°C シナリオにおける 2020 年、2030 年、2050 年のエネルギーキャリア別一次バイオエネルギー供給量



注: 1.5-S = 1.5°C シナリオ、EJ = エクサジュール、PES = 現行計画シナリオ

1.5°Cシナリオでは、近代的バイオエネルギーの供給を、2020年と比較して2050年までに4倍に増やす必要がある

バイオエネルギー[原注6]による発電 は、1.5°C シナリオでは発電電力量全体の約 4.5%を占め、2030 年に 6.5 EJ、2050 年に 14.9 EJ に達する。これは、現行水準のそれぞれ 3 倍と 7 倍の増加となる。電力部門や一部の産業部門においてバイオマス利用と CCS を併用することは、ネットゼロ目標を達成するために極めて重要である。バイオマスを利用するプロセスには、原則的に CCS が適用され、2050 年までに年間約 10 $GtCO_2$ 相当を回収できる可能性がある(Lyons *et al.*, 2021)。1.5°C シナリオでは、二酸化炭素回収・貯留を組み合わせたバイオエネルギー(BECCS)によって 2050 年に約 3.4 $GtCO_2$ が回収・貯留されると想定される(84%は電力部門と熱供給部門、16%は産業部門)。

バイオエネルギーは、2020 年の最終エネルギー消費量の 11%を占めた。消費の内訳は、伝統的バイオマス利用(51%)、および産業 (22%)、 家庭・業務(17%)、運輸(9%)、その他の消費(1%)における近代的利用である(図 2.8 を参照)。伝統的利用には、簡単で非効率なかまどや暖炉での利用が含まれる。このような使い方は室内の空気を汚染し、健康に深刻な影響を及ぼす。また、森林劣化をもたらし、それは温室効果ガスの排出と生物多様性の喪失につながる。国連持続可能な開発目標(SDGs)の目標 7 に掲げるように、全ての人にクリーンな調理用燃料を提供するための国際努力が必要である(IEA *et al.*, 2021: 7)。

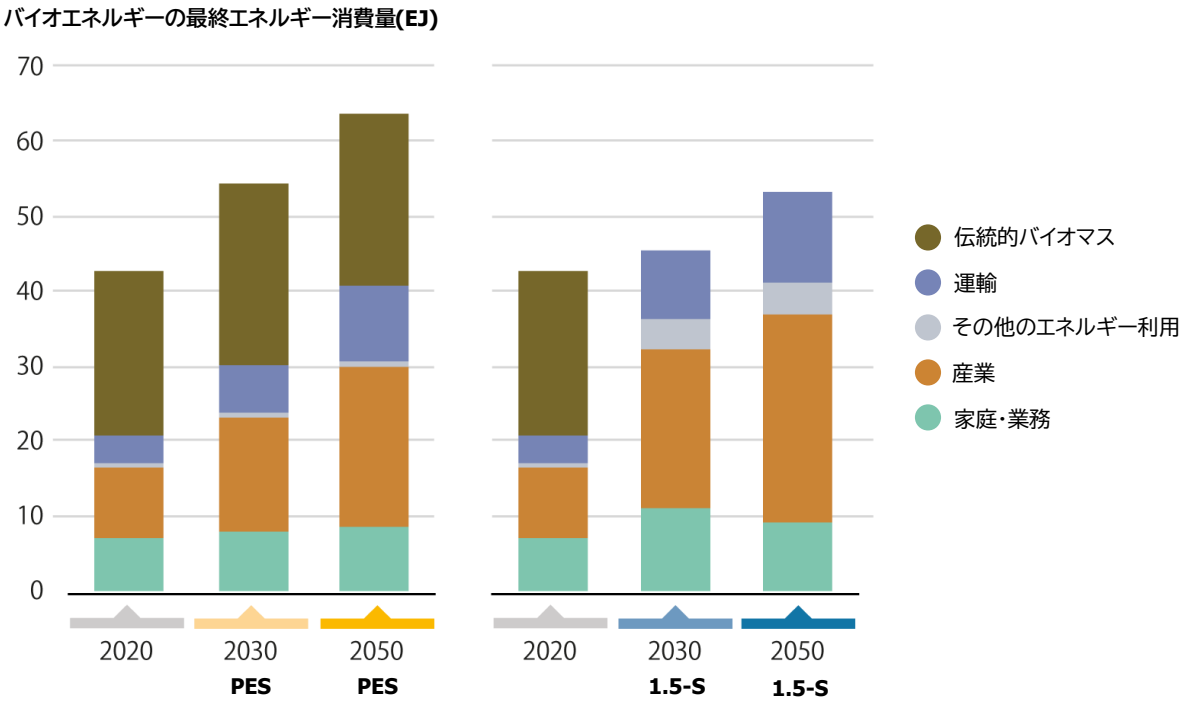
1.5°C シナリオを達成するために必要な主なステップには、非効率な(伝統的)バイオマス利用を 2030 年までに大幅に削減すること、家庭・業務部門におけるエネルギーとしてバイオマスの近代的利用を 2030 年までに拡大し、2050 年まで安定した成長を実現すること、産業部門におけるバイオエネルギー利用を 2050 年まで急増させること、道路輸送、航空、海運の各分野においてバイオ燃料の利用を増やすことなどがある。



原注6 バイオマス、バイオガス、バイオマス廃棄物を含む。

SDGsの目標7を達成するためには、2030年までに伝統的バイオマス利用の大幅な削減が必要である

図 2.8　現行計画シナリオと 1.5°C シナリオにおける 2020 年、2030 年、2050 年のバイオエネルギーの部門別最終エネルギー消費量



注：1.5-S = 1.5°C シナリオ、EJ = エクサジュール、PES = 現行計画シナリオ



1.5°C シナリオでは、2030 年までに家庭・業務部門における調理や暖房用途の非効率なバイオマス利用を大幅に削減することを想定している。2030 年までに全ての人がクリーンな調理方法や調理用燃料を利用できるようにするためには、持続可能に製造されたバイオエネルギーを燃料とする効率の良い改良型調理コンロや電気コンロなど、クリーンな技術を導入する必要がある。建物におけるバイオエネルギーの近代的利用は、2020 年の 7.3 EJ から 2030 年までに 11.3 EJ に拡大し、2050 年までに 9.4 EJ となる。

バイオエネルギーは、産業部門の中温・高温加熱用途において、また化学品原料として重要な役割を果たす。1.5°C シナリオでは、産業部門における世界のバイオエネルギー需要は 2030 年までに 21 EJ、2050 年までに 27.6 EJ に達する。その間、化学・石油化学分野における世界のバイオ由来プラスチックの生産量は、現在の年間 2 Mt 強から年間 73 Mt に拡大する。これは、プラスチック生産全体の約 20%に相当する。バイオマス原料から製造されるその他の合成有機材料も、2050 年までに生産量が 51 Mt に達する。バイオ由来原料が化学品製造において果たす役割は、現在わずかなものである。プラスチックの約 1%、化学品の 1%未満が、バイオ由来原料を用いて製造されている。1.5°C シナリオでは、化学品製造に使用されるバイオエネルギー原料は 2030 年に 4.1 EJ に、2050 年に 10.9 EJ に増加する。

バイオエネルギーは、運輸部門の脱炭素化に貢献する。1.5°C シナリオでは、運輸部門のバイオエネルギー消費量は 2020 年の 3.7 EJ から 2030 年までに 9.1 EJ に、2050 年までに 12 EJ に拡大する。バイオエネルギーの拡大は、燃料効率の向上や電気自動車の利用台数増加を補完するものである。世界中の自動車が電化されるまでの間、特に 2020 年代は、バイオ燃料混合率を高めることが、道路輸送による排出を削減するために極めて重要である。

航空分野では、バイオジェット燃料がこれまでよりはるかに大きな役割を果たす。バイオジェット燃料と合成燃料を併せて使用することにより、航空分野を脱炭素化する機会が開ける。1.5°C シナリオでは、バイオジェット燃料の年間生産量は約 1,100 億リットルに達する。液体バイオ燃料は、運輸部門全体のエネルギー需要の 24%を満たし、その生産量は 2050 年までにほぼ 4 倍に拡大する。海運分野でバイオ燃料が果たす役割はそれより限定的であり、1.5°C シナリオにおいて 2050 年までにエネルギー構成に占める比率はわずか 10%である。表 2.3 は、1.5°C シナリオにおける 2030 年と 2050 年のバイオエネルギーの供給と消費に関する主要指標を示している。

表 2.3 バイオエネルギーの供給と消費に関する主要業績指標：**2030 年**と **2050 年**における現行計画シナリオと **1.5°C** シナリオ

			従来	2030 年		2050 年	
			2020 年	PES	1.5°C シナリオ	PES	1.5°C シナリオ
バイオエネルギー供給	バイオエネルギーの近代的利用への一次供給量 (EJ)	世界	34	50	86	73	135
		G20	30	43	65	58	86
	一次エネルギー供給量に占めるバイオエネルギーの近代的利用の比率(%)	世界	6%	7%	15%	9%	22%
		G20	6%	8%	14%	10%	19%
KPI.01 再生可能エネルギー（電力）	発電に占めるバイオエネルギーの比率 (%)	世界	2%	3%	5%	4%	5%
		G20	2%	3%	4%	2%	3%
KPI.02 再生可能エネルギー（直接利用）	最終エネルギー消費量に占めるバイオエネルギーの近代的利用の比率(%)	世界	6%	6%	12%	7%	15%
		G20	6%	7%	11%	9%	14%
	家庭・業務部門の最終エネルギー消費量に占めるバイオエネルギーの近代的利用の比率(%)	世界	6%	6%	11%	6%	9%
		G20	8%	8%	7%	8%	5%
	運輸部門の最終エネルギー消費量に占めるバイオエネルギーの近代的利用の比率(%)	世界	4%	5%	8%	6%	13%
		G20	4%	5%	8%	8%	12%
	産業部門の最終エネルギー消費量に占めるバイオエネルギーの近代的利用の比率(%)	世界	7%	9%	14%	10%	20%
		G20	7%	9%	14%	11%	20%
KPI.06 CCS、BECCS、その他	BECCS による炭素除去（$GtCO_2$/年）	世界	-	-	0.7	-	3.4
		G20	-	-	0.5	-	1.8

注： BECCS = 二酸化炭素回収・貯留付バイオエネルギー、CCS = 二酸化炭素回収・貯留、EJ = エクサジュール、G20 = 主要 20 カ国、Gt = ギガトン、KPI = 主要業績指標、PES = 現行計画シナリオ

持続可能性は、バイオエネルギー政策における主要な検討事項でなければならない

2.4.2 バイオエネルギーの供給と消費に関する政策

バイオエネルギーの導入状況は、中期・長期目標を達成するために必要な水準を下回っている。この原因には、政治的・制度的（政策の不確実性、脆弱な制度構造など）、財務的・経済的（化石燃料補助金、高いコスト、手頃な資金調達ができない）、技術的・インフラ関連（技術的即応性の低さ、技術的信頼性、インフラの欠如など）、サプライチェーン関連（安定した原料供給や適格労働者の欠如、持続可能性リスクなど）、情報・国民意識関連（国民意識の低さ、信頼できる情報の欠如など）といったさまざまな障壁がある(IRENA, 2022j)。

バイオエネルギーの持続可能性は複雑な問題である。原則的には、バイオエネルギーの利用はさまざまな便益をもたらす可能性がある。例えば、発電、熱供給、運輸、産業において化石燃料をバイオエネルギーに代えることにより、温室効果ガス排出量を削減することができる。また、環境的便益や社会経済的便益ももたらす。その一方で、バイオエネルギーの開発は、適切に管理されなければ、エネルギー部門以外の部門で環境的、社会的、経済的悪影響を及ぼすおそれがある。そのような影響は、バイオエネルギーが農業、林業、農村開発、廃棄物管理といった多くの重要な分野と密接に関わり合っていることに起因する。同時に、バイオエネルギーによる脱炭素化を実施する際には、バイオマスの伝統的利用を段階的に廃止するとともに、炭素蓄積量の減少、間接的土地利用やサプライチェーンによる排出量を考慮することが望ましい。



あるバイオエネルギー生産モデルは、ある場所では持続可能と見なされるが、別の場所ではそうではない可能性がある。その理由として、例えば気候の違いや生物物理学的相違がある。人口統計、政治（土地所有権が関わる場合など）、文化も、ある場所にバイオエネルギーを導入できるか否かを決定する要因になる。バイオエネルギー開発に関わる意思決定や持続可能性を、包括的な枠組みによって実現することもできる。そのような枠組みには、持続可能性目標の設定と長期的計画立案、バイオエネルギーに関する部門横断的調整、規制と認証制度に支えられた持続可能性ガバナンス、そして、バイオエネルギー政策の立案と SDGs の統合を含めることが望ましい（図 2.9）。

図 2.9　持続可能なバイオエネルギー開発のための政策枠組み



出典：(IRENA, 2022j).



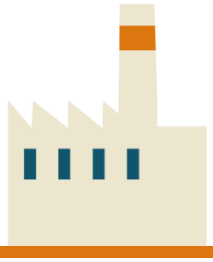
バイオエネルギー政策には、環境、林業、農業政策との調整が必要

長期的な国家バイオエネルギー開発戦略および計画は、一貫した長期的な政策シグナルを発信し、投資家やプロジェクト開発者の間に信頼を構築するとともに、政策立案者を導く役割を果たす。長期ロードマップを策定し、複数の目的を設定することにより、技術投資の強化、商業化や規模拡大の加速を促進することができる。明確な中期的・長期的バイオエネルギー目標を設定することにより、具体的な計画やインセンティブを通して政策の確実性を高めることができる。ただし、バイオエネルギー目標は、持続可能な方法で調達できる原料の数量に基づいて設定することが望ましい。これにより、環境や社会へのさらなる悪影響を防ぐことができる。長期的なバイオエネルギー開発には、産業、環境、林業、農業、エネルギーなど、さまざまな分野にまたがる協調的かつ統合的な政策や行動計画が必要である。分野横断的な協調と統合を図ることにより、政策の一貫性を確保し、起こりうる持続可能性の問題を防ぎ、分野間の相乗作用を生み出す機会を切り開くことができる。

バイオエネルギー需要を拡大し、投資を呼び込むために、命令や義務も有効である。これには、熱供給部門で再生可能エネルギーの利用を要件とする、運輸部門でバイオ燃料の混合を義務化するなどがある。また、バイオエネルギーの生産や消費に関する認可、許可、割当などの政策も含まれる。特定の最終消費部門において化石燃料を禁止する公約や対策も、バイオエネルギー産業の開発を支援することができる。これに関連して、各国、特に G20 諸国は、補助金のかなりの部分を占める化石燃料の生産と消費に対する補助金を早急に廃止する必要がある(Parry *et al.*, 2021)。さらに、バイオエネルギーと他の再生可能エネルギーに均等な競争機会を提供するためには、カーボンプライシング政策が必要である。バイオエネルギー製品の価格競争力を化石燃料製品のそれよりも高めるために、課税・課金を軽減することも考えられる。例えば、バイオエネルギー生産者への付加価値税や液体バイオ燃料への輸入関税などがある。助成金や補助金は、バイオエネルギーや他の再生可能エネルギーによるソリューションを支援する一般的な手段である。それにより、先行投資や運用コストを削減することができる。

技術の研究、開発、実証を通してイノベーションを支援することにより、技術即応性を高め、航空バイオ燃料のような新しいバイオ燃料の商業化やバイオエネルギーの産業利用を加速することができる。地域熱供給網やバイオ燃料の流通システムのような必要なインフラへの投資は連系の義務化によって促進することができ、あるいは自治体が直接投資することも考えられる。訓練、教育、能力構築、技能開発のイニシアティブや関連政策によって、労働者の技能向上を支援することができ、労働者はその技能を生かしてサプライチェーン全体にわたるバイオエネルギーシステムを設計、設置、運用、維持することができる。政府や自治体は、バイオエネルギーに伴う便益や課題に関する意識向上を図るとともに、技術の採用を奨励することができる。

産業部門の バリューチェーンにおける 抜本的変化が必要である



2.5 産業部門

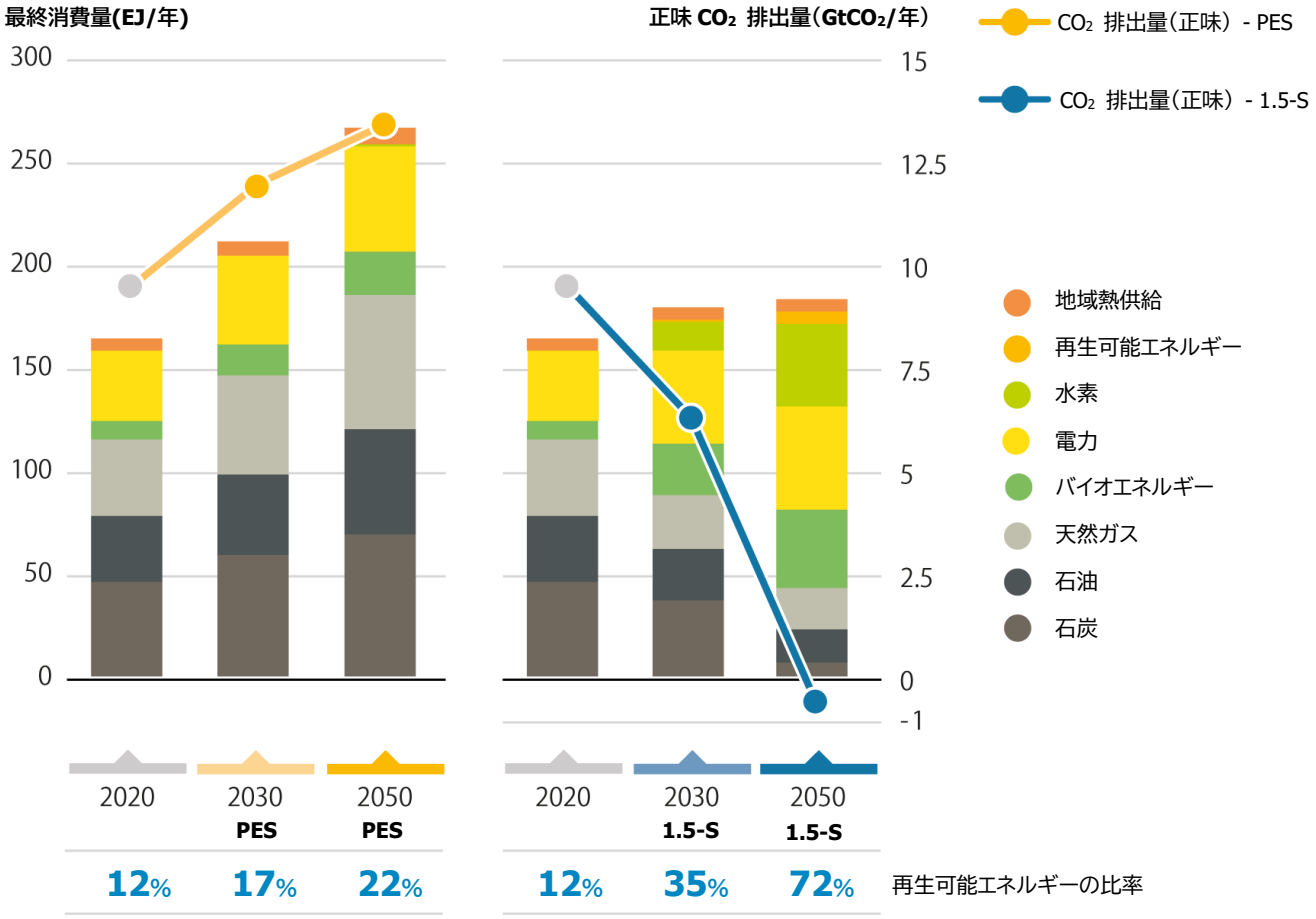
2.5.1 産業部門の転換に関する主要指標

主要材料の工業生産は、近代経済の実現要因として不可欠である。国が発展するにつれ、そのような材料の需要が拡大し、したがってエネルギー消費も増加する。産業部門は、2020 年における世界の最終エネルギー消費量の 36%を占めている。さらに、製造工程は炭素集約度が高いため、世界のエネルギー関連の CO_2 排出量のうち 4 分の 1 を産業部門が占めている（電力部門に次いで第 2 位の排出源）。

現在、産業部門のエネルギー消費量のほとんどは化石燃料によるもので、主要な国や地域に集中している。図 2.10 に示す通り、化石燃料は 2020 年における産業部門のエネルギー消費量の 71%を占めており、残りを電力(20%)、バイオエネルギーおよび地域熱供給(9%)が補っている。主要市場については、中国が 2020 年における世界の産業部門のエネルギー消費量の 41%以上を占めており、米国(9%)、EU(8%)、インド(8%)が続く。

産業部門全体にわたる排出削減を実現するためには、材料を製造し、消費し、処分する方法を抜本的に変える必要が生じる。IRENA の 1.5°C シナリオは、五つの柱に基づく一連の脱炭素化戦略を提案している。需要の削減やエネルギー効率および材料効率の向上と、それと並行した循環経済の実践と構造改革、クリーン電力（主に再生可能エネルギー電源によるもの）の直接利用、再生可能エネルギー由来の熱とバイオマス（太陽熱、地熱、バイオ燃料、バイオ原料など）の直接利用、合成燃料や原料（主に再生可能エネルギーを利用）としてのクリーン電力の間接的利用、CO_2 除去技術や CCS 技術（バイオエネルギーと二酸化炭素回収・有効利用および／または貯留(CCUS)など）の利用である。

図 2.10　産業部門：現行計画シナリオおよび 1.5°C シナリオにおける 2020 年、2030 年、2050 年の最終消費量と対応する排出量



注： 数値には、非エネルギー用途、コークス炉、溶鉱炉、化学燃料および原料、産業用コージェネレーションのエネルギー需要が含まれる。再生可能エネルギーの比率には、直接利用と供給側の寄与(発電／熱生産／グリーン水素製造)が含まれる。正味排出量は二酸化炭素回収の効果を考慮している。1.5-S = 1.5°C シナリオ、EJ = エクサジュール、$GtCO_2$ = ギガトン(二酸化炭素換算)、PES = 現行計画シナリオ

1.5°C シナリオでは、産業部門のエネルギー利用を効率化し、2030 年までの消費量を 180 EJ 程度に抑え、2050 年まで同程度の水準を維持する(2020 年よりやや増加)ことが提案されている。消費量が最も多い国々は引き続き産業部門を率いるが、市場における立場の変遷によりそのシェアには変化が生じる。CO_2排出量については、この意欲的なシナリオでは、G20 諸国において 2050 年までに産業部門の排出量を 100%以上削減することが可能である(表 2.4)。この効果をもたらす主な実現要因は、産業部門における再生可能エネルギー(直接利用、供給側関連)の比率が 2020 年の 12%から 2030 年には 35%に、2050 年には 72%に増加することである。2050 年には産業部門のエネルギー需要のうち約 27%を電力が満たし、バイオエネルギー、地域熱供給、その他の再生可能エネルギー(27%を満たす)、クリーン水素(22%を満たす)が続く。

表 2.4　産業部門の主要業績指標：2030 年と 2050 年における現行計画シナリオと 1.5°C シナリオ [a]

			従来	2030 年		2050 年	
			2020 年	PES	1.5°C シナリオ	PES	1.5°C シナリオ
KPI.02 再生可能エネルギー（直接利用）	バイオマス（原料含む）(EJ)	世界	9	15	24	21	36
		G20	8	12	19	18	28
	太陽熱消費量 (TWh_{th})	世界	5[b]	4	588	5	1 254
		G20	5[b]	4	516	5	1 031
	太陽熱集熱器設置面積（億 m^2）	世界	0.11[b]	0.08	12.54	0.11	26.73
		G20	0.12[b]	0.08	11.01	0.11	21.98
KPI.03 エネルギー集約度	最終消費量(EJ)	世界	173	213	181	268	183
		G20	148	172	148	211	143
KPI.04 最終消費部門の電化（直接）	最終エネルギー消費量に占める電力の比率 (%)	世界	20%	20%	25%	19%	27%
		G20	20%	21%	25%	19%	28%
	ヒートポンプ（万台）	世界	<100	300	3 500	600	8 000
		G20	<100	300	3 100	500	7 100
KPI.05 クリーン水素および派生物	クリーン水素消費量 (EJ)[c]	世界	0[d]	0.2	14.4	0.8	40.0
		G20	0[d]	0.2	12.0	0.8	31.1
KPI.06 CCS、BECCS、その他	CCS（回収済み $GtCO_2$/年）	世界	0[d]	0.1	1.0	0.4	3.1
		G20	0[d]	0.1	0.8	0.3	2.1
	BECCS（回収済み $GtCO_2$/年）	世界	0[d]	0	0.7	0	1.0
		G20	0[d]	0	0.4	0	0.7
排出量	二酸化炭素回収・除去後の CO_2 排出量（$GtCO_2$/年）	世界	9.0	11.0	5.8	12.9	-0.5
		G20	7.7	9.0	4.8	10.0	-0.3

表 2.4 注:
a.数値には非エネルギー利用も含む。
b.2019 年データ。
c.クリーン水素消費は、産業プロセスにおけるグリーン水素およびブルー水素の直接使用を指す。
d.現在は小規模なクリーン水素生産が行われており、生産量は世界で年間 28 kt、G20 諸国で 8.4 kt である。産業部門における CCS による回収量は、世界で年間 3.9 $MtCO_2$ で、G20 諸国によるものである。BECCS による回収量は世界で 0.97 $MtCO_2$ で、これも G20 諸国によるものである。

注: BECCS = 二酸化炭素回収・貯留付バイオエネルギー、CCS = 二酸化炭素回収・貯留、EJ = エクサジュール、G20 =主要 20 カ国、$GtCO_2$ = ギガトン(二酸化炭素換算)、KPI = 主要業績指標、PES = 現行計画シナリオ、TWhth = テラワット時熱

産業部門でエネルギー消費量と排出量が最も多い三つのサブ部門は、鉄鋼、セメント・石灰、化学品・石油化学品である。エネルギー関連の排出量のうちこれらが占める比率は、2020 年に 70%近くに上った(28%、30%、11%)。これらのサブ部門については、以下の項で詳細に論じる。

セメント

セメント製造には、さまざまな設計思想のキルンが用いられる。クリンカー製造は、原材料の水分含有量に応じて 2 種類(「乾式」と「湿式」)に大別される(IEA, 2018)。乾式キルンは必要なエネルギーが湿式キルンよりも少ないため、現在セメント製造に最も広く採用されている製法である(IEA, 2018)。2020 年には世界で約 42 億 t のセメントが生産された。これは世界の最終エネルギー消費量(12.5 EJ)の 3%に相当し、世界の CO_2 排出量(2.7 Gt)の 8%を占め、60%は関連プロセスによるものである。セメント生産量が最も多い国は中国(57%)で、インド(7%)、EU(4%)、米国(2%)が続く。

IRENAの1.5°Cシナリオでは、
産業部門でエネルギー消費量と
排出量が最も多いサブ部門は
2050年までにマイナス排出に達する



セメント分野の転換には、クリンカーの代替、循環経済の実践、再生可能エネルギーの拡大が必要である

セメント分野の競争力を維持しながら転換を成功させるためには、セメントサイクル全体を考慮に入れつつ、いくつかの戦略を同時に実行する必要がある。

1) **セメントの使用量を削減する**（品質と材料強度を維持しつつ、コンクリートに使用されるセメントの量とインフラや建築物に使用されるコンクリートの量を削減するなど）。1.5°C シナリオでは、現行計画シナリオと比較して従来型セメントの使用量が 2030 年までに 8%、2050 年までに約 25%減少する。これは、コンクリートに使用されるセメントの量と建設に使用されるコンクリートの量が減少するためである。

2) **クリンカーに代わる添加材や充填材の使用を増やすとともに、循環経済の実践によって補足する。**最も一般的なタイプのセメントは「ポルトランドセメント」で、クリンカーのほか、石膏や粉末石灰といったより少量の添加材を含んでいる(IRENA, 2020c)。従来のクリンカーは「補助的なセメント系材料」と呼ばれる添加材（高炉スラグ、石炭フライアッシュ、赤泥、焼成粘土など）によって部分的に代替することができ、そのほとんどは他の材料の製造工程の廃棄物である。1.5°C シナリオでは、セメントにおけるクリンカーの使用量を 2050 年までに 40%削減することを想定している(IEA, 2018) (IRENA, 2020c)。したがって、セメントに含まれるクリンカーの比率は現在世界平均で 73%であるが、これを 2050 年までに主に上位市場において 60%前後に減少させることになる。さらなる代替を進めるために、現在研究中または試験中の試みがある。同時に、これらの代替材料の利用可能性やセメント特性に関する国の基準についても考慮することが望ましい。

3) **セメント製造の効率化策を促進する。**主に新興国（インドなど）で計画されているグリーンフィールドプロジェクトでは、最低基準を定めるとともに、既存ユニットの効率改善を図るために利用可能な最適技術の適用を促進することが望ましい。1.5°C シナリオでは、各国の間で生産プロセスのうち特定のエネルギー消費が改善されることにより、2030 年まで今日の 12 EJ と同程度のエネルギー消費量が維持される。消費量は減少し、2050 年には 10 EJ に達する。現行計画シナリオと比較して、消費量は 2030 年に 13%、2050 年に 36%少ない。現在の主要市場は、2050 年におけるセメント産業の最終エネルギー消費量の約 50%を占める。

4) **再生可能エネルギーや代替燃料に切り替える。**IRENA の 1.5°C シナリオでは、再生可能エネルギー（バイオエネルギー、その他の再生可能エネルギー、電力）全体の比率が 2020 年の 4%から 2050 年までにおよそ 55%に拡大し、その大部分はバイオエネルギーであることが示唆されている。バイオマスのポテンシャルがある大国（インド、中国、ブラジルなど）は、バイオマスの利用可能性という点で注目に値する。なぜなら、バイオマス生産とセメントユニット（施設）でのバイオマス処理は、必要な排出量削減を実現するための鍵になるからである。

5) **CCS-CCUS や BECCS 技術のような CO_2 除去策を適用する。**特に残余プロセス排出量を回収する。1.5°C シナリオでは、これにより 2050 年までに総回収量がおよそ 2.1 $GtCO_2$/年に達する。

最後に、セメント分野の加熱工程を脱炭素化する新たなソリューションには、電気アーク炉やソーラーキルンの使用がある（ボックス 2.6 参照）。

水素に基づく主なイノベーションを電化やリサイクルで補完することにより、低排出の鉄鋼製造が可能になる

鉄鋼

2020 年における世界の鉄鋼生産量は 19 億 t に上る。生産量の大部分を中国(57%)が占め、EU(7%)、インド(5%)、米国(4%)がそれに続く。鉄鋼製造は 35 EJ のエネルギー(世界の最終エネルギー消費量の 9%)を消費し、世界の CO_2 排出量の 7%を占める。世界で製造された鉄鋼の 70%以上は、溶鉱炉／塩基性酸素転炉(BF-BOF)を用いて製造されおり、ほとんどが化学的還元剤としての原料炭である。

鉄鋼分野を脱炭素化するにはいくつかの選択肢がある。

1) **循環経済の実践とともに、電気アーク炉による製鋼への再生スクラップ利用を増やすことが、重要な役割を果たす。**世界の鉄鋼生産量は、2020 年に 19 億 t 強であったのに対し、2050 年までに約 40%拡大し、26 億 t 近くに達すると予想される。IRENA の 1.5°C シナリオでは、循環経済施策により鉄鋼生産量は 2030 年に 7%、2050 年に 15%少なくなる。世界の鉄鋼生産量のおよそ 3 分の 1 がスクラップを用いた電気アーク炉法によるものとなり、中国とインドが主要生産国となる。

2) **鉄鋼製造の構造転換が必要であり、エネルギー消費においても、還元剤としても、再生可能エネルギーが化石燃料に取って代わる必要がある。**鋼鉄分野では再生可能エネルギー(バイオエネルギー、その他の再生可能エネルギー、電力供給、グリーン水素製造)の比率が拡大し、2020 年の 6%から 2030 年には 20%に、2050 年には 61%に達する。電気アーク炉を用いた水素による鉄の直接還元のようなイノベーションによって、有望で効率的な低排出の技術的道すじが示されており(ボックス 2.5 を参照)、それは工程のデジタリゼーションによって補完される(すなわち、インダストリー 4.0 の実践の統合)。これらの技術やエネルギー効率化策を実施することにより 1.5°C シナリオでは鉄鋼分野の最終エネルギー消費量は 2030 年に 36 EJ となり、2050 年には 24 EJ まで減少する(現行計画シナリオにおける各年よりそれぞれ 14%および 55%少ない)。主要市場は最終エネルギー消費量の 40%以上を占め、インドと中国が主要消費国となる。

3) 鉄鋼製造において化石燃料を用いた工程が引き続き使用される場合(BF-BOF、天然ガス／直接還元鉄など)、**CCS はさらなる排出量削減の選択肢となる。**1.5°C シナリオではこの対策が実施され、総回収量は 2050 年におよそ 0.3 $GtCO_2$/年に達する。

4) **産業移転。**鉄鉱石採掘とグリーン製鉄を低コストの再生可能エネルギー源が豊富な地域(オーストラリア、ブラジルなど)に組み合わせることにより、新たな価値とサプライチェーンを創出するとともに、化石燃料への依存度が大きい国々(中国、日本、韓国など)から製鉄・製鋼プロセスを切り離すことができる。

鉄鋼分野の加熱工程を脱炭素化するさらなる革新的ソリューションには、高温または超高温ヒートポンプ、電気ボイラー、鉄鉱石の電気分解などがある(ボックス 2.6 を参照)。

ボックス 2.5　鉄鋼分野の脱炭素化に向けた転換を加速する：ブレークスルー・アジェンダ報告書が示す主要施策

2021 年の国連気候変動会議で発表された「ブレークスルー・アジェンダ」は、クリーンエネルギー技術のためのイノベーションと開発を加速することを目的としている。アジェンダでは、設定された目標に向けた進捗状況を追跡する年間の評価サイクルが規定され、導入を推進するために国際協力を行うべき分野が挙げられている。IRENA は、国際エネルギー機関および国連ハイレベル気候チャンピオンと協力を行い、年 1 回発行される「ブレークスルー・アジェンダ報告書」で推奨される国際協力の指針を提供している。2022 年 9 月に発表されたレポートの初版は、電力、道路、運輸、鉄鋼、水素、農業の各分野に重点を置いている(IEA et al., 2022)。

鋼鉄は、二つのルートで製造することができる。鉄鉱石から作る一次製鋼と、鋼スクラップから作る二次製鋼である。一次製鋼は、エネルギー集約度と排出集約度が非常に高い。しかし、鉄鋼産業を脱炭素化するには、低排出な一次製鋼の方法を導入する必要がある。そのような方法には、主に水素の利用があり、それと併せて二酸化炭素回収や直接電化が考えられる。

この報告書では、鉄鋼分野の脱炭素化に向けた転換を加速する主要施策が取り上げられている。

- 上位の鉄鋼生産国は、低排出スチールやニアゼロカーボン・スチールの確固とした共通の定義や基準を導入しなければならない。そうすることで、購入者がより確実かつ容易に高排出または低排出の鋼材を区別することが可能になる。例えば、複数の団体が炭素会計基準や認証制度を確立する取り組みを行っている。例えば ResponsibleSteel には、51 社が加盟している。

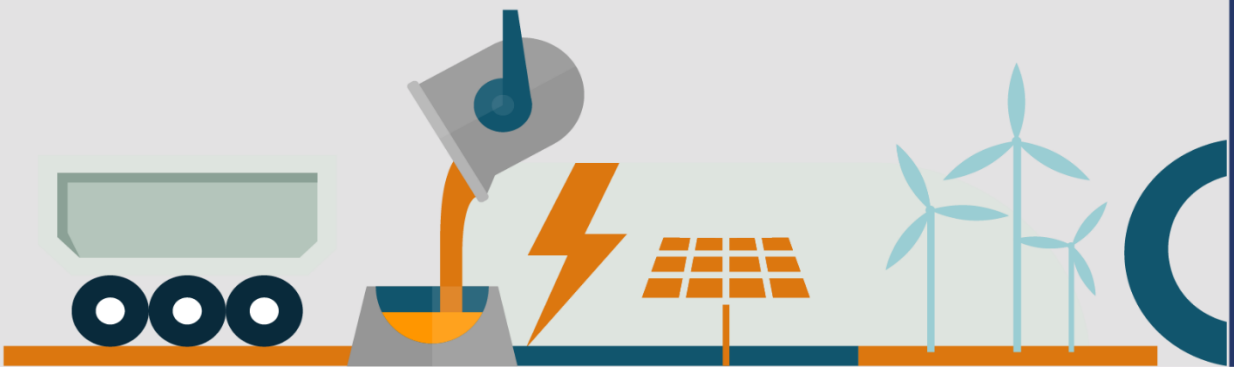
- 割増コストを解消するため、低排出スチールやニアゼロカーボン・スチールの需要を創出する対策を早急に講じる必要がある。政府や企業は、調達や先進的な購入義務を通して十分な需要を創出することができる。そのようなメカニズムを用いて需要を保証することにより、革新的な製鋼工程やインフラへの投資を呼び込むことができる。このような事例として、クリーンエネルギー大臣会合(CEM)産業高度脱炭素化イニシアティブ(IDDI)が発足した「SteelZero」と「グリーン公共調達誓約」がある。これらは、低排出スチールやニアゼロカーボン・スチールのマスマーケットのコミットメントを目指す官民のイニシアティブである。

- 複数の地域で、革新的な製鋼技術を拡大する研究、開発、実証への民間と公共の両部門からの投資を結集させる。これらの技術には、水素利用、二酸化炭素回収・有効利用および／または貯留(CCUS)、直接還元炉などがある。また、技術の拡大だけでなく、関連するサプライチェーンにも支援を提供する必要がある。鉄鋼分野には、欧州鉄鋼技術プラットフォーム、グローバル低炭素冶金イノベーション連合など、少数の研究・イノベーションフォーラムがある。

- 商業規模のプロジェクトでは、極めて重要な実現支援インフラの導入に対する先を見据えたアプローチが必要となる。これには、送電設備、二酸化炭素(CO_2)や水素の貯蔵および輸送設備の開発などが含まれる。商業活動や関連インフラには、熟練労働者も必要となる。低炭素燃料や CCUS のためのインフラやサプライチェーンを対象とする世界の投資は、160 億ドルに達する。

- 政府や企業などの先行者は、最初のプラントから数年以内に各国が次々に「ファストフォロワー」となるよう、学んだ知見を共有しなければならない。これには、プロジェクト開発、発電所運用、許認可や規制、低 CO_2 原料のサプライチェーン、CO_2 パイプラインと鉄鋼インフラの統合などに関する幅広い知識がある。アプローチの共有には、地域社会も含める必要がある。

- 技術と政策の道すじが明らかになったら、官民部門の双方が、大規模な脱炭素化を目指す重要な節目を設定した中期・長期戦略を策定しなければならない。戦略には、材料効率、リサイクル、原材料など、循環型サプライチェーンの部分間の関係を含めることが望ましい。例えば、15 の国／地域を対象とする 30 以上のロードマップが、鉄鋼分野の大規模な脱炭素化に重点を置いている。



化学分野を脱炭素化するために、エネルギー効率化、循環経済施策、クリーンエネルギー源の利用が必要である

化学品

化学・石油化学分野は、世界の産業部門による CO_2 排出量の大きな部分を占めている。化学品製造によるエネルギー関連およびプロセス関連の CO_2 排出量は、2020 年に約 0.83 Gt であった。同じ年、世界の化学分野の最終エネルギー消費量は 20 EJ であった。そのうち最も比率が高かったのは中国(エネルギーの 46%)、次いで米国(15%)、EU(11%)、インド(2%)である。

現行計画シナリオでは、プラスチックの世界総需要は 2020 年の 406 Mt から増加し、2050 年までに 986 Mt に達する。この需要を満たすため、プラスチック供給を年間 600 Mt 増やす必要がある。同分野の加工エネルギー(電力を含む)需要は、同時期の 31 年間に年間 41 EJ に達すると推定され、現行計画シナリオでは加工エネルギーの世界総需要の半分以上が石油・天然ガスによって満たされる。一方 1.5°C シナリオでは、化学・石油化学分野の最終エネルギー消費量は 2020 年の 20 EJ から増加し、2030 年までに 26 EJ に達する。2050 年には、加工エネルギー消費量が 36 EJ に増加する(中国 31%、米国 19%、インド 5%、EU4%)。1.5°C シナリオで推定される加工エネルギー消費量は、現行計画シナリオより約 12%少ない。これは、製造プロセスのエネルギー効率が年間 3%改善されることによる。1.5°C シナリオで推定される非エネルギー利用は、現行計画シナリオより 25%近く少ない。これは、再利用やリサイクルの強化、それと併せたプラスチック需要の持続可能な削減など、循環経済戦略によるものである。





これらの目標を達成するためには、化学分野の課題に合わせたエネルギー転換の一環としていくつかの施策を講じる必要がある。

1) **代替燃料への転換の必要性。**2020 年、化学分野の主なエネルギーキャリアは天然ガス(32%)、電力(22%)、地域熱・冷熱供給(16%)で、次いで石油(15%)、石炭(14%)である。1.5°C シナリオでは、2050 年にエネルギー消費量に占める比率が最も高いのはバイオマス(27%)で、電力(21%)と水素(19%)を上回り、石油(10%)と天然ガス(9%)がそれに続く。残りは、地域熱供給(7%)、石炭(5%)、太陽熱(2%)からなる。

2) **再生可能エネルギーへの転換と化学プロセスのエネルギー効率化。**1.5°C シナリオの技術ポートフォリオによって、化学分野は 2050 年までに全世界でネット・ネガティブを達成する。排出量削減努力には、加工のエネルギー源や原材料としての再生可能エネルギーによるソリューションのほか、再生可能エネルギー由来水素、エネルギー効率化、CCS および BECCS がある。

3) **循環経済施策の導入。**例えば、再利用、メカニカルおよびケミカルリサイクル率、材料代替、持続可能原料の使用による需要削減といった排出量削減努力は、需要削減、それと併せたリサイクル、製造プロセスの電力需要を満たすための再生可能エネルギーの利用からなる。現行計画シナリオでは、世界の化学分野の CO_2 排出量は、2020 年の 2.4 Gt から 2050 年の 4.7 Gt へ倍増すると推定される。バイオ由来化学品は、化学品・プラスチック需要の拡大を化石燃料と切り離すための要となる。

4) **グリーン水素とバイオマスへの移行。**再生可能エネルギー由来水素の世界需要は、25 EJ に拡大する(年間約 180 Mt の水素に相当)。世界の化学・石油化学分野におけるバイオマスの利用は、2050 年までに年間 22 EJ に増加する。総プロセスエネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの比率(再生可能エネルギー電力と地域熱供給を除く)は、2050 年までに 50%に拡大する。

これらの対策に加え、化学分野では、新技術の電気分解炉を使用し、高温または超高温ヒートポンプその他の技術の利用を検討することにより、加熱工程の脱炭素化を達成する可能性もある(ボックス 2.6 を参照)。さらに、化学分野の主なグリーンイノベーションとして、グリーンケミストリー、プロセス強化がある。

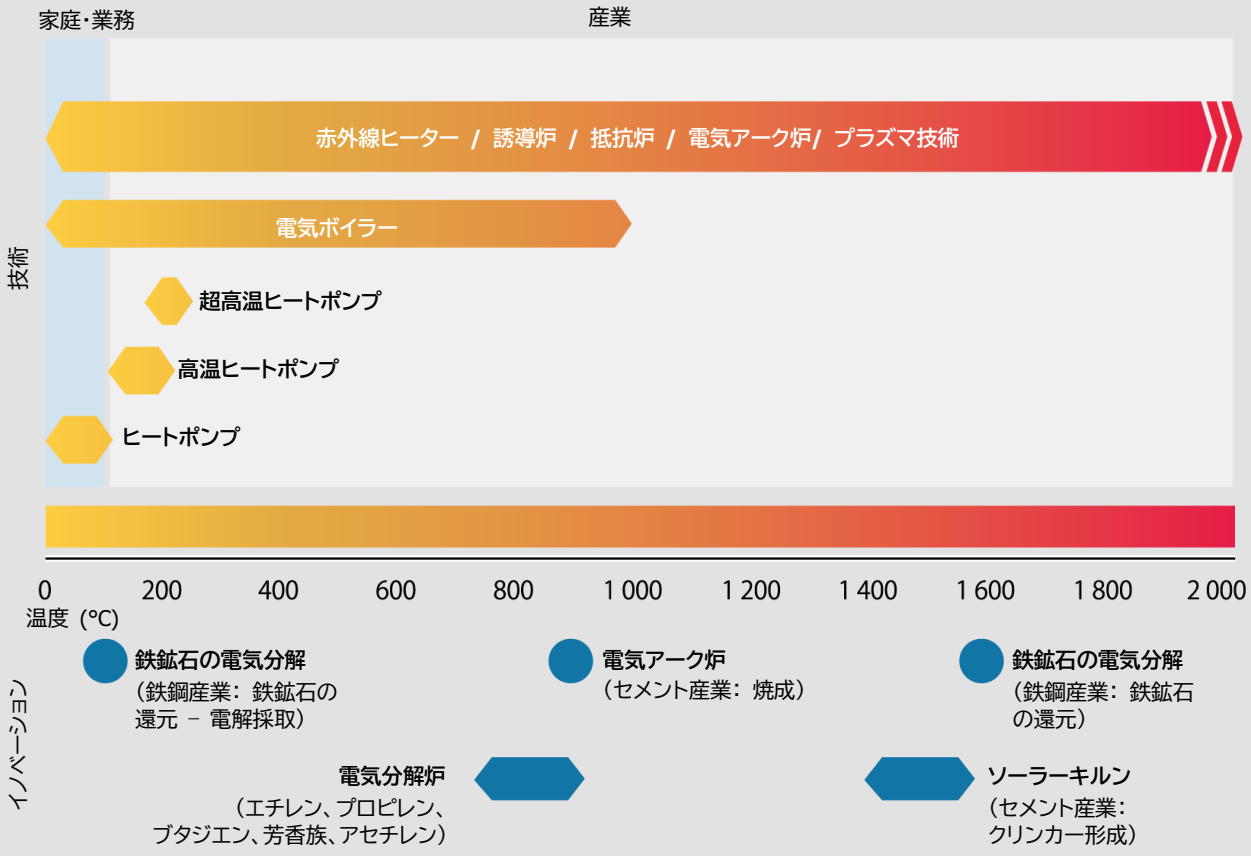
ボックス 2.6　産業部門の加熱工程を脱炭素化する新技術

産業プロセスで必要とされる温度には非常に大きな幅がある。それは、産業部門における全てのエネルギーニーズを満たせる単一技術は存在しないことを意味する。家庭・業務部門ではヒートポンプでおそらく全ての空調ニーズを満たすことができるのと対照的である。

図 2.11 は、産業部門で用いられる温度と革新技術の応用を概観したものである。見て分かる通り、特定の産業プロセスでは使用温度の範囲が最高 2,000°C まで及ぶ。

産業部門では、間接電化（従来の燃料に代わる合成燃料の製造に電力の利用（例えば電力-水素-熱））で便益を得ることができる。また、電気炉、電気ボイラー、ヒートポンプ、その他の電解プロセスに電力を直接利用することができる。

図 2.11　産業部門で用いられる温度の範囲と技術



出典：(IRENA, 発刊予定 [a]).

高温ヒートポンプ(HTHP)は、ヒートシンク温度が 90°C から 160°C のヒートポンプを指す(Arpagaus *et al.*, 2018)。HTHP は成熟技術ではないが、商業的に利用可能になれば、多くの用途で電化が可能になる。そのような用途のひとつが低温殺菌処理であり、電化によって大幅な省エネルギーが可能になる。同様に、全ての乾燥工程がヒートポンプ導入の恩恵を得ると考えられており、そのことは EU の DryFiciency プロジェクトによって実証されている(DRYFICIENCY project, 2016)。

電化が最も困難な産業部門は、主に化学、セメント、鉄鋼の 3 分野である。これらの分野については有望なソリューションが開発されているが、それらの技術的即応性はまだ低い。化学分野については、電気分解炉(e クラッカー)が試験段階にある。セメント分野では、プラズマ発生装置によって熱が供給される新型キルンに関する取り組みが行われている(Somers, 2020)。最後に、鉄鋼分野では新たな電解還元プロセスを開発する努力が行われているが、まだ試験規模である。

電気分解炉(eCF)実験装置

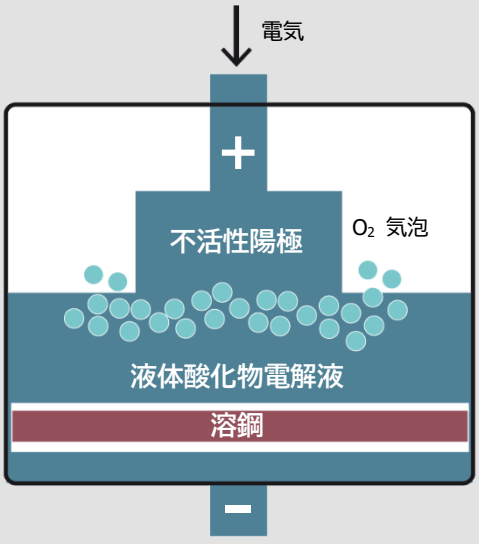
Shell および Dow は、電気加熱式蒸気分解炉の実験ユニットの稼働を開始している。アムステルダム・エネルギー転換キャンパス(オランダ)に設置されているこの装置は、両社の共同技術開発プログラム、すなわち、蒸気分解炉を電化し、石油化学品製造における極めて炭素集約度の高いプロセスの脱炭素化に一歩近づこうとするプログラムにおいて、重要な節目となっている。今日のガス加熱式蒸気分解炉に代わるものとして、2023 年を通して装置の試験が行われる。このソリューションは 2025 年までに規模を拡大し、投資支援の対象となる可能性がある。

Boston Metal：電解法で鉄鉱石を鋼に転換

マサチューセッツ工科大学からスピンアウトしたテクノロジー企業は、低い金属製の円筒の上部から煙突のようなチューブが突き出ており、前部に卵形開口がある装置を開発した。この装置は、合金鉄を製造するために作られている。合金鉄は、特定グレードの鋼を製造するために用いられる利幅の大きい材料で、このスタートアップ企業の最初の対象となる市場である。

「煙突」は陽極である。底面に沿った薄い金属層は陰極を形成する。プラスとマイナスの電極を組み合わせてポンプのように作用させ、金属鉱物とその他の酸化物を混合したチャンバー内の電解液中で電子を移動させる。

電解液の成分は、同社の中核技術の極めて重要な部分である。鋼鉄の場合、その他の酸化物が高温で溶剤として作用し、それ自体は分解されることなく、酸化鉄を分解する。



出典：(Temple, 2018)

電流によって液体が熱せられ、鉄から分離した酸素の気泡が上部に上昇する一方、それにより生じた金属は底に堆積する。前面開口部に張った膜をオペレーターが「開栓」、つまり裂け目を入れることで、溶けた金属が流れ出る(Temple, 2018)。

▸続く

ボックス 2.6　産業部門の加熱工程を脱炭素化する新技術（続き）

ソーラークリンカー製造

2022 年初め、Cemex, S.A.B. de C.V.（Cemex；モンテレイ、メキシコ）と Synhelion SA（ルガーノ、スイス）は、クリンカー製造プロセスと Synhelion の太陽熱集熱装置を組み合わせてソーラークリンカーを製造することに成功した。この画期的業績は、完全に太陽熱式のセメントプラント実現に向けた第一歩である。クリンカーは、石灰、粘土、その他の原料がロータリーキルン内で 1,500°C 近い温度で溶融することによって製造される。通常キルンは化石燃料で加熱するため、プロセスによる直接的な二酸化炭素排出量の約 40%を占めている。化石燃料を完全に太陽熱エネルギーに置き換えることができれば、2050 年までに炭素中立を達成するための業界努力におけるゲームチェンジャーになる。Synhelion と Cemex の研究開発チームは、クリンカー製造プロセスと Synhelion の太陽熱集熱装置を組み合わせることによって、集光太陽熱でクリンカーを製造する試験生産ユニットを設置した。試験装置は、スペイン、マドリッド近郊に立地する IMDEA Energy の超高集光度ソーラータワーに設置されている。

2.5.2 産業部門の転換を促す政策

産業転換のためには、戦略、規制、基準、金融的・財政的インセンティブ、その他の施策を組み合わせることによって、低炭素工業製品の初期の市場需要を創出し、それらの収益性を高め、化石燃料を用いた製品と公平な条件で競争できるようにする必要がある。実現要因としての役割を果たす政策や対策には、戦略やロードマップ、カーボンプライシング、グリーン公共調達、低炭素材料・製品に関する基準、循環型の枠組み、さらには情報と経験の共有を促すプログラムやイニシアティブなどがある。

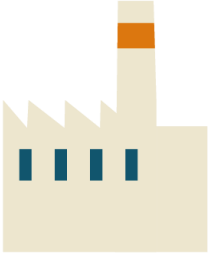
国の産業転換戦略やロードマップは、投資家や産業関係者に長期的なシグナルを送る。それらは産業の発展を導き、それによって技術の進歩やビジネスイノベーションの加速を促すことができる。一方、これらの戦略に盛り込まれた目標や予定は、該当する分野の間で足並みが揃うよう調整することが望ましい（グリーン水素、持続可能なバイオマス、電化目標など）。例えば、英国政府は 2021 年、産業部門の排出量を 2035 年までに 3 分の 2 削減し、2050 年までに少なくとも 90%削減することを目指す国の産業脱炭素化戦略を採用した。そのため同戦略は、エネルギー効率と資源効率の最大化、電化の促進、化石燃料と水素やバイオエネルギーとの代替、さらには CCUS 施策に重点を置いている(Government of the United Kingdom, 2021)。

グリーン公共調達は、再生可能エネルギーに基づく低炭素工業製品・材料の初期の市場需要を創出するために役に立つ。また、短期的・中期的に転換を促進するうえでも重要な役割を果たし得る。建造物や物理的インフラに公共予算を割当てることにより、再生可能エネルギーに基づく鉄鋼、アルミニウム、セメントの需要の第一波に拍車をかけ、その安定と拡大を図ることができる。同様に、低炭素建築資材の使用は、企業の調達、最低必要条件の規定、優先購入の義務付けによって奨励することができる。例えば、米国では「バイ・クリーン」と呼ばれる公共調達政策が導入され（2017 年にカリフォルニア州、その後連邦規模に拡大）、鉄鋼、コンクリート、アスファルト、ガラスなどの低炭素建築資材の使用が奨励されている。カーボンレポート制度やカーボンラベル制度などのインセンティブも、産業の脱炭素化努力の支援のために提供されている(SEI, 2023)。欧州、フランス、ドイツ、オランダ、スウェーデン、英国は、低炭素コンクリートの公共調達を奨励する施策や政策を採用している(MPP, 2022)。

低炭素工業製品に関する統一基準は、調達や消費を行う際のよりどころとなる(Gangotra *et al.*, 2023)。認証制度、エコデザイン・イニシアティブ、環境ラベル制度があれば、消費者は、低炭素な選択肢に伴う割増コストを支払う気持ちになりやすい。消費者が情報に基づいて選択するために、主な製品や材料ごとのエネルギー効率や排出量に関するデータを収集し、共有する取り組みも有益である。例えば、国連環境計画では、Global Life Cycle Assessment Data Access (GLAD)と呼ばれる組織内ネットワークを開発している。このネットワークは、さまざまな情報提供者によるライフサイクルに関するインベントリーデータセットを検索するインターフェイスをユーザーに提供することによって、データの利用しやすさと相互運用性を高めることを目的としている(IDDI, 2023)。

エネルギー効率化策によって、既存プロセスのエネルギー消費量とそれに伴う排出量を削減し、循環経済の実践を促進する。例えば、クリンカー製造やセメント製造の効率を改善することで、セメント分野の排出量を 25%削減できる可能性がある(WEF and Accenture, 2022)。実施し得る対策としては、エネルギー効率の最低基準を設定する、利用し得る最善の技術を採用する、燃料、プロセス、製品に炭素集約度要件を設定するなどがある。

循環経済は、産業脱炭素化の要である（ボックス 2.7）。産業とプロセスの設計における循環経済原則を統一することによって、材料やエネルギーの需要と関連コストを大幅に削減することができる。同時に、製品寿命を延ばし、再利用を奨励する必要がある。産業部門の場合、これに関連する実践としては、材料リサイクル、持続可能な廃棄物管理、高価値化学品の再使用、産業プロセスによる副産物のリサイクルなどがあり、いずれも製造者が責任を持って自発的に取り組むことにより実現できる(IRENA, 発刊予定 [b])。



循環経済は、産業部門脱炭素化の要である

ボックス 2.7　循環経済と産業部門の脱炭素化

循環経済には、廃棄物や汚染を削減する、製品や材料を最も高い価値のまま循環させる、自然を再生するという三つの主な原則がある。そのためには、経済活動を限りある資源の消費から切り離す必要がある(Ellen Macarthur Foundation, 2021)。産業脱炭素化を支えるために、これらの原則を適用してエネルギーや材料を循環させ、エネルギー、水、材料のより効率的な消費を促進し、環境における廃棄物を最小化することができる(IPCC, 2022b)。再生可能エネルギーを利用し、有害化学物質を削減し、修繕、再利用、リサイクルしやすいように工業製品の設計を改善して、エネルギーや原材料を新たな製品に充てることができる(Ekins *et al.*, 2019)。

循環経済原則を産業部門に適用することによって、製造コストを削減するとともに競争力を高め、温室効果ガス、廃棄物、その他の汚染物質を削減し、原材料供給の長期的利用可能性を高め、新たな市場機会、収入、雇用を創出し、さらには金融経済の安定性やレジリエンスを高めることができる。循環経済の実践は、最終的な廃棄物の量を削減するとともに、未使用材料(その採取や加工により、世界の温室効果ガス排出量の半分と環境影響の大部分がもたらされる)の需要を削減する大きなポテンシャルがある(UNIDO, 2019)。例えば、アルミニウムは、元の特性を失うことなく何度もリサイクルすることができる。再生アルミニウムを生産に使用した場合、一次アルミニウムに比べて排出量を 95%削減することができる(European Aluminium, 2020)。

循環経済ソリューションのポテンシャルはまだ未開発のままである。高いコスト、技術・インフラ関連の障壁、生産やプロセスにソリューションを実施する能力の欠如、さらには不十分な情報アクセス(循環経済の便益、ソリューション、成果について)などが、循環経済を通した産業転換を阻む主な障害である。政府、研究機関、産業関係者は、情報格差を埋めるとともに知識と経験を共有するよう協力を行い、該当する市場需要の拡大とコスト競争力の向上を図る必要がある。また、新技術の研究・開発・実証を支援するために、金融的・財政的施策が必要である。国家や地域レベルの循環経済戦略・計画は、投資家に長期的シグナルを送ることができる。中国、EU、フランス、ドイツ、イタリア、日本、英国は、循環経済に向けた計画立案を始めている(IEA, 2022b)。多くの持続可能な開発目標を達成するためには、さらに多くの国が産業計画や産業活動において循環型の施策を採用する必要がある。



再生可能エネルギーを使用した低炭素材料はコストが高く、これまで大きな障壁となっているが、税金還付、税額控除、補助金、助成金といった金融的・財政的インセンティブによってそれを緩和することができる。米国政府は近頃、重工業の脱炭素化を支援するために 60 億ドルの資金を投入することを発表した(Gardner, 2023)。中国では、Baowu Steel Group が、水素を利用した製鋼プラントを支えるために 5 億元(約 7,200 万ドル)のグリーンボンドを発行した(China Steel, 2022)。

情報や知識の共有を促すプログラムやプラットフォームも、関係者の間で意識を高めるために必要である。中国、インド、その他の途上国など、主な生産国は、低炭素な工業製品や産業ソリューションのための国際基準や情報プラットフォームを考慮することが望ましい。2019 年、スウェーデン政府とインド政府は Leadership Group for Industry Transition と呼ばれるイニシアティブを発足させた。2021 年、このイニシアティブにより、政府の取り組みと業界のプロジェクトに関する情報を提供するため、Green Steel Tracker と Green Cement Technology Tracker という二つのプログラムが開始された(Leadit, 2023)。

分野横断的対策のほか、分野別の政策や行動によっても、セメント、鉄鋼、化学産業のような高排出分野の転換を加速することができる。

稼働中のプラントに再生可能エネルギーを使用した低炭素なクリンカー代替材(高炉スラグ、フライアッシュなど)やセメントを導入するための革新的ソリューションの研究・開発・実証を支援することが、セメント分野の脱炭素化に有益である可能性がある。代替的建築手法や木材の導入を支援してセメント消費量を削減し、BECCS などの二酸化炭素除去技術を促進してクリンカーやセメントの製造プロセスによる排出量を相殺するためには、金融的インセンティブも必要である。

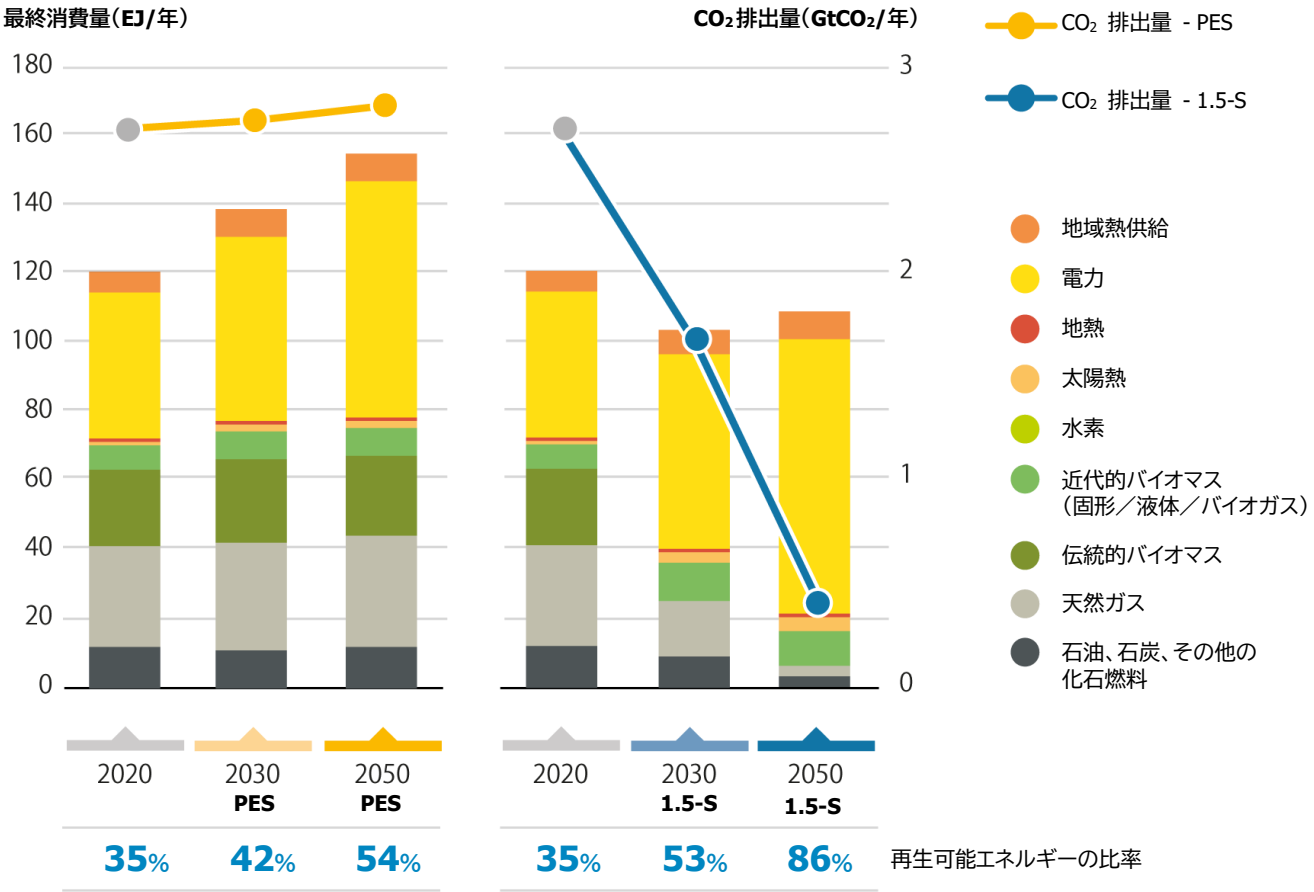
同様に鉄鋼分野でも、水素による鉄の直接還元のような革新的ソリューションの研究開発、CCS インフラ、化石燃料を使用する残存設備の改造などに、追加的な金融・財政支援を行う必要がある。また、政府は、低コストの再生可能エネルギー源が利用できるポテンシャルが高く、新たな価値やサプライチェーンを創出できる可能性がある地域に、鉄鋼業を移転するようインセンティブを提供する施策も検討することもできる。ただし、プラントの移転先地域で水ストレスやその他の環境インパクトを増大させることがないよう、注意を払わなければならない。

化学産業は脱炭素化が困難な分野のひとつであり、したがって、低炭素化学品のための十分に機能する市場を創出する施策(規制、義務付けなど)や、資源効率が良く環境に配慮した大量用途向け材料の開発は便益をもたらす。また、政府や業界は、持続可能な化学品や材料、クリーンな製造プロセスや技術の開発を促進する目標、規制、義務付けを採用することができる。化学品製造における高効率ヒートポンプやその他のエネルギー効率化ソリューションの採用を奨励してもよい。

2.6 家庭・業務部門

家庭・業務(住居、商業、公共)部門[訳注 3]は、2022 年における直接的 CO_2 排出量の 9%近くを占めている(IEA, 2023a)。重大な転換を経る必要があることは広く認識されているものの、これまでのところ同部門では、世界のエネルギー転換を促進する対策はほとんど取られていない。2020 年に家庭・業務部門は総最終エネルギー消費量の 30%を占め(絶対値で 124 EJ)、中心的なエネルギーキャリアである電力は同部門の総消費量の約 3 分の 1 を占める(図 2.12)。バイオエネルギー(伝統的および近代的)と天然ガスがそれぞれ約 4 分の 1 を占め、残りは石油とその他のエネルギー源がおおよそ半々である。サービスの中では、加熱用途の燃料の直接利用が同部門内で最大のエネルギーを消費しており、その 3 分の 2 以上が化石燃料、主に天然ガスによるものである。

図 2.12 家庭・業務部門: 現行計画シナリオと 1.5°C シナリオにおける 2020 年、2030 年、2050 年の最終エネルギー消費量と対応する排出量



注: 1.5-S = 1.5°C シナリオ、EJ = エクサジュール、$GtCO_2$ = ギガトン(二酸化炭素換算)、PES = 現行計画シナリオ

訳注 3 日本の現行の『総合エネルギー統計』では、「企業・事業所他部門」の内訳として「業務他」があり、また「家庭部門」も存在し、両者は分けて統計データが取られている。一方、IRENA など国際機関のエネルギー統計では、"building sector"(直訳すると「建物部門」)として両者が統合されており、日本の統計と国際統計とでは部門の定義や内訳が異なることに注意。本翻訳では、日本の統計にできるだけ合わせる形で、"building sector" を「家庭・業務部門」と訳すこととする。



1.5°Cシナリオに従うために、家庭・業務部門における電力の比率は大幅に拡大する

1.5°C シナリオに示される通り、2050 年までに家庭・業務部門ではスマート化、相互接続、高エネルギー効率化が進み、電源や温熱・冷熱供給源は再生可能エネルギーが中心になる可能性がある。この想定を実現することが、世界の気候目標を達成するために必要であり、また、それにより建物は使用者にとってより快適で安価なものとなる。また、分散型エネルギー源によるエネルギー生産拠点となり、エネルギー貯蔵手段(蓄電池、電気自動車)を電力システムに提供し、電力デマンドレスポンスを通して系統運用の強化を可能にすることにより、コスト効率の高いエネルギー効率化策の機会がもたらされる。さらに、優良な建物によって雇用が生まれ、都市部の大気質が改善される。

家庭・業務部門の脱炭素化に向けた転換には、1.5°C シナリオで想定されるように、いくつかのエネルギー転換戦略を並行して追求する必要がある。

1) **最高水準の規格、効率の高い照明・電化製品、再生可能エネルギー電力を使用した熱供給・調理技術によって、建物のエネルギー効率を高める。**先進国では既存建物の 4 分の 3 が古く非効率であるため、エネルギー効率の高い建物の比率を 2030 年までに 30%、2050 年までに 60%に引き上げることを目指し、建物の改修・改築を促進する。

2) **電力需要の増大に備える。**2050 年までに、寒冷地域における熱供給の電化、温暖地域における冷房需要の増大、都市部における電気調理器の導入拡大により、電力需要は 2020 年のほぼ 2 倍に達する。特にヒートポンプは、需要拡大の中で世界のエネルギー転換を支えるための鍵となる技術である。ヒートポンプは、化石燃料ボイラーと比べて 3～5 倍のエネルギー効率水準を達成することができ、再生可能エネルギー電力によって作動する。ヒートポンプの使用は、2050 年までに 12 倍に増えると見込まれている(ボックス 2.8 を参照)。電力はすでに家庭・業務部門で最大のエネルギー源となっており、その比率は 2020 年に 35%となっているが、2030 年には 53%に、2050 年には 73%に拡大する(絶対値では 2020 年の水準の 2 倍に増加する)。しかし、2021 年には 7 億 3,300 万人が未だ電力を利用できない状況にあった(IEA *et al.*, 2023c)。

3) **屋内空気汚染を引き起こす伝統的で持続不可能なバイオエネルギー源を、持続可能なバイオマス、バイオガス、電力をエネルギー源とするクリーンで効率の高い調理用コンロに置き換える。**アフリカのような地域では、家庭におけるバイオエネルギーの伝統的利用が総エネルギー消費量のうち高い比率を占めており、その大部分は調理のためである。SDGs の目標 7.2 に沿って、2030 年までに伝統的なバイオマスは段階的に廃止され、農村地帯では持続可能なバイオマスを使用したコンロに、都市部では信頼性の高い電力システムを利用する電気コンロに置き換えられることになる。

建物の改修率の加速、エネルギー効率の高い電化製品、ヒートポンプが鍵となる



4) **バイオ燃料、バイオメタン、太陽熱のような再生可能エネルギーによる熱供給を促進する。**太陽熱温水システムは、日射量の多い場所では信頼性やコスト効率が高く(曇りの多い地域でも電気ボイラーで補える可能性がある)、2021 年の 7 億 2,900 万 m^2 (IEA, 2022c)から、2030 年には約 14 億 m^2、2050 には 20 億 m^2 に拡大すると見込まれる。近代的バイオマスは、ウッドチップやペレットを使用する地域熱供給システムまたはビル用ボイラーによって、効率的に建物を暖めることができる。EU では、クリーン水素とバイオガスを組み合わせることにより、既存のガス供給インフラを活用して、2050 年までに熱供給需要の 6%を賄うことができると考えられる。

5) **高需要の厳冬地域では、熱供給システムと熱貯蔵や季節間貯蔵を組み合わせて柔軟性を提供する。**IRENA は、世界の熱エネルギー貯蔵量を約 234 GWh と推定している(IRENA, 2020d)。このような貯蔵は、信頼性、セキュリティ、柔軟性の高いエネルギーシステムを支えるものとなる(IRENA, 2020c)。

6) **ネットゼロ建物を可能にする新たな技術、材料、設計、ビジネスモデルといった体系的イノベーションを促進する。**効率の高い建築方法、低排出材料、循環経済原則は、他の部門、特に産業部門の排出量削減を支援するための鍵となる。建物内のスマートエネルギー管理システムやデジタリゼーション(IoT: モノのインターネット)によって、建物のエネルギー消費パターンが変化し、需要の柔軟性向上によって系統サービスを提供することさえ可能になる。それと並行して EV に移行することにより、自宅充電が可能になる。また、太陽光発電、電力貯蔵、熱貯蔵によってエネルギー供給を分散化し、建物の電力需要をより局所的に満たすことが可能になる。

これらの対策を実施することにより、家庭・業務部門における再生可能エネルギーの比率は、2020 年の 35%から 2030 年には 53%に、2050 年には 86%に拡大する。また、この転換により、最終エネルギー消費量は、参照シナリオと比較して 2030 年に 25%、2050 年に 31%減少する。1.5°C シナリオでは、エネルギー関連の CO_2 排出量は、2020 年(2.8 Gt)と比較して 2030 年までに 40%減少し、2050 年までに 0.4 Gt に達する(表 2.5)。

表 2.5　家庭・業務部門の主要業績指標：2030 年と 2050 年における現行計画シナリオと 1.5°C シナリオ

			従来	2030 年		2050 年	
			2020 年	PES	1.5°C シナリオ	PES	1.5°C シナリオ
KPI.02 再生可能エネルギー（直接利用）	バイオマス（伝統的も含む）(EJ)	世界	29.3	32.4	11.2	31.6	9.3
		G20	12.0	12.1	6.3	11.4	4.3
	太陽熱と地熱の消費量 – 熱供給(EJ)	世界	2.3	2.6	4.5	3.0	6.0
		G20	2.3	4.0	2.5	4.8	2.9
	太陽熱集熱器設置面積(億 m^2)	世界	7.46	6.36	14.45	7.98	20.28
		G20	7.23	6.15	12.40	7.71	15.45
	再生可能エネルギーを使用した地域熱供給(EJ)	世界	6.4	7.8	7,0	8.4	8.1
		G20	5.7	7.0	6.2	7.3	7.1
KPI.03 エネルギー集約度	家庭・業務部門の最終エネルギー消費量 (EJ)	世界	124.0	141.2	105.7	158.2	109.3
		G20	92.7	104.4	84.5	115.7	82.1
	建物改修率（ストックに対する%/年）	世界	1	1	2	1	3
		G20	1	1	2	1	3
	スマートメーター（億台）	世界	1.3	11.0	12.0	23.0	28.0
		G20	1.3	9.0	10.0	16.0	19.0
KPI.04 最終消費部門の電化（直接）	家庭・業務部門における電力の比率(%)	世界	34%	37%	53%	43%	73%
		G20	38%	43%	53%	50%	74%
	ヒートポンプ設置数（万台）	世界	5 800	9 700	44 700	15 600	79 300
		G20	5 800	9 700	44 700	15 600	79 300
	ヒートポンプ設備容量* (GW)	世界	1 159	1 943	8 937	3 111	15 867
		G20	1 159	1 943	8 937	3 111	15 867
KPI.05 クリーン水素および派生物	クリーン水素消費量 (EJ)	世界	0	0	0.16	0	0.14
		G20	0	0	0.16	0	0.14
排出量	直接（$GtCO_2$/年）	世界	2.8	2.9	1.7	2.9	0.4
		G20	2.4	2.4	1.5	2.3	0.4

注： *ユニット容量を 20 kW/台として推定、EJ = エクサジュール、G20 = Group of Twenty、$GtCO_2$ = ギガトン（二酸化炭素換算）、GW = ギガワット、KPI = 主要業績指標、m^2 = 平方メートル、PES = 現行計画シナリオ

ボックス 2.8　建物における温熱・冷熱供給の電化

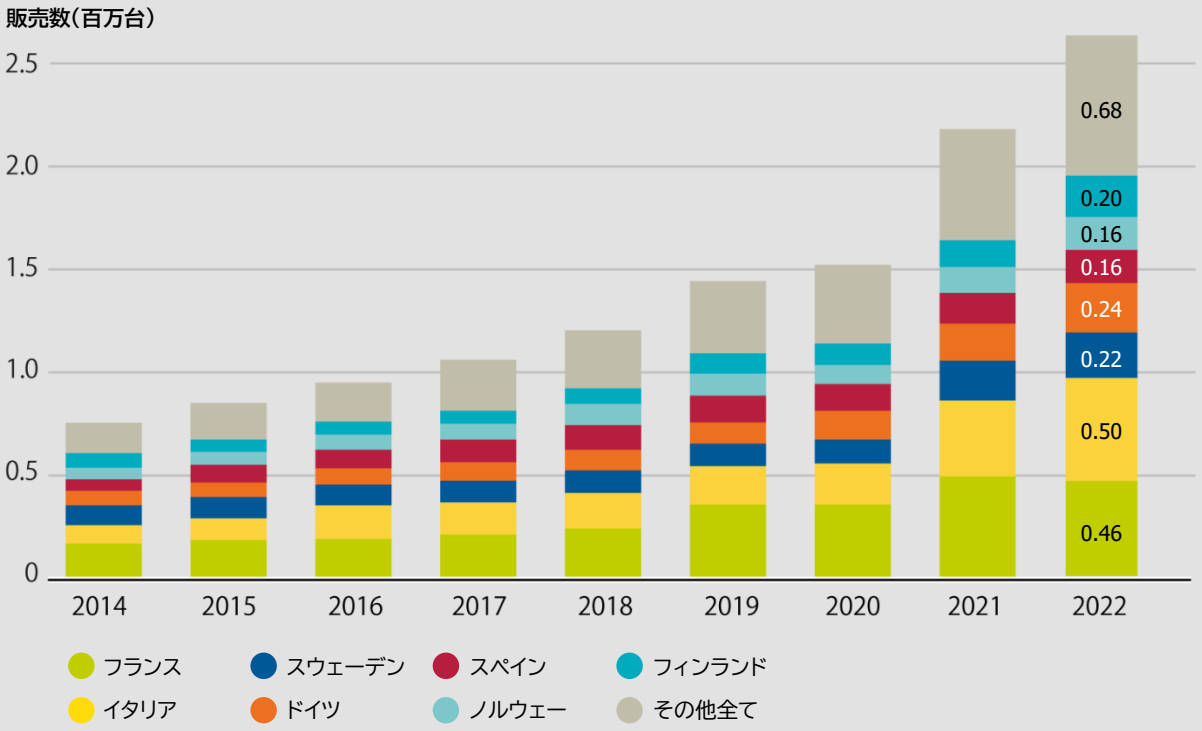
温熱・冷熱供給は、世界のエネルギー関連の二酸化炭素排出量の 40%以上を占める。家庭・業務部門の電化は、同部門を脱炭素化するとともに 2050 年までに 1.5°C シナリオを実現するために極めて重要である。

ヒートポンプには、世界中でかつてないほどの政策支援が向けられている。例えば次のようなものである。

- EU の REPowerEU 計画では、2026 年までに EU 域内で約 2,000 万台、2030 年までに 6,000 万台のヒートポンプの設置を義務付けている(EHPA, 2022)。
- 米国のインフレ抑制法によるヒートポンプ補助金では、所得が中央値の 80%以下の世帯には新規ヒートポンプ購入費用の 100%を給付し、所得が中央値の 81～150%の世帯にはヒートポンプ購入費用の最大 50%を給付し、所得が中央値の 150%を超える世帯にはヒートポンプ購入費用の 30%(上限 2,000 ドル)の税額控除を認める(HVAC, 2022)。

欧州のヒートポンプ市場は、2015 年以降二桁成長を記録している。2020 年には 160 万台のヒートポンプが販売され、設備台数は 1,490 万台になった。市場は 2021 年に 34%成長し、総設備台数は 1,700 万台に増加した。有利な法的枠組みやコスト低下により、この傾向は今後も続くと見込まれる(IRENA, 2022k)。

図 2.13　EU21 カ国における 2014～2022 年のヒートポンプ販売数



出典： (EHPA, 2023).

ヒートポンプ技術に関するイノベーションは、成績係数の向上、消費電力量と二酸化炭素排出量の削減、設置の促進、より大きなシステムに連系した際の運用の強化、利用者の使い心地の向上を目的とする。

住宅熱供給分野の電化により、電力システムへの負荷が大幅に増大する。それは、課題でもあり、機会でもある。エネルギー効率化策と柔軟かつスマートな電化戦略を併せて用いることが、最終消費部門を脱炭素化するうえで極めて重要である。成功するか否かは、技術、市場の設計と規制、システムの計画と運用、ビジネスモデルにおけるイノベーションにかかっている。スマート電化戦略は、再生可能エネルギーの導入を拡大し、ピーク負荷を低減し、系統混雑を緩和しようとするものである。IRENA は、熱供給部門のスマート電化戦略に役立つ 35 の主なイノベーションを特定している(IRENA, 発刊予定 [a])。



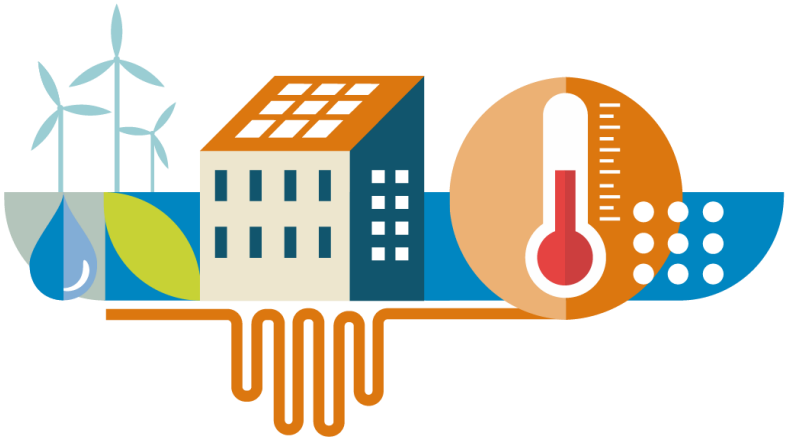
建築物エネルギー基準は、エネルギー効率化を促進するための鍵となる手段

2.6.1 家庭・業務部門の転換を促す政策

ネットゼロ建物への転換には、政策支援と実現支援策が必要である。例えば、建物のエネルギー需要を削減する、エネルギー効率を高める、温熱・冷熱供給の電化と再生可能エネルギーの直接利用を促進するといった策である。適切な政策パッケージは、その国や市に特有の気候条件、再生可能エネルギーのポテンシャル、財源、その他の要因に基づいて選ぶことが考えられる。広く採用されている政策としては、建築物基準、熱供給への化石燃料の使用禁止、改修、効率化、再生可能エネルギー導入を促す金融的・財政的インセンティブ、ネットゼロ建物に関する目標、最低エネルギー消費効率基準(MEPS)、さらには、公共建築物や住宅への太陽熱温水設備の義務付けなどがある。

建物エネルギー基準は、家庭・業務部門を脱炭素化する施策として最も広く認識され、また拡張性が高い(UNEP, 2018)。国または地方政府が施行する建築物エネルギー基準は、通常、人々が利用する建物やその他の構造物の建設、改修、修繕に関する規制を含む。これらの基準は、新築・改築された建物に関する性能基準を設定し、あるいは屋上太陽光発電システムや太陽熱温水器といった再生可能エネルギー利用システムの導入を奨励することによって、エネルギー効率化を促進することができる。世界 80 カ国以上で建築物基準が施行されており、大部分は住宅と公共建築物の両者を対象としている(IEA, 2022d)。政策立案者は、対象を全タイプの建物に拡大し、ネットゼロ目標に沿った、より厳しいエネルギー性能要件を設定することによって、建築物エネルギー基準を拡充することができる。例えば、オーストラリア、日本、トルコ、米国、多くの欧州諸国は、既存建物に対する義務的な建築物エネルギー基準を設けている(Battelle Memorial Institute, 2021)。





建物における熱供給のための化石燃料の使用を段階的に廃止し、次いで電化ソリューションや再生可能エネルギーの直接利用の市場を創出することによって、化石燃料への依存を最小限にすることができる。2022 年までに約 13 カ国と 59 都市で、化石ガス、石油、石炭を建物における熱供給や調理に利用することを制限する案が可決または提出されている(REN21, 2022)。ノルウェーは 2017 年に、建物の熱供給に化石燃料を利用することを 2020 年より禁止する国家規制を採択した(MCE, 2019)。英国では、2025 年より新築住宅に低炭素熱源が義務付けられる。同国ではまた、2023 年 5 月 1 日をもって伝統的な家庭用石炭の販売が全面的に禁止される(DEFRA, 2022)。また、自治体も、より強力な役割を果たすことができる。例えば、ニューヨーク市は 2021 年、新築建物における天然ガスの利用を禁止する法案を採択し、2024 年より 7 階建て未満の新築建物について、2027 年より全ての新築建物について施行する(Maldonado, 2023)。同様に、米国のシアトルも 2020 年、新築建物における熱供給に化石燃料の利用を禁止することを発表した(IRENA, 2022j)。

最低エネルギー消費効率基準(MEPS)は、電化製品のエネルギー効率化を達成するための鍵となる政策である。家電製品の効率向上を図る MEPS を採択している国は、約 80 カ国に上る。全ての家庭用冷蔵庫によるエネルギー消費量の 80%近く、テレビによるエネルギー消費量の 4 分の 3 が、これらの MEPS の対象となっている(IEA, 2022e)。タイ、ベトナム、マレーシアのような一部の途上国では、エアコンや冷蔵庫について MEPS の規定が採択されている(International Copper Association, 2016)。ただし、効率の低い電化製品が市場に残り続けることがないよう、新たな MEPS は技術中立的であることが望ましい(CLASP, 2023)。建物のエネルギー効率を促進する方法としては、MEPS のほかに、エネルギーラベル制度やエネルギー性能認証がある。

主要な国や地域は、新築建物の排出量を規制する目標を設定し始めている。このような 100%ゼロエミッション建物を目指す目標は、エネルギー効率を高め、残りのエネルギー必要量を再生可能エネルギーで賄うことによって達成される。2021 年、欧州委員会は、2030 年より全ての新築建物にゼロエミッションを義務付ける政策を提案した(European Commission, 2021a)。カナダのバンクーバー市も、2030 年より全ての新築建物を 100%排出量ゼロにすることを目指している(City of Vancouver, 2016)。ケープタウン、コペンハーゲン、ヨハネスブルグ、メデジン、サンノゼなど、約 21 都市の当局は、2030 年までに市が所有、入居、開発する全ての建物をネットゼロにすることを約束している(C40, 2023)。

建物のエネルギー効率化と再生可能エネルギー利用は、直接資金提供、補助金、助成金、購入補助金、融資などの金融・財政政策を通して支援することができる。2022 年、欧州委員会は、ドイツ政府が示した、再生可能エネルギーと廃熱で 75%賄うことが義務付けられた新たな地域熱供給網の普及を促進するために 2028 年まで 29 億 8,000 万ユーロの国家援助を行う計画を承認した。再生可能エネルギーを利用する熱供給プロジェクトは、投資コストの最大 40%について助成を受けることができる(Abnett, 2022)。韓国のソウル特別市庁は、建物に太陽光発電を導入するプロジェクトを支援するプログラムを 2020 年に発足させた。プログラムでは、設置コストの 80%について助成を受けることができる(C40, 2021)。

政府は、情報通信技術を応用して、照明、冷暖房、全ての電化製品のエネルギー消費量など、建物のエネルギー消費データを(センサーやスマートメーターにより)収集、監視、分析することを検討することも考えられる。これは、エネルギー消費状況を診断し、建築物エネルギー効率基準を設定し、個々の状況に合わせた運用強化策を策定し、利用者の行動変容を提案する際の根拠となり得る。中国の上海市政府は 2010 年より、政府所有のオフィスビルと大規模公共建築物(床面積 20,000 m^2 以上)のエネルギー消費状況を監視するデジタルプラットフォームを発足させている。2021 年末までに、この監視システムが対象とする市内の公共建築物は 2,143 棟に達した(床面積およそ 1 億 100 万 m^2)。同システムは、市の建築基準を改善し、他の関連する政策立案を支援するために重要な役割を果たしている(SHHURD and SHDRC, 2022)。

地域温熱・冷熱供給網によって、低温の再生可能エネルギーの利用が可能となり、温熱／冷熱需要が大きく人口密度が高い都市部や再生可能エネルギー源が豊富な地域で実現可能性やコスト効率が高くなる。このような熱供給網は、低需要期に余剰温熱・冷熱に対して熱貯蔵を利用することで、いっそう有効性を発揮することができる(IRENA and Aalborg University, 2021)。新規開発地や公共建築物に地域エネルギーネットワークへの接続を義務化することによって、地域エネルギーネットワークの拡大が支援され、熱供給需要を確保することができる。例えば、オランダのアムステルダムでは、全ての新規開発地に対して地域熱供給システムへの接続を義務付けている。ノルウェーのオスロの全ての庁舎でも同様の義務付けがあるが、より低排出の手段があることを証明できればその限りではない(IRENA, 2022j)。

また、エネルギー転換を支援するために、各国は、太陽熱や地熱を熱供給に直接利用することを促す政策や施策を優先的に実施することが望ましい。その点では、新規または既存建物に太陽熱利用システムの設置を義務付ける施策が多くの国や市で実施され、成果を挙げている。1 人あたり設備容量の上位 3 カ国は、バルバドス、キプロス、イスラエルである(IRENA *et al.*, 2020)。太陽熱設備の義務付けには、金融的・財政的インセンティブが併用されるのが一般的である。例えば、イタリアでは「コント・テルミコ」という国の制度が太陽熱設備の設置を後押しし、2021 年の設置数は前年と比べて 83%増加した。この制度では、規模が 2,500m^2 までの太陽熱プラントに、プロジェクト投資コストの最大 65%のインセンティブが提供される(Solar Thermal World, 2022)。

義務化および財政的インセンティブは、建物における再生可能エネルギーの直接利用の促進に役立つ

運輸部門の転換のために、低炭素ソリューションの導入を加速する必要がある

2.7 運輸部門

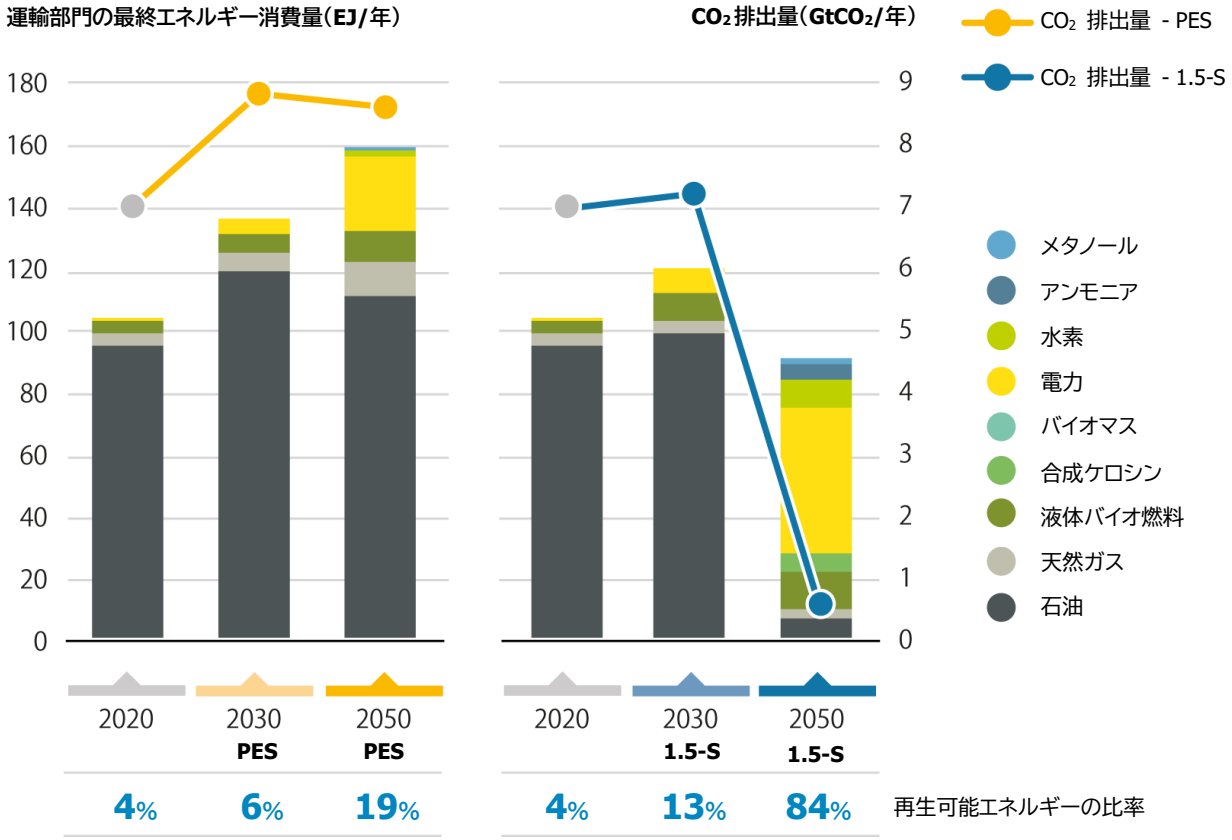
2.7.1 運輸部門の転換を示す主な指標

人や物の移動は、今日の経済と社会において重要な役割を果たしている。運輸部門は化石燃料に大きく依存しており、2020 年の排出量は 6.9 $GtCO_2$ に達し、世界のエネルギー関連の CO_2 排出量の 5 分の 1 を占めている。ただし、この排出量は、新型コロナウイルス(COVID-19)の流行の影響により、2019 年の水準より少なくなっている。2019 年には、運輸部門の排出量は世界のエネルギー関連の CO_2 排出量の 4 分の 1 近くを占めていた。運輸部門のエネルギー消費量は 2020 年に 104 EJ で、2019 年より 14%少なく、需要のほとんどを化石燃料で占められ(95%)、次いでバイオ燃料(4%)、電力(1%)となっている。道路輸送だけで運輸部門のエネルギー消費量の 4 分の 3 以上を占め、次いで海運(10%)、航空(8%)、鉄道(2%)となっている。世界の輸送サービス需要は今後拡大すると予想されることから、運輸部門をゼロカーボン部門へと持続可能な方法で変革することが極めて重要である。

IRENA の 1.5°C シナリオでは、運輸部門は、現行の想定より急速かつ大幅な転換が起こり、低炭素ソリューションの導入が加速される。図 2.14 は、1.5°C シナリオにおいて 2050 年までに運輸部門において予想されるエネルギー消費量の推移と CO_2 排出量の軌跡を示している。

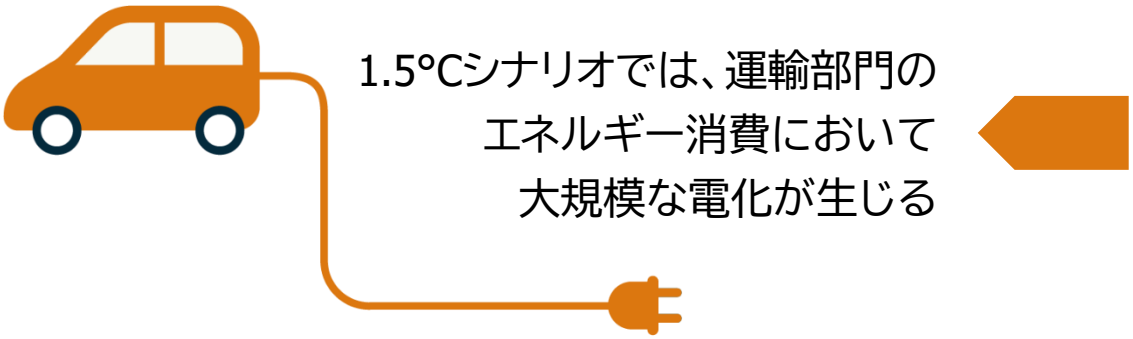


図 2.14　運輸部門：現行計画シナリオと 1.5°C シナリオにおける 2020 年、2030 年、2050 年の最終エネルギー消費量と対応する排出量



注： 1.5-S = 1.5°C シナリオ、EJ = エクサジュール、$GtCO_2$ = ギガトン（二酸化炭素換算）、PES = 現行計画シナリオ

低炭素アプローチを組み合わせることにより、運輸部門の年間排出量は 2050 年までにわずか 0.6 $GtCO_2$ に減少し、2020 年と比べて 91%の減少となる。これらの施策には、すべての輸送モードにわたる電化、再生可能エネルギー（バイオ燃料、水素および派生燃料を含む）の拡大、エネルギー効率化、技術革新などがある。



1.5°Cシナリオでは、運輸部門のエネルギー消費において大規模な電化が生じる

道路輸送への EV 普及を加速し、それと併せて電源を脱炭素化することは、運輸部門の脱炭素化にとって圧倒的に重要な手段である。技術進歩、特に蓄電池の進化により、近年 EV の経済的側面は大幅に改善しており、その適用範囲はより幅広い車両区分とサービスの種類へと急速に広がっている（ボックス 2.9 を参照）。IRENA の 1.5°C シナリオでは、EV[原注7] は 2050 年までに全ての道路輸送車両の 90%以上を占めるようになる（駆動技術のうちオートバイでは 95%、乗用車では 93%、バスでは 82%、小型トラックでは 80%、大型トラックでは 67%）。G20 諸国の一部はすでに、現行計画シナリオに示されるような化石燃料への依存を低減するため、強力な電化目標を設定している。例えば欧州では、2035 年までに CO_2 を排出する車両を禁止する計画である(European Council, 2023)。他の国々も、IRENA の 1.5°C シナリオに沿って、より意欲的な目標を設定しなければならないと考えられる。

電化は、鉄道分野のより高度な脱炭素化においても極めて重要な役割を果たす。2019 年には、世界の電車のエネルギー需要の 42%を電力がまかなっている。電車技術は成熟しており、電化は技術的に可能で、幅広い状況においてコスト効率が高い。高速鉄道路線によって、短距離飛行の需要が削減される。IRENA の 1.5°C シナリオでは、2050 年までに電力は鉄道分野のエネルギー消費量の 89%を占めるようになる。

運輸部門を脱炭素化するには、持続可能なバイオ燃料、水素、合成燃料など、再生可能エネルギー由来燃料の採用を拡大する必要がある。IRENA の 1.5°C シナリオでは、持続可能な液体バイオ燃料の生産量を現在の水準から 2050 年までに 3.3 倍に拡大する必要がある。運輸部門の CO_2 排出量を削減するため、特に 2020 年代から EV の普及が大幅に拡大するまで、各国は意欲的なバイオ燃料混合目標を設定する必要がある。ブラジルやインドネシアのような一部の国では、運輸部門の脱炭素化においてバイオ燃料が極めて重要な役割を果たし、2050 年までに最終エネルギー消費量の約 35%に達する。他の国々も現在意欲的なバイオ燃料混合目標を設定しようとしており、例えばインドでは、2030 年までにガソリンのエタノール混合率を 20%にする目標を掲げている(MoPNG, 2018)。1.5°C シナリオでは、2050 年までにバイオジェット燃料は航空分野のエネルギー総消費量の 24%を占める。

原注7 バッテリー自動車およびハイブリッド自動車を含む。

運輸部門の転換には、厳しい効率基準と行動変容が極めて重要である



再生可能エネルギー由来燃料[原注8]が運輸部門の最終エネルギー消費量に占める比率は、2050 年までに 23%に達する(21 EJ)。航空分野がこの消費量の 39%を占め、海運(31%)、道路輸送(30%)がそれに続く。道路輸送では、水素需要のほとんどが大型トラックによるものとなる。世界の水素車が占める比率は、2050 年までに 17%に達する。国際海上輸送では、脱炭素化に向けてさまざまな低炭素燃料が組み合わせて利用され、IRENA の 1.5°C シナリオでは、2050 年までにアンモニア、メタノール、水素が燃料構成のほぼ 61%を占めるようになる。航空分野では、総エネルギー消費量に占める合成ケロシンの比率が 2050 年までに 42%に増加する。

全ての輸送モードについて厳しい効率基準を設定することが、部門の転換を促すために極めて重要であり、行動変容も同様に重要である。脱炭素化は、運輸サービスの提供における構造転換によって支援することができる。私有の乗用車から集団輸送へ、航空旅客輸送や道路貨物輸送から鉄道輸送へのモーダルシフトが起こる可能性は非常に高いが、それに応じたインフラを開発する必要がある。これにより、運輸部門のエネルギー集約度を低減することができる。輸送需要の増大にもかかわらず、IRENA の 1.5°C シナリオでは、運輸部門の最終エネルギー消費量は 2050 年までに 2020 年の水準より 13%、2019 年の水準より 25%減少する。先進国の輸送需要は、今後数十年、一定となる可能性がある。これらの市場の一部では、エネルギー消費量は、より効率の高い技術の利用やモーダルシフトによって、2050 年までに 2019 年の水準より約 50%減少する。しかし、新興国の一部では、輸送需要は今後数十年で大幅に増大すると予想されるため、より効率の高い技術への切り替えが起こるにもかかわらず、運輸部門のエネルギー需要は 2050 年までに 2019 年の水準と比べて最大で約 80%増大する。

IRENA による 1.5°C シナリオの分析によれば、効率化策と低炭素アプローチを組み合わせることによって、運輸部門のエネルギー消費量は 2050 年までに 91 EJ に減少する。同シナリオでは、電力がエネルギー消費量の 52%を占め(そのうち 91%の供給源は再生可能エネルギー)、次いで水素およびその派生物(23%を占める)、バイオ燃料(燃料構成の約 13%を占める)となっている。残りの消費量を化石燃料が占める(約 11%)。同時に、環境意識の向上、都市計画の改善、行動変容により、輸送需要は現行計画シナリオと比べて小さくなると予測される。

原注8 水素、アンモニア、メタノール、合成燃料を含む。

表 2.6　運輸部門の主要業績指標：2030 年と 2050 年における現行計画シナリオと 1.5°C シナリオ

			従来	2030 年		2050 年	
			2020 年	PES	1.5°C シナリオ	PES	1.5°C シナリオ
KPI.02 再生可能エネルギー（直接利用）	運輸部門の最終エネルギー消費量に占めるバイオ燃料の比率(%)	世界	4%	5%	8%	6%	13%
		G20	5%	6%	8%	6%	10%
KPI.03 エネルギー集約度	運輸部門の最終エネルギー消費量 (EJ)	世界	104	136	121	159	91
		G20	87	111	98	120	73
KPI.04 最終消費部門における電化（直接）	最終エネルギー消費量に占める電力の比率(%)	世界	1%	4%	7%	15%	52%
		G20	2%	6%	9%	25%	63%
	電気乗用車とプラグインハイブリッド乗用車の利用台数（百万台）	世界	10	255	359	1 331	2 182
		G20	10	255	328	1 331	1 811
	EV 充電器（百万台）	世界	1	260	372	1 367	2 300
		G20	1	260	339	1 367	1 905
KPI.05 クリーン水素および派生物	運輸部門の最終エネルギー消費量に占めるクリーン水素の比率(%)	世界	0%	0%	0.3%	1%	10%
		G20	0%	0.1%	0.4%	2%	12%
	運輸部門の最終エネルギー消費量に占めるアンモニア、メタノール、合成燃料の比率(%)	世界	0%	0%	0.1%	0.4%	14%
		G20	0%	0%	0%	0.1%	5%
排出量	二酸化炭素回収・除去後の CO_2 排出量（$GtCO_2$/年）	世界	7.0	8.8	7.2	8.6	0.6
		G20	5.8	7.0	5.8	5.9	0.4

注：

a. IEA の *Global EV Outlook* による 2020 年の台数(IEA, 2022h)

b. IEA の *Global EV Outlook 2022* による 2020 年の EV 充電器の台数。EV 充電器の予想台数には、公共および民間の充電器が含まれる。

EJ = エクサジュール、EV = 電気自動車、G20 = Group of Twenty、$GtCO_2$ = ギガトン（二酸化炭素換算）、KPI = 主要業績指標、PES = 現行計画シナリオ

陸上輸送

途上国では、人口増加と経済成長により道路輸送活動が急増すると予想される。新興国では、2050 年までに普通乗用車の 1 人あたり台数が大幅に(約 0.04 台から 0.23 台へ)増加するが、先進国では、行動変容と公共交通機関へのモーダルシフトにより、1 人あたり台数は同程度の水準を保つか、減少さえすると予想される。鉄道輸送活動は、2050 年に向けて引き続き増加すると予想され、1.5°C シナリオでは、モーダルシフトによる需要増加に対応するためにより高度な成長が見込まれる。

航空

航空輸送需要は、2023 年までにパンデミック前の水準に回復すると予想される。有償旅客キロ数で測定した場合、現行計画シナリオでは平均して年間 2.6%の成長が見込まれ、1.5°C シナリオでは成長率はそれよりやや低い(2.4%)。IRENA の 1.5°C シナリオでは、石油系燃料が主流となっている今日の状況から、持続可能な航空燃料(SAF)(バイオジェット燃料と合成燃料のいずれも)が大幅な成長を遂げ、2050 年までにエネルギー構成の 82%を占めると見込まれる。一方、2035 年以降は新たな水素燃料や電動航空機(またはハイブリッド機)が短距離飛行に導入され、航空分野を根本から転換する可能性がある。

海運

国際海運分野では、同分野を脱炭素化するために多様な低炭素燃料が利用されるようになり、IRENA の 1.5°C シナリオでは、2050 年までにアンモニア、メタノール、水素が燃料構成のほぼ 61%を占める。国際海事機関(IMO)は、2030 年までに海運分野の炭素集約度を(2008 年と比較して)少なくとも 40%低減することを目指しており、1.5°C シナリオに沿って代替燃料の普及を拡大するためには、供給、インフラ、技術面の課題に対処する多大な努力が必要となる。海運分野ではすでに、メタノール燃料の選択肢が 2024 年にも商業市場に参入すると予想されることから、新造船と改修船のいずれにおいてもデュアル燃料エンジンが採用されつつある。

運輸部門では、燃料の多様化、考え得る全ての脱炭素化ソリューションの開拓が不可欠である



ボックス 2.9　電動モビリティ分野の新興技術

電気自動車(EV)は、電力システムに大量導入された再生可能エネルギー電力を利用した直接電化によって運輸部門を脱炭素化するソリューションとして浮上しつつある。EV の新規導入を促す政策圧力の高まりを受けて、世界的に急速な拡大が進んでおり、市場に参入するモデルが増加し、消費者の関心が大きくなりつつある。

充電インフラの開発は EV 普及の要であり、立地、充電タイプ、充電モード、その他の機能など、多様な要素を必要とする。誰もが充電できるようにするには、路上、職場、商業施設、公共スペースにあるような共用駐車スペースに充電設備を備えることが考えられる。

EV 販売数の増加に伴い、蓄電池の需要が急速に拡大している。その一方で蓄電池の価格は低下しつつあり、市場と技術が同調して動いていることを示している。リチウムイオン電池のコストは 2010 年に約 1,200 ドル/kWh だったが、2021 年に 132 ドル/kWh と順調に低下し、2022 年に 151 ドル/kWh とわずかに上昇した(BNEF, 2022)。蓄電池の改良にはトレードオフが伴う。なぜなら、ひとつの性能基準が改善すると、少なくとも別のひとつの基準の悪化を招く恐れがあるからである。概して言えば、改善の重点は、エネルギー密度、コスト、安全性、次いで、放電深度(DoD)と経年劣化(年)に置かれている。しかし、サイクル劣化(充電サイクル数)、出力密度、急速充電能力についても、さらなる改善が必要である。ただし、これは、電池のセルタイプ(電気化学)、電池パック(セルをまとめる方法、充電を管理する方法)に依存する(IRENA, 2023, 発刊予定 [d])。

最終消費部門のスマート電化を実現し、スマート充電戦略を構築するためには、技術だけでなく、市場設計と規制、電力システムの計画と運用、そしてビジネスモデルにおけるイノベーションが必要である。スマート電化戦略は、再生可能エネルギーの統合を進め、ピーク負荷を低減し、それによって系統混雑を緩和しようとするものである。最終消費部門のスマート電化戦略を促すイノベーションの全体像に関する IRENA の報告書には、運輸部門に関する 35 の主なイノベーションとスマート電化戦略が示されている(IRENA, 発刊予定 [a])。

2.7.2　運輸部門の転換を促す政策

陸上輸送分野に関する政策

道路輸送分野を脱炭素化するためには、エネルギー効率化と再生可能エネルギーの利用を促進する多くの政策を実施する必要がある。全体的枠組みとしては、目標、義務付け、金融的・財政的インセンティブ、燃料規格、研究・開発・実証の支援、そして、EV [原注9]、燃料、その他の再生可能エネルギーによる選択肢の導入を促す自治体レベルの政策などがある(IRENA, forthcoming [c])。これらの施策は、「回避、転換、改善」という行動段階として要約されることが多い(ボックス 2.10)。

原注9 EV には、プラグインハイブリッド電気自動車(PHEV)、バッテリー電気自動車(BEV)、燃料電池電気自動車(FCEV)がある。

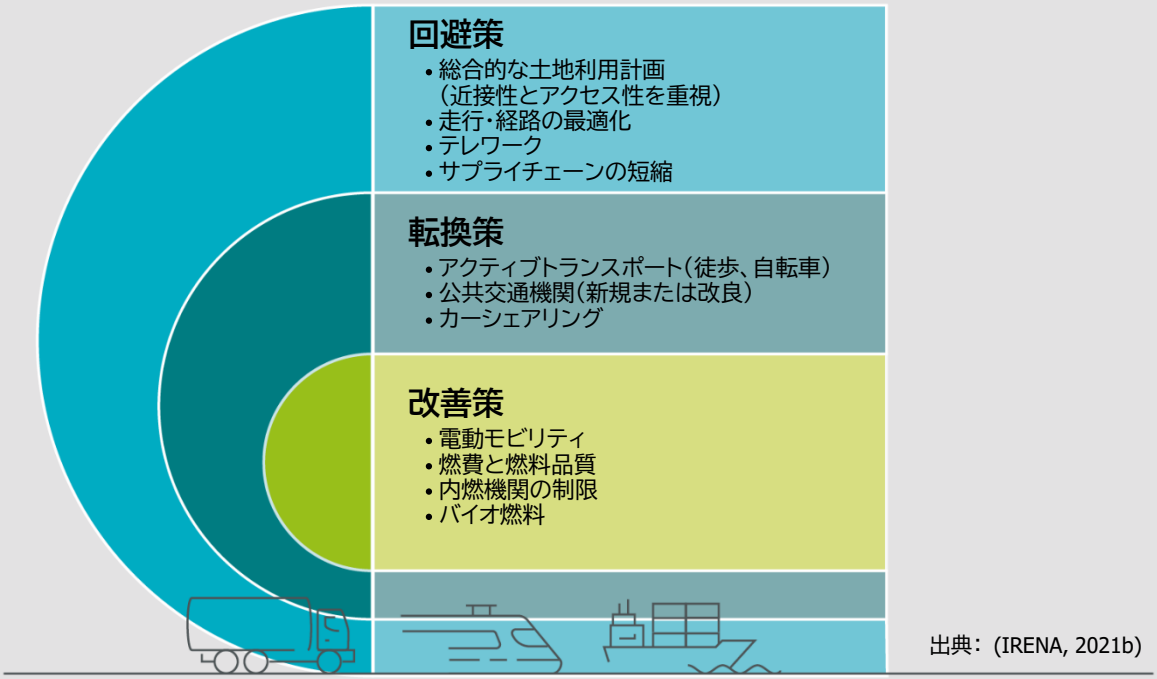
ボックス 2.10　道路輸送分野の「回避・転換・改善」戦略

「回避」政策は、自動車走行の頻度と走行距離を削減し、走行時間を短縮し、あるいは自動車による移動そのものの必要をなくすものである。有効な政策としては、土地利用戦略、公共交通指向型開発、走行と経路の最適化、サプライチェーンの簡素化、テレワーク、オンライン学習などがある(IRENA, 2021b)。ニュージーランドのオークランドを対象とした研究では、土地利用政策を実施することによって市の輸送分野の排出量をさらに 10%削減することができると推定された(OECD, 2022)。しかし、「回避」政策は、土地利用を再設計して利用密度を高めるなど、計画立案や交通システムを体系的に転換する必要がある可能性があり、したがって、長期的かつ一貫した政策支援が必要である(図 2.15 を参照)。

「転換」政策は、公共交通機関のようなより効率的で低排出の輸送モード、徒歩やサイクリング(これらは互いに補い合い、よく調和する)へのモーダルシフトを促進するものである。政策やインセンティブには、走行距離税、公共交通機関補助金、都市部拡大の管理などがある。2021 年、英国政府は運輸部門の脱炭素化計画を発表しており、これには、電動バスの利用を促進し、道路インフラの改善により徒歩や自転車の利用を後押しする転換政策が含まれている(REN21, 2022)。

最後に、「改善」政策は、全ての輸送モードの炭素集約度を低減する運用面・技術面のエネルギー効率化策のほか、ゼロエミッション車(バッテリー型電気自動車、燃料電池電気自動車など)、プラグインハイブリッド電気自動車、低排出燃料(バイオエタノール、バイオディーゼルなど)の利用拡大を目指すものである。

図 2.15　輸送戦略を強化する施策



出典：(IRENA, 2021b)



燃費基準は、車両効率を高める効果が証明されている

燃費基準や排気ガス基準など、車両効率に関する政策や基準は、運輸部門を脱炭素化するための要である。燃費基準は通常、新車が 1 単位の燃料で走行できなければならない距離を規制するもので、自動車メーカーによりエネルギー効率の高い車両を製造するよう迫ることができる。エネルギー効率の高い車両の幅広い普及と燃料効率基準の継続的強化により、車両の平均燃費を改善することができる。軽量車の新車販売台数の 80%を占める、ブラジル、カナダ、中国、EU、インド、日本、サウジアラビア、メキシコ、韓国など、10 を超える国や地域で、そのような政策が採択または提案されている。そのうち六つの国と地域（中国、カナダ、インド、EU、米国、日本）では、重量車向けの基準も適用している(GFEI, 2020)。同様に、排気ガス基準は、車両からの汚染物質排出量の上限を規定するものである。2023 年、米国政府は新たな連邦排気ガス規制を提案しており、これが採択されれば、排気ガスをさらに大幅に削減するとともに、電気自動車の販売を増加させるものとなる(US EPA, 2023)。

ゼロエミッション車(ZEV)に関する目標は、自動車市場に強力なシグナルを送り、ZEV の市場シェアを急速に拡大することができる。2021 年、COP26 の ZEV 宣言に 30 カ国以上の政府が署名した。宣言署名国は、2040 年までに全世界で、また、2035 年までに主要市場において、乗用車とバンの新車販売を 100%ZEV にするために取り組むことを誓った(Owen-Burge, 2021)。署名国のうち 5 カ国はアフリカで、具体的にはカーボベルデ、ガーナ、ケニア、モロッコ、ルワンダである。2022 年、主要市場国は新たな目標を発表した。例えば中国は、2025 年までに 2,000 万台以上の EV のニーズを充足する充電インフラを構築し、2025 年までに高速道路サービスエリアの 60%に急速充電設備を設置する目標を発表した(Government of China, 2022)ほか、広西省と広州市について地方目標を設定している。ZEV 目標は、バッテリーなどの EV サプライチェーンや、充電インフラの設置事業者と運用事業者にも影響を及ぼす。同様に、内燃機関(ICE)車の新車販売を禁止することによっても、投資家やメーカーに明確なシグナルを送ることができる。EU は、2035 年より ICE 乗用車およびバンの販売を禁止することで合意している。

ZEV の需要は、ZEV 購入に対する補助金、助成金、税金還付といった金融的・財政的インセンティブによって効果的に後押しすることができ、多くの国や地方政府がこの方法を採用して成功を収めている。EV 購入に資金援助を行っている主要 EV 市場には、フランス、ドイツ、米国などがある。2023 年、米国はインフレ抑制法に基づいて、EV 購入に対する 7,500 ドルの税額控除を設けた。また、フランスでは最大 8,000 ユーロ、ドイツでは 6,750 ユーロの補助金を利用することができる。しかし、EV 補助金は費用のかかる施策であり、多くの国、特に途上国ではそれを賄う余裕がない可能性がある。インドのグジャラート州では、開発途上世界ではごくわずかな例のひとつとして、乗用車、二輪車、三輪車を対象とする EV 補助金制度がある(First Post, 2021)。

途上国や新興国で二輪車と三輪車の電動化が急速に進んでおり、安価でクリーンな交通手段を提供するとともに、環境や生計との相乗効果を最大限に高めている。主な施策としては、金融的・財政的インセンティブや基準の設定がある。これには、中国、インド、ケニア、ルワンダなどの例がある。

地方自治体も、重要な役割を果たす。例えば、アテネ、マドリード、メキシコシティは、2025 年までにガソリン車とディーゼル車を禁止することを決定し、パリも 2030 年までに禁止することを目指している(IRENA, 2021b)。自治体は、公共交通機関や公用車用に電動バスの公共調達を行うなどして、ゼロエミッション輸送に転換することもできる。例えば中国では、2015 年に交通運輸部、財政部、工業情報化部が合同で規則を公布し、北京などの 10 の市や州において新規導入のすべてまたは交換車両の 80%を完全電動バスにすることを義務付けた。欧州でも、オスロ、トロンハイム、ヨーテボリで電動バスが導入されている。中南米では、チリの首都サンティアゴで 2018 年末に 100 台の電動バスが導入され、その数は 2020 年末までに 800 台近くに達している。コロンビアでは、2040 年までにボゴタとメデジンにおける全ての公共バスの 75%をゼロエミッション車に交換することが検討されている(IRENA, 2021b)。

自治体政府が都市部の輸送に ZEV を推進するためのいくつかの政策手段がある。市が低排出またはゼロ排出ゾーンを定めることで、人々に化石燃料車の購入を思いとどまらせ、公共交通機関(バス、トラム、ライトレール、地下鉄)を利用する意欲を高めることができる。英国のロンドンは低排出ゾーンの代表的な例であり、ほかにも何百という欧州の都市が低排出ゾーンを導入している。ミラノ(イタリア)、ストックホルム(スウェーデン)、シンガポール、テヘラン(イラン・イスラム共和国)、ワシントン DC(米国)など、多くの都市で、都市部の渋滞料金が徴収されている。一部の都市、特に中国の上海、深圳、広州では、入札やくじ引き方式の車両割当制度を採用している。同様に、メキシコシティ(メキシコ)、デリー(インド)、ジャカルタ(インドネシア)では、EV 導入を奨励するために EV 優先の方針でナンバープレートの発給制限を実施している。





EVの普及を支援するためには、幅広い政策が必要になる

各国政府は、義務付けやインセンティブによって EV 充電インフラ整備を促進することができる。各国政府は、建物を新築または改築する際に EV 充電用のケーブル設置を必須要件としたり、あるいは公共駐車場や事業用駐車場に一定比率で EV 充電設備の設置を義務付けることができる。一部の市場や都市で EV 利用台数が増加していることから、電力システムへの悪影響を防ぎ、EV が電力システムに提供し得る系統柔軟性サービスを活用するために、「スマート」充電システムが極めて重要になっている。したがって、政策立案者はスマート充電政策を運輸部門のエネルギー転換策の一環として検討することが望ましく、英国（2022 年より「オープンチャージポイント・プロトコル」の遵守を義務付け）、ベルギー、ルクセンブルクでも導入されている。

自動車業界が公正な移行を実現するために、各国政府や企業は、内燃機関車産業の労働者に対する再訓練または再認証プログラムを提供しなければならない。これには、影響を受けた労働者やコミュニティが、おそらく長期に亘る困難な移行期間に対処できるよう、社会的保護を提供することも含まれる。

短中期的には、内燃機関車両を脱炭素化し、一部の国では輸送燃料としてのバイオメタン利用を促進するために、化石燃料ディーゼルやガソリンへのバイオ燃料の混合率を引き上げる政策が必要になる。主な政策には混合義務付けや再生可能燃料基準があり、米国、ブラジル、インドネシア、その他多くの国で導入されている。ただし、政策は、持続可能性、部門横断的な協力、規制、認証を統合する目標を設定することにより、持続可能なバイオ燃料の原料や製造プロセスを確保しなければならない。そのような政策の例として、EU の再生可能エネルギー指令における持続可能性基準や、ブラジルの「レノバ・ビオ」がある。

鉄道の脱炭素化は、主に再生可能エネルギープロジェクトや再生可能エネルギー電力の調達を通した電化にかかっている。インドでは、中央政府が所有するデリー・メトロ・レール・コーポレーションが 2014 年より屋根置き太陽光発電を行い、再生可能エネルギー電力を鉄道システムに提供している。同社はマディヤプラデーシュ州と電力購入契約を結び、システムのために太陽光発電による電力をさらに調達している(IRENA and GIZ, 2018)。

海運分野の脱炭素化を成功させるには、効果的な国際的取り組みが必要である



航空分野に関する政策

持続可能な航空燃料(SAF)に関する目標は、依然として、航空分野を脱炭素化するための最も重要な政策である。航空産業は、国際航空運送協会(IATA)を通して、パリ協定の目標を支持して 2050 年までに二酸化炭素排出量をネットゼロにする目標を設定している。国際民間航空機関(ICAO)も、国際航空分野に関する二つのグローバルな意欲的目標を設定しており、2010 年の第 37 回総会で決定した通り、2050 年まで年 2%のペースで燃料効率を改善し、2020 年以降は炭素中立的な成長を遂げることを目指している (ICAO, 2022)。ReFuelEU 航空規則案は、燃料サプライヤーに対し、EU の空港で供給される燃料の SAF 混合率を 2025 年までに 2%にし、徐々に増やして 2030 年までに 5%にすることを義務付けるものである。その後目標はより急速に引き上げられ、2035 年には 20%に、2040 年には 32%に、2050 年には 63%になる。この規則案には、合成ケロシンの混合率を 2030 年以降 0.7%とする準義務も含まれている(European Commission, 2021b)。

航空燃料への混合義務付けにより市場を創出することができるが、それが SAF 全般を対象とする場合、割当はバイオ燃料で占められ、合成燃料の普及を促進することにならない可能性もある。欧州の 6 カ国は SAF を対象とする混合目標を設定しており、北欧諸国が先頭を切っている。義務付け政策により、航空燃料における持続可能な再生可能燃料の比率を徐々に増やし、2050 年までに 100%再生可能燃料に到達するよう規定することができる。

海運分野に関する政策

海運分野の脱炭素化は、主に国際海上輸送の排出量削減を促す国際的取り組みに依存する。国際海事機関(IMO)は、海運分野の脱炭素化目標や戦略を策定し、それらを業界や各国が幅広く採用するよう促す役割を果たす。2018 年、IMO は海運分野の GHG 排出量を削減する戦略を導入した。この戦略は、国際海運の炭素集約度と温室効果ガス排出量の定量的削減目標を掲げており、例えば炭素集約度については、2008 年の水準と比較して 2030 年までに少なくとも 40%低減し、2050 年までに 70%削減を目指して努力することになっている。また、国際海運による温室効果ガス排出量を可能な限り早期にピークアウトさせ、2008 年の水準と比較して 2050 年までに少なくとも 50%削減することを目指すとともに、パリ協定の気温目標に沿って徐々に削減するための努力を続行している(IMO, 2018)。

IMO の戦略には、国家の施策を国際目標と整合させる実現支援策が盛り込まれている。例えば、国の行動計画の策定や更新を支援する、港湾に対して海上輸送による温室効果ガス排出量の削減を促進するよう奨励する、国際海事研究委員会を設立して研究開発活動を実施および調整する、海運分野向けのゼロカーボン燃料あるいは化石資源不使用の燃料を目指し、代替燃料のライフサイクルに亘る温室効果ガス／炭素集約度に関する堅牢なガイドラインを策定する、政策決定に資するためにさらなる温室効果ガス排出量に関する研究を行い、各施策について限界削減費用曲線を推定し、技術協力や能力開発活動を奨励するなどである。

2.8 結論

本章で示した通り、エネルギー転換には電力部門と最終消費部門における幅広い転換が必要である。この転換を達成する技術のほとんどはすでに利用可能になっているが、必要とされる規模拡大の実現は難しい課題となる。政府は、エネルギー転換を加速し、エネルギー部門への十分な投資の流入を確保するために、包括的な政策や施策によって介入する必要がある。これについては、第 3 章で詳しく検討する。

また、電力部門と最終消費部門の転換を促す政策枠組みには、技術導入に重点を置くものだけでなく、それ以上の施策を盛り込む必要がある。行動変容や、持続可能な生産と消費の実践を奨励する必要もある。最も重要なこととして、転換を促す政策枠組みには、エネルギー転換が公正かつ包摂的なものとなるようにする幅広い政策介入（産業政策、労働市場政策など）を盛り込むことが望ましい。2023 年後半に発行予定の『世界エネルギー転換展望 2023』第 2 巻では、この点をより詳細に検討する。



第 3 章

投資ニーズ、資金調達、実現支援政策の枠組み



第3章の要点

- エネルギー投資は、エネルギー転換を推進しつつ、座礁資産リスクを回避することが望ましい。「現行計画シナリオ」では、2023 年から 2050 年までのエネルギー部門全体の累積投資額は 103 兆ドルと予想される。この投資額のうち約 60%はエネルギー転換技術に向けられており、そのほとんどが再生可能エネルギー、効率化、電化（エレクトリフィケーション）、水素、そして二酸化炭素除去である。しかし、現行計画による投資の 40%は、依然として化石燃料に向けられている。

- 1.5°C 目標を維持するためには、エネルギー転換技術への投資を拡大するとともに再配分することが必要である。1.5°C シナリオでは、2050 年までの期間に現行計画シナリオよりも 47 兆ドル多い総額 150 兆ドルの設備投資を行い、石炭および石油を中心とする化石燃料技術への投資約 26 兆ドルをエネルギー転換技術やインフラに振り向ける必要がある。

- 気候目標を達成するため、発電部門と最終消費部門への再生可能エネルギーの導入を加速しなければならない。最終消費部門の電化とエネルギー効率の向上にも関心を向ける必要がある。エネルギー転換技術への投資は 2022 年に過去最高の 13 億ドルに達したが、それでもなお 1.5°C 目標を達成するために必要な投資額には足りていない。また、資金調達を支援する政策や施策、地域の能力構築（訓練など）といった、エネルギー転換の実現を支援する環境を創出するためにも相当の投資が必要である。また、これまでの投資は少数の国や地域に集中しており、このままでは 1.5°C 目標を達成することはできない。エネルギー転換を世界規模で実現するためには、資金調達手段へのアクセスを拡充しなければならない。

- 再生可能エネルギーの拡大には、強力な国際協力や官民の協調行動が必要であり、それにはさまざまな障壁に対する政治的意志と包括的政策枠組み、そしてさらなる投資が必要である。エネルギー転換の地理的拡大を加速し、その社会経済的開発目標を実現する喫緊の必要性があることを考えると、十分な投資を受けていない国々が経済を妨げることなくエネルギー転換の長期的便益を得ることができるよう、革新的な手段が必要とされる。

▸続く

第3章の要点

- エネルギー設備への投資に伴うリスクのより包括的な定義が必要である。投資家へのリターンに関するリスクという狭い視野から、環境や社会へのリスクの考慮へと視野を広げなければならない。開発途上国では利用できる公的資金が限られているため、国際社会がさらに後押しする必要がある。
- 再生可能エネルギーへの公的資金提供（より広範には気候資金）は、いくつかの困難に直面している。過去 3 年間のマクロ経済的問題や地政学的問題により、ほとんどの国の関心はインフレ、サプライチェーンの途絶、食料不足、成長の停滞に向けられるようになった。それでも、エネルギー転換への投資は、公平で、包摂的で、強靭な経済への道を開くものとなり得る。そのために、グローバルノースからグローバルサウスへの国際協力と公的資金の流入は不可欠である。
- 公的資金（国内資金または国際協力を介した資金）は、仲介機関（政府、開発金融機関、「緑の気候基金」のような国際基金など）を通して、さまざまな手段を用いて流動させる必要がある。例えば、助成金、補助金、訓練プログラムのような政府支出、譲許的融資や保証のようなデットファイナンス、エクイティファイナンスや資産の直接所有（送電線など）、税額控除や電力購入契約のような財政政策や規制などである。そのような手段によって、構造改革や公正な移行を支援するような、必要な政策に公的資金を振り向けることが望ましい。さらに、これらの手段は、経済的便益が公平に共有されることを保証する先進的な設計にすることが望ましい。



3.1 はじめに

本章では、第 2 章に示した分析に基づいて、1.5°C シナリオのもとで 2050 年までに必要な投資を論じる。技術ごとに投資ニーズを検討し、政府がエネルギー転換投資の短期的ニーズと長期的ニーズのバランスをどのように取ることができるかを模索する（第 3 章第 1 節）。再生可能エネルギーを基本とする電化を実現するには電力システムの大幅な拡張と増強が必要であり、水素の役割が拡大する中、パイプラインや電解装置、貯蔵施設が必要となる。第 3 章第 2 節では、インフラ投資の加速が果たす極めて重要な役割を検討する。

第 3 章第 3 節では、投資とそれを促進する政策に重点を置いて、過去 10 年間のエネルギー転換関連投資の傾向を詳細に説明し、第 3 章第 4 節の土台とする。第 3 章第 4 節では、公共政策の役割と投資、技術導入だけに留まらない資金調達ニーズ、資金調達のリスクを低減するために必要な実現支援政策の枠組みについて論じる。同節では、公的投資の拡大に関する推奨事項を技術とインフラの両面から、そしてそれらを有効活用するために必要な制度的・法的能力の面から提案する。

3.2 エネルギー転換を加速する投資

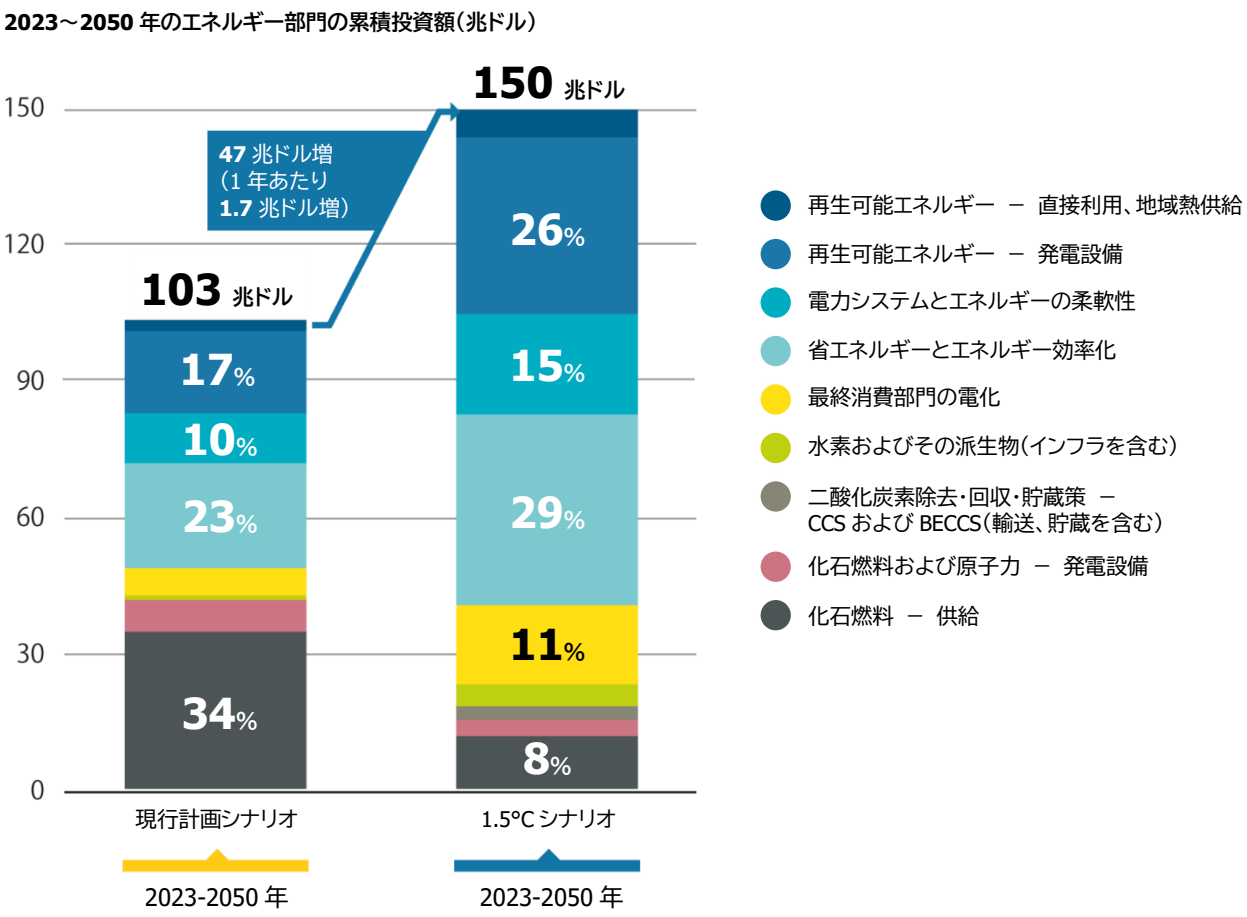
3.2.1 世界のエネルギー転換投資：長期的および短期的優先事項

気候目標を達成するために、エネルギー転換によって、再生可能エネルギー発電と自家消費型発電、最終消費部門の電化、エネルギー効率の向上を加速する必要がある。それに伴う設備投資の増加により、1.5°C シナリオでは現行計画シナリオ (PES)の 103 兆ドルより 47 兆ドル多い 150 兆ドルの投資が必要である（図 3.1 を参照）。



1.5°Cシナリオでは、今後2050年までに、150兆ドルの投資が必要になる

図 3.1　世界の投資額と技術別構成：2023～2050 年の現行計画シナリオと 1.5°C シナリオ



注： BECCS = バイオエネルギー・二酸化炭素回収・貯留、CCS = 二酸化炭素回収・貯留



1.5°C シナリオでは、エネルギー転換技術およびインフラへの投資額は 2050 年までに 150 兆ドルに上り、年平均は 5 兆 3,000 億ドルになる。言い換えれば、これは、現行計画シナリオよりも年間 1 兆 7,000 億ドル多い投資額となる。

最終消費部門では、エネルギー転換技術への投資額は 2050 年までに 73 兆ドルに上り、必要な投資総額の約 47%を占める。これには、省エネルギーおよびエネルギー効率化（43 兆ドル）、電化（16 兆 6,000 億ドル）、再生可能エネルギーの発電および直接利用技術（6 兆ドル）、グリーン水素（4 兆 7,000 億ドル）、二酸化炭素除去（3 兆ドル）が含まれる。

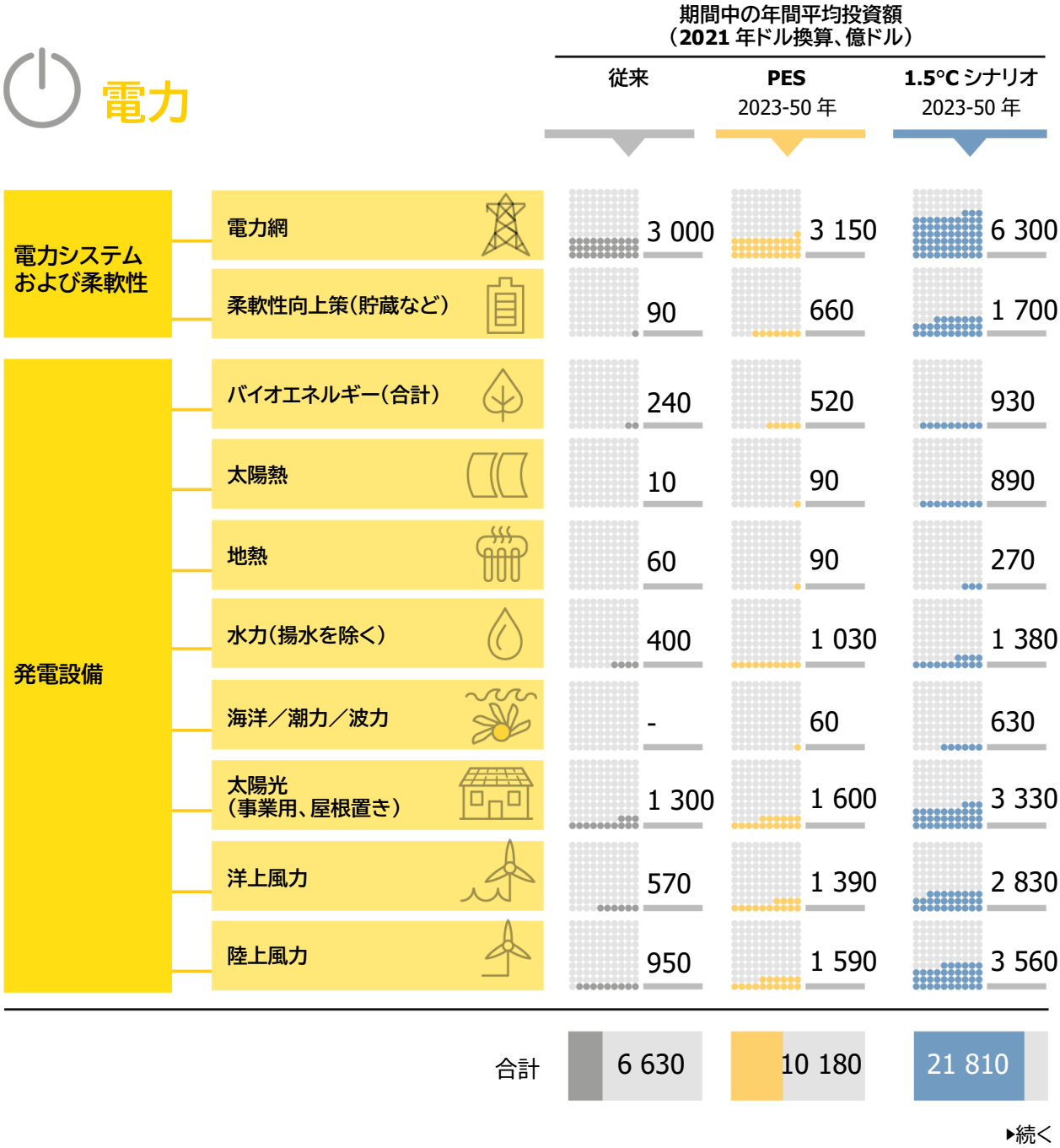
電力部門の再生可能エネルギーへの移行のための累積投資額は合計 61 兆ドルに上り、再生可能エネルギー発電容量（39 兆ドル）や再生可能エネルギーの実現支援インフラ、すなわち電力システムおよび柔軟性（22 兆ドル）に投入する必要がある。化石燃料供給への投資額は 12 兆ドル、化石燃料発電および原子力発電への投資額はそれぞれ 1 兆 9,000 億ドルと 1 兆 6,000 億ドルとなる。

現行計画シナリオでは石炭と石油を中心とする化石燃料技術への投資は年平均約 1 兆ドルに上るが、1.5°C シナリオではこれがエネルギー転換技術およびインフラに振り向けられる。振り向けられる投資総額は、2050 年までの間に約 26 兆ドルに上る。

3.2.2 部門別および技術別の投資機会

全てのエネルギー転換技術に亘る世界の投資額は、2022 年に過去最高の 1 兆 3,000 億ドルに達した（第 3 章第 3 節）。しかし、1.5°C シナリオの道すじを維持するためには、年間投資額を 4 倍以上に増やす必要がある。表 3.1 では、1.5°C シナリオを達成するために必要な年間投資額をさまざまな技術や部門ごとに検討しており、次の項では個別の投資要件をより詳細に検討する（第 3 章第 2 節第 3 項）。

表 3.1　現行計画シナリオおよび 1.5°C シナリオにおいて 2023～2050 年に必要な年間投資額



▸続く

データ元：（IRENA statistics: 2021 investments; IEA, 2022f; BNEF, 2023a）

注：電力システムおよび柔軟性：送配電網、スマートメーター、揚水式水力発電設備、分散型および系統用定置型蓄電池（主に分散型太陽光発電システムとの併用）。**再生可能エネルギー発電設備：**発電のための再生可能エネルギー技術の導入。**再生可能エネルギーの最終消費および地域熱供給：**バイオ燃料供給、再生可能エネルギーの直接利用、地域熱供給用途（太陽熱、近代的バイオエネルギーなど）、およびバイオマスによるアンモニアおよびメタノール製造。**産業部門におけるエネルギー効率化：**プロセス効率の向上、デマンドサイドマネジメント・ソリューション、高効率エネルギーシステムおよびモーターシステム、廃棄物処理の改善。**運輸部門におけるエネルギー効率化：**全ての旅客・貨物輸送モード、特に道路、鉄道、航空、船舶。既存車両への投資は除く。**家庭・業務部門におけるエネルギー効率化：**建築物の外皮性能（断熱、窓、ドアなど）の改善、高効率な照明やその他電化製品の導入。**水電解装置および水素インフラ：**グリーン水素の製造のための電解装置の容量（アルカリおよび高分子電解質膜）、水素輸送インフラ、水素の季節間貯蔵設備

▶続く

続き

表 3.1　現行計画シナリオおよび 1.5°C シナリオにおいて 2023～2050 年に必要な年間投資額

最終消費部門および地域熱供給

		期間中の年間平均投資額（2021 年ドル換算、億ドル） 従来	PES 2023-50 年	1.5°C シナリオ 2023-50 年
再生可能エネルギーの最終消費および地域熱供給	バイオ燃料－供給	160	470	1 110
	再生可能エネルギーの直接利用、地域熱供給	570	340	980
エネルギー効率化	家庭・業務	2 370	4 180	9 350
	産業	400	2 120	4 240
	運輸	190	2 010	1 470
電化（エレクトリフィケーション）	EV 充電設備	80	1 180	3 140
	ヒートポンプ	600	290	2 300
	運輸	-	820	500
グリーン水素および派生燃料の製造	水電解装置および水素インフラ	0	230	1 360
	水素由来のアンモニアおよびメタノール	-	20	340
二酸化炭素除去	CCS、BECCS、その他の除去方法による CO_2 回収	-	30	1 070
循環型経済施策	リサイクルとバイオ由来製品	40	40	180
	合計	4 420	11 730	26 050

注：水素由来のアンモニアおよびメタノール：水素原料から製造したアンモニアおよびメタノール。**二酸化炭素除去：**主に産業部門のプロセス排出量とブルー水素製造における CCS の導入。化学工場、発電所、コージェネレーションプラントにおける BECCS の導入。**循環型経済施策：**ケミカルおよびメカニカルリサイクル、エネルギー回収、バイオ由来の代替製品（バイオプラスチックなど）、有機材料。
BECCS = バイオエネルギー・二酸化炭素回収・貯留、CCS = 二酸化炭素回収・貯留、EV = 電気自動車、PES = 現行計画シナリオ



電力部門への投資は、現行計画シナリオでも 1.5°C シナリオでも引き続き増加する。この投資は、追加的な再生可能エネルギー発電設備、系統拡張および強靭化、その他の系統柔軟性強化策（再生可能エネルギー出力予測の向上から、系統連系されたデマンドサイドからの柔軟性、定置型エネルギー貯蔵まで）に向けられる。現行計画シナリオでは、2050 年までの間の再生可能エネルギー発電設備や電力システムおよび柔軟性への年間平均投資額は 1 兆ドルを超えると推定される。IRENA の 1.5°C シナリオでは、電力部門の転換には、2050 年までに年間平均 2 兆 2,000 億ドル以上の投資が必要になる。このシナリオでは、総額 61 兆ドルの投資が必要であり、これは、2050 年までに現行計画シナリオで必要となる累積投資額（28 兆 5,000 億ドル）の 2 倍以上である。投資の増加は、電化の普及、グリーン水素製造、再生可能エネルギー発電設備の初期資本コストの高さ（化石燃料と比較して）、柔軟性強化策から発生するさらなる需要により必要となる。

IRENA の 1.5°C シナリオでは、電力部門への投資は本報告書の展望期間の投資総額の 43%を占める。2050 年までに、再生可能エネルギー発電技術への年間投資必要額は、ほぼ 1 兆 4,000 億ドルに達し、電力システムおよび系統柔軟性への年間平均投資必要額は 8,000 億ドルに達すると推定される。発電プロジェクトが運転開始した際には、それが電力システムに適切に連系され、その価値と有用性の両者が電力システムの信頼度の維持に最大限発揮されるよう、この投資は十分に統合的かつ協調的に行われなければならない。

投資が最も多く集まるのは、太陽光や風力のような再生可能エネルギー技術である。今後 2050 年までに、太陽光発電（屋根設置、発電事業用）に投じられる年間平均投資額は 3,330 億ドル、洋上風力発電は 3,560 億ドル、陸上風力発電は 2,830 億ドルである。2021 年の水準と比較して、太陽光発電への年間投資額は 2.6 倍、洋上風力発電は 3.7 倍、陸上風力発電は 5 倍に増やす必要がある。



他の再生可能エネルギー技術への投資も拡大する必要がある。例えば、水力、バイオエネルギー、地熱、太陽熱、海洋エネルギー技術といった幅広い技術に、今後 2050 年まで年間 4,000 億ドル以上を投資する必要がある。

家庭・業務部門では、2023～2050 年の累積投資額は 34 兆ドルを上回り、1.5°シナリオで 2050 年までに必要なエネルギー転換技術への投資総額の約 23%を占める。エネルギー効率化への投資が 77%と最大の比率を占め、次いでヒートポンプへの投資が 17%、その他の再生可能エネルギー（主に太陽熱）の利用が残りの 6%を占める。そのために、従来の水準と比較して、ヒートポンプへの年間投資額は 2.1 倍、エネルギー効率化は 3.7 倍に増やす必要がある。

運輸部門では、2050 年までの投資額は 15 兆ドル（エネルギー転換関連の投資総額の 11%）に上る。充電インフラは投資全体の 58%を占め、その進展が電気自動車の普及を加速するための鍵となる。エネルギー効率化が 27%を占め、運輸の電化への支援が 9%、水素ステーションと燃料補給施設が残りの 5%を占める。充電インフラへの年間投資額は、従来の水準と比較して 39 倍に増やす必要がある。

産業部門への投資は、エネルギー効率化と省エネルギー策（新たなエネルギーキャリア(new carriers)を用いた、利用し得る最善の技術やプロセスの導入）に重点が置かれる。1.5°C シナリオにおける 2023～2050 年の累積投資額は約 12 兆ドルと推定され、現行計画シナリオにおける水準の 2 倍になる。産業部門におけるその他の取り組みとしては、二酸化炭素回収・貯留(CCS)とバイオエネルギー・二酸化炭素回収・貯留(BECCS)からなる二酸化炭素除去インフラへの累積投資額が推定 2 兆 2,000 億ドル、その他の再生可能エネルギーに基づく技術（バイオマス、地熱、太陽熱など）の導入が推定 7,000 億ドル、バイオ由来アンモニアおよびメタノールが 7,000 億ドル、循環型経済施策が 5,000 億ドル、ヒートポンプの利用が 600 万ドルである。



その他のタイプのエネルギー供給に目を向ける際は、バイオマスサプライチェーンを拡大するとともにその持続可能性を確保し、変換技術を強化および拡大することの重要性に留意する必要がある。その一方で、水素製造と水素インフラを大幅に拡大する必要がある。

バイオエネルギーの投資額については、2050 年までに 6 兆 2,000 億ドルに上り（エネルギー転換関連の投資総額の 5%）、そのほとんどはバイオエネルギーを用いた発電容量（2 兆 6,000 億ドル）とバイオ燃料供給の拡大（2 兆 4,000 億ドル）に向けられる。残りは、バイオマス由来のアンモニアとメタノールを製造し（7,000 億ドル）、循環型経済実践の一環としてバイオ由来プラスチックと有機材料を導入し（3,000 億ドル）、最終消費部門におけるバイオエネルギーの直接利用を促進する（2,000 億ドル）ために必要とされる。

グリーン水素を製造する電解装置、水素供給インフラ、化学品製造用の再生可能エネルギー由来水素原料への投資は、2050 年までに年間平均 1,700 億ドルに上る。グリーン水素は開発初期段階にあるため、供給量 1 GW あたり 50 億ドルのサプライチェーン投資が必要になる。

3.2.3 エネルギー転換を促す物理的インフラ強化への投資

再生可能エネルギー導入拡大に必要な電力システムの増強

1.5°C 目標に沿った排出経路に向けて世界がエネルギー転換を進めるなか、再生可能エネルギー源を電力システムに統合することがますます重要になる。しかし、電力システムは再生可能エネルギーにとって難題ともなっている。なぜなら、電力システムは大規模で中央集権型のディスパッチ可能な発電所に対応するように設計されているためである。再生可能エネルギーの統合を促進するためには、電力システムにさまざまな増強を施す必要がある。例えば、分散型電力発電に対応できる管理・制御システムへの投資である。送配電インフラを改良することにより、電源容量のニーズ増大や双方向の電力潮流に対応することが可能になる。さらに、スマートグリッドの採用やアドバンストアナリティクスの利用によって、運用を最適化し、系統信頼性を向上させることができる。1.5°C シナリオでは、このような系統設備への累積投資額は 2050 年までに 22 兆 4,000 億ドルに達する。投資額のおよそ 80%は電力システムの拡充に、残りの 20%が貯蔵のような柔軟性強化策に向けられる。電力システムの増強により、再生可能エネルギーに対応可能となり、強靭かつ柔軟で持続可能なエネルギーシステムをもたらすことができる。

グリーン水素および合成ガスのパイプラインによる再生可能エネルギーの拡大

気候と調和する 1.5°C の道すじにおいて、電力部門の転換の一環として、あらゆる再生可能エネルギー、とりわけ風力発電と太陽光発電の大幅な規模拡大が生じる。風力発電と太陽光発電は分散型の変動性電源であるため、電力システムの運用や計画におけるパラダイムシフトが必要である。グリーン水素は、航空部門、船舶部門、重工業部門のような、直接電化が不可能に近く、脱炭素化が困難な部門の排出量を削減するための鍵となり得る。世界的に、これらの最終消費部門の需要を満たすうえでも、電解装置の容量拡大を実現するうえでも、クリーン水素システムの出現が鍵となる。電解装置の容量は、今日極めてわずかであるが、2030 年までに 233 GW に、2050 年までに 5,722 GW に増加すると見込まれる。これほどの規模の拡大は、水素インフラ拡大と需要部門における急速な進展が必要であることを示している。1.5°C シナリオでは、2050 年までに合計 3 兆 8,000 億ドルをグリーン水素の製造およびインフラ（季節間貯蔵のニーズも含む）に投資する必要がある。

主にグリーン水素とバイオメタンの消費拡大を支えるため、グリーンガスの利用を拡大する適切なインフラが必要である。バイオメタンは既存の天然ガスインフラに依存できるが、水素をパイプライン輸送するにはインフラを改良する必要がある。しかし、水素輸送手段の開発には多額の投資が必要であり、それが実現可能性を制限する恐れがある。とはいえ、重工業部門や運輸部門におけるクリーンなエネルギーや水素への需要は非常に大きいため、水素専用のパイプライン網は不可欠と思われる。それでも、規制環境についても製造技術や貯蔵技術についても、依然として不確実性が存在する。全体としては、水素パイプラインは、二酸化炭素排出量ネットゼロの経路への転換を支え得るものである。しかし、パイプライン建設に関連する不確実性、例えば拡大のペース、既存の供給網や需要中心地との連系線に関する不確実性が、開発の妨げとなっている。

航空部門と船舶部門 － 再生可能エネルギーや水素派生燃料のために必要な港湾や燃料補給インフラ

船舶部門と航空部門はそれぞれ、世界の排出量の約 2～3%を占めている。1.5°C シナリオでは、これらの部門の排出量を削減するためにエネルギー効率の強化と低炭素燃料への移行が必要とされる。1.5°C シナリオでは、2050 年までに船舶部門で必要とされる全ての燃料のうち 64%がアンモニア、メタノール、水素由来燃料からなる多様な構成となり、航空部門では 2050 年までにエネルギーミックスのうちの 82%が持続可能な航空燃料（バイオジェット燃料や合成燃料）になる必要がある。1.5°C シナリオでは、航空部門と船舶部門における装置のエネルギー効率化、改修、新技術への追加的支出のために必要な投資総額は、2050 年までに 1 兆 4,000 億ドルに上る。船舶部門と航空部門の燃料がさらに多様化すれば、港湾や燃料補給施設では貯蔵設備、特にアンモニア、メタノール、水素のハンドリングと貯蔵のための設備に投資する必要がある。一方で、バイオ燃料や合成燃料の混合のほとんどは主にサプライチェーンで行われ、現在のケロシン系ジェット燃料の貯蔵施設を再利用することができる。そのため 1.5°C シナリオでは、港湾や空港といった燃料補給施設のエネルギー転換を実現するため、2050 年までに 3,000 億ドルの累積投資額が必要になる。



系統柔軟性、電化、再生可能エネルギー燃料の普及を強化するために、インフラ投資が必要である



道路交通部門で必要な電気自動車充電／水素補給インフラ

運輸部門を脱炭素化するためには、電気自動車と水素自動車の導入が鍵となる。1.5°C シナリオでは、2050 年までに電気自動車の数は 20 億台を超え、全乗用車の 93%を占める。電気バスおよび電気小型トラックは車両全体の 76%を占め、水素燃料を使用する大型トラックは車両全体の 17%を占める。これらの目標が達成される場合、充電インフラや水素補給ステーションの整備が不可欠である。1.5°C シナリオでは、充電インフラ整備に必要な 2050 年までの累積投資額は 9 兆ドルとなる。水素補給ステーションについては、2050 年までの累積投資額は 5,000 億ドルと予想される。

鉄鋼、化学品、セメントなどの業種別産業部門で必要な改修

重工業部門の排出量削減は、幅広い技術に依存する。さらに、これらの部門のエネルギー転換は、CO_2 排出量の 100%削減を達成するまでにおよそ 30 年かかると見込まれる。1.5°C シナリオでは、2030 年以降については、鉄鋼部門とセメント部門における（主に化石燃料に基づく）従来技術の設備設置を想定していない。短期的なエネルギー効率化対策としては、既存プラントの改修や利用し得る最善の技術による新設が含まれる。石炭や天然ガスを使用する製造プラントの改修は 2050 年までにほぼ行き渡ることから、省エネルギーのほかに、2030 年以降は CCS インフラが導入される。鉄鋼業におけるエネルギー効率化と改修への累積投資額は、200 億ドルに上る。セメント部門における累積投資額は 1 兆 7,000 億ドルと推定される。

高付加価値化学品、アンモニア、メタノールの製造において、1.5°C シナリオでは伝統的な蒸気分解法が急激に縮小する。エネルギー効率化対策と再生可能熱や再生可能原料を併用することにより、特に現行計画シナリオと比較した場合、成果が向上する。また、メカニカルおよびケミカルリサイクル、メタノールやアンモニア製造における水素由来原料へのシフト、電力供給の転換を通じた再生可能エネルギー電力へのシフトが重要な役割を果たす。1.5°C シナリオで特定された技術ポートフォリオには、2050 年までに少なくとも 4 兆 5,000 億ドルの投資が必要である。投資額に占める比率が最も大きいのは化石燃料からバイオマスや水素への原料シフト(40%)、次いでヒートポンプ(35%)、エネルギー効率化(12%)、CCS(6%)、再生可能エネルギーの直接利用(1%)である。リサイクルのみを考慮した場合、プラスチックの循環型経済が投資額に占める比率は、3%である。



再生可能エネルギーの消費効率を高めるために必要な建築物の改修

先進国市場の既存建築物の 4 分の 3 以上は、断熱が不十分である。さらに悪いことに、熱供給を従来型の化石燃料技術に依存している。効率性とエネルギー利用の大幅改善は、既存建築物の大規模な改修によって実現し得る。2050 年までに、先進国市場では既存建築物の 80%以上、途上国市場では 60%から 80%、新興国市場では 50%近くが、より高い効率性基準を満たさなければならない。建築物改修対策のために 2050 年までに必要とされる世界規模の累積投資額は約 21 兆 6,000 億ドル、ヒートポンプ導入のためには 5 兆 8,000 億ドルである。

3.3 再生可能エネルギー投資と再生可能エネルギー政策

3.3.1 エネルギー転換投資と促進政策

2022 年、エネルギー転換技術への世界の投資額は過去最高の 1 兆 3,000 億ドルに達した。さまざまなサプライチェーンの問題に加え、人件費や資金調達コスト、さらには運送料や建築材（鉄鋼、セメントなど）コストへのインフレ圧力にもかかわらず、投資額は 2021 年と比べて 19%増、パンデミックが始まる前の 2019 年と比べて 70%増となった（図 3.2）。

再生可能エネルギーとエネルギー効率性は依然として最大の部門であり、両者を合わせた額は 2022 年に 7,720 億ドルに上るが、他の技術にも投資が集まり始めていることから、投資全体に占める比率は低下している。運輸の電化技術（電気自動車やその充電インフラなど）[原注 10] への投資額は 2022 年に 4,660 億ドルに達し、2021 年と比べて 54%増となった。電気自動車の世界販売台数は 2022 年に大幅に増加し、第 1 四半期に 200 万台が販売され、2021 年同期と比べて 75%増となった(IEA, 2022g)。ZEV 宣言のような誓約や、中国で発表されたような新目標（第 2.7.2 項を参照）、さらには 2021～2022 年に導入された政策や施策が、EV の普及を後押しした。

原注 10 運輸の電化への投資には、電気乗用車、電気商用車、電気バスの販売のほか、家庭や公共の充電設備投資などがある(BNEF, 2023b)。

エネルギー転換技術への世界の投資額は、2022年に1兆3,000億ドルに達した

熱供給の電化(主にヒートポンプ)[原注 11] への投資額は 2022 年に 640 億ドルに達し、2020 年と比べて 35%増となった。この急激な増加は、2020 年以前の投資が年平均成長率(CAGR)のほんの 9%と緩やかなペースで増加していた状況とは対照的である。2020 年以降、世界中でヒートポンプに対する前例のない政策支援が行われるようになり、投資額はほぼ 2 倍に増えた。例えば、欧州連合の REPowerEU 計画や米国のインフレ抑制法(ボックス 2.8)などがある。

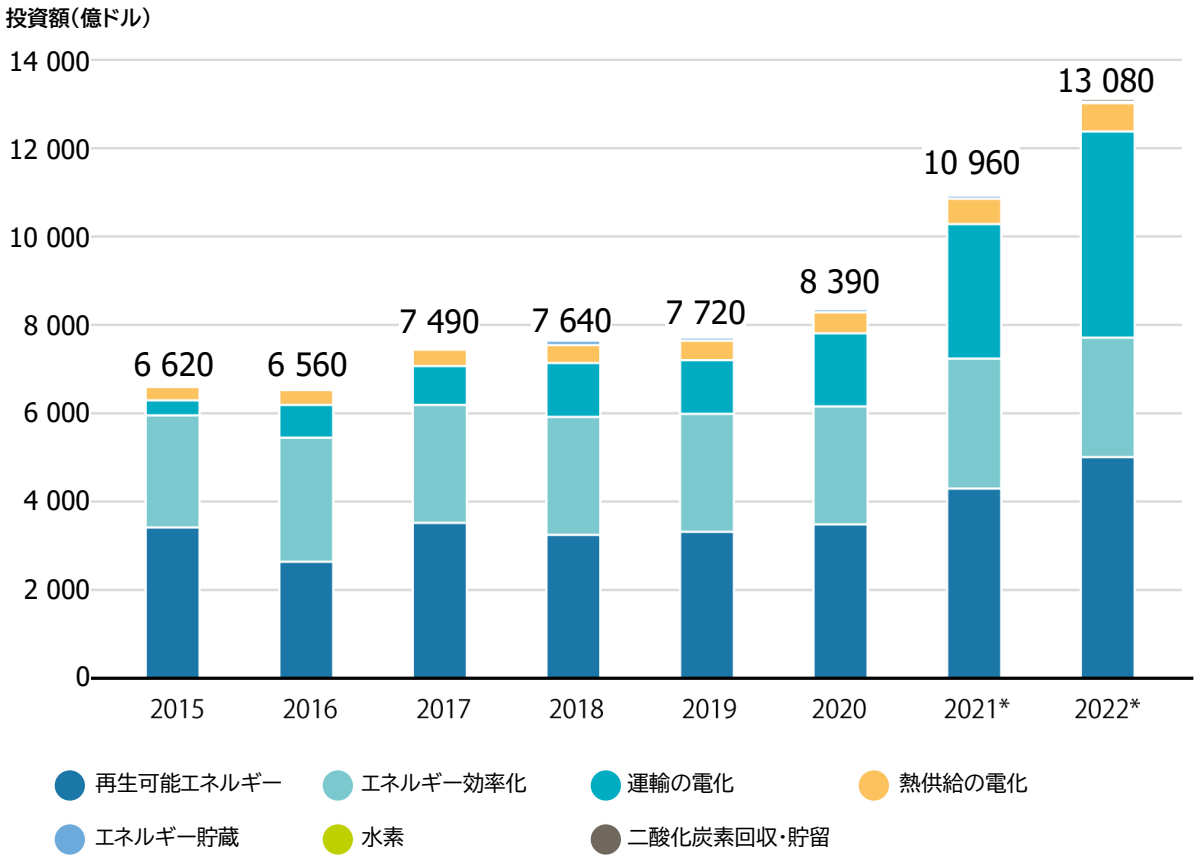
一方、水素[原注 12] への投資は 2022 年に 11 億ドルに達し、2021 年と比べて 3 倍以上に増えた。水素への政策支援は世界中で勢いを増しており、水素戦略を策定済み、あるいは準備中の国は、2017 年にわずか 1 か国(日本)だったが、2022 年 10 月時点では 60 か国を超えている。水素技術には、アーリーステージキャピタル(初期段階の資金提供)と国の公共投資のいずれもが、力強く流入している(IRENA and CPI, 2023)。

建築物の改修、公共交通機関、電気自動車インフラといったエネルギー効率化への世界の投資額は、2022 年に 2,730 億ドルに達した(IRENA and CPI, 2023)。2022 年は、政府や消費者が燃料供給の混乱とエネルギー価格の高騰に対処する努力を講じたため、エネルギー効率促進策が広く採用された(IEA, 2022g)。



原注 11 熱供給の電化への投資には、住宅用ヒートポンプなどがある(BNEF, 2023b)。
原注 12 水素投資には、水素電解装置プロジェクト、燃料電池車、水素補給インフラなどがある(BNEF, 2023b)。

図 3.2　2015～2022 年におけるエネルギー転換技術への世界の投資額



出典： (IRENA and CPI, 2023)

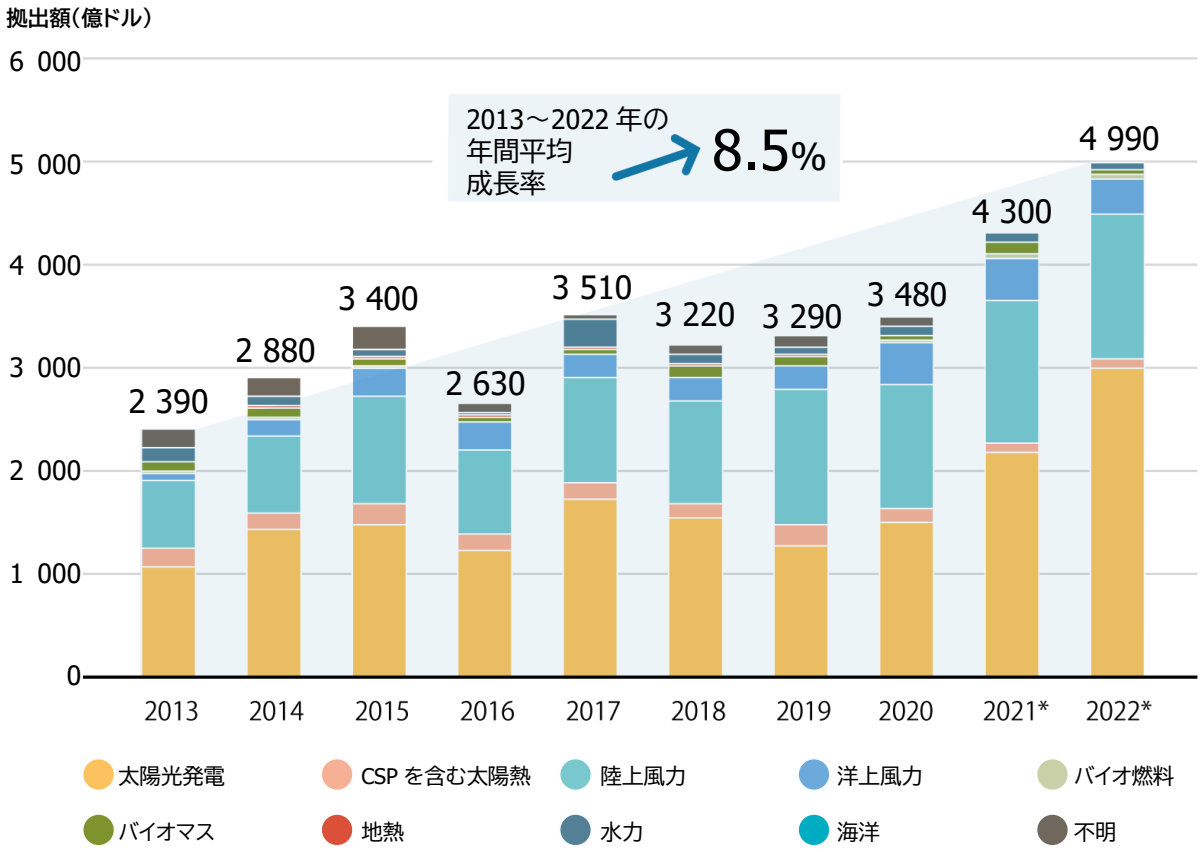
注： 2021 年と 2022 年の再生可能エネルギーへの投資額は、BNEF によるデータに基づいて暫定的に推定したものである。大規模水力発電投資については BNEF のデータは限定的であるため、これらは 2019 年と 2020 年の年間平均投資額に相当する年 70 億ドルになるものと想定した。エネルギー効率化に関するデータは(IRENA, 2022m)による。これらのデータの数値は 2019 年のドル換算であるが、その他の全ての数値は現行の価格および為替レートを用いている。これより粒度の高いデータがないため、データベース全体に亘って単位を統一することはできなかった。したがって、これらの数字を併せて記載したのはあくまでも参照の目的であり、データ源同士を比較するために用いるべきではない。他のエネルギー転換技術に関するデータは(BNEF, 2023b)による。

3.3.2 再生可能エネルギー投資および政策

再生可能エネルギーへの年間投資額は 2022 年に 4,990 億ドルでピークに達し、2020 年より 43%増加した(BNEF, 2023b)(図 3.3)。クリーンエネルギー需要の後押しもあって、気候変動、エネルギー安全保障、安定した国内エネルギー源に対する投資家の強い意欲と政策立案者の意識の高まりが、再生可能エネルギーに有利に働いている。

2020 年と 2021 年は、ちょうど一部の国や地域が再生可能エネルギー目標を達成する期限でもあり、また、一部の国では発電会社が政府補助金に申請する期限でもあり、その顕著な例としては中国とベトナムの固定価格買取制度(FiT)がある(IRENA and CPI, 2023)((Do *et al.*, 2021; Jaghory, 2022)に基づく)。

図 3.3　2013～2022 年における再生可能エネルギーへの世界の年間拠出額の技術別内訳



出典：(IRENA and CPI, 2023).

注：2021 年と 2022 年の投資額は、(BNEF, 2023c)のデータに基づいて暫定的に推定した。大規模水力発電投資については BNEF のデータは限定的であるため、これらは、2019 年と 2020 年の直近 2 年間の年間平均投資額に相当する年 70 億ドルになるものと想定した。

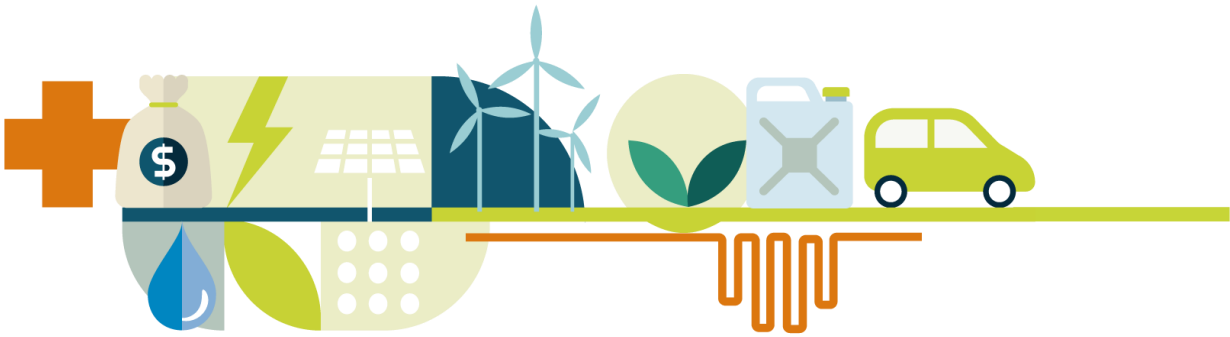
CSP = 集光型太陽熱発電

再生可能エネルギー投資の90%以上が、太陽光発電と陸上風力発電に向けられる

技術別および最終用途別の再生可能エネルギー投資

コスト競争力のある太陽光発電と陸上風力発電は、引き続き投資額では上位を維持する。これらの発電技術は、意欲的目標と政策支援手段(FiT や入札)により魅力的な投資先となっている。図 3.3 に示す通り、2013 年から 2022 年までの間、太陽光発電および風力発電技術[原注 13]は投資の大部分を惹きつけていた。再生可能エネルギー投資全体に占める両者を合わせた比率は、2013 年に 82%であったが、2022 年には 97%に増加した。

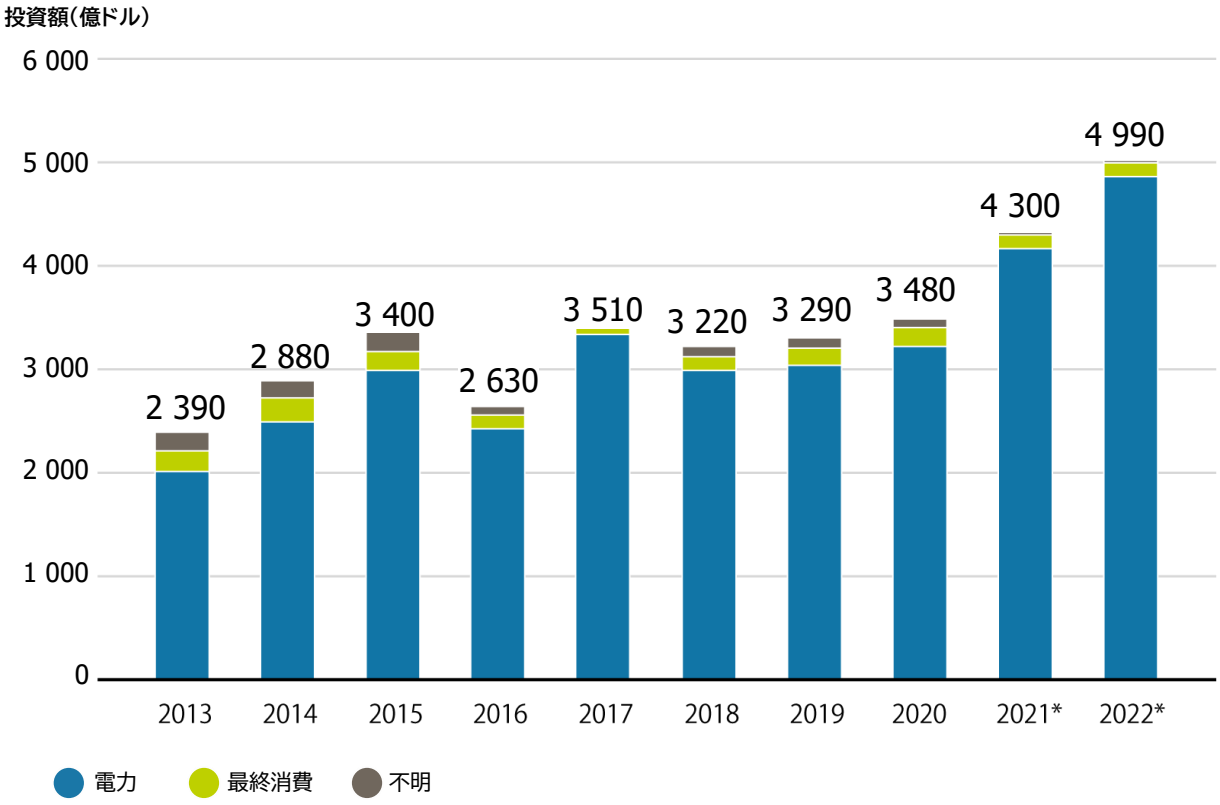
再生可能エネルギー投資の大部分は引き続き電力部門に向けられ、最終消費部門が投資全体に占める比率は、2013 年から 2022 年までの平均で年間 10%に過ぎない(図 3.4)[原注 14]。再生可能エネルギー投資のうち最終用途に向けられる比率は、次第に減少している。2013 年には最終用途に用いられる再生可能エネルギーに全体の 8.5%(200 億ドル)が向けられていたが、2020 年には 5%未満(170 億ドル)まで低下した。暫定データによると、2022 年にはこの比率が 3%まで低下している。熱供給(太陽熱温水器、地熱ヒートポンプ、バイオマスボイラーなど)や運輸(バイオ燃料など)といった最終消費部門への投資が慢性的に不足していることにより、世界のエネルギーシステムの大部分が化石燃料に依存したままとなっている。



原注 13 太陽光技術には、太陽光発電、太陽熱がある。太陽熱への投資には、集光型太陽熱発電所のほか、太陽熱温水器がある。風力技術には、陸上風力発電と洋上風力発電がある。

原注 14 ただし、最終用途への投資は世帯レベルや企業レベルでなされることが多い(バイオマスボイラー、地熱ヒートポンプなど)ため、データが限られていることに留意するべきである。

図 3.4　2013～2022 年における再生可能エネルギーへの世界の年間投資額の用途別内訳



出典：(IRENA and CPI, 2023).

注： 2021 年と 2022 年の投資額は、BNEF によるデータに基づいて暫定的に推定した(BNEF, 2023c)。大規模水力発電投資については BNEF のデータは限定的であるため、これらは 2019 年と 2020 年の直近 2 年間の年間平均投資額に相当する年 70 億ドルになるものと想定した。

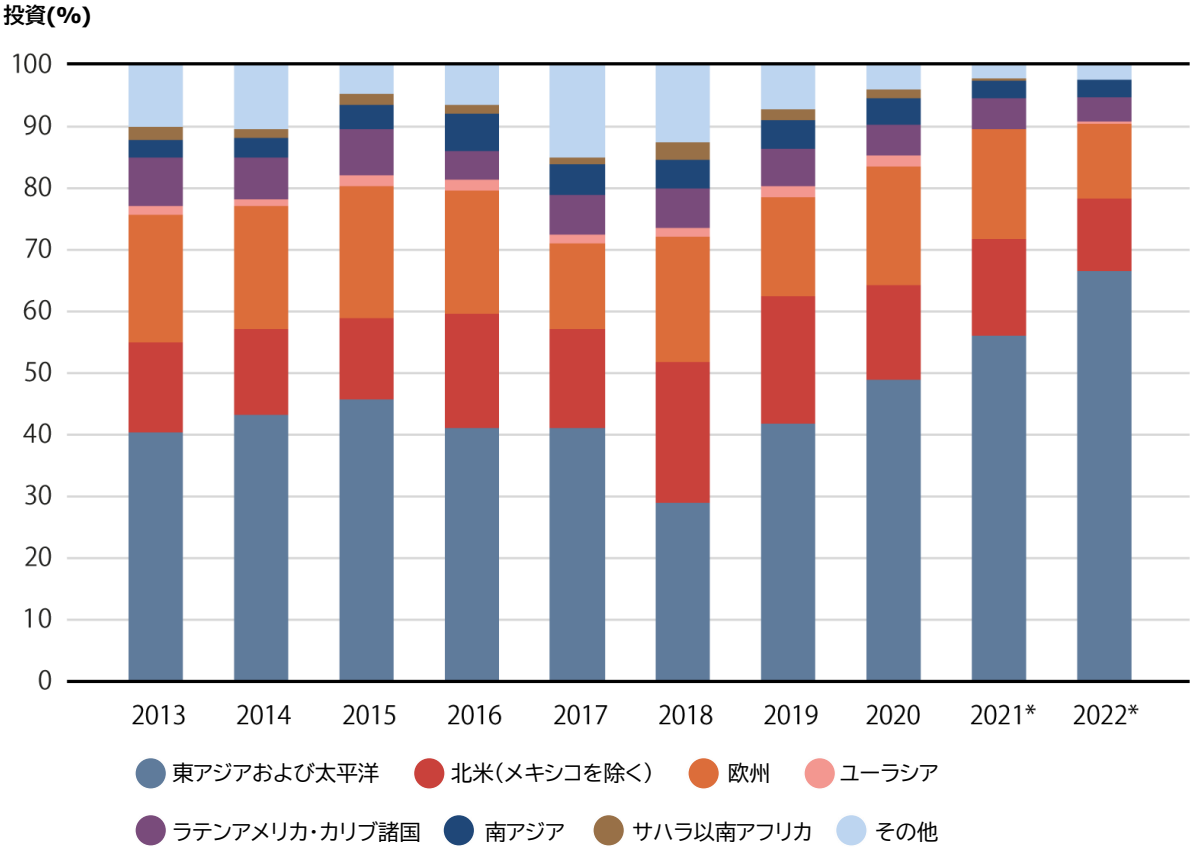
地域別の再生可能エネルギー投資

再生可能エネルギー投資は依然として低リスク環境に集中している。東アジアおよび太平洋地域が最も多くの投資を惹きつけており、2019～2020 年には全体の約 45%（年間 3,070 億ドルに相当）（図 3.5）、2022 年には世界の投資総額のほぼ 3 分の 2 を占めた。中国が当該地域における投資の 5 分の 4 以上を占めており、そこには、2030 年に排出量ピークを目標とし、2060 年までに炭素中立を達成するという中国政府の巨大な意欲が働いている。中国は、再生可能エネルギーの導入や開発のために歴史的な水準の資金を投資している。また、近年ベトナムが日本を抜いて、当該地域における第 2 位の投資先となった。これらの要因となったのは、2020 年と 2021 年に期限を迎えることになっていた FiT であり、当該年中に多くのプロジェクト案件が一斉に決算を完了したためである。

2022 年、欧州と北米が投資額に占める比率は合わせて約 24%で、二つの地域の割合はほぼ半々である。北米への投資額の大部分を米国が占め、欧州では英国、ドイツ、フランスの比率が最も多い(図 3.5)。

これとは対照的に、120 か国の途上国や新興国からなる地域は、2022 年の投資総額の約 15%しか獲得していない。インドとブラジルは、意欲的な再生可能エネルギー目標、リスク低減スキーム、堅牢な政策支援(FiT や入札)を備え、最も多くの恩恵を得ている。アフリカへの投資の比率は低下し続けており(ボックス 3.1 を参照)、政府、開発金融機関(DFI)、その他の慈善団体などの組織がこれまで以上に公的資金を動員しない限り、資金へのアクセスはさらに制約されると予想される(第 3.4 節を参照)。

図 3.5　2013～2022 年における再生可能エネルギー投資の投資先地域別内訳



出典: (IRENA and CPI, 2023).
注: 「北米(メキシコを除く)」には、バミューダ、カナダ、米国が含まれる。「その他」には、中東、北アフリカ、その他オセアニア、地域横断、その他アジア、不明が含まれる。分析に用いた地域分類についての詳細は、以下を参照:(IRENA and CPI, 2023)。

2020年における再生可能エネルギー事業資金の総額のうち、助成金と低コストのプロジェクト融資はわずか1%

資金調達手段および資金源別の再生可能エネルギー投資

資金調達手段の中でもデットファイナンス（借入れによる資金調達）の比率が増加しており、2013 年には 23%だったが、2020 年には 56%に達した（図 3.6 を参照）。これは恐らく、太陽光発電や陸上風力発電などの主要な再生可能エネルギー技術が成熟し安定化したことにより、特に先進国（G20 など）で多額の融資を呼び込むことが可能になったことと関係する。なぜなら、貸し手は長期に亘る定常的かつ予測可能なキャッシュフローを見込むことができ、それを電力購入契約やその他の政策支援（FiT など）が後押しするからである。2019～2020 年には、借入れは太陽光発電投資のほぼ半分(43%)、陸上風力発電投資のほぼ70%を占めた。陸上風力発電のほうが太陽光発電より借入れの比率が高いのは、風力発電プロジェクトの開発において国有金融機関がより大きな役割を果たしており、そのような金融機関は一般的に貸付けを好むことに関係していると思われる。

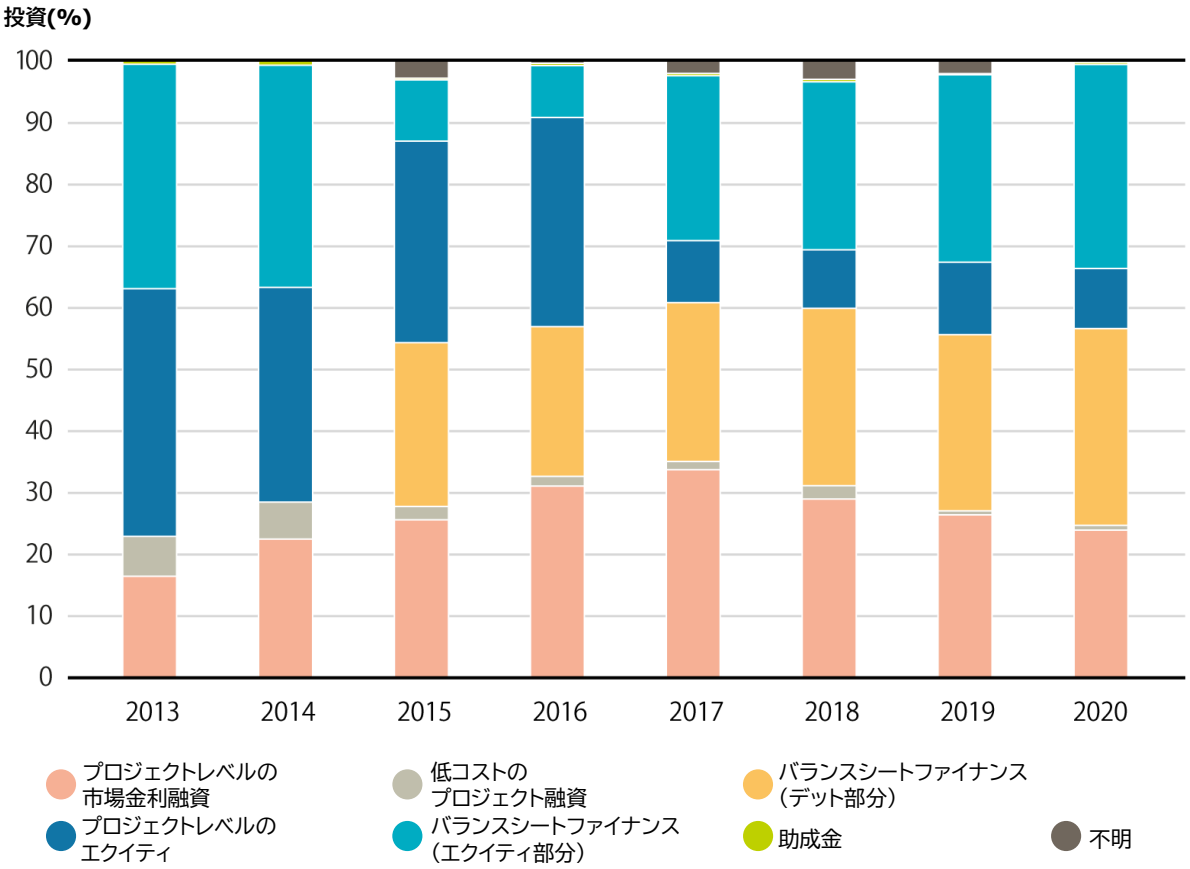
2020 年における再生可能エネルギー事業資金の総額のうち、譲許的資金提供（補助金、低コストのプロジェクト融資）が占める比率はたった 1%であった。乏しい譲許的資金は、政府や多国間、二国間、または国の開発金融機関(DFI)によって提供されることが最も多く、成熟度の低い市場に届くことはない。それは、エネルギー転換も多くの途上国に到達できないということを意味する。

2013～2020 年に再生可能エネルギーに投入された資金のうち、政府が提供した助成金ベースの資金提供が最も多く(55%)、政府と DFI による低コストプロジェクト融資は 93%を占めた。提供先の国名が判明した譲許的資金のうち、68%が低所得国と下位中所得国に向けられていた[原注 15]。助成金と低コスト融資の全体のうち、後発開発途上国に流入するのは 30%である[原注 16]。



原注 15 世界銀行の加盟国所得水準別分類（2021 年）に基づく。
原注 16 国連の後発開発途上国のリストに基づく。

図 3.6　2013～2022 年における世界の再生可能エネルギー投資の資金調達手段別内訳



出典：(IRENA and CPI, 2023).

譲許的資金の提供先としては、地域の中でもラテンアメリカ・カリブ諸国の比率が最も高く(37%)、それ以外の途上国地域にはより均一に分配されている。低コストプロジェクト融資に占める比率もラテンアメリカ・カリブ諸国が最も高く（低コスト融資全体の 43%）、助成金による資金提供を最も多く受けているのはサハラ以南アフリカである（2013～2020 年における助成金の総額の 29%）。このような地域的傾向は、ラテンアメリカでは DFI による低コスト融資の提供が相対的に優勢で、サハラ以南アフリカでは DFI と政府による助成金の提供が優勢であることによって説明できる（ボックス 3.1）。助成金による資金提供は、収益性のある一連のプロジェクトを構築するために不可欠であり、プロジェクトが投資家を呼び込めるレベルの成熟度に達するのを助け、パイロットプロジェクトを実施し、地熱探査掘削や化石燃料プラントの閉鎖といった非営利的な活動の資金調達を支援する。

全ての資金調達手段(譲許的、非譲許的)を地域別にみると、ほとんどの途上国市場では公的資金(特に多国間開発融資)が主流であり、そのためこれらの地域では貸付けの比率が高くなっている。中央アジア諸国のカザフスタン、キルギス、タジキスタン(図 3.7 では「その他アジア」に分類)は、2013～2020 年に貸付けの比率が最も高く(69%)、次いでラテンアメリカ・カリブ諸国とサハラ以南アフリカ(それぞれ 58%)となっている(図 3.7)。一方、欧州と北米では民間資金が主流で、商業金融機関や企業から多額の投資があるため、これらの地域ではエクイティファイナンスが浮上している。

2020 年の投資のうち、3 分の 2 を民間アクターが提供した。商業金融機関や企業が主要な民間資金を供給し、両者を合わせて、2020 年における再生可能エネルギーへの民間資本のほぼ 85%を占めた。2018 年までは、民間投資の大部分は企業によるものだったが(2013～2018 年の平均で 65%)、2019 年と 2020 年には企業の比率は 41%に低下し、商業金融機関の比率がそれを上回った。これは、先に論じたエクイティファイナンスの比率低下と一致している。

図 3.7　2013～2020 年における再生可能エネルギー投資の地域および投資タイプ(デット、エクイティ)別内訳

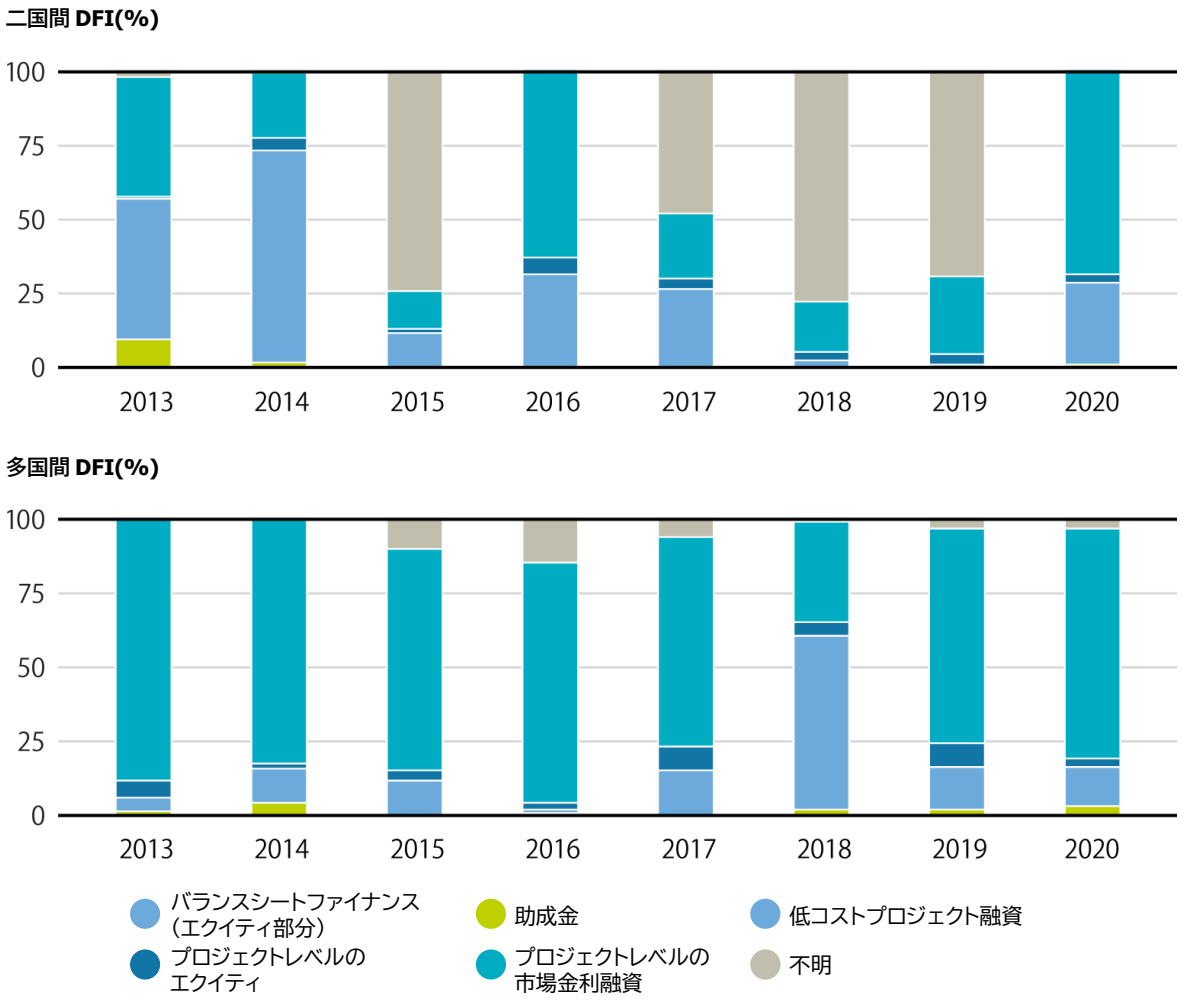


出典：(IRENA and CPI, 2023).

国有金融機関、国の DFI、国有企業は、2020 年における主要な公的資金源であった（80%以上）。多国間 DFI は、公的資金の 9%を提供し、過去の年間拠出額と併せて、公共部門からの国際資金フローの約半分を占めた。二国間 DFI による 2020 年の拠出額は、2019 年と比べて 70%減少した。つまり、2020 年における再生可能エネルギー投資総額のうち、多国間および二国間 DFI が提供したのは 3%未満ということになる。

今後、多国間および二国間 DFI は、より多くの資金を、より良い条件で、大規模なエネルギー転換プロジェクトに向ける必要がある。2020 年に二国間および多国間 DFI が供給した資金は、主に市場金利でのデットファイナンス（市場で決まる利率の金利とともに返済する必要がある）として提供されたが、助成金と譲許的融資は再生可能エネルギー投資総額のわずか 1%だった（図 3.8）。これらの制度は、世界のエネルギー転換を加速することができる大規模かつ国際的なプロジェクトを支援するために、特に有効である。

図 3.8 2013～2020 年に DFI が助成金および低コスト融資として提供した資金



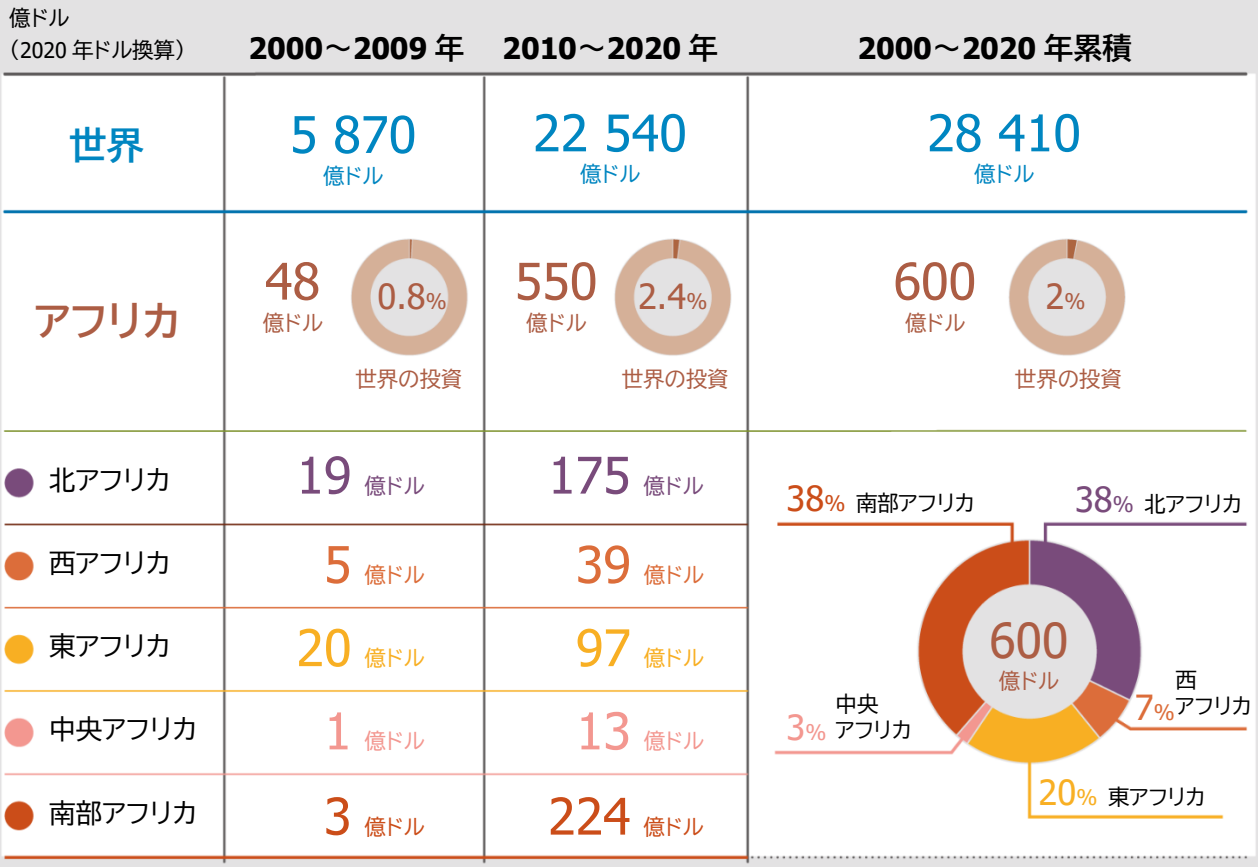
出典：(IRENA and CPI, 2023).

注：DFI = 開発金融機関

ボックス 3.1　地域別および資金源別のアフリカへの再生可能エネルギー投資

IRENA の報告書"*Renewable energy market analysis: Africa and its regions*"(IRENA and AfDB, 2022)では、アフリカにおける資金調達の概観が分析されている。アフリカ大陸には莫大なポテンシャルとニーズがあるにもかかわらず、2000～2020 年に世界で再生可能エネルギーに投じられた 2 兆 8,000 億ドルのうち、アフリカに向けられたのはわずか 2%、金額にして 600 億ドルに過ぎない(大規模水力発電を除く)(図 3.9)。また、2010～2020 年になされた投資の 4 分の 3 は、南アフリカ、モロッコ、エジプト、ケニアの 4 か国のみが獲得した。これらの国々は、その政策環境や制度環境、規制、資金アクセス、市場の特徴(規模、有望性、安定性など)のお陰で、リスク･リターン特性が比較的良好である。

図 3.9　2000～2020 年におけるアフリカと世界の再生可能エネルギー投資の累積額



出典：(IRENA and AfDB, 2022)



北アフリカは、2000～2020 年におけるアフリカ大陸への再生可能エネルギー投資で、南部アフリカに次いで 2 番目に多くの投資を受けている。資金の大部分がモロッコ(47%)とエジプト(45%)に向けられ、主に太陽光発電(57%)と陸上風力発電(22%)に投入されている。北アフリカ地域では、民間部門の参画がアフリカの他の地域よりも活発であることが利点となっている。2020 年には、北アフリカにおける全ての再生可能エネルギー資金のうち民間アクターが提供したものは 65%を占め、2013 年の 11%から大幅に増加した。

それとは対照的に、サハラ以南アフリカは公的資金に依存している。東アフリカは、過去 20 年間におけるアフリカ大陸への投資の 5 分の 1 を占めており、2013～2020 年の投資全体のうち 57%を公的資金源が占め、その大部分が二国間および多国間 DFI (51%)によるものである。西アフリカは、アフリカ大陸への投資のほんの 7%を得るに留まり、投資の 61%を公的資金源が占め、そのうちの約半分を二国間および多国間 DFI が担っている。当地域への再生可能エネルギー投資総額の半分が、ナイジェリア(29%)とセネガル(21%)の 2 か国のみに向けられている。技術面では、投資の対象は、主に太陽光発電(55%)および陸上風力発電(13%)プロジェクトである。最後に、中央アフリカは、緊急にエネルギーアクセスを拡大する必要があるにもかかわらず、アフリカ大陸のどの地域よりも投資額が少ない。資金の約 56%が公的資金源によるものだが、民間からの目立った投資を呼び込むことができる国もあり、具体的に言えばアンゴラ(57%)とチャド(79%)である。

2000～2020年に世界で
再生可能エネルギーに
費やされた2.8兆ドルのうち、
アフリカが受け取ったのはわずか2%



3.4 公正かつ包摂的なエネルギー転換のために公的資金と政策が果たす役割

民間投資は、2013～2020 年における投資総額の約 75%を占め、主に先進国に向けられている。成熟技術／用途と特定市場への偏った投資の流れは、民間資本の主流の重要な特徴を表している。低リスク投資を好み、社会面、環境面、気候面の向上よりも財務的リターンを優先するということである。そのため、民間資本は、実際のまたは認識上のリスクがより低い国か、リスク削減ファシリティが提供されている場合のみフロンティア市場に流れ込む。その一方で、最貧国は十分な投資が得られないままとなっている(IRENA and CPI, 2023)。

よりリスクの高い環境に資本が流入する場合、一般的にはそれに伴うコストもはるかに高い。つまり、最も所得の低い人々が、しばしば基本的なエネルギー、すなわち貧困緩和と社会経済的進歩のために不可欠であると普遍的に認められるエネルギーに、最も高い費用を支払うということである。したがって、格差を拡大し続ける民間資本への依存度がより低い公的資金がより大きな役割を果たす必要がある。

しかし、公的資金には限りがあるため、各国政府はリスク削減プロジェクトで利用可能なものに重点を置き、それらのリスク・リターン特性を改善して民間資本を呼び込もうとしている。再生可能エネルギープロジェクトの債務返済能力に関連するリスクを低くするため、リスク削減ソリューションが用いられる。そのようなリスクは、政府の行動(政治面、規制面、政策面)、マクロ経済条件(通貨リスクなど)、オフテイカーの信用度、不可抗力、その他の事象に関する不確実性から生じている。

リスク削減手段の中でも、「すべてに通用する」ソリューションを求める貸し手の間で、公的保証を選好する動きが浮上している。しかし、そのような保証は、規制当局、信用格付け会社、国際機関(国際通貨基金など)によって偶発債務として扱われ、当該国が重要なインフラ開発やその他の投資のために追加借入れを行う能力を損なう恐れがある。さらに、新興国では、COVID-19 パンデミックに続く高いインフレ率や通貨の変動または切り下げに対処するために、公的債務にはすでに限界までストレスがかかっている。このようなマクロ経済環境において、多くの国々は国際金融市場で安価な資本へのアクセス、あるいはリスク削減手段として公的保証の提供ができなくなっている。



エネルギー転換のペースを速め、地理的範囲を拡大し、社会経済的開発目標を実現するポテンシャルを十分に引き出すことが緊急に必要とされることから、十分な投資を受けていない国々がエネルギー転換の長期的便益を享受し、財政的に制約された経済がさらに不利な状況に陥ることがないようにするために、より革新的な手段が必要である。

また、より包括的な方法でリスクを定義する必要がある。投資家へのリターンという視点のみに立って、エネルギー設備が利益をもたらさないリスクにばかり目を向けるのではなく、視野を広げ、環境、地球、社会へのリスクを含める必要がある。これには、大勢の人たちがエネルギー転換から取り残され、低開発状態から抜け出せなくなるリスク、持続可能な開発目標を達成できないリスクなどがある。

投資リスクは、政府や国際社会の視点から検討しなければならない。それに沿って公共政策や公的資金提供を策定し、社会面、経済面、環境面の負の外部性という形で現れる市場の失敗を是正するために個別の介入を行う必要がある。さらに、このアプローチによって、より幅広い公共目標や社会目標に民間のインセンティブを整合させることができる。

開発途上国で利用可能な公的資金には限りがあるため、国際社会はいっそうの努力を行う必要がある。

ほとんどの公的投資は国の財源によるもので、国際協力は比較的少ない。2020 年における世界の投資額のうち、二国間および多国間 DFI が提供した資金は合わせて 3%未満である。また、二国間および多国間 DFI による資金は、市場金利でのデットファイナンスとして提供されることがますます多くなっており、その場合は市場で決まる利率の金利とともに返済する必要がある。助成金と譲許的融資は、再生可能エネルギー資金全体のわずか 1%に過ぎない。金利は同じであることから、DFI による資金提供がもたらす唯一の違いは、資金が利用可能になること、ただし、利用者にとってコストが高くなるという点である。つまり、最も所得の低い人々が、再生可能エネルギーに最も高い費用を支払うということである (IRENA and CPI, 2023)。

1.5°Cシナリオを実現し、その社会経済的便益を享受するためには、グローバルノースからグローバルサウスへの資金流入を増やす必要がある

未開拓の膨大なポテンシャルを秘めているが、民間投資を誘致することが難しい地域や国々に、より多くの公的資金を向ける必要がある。しかし、再生可能エネルギー資金(そして、より広義には気候資金)のための公的資金提供は、特に過去 3 年間においては、厳しい状況に置かれている。最近はほとんどの国がマクロ経済的問題や地政学的問題に直面しており、インフレ、サプライチェーンの途絶、食料不足、成長の停滞に関心と資金を振り向けざるを得なくなっている。今や、再生可能エネルギー投資は乏しい公共資源を奪い合うという厳しい経済的事情に直面しているのである。

しかし、COVID パンデミック後の復興に関する IRENA の報告書に記される通り、エネルギー転換への投資は、公平で、包摂的で、強靭な経済への道を開くものとなりうる(IRENA, 2020e)。したがって、1.5°C シナリオを実現し、その社会経済的便益を享受するためには、グローバルノースからグローバルサウスへの国際協力と公的資金の流入が不可欠である。このことは、2020～2021 年に厳しい逆風に直面したオフグリッド再生可能エネルギー部門の例が如実に示している。しかし、2020 年の後退にもかかわらず、2021 年の投資額は国際公的金融機関による支援のおかげで過去最高に達した(ボックス 3.2)。

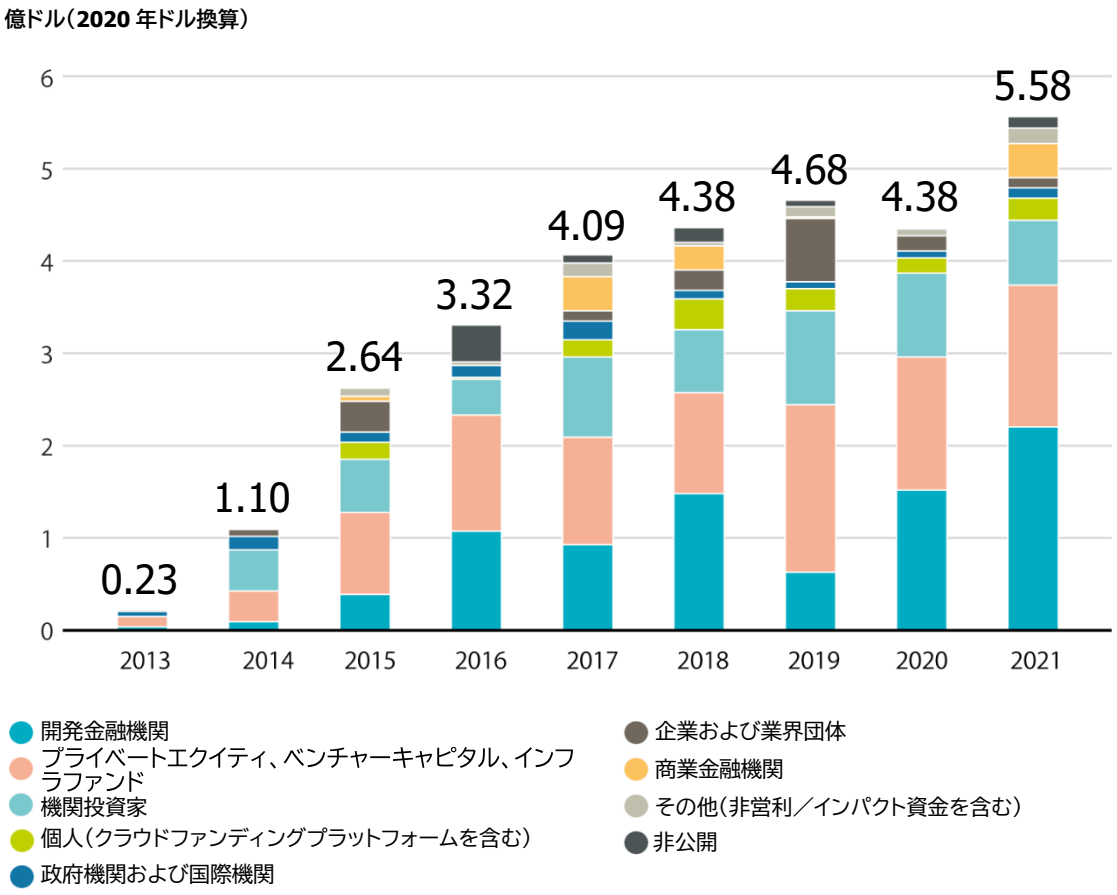


ボックス 3.2　途上国におけるオフグリッド再生可能エネルギー投資

COVID-19 パンデミックとその経済的影響にもかかわらず、オフグリッド再生可能エネルギー部門への投資は拡大を続け、何百万人もの人々に電気をもたらしている。オフグリッド再生可能エネルギーへの年間投資額は、2021 年に過去最高の 5 億 5,800 万ドルに達した(Wood Mackenzie, 2022)(図 3.11 を参照)。最近の増加は、サハラ以南アフリカ、特に東アフリカ、さらに最近では西アフリカへの投資によって牽引されている。また、投資範囲も徐々に拡大し、住居用途を満たすだけでなく、商業用途や工業用途も増えている。

国際公的金融機関による支援は、パンデミックがピークに達した 2020～2021 年には当部門にとって不可欠であった。公的資金の比率は 2015 年の 30%から 2019 年には 44%に上昇し、公的金融機関が投資額全体の 44%に相当する 4,350 億ドルを提供した。開発金融機関はこの資金の多くを投資に注入しており、実際、これらの金融機関の拠出額は、2020 年に始まるパンデミック前の期間に当部門の主流となっていたプライベートエクイティ、ベンチャーキャピタル、インフラファンドによる拠出額を上回った。投資総額の 80%以上が国際資金へと流入しており、オフグリッド部門では公的資金の国際的フローが重要であることを示している。

図 3.10　2013～2021 年におけるオフグリッド再生可能エネルギーへの年間拠出額の世界比率の資金調達手段別内訳



出典：(IRENA and CPI, 2023).

公的資金は、多国間および二国間DFIのような仲介機関を通して、さまざまな手段を用いて流動させなければならない

寄付金や助成金などの政府開発援助、DFI や輸出信用機関による譲許的融資や市場金利融資を通して移転される公的資金は、グローバルサウス、特に後発開発途上国など財政に制約のある国々におけるエネルギー転換の資金調達に不可欠である。また、多国間基金や国連傘下の基金(「緑の気候基金」など)からの資金提供による資金調達もある。二酸化炭素排出枠やカーボンオフセット市場は、資金提供を補足するものとなり得る。

公的資金(国内資金または国際協力による資金)は、仲介機関(政府、多国間および二国間 DFI、「緑の気候基金」や「公正なエネルギー移行パートナーシップ」といった国際基金など)を通じた、さまざまな手段を用いて流動させなければならない。これには、既存または新設の手段があり、次のようなものが考えられる。

- 助成金、購入リベート、補助金などの政府支出。
- 譲許的資金提供や保証などの借入れ。
- エクイティや資産の直接所有(送電線、プロジェクト建設用地など)。
- 税・賦課金、控除、加速償却、電力購入契約のような規制など、財政政策や規制。これは特に、生産者に支払われる料金や電力システム運用コストが、消費者から収受する料金よりも少なく、差額は政府の補助金によって支払われる場合に当てはまる。

このような手段は慎重に用いることが望ましい。便益は公平に分配し、特定の産業に関連する手段に集中しないことが望ましい。



図 3.9 に示したように、公的資金は、IRENA の幅広い政策枠組みのカテゴリーに分類された手段を通して流動する。例として以下のものがある(IRENA and CPI, 2023)。

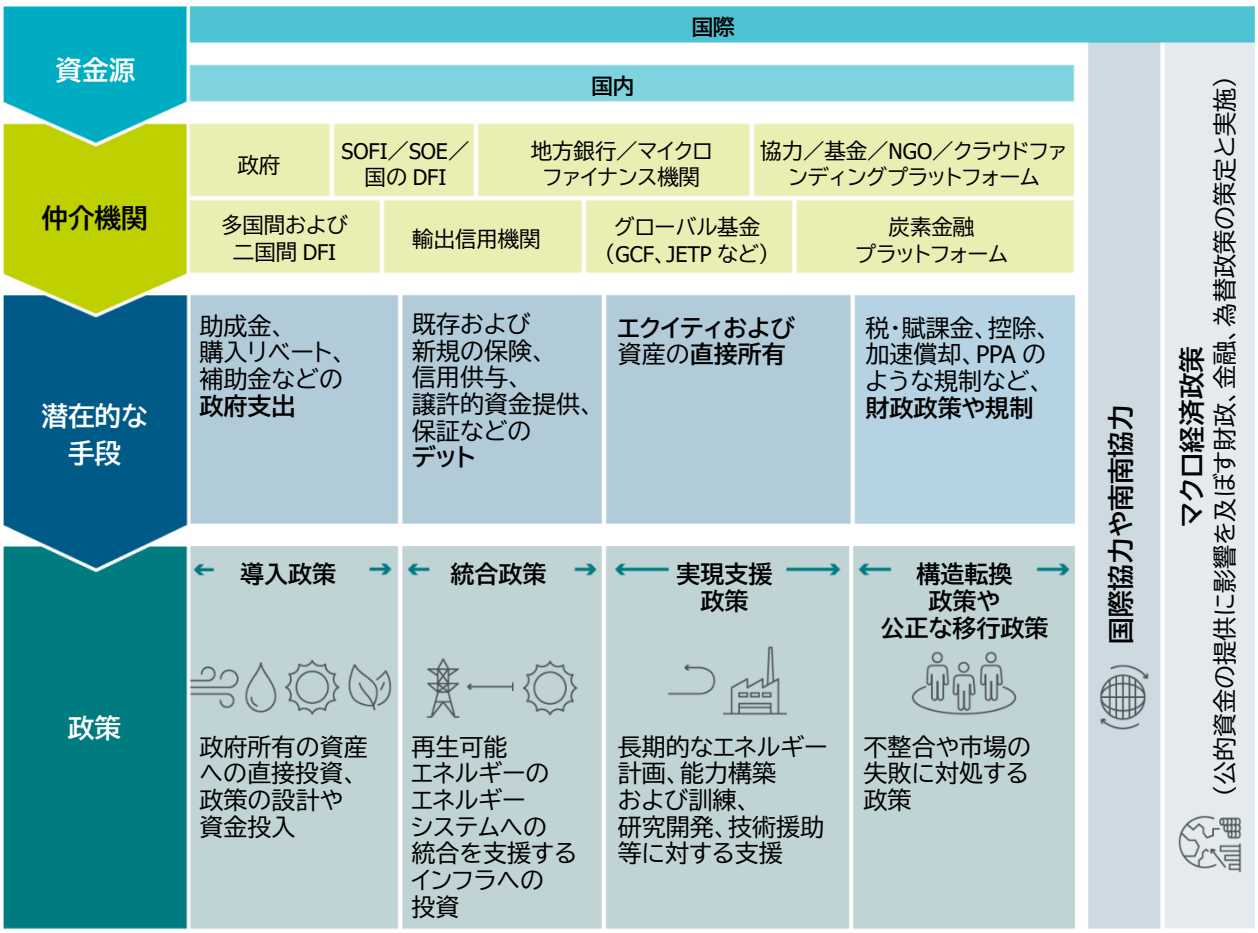
- 導入政策においては、政府所有のエネルギー転換資産や官民パートナーシップへの直接投資として、あるいは民間投資を誘致または支援する政策の設計や資金投入(譲許的資金、資本補助金、助成金、さらには入札、FiT、フィードインプレミアムのような料金制度など)によって、公的資金を流動させることを定める。
- 統合政策においては、再生可能エネルギーをエネルギーシステムに統合するためのインフラや資産(地域送電線や国内送電線、揚水式エネルギー貯蔵施設など)に対し、公的投資によって資金提供する方法を規定する。2030 年に向けて、エネルギー効率化やエネルギー転換実現インフラ(系統拡張、系統柔軟性など)への公的投資が不可欠である(ボックス 3.3)。
- 実現支援政策のもとでは、公的資金によって、長期的なエネルギー計画、能力構築および訓練、研究開発、地域産業とバリューチェーンの発展、さらには多国間開発銀行や IRENA のような政府間組織を通して提供される技術援助を支援することができる。
- 構造改革政策や公正な移行政策のもとでは、公的資金は、多くの優先事項の中でも、変動性再生可能エネルギーの大量導入をより容易にするための電力市場の再設計、化石燃料の廃止に伴う補償、エネルギー転換によってジェンダー平等や社会的包摂などを促進するための政策に投入することができる。
- グローバルな政策枠組みにおいては、グローバルノースからグローバルサウスへの国際的な資金の流れを構築し確保するための鍵となる、国際協力や南南協力が定義付けられている。
- また、特定部門に直接関係するものではないが、エネルギー転換のための公的資金提供に影響を及ぼすマクロ経済政策(財政、金融、為替政策)がある。

公的投資の流動をさらに強化するためには、政府がより柔軟に支出を選択できるような(財政的余地を与える)政策により多くの関心を向けることが望ましい。グローバル富裕税を通じて気候に関するさらなる協力が実現できれば、この目標に寄与できると考えられる。今後発表される本展望第 2 巻において、IRENA はさらなる投資対象を創出するための政策的な選択肢を多数提案している。富の集中が進んでいるため、わずかな累進的増税でも莫大な利益をもたらすことができる。世界全体の収益が増加すれば、教育、医療、そして公正かつ包摂的なエネルギー転換の実現に対する公的支出が促進される可能性もある。



図 3.10 に示した枠組みの要素の中には、重複するものもある可能性もある。例えば、優遇税制は財政政策またはマクロ経済政策であると同時に導入政策としての役割も果たし、系統インフラへの資金投入は実現支援政策または統合政策でもあり得る。能力構築への資金投入は、実現支援政策の一部であるが、これらの資金は社会開発プログラム、さらには教育政策や社会保護や補償政策などの一環として、構造転換を促すものである。したがって、さまざまな政策や手段の間には複雑な相互関連やフィードバックループが存在する。再生可能エネルギー経済の幅広い構造的作用を理解することによって、エネルギー転換の推進を戦略的な形で実施するために公共政策や資金供給を活用することができる。

図 3.11　公正かつ包摂的なエネルギー転換を促す公的資金の流れ



出典：(IRENA and CPI, 2023)

注： DFI = 開発金融機関、GCF = 緑の気候基金、JETP = 公正なエネルギー移行パートナーシップ、NGO = 非政府組織、PPA = 電力購入契約、SOFI = 国有金融機関、SOE = 国有企業

ボックス 3.3　短期投資の優先事項（2030 年まで）

2030 年まで、エネルギー転換技術やインフラへの並行的かつ抜本的な移行に沿って投資を拡大するとともに、排出強度の高いエネルギー源や物理的インフラを固定化して座礁資産リスクを招くような選択肢（天然ガスパイプラインへのさらなる投資など）を避けなければならない。新たなエネルギー転換技術が主流となることを可能にする強靭かつ包摂的な物理的インフラの基盤を築くことが必須である。

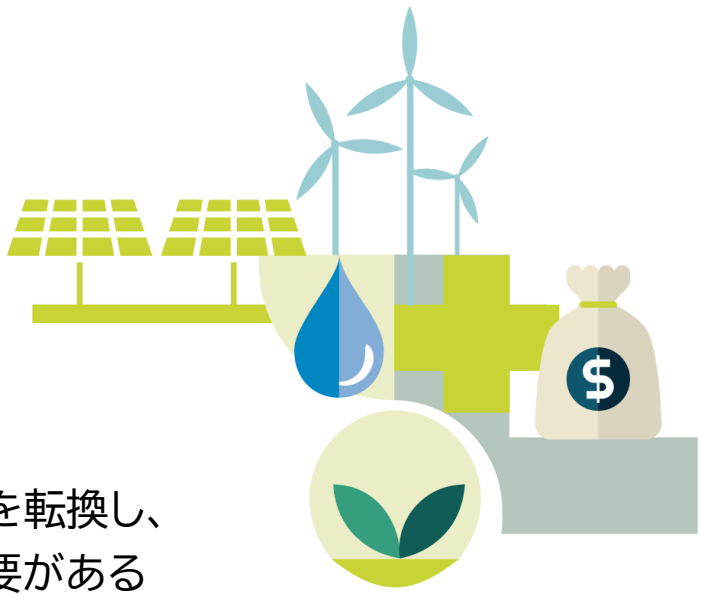
1.5°C シナリオでは、今後 2030 年までの累積投資総額は 45 兆ドルに達し、エネルギー転換技術は投資額の 81%、金額にして 36 兆ドルを占める。現行計画シナリオでは、エネルギー部門における 2030 年までの累積投資総額は 29 兆ドルである。したがって、1.5°C シナリオでは 2030 年までに 16 兆ドルの追加的な累積投資、すなわち年間 2 兆ドルの追加が必要になる。

エネルギー効率化、系統の拡張、柔軟性への投資は必須であるが、化石燃料や関連インフラへの資金投入は、資産の座礁を避けるためだけであるとしても、転換目標に沿ったものであることが望ましい。したがって、1.5°C シナリオでは、2030 年までエネルギー転換投資のために年平均 4 兆 5,000 億ドルの支出が必要である。このような支出は、再生可能エネルギー、エネルギー効率化、低炭素技術に重点を置くものとなり、電力システムや貯蔵施設のような実現支援インフラを含む。

2030 年まで、投資は再生可能エネルギー、インフラ、エネルギー効率化に重点を置く必要がある。これらの技術は低廉で、容易に利用可能で、スケールアップが可能である。2030 年が近づくにつれ、最終消費部門ではエネルギー効率化のために年平均 1 兆 8,000 億ドルの投資が必要となり、次いで再生可能エネルギー発電容量に年間 1 兆 3,000 億ドルが必要となる。再生可能エネルギー拡大のためのインフラについては、電力システムの系統拡張と近代化のために年間 6,000 億ドルの投資が必要になる。最終消費部門の電化には 4,000 億ドル、再生可能エネルギーの直接利用と地域熱供給には 3,000 億ドル、そして水素およびその派生物にはインフラも含めて 1,000 億ドルが必要になる。

また、エネルギー転換に伴い、銅、リチウム、コバルト、ニッケル、レアアース、白金族元素などのクリティカルマテリアルの需要も急増する。再生可能エネルギー技術の導入が成功するか否かは、これらの材料の確実な供給にかかっている。系統設備、ソーラーパネル、電気自動車に不可欠な材料である銅の需要は、2030 年までに倍増すると予想される。同様に、リチウムの需要も 3～6 倍に増加すると考えられる。コバルトの需要も、2030 年までに 2～3 倍になると予想される。さらに、電気自動車のバッテリーや水電解装置に使用されるニッケルも、2030 年までに需要の 2～3 倍増に直面すると予想される。これらの材料は需要の増加が予想されているものの、再使用やリサイクルによって循環経済の中に数十年に亘って留まることができるという点は注目に値する。対照的に、化石燃料経済（石油、石炭、天然ガス）への多額の投資は、初回使用後には無駄になり、温室効果ガス排出という点で経済的負担となる。

需要急増に対応するため、業界は採掘能力と加工能力の両面で多額の投資を行う必要がある。例えば、銅の需要は 2022 年から 2030 年までに年間約 7 Mt のペースで増加し、最近のプロジェクトの平均資本集約度を前提とすると、2030 年までに 1,600 億ドルの投資が必要になると予想される。リチウムについても同様に、エネルギー転換に必要な年間 2.4 Mt を確保するためには、2030 年までに 520 億ドルの投資が必要である。ただし、銅とともにニッケルとコバルトが採れるなど、銅山ではさまざまな種類の鉱物が産出されることが多く、したがってある材料への投資が他の材料の産出につながることも多い点に注目するべきである。2020 年代は採掘や加工への投資が極めて重要であるが、サプライチェーン全般に亘るイノベーションへの投資も必要である。例えば、電気自動車のバッテリーの場合、主な技術課題を克服し、2030 年までにリサイクル能力を 25 倍に拡大するためには、多額の投資が必要になる(WEF, 2019)。



途上国への貸付けを転換し、資本を増加する必要がある

今後、再生可能エネルギーへの公的投資は、資本を増加する必要がある。同様に、途上国への貸付けも、COP27 で発足した「損失と損害」基金のように、例えば助成金や譲許的融資などによって転換する必要がある。

一方、公的資金と公共政策は、民間資本を呼び込むために引き続き利用することが望ましい。IRENA の投資フォーラムでは、加盟国が民間資本によってプロジェクトの資金を調達するための支援を行っている（ボックス 3.4）。同時に、銀行や国営石油会社による化石燃料から再生可能エネルギーへの投資先切替えを奨励すること、慈善団体の参加を奨励することなど、リスク削減の目的に留まらない政策や手段が必要である。

最後に、エネルギー転換が好影響をもたらすためには、各国のさまざまな特性や初期条件を認識した、より公平な資金フローを確保するために、政府や開発パートナーがより積極的な役割を果たす必要がある。

ボックス 3.4　IRENA 投資フォーラム

投資フォーラムは、加盟国のエネルギー転換の資金調達実施を支援する IRENA の戦略を構成する重要な要素である。フォーラムは、準地域的アプローチを通して、エネルギー転換プロジェクトへの投資を促進し、資金調達を促進するために効果的な組織化の枠組みを提供することを目指している。フォーラムには二つの目的がある。第一は、意思決定者に対し、エネルギー転換投資を可能にする強力な支援環境を確立するよう奨励すること、第二は、資金提供者とプロジェクト開発者のエンゲージメントやマッチメーキングを促進し、エネルギー転換プロジェクトに対する国内外の資金提供がパリ協定の目標達成を目指すよう図ることである。それぞれの投資フォーラムは、社会経済的特性や資金調達のエコシステムが類似する国々の地理的グループを対象とする。

第 1 回投資フォーラムは東南アジアにおいて、東南アジア諸国連合の加盟国を対象に、2022 年の G20 議長国であるインドネシア政府（エネルギー鉱物資源省）との協力により開催された。2022 年 8 月 31 日から 9 月 1 日まで、インドネシアのバリにおいて、「エネルギー転換に関する G20 投資フォーラム」が開催された。フォーラムは 2 日間のイベントで、プロジェクトリスクについて詳細に論じるセッションのほか、マッチメーキングのためのパラレルセッションやエネルギー転換に関するハイレベル対話が行われた。本イベントでは、政策立案者、規制当局、開発者、投資家の観点から、投資メカニズム、課題と機会など、エネルギー転換に関連する開発プロジェクトや実施プロジェクトに関する議論が行われた。フォーラムの間に、資金提供者とプロジェクト提案者の間で 29 のマッチメーキングセッションが開催され、21 件のプロジェクトが紹介された。投資フォーラムで紹介された 2 件のプロジェクトが、IRENA の推奨とプロジェクト促進ツールによる支援を受けて資金調達完了に到達することができた。インドネシアのウジュン・バトゥにおける 3 MW のバイオガス発電所と、マレーシアの Jalan Pintasan Bidor（ビドーバイパス）における 30 MW の太陽光発電所である。

第 2 回投資フォーラム“IRENA-Caribbean Cooperation for Fostering Energy Transition Investments and Finance”（エネルギー転換投資・資金調達促進のための IRENA・カリブ海地域協力）会議は、「小島嶼開発途上国(SIDS)ライトハウス・イニシアティブ」を通して、2023 年 5 月 30 日から 6 月 1 日まで、IRENA とバルバドス政府によって共催された。フォーラムでは、17 件のプロジェクトが 15 の資金提供者に紹介された。さらに 2 回の投資フォーラムが、2023 年下半期に開催予定である。一つは西アフリカ諸国を対象とするもので、アフリカ開発銀行との協力により、IRENA とナイジェリア政府によって共催される。フォーラムでは、西アフリカの 15 か国から、政府、資金提供者、プロジェクト開発者、その他のステークホルダーなど、官民両部門の意思決定者を集めて開催し、エネルギー転換投資に重点を置く。二つ目のフォーラムは、ラテンアメリカ諸国のプロジェクトを対象とし、IRENA とウルグアイ政府によって共催される。



参考文献

Abnett, K. (2022), "EU approves 3-billion-euro German green heating scheme", *Reuters*, https://www.reuters.com/markets/commodities/eu-approves-3-billion-euro-german-green-heating- scheme-2022-08-02/ (accessed 3 April 2023).

Amelang, S. and J. Wettengel (2022), "Germany agrees 200-billion euro 'defence shield' against soaring energy prices", *Journalism for the energy transition*, 29 September, https://www.cleanenergywire.org/news/germany-agrees-200-billion-euro-defence-shield-against-soaring-energy-prices (accessed 7 June 2023).

Aposporis, H. (2022), "Launch of works on Alexandroupolis LNG terminal in Greece", *Balkan Green Energy News*, https://balkangreenenergynews.com/launch-of-works-on-alexandroupolis-lng-terminal-in-greece- heralds-reduced-dependence-on-russian-gas-for-the-balkans/ (accessed 4 May 2023).

Arpagaus, C., *et al.* (2018), "High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials", *Energy*, vol. 152, pp. 985–1010, https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166

Battelle Memorial Institute (2021), *Building Energy Codes and Other Mandatory Policies Applied to Existing Buildings*, Battelle Memorial Institute, https://www.iea-ebc.org/Data/Sites/1/media/docs/working-groups/ building-energy-codes/ebc_wg_becs_codesothermandatorypolicies-existingbuildings_june_2021.pdf

Bloomberg (2022), "Germany's Floating LNG Terminal Budget Balloons to €9.7 Billion – Bloomberg", https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-12-09/germany-s-floating-lng-terminal-budget- balloons-to-9-7-billion?leadSource=uverify%20wall (accessed 4 May 2023).

BNEF (2022), "EVO Report 2022", Bloomberg New Energy Finance, https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/ (accessed 14 December 2022).

BNEF (2023a), *Energy Transition Investment Trends 2023*, Bloomberg New Energy Finance, https://about.bnef.com/energy-transition-investment/

BNEF (2023b), "Energy Transition Investment database", Bloomberg New Energy Finance, https://www.bnef.com/interactive-datasets/2d5d59acd9000005 (accessed 14 January 2023).

BNEF (2023c), "Renewable Energy Transactions database", Bloomberg New Energy Finance, www.bnef.com

C40 (2021), "How to encourage residents and businesses to install building-scale clean energy", https://www.c40knowledgehub.org/s/article/How-to-encourage-residents-and-businesses-to-install-building-scale-clean-energy?language=en_US (accessed 3 April 2023).

C40 (2023), "Net Zero Carbon Buildings Accelerator", *C40 Cities*, https://www.c40.org/accelerators/net-zero-carbon-buildings/ (accessed 3 April 2023).

China Steel (2022), "500 million yuan, 3 years, interest rate 2.68! Baosteel Co., Ltd. issues low-carbon transformation green bonds for Zhansteel hydrogen metallurgy" [in Chinese], http://www.csteelnews.com/qypd/qydt/202205/t20220526_63288.html (accessed 3 May 2023).

City of Vancouver (2016), *Zero Emissions Buildings Plan*, City of Vancouver, https://vancouver.ca/files/cov/zero-emissions-building-plan.pdf (accessed 3 April 2023).

CLASP (2023), "*World's Best MEPS: Identifying Top Energy Efficiency Standards for Priority Appliances"*, https://www.clasp.ngo/research/all/worlds-best-meps/

Climate Watch (2022), "Pathways", https://www.climatewatchdata.org/pathways/models?category=10&currentLocation=267&indicator=388&model=3&scenario=182%2C181%2C180%2C183&subcategory=36#models-scenarios-indicators (accessed 9 December 2022).

DEFRA (2022), "Selling coal for domestic use in England", GOV.UK, https://www.gov.uk/guidance/selling-coal-for-domestic-use-in-england (accessed 2 April 2023).

Do, T. N., *et al.* (2021), "Vietnam's solar and wind power success: Policy implications for the other ASEAN countries", *Energy for Sustainable Development*, vol. 65, pp. 1–11, https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.09.002

DRYFICIENCY (2016), "DRYFICIENCY project", https://dryficiency.eu/ (accessed 14 September 2022).

EHPA (2022), "REPowerEU: heat pump strategy required to help sector deliver", *European Heat Pump Association*, https://www.ehpa.org/2022/06/12/ehpa_news/repowereu-heat-pump-strategy-required-to-help-sector-deliver/ (accessed 14 December 2022).

EHPA (2023), *European Heat Pump Association's 2023 Market Report (preview)*, https://www.ehpa.org/press_releases/heat-pump-record-3-million-units-sold-in-2022-contributing-to-repowereu-targets/#:~:text=The%20European%20heat%20pump%20market,of%2034%25%20in%20annual%20sales.

Ekins, P., *et al.* (2019), *The Circular Economy: What, Why, How and Where*, OECD, Paris, https://www.oecd. org/cfe/regionaldevelopment/Ekins-2019-Circular-Economy-What-Why-How-Where.pdf

Ellen Macarthur Foundation (2021), "Circular economy introduction", https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview (accessed 3 May 2023).

Energy Tracker Asia (2022), "Net-Zero Companies: Vague Pledges Lead to Greenwashing", *Energy Tracker Asia*, https://energytracker.asia/net-zero-companies-vague-pledges-lead-to-greenwashing/ (accessed 20 September 2022).

Esau, I. (2022), "$25 billion African gas pipeline scheme takes step forward", *Upstream Online*, https://www. upstreamonline.com/politics/-25-billion-african-gas-pipeline-scheme-takes-step-forward/2-1-1301893 (accessed 4 May 2023).

European Aluminium (2020), *Circular Aluminium Action Plan: A Strategy for Achieving Aluminium's Full Potential for Circular Economy by 2030*, European Aluminium

European Commission (2021a), "Renovation and decarbonisation of buildings", *European Commission – European Commission*, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6683 (accessed 3 April 2023).

European Commission (2021b), "Proposal for a regulation of the european parliament and of the council on ensuring a level playing field for sustainable air transport", European Commission, https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/refueleu_aviation_-_sustainable_aviation_fuels.pdf

European Commission (2023), "Accelerate the rollout of renewable energy", *European Commission - European Commission*, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_2061 (accessed 12 May 2023).

European Council (2023), "Fit for 55", https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55- the-eu-plan-for-a-green-transition/ (accessed 24 February 2023).

Faaij, A. P. C. (2018), "Securing sustainable resource availability of biomass for energy applications in Europe; review of recent literature", https://www.nri.ac.ir/Portals/0/images/ Technology/biomass/Bioenergy-Europe-EU-Biomass-Resources-Andr%C3%A9-Faaij-Final[1]. pdf?ver=1397-10-01-134642-957

First Post (2021), "State-wise EV subsidies in India: A handy list of incentives and benefits for electric vehicles in each state", *Tech2*, https://www.firstpost.com/tech/auto/state-wise-ev-subsidies-in-india-a-handy-list-of-incentives-and-benefits-for-electric-vehicles-in-each-state-9952771.html (accessed 22 May 2023).

Gangotra, A., *et al.* (2023), "What does 'green' procurement mean? Initiatives and standards for cement and steel.", https://www.wri.org/insights/green-procurement-initiatives (accessed 3 May 2023).

Gardner, T. (2023), "US announces $6 bln in grants to decarbonize heavy industry | Reuters", https://www.reuters.com/business/environment/us-announces-6-bln-grants-decarbonize-heavy- industry-2023-03-08/ (accessed 4 May 2023).

GFEI (2020), *Vehicle efficiency and electrification: A global status report*, Global Fuel Economy Initiative, https://www.globalfueleconomy.org/media/791561/gfei-global-status-report-2020.pdf

Government of China (2022), "Implementation Opinions of the National Development and Reform Commission and Other Departments on Further Improving the Service Guarantee Capabilities of Charging Infrastructure for Electric Vehicles", http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content_5669780.htm (accessed 14 December 2022).

Government of the United Kingdom (2021), *Industrial decarbonisation strategy*, Department for Business, Energy and Industrial Strategy, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/970229/Industrial_Decarbonisation_Strategy_March_2021.pdf

Habibic, A. (2022), "EC greenlights joint control of German LNG Terminal by KfW and Gasunie", *Offshore Energy*, https://www.offshore-energy.biz/ec-greenlights-joint-control-of-german-lng-terminal-by-kfw- and-gasunie/ (accessed 4 May 2023).

HVAC (2022), "The Inflation Reduction Act 'pumps up' heat pumps", *HVAC Solutions*, https://www.hvac.com/resources/inflation-reduction-act-heat-pump-rebates/ (accessed 14 December 2022).

IATA (2021), "Net-Zero Carbon Emissions by 2050", https://www.iata.org/en/pressroom/pressroom-archive/2021-releases/2021-10-04-03/ (accessed 17 May 2023).

ICAO (2022), "States adopt net-zero 2050 global aspirational goal for international flight operations", https://www.icao.int/Newsroom/Pages/States-adopts-netzero-2050-aspirational-goal-for-international- flight-operations.aspx (accessed 17 May 2023).

IDDI (2023), *Industrial deep decarbonisation initiative: Summary of progress and outlook*, Industrial deep decarbonisation initiative, https://www.industrialenergyaccelerator.org/general/summary-of-progress- and-outlook/

IEA (2018), *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*, Paris, https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry

IEA, *et al.* (2021), *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report*, https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/ download-documents/2021_tracking_sdg7_report.pdf

IEA (2022a), *Africa energy outlook 2022*, International Energy Agency, Paris, https://www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2022

IEA (2022b), "Industry – Analysis", IEA, https://www.iea.org/reports/industry (accessed 3 May 2023).

IEA (2022c), *Solar Heat Worldwide - Global Market Development and Trends 2021. Detailed Market Figures 2020*, Solar Heating & Cooling Programme, International Energy Agency, Gleisdorf, https://www.iea-shc. org/solar-heat-worldwide

IEA (2022d), *Buildings*, International Energy Agency, Paris, https://www.iea.org/reports/buildings

IEA (2022e), *Appliances and Equipment*, International Energy Agency, Paris, https://www.iea.org/reports/appliances-and-equipment

IEA (2022f), *World Energy Investment 2022*, https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2022

IEA (2022g), *Energy Efficiency 2022 – Analysis*, https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022 (accessed 14 December 2022).

IEA (2022h), *Global EV Outlook 2022*, International Energy Agency, Paris, https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022

IEA (2023a), *CO_2 Emissions in 2022*, International Energy Agency, Paris, https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022

IEA (2023b), *Fossil Fuels Consumption Subsidies 2022*, International Energy Agency, Paris, https://www.iea.org/reports/fossil-fuels-consumption-subsidies-2022

IEA, *et al.* (2022), *The Breakthrough Agenda Report 2022*, https://www.irena.org/publications/2022/Sep/Breakthrough-Agenda-Report-2022

IEA, *et al.* (2023), *Tracking SDG7: The energy progress report 2023*, International Energy Agency, International Renewable Energy Agency, United Nations Statistics Division, the World Bank and World Health Organization, Geneva, https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/Tracking-SDG7-2023

IMO (2018), "IMO's work to cut GHG emissions from ships", https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx (accessed 17 May 2023).

International Copper Association (2016), *Scoping Study on Intra-ASEAN Value Chain Cooperation and Trade in Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies*, International Copper Association.

IPCC (2022a), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Intergovernmental Panel on Climate Change, DOI: 10.1017/9781009157926.001

IPCC (2022b), C*limate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability-Summary for policymakers*, Intergovernmental Panel on Climate Change, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf 【日本語訳】気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第 6 次評価報告書第 2 作業部会(WG2)報告書 政策決定者向け要約(SPM), 環境省, https://www.env.go.jp/content/000138044.pdf

IPCC (2023), *AR6 Synthesis Report Climate Change 2023*, https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

IRENA (2014), "Global Bioenergy Supply and Demand Projections: A working paper for REmap 2030", https://www.irena.org/publications/2014/Sep/Global-Bioenergy-Supply-and-Demand-Projections-A- working-paper-for-REmap-2030

IRENA (2016a), *Renewable Energy Benefits: Measuring the Economics*, International Renewable Energy Agency (IRENA) and Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Abu Dhabi, /publications/2016/Jan/ Renewable-Energy-Benefits-Measuring-the-Economics (accessed 6 April 2018).

IRENA (2016b), *Unlocking renewable energy investment: The role of risk mitigation and structured finance*, 2016, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/publications/2016/Jun/ Unlocking-Renewable-Energy-Investment-The-role-of-risk-mitigation-and-structured-finance

IRENA (2018a), *Power System Flexibility for the Energy Transition. Part II, IRENA FlexTool Methodology*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, UAE, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_2_2018.pdf?la=en&hash=B7028E2E169CF239269EC9695D53276E084A29AE

IRENA (2018b), *Power System Flexibility for the Energy Transition. Part I: Overview for Policy Makers*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_1_2018.pdf

IRENA (2020a), *Global renewables outlook: Energy transformation 2050*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020

IRENA (2020b), *Digital Story: Innovation – A game changer for power system flexibility*, https://www.irena. org/Digital-content/Digital-Story/2020/Jul/Innovation-A-Game-Changer-for-Power-System-Flexibility

IRENA (2020c), *Reaching zero with renewables: Eliminating CO_2 emissions from industry and transport in line with the 1.5°C climate goal*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/IRENA_Reaching_Zero_with_Renewables_Preview_2020.pdf

IRENA (2020d), *Innovation outlook: Thermal energy storage*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage (accessed 29 March 2021).

IRENA (2020e), *The post-COVID recovery: An agenda for resilience, development and equality*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/publications/2020/Jun/Post-COVID-Recovery

IRENA (2021a), *World energy transitions outlook: 1.5°C pathway*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook

IRENA (2021b), *Renewable energy policies for cities: Transport*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/publications/2021/May/Policies-for-Cities-Transport

IRENA (2022a), *World energy transitions outlook 2022: 1.5°C pathway*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/publications/2022/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2022

IRENA (2022b), *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I - Trade outlook for 2050 and way forward*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/Publications/2022/Jul/ Global-Hydrogen-Trade-Outlook

IRENA (2022c), *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part II - Technology review of hydrogen carriers*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/ Publications/2022/Apr/Global-hydrogen-trade-Part-II

IRENA (2022d), *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part III - Green hydrogen cost and potential*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/Publications/2022/ May/Global-hydrogen-trade-Cost

IRENA (2022e), *Renewable energy targets in 2022: A guide to design, International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi, www.irena.org/Publications/2022/Nov/Renewable-energy-targets-in-2022

IRENA (2022f), *RE-organising power systems for the transition*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jun/IRENA_Organising_ Power_Systems_2022.pdf

IRENA (2022g), *Green hydrogen for industry: A guide to policy making*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Green_ Hydrogen_Industry_2022_.pdf

IRENA (2022h), *Decarbonising end-use sectors: Green hydrogen certification*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/publications/2022/Mar/The-Green-Hydrogen-Certification-Brief

IRENA (2022i), "Accelerating hydrogen deployment in the G7: Recommendations for the Hydrogen Action Pact", International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://irena.org/Publications/2022/Nov/ Accelerating-hydrogen-deployment-in-the-G7

IRENA (2022j), *Bioenergy for the energy transition: Ensuring sustainability and overcoming barriers*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/publications/2022/Aug/Bioenergy- for-the-Transition

IRENA (2022k), *Renewable solutions in end-uses: Heat pump costs and markets*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/Publications/2022/Nov/Renewable-solutions-in-end-uses- Heat-pump-costs-and-markets

IRENA (2022l), *Renewable energy roadmap for Central America: Towards a regional energy transition*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/publications/2022/Mar/Renewable- Energy-Roadmap-for-Central-America (accessed 16 December 2022).

IRENA (2022m), *Renewable energy outlook for ASEAN: Towards a regional energy transition (2nd Edition)*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/publications/2022/Sep/Renewable- Energy-Outlook-for-ASEAN-2nd-edition (accessed 16 December 2022).

IRENA (2023a), *Renewable capacity statistics 2023*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023

IRENA (2023b), *The cost of financing for renewable power*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/Publications/2023/May/The-cost-of-financing-for-renewable-power

IRENA (2023c), *Creating a global hydrogen market: Certification to enable trade*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/Publications/2023/Jan/Creating-a-global-hydrogen-market- Certification-to-enable-trade

IRENA (2023d), *Long-term energy scenarios and low-emission development strategies: Stocktaking and alignment*, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, https://www.irena.org/ Publications/2023/Jan/LTES-and-low-emission-development-strategies-Stocktaking-and-alignment

IRENA (forthcoming [a]), *Innovation landscape for smart electrification: Decarbonising end-use sectors with renewable power*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (forthcoming [b]), *End-of-life management of solar PV and storage batteries and the circular economy*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (forthcoming [c]), *Renewable energy policies for the energy transition of transport*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (forthcoming [d]), *Critical materials for the energy transition: EV batteries, International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi.

IRENA and AfDB (2022), *Renewable energy market analysis: Africa and its regions*, International Renewable Energy Agency and African Development Bank, Abu Dhabi and Abidjan, https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Renewable-Energy-Market-Analysis-Africa

IRENA and Aalborg University (2021), *Integrating low-temperature renewables in district energy systems: Guidelines for policy makers*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/publications/2021/March/Integrating-low-temperature-renewables-in-district-energy-systems

IRENA and GIZ (2018), *Turning the urban rail system green: New Delhi*, India, International Renewable Energy Agency and Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, Abu Dhabi, https:// www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Dec/IRENA_Cities_2018d_New-Delhi.pdf?la=en&hash=3AFEEC1C114171E22A1C21D8883F40525B56859A

IRENA and GWEC (forthcoming), *Enabling frameworks for offshore wind scaleup: Innovation in permitting*, Brief, International Renewable Energy Agency and Global Wind Energy Council, Abu Dhabi and Brussels.

IRENA, and CPI (2023), *Global landscape of renewable energy finance 2023*, International Renewable Energy Agency and Climate Policy Initiative, Abu Dhabi, www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global- landscape-of-renewable-energy-finance-2023

IRENA, *et al.* (2020), *Renewable energy policies in a time of transition: Heating and cooling*, International Renewable Energy Agency (IRENA), International Energy Agency (IEA) and Renewable Energy Policy network for the 21st century (REN21), Abu Dhabi, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_IEA_REN21_Policies_Heating_Cooling_2020.pdf

Jaghory, D. (2022), "Chinese Cleantech: 2022 Marks Year of Transition for Wind and Solar Policy", https://www.globalxetfs.com/chinese-cleantech-2022-marks-year-of-transition-for-wind-and-solar-policy/#:~:text=The%20FIT%20for%20offshore%20wind,be%20a%20year%20of%20transition

Jewkes, S. (2022), "Italy eyeing two floating LNG plants to cut Russia gas reliance", Reuters, https://www.reuters.com/business/energy/italy-eying-two-floating-lng-plants-cut-russia-gas-reliance- sources-2022-03-22/ (accessed 4 May 2023).

Karres, D. (2023), "Supply with LNG", *KfW Stories*, https://www.kfw.de/stories/energy_security_film.html (accessed 4 May 2023).

Kurmayer, N. (2022), "Twice as expensive: The high cost of Germany's floating LNG terminals", www. euractiv.com, https://www.euractiv.com/section/energy/news/twice-as-expensive-the-high-cost-of- germanys-floating-lng-terminals/ (accessed 4 May 2023).

Landini, F. (2022), "Snam to invest 3.7 bln euros in Italy's gas network", Reuters, https://www.reuters.com/business/energy/snam-confirms-2022-guidance-aims-boost-italys-gas-storage-2022-11-10/ (accessed 4 May 2023).

Leadit (2023), "Green Steel Tracker", *Leadership Group for Industry Transition*, https://www.industrytransition.org/green-steel-tracker/ (accessed 4 May 2023).

Lyons, M., *et al.* (2021), *Reaching zero with renewables: Capturing carbon*, Technical Report, No. 4/2021, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/ Technical-Papers/IRENA_Capturing_Carbon_2021.pdf (accessed 14 December 2021).

Maldonado, S. (2023), "The Future of Gas Stoves in New York: What to Know Ahead of a Ban", *The City*, https://www.thecity.nyc/2023/1/13/23554476/future-gas-stoves-ban-new-york-what-to-know (accessed 2 April 2023).

Mawhood B., P. Bolton and I. Stewart (2022), "Energy Bills Support Scheme: Government policy and FAQs", https://commonslibrary.parliament.uk/research-briefings/cbp-9461/

MCE (2019), *Norway's National Plan related to the Decision of the EEA Joint Committee*, Norwegian Ministry of Climate and Environment.

Meinshausen, M., *et al.* (2022), "NDC factsheets 8th Nov 2022", https://www.climate-resource.com/tools/ndcs

MoPNG (2018), "National Policy on Biofuels – 2018", https://mopng.gov.in/en/page/11

MPP (2022), *Low carbon concrete and construction: A review of green public procurement programme*, Mission Possible Partnership, https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/06/LowCarbonConcreteandConstruction.pdf

Net Zero Tracker (2022), "Net Zero Tracker", https://www.zerotracker.net/

OECD (2022), *Decarbonising Urban Mobility with Land Use and Transport Policies: The Case of Auckland*, OECD Publishing, Paris.

Owen-Burge, C. (2021), "COP26 energizes the shift to clean electric transport", *Climate Champions*, https://climatechampions.unfccc.int/cop26-energizes-the-shift-to-clean-electric-transport/ (accessed 5 May 2023).

Park, S., *et al.* (2022), "Public dialogue as a collaborative planning process for offshore wind energy projects: Implications from a text analysis of a South Korean case", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112949

Parry, I. *et al.* (2021), "Still Not Getting Energy Prices Right: A Global and Country Update of Fossil Fuel Subsidies", International Monetary Fund, https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2021/09/23/ Still-Not-Getting-Energy-Prices-Right-A-Global-and-Country-Update-of-Fossil-Fuel-Subsidies-466004

Rana, F., and Abou Ali, A. (2022), *Renewable energy targets in small island developing states*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/Technical-Papers/Renewable-energy-targets-in-SIDS

REN21 (2022), *Renewables 2022 Global Status Report*, REN21, Paris, https://www.ren21.net/gsr-2022/

Reuters (2022a), "VTTI plans new 5 bcm floating LNG platform in Netherlands by 2024", https://www.naturalgasworld.com/vtti-plans-new-5-bcm-floating-lng-platform-in-netherlands-by-2024-102591 (accessed 4 May 2023).

Reuters (2022b), "Finland to invest 850 million euros to speed up Russian energy exit", https://www.reuters.com/business/energy/finland-invest-850-million-euros-speed-up-russian-energy-exit-2022-04-07/ (accessed 4 May 2023).

SEI (2023), *Green Public Procurement: a key to decarbonizing construction and road transport in the EU*, Stockholm Environment Institute.

Sharma, S. (2022), "India plans to spend $2.5bn on LNG storage infrastructure", https://www.naturalgasworld.com/india-plans-to-spend-2.5bn-on-lng-storage-infrastructure-102281 (accessed 4 May 2023).

SHHURD and SHDRC (2022), "2021 Energy Monitoring and Analysis of Energy Consumption in Government-owned Office Buildings and Large-Scale Public Buildings" [in Chinese], Shanhai Municipal Housing and Urban-Rural Development Commission and Shanghai Development and Reform Commission.

Solar Thermal World (2022), "Superbonus has pushed solar heat in Italy", *Solarthermalworld*, https://solarthermalworld.org/news/superbonus-has-pushed-solar-heat-in-italy/ (accessed 3 April 2023).

Somers, J. (2020), "Deep decarbonisation of industry: The cement sector", European Union, 2020 – JRC120570.

Struna, H. (2022), "How the Ukraine war has impacted the French agrifood sector", www.euractiv.com, https://www.euractiv.com/section/agriculture-food/news/how-the-ukraine-war-has-impacted-the- french-agrifood-sector/ (accessed 12 May 2023).

Sullivan, I. (2022), "France, Spain, Portugal to build hydrogen pipeline by 2030", *ABC News*, https://abcnews.go.com/International/wireStory/france-spain-portugal-build-hydrogen- pipeline-2030-94854264 (accessed 11 January 2023).

Temple, J. (2018), "A new way to make steel could cut 5% of CO_2 emissions at a stroke", *MIT Technology Review*, https://www.technologyreview.com/2018/09/24/2024/this-mit-spinout-could-finally-clean-up- steel-one-of-the-globes-biggest-climate-polluters/

UN (2022), *Global impact of war in Ukraine: Energy crisis*, No. BRIEF NO.3 (p. 29), United Nations, chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://news.un.org/pages/wp-content/ uploads/2022/08/GCRG_3rd-Brief_Aug3_2022_FINAL.pdf?utm_source=UNITED+NATIONS&utm_ medium=BRIEF&utm_campaign=GCRG (accessed 21 December 2022).

UNEP (2018), *A guide for incorporating buildings actions in NDCs*, United Nations Environment Programme, https://globalabc.org/sites/default/files/2020-03/GABC-NDC-GUIDE_ENGLISH.pdf

UNIDO (2019), *Industrial Resource Efficiency Division and Circular Economy*, UNIDO, https://www.unido.org/sites/default/files/files/2020-02/IRE%20and%20CircularEconomy.pdf

US EPA (2023), "Biden-Harris Administration Proposes Strongest-Ever Pollution Standards for Cars and Trucks to Accelerate Transition to a Clean-Transportation Future", News Release, https://www.epa. gov/newsreleases/biden-harris-administration-proposes-strongest-ever-pollution-standards-cars-and (accessed 5 May 2023).

WEF (2019), *A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030: Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation*, World Economic Forum, Geneva, https://www3.weforum.org/docs/WEF_A_Vision_for_a_Sustainable_Battery_Value_Chain_in_2030_Report.pdf

WEF and Accenture (2022), *Net-Zero Industry Tracker 2022 Edition*, World Economic Forum

WindEurope (2022), "EU Energy Ministers adopt emergency measures on permitting", https://windeurope.org/newsroom/news/eu-energy-ministers-adopt-emergency-measures-on-permitting/ (accessed 11 April 2023).

Wood Mackenzie (2022), "Off-grid renewable investment (database)", https://datahub.woodmac.com/app/main#/dashboards/5d3a1511d249d18c0f00175

IRENA
International Renewable Energy Agency



www.irena.org