

# Energy Technology Perspectives 2023

iea

# 国際エネルギー機関 2023 年エネルギー技術の展望 概要

## 概要

訳者注) 重要と思われる部分はアンダーラインを施した。

Covid-19 パンデミックとロシアのウクライナ侵攻により、世界のエネルギーと技術サプライチェーンに大きな混乱が生じている。エネルギーや素材の価格高騰、重要な鉱物、半導体およびその他の部品不足は、エネルギー転換の潜在的な障害となっている。このような背景から、本報告書、エネルギー技術展望 2023 (ETP-2023) では、エネルギー安全保障、レジリエンス、持続可能性の観点で、今後数年間のクリーンエネルギーと技術サプライチェーンの開発とスケールアップを取り巻くリスクと可能性について分析を行った。ETP-2023 は、最新のエネルギー、商品、技術データ、および最近のエネルギー、気候、産業政策の発表に基づき、クリーンエネルギーと技術サプライチェーンに関する重要な問題を探っている:

- ・必要なペースでサプライチェーンを持続的に拡大するための主なボトルネックはどこにあるのか?
- ・クリーンエネルギーへの移行に伴う新たなエネルギー安全保障上の懸念に対応するため、各国政府の産業政策の策定をどのようにするのか?
- ・安全で強靱なサプライチェーン構築が失敗するリスクが最も高いクリーンテクノロジー分野はどこか?
- ・また、より広範な開発目標を達成しつつ、そのようなリスクを軽減するために、政府は何をすればよいか?

「エネルギー技術展望」シリーズは、2006 年以来、エネルギー技術に関連するあらゆる事柄についての重要な考察の源であり、IEA の主要な技術出版物である。ETP-2023 は、不確実性を克服し、エネルギー安全保障を守りながら、新しいエネルギー経済が提供する機会を利用しようとする政府および産業界の意思決定者にとって、不可欠なガイドブックとなるであろう。

## はじめに

世界のエネルギー分野は、化石燃料に依存したのものから、自然エネルギーやその他のクリーンエネルギー技術に依存したものと、今後数十年で大きく変化することが予想されている。太陽光発電、風力発電、電気自動車、水素の電解槽など、さまざまな技術の急速な発展により、新しいグローバルエネルギー経済がますます鮮明になりつつある。この移行は、エネルギーシステムを支える材料や製品を供給する産業にも変化をもたらし、クリーンエネルギー技術製造の時代という新しい産業時代の幕開けを告げている。

国際エネルギー機関(IEA)は、世界のエネルギーシステムの安全性、強靱性、持続可能性を向上させることを専ら行っている。2006年に始まったIEAの技術フラッグシップ・シリーズの最新版である「エネルギー技術展望 2023(ETP-2023)」は、こうした相互にリンクした優先事項が中心になっている。意思決定者が現在進行中の変化を理解し適応しようとする中で、ETP-2023は、現在と将来のクリーンエネルギー技術産業に関する世界初の包括的なグローバルガイドブックとしての役割を果たしている。本報告書は、世界中のクリーンエネルギー技術製造とそのサプライチェーンを詳細に分析し、クリーンエネルギー転換の進展に伴い、それらが今後どのように進化していくかを解説するものである。

アジアからヨーロッパ、北米まで、世界の主要な経済圏は、ネットゼロ移行、エネルギー安全保障の強化、新しいエネルギー経済での競争という重複した目的をもって、クリーンエネルギー技術製造の拡大に向けた取り組みを強化している。そして、現在の世界的なエネルギー危機は、こうした取り組みをさらに加速させている。

これらのトレンドは、世界中の政府、企業、投資家、市民にとって大きな意味を持つ。すべての国は、この新しいエネルギー経済から利益を得、課題を克服する方法を特定する必要がある。本報告書は、クリーン技術製造業の急速な成長により、今後数年間で数千億ドル規模の新市場と数百万人の新規雇用が創出され、各国が発表したエネルギーと気候に関する公約を実行に移すことを想定していることを示している。

同時に、この新しいエネルギー経済における地位を確保するために各国が策定する産業戦略は、こうした変化がもたらす新たな課題を考慮する必要がある。現在、クリーンエネルギーのサプライチェーンにおいて、製造技術とそれに依存する重要な鉱物の両方で、世界中で潜在的に危険なレベルの“集中”が見られるようになってきている。

政策立案者が自国経済に利益をもたらす産業戦略を考案し、プロジェクト開発者や投資家が将来の製造業に関する重要な決定を下す際に、こうした課題があるからこそ、ETP-2023は重要かつタイムリーに貢献することができる。私たちの分析によると、世界のプロジェクトの情報ルートは非常に大規模で、すべてが実現すれば、世界は国際的なエネルギー・気候目標の達成に大きく近づくことができる。しかし、発表されたプロジェクトの大半は、まだ建設中ではなく、間もなく建設が開始される予定のもの

でもない。政府は、開発者や投資家が事業を進めるために必要な目に見える展望と自信を提供できるような、支援的な政策や幅広い産業戦略を提供する役割を担っている。

しかし、本報告書では、迅速かつ安価なエネルギー転換を実現するために不可欠な、クリーンエネルギー技術の公正で開かれた国際貿易の確保の重要性など、各国政府が留意すべき課題も示されている。また、ETP-2023 は、ほとんどの国にとって、クリーンエネルギー技術のサプライチェーンのすべての部分で競争しようとするのは現実的でないことを明らかにしている。鉱物資源、低コストのクリーンエネルギー供給、関連スキルを持つ労働力、既存産業との相乗効果など、各国は自国の強みを発揮する必要がある。また、どの国もサプライチェーンのすべての部分を一度にカバーすることはできないため、国際的な連携が産業戦略上不可欠な要素となる。例えば、戦略的パートナーシップや海外からの直接投資などである。

これらは、ETP-2023 が極めて貴重な知見を提供する重要課題の一部に過ぎない。世界中の意思決定者が、このページに掲載されていることや他の多くの情報を大いに評価するものと確信している。そして、私の同僚であるティムール・ギュルの卓越したリーダーシップの下、IEA のエネルギー技術政策部の優れたチームが、今後何年にもわたって参考資料となる本報告書を作成するために行ったすべての作業に感謝したい。

Dr. Fatih Birol  
Executive Director  
International Energy Agency

## Table of contents

Executive summary.....	20	← 翻訳 (P20~34)
Introduction.....	26	
Purpose of this report.....	26	
Clean energy and technology supply chains.....	27	
Scope and analytical approach.....	29	
Report structure .....	34	
References.....	35	
Chapter 1. Energy supply chains in transition.....	36	
Highlights.....	36	← 翻訳 (P36)
The clean energy transition.....	37	
Implications of net zero for supply chains.....	51	
References.....	76	
Chapter 2. Mapping out clean energy supply chains.....	82	
Highlights.....	82	← 翻訳 (P82)
Assessing vulnerabilities in supply chains.....	83	
Geographic diversity and energy security .....	86	← 翻訳 (P97-98)
Resilience of supply chains.....	119	(FCV 部分)
Supply chain sustainability.....	132	
References.....	139	
Chapter 3. Mining and material production.....	146	
Highlights.....	146	← 翻訳 (P146)
Material needs for net zero emissions.....	147	
Mineral extraction.....	160	
Materials production.....	173	
References.....	203	
Chapter 4. Technology manufacturing and installation.....	210	
Highlights.....	210	← 翻訳 (P210)
Overview .....	211	
Mass manufacturing of clean technologies and components .....	216	← 翻訳 (P232-237)
Installation of large-scale, site-tailored technologies.....	252	(FCV 部分)
References.....	271	
Chapter 5. Enabling infrastructure.....	280	
Highlights.....	280	← 翻訳 (P280)
The role of enabling infrastructure.....	281	

## 全体概要

エネルギーの世界は、新しい産業時代の初期段階、つまりクリーンエネルギー技術製造の時代に突入している。2000 年代初頭(太陽光発電や風力発電など)および 2010 年代(EV やバッテリーなど)には黎明期にあった産業が、今日では広大な製造業として急成長している。これらおよびその他の重要なクリーンエネルギー産業の規模と意義は、今後さらに急速に拡大することが予想されている。世界各国は、ネットゼロの推進、エネルギー安全保障の強化、新たなグローバルエネルギー経済での競争という重複する目的のもと、クリーンエネルギー技術製造の拡大に向けた取り組みを強化している。現在の世界的なエネルギー危機は、世界のクリーンエネルギー移行にとって極めて重要な瞬間であり、今後数年間、さまざまな産業に投資の波が押し寄せてくることが予想される。このような状況において、クリーンエネルギーのための安全で、強靱で、持続可能なサプライチェーンの開発は不可欠である。

すべての国は、新エネルギー経済からどのように利益を得ることができるかを特定し、自国の強みと弱みに応じて産業戦略を定義する必要がある。この 2023 年版のエネルギー技術展望(ETP-2023)は、採掘、リチウム・銅・ニッケル・鉄鋼・セメント・アルミニウム・プラスチックなどの材料の生産、主要技術の製造・設置の分野を網羅し、世界のクリーンエネルギーサプライチェーンの現状を包括的に紹介している。本報告書は、各国がエネルギー、気候、産業の目標を追求する中で、これらの分野が今後数十年の間にどのように発展していくかを描いている。また、クリーンエネルギー技術のための安全で強靱かつ持続可能なサプライチェーンを構築するためのチャンスとニーズを評価し、政策立案者への考察を示している。

## 新エネルギー経済はチャンスとリスクをもたらす

クリーンエネルギーへの移行は、新しい産業や拡大しつつある産業において、成長と雇用に対し大きなチャンスを提供する。世界各国がエネルギーと気候に関する公約を完全に実施した場合、2030 年までに年間約 6,500 億ドル(現在の 3 倍以上)の大量生産に相当するクリーンエネルギー技術のグローバルな市場が存在することになる。クリーンエネルギー関連の製造業の雇用は、現在の 600 万人から 2030 年には 1,400 万人近くに倍増し、その半分以上が電気自動車、太陽光発電、風力発電、ヒートポンプに関連するものになると考えられる。2030 年以降もクリーンエネルギーへの移行が進めば、産業と雇用のさらなる急成長が期待される。

しかし、クリーンエネルギーのサプライチェーンには、製造技術とそれに依存する原料の両方において、潜在的に危険なレベルの“集中”が存在している。現在、中国はほとんどのクリーンエネルギーの製造技術と貿易を支配している。クリーンエネルギーのサプライチェーンに対する中国の投資は、主要な技術のコストを世界的に引き下げるのに役立っており、クリーンエネルギーの移行にさまざまな利益をもたらしている。同時に、グローバルサプライチェーンにおける地理的な“集中”は、政府が対処すべき潜在的な課題も生み出している。風力、バッテリー、電解槽、ソーラーパネル、ヒートポンプなどの大量生

産技術では、3大生産国が各技術の製造能力の少なくとも70%を占めており、そのすべてで中国が支配的である。重要な鉱物資源の採掘の地理的分布は、資源保有量と密接に関連しており、その多くは非常に“集中”している。例えば、コンゴ民主共和国だけで世界のコバルトの70%を生産し、わずか3カ国で世界のリチウム生産の90%以上を占めている。サプライチェーンのどのポイントにおいても“集中”は、個々の国の政策選択、自然災害、技術的失敗、企業的意思決定などの事故に対して、サプライチェーン全体が脆弱になる。

世界は、ひっ迫したサプライチェーンのリスク、つまり、近年のクリーンエネルギー技術の価格が上昇し、各国のクリーンエネルギー移行がより困難でコストのかかるものになっていることをすでに目の当たりにしている。コバルト、リチウム、ニッケルの価格上昇は、史上初のバッテリー価格上昇をもたらし、2022年には世界全体で10%近くも跳ね上がった。また、中国以外の風力タービンのコストも、長年低下していたものの上昇しており、鋼材や銅などの投入資材の価格は、2020年前半と2022年の同時期で約2倍に上昇した。同様の傾向は、太陽光発電のサプライチェーンにも見られる。

## 政府はクリーンエネルギー技術製造の未来を形作るために競争している。

各国は、クリーンエネルギーのサプライチェーンの弾力性と多様性を高めると同時に、巨大な経済的機会を獲得するために競争している。主要な経済国は、気候政策、エネルギー安全保障政策、産業政策を組み合わせる行動している。米国のインフレ抑制法はこのことを明確に示しているが、EUのFit for 55パッケージやREPowerEU計画、日本の「Green Transformation」プログラム、太陽光発電や電池の製造を奨励するインドの生産連動インセンティブ制度、中国の最新の5カ年計画の目標達成やさらにはそれを上回る取り組みなどがある。

クリーンエネルギー産業戦略を正しく行う国には、大きな利益がある。プロジェクト開発者や投資家は、さまざまな市場で競争力を発揮できるような政策に目を向けており、支援的な政策に反応するであろう。太陽光発電の場合、世界で発表された製造プロジェクトのうち、建設中または間もなく建設が始まるものは25%に過ぎず、EV用バッテリーでは約35%、電解槽では10%未満である。中国が最も多く、太陽光発電では全体の25%、電池では45%がすでにこのような先進的な段階にある。欧米では、発表された電池や電解槽の工場のうち、建設中のものは20%未満である。製造設備を稼働させるまでのリードタイムが平均1~3年程度と比較的短いため、投資しやすい環境が整っている国では、プロジェクトが急速に拡大する可能性がある。ある国で発表された製造プロジェクトが、政策や市場動向の変化に応じて、別の場所で実際に開発される可能性もある。

クリーンエネルギーのサプライチェーンを多様化し、強化するために、より大きな努力が必要である。現在発表されている2030年までの製造能力拡大計画のうち、太陽光発電用部品（セルとモジュールが約85%、ウェハーが約90%）、陸上風力発電用部品（ブレードが約85%、筐体とタワーが約90%）、EVバッテリー部品（陽極材が98%、陰極材が93%）は、ほとんど中国が占めている。水素電解槽は例外で、発表されている2030年の製造能力の約4分の1は中国とEUそれぞれに、さらに10%は

米国にある。

## クリーンエネルギーのサプライチェーンは、国際貿易の恩恵を受ける

国際貿易は、迅速かつ安価なクリーンエネルギーへの移行に不可欠だが、各国は供給側の多様性を高める必要がある。太陽光発電では、現在、多くの部品が取引されており、特にウェハーとモジュールが多い。世界需要に占める国際貿易の割合は、太陽光発電モジュールで 60%近くを占め、中国で生産された太陽光発電モジュールの約半分は、主に欧州とアジア太平洋地域に輸出されている。EV も同様で、部品貿易の大半はアジアから欧州に流れ、EV 用電池の約 25%を中国から輸入している。風力発電の部品は重くてかさばるが、タワー、ブレード、筐体の国際貿易は極めて一般的になっている。風力発電の部品製造では、中国が世界の生産能力の 60%を占め、輸出の半分を占めており、そのほとんどが他のアジア諸国やヨーロッパに輸出されている。風力発電の最大市場の一つである米国では、ブレードとハブの国内生産比率は 25%以下である。ヒートポンプについては、世界の製造業に占める国際貿易の割合は 10%以下であり、そのほとんどが中国からヨーロッパへの輸出である。

2030 年に向けて発表された製造のプロジェクトは、多くのクリーンエネルギー技術にとって非常に大きなものである。仮に、発表されている製造能力拡大プロジェクトがすべて実現し、すべての国が発表された気候変動に関する公約を実施した場合、中国だけで 2030 年の太陽光発電モジュールの世界市場全体、電解槽の世界市場の 3 分の 1、電気自動車のバッテリーの世界市場の 90%を供給できるようになる。EU で発表されたプロジェクトは、電解槽と EV 用電池は EU の国内需要をすべて賄えるが、太陽光発電と風力は、引き続き技術的に優位な地域からの輸入に大きく依存することになる。米国でも、インフレ抑制法の施行により、さらなる設備増強の可能性が高いが、状況はほぼ同様である。現在、世界で発表されているプロジェクトは、ある技術(太陽光発電、電池、電解槽)では需要を上回り、他の技術(風力発電部品、ヒートポンプ、燃料電池)では大きく不足する。このことにより、需要の不確実性を下げ、投資決定を支援するために、政府による明確で信頼できる導入目標の設定が重要であることが浮き彫りになっている。

## 重要な鉱物には独自の課題がある

クリーンエネルギー技術のサプライチェーンにおいて、重要鉱物の採掘は、資源保有性に依存する唯一のステップである。新規鉱山の採掘には、開発プロジェクト開始から最初の生産まで 10 年以上の長いリードタイムがかかるため、重要鉱物の供給がクリーン技術製造の主なボトルネックとなるリスクが高まる。さらに、今日の生産は地政学的に集中しているため、供給の安定性にリスクがあり、国際的な協力と戦略的パートナーシップは極めて重要である。新しい採掘能力を開発する企業は、サプライチェーンのさらに下流のクリーンエネルギー技術が、やがてうまくスケールアップされることを確信する必要があるため、将来の普及に関する明確な政策シグナルが、この分野への投資リスクを軽減するために特に重要である。

重要な鉱物の加工・精製を目的としたプロジェクトの多くは、中国に設置されることが発表されている。これらの中流工程は、エネルギー集約型になる傾向がある。中国は、2030 年までの銅の追加生産能力の 80%を占め、電池に使われる主要金属の精製能力の発表の大部分を占めている(コバルトは 95%、リチウムとニッケルは約 60%)。現在、世界中で計画されている鉱物処理能力の拡大は、クリーンエネルギー技術の急速な展開に必要な量にははるかに及ばない。太陽光発電のサプライチェーンに使用されるポリシリコンは、2030 年までに生産能力の余剰が予想される唯一の分野である。

重要な鉱物の供給におけるリスクを軽減するためには、国際的な生産者と消費者の関係を多様化した新しいネットワークが必要である。これらは、鉱物資源だけでなく、その生産と加工に関する環境、社会、ガバナンスの基準にも基づいている。このような新しいパートナーシップは、特に発展途上国の資源豊富な生産者に、一次生産を超える機会を提供する方法でバランスをとる必要がある。しかし、鉱物の安全保障を支える包括的な政策には、特にリサイクルプログラムや技術革新への支援など、需要側への配慮が必要である。

## 各国のクリーンエネルギー産業戦略には、その国の強みと弱みを反映させる必要がある。

ほとんどの国にとって、関連するクリーンエネルギー技術のサプライチェーンのすべての部分で効果のある競争を繰り広げることは現実的ではない。そうする必要はない。特定の競争力は、低コストの再生可能エネルギーへのアクセス性や鉱物資源の存在など、固有の地理的優位性から生じることが多く、エネルギーや素材製品の生産コストを下げることにつながる。しかし、それらは、国内市場の大きさ、高い技能を持つ労働力、既存産業との相乗効果や波及効果など、他の属性から生まれることもある。こうした競争優位性の総合的評価・育成は、国際ルールに従って設計され、戦略的パートナーシップによって補完され、各国政府の産業戦略の中心的な柱となるべきである。

エネルギーコストは、今後も各国のエネルギー多消費型産業部門の競争力を左右する大きな差別化要因になると思われる。今日の産業競争力は、エネルギーコスト、特に天然ガスと電力に密接に関連しており、地域によって大きく異なる。このことは、クリーンエネルギー移行期においても変わりはない。例えば、再生可能な電力から得られる水素の製造コストは、中国や米国では、日本や西ヨーロッパ(5~7 ドル/kg)よりもはるかに低く、アンモニアや鉄鋼などの派生商品の製造コストにも同様の差が生じる可能性がある。各国が気候変動に関する公約を達成し、再生可能エネルギーのコストが下がり続け、電気分解槽のコストが急速に低下するにつれて、地域間のコスト差は多少縮小すると思われるが、競争力の差は残るであろう。サプライチェーンのどの部分を国内特化し、どの部分で戦略的パートナーシップを構築するか、あるいは第三国に直接投資するかを慎重に検討することが、各国の産業戦略における重要な検討事項である。

新しいインフラは、すべての国で新しいエネルギー経済のバックボーンを形成する。電気、水素、CO2 などの輸送、送電、流通、貯蔵などの分野がこれにあたる。クリーンエネルギーのインフラ構築には 10

年以上かかることもあり、一般的には大規模な土木プロジェクトが含まれ、地域の計画や環境規制を遵守する必要がある。建設はほとんどの場合、平均 2~4 年かかる比較的効率的なプロセスであるが、計画や許認可は遅れの原因となり、ボトルネックとなることがある。このプロセスは、管轄やインフラの種類によって 2~7 年かかる。インフラプロジェクトのリードタイムは、通常、それに接続する発電所や産業施設よりもはるかに長い。

## 新しいエネルギー経済のストーリーはまだ書かれていないーサプライチェーンがその中心である

クリーンエネルギー技術製造のための産業戦略には、気候やエネルギー安全保障の要請と経済的チャンスを密接に調整する、政府全体のアプローチが必要である。これは、国内の競争優位性を特定し育成すること、サプライチェーンの包括的なリスク評価を行うこと、大規模なインフラプロジェクトを含む許認可期間の短縮、サプライチェーンの主要要素に対する投資と融資の準備、将来のニーズを見据えた労働力のスキル開発、初期段階の技術におけるイノベーションの加速を意味する。どの国も出発点の異なり、強みも異なるため、どの国も独自の具体的な戦略を立てる必要がある。そして、どの国も単独で進めることはできない。各国が国内能力を高め、新しいグローバルエネルギー経済における地位を強化するとしても、明日の産業のための強靱な基盤を構築する努力の一環として、国際協力から大きな利益が得られる。

# はじめに

## 本報告書の目的

技術フラッグシップシリーズ報告書である、国際エネルギー機関(IEA)のエネルギー技術展望(ETP)は、2006年以降、エネルギー分野の主要な技術的側面に関する重要な考察を提供している。クリーンエネルギー技術およびイノベーションは、エネルギー安全保障、経済発展、環境の持続可能性という政策目標を達成するために不可欠である。費用対効果の高いエネルギー・環境政策の立案には、これらの技術導入の可能性を明確に理解することが必要である。ETPは、既存、新規、新興のエネルギー技術に関連する機会と課題を評価し、政府やその他の関係者がクリーンで持続可能なエネルギーシステムへの世界的移行を加速させる方法を明らかにすることで、この目標の達成を支援することを目指している。

Covid-19パンデミックとロシア連邦(以下「ロシア」)のウクライナ侵攻は、世界のエネルギーと技術のサプライチェーンを決定的に混乱させ、ガス、石油、石炭の価格高騰や、クリーンエネルギー技術製造に必要な重要鉱物、半導体、その他の材料や部品の不足を招いた。現在の世界的なエネルギー危機は、短期的な経済見通しに脅威を与え、一部のクリーンエネルギー技術の普及を遅らせる恐れがあるが、同時に、自然エネルギー、エネルギー効率、その他のクリーンエネルギー技術への投資を大幅に増やすことにより、化石燃料からの転換を加速させる経済的根拠を強めている。地球上で最近頻発する異常気象は、温室効果ガスの排出を抑制するための抜本的な行動が緊急に必要であることを想起させる。IEAが繰り返し強調しているように、世界はエネルギー危機と気候危機のどちらかに取り組むことを選択する必要はない。クリーンエネルギーへの転換を加速することで得られる社会的・経済的利益は、無策の場合のコストと同じくらい大きなものなのである。

クリーンエネルギー技術製造を行い、低排出ガスエネルギー商品を生産するための安全かつ強靱で持続可能なサプライチェーンは、世界のエネルギー転換の中心となっている。これらのサプライチェーンは、化石燃料の供給ではなく、鉱物や、鉱物から派生するさまざまな材料や部品に大きく依存している。その結果、エネルギー安全保障の検討は、こうした資源や商品へのアクセスに関わることが多くなる。クリーンエネルギーへの移行において重要な役割を果たすバッテリーや低エミッション得られる水素などの新興市場を形成する上で、太陽光発電(PV)などの既存の市場や技術から重要な教訓を得ることができる。

ETPの主な目的は、政府や業界の意思決定者が、今世紀半ばまでに世界がネット・ゼロエミッションを達成するために必要なクリーンエネルギー技術<sup>1</sup>のサプライチェーンを開発・拡大する際の障害を克服できるようにすることである。ETP-2023は、エネルギー安全保障、強靱性、持続可能性の観点から、今後数年間にクリーンエネルギーと技術のサプライチェーンを拡大する際のチャンスとリスクに焦点を当てている。ETP-2023は、主要なクリーンエネルギーと技術のサプライチェーンが現在どのよう

な状況にあるのかを示し、世界がネット・ゼロエミッションの軌道に乗るためにはどれくらいのスピードで拡大する必要があるかを評価する。また、ネット・ゼロの世界に適応する際の脆弱性とリスク、新しいグローバルエネルギー経済を確立するための新たなチャンスも特定する。また、サプライチェーンの安全性、強靭性、持続可能性を高めるために、政府がより効果的な政策や戦略をどのように設計できるかも検証する。

ETP-2023 は、政策立案者やその他のステークホルダーにとっての有用性と関連性の向上を目的とした、本シリーズの 2020 年版を改訂したものである。ETP-2023 は、IEA が現在行っている重要鉱物の分析、電気自動車(EV)バッテリーや太陽光発電の技術サプライチェーンに関する最近の詳細な評価、IEA の広範なクリーンエネルギー技術の追跡・分析活動を活用・更新している。ETP の分析には、IEA 技術連携プログラムの専門知識と、技術データと分析的考察に関しこの作業をサポートする世界中の専門家が提供する調査にも役立っている。

1 クリーンエネルギー技術とは、CO<sub>2</sub> や汚染物質の排出を最小またはゼロにする技術である。本報告書では、クリーンエネルギー技術とは、CO<sub>2</sub> の回収・利用・貯蔵(CCUS)やその他の汚染防止対策を伴わない限り、石炭、石油、天然ガスといった化石燃料の生産や転換を伴わない、低排出量またはゼロに近い技術を指す。

## クリーンエネルギーおよび技術のサプライチェーン

エネルギーや技術のサプライチェーンとは、技術やエネルギーサービスを市場に提供するために必要な一連のステップあるいは段階を指す。天然資源(鉱物など)の採掘、原料や燃料の生産、部品の製造と技術やシステムへの組み込み、技術の設置や運用、運用期間中や寿命が尽きて解体されるときに発生する廃棄物の管理などが含まれる。エネルギー技術とは、エネルギーを生産し、エネルギーサービス(エネルギーの生産、変換、貯蔵、輸送、使用)を提供するために用いられるハードウェア、技術、技能、方法、プロセスの組み合わせからなるものである。

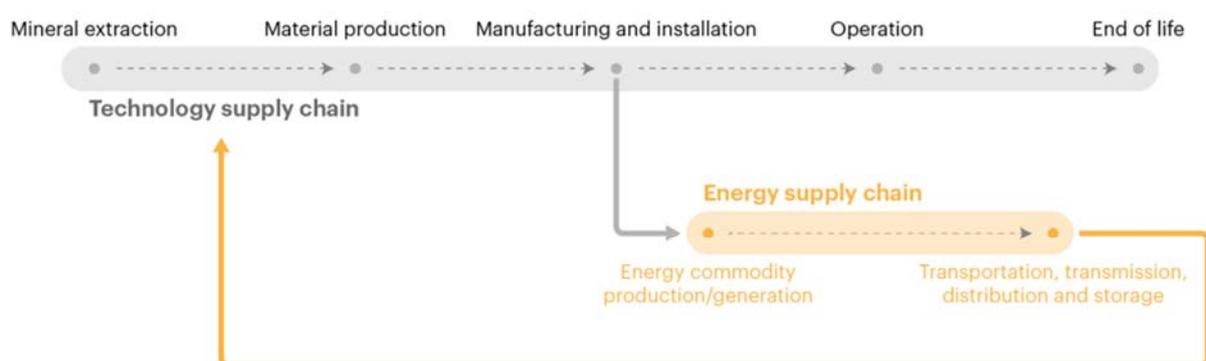
本報告書では、最終的に提供されるサービスに基づき、技術サプライチェーンとエネルギーサプライチェーンを区別している:

- 技術サプライチェーンとは、ある技術を導入するために必要なさまざまな段階を指し、各段階で原料、部品、サービスの投入が行われる。クリーンエネルギー技術の場合、鉱物の採掘、鉱物を利用可能な原料に加工、部品の製造、完成品への組み立て、設備の設置、運用、廃棄、一部の部品の再利用やリサイクルなどが主なステップとなる。これらの技術には、太陽光発電システム(家庭用から大規模まで)や水素を製造する電解槽などの供給側機器と、電気自動車、ヒートポンプ、水素燃料電池車などの最終使用側機器がある。
- エネルギーサプライチェーンとは、燃料や最終的なエネルギーサービスをエンドユーザーに供給するために必要な様々なステップを指し、通常、技術サプライチェーンに沿った、あるいは技術サプライチ

チェーンを横断するエネルギー商品の取引を伴う。発電や燃料転換のほか、輸送、送電、流通、貯蔵などの工程が含まれる。例えば、再生可能な電力(太陽光発電や風力発電など)、低エミッションの水素、合成灯油などの合成炭化水素燃料の供給が挙げられる。

技術サプライチェーンとエネルギーサプライチェーンは相互に関連している。あらゆる形のエネルギーを生産、発生、輸送、貯蔵するには技術が必要であり、その技術は加工され、サービスに投入されるように必要がある。それと並行して、技術サプライチェーンに沿ったさまざまなステップはすべてエネルギーを消費するため、エネルギーサプライチェーンに依存することになる。

Figure I.1 Steps and interdependencies of technology and energy supply chains



IEA. CC BY 4.0.

Energy and technology supply chains are interdependent, as one is unable to operate without the other.

技術コストとエネルギー価格の最近の動向は、2種類のサプライチェーンの相互連関を物語っている。いくつかの主要なクリーンエネルギー技術に不可欠な多くの鉱物や金属の価格は、需要の増加、サプライチェーンの混乱、将来の供給に対する懸念、エネルギー価格の上昇などが重なり、ここ数年で急騰している。例えば、リチウムの価格は2022年初頭からほぼ倍増している(第2章参照)。リチウムイオン電池の製造に不可欠なリチウム、ニッケル、コバルト、マンガンなどの正極材は、電池ギガファクトリーの数が増えなかった過去10年間の半ばでは、電池パックコストの5%未満であったが、現在では20%を超えるシェアに上昇している。

## スコープと分析手法

### サプライチェーンのリスク評価フレームワーク

クリーンエネルギー技術のサプライチェーンに混乱が生じると、気候やエネルギーの目標を達成するためのグローバル能力に大きな影響を与える可能性がある。サプライチェーンの各要素のリスクプロファイルを理解することは、安全性、強靭性、持続可能性を高めるためにどこに努力を傾けるべきかを

明らかにし、潜在的な脆弱性に対処するための政策を策定する上で重要なステップとなる。これらのリスクプロファイルは、国や地域、技術によって大きく異なり、新しい技術や原料の出現や成熟、市場の発展とともに変化していくであろう。

サプライチェーンを安全で、強靱でそして持続可能なものにするには、包括的で協調されたアプローチを通してのみ達成可能である。これは、ネットゼロの経路のニーズを満たすことができ、短期的なショックを吸収、順応、回復し、周期的な原料不足、気候変動や自然災害の影響、その他の潜在的な市場の混乱を含む長期的な供給の変化に適応できるサプライチェーンを開発するための行動をとることを意味する。特に、クリーンエネルギー技術のサプライチェーン自体の排出強度と環境負荷を低減することが急務である。

IEA は、政府と企業の双方がサプライチェーンのリスクと脆弱性を把握するために利用できるリスク評価フレームワークを開発した。これは、2022 年 7 月に発行された「クリーンエネルギー技術のサプライチェーンの確保」(IEA, 2022a)で初めて紹介されたものである。ETP-2023 の目的のために、分析は大幅に拡張され、4 つの特定された潜在的リスク(不十分なスケールアップ速度、および供給の不安定性、柔軟性、持続不可能性)に関連する可能性と影響指標の複合評価に基づき、技術とエネルギーのサプライチェーンのための総合リスク評価の枠組みを提供している。

このフレームワークは、現在のサプライチェーン構造に適用して、短・中期的にどの程度適応・対応できるかを評価するためのものである。本報告書では、グローバルな視点からこのフレームワークを使用しているが、国や地域レベルで適用することも可能である。

## シナリオ分析

本報告書の分析は、IEA の GEC (Global Energy and Climate) モデル (IEA, 2022b) から得られたクリーンエネルギー技術の世界予測に支えられている。このモデルは、エネルギー供給と変換、建物、産業、輸送部門におけるエネルギー利用をカバーする複数の相互リンクしたモデルからなる詳細なボトムアップモデリングの枠組みである。このモデリングフレームワークには、全世界をカバーする 26 の地域または国が含まれている(附属書を参照)。ETP-2023 の予測期間は 2021 年から 2050 年である。すべての過去データの最新年は 2020 年であるが、一部の国やセクターでは 2021 年の一部について予備データが入手可能であり、予測の調整に使用されている。

可能性のあるエネルギー技術の道筋を表すために二つのシナリオを採用した:

- 本報告書の中心シナリオである 2050 年ネット・ゼロエミッション (NZE) シナリオは、世界の平均気温を産業革命前と比べて 1.5°C で安定させるための道筋を示した規範的シナリオである。NZE シナリオは、エネルギー部門以外からの排出削減に頼ることなく、2050 年までにエネルギー部門の CO<sub>2</sub> 排出量を世界全体でネットゼロにするものである。これにより、先進国が発展途上国よりも先にネットゼ

口を達成する。また、NZE シナリオは、2030 年までにエネルギーへの普遍的アクセスを達成し、大気質の大幅な改善を確保するという、エネルギー関連の主要な国連持続可能な開発目標(SDGs)も満たしている。

- 発表されている宣言シナリオ(APS)は、各国政府が、長期的なネットゼロ排出目標や国家が決定した貢献(NDC)、エネルギーアクセスなどの関連分野の約束を含め、発表されているすべての気候関連公約を完全かつ期限内に達成することを想定している。これらの公約が、その実施を確保するための具体的な政策に裏打ちされているかどうかにかかわらず、この公約は実行されるとする。また、国際的な場での約束や、企業や非政府組織のイニシアティブも、政府の挑戦を高めるものであれば、考慮される。

いずれのシナリオも、予測や予想とみなすべきではない。むしろ、異なる技術選択や政策目標がもたらす影響やトレードオフに関する考察を提供し、エネルギー部門の意思決定を支援する定量的な枠組みや、政府やその他のステークホルダーの技術選択に関する戦略的ガイダンスを提供することを目的としている。ETP-2023 における分析の焦点は、NZE シナリオの技術要件に関するものである; APS は、地政学的な“集中”や地域のニーズを理解する観点から採用されている。シナリオと結果は、2022 年世界エネルギー見通し(IEA, 2022c)で示されたものと一致している。

## いくつかのエネルギーおよびサプライチェーン

本報告書では、六つのクリーンエネルギーと技術のサプライチェーンを詳細に分析した(図 I.2)。これらのサプライチェーンは、NZE シナリオのクリーンエネルギー移行における重要性に基づいて選択された。これらのサプライチェーンは、NZE シナリオの 2050 年までの累積の排出削減量の約半分に相当する。

三つはクリーンエネルギーのサプライチェーンで、

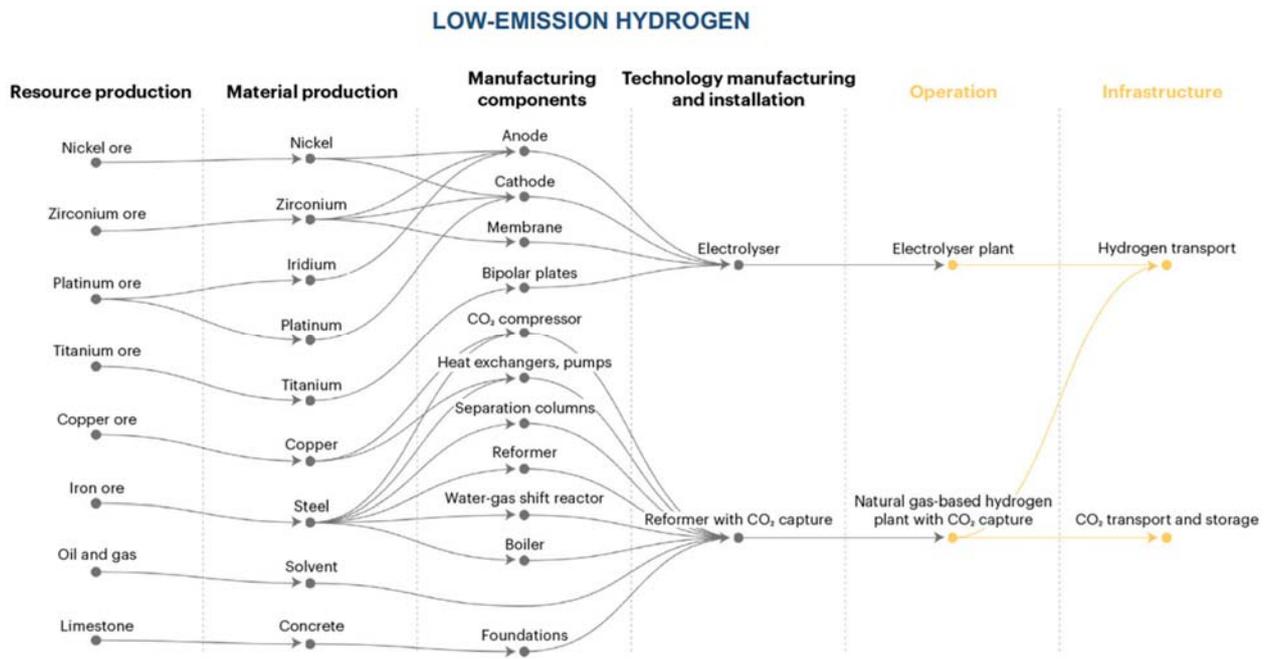
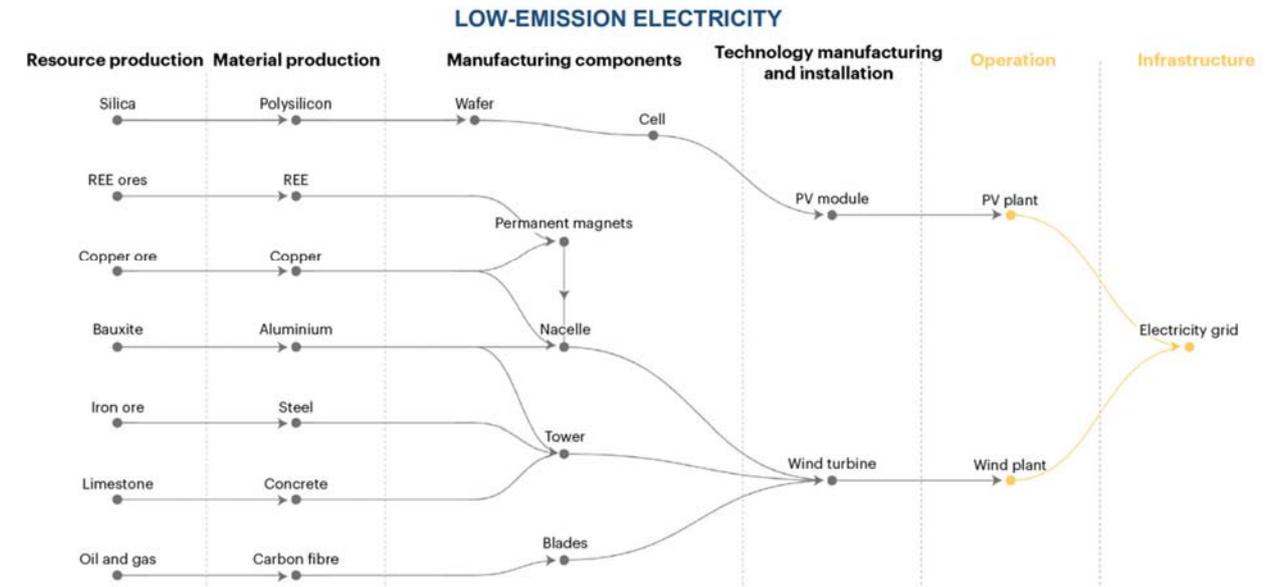
- ・低エミッション電力(太陽光発電と風力発電とそれぞれの技術サプライチェーンを含む)
- ・低エミッション水素(電解槽と炭素回収・貯蔵(CCS)付き天然ガス系プラントの技術サプライチェーンを含む)
- ・低エミッション合成炭化水素燃料(直接空気回収(DAC)と炭素回収付きバイオエネルギー(BECC)の技術サプライチェーンを含み、低エミッション水素サプライチェーンに接続)

他の三つはクリーン技術のサプライチェーンで、

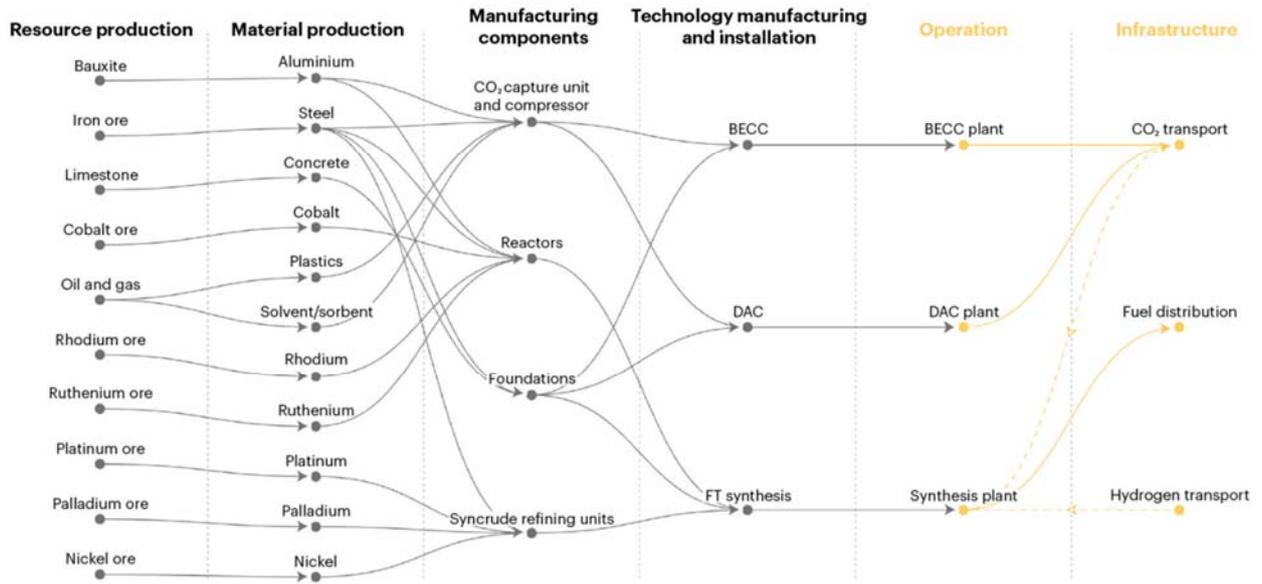
- ・電気自動車(バッテリーサプライチェーンを含む)
- ・ビル用ヒートポンプ
- ・燃料電池トラック(燃料電池サプライチェーンを含む)

である。

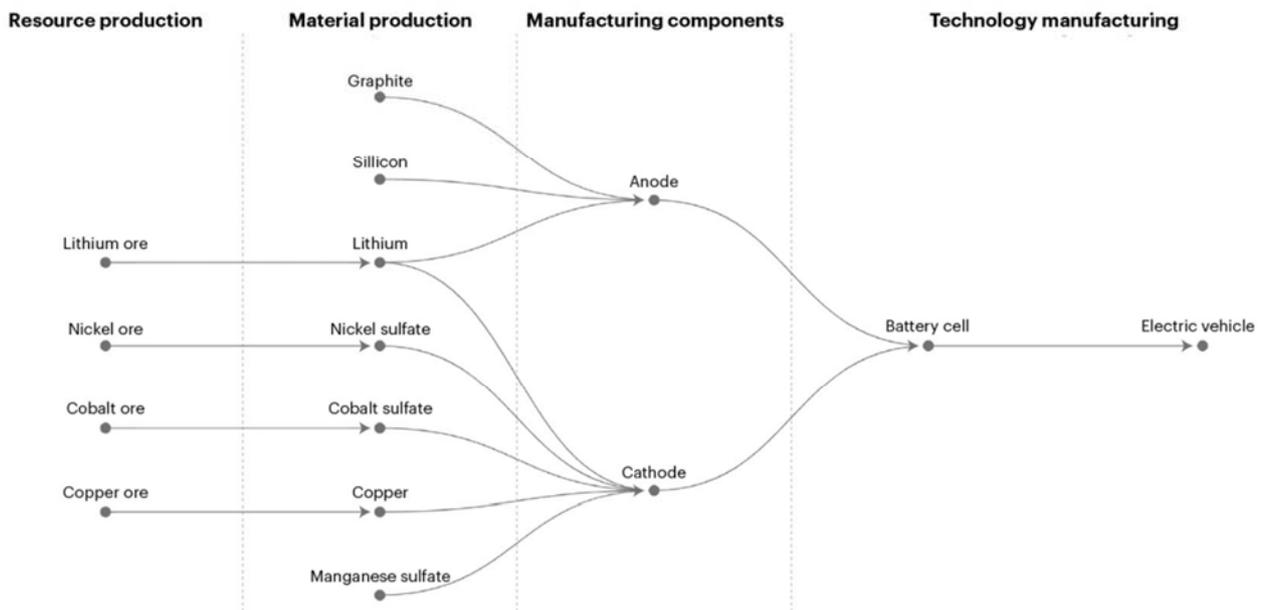
**Figure I.2 Key elements for each step in selected clean energy and technology supply chains**



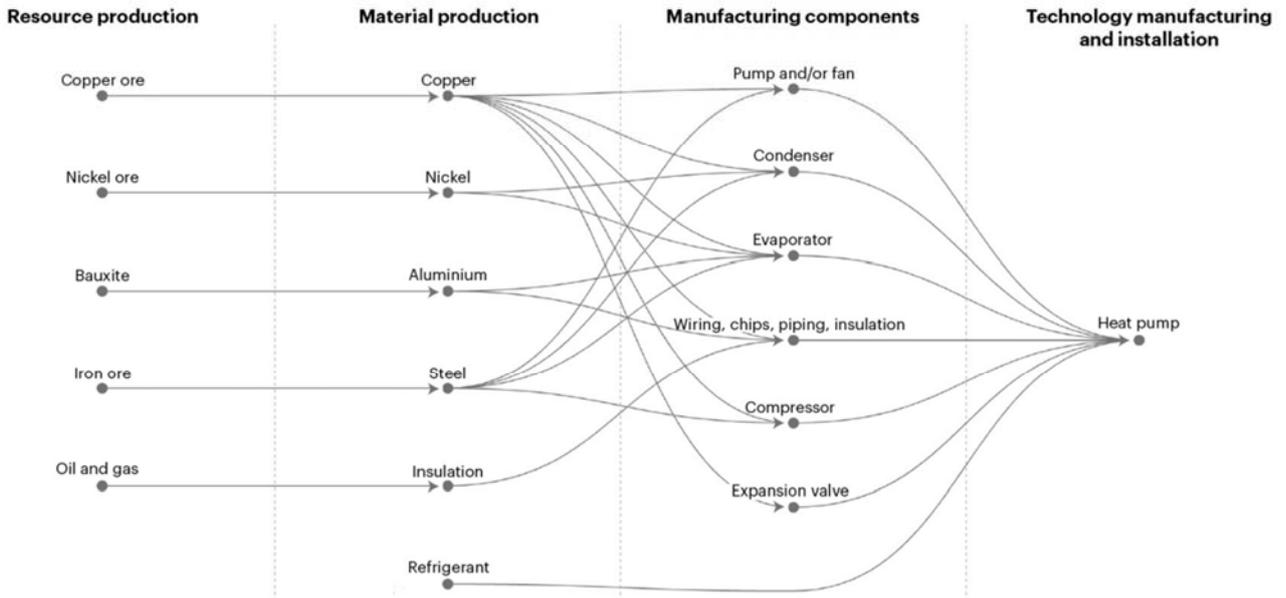
## LOW-EMISSION SYNTHETIC HYDROCARBON FUELS



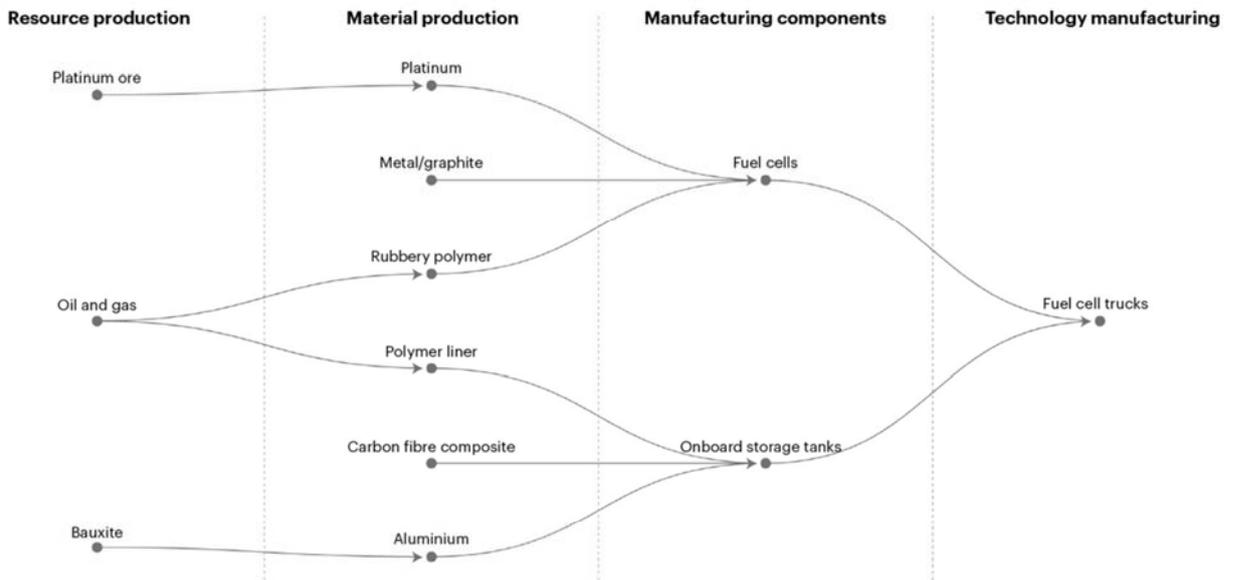
## BATTERY ELECTRIC VEHICLES



## HEAT PUMPS



## FUEL CELL TRUCKS



IEA. CC BY 4.0.

Notes: BECC = bioenergy with carbon capture. DAC = direct air capture. FT = Fischer-Tropsch.

**ETP-2023 studies six selected clean energy and technology supply chains in detail.**

## 報告書の構成

第 1 章では、世界のクリーンエネルギー転換の現状を概観し、NZE シナリオのネット・ゼロエミッションの道筋を実現するためにクリーンエネルギーと技術のサプライチェーンに求められる変化の程度と、起こりうるリスクについて概説。

第 2 章では、主なクリーンエネルギーと技術のサプライチェーンが現在どのように機能しているか、またクリーンエネルギー移行が進むにつれてどのような脆弱性があるかについて、地政学的集中と安全、市場ショックに対する強靱性、環境性能との関連性に着目して詳細に評価

第 3 章では、ネット・ゼロエミッションへの移行に必要な世界の鉱物と原料のニーズを定量化し、現在の拡張計画がその軌道にどの程度適合しているかを分析する。また、主要地域における投資を促進する政策や市場要因、サプライチェーンのこの段階における主な企業戦略についても検討

第 4 章では、大量生産型および大規模サイト向けクリーンエネルギー技術の供給見通しについて、現在および今後予定されている建設活動に基づく製造・設置能力の拡大に焦点を当て、評価。また、第 3 章と同様に、第 4 章では、主要地域における投資を促進する政策や市場要因、サプライチェーンのこのステップにおける主な企業戦略についても検討

第 5 章では、電力、水素、CO<sub>2</sub> の輸送、送電、流通、貯蔵に焦点を当て、ネット・ゼロエミッションに必要なクリーンエネルギーのサプライチェーンをコスト効率よく維持するために、エネルギーと CO<sub>2</sub> のインフラをどのように、どの程度のペースで変革していく必要があるかを分析

第 6 章では、政策立案者が安全で強靱性のある持続可能なサプライチェーンの開発と拡大をどのように支援できるのか、自由に使えるツールとその最適な使用方法について、世界各地の最近の経験を踏まえて解説

## 文 献

IEA (International Energy Agency) (2022a), Securing Clean Energy Technology Supply Chains, <https://www.iea.org/reports/securing-clean-energy-technology-supply-chains>

IEA (2022b), Global Energy and Climate Model, <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model>

IEA (2022c), World Energy Outlook, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

# 第1章 移行期のエネルギーサプライチェーン

## 主なポイント

- ・ 挑戦的なエネルギー・気候政策、技術の進歩、ロシアのウクライナ侵攻に伴うエネルギー安全保障への懸念の再燃などを背景に、クリーンエネルギーへの移行が加速している。2022 年のクリーンエネルギー投資は 1.4 兆米ドルに達し、2021 年比で 10%増加し、エネルギー部門投資総額の成長の 70%を占めた。この重要な進展にもかかわらず、化石燃料は依然として一次エネルギーミックスの 80%を占めている。
- ・ 気候変動に関する目標を達成するためには、クリーンエネルギー技術の導入を急速に加速させる必要がある。2050 年ネット・ゼロエミッション(NZE)シナリオでは、電気自動車の世界生産台数は 2030 年までに 6 倍に増加し、自然エネルギーが発電の 60%以上を占め(現在の 30%から増加)、電力需要は 25%増加して最終消費全体の 30%近くを占める(現在の 20%から増加)。クリーン技術の製造能力を拡大するために発表されたプロジェクトがすべて実現すれば、太陽光発電モジュールは NZE シナリオの 2030 年のニーズを満たし、電気自動車のバッテリーの必要量に近づくが、その他の分野では不足し、電解槽で 40%、ヒートポンプで 60%のギャップが残る。
- ・ クリーンエネルギーへの移行は、クリーンエネルギー技術のサプライチェーンに依存している。ETP-2023 で調査したサプライチェーンを NZE シナリオの 2030 年目標に沿った十分な容量をラインに乗せるためには、1.2 兆ドルの累積投資が必要である。発表された投資は、このうち約 60%を占めている。プロジェクトのリードタイムを考慮すると、ほとんどの投資は 2023-2025 年に必要とされ、その期間は年間平均 2,700 億ドルで、これは 2016-2021 年の平均投資率の約 7 倍である。
- ・ 銅、リチウム、コバルト、ニッケルなどの重要な材料は、エネルギー安全保障のパラダイムを変えつつある。一般的なサイズの電気自動車を製造するには、これらの材料が通常の自動車の 5 倍必要である。リチウムの採掘で最大 35%、硫酸ニッケルの生産で最大 60%の不足が生じ、2030 年の NZE シナリオの必要量を大きく下回る可能性があることが、予想される供給の拡大から示唆されている。
- ・ 新しいサプライチェーンを構築し、既存のサプライチェーンを拡大するためのリードタイムは長く、今日、政策的介入が必要となっている。鉱山の開設やクリーンエネルギーのインフラ整備には 10 年以上かかることがある。しかし、大量生産される技術の工場建設や操業開始には、1~3 年程度しかかからない。
- ・ NZE シナリオにおけるクリーンエネルギー部門の雇用は、2021 年から 2030 年にかけて 3,300 万人から 7,000 万人に急増し、化石燃料関連部門の 850 万人の減少を相殺する。ネットゼロ目標を達成するためには、大規模に熟練した労働力を構築することが重要であるが、拡大するクリーンエネルギー産業における労働力とスキルの不足は、すでにボトルネックとなっている。

## 第2章 クリーンエネルギーサプライチェーンのマッピング

### ハイライト

- ・ 重要な鉱物の生産は地政学的に集中しているため、供給の安定性に懸念がある。 コンゴ民主共和国はコバルトの 70%を、中国は希土類元素(REE)の 60%を、そしてインドネシアはニッケルの 40%を供給している。リチウムはオーストラリアが 55%、チリが 25%を占めている。これらの鉱物の加工も非常に集中しており、中国がレアアースの 90%、リチウムとコバルトの 60~70%の精製を担っている。また、中国はバルク材料の供給でも優位を占めており、世界の粗鋼、セメント、アルミニウムの生産量の約半分を占めているが、ほとんどは国内で使用されている。
- ・ 中国は現在、クリーンエネルギー技術の世界的な主要供給国であり、多くの技術において純輸出国である。 中国は、ほとんどの大量生産技術(太陽光発電、風力発電システム、バッテリーなど)において、世界の製造能力の 60%以上、電解槽の製造能力の 40%を保有している。ヨーロッパは、風力発電の部品を除き、一般的に純輸入国であり、電気自動車とバッテリーの約 4 分の 1、太陽光発電モジュールと燃料電池のほぼすべてが輸入されており、そのほとんどが中国からの輸入である。太陽光発電については、北米を除くすべての市場に中国が直接機器を供給している。米国は太陽光発電モジュールの 3 分の 2 を東南アジアから輸入しているが、主に中国企業は東南アジアへ積極的に投資している。
- ・ Covid-19 のパンデミックとロシアのウクライナ侵攻に起因する最近のサプライチェーンの混乱は、急速に拡大する需要と相まって、材料とエネルギーのコストを劇的に上昇させている。2022 年のリチウムの平均価格は 2019 年の 4 倍近く、コバルトとニッケルは 2 倍となった。2022 年初頭のバッテリー金属価格の高騰により、何年も下がりが続いていたバッテリー価格が 2021 年比で世界的に 10%近く上昇した。太陽光発電用ポリシリコン、銅、鉄の価格は、いずれも 2020 年前半から 2022 年にかけて約 2 倍に上昇した。これらの価格上昇は、太陽光発電モジュールの価格を 25%上昇させ、中国以外の風力発電機の価格を最大 20%上昇させる要因となった。
- ・ クリーンエネルギー技術のライフサイクル CO2 強度は、化石技術に比べてはるかに低いが、そのサプライチェーンは依然として CO2 排出やその他の汚染物質の重要な発生源となっている。分析対象となったクリーンエネルギー技術のサプライチェーンでは、材料生産と技術製造が通常、排出量の 90%以上を占めている。多くの場合、商業的に利用可能な低排出ガス技術がないため、これらのステップからの排出量を削減することは困難であるが、ネット・ゼロエミッションへの移行において重要な事項である。

(以下、第2章における燃料電池トラックに関する部分のみ抜粋翻訳)

## 地理的多様性およびエネルギーセキュリティ

### 技術製造および設置

#### 燃料電池トラック

2021年には、世界で約900台の大型燃料電池トラックが販売され<sup>9</sup>、その90%が中国であった。イスが二番目に大きな市場で約8%であった。燃料電池トラックの製造には、従来のディーゼルベースの内燃機関トラックを作るときに使われないいくつかの特別な部品の製造が含まれる。それらは、車載貯蔵用の水素タンクと燃料電池システムである。これまで、世界の燃料電池トラックメーカーが言及している生産設備能力は13,000台/年以上であり、中国、韓国、米国、欧州に集中する既存の設備では、かなりの遊休設備があるが、近い将来の導入拡大に大きな可能性を示している。

9 大型とは、車両総重量が15トンを超えるトラックを指す。この特定の車両セグメントに注目したのは、2050年までのネット・ゼロエミッション・シナリオにおいて、燃料電池車のシェアが最も大きいと予測される車両カテゴリーであるためである。2021年のバッテリー電気大型トラックの世界保有台数は、燃料電池トラックのそれよりも1桁以上大きい。同シナリオでは、前者がゼロ・エミッション・パワートレインの主流であり続けると予測されている。

トラックのトップメーカーは中国のSAIC Hongyan(上汽紅岩汽車有限公司)で、年3,000台の生産能力がある。韓国のHyundaiは年2,000台、米国のHyzon Motorsは年1,000台(オランダで製造)、Nikolaは、米国で2,500台、ドイツで2,000台である。他の多くの既存メーカーも、既存の組立工場の改造に伴うリードタイムの短さや、燃料電池、バッテリー電気トラック、内燃機関トラックに共通する部品の多さから、近い将来燃料電池トラックの生産を開始するのに有利な立場にある。例えば、Cummins社は米国のDaimler社や欧州のScania社と、Kenworth社は米国のトヨタと、中国のWeichai Power社やSinotruck社と、それぞれ長期的な契約を結んでいるなど、いくつかの燃料電池メーカーはトラックメーカーと協業している。これらのメーカーはいずれも、既存の豊富な生産能力とサプライチェーンを活用することで、迅速に生産を拡大することができる。

燃料電池トラックは通常、水素を電気に変換する陽子交換膜(PEM)技術に依存しており、その電気は電気モーターの動力と車両のバッテリーを充電するために使用される。自動車、バン、トラック、フォークリフトを含むすべての車両向けのPEM燃料電池の製造能力は、2021年に合計29万システム/年を超え、2022年には33万システム/年以上に達すると考えられている。2021年の生産能力の約65%は中国で、主要な生産者はRefire、SinoSynergy、Weichai、Wuhan HydraV Fuel Cell Technologiesである。韓国は15%以上の生産能力を持ち、現代自動車が最大のメーカーである。

車載用高圧水素貯蔵タンクには、既存の製造能力がかなりある。大手メーカーは、他の圧縮ガス貯蔵装置、特に天然ガスで培った知識と経験を活用している。また、チューブトレーラー（訳者注：高圧円筒形水素貯蔵タンクを複数本搭載したトレーラー）による水素供給や、燃料補給ステーションなどの定置用水素貯蔵のための装置も多く供給している。

高圧貯蔵容器の製造は、北米、欧州、アジアですでに確立されている。この種の機器を製造するメーカーの多くが、大型車の車載用水素貯蔵市場にすでに参入しているか、あるいは参入を予定している。カナダ、中国、英国、米国に工場を持つ Luxfer は、最近スイスで販売された Hyundai の大型トラックにタンクを提供した。カナダ、ドイツ、米国に製造拠点を持つ Hexagon Purus は、Nikola に車載用貯蔵タンクを提供する契約を結んでいる。トヨタは現在、自社でタンクを製造しているが、他メーカーへの供給も視野に入れている。

## 第3章 採掘および原材料製造

### ハイライト

- ・クリーンエネルギーへの移行には、かなりの量の原材料投入が必要である。重要な鉱物（特にリチウム、コバルト、ニッケル、銅、ネオジウム）とバルク材（鉄鋼、セメント、プラスチック、アルミニウム）は、風力タービン、電気自動車のバッテリーから電力網まで、さまざまな技術やインフラが必要である。5 つの主要な重要鉱物のそれぞれに対する需要は、クリーン技術の展開の急増に伴い、2050 年までのネット・ゼロエミッション(NZE)シナリオでは 2030 年までに 1.5 倍から 7 倍に増加する。すべての需要分野での材料効率の向上は、クリーンエネルギー技術やインフラのための鉄鋼やセメントの需要増を補って余りある。
- ・ネットゼロの目標を達成するためには、重要な鉱物の採掘能力を速やかに拡大する必要がある。現在予想されている投資によって大幅な増加が見込まれるとはいえ、2030 年の世界の NZE シナリオの必要量にはまだ大きく及ばないだろう。最もギャップが大きいのはリチウムで、予想される拡大量は 2030 年の必要量のわずか 3 分の 2 をカバーするに過ぎない。新規鉱山のリードタイムは長く、不確実であるため、このギャップを埋めるためには、主に今後 3 年間で約 3,600 億～4,500 億米ドルの投資が必要となる。
- ・また、これらの鉱物を使用可能な材料に加工する能力も大幅に拡大する必要がある。現在予定されているプロジェクトでは、採掘能力が十分かどうかにかかわらず、新しい計画がすぐに発表されない限り、いくつかの重要な材料について大きな供給ギャップが生じることが指摘されている。現在の発表では、2030 年までに NZE シナリオで必要とされる量に対して、硫酸ニッケルは 60%、リチウムは 35%の不足が見込まれている。地政学的に多様化することによって供給途絶のリスクを軽減できるかもしれないが、現在の拡張計画では、中国が引き続き支配的であることが指摘されている。
- ・従来のバルク材生産能力は排出集中型であり、脱炭素化は非常に困難である。ゼロエミッションに近い生産ルートのはほとんどはまだ商業的に利用できないが、現在、最小量となっている生産量から、NZE シナリオでは 2030 年までに一次鋼の生産量を約 1 億 3,000 万トン、セメントの生産量を約 3 億 7,000 トンまで拡大しなければならない。発表されたプロジェクトのうち、ゼロエミッションに近い生産がすぐに実現できそうだと評価したプロジェクトは、2030 年の NZE シナリオの一次鋼の必要量のわずか 10%、セメントの 3%をもたらずに過ぎない。これらのプロジェクトは主にヨーロッパと北米で行われているが、需要が最も伸びるのは新興国と発展途上国であり、国際協力の強化が必要であることを示唆している。

## 第4章 技術の製造および設置

### ハイライト

- ・ 現在発表されている太陽光発電(PV)モジュールの製造計画は、完全に実現すれば、2050年までのネット・ゼロエミッション(NZE)シナリオにおける2030年の需要レベルを満たすのに十分である。この拡張計画は、他のクリーンエネルギー技術には及ばないが、プロジェクトのリードタイムが1~3年と短く、さらに最近発表された政策的インセンティブと相まって、このギャップが克服できないものではないことを示唆している。 NZEシナリオに沿って大量生産技術の世界生産を拡大するためには、2030年までに6,400億米ドルの投資が必要であり、発表されたプロジェクトは、この投資の約3分の2に相当する。
- ・ 発表されたEV用バッテリー製造プロジェクト(主に中国)は、2030年までに生産能力を6倍に高め、NZEシナリオのニーズの80%以上を満たすことができる。 NZEシナリオでは風力タービンの導入が4倍になるのに対し、2030年までに風力コンポーネントの製造は陸上で5-10%、海上で20-55%しか成長しないことがプロジェクトの発表で明らかになった。電解槽の製造能力は、2030年までに現在の約10倍、100ギガワット(GW)以上となり、NZEシナリオの必要量の約半分となることが予想される。発表されたヒートポンプの製造プロジェクトは、2030年のNZEシナリオのニーズの3分の1を満たすことができ、燃料電池トラックは半分に相当する。
- ・ 大規模な技術をタイムリーに稼働することは困難である。 例えば、現在の導入計画では、2030年のNZEシナリオの低排出合成炭化水素燃料の需要の約15%、炭素捕捉を伴うバイオエネルギーの需要の20%にしか相当しない。 これらの技術は開発の初期段階にあり、通常、プロジェクトのリードタイムは長い。
- ・ クリーンエネルギー技術を導入・製造するための労働力は、大幅に増加する必要がある。 現在、約3,300万人がクリーンエネルギーの分野で働いている。2030年までに、NZEシナリオでは、電気自動車とそのバッテリーを製造するために、さらに800万人の労働者が必要になる。ただし、現在、内燃機関(ICE)車の製造に従事している労働者が、これらの役割の大部分を担う可能性もある。太陽光発電、風力発電、ヒートポンプシステムの設置(75%)と製造(25%)には、さらに400万人の労働者が必要とされる。
- ・ 産業政策、低コストのエネルギーや原材料へのアクセス、労働者の確保、貿易政策などが、中国が世界的に優位な製造基盤を築いている理由の大部分を占めている。 他の国々もクリーンエネルギー製造能力の拡大に取り組んでいる。最近の顕著な政策努力としては、米国のインフレ抑制法、REPowerEU計画、日本のグリーントランスフォーメーションイニシアティブ、インドの生産連動奨励金制度などがある。しかし、現在の拡張プラントからすると、現在の地政学的な集中度は、この10年間は高いままであると思われる。

(以下、第4章における燃料電池トラックに関する部分のみ抜粋翻訳)

## 燃料電池トラック

水素を燃料とする燃料電池自動車(FCEV)は、数十年前から開発が進められてきたが、自動車やバスの商業化が始まったのは、ここ 10~15 年である。燃料電池は、航続距離、燃料補給時間<sup>28</sup>、エネルギー密度(より重い積載量を可能にする)の点で、標準的なバッテリーEV 技術よりも優れているため、最近では大型トラックの開発にも注目が集まっている。しかし、バッテリーのコストが急速に低下し、導入計画が急速に拡大しているため、バッテリーEV トラックとの競争は熾烈である。そのため、将来の燃料電池トラックの導入は非常に不確実である。

28 大型燃料電池トラックの水素補給技術の検討については 5 章参照

政府および産業界は、大型トラック輸送の脱炭素化に向けた取り組みを強化している。2021 年に 16 カ国、2022 年にさらに 11 カ国が署名した「ゼロエミッション中型・大型車に関する覚書」<sup>※</sup>に代表されるように、2040 年までにゼロエミッションのトラック・バス販売を 100%とする目標(2030 年までに 30%の暫定目標)が設定された。現在の政府目標が達成された場合、2030 年の世界の大型トラック販売台数の約 7%が低排出ガスとなり、そのうち約 10%(2 万台以上)が燃料電池トラックで、主に長距離トラック部門に供給されると予測されている。

※訳者注

本プロジェクトは、COP26 の大臣会合で立ち上げられた。

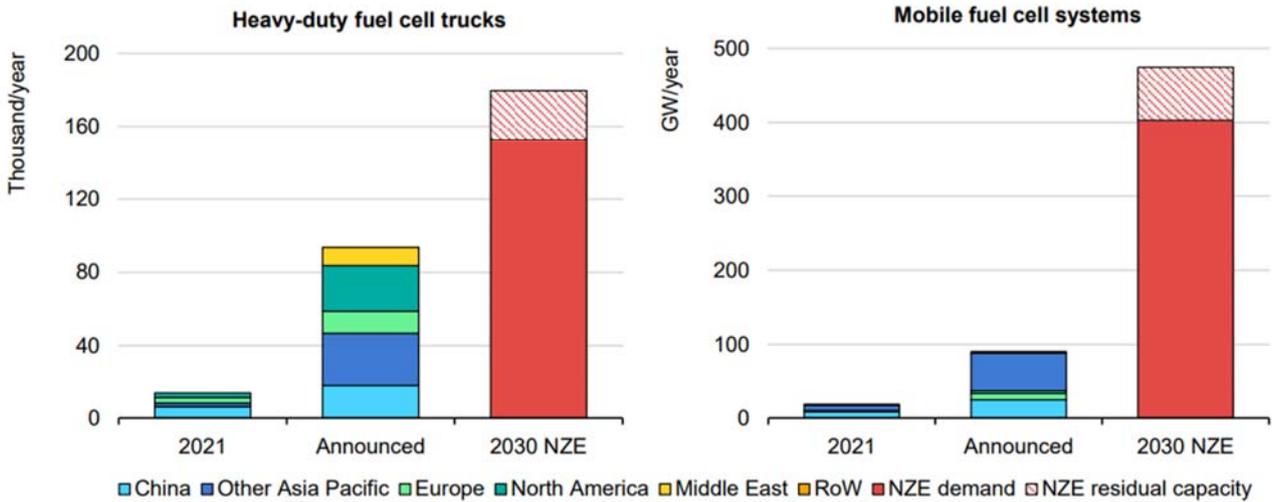
署名国:オーストリア、カナダ、チリ、デンマーク、フィンランド、ルクセンブルク、オランダ、ニュージーランド、ノルウェー、スコットランド、スイス、トルコ、英国、ウルグアイ、ウェールズ(日本は参加していない)

## 拡大計画とネットゼロ軌道とのギャップ

メーカーの発表によると、世界の大型燃料電池トラックの生産能力は、2030 年までに年間 9 万台以上に達する見込みである。これは既存の生産能力の約 7 倍に相当し、NZE シナリオで必要とされる生産能力の約 50%を占めることになる。不足分を補う時間は十分にある。年間 3,000 台程度のトラックを製造する比較的小規模な設備であれば、起工から燃料電池トラックの生産開始まで、わずか 6 カ月程度で済む(例えば、2021 年に稼働した SAIC Hongyan の工場[Electrive、2022]など)。この規模の工場を年間約 2 万台のトラック生産能力まで拡大するには、さらに 1~2 年かかる。

図 4.9 発表されているプロジェクトおよび NZE シナリオにおける国・地域別の大型燃料電池トラックおよび自動車用燃料電池の製造能力

Figure 4.9 Heavy-duty fuel cell truck and mobile fuel cell manufacturing capacity by country/region according to announced projects and in the NZE Scenario



IEA. CC BY 4.0.

Notes: RoW = rest of world; NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario. Announced capacity includes existing capacity. The manufacturing capacity needed to meet projected demand in the NZE Scenario (NZE demand) is estimated assuming a utilisation rate of 85%. NZE residual capacity, thus, represents the manufacturing capacity that would remain unused, on average, which provides some flexibility to accommodate demand fluctuations. Capacities in 2021 and announced capacities include material handling equipment and other transport applications; NZE demand for fuel cells is based on fuel cell vehicles only.

Sources: IEA analysis based on Samsun et al. (2022), E4tech (2022) and company announcements.

**Expansion projects indicate a sevenfold increase in global fuel cell truck manufacturing capacity to 90 000 trucks per year by 2030 – 50% of that required in the NZE Scenario.**

プロジェクトの拡大により、世界の燃料電池トラック製造は 7 倍に増加

2030 年には、NZE シナリオの 50%にあたる年間 9 万台のトラック輸送能力が確保

燃料電池製造に関する発表によると、自動車用燃料電池の生産能力は 2030 年までに 5 倍の 90GW/年に増加するとされている。NZE シナリオで予測される 2030 年の燃料電池トラックの販売台数に基づけば、発表された燃料電池生産能力のうち、トラック製造に使用する必要があるのは、推定 3 分の 1 程度である。燃料電池の生産は、新しい工場が稼働するまでに 1~2 年かかるため、需要の増加に追いつくことができると予想される。また、燃料電池トラックのメーカーは、燃料電池を自社で製造するか、燃料電池メーカーと提携する傾向にある。例えば、Daimler と Volvo は大型トラック用の燃料電池システムを供給する合弁会社「Cellcentric」を設立し、トヨタは大型トラック用の燃料電池パワートレイン・モジュールを生産するための生産工場を米国に開設する予定である。

表 4.3 いくつかの大型燃料電池トラックと燃料電池メーカーの拡大計画

Table 4.3 Expansion plans of selected heavy-duty fuel cell truck and fuel cell manufacturers

Manufacturer	Company HQ	Manufacturing capacity	
		2021	2030
Heavy-duty fuel cell truck manufacturers (trucks/year)			
Hyzon	United States	1 000	40 000
Nikola	United States	4 500	30 000
Hyundai	Korea	2 000	11 000
Fuel cell manufacturers (systems/year)			
Hyundai	Korea	40 000	500 000
Symbio	France	--	200 000
HydraV	China	25 000	100 000

Source: Fuel cell manufacturing capacity data from E4tech (2022).

燃料電池部品(膜電極接合体(MEA)、バイポーラプレートなど)や燃料電池自動車用水素貯蔵タンクの生産能力拡大もいくつか発表されている。燃料電池トラックメーカーの Hyzon は、2021 年に米国に MEA 製造工場を建設することを発表し、フル稼働すれば年間 12,000 台の燃料電池トラックの生産を支えるだけの MEA を製造するとしている(Hyzon、2021)。Nikola に燃料電池システムを供給する Bosch 向けにバイポーラプレートを製造する Dana は、ドイツの工場を今後 1、2 年で年間 35 万枚から 400 万枚に拡張する計画を発表した(Innovationsregion Ulm, 2022)。貯蔵タンクについては、Faurecia(Hyundai のパートナー)が最近、フランスにある工場を 2025 年までに年間 1 万個から 10 万個に拡張する計画を発表した(Surfeo, 2022)。

Nikola と Hyzon は<sup>29</sup>、ゼロエミッションの大型トラックを供給するためにこの 10 年間で設立された米国に本社を置く企業であり、燃料電池トラックの生産能力拡大の発表の大部分を占めている。Nikola は、既存の工場を拡大するだけで、製造能力を 7 倍近くに増やすことができる。Hyzon は、2025 年までに燃料電池車(大型トラックとバスを含む)の生産ラインを年間 4 万台にする計画を立てている。この 2 社の計画が実現すれば、2030 年に予測される NZE シナリオの需要のほぼ半分を供給できることになる。

<sup>29</sup> Hyzon 自身は 2020 年に設立されたが、シンガポールに本社を置く Horizon Fuel Cell Technologies の子会社としてスタートし、20 年近く燃料電池の開発に携わってきた。

燃料電池自動車の開発で長い歴史を持つトヨタと Hyundai も大型燃料電池トラックの生産を開始し、他のトラックメーカー(Daimler、MAN、Scania、Volvo、DAF など)もその意思を表明している。しかし、将来の生産能力に関する発表は、これまで最も多くの大型燃料電池トラックを製造してきた中国企業を含めて、かなり限られている。Hyundai は中国に燃料電池トラックの製造工場を開設し、当初は年間 6,500 台の生産能力を持つが、それ以外は販売目標が製造能力拡大の唯一の指標である。一般的に、既存のトラックメーカーは、将来の潜在的な需要を満たすために、現在の生産ラインを燃料電池トラッ

クの製造に変更することができるはずである。これらの理由から、NZE シナリオで 2030 年に必要とされる 15 万台の大型燃料電池トラックを生産するための障害は、発表がないことであり、それを見過ごしてはならない。この点を考慮すると、韓国の Hyundai の Jeonju 工場は現在、年間 10 万台以上の商用車生産能力を有している。

大型燃料電池トラックの生産能力の地理的分布は、発表されている拡大計画に基づくと、より多様化することになる。現在の計画がすべて達成され、他の拡大が行われない場合、世界の生産能力における中国のシェアは 2021 年の 45%から 2030 年には 20%に低下することになる。米国の生産能力は、Hyzon と Nikola の発表によれば、同期間に 10 倍の年間 25,000 台となるが、世界の生産能力に占める割合は約 25%にとどまる。欧州では、Nikola 社および Daimler 社の発表により、2030 年には年間 12,000 台程度まで生産能力が高まる可能性がある (Hyundai は韓国で欧州市場向け燃料電池トラックの生産を継続すると想定)。欧米での販売目標に基づき、韓国の生産能力は現在の年間 2,000 台から、2030 年には年間 4,500 台に増加する。Hyzon が発表した全世界の目標生産能力、および米国と欧州の特定生産能力に基づく、その他の地域の生産能力は、サウジアラビアでの年間 1 万台の新規生産能力を含め、年間 3 万 5,000 台近くに達する可能性がある。

韓国は、トラック向けの自動車用燃料電池の製造において、世界市場シェアが 2021 年の 20%から 2030 年には 50%以上に跳ね上がり、その重要性がさらに増すと見られている。Hyundai の発表は、中国のシェアが 50%から 25%に急落するという規模である。トヨタは生産能力増強の発表をしていないため、日本のシェアは現在の 20%近くから 2030 年には 5%未満に低下するが、トヨタは需要に応じて生産能力を急速に増強することができることが知られている。

## 地域の政策と市場導入

燃料電池トラックの普及はまさに初期段階にあるため、燃料電池サプライヤー、トラックメーカー、水素製造業者、燃料充填ステーション開発業者など、サプライチェーン全体の業界関係者は、市場拡大をサポートするためにパートナーシップ、コラボレーション、ジョイントベンチャーを結成している。業界の活動や投資は、当然のことながら、支援的な政策枠組みを持つ国に集中している。

欧州では、政府の支援や民間企業の気候変動対策への取り組みから、燃料電池トラックにとって有利な環境が整っている可能性がある。最近、欧州委員会は、水素充填ステーションを含む低排出ガス車のためのインフラ構築を支援するための代替燃料インフラを立ち上げた。さらに、提案されている代替燃料インフラ規則では、水素充填ステーションの利用可能性に関する要件が設定される。スイスでは、大型車に対する連邦税が、電気駆動の車両の場合免税の対象となるため、大型燃料電池トラックの導入が後押しされている。

また、欧州連合 (EU) は、燃料電池トラックの導入を支援するための多くのプロジェクトに資金を提供している。例えば、H2Haul プロジェクトでは、欧州の道路で安全に走行できることを確認しながら普及を

図るプロジェクトや、水素補給インフラを設置するためのプロジェクトが進行中である。また、欧州連合の PRHYDE プロジェクトは、トラックの将来における標準化活動や水素技術を使ったその他の重量輸送に用いられる公的な大型燃料補給プロトコルの推奨事項を開発することを目的としている。

2020 年には、トヨタ、Hyundai、Hyzon、Ballard といった業界関係者を含む共同声明で、2030 年から欧州で大型燃料電池および水素トラック 10 万台を普及するという共通の挑戦目標が述べられている (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking & Hydrogen Europe, 2020)。さらに、Daimler Truck AG、IVECO、OMV、Shell、TotalEnergies、Volvo Group が参加する H2Accelerate イニシアチブでは、水素燃料トラック輸送の技術的・商業的実現可能性を評価する共同研究が行われている。

米国では、エネルギー省が大型燃料電池トラックについて、従来のディーゼルトラックとの競争力を高めるといった挑戦的な目標を掲げている。この目標をサポートするため、水素・燃料電池技術室は産業界との共同出資により、国立再生可能エネルギー研究所で中型および大型の水素充填プロトコルやハードウェアの開発をサポートする、他に類を見ない研究およびモデリング能力を備えている。

ゼロ・エミッション・トラックへの移行を義務付ける連邦規制はないが、カリフォルニア州の「Advanced Clean Trucks Rule」では、2035 年までにトラックの種類に応じて大型トラック販売の 40~75%をゼロエミッションにすることが求められている。このルールを受けて、16 の州とコロンビア特別区、カナダのケベック州は、2030 年までに中型および大型トラックの新車販売台数の少なくとも 30%をゼロエミッションにし、遅くとも 2050 年までに 100%にするという目標を定めた覚書(MOU)に調印した。カナダは、2040 年までにトラックとバスのゼロエミッション車販売台数 100%(2030 年までに 30%の暫定目標)を目指す「ゼロエミッション中型・大型車に関するグローバル MOU」の一員でもある。現在、米国で稼働している公共の水素充填ステーションは、カリフォルニア州のみである。Nikola は、インフラや燃料プロバイダーとパートナーシップを結び、大型燃料電池トラックの運送事業者をサポートすることで、ネットワーク拡大を目指している。

韓国では、政府の「水素経済ロードマップ」において、燃料電池自動車の生産、輸出、国内普及の目標が示されている。その中には、2040 年までに燃料電池トラックを 3 万台走らせるという目標が含まれている。2021 年に結成された KOHYGEN コンソーシアムは、2040 年までに 300 の大型水素ステーションを建設し、燃料電池トラックの展開をサポートすることを目指している。韓国の Hyundai Motor Group は、1998 年に始まった燃料電池開発の長い歴史を持っている。最近の FCEV ビジョン 2030 で、Hyundai Motor Group は、FCEV 用の 50 万台を含む、年間 70 万台の燃料電池システムを生産する目標を発表した。これをサポートするために、韓国で 2 番目となる燃料電池製造工場を開設している。

日本の新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は、2000 年代初頭から燃料電池技術の拡大に向けた技術ロードマップを公開し、拡大を支援するための補助金を提供している。日本を代表する自動車メーカーであるトヨタ自動車とホンダは、FCEV の商業化をリードしてきた。2019 年、日本の第

3 次水素・燃料電池戦略ロードマップでは、2030 年までに燃料電池自動車を 80 万台とする目標が掲げられた。2022 年 3 月には NEDO が「燃料電池大型車技術ロードマップ」を発表し、燃料電池トラックの国内導入について 2030 年と 2040 年の目標を設定した。最近では、トヨタの子会社で商用車を製造している日野が NEDO の助成を受けて、カリフォルニアの港でこのようなトラックの試験を行っている。

中国では、2022 年に政府が初の国家レベルの水素開発計画を立ち上げ、2025 年までに 5 万台の燃料電池自動車を稼働させることを目標に掲げている。第 14 次 5 年計画では、水素は 6 つの重点分野の一つであった。歴史的に、中国はトラックやバスを含む大型 FCEV の開発・普及を優先しており、両者の普及におけるリーダーとなっている。多くのメーカーが、燃料電池バス製造の経験、あるいは親会社や姉妹会社の経験を活かして、大型トラックへの展開を進めてきた。FCEV の早期普及における中国の成功は、中国以外の燃料電池プロバイダーとのパートナーシップや合弁事業によるものであると、ある程度は言える。Ballard、Hyundai、トヨタなどの燃料電池メーカーは現在も中国市場に参入しているが、国内企業の役割も大きくなってきている。

## Chapter 5. インフラの実現

### ハイライト

- ・ 電気、水素、CO<sub>2</sub> を輸送・貯蔵するためのインフラは、クリーンエネルギーの移行を実現する上で、しばしば見過ごされがちだが、非常に重要な要素である。 NZE シナリオでは、2021 年から 2050 年にかけて、送電網は約 185%、配電網は約 165%増加し、その 85%は新興国で増加する。現在ほとんど存在しない低排出ガス水素の貿易は、2030 年には世界の商用水素需要の 20%以上をカバーする。CO<sub>2</sub> 貯蔵の年間注入量は、現在の約 4,200 万トン (Mt) から 2030 年には約 1.2 ギガトン (Gt) に急増し、CO<sub>2</sub> 輸送・貯蔵インフラの大幅な拡張が必要となる。
- ・ このような急成長は、サプライチェーンに多大な要求を突きつけることになる。送電網、配電網、変圧器に要する年間金属使用量は、NZE シナリオでは 2022-2030 年に現在より約 50%増加する。2022-2030 年に送電網と変圧器に使われる銅は、2030 年の世界の銅生産量のほぼ 20%に相当する。電力用変圧器の製造には方向性電磁鋼板 (GOES) が必要で、現在、中国、日本、韓国、ロシア、米国の 5 カ国が、世界の生産能力 (年間 3.8 Mt) の 85%近くを占めている。NZE シナリオでは、2022 年から 2030 年にかけて、GOES の需要だけが年間 600 万 t に倍増する。
- ・ パイプライン、貯蔵施設、ターミナル、燃料補給ステーションを含む低排出ガス水素および水素由来燃料輸送への世界の年間投資額は、NZE シナリオではこの 10 年後半に 500 億米ドル以上に達し、これは現在の天然ガスパイプラインおよび船舶インフラへの年間投資額のほぼ 40%に相当する。水素と水素由来燃料の需要が長期的に増加するため、インフラ投資は 2041-2050 年に 800 億米ドル以上に達する。
- ・ NZE シナリオでは、CO<sub>2</sub> インフラ整備も加速されるが、CO<sub>2</sub> 貯蔵能力の開発に必要なリードタイムの制約を受ける。重要鉱物と異なり、CO<sub>2</sub> 貯蔵の埋蔵量を特定するための評価はあまり行われていない。CO<sub>2</sub> 回収施設や輸送インフラへの投資を確実なものにするためには、CO<sub>2</sub> 貯留の可能性に対する信頼が必要であり、早急に資源評価を行う必要がある。
- ・ 今日、エネルギーインフラの建設には 10 年以上かかることがある。建設はほとんどの場合、2~4 年かかる比較的効率的なプロセスであるが、計画や許認可がしばしば遅延を引き起こし、ボトルネックとなり、管轄やインフラの種類によって 2~7 年かかることがある。 インフラプロジェクトのリードタイムは、通常、それに接続する施設のリードタイムよりもはるかに長い。

(訳者 注)

参考までに、本報告書制作に関する日本側の関わり方および関係者を以下に示す。

日本の IEA 職員、その他 IEA 関係者(コメント等フィードバック) : Takashi Nomura、Keisuke Sadamori

コスト支援 : 日本政府およびオーストラリア政府

情報提供、フィードバック :	Harmeet Bawa	Hitachi Energy
	Hiroyuki Fukui	Toyota
	Yuya Hasegawa	Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan
	Marie Ishikawa	Toyota
	Oji Kuno	Toyota
	Hidenori Moriya	Toyota
	Hidetaka Nishi	Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan
	Motohiko Nishimura	Kawasaki Heavy Industries
	Takashi Nomura	Toyota
	Koichi Numata	Toyota
	Toshiyuki Sakamoto	Institute of Energy Economics, Japan
	Gerhard Salge	Hitachi Energy
	Yusuke Tsukahara	Asahi Kasei
	Akira Yabumoto	J-Power
	Makoto Yasui	Chiyoda
	Nozomi Yokoo	Toyota
	Shiho Yoshizawa	Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan