

サステナビリティ研究グループ

日本の挑戦: 2050年までに カーボンニュートラルを 達成するには

直ちに着手すべき理由

著者: 桑原 祐、デトレフ・モーア、山田 唯人、ベンジャミン・ザウアー



世界130を超える国々で、2050年までに温室効果ガス(GHG)の排出量ネットゼロを達成させることを目指し、排出量削減目標がすでに設定または検討されている¹。日本では、2020年10月の臨時国会で菅義偉首相が就任後初めて行った所信表明演説で、この目標に取り組むことを宣言した²。

2021年4月、菅首相は日本の中間目標として、2030年までに温室効果ガスの排出量を2013年度比で46%減を目指す³と表明した³。この目標値は、パリ協定のもとで2030年までに排出量26%減、2050年までに80%減を目指した従来目標からの大幅な引き上げとなる。これは、欧州連合(EU)やカナダなど温室効果ガスを大量に排出している国々がさらに意欲的な削減目標を掲げたことに同調した結果である。

日本の温室効果ガスの排出量は、中国、米国、EU、インド、ロシアに続き、世界で6番目に多い⁴。2017年には正味で1,230MtCO₂e(百万トンCO₂換算)を排出しており、排出量の大半を以下5つの部門が占めている: 電力(37%)、産業(36%)、運輸(17%)、建築物(10%)、農業(4%)⁵。

ネットゼロを目指す過程で、今後数年間は日本には有利な点が多数存在する。例えば、ドイツや米国などの他の工業大国と比べると、日本のエネルギー効率は全般的に高水準であり、GDP1,000ドル当たりのエネルギー消費量が少ない。また、広範囲に及ぶ鉄道インフラが自動車に代わる実用的な移動手段となっている。さらに日本の建築物のライフサイクルは欧州地域などと比較して大幅に短いため、新築物件に対して比較的容易に環境規制を課することができる。

加えて、日本では耐震のために建築物を改修する頻度が高いため、このような機会を利用して断熱改修工事や持続可能性の高い暖房・調理設備への交換などを行いやすい。また都市部のオフィスビルや住宅の大半は、数社の大手不動産企業が所有していることから、変革の取り組みを広範に展開しやすい。

一方で、日本特有の課題も存在する。日本の電力業界は他の先進国と比べて化石燃料への依存度が高く、脱炭素化が求められる部門にゼロカーボン電力を供給することが難しい。化石燃料への依存度が高い一因として、再生可能エネルギー発電設備の設置が容易ではないケースが多いことが挙げられる。例えば、沿岸海域の水深が深いために風力タービンの設置が難しく、内陸部は山岳地帯が多く開けた土地が乏しいため、風力や太陽光発電所の設置には限界がある。

さらに、日本は世界一人口の多い都市圏である東京都市圏、および大阪や名古屋といった人口過密な大都市を抱えていることから、電気自動車および水素自動車の普及に要する充電ステーションなどのインフラを官民が整備する際にも空間的な課題にも直面してしまう。

日本がネットゼロを目指すとした菅首相の宣言は世界的に注目され、その目標達成に向けて最適手段および詳細な実行計画を示す機会が訪れた。そこでマッキンゼーは、脱炭素化の目標と現実とのギャップを埋めるため、技術および投資の観点から実行可能性および経済合理性が最も高いと思われる選択肢に基づいて、日本が主要部門の脱炭素化を実現し得るシナリオを構築した。

日本の状況に応じたコスト最適化シナリオの構築

日本がネットゼロ目標を達成するシナリオは多数存在する。その中でマッキンゼーは、政策立案者や企業の意思決定者などの視点から、あらゆる投資に関する社会的割引率⁶を4%として「社会的にコスト最適化」できると考えられるシナリオをモデル化した。すべての部門を含むシステム全体、および2017年から2050年の時間軸全体のコストを最適化している。

¹ Net-zero coalition(ネットゼロ世界連合)ウェブページ、国連気候変動対策、2021年6月、www.un.org。

² 「第203回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説」首相官邸、2020年10月26日、www.kantei.go.jp

³ 「菅総理大臣の米国主催気候サミットへの出席について(結果概要)」外務省、2021年4月22日、www.mofa.go.jp

⁴ Net zero coalition ウェブページ、2021年

⁵ 土地利用、土地利用変化および林業部門(LULUCF)での吸収量を加味すると、全部門の総排出量が100%になる

⁶ 社会的割引率(SDR)は、将来の特定時点で生じるコストとメリットを現在価値化するために用いる交換比率である。気候変動政策を策定する際、将来の気候変動の影響抑制のために今日の社会がどの程度投資すべきかを判断するうえで重要な要素となる

マッキンゼーは、2つの主要な独自モデルにより、ボトムアップ分析を実施:

- **マッキンゼー脱炭素化シナリオ最適化モデル (DPO):** 75のセグメントにおいて600を超える技術を対象としたモデル。ここでは、各技術を個別のビジネスケース(投資と運用コスト項目、排出インパクト、エネルギー消費など)に関連付けている
- **マッキンゼー電力モデル(MPM):** 1時間ごとの電力需給シミュレーションを行い、これを基にコスト最適化した発電技術ミックスを導出する電力システムモデル

マッキンゼーが描く脱炭素化へのシナリオは、現在の政策的、社会的、技術的条件のもとで生じる事象を予測するものではない。また日本国内の各企業や個人が抱えるあらゆる個別の状況を網羅するものでもない。我々の意図は、政策立案者や経営幹部の計画立案に資する情報を提供し、政府が設定した削減目標は技術的に達成可能であることを示すこと、および目標達成に必要な変革が持つ意味合いを検証することである。

2030年にかけてのコスト最適化シナリオ

2030年までに温室効果ガスの排出量を2013年度比46%減とする日本の目標を達成するには、およそ645MtCO₂eを削減しなければならない。この取り組みに必要な技術がすでに成熟していることを踏まえると、今後10年間で平均34ドル/トン(tCO₂e; 二酸化炭素換算トン、以下同様)のコスト削減が期待できる。

部門別では、建築物部門が最も早期に脱炭素化を実現すると考えられる。この部門では、断熱改修工事を実施し、石炭ボイラーをヒートポンプに置き換えることで限界削減費用-57ドル/トンを実現し、排出量を2017年比で55%削減できるとみられる(図表1)。

建築物部門に次いで、2番目に脱炭素化を実現できるのは電力部門で、2030年までに排出量を42%削減(2017年比)し得る。その達成には石炭火力発電のコンバインドサイクル発電(CCGT)へのシフト、福島第一原発事故(2011年)以来停止している原子力発電所の再稼働、太陽光発電および洋上風力発電の発電量拡大が必要となるが、2030年にかけて限界削減費用は-18ドル/トンを見込める。

産業部門は、高温での製造プロセスおよび炭素集約度の高い素材を必要とすることから、依然として脱炭素化が難しい部門である。それでも需要の削減、石油に代わりガスを使用する工業用ボイラーの導入、さらに低温プロセスでのヒートポンプの活用などにより、2030年までに排出量を40%削減(2017年比)し、限界削減費用は-20ドル/トンとなる可能性がある。

運輸部門の削減量は最も少なく、2030年まででは32%の削減(2017年比)にとどまるとみられる。輸送手段を脱炭素化する技術は十分に成熟しているものの、バッテリー式電気自動車(BEV)の生産規模の拡大、充電インフラの拡充、乗用車や小型商用車の内燃機関(ICE)からBEVへの移行にはある程度の時間が必要になる。2030年までに限界削減費用は、-49ドル/トンと想定する。

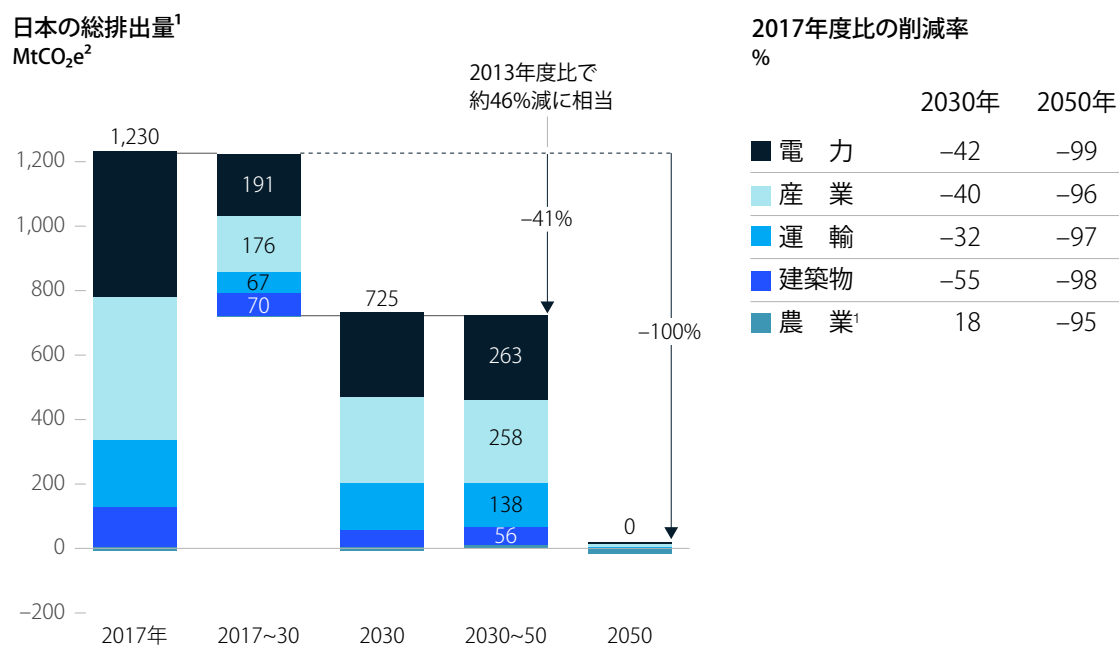
2030年から2050年におけるコスト最適化シナリオ

ここからが難所となる。比較的容易で安価な脱炭素化ソリューションをほとんど実施し尽くした後は、目標達成までに残された排出量を削減するには、より割高な技術に頼らざるを得なくなるとみられる。例えば産業部門では、製造会社は二酸化炭素回収・利用・貯留(CCUS)の導入や中高温の製造プロセスに使用する燃料を水素に切り替えることなどにより、限界削減費用は41ドル/トンまで上昇する。

電力部門では、再生可能エネルギーの発電能力が日本の限界に達した場合、その後もグリーン電力を供給するには水素やアンモニアなどの代替燃料を使用したり、火力発電所でCCUSを導入したりする必要が生じ

図表1

日本の脱炭素化シナリオ: 建築物および電力部門が早期に達成するとみられる



¹土地利用、土地利用変化及び林業部門(LULUCF)、または土地利用と森林からのCO₂隔離を含む

²百万トンCO₂換算

資料: 経済産業省、マッキンゼー分析

る。このような代替燃料を導入することにより、電力部門の限界削減費用コストは81ドル/トンまで上昇する。

建築物部門では、断熱改修工事や電化に加え、水素燃料ボイラーを設置する必要がある。これにより、建築物部門の限界削減費用は6ドル/トンまで上昇する。運輸部門は、全体的にコスト削減を期待できる唯一の部門であるが、乗用車と小型車の電化に加えて、長距離トラックを燃料電池車(FCV)へ、また航空機および船舶の燃料を水素燃料またはバイオ燃料へと切り替える必要がある。これらの移行を実施することにより、この部門では限界削減費用は-62ドル/トンとなると考えられる。

このような一連の取り組みの結果、全部門合計の限界削減費用は2050年までに36ドル/トンまで上昇する。2030年までは-34ドル/トンであったことを考えると、コストが大幅に増加することになる。脱炭素化に向けた移行期においては、日本の人口減少とプロセス・燃

料効率の向上により、一次エネルギーの投入量およびエネルギー消費量が減少するとみられる。また、石油と石炭の消費が著しく減少し、一次エネルギーの供給源として再生可能エネルギー、クリーン水素、アンモニアが取って代わるであろう(図表2)。ただし、再生可能エネルギーのみでは需要を完全に満たすことができないため、天然ガスは電源構成の一部に残ることになる。

実施が求められる主な施策

ネットゼロ達成に要する変革の規模を、実施すべき主な施策で示した(図表3):

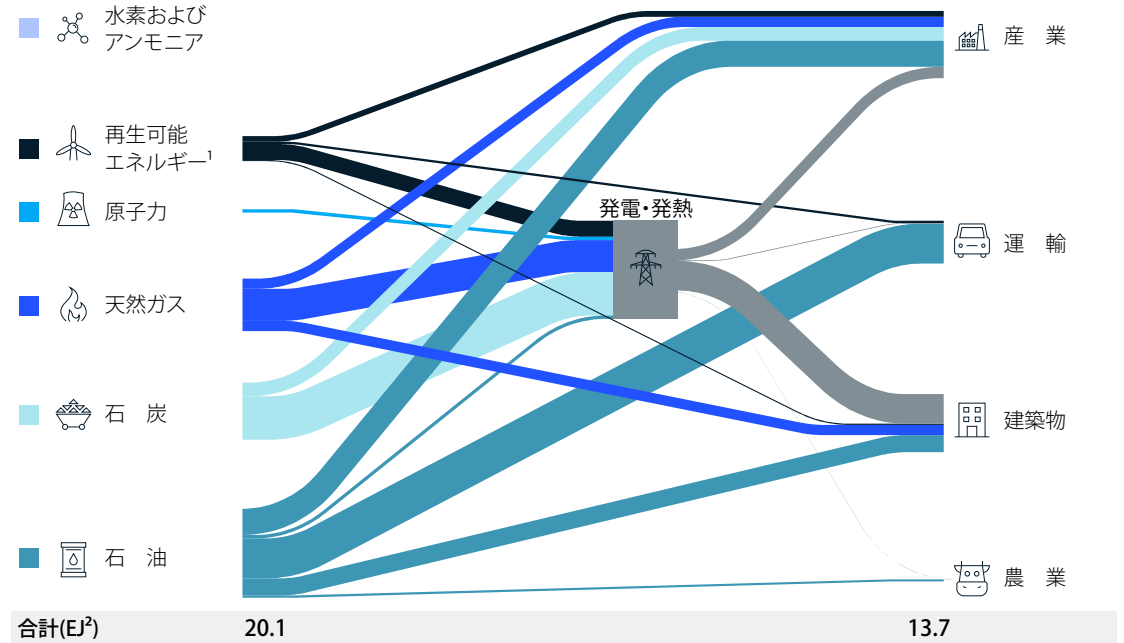
- 電力: 太陽光発電および風力発電の発電能力を、2050年までに現在の3倍となる275ギガワット(GW)まで拡大する必要がある。また、削減対策を講じない石炭火力発電所は2030年までに全廃することになる。

図表2

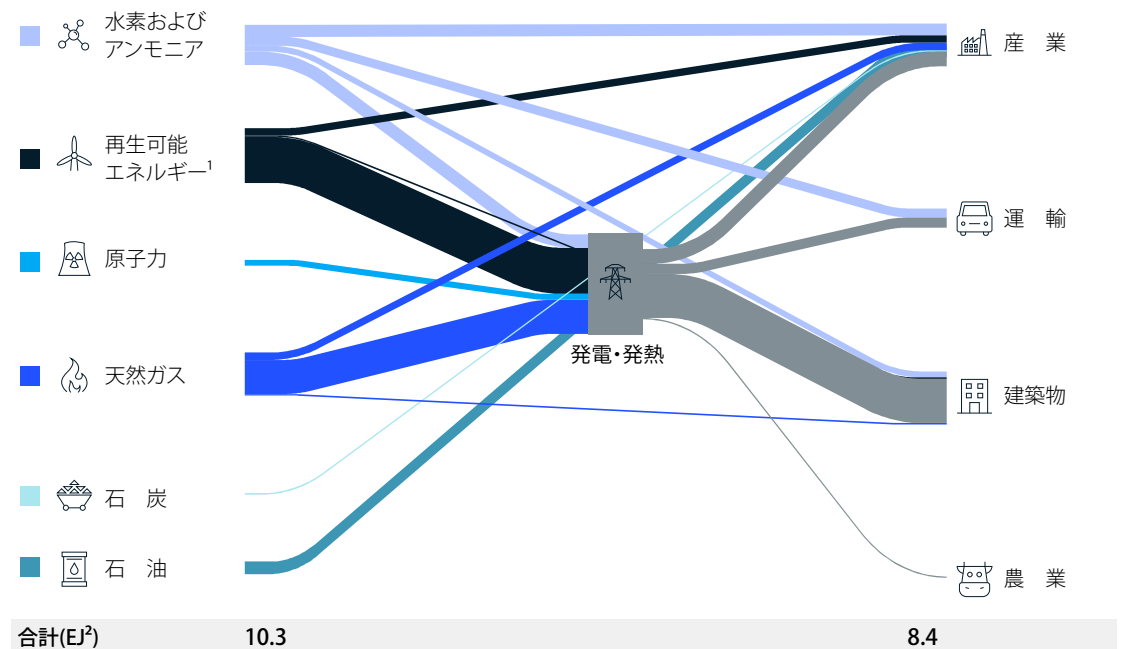
再生可能エネルギー、低炭素水素、アンモニアが主な一次エネルギー供給源となるが、天然ガスも引き続き有効活用されるとみられる

一次エネルギー供給から最終エネルギー消費までの流れの流れ

2017年



2050年



注: 水素およびアンモニアの国内での生産量と輸入量の比率によっては、一次エネルギーとしての水素およびアンモニアの供給量(輸入)を減らして、その減少分を天然ガスが補い、その天然ガスを二次エネルギーとして水素とアンモニアに変換させることも可能

¹水力、バイオマス、太陽光、風力、地熱発電を含む

²エクサジュール

資料: 経済産業省、マッキンゼー分析

- 産業:** 電力では中高温の製造プロセスに必要な熱を発生させることはできないため、産業部門では水素の活用により排出量の21%、CCUSの導入により排出量の18%を削減し得る。日本は水素サプライチェーンを構築し、高コストなCCUS技術に投資することが求められる。
- 運輸:** 2030年の排出削減目標を達成するには、2030年までに国内で新たに販売する自動車、トラック、バスの90%をBEVにする必要がある。そのためには、自動車業界ではBEVの生産を拡大し、各都市でも必要なインフラを整備していく必要がある。

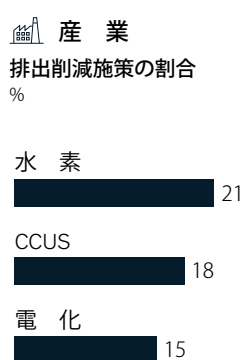
図表3

ネットゼロに到達するには、各セクターで大胆な施策が必要となる

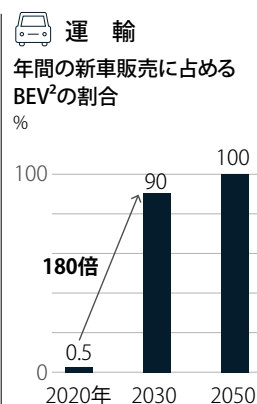
部門別、主な取り組み



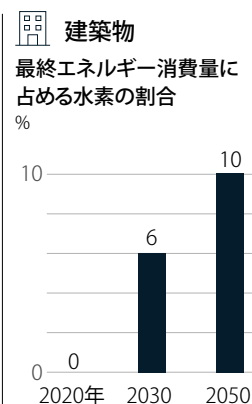
コストが低減し、立地制約を克服することにより、2030~50年で3倍に増加



水素およびCCUS³は、特に高温熱源を必要とするサブセクター(鉄鋼、セメント、化学など)で極めて重要



他の施策と比較して、相対的なコスト競争力の高さにより、2030年までに大幅に拡大

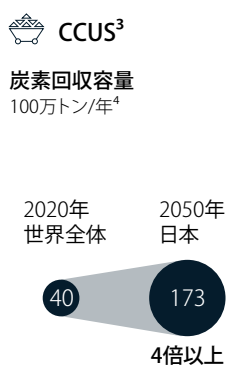


安価なゼロカーボン電力の供給が限定的であるため、水素が必要

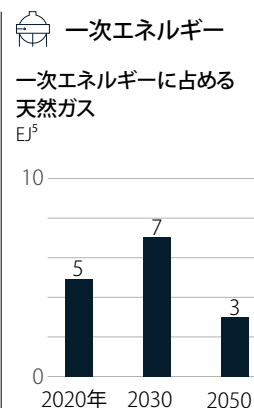
テーマ別、主なポイント



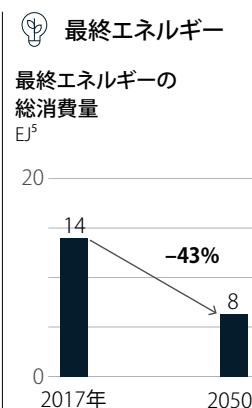
太陽光・風力には制約があるため、水素発電の実現・拡大が必要



CCUS³はCO₂貯留地および技術が確立されていないが極めて重要



天然ガスはネットゼロへの移行期および移行後の両方が必要



建築物の断熱性能および電化効率の向上、人口減少により低減

¹ ギガワット

² バッテリー式電気自動車

³ CO₂の回収・活用・貯留

⁴ 1トン = 2,205 ポンド

⁵ エクサジュール

資料: 経済産業省、マッキンゼー分析

- ー **建築物**: 断熱改修工事および空調・調理設備の電化だけでは建築物からの排出量をすべて削減することはできないため、建築物部門ではエネルギー総消費量の10%を水素に切り替える必要がある。この点からも、日本で盤石な水素サプライチェーンを構築することが更に重要となる。

これらの変革を実現するには、日本は2050年までに年間2,200万トンの水素が必要となり、現在の年間需要が200万トン未満であることを考慮すると大幅な増加となる。そのうちの31%を電力部門で発電用に消費することになる。さらに、CCUS技術を活用して2050年までに1億7,300万トンのCO₂回収が必要になる。これは、現時点における世界のCO₂回収量の4倍を超える規模である。これを実現するには、日本はCCUS技術に投資を行い、現時点ではまだ存在しない広大なCO₂貯留地のネットワークを構築しなければならない。

移行のための資金調達

マッキンゼーが構築したコスト最適化シナリオでは、ネットゼロを達成するには2050年までに総額10兆ドル(年間3,300億ドル)の投資が必要となる。このうち8兆ドルは、既存技術に投資している資金を振り向けることで確保できる。これに更に2兆ドル(年間平均700億ドル; 日本GDPの1~2%程度)を投資して、高コストな脱炭素技術やインフラ整備(送電網の拡張、BEV充電ステーション、水素およびアンモニアのパイプラインの整備など)に要する正味コストをカバーする必要がある。政府は、移行に要する資金調達を支援するにあたり、補助金の交付、炭素税の導入(税收を省エネ投資の補助に還元)、特別投資、民間部門からの資金調達など様々な施策を通じてアプローチできる。

代替シナリオ

マッキンゼーは、中心となるコスト最適化シナリオを構築する一方で、ネットゼロに到達するまでの道のりには数多くの変数が関与することから、代替シナリオをいくつか検討した。

1つ目の代替シナリオでは、総発電量に占める再生可能エネルギーの割合を、60%ではなくほぼ80%に設定する。これを達成するには、地質学的・社会的な制約を解消する必要がある。具体的には、陸上風力

発電施設の建設に反対する地域住民(いわゆる地域エゴ「NIMBY」)への対応、洋上風力発電に適した海域の確保に向けた漁業権などの調整、農地への営農型太陽光発電(ソーラーシェアリング)の導入などが挙げられる。発電量に占める再生可能エネルギーの比率が高まれば、水素やCCUSなどの高コスト技術を導入する必要性が低減することから、システムに関する限界削減費用は36ドル/トンから三分の一低減し、24ドル/トンとなる。

再生可能エネルギーの比率を高めるモデルに加え、マッキンゼーは原子力発電の寄与度を高めた電源構成もモデル化した。原子力発電所を再稼働することで新たに13GWの発電容量を確保(小型モジュール型原子炉を含む)できる。さらに電源構成に占める再生可能エネルギーの比率を高めると、限界削減費用を70%低減でき、11ドル/トンとなる。このシナリオでは、日本のエネルギー自給率が88%にまで上昇し、これまで燃料を常に海外からの輸入に依存してきた日本にとっては大きな成果となる。しかし一方で、原子力への依存度を高めると、福島第一原発事故のような災害が発生するリスクも増すことから、難しい選択となる。

2つ目の代替シナリオは、生産プロセスの中で低付加価値かつエネルギー集約型の部分を海外にアウトソーシングする方法である。例えば、水素コストが低い国から粗鋼を輸入し、国内で仕上鋼を生産することなどである。このような方法をとることで再生可能エネルギーの課題を軽減することができ、産業部門における限界削減費用を41ドル/トンから34ドル/トンに低減できる。

ただし、このアプローチで効果が生まれるのは産業部門に限られるため、全体の限界削減費用としては、コスト最適化シナリオの36ドル/トンから8%のみ低減した33ドルとなる。また産業部門でこのようなプロセスの見直しを行う際には、委託した生産プロセスの部分について、その国で完全に脱炭素化されていたことが保証されなければならない。

直ちに実施すべき取り組み

2050年までにカーボンニュートラルを達成するには、日本の政策立案者、規制当局、企業、個人が一体と

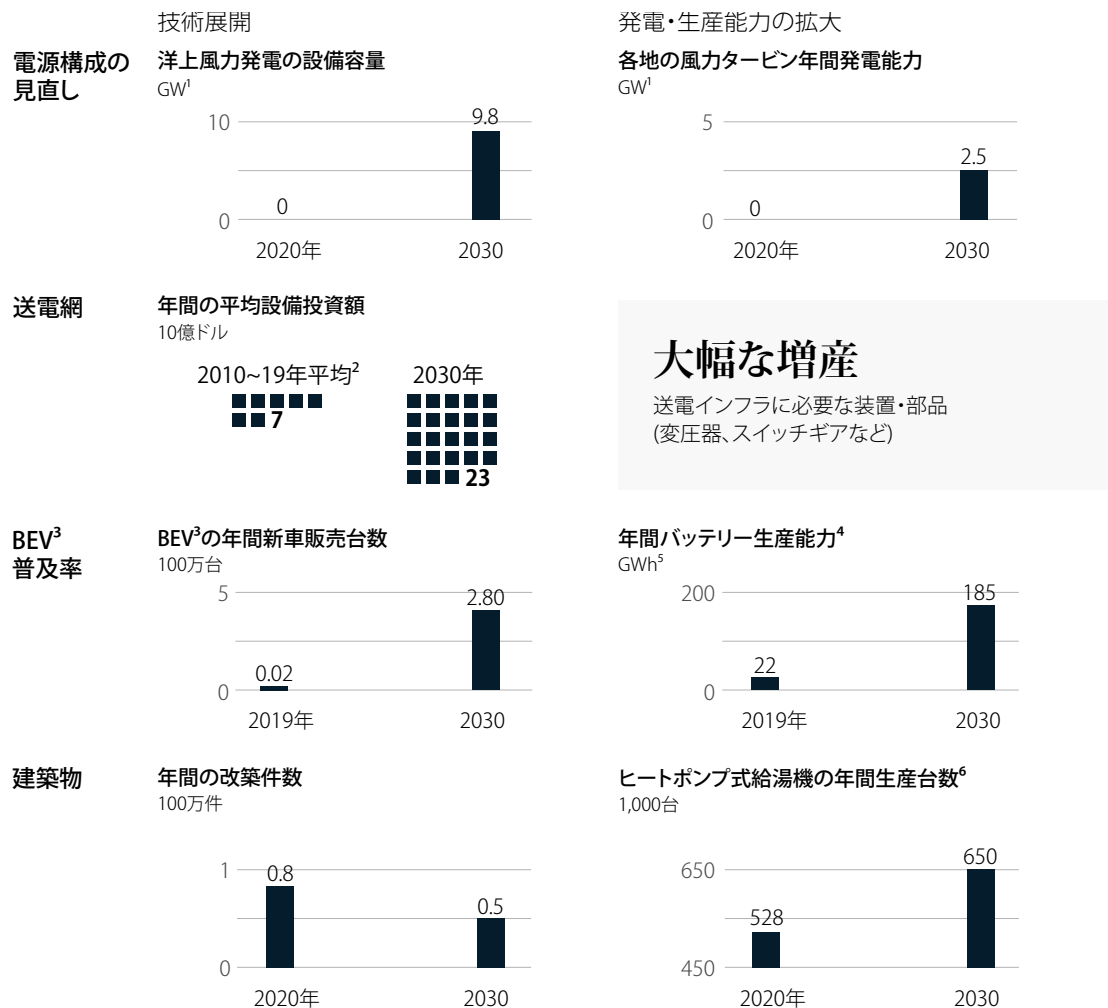
なっており、取り組みを行う必要がある。2030年に排出削減の中間目標を達成し、さらに2050年に向けた基盤を確立するには、以下に示す取り組みを即時に実行する必要がある：

1. **脱炭素化に向けた4つの施策展開**：今後数年間で、日本は「BEVの普及促進」、「建築物のエネルギー効率向上」、「電源構成の見直し」、「送電網の強

化」などの取り組みを加速させなければならない（図表4）。2030年までに公道を走る自動車の30%、新車販売の90%をBEVにするには、政府が野心的な目標を設定し、インセンティブを充実させる必要がある。また電池メーカーも新たな需要に応えるため、今後10年間で生産量を8倍に拡大していかなければならない。

図表4

2030年の中間目標を達成するには、技術およびインフラの展開を加速させる必要がある



¹ギガワット

²送電、変電、配電に対する総設備投資額の年平均値、日本の電力10社およびJ-Powerによる報告(2010~19年)

³バッテリー式電気自動車

⁴2030年時点で新BEV1台当たり80kWhのバッテリー容量を想定。国内でのあらゆるバッテリーの生産を想定

⁵ギガワット時

⁶住宅用および商業用の両方を含む。2020年の数値は一般社団法人日本冷凍空調工業会の国内出荷データによる

資料：経済産業省、マッキンゼー分析

2030年までに再生可能エネルギーを電源構成に組み込むには、特定地域における風力発電容量の入札枠の拡大、新築および改築する建築物の屋上に太陽光パネルを設置することの義務付け、さらに石炭火力の段階的廃止計画の策定およびこれに対応するインセンティブを強化することなどが必要となる。また、サプライチェーンでは風力タービンなどの増産が求められる。

最後に送電網の整備に対する年間投資額について、現行の70億ドルから、2030年にかけてその3倍以上の230億ドルまで増やす必要がある。政府は、発電能力の拡大に直接投資を行い、電力会社、再生可能エネルギー開発企業、消費者間でのコスト配分を明確化する必要がある。

2. **戦略的選択:** 限界削減費用を全体的に低減させるには、政策立案者は電源構成に占める再生可能エネルギーおよび原子力の割合を決定し、それぞれの電力をまかなう手段を策定しなければならない。例えば、電力構成における再生可能エネルギーの比率を高めるには、洋上風力発電および太陽光発電の発電能力を拡大することを目的とした法律を制定させることなどが考えられる。
3. **長期視点での技術開発:** 日本は、CCUSおよび水素の活用に必要なインフラの整備についてはゼロからのスタートとなる。このため、2050年までにネットゼロを達成するには、直ちに一連の取り組みに着手する必要がある。政府は取り組みの基礎固めとして、CO₂貯留地の調査および最終選定、長期にわたるインフラ整備および技術開発への財政

的支援、民間投資に対する税額控除や排出権取引などのインセンティブ提供が必要となる。また機器製造業者、電力会社、石油・ガス企業などがコンソーシアムを創設し、政府と連携して一連の技術開発を進めていくべきである。さらに企業は、海外資源への投資を通して、CCUSの普及加速およびブルー水素、グリーン水素、アンモニアの生産量を拡大していかなければならない。

4. **日本産業界の競争力維持:** 日本は、産業活動をエネルギー需要が低い産業やプロセスに集中させるべきである。例えば自動車メーカーであれば、バッテリーやインバーターの製造を海外にアウトソーシングし、それらを輸入して国内でBEVの組み立てを行うことなどである。

さらに環境に配慮した未来へ

日本が脱炭素化を実現するには、莫大な投資に加え、事業活動の再構築、産業内での重点領域の再考が必要となる。しかし、このような施策を迅速に展開することで、日本は水素ガスタービン、浮体式洋上風力・太陽光発電技術、BEV製造など多様なグリーンテクノロジー（環境技術）の部門で世界をけん引するグローバルリーダーとしての地位を獲得できる可能性が生まれる。これらの取り組みにより、多数の企業や個人に新たな事業機会が創出され、さらには気候変動対策における日本の役割を果たすことにもつながると考える。

マッキンゼーが構築したコスト最適化シナリオの詳細については、本テーマに関するレポートの総合版をご覧ください。

執筆者について: 桑原 拓およびデトレフ・モア (Detlev Mohr) はマッキンゼー東京オフィスのシニアパートナー、山田 唯人はパートナー、ベンジャミン・ザウアー (Benjamin Sauer) はアソシエイトパートナー。

本稿の執筆にあたっては、Tae Ahn、Nafie Bakkali、Sumika Davidson、Alison Hightman、小西 啓為、Kritika Rastogi、Manuel Ross、柴田 陽子、Wei Xin、山崎 寧々、佐藤 愛季の各位に多大な協力を得た。執筆者一同よりここに感謝の意を表す。

Designed by McKinsey Global Publishing
Copyright © 2021 McKinsey & Company. All rights reserved.