

第7章: 風力エネルギー

7.1 はじめに

風力エネルギーは、数千年にわたって様々な用途で使用されてきた。しかし、商業規模での発電のための風力エネルギー利用は、技術の進歩と政府の支援によって 1970 年代になって初めて可能になった。多くの様々な風力エネルギー技術が様々な用途で利用可能になっているが、気候変動緩和に関する主な風力エネルギーの利用は、地上（「陸上」）または海や淡水域（「洋上」）に設置された大規模な系統連系風車による発電である¹³[7.1]。

風力エネルギーは、短期的（2020 年まで）及び長期的（2050 年まで）に温室効果ガス排出量を削減するための大きなポテンシャルを有している。2009 年末までに導入された風力発電の設備容量は、世界の電力需要の約 1.8%を満たす温室効果ガス排出の削減と風力発電普及拡大の障壁を軽減するための意欲的な取り組みが行われれば、2050 年までにその割合は 20%を超える可能性がある。陸上風力発電はすでに多くの国で急速に普及しており、エネルギー供給システムへの風力発電導入率の増加を阻むような克服不可能な技術的障壁は存在しない。加えて、平均風速は場所によって大きく異なるものの、世界のほとんどの地域に大規模な風力エネルギーの普及を可能とする大きな技術的ポテンシャルが存在する。良好な風資源を有する地域の中には、関係する環境影響を考慮しなくても、すでに風力エネルギーのコストが現在のエネルギー市場価格と競争力を持っている地域もある。しかし、世界のほとんどの地域において、急速な普及を確実にするための政策措置が必要である。しかし、陸上及び洋上風力発電技術は継続的に進歩し、風力発電のコストはさらに削減され、その温室効果ガス排出量緩和ポテンシャルも向上すると予想されている [7.9]。

7.2 資源ポテンシャル

風力エネルギーの世界的な技術的ポテンシャルは一定ではなく、技術の状況と風力エネルギー導入に対する他の制約の状況に関係している。しかし、世界の技術的ポテンシャルが現在の世界の発電電力量を上回ると実証する世界の風資源の評価は増えてきている [7.2]。

世界の風力エネルギーの技術的ポテンシャルを推定するための標準化された方法は開発されていない。データ、手法、前提、さらには技術的ポテンシャルの複雑な比較の定義に至るまで多種多様である。AR4 では、陸上風力発電の技術的ポテンシャルを 180EJ/年（50,000TWh/年）としている。他の開発の制約を比較的大きいと見た場合の、風力エネルギーの世界の技術的ポテンシャルの推定値は、低い値では 70EJ/年（19,400TWh/年）（陸上のみ）から高い値では 450EJ/年（125,000TWh/年）（陸上及び沿岸）までの幅となっている。この範囲は、2008 年の世界の発電の約 1～6 倍に相当するが、研究のいくつかは古い前提に基づいていること、洋上風力発電が除外または部分的にしか含まれていない研究があること、方法論的に、或いは計算上の制限があることにより、技術的ポテンシャルが低く評価されている可能性がある。洋上風力発電のみの技術的ポテンシャルの推定値の幅は、比較的浅い水域及び沿岸での利用のみを考えた場合、15～130EJ/年（4,000～37,000TWh/年）となっている。さらに、浮体式風車設計に基づく深水域での利用も考えた場合、より大きい技術的ポテンシャルが利用可能である [7.2.1]。

既存の推定値が風力エネルギーの技術的ポテンシャルを低く評価しているか高く評価しているかに関わらず、また、同資源の評価方法がさらに進まなければならない必要があるとしても、資源そのものの技術的ポテンシャルは世界中の風力エネルギーの普及を制限する要因になる可能性は低いということは明らかである。代わりに、風力エネルギーのコストに関連する経済的制約、送電アクセスと運用統合に関連する制度的な制約とコスト、及び社会的受容と環境影響に関連する問題は、世界の技術的ポテンシャルの絶対的な限界に突き当たるよりかなり前に、成長を制限する可能性が高い [7.2.1]。

加えて、世界のほとんどの地域において、大規模な風力エネルギーの普及を可能にする大きな技術的ポテンシャルが存在している。しかし、風資源は世界中に均等に分散していてもいるわけではなく、人口密集地周辺に集中しているわけでもないため、風力エネルギーは各国の需要を均等に満たすわけではない。図 TS.7.1（世界の風資源マップ）は、北アメリカ（OECD 加盟国）や東欧・ユーラシアの陸上風力発電

¹³小型風車、高高度風力発電、及び風力エネルギーの機械的推進力利用については、第7章で簡潔に検討している。

の技術的ポテンシャルは特に大きいことが分かっているが、アジア（非 OECD 加盟国）及びヨーロッパ（OECD 加盟国）の地域の中には技術的ポテンシャルがやや限られている地域もある。ラテンアメリカ及びアフリカの特定の地域では技術的ポテンシャルが限定的なことを示しているが、これらの大陸の他の地域では大きな技術的ポテンシャルを持っていることを示している。一般に、最近の詳細な地域的な評価は、風資源の規模を過去に推定された評価よりも大きく見積もっている [7.2.2]。

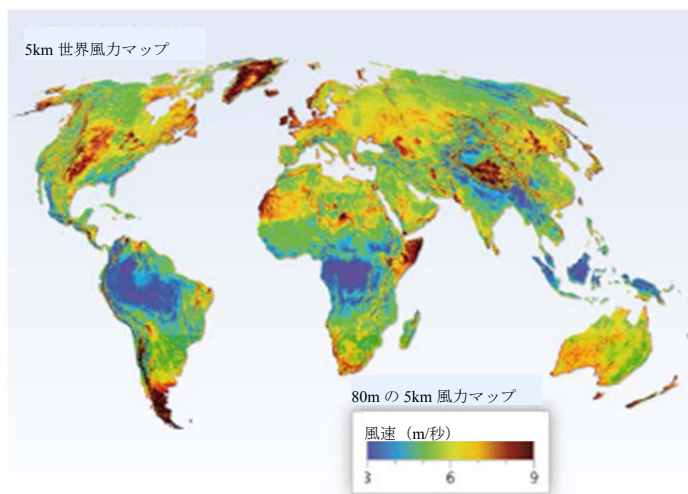


図 TS.7.1: 5km×5km の解像度の世界の風資源マップの例 [図 7.1]

世界的な気候変動によって、風資源の地理的分布や経年変動・年内変動、風資源の質、風車の設計や運転に影響する局地的な気候現象の範囲が変わる可能性がある。これまでの研究では、今世紀中にヨーロッパ及び北アメリカの大部分で複数年にわたって年間平均風速が最大±25%以上変化する可能性は低いことが示されており、北ヨーロッパの研究では、複数年にわたる年間平均風エネルギー密度は現在の値から±50%の範囲に留まる可能性が高いことが示されている。世界のその他の地域を対象とした研究はほとんどない。この分野の研究は初期段階であるため、さらなる研究が必要である。しかし、これまでの研究では、世界的な気候変動によって風資源の地理的分布が変化する可能性はあるものの、その影響が風力エネルギー普及の世界全体のポテンシャルに強く影響するほどの可能性は低いとされている [7.2.3]。

7.3 技術及び応用

最新の商用の系統連系された風力発電は、小型で簡素な機械から大型で非常に洗練された装置へと発展を遂げている。科学的、工学的な専門知識と進歩に加え、改良された計算ツール、設計基準、製造方法及び運転保守手順はすべて、これらの技術開発を支えてきた [7.3]。

風から電気を作るためには、流れる空気の運動エネルギーを電力エネルギーに変換する必要がある。この変換を行うための費用対効果の高い風車及び発電所の設計が、風力エネルギー産業の工学的な課題である。様々な風車構成が研究されてきたが、商業的に利用可能な風車は、主にタワーの風上方向に3枚の翼（ブレード）が取り付けられた水平軸の装置である。風力発電の均等化発電原価（LCOE）を下げるため、一般的な風車のサイズは大幅に大型化しており（図 TS.7.2）、2009 年において世界に設置されている多くの陸上風車は定格容量が 1.5～2.5MW である。2010 年時点では、一般の陸上風車は 50～100m のタワーに設置されている。ロータ直径は 50～100m のものが多いが、ロータ直径及びタワー高が 125m を超える商用機も運転されており、さらなる大型機も開発中である。陸上風車技術はすでに商用的に大規模な生産及び普及の段階に入っている [7.3.1]。

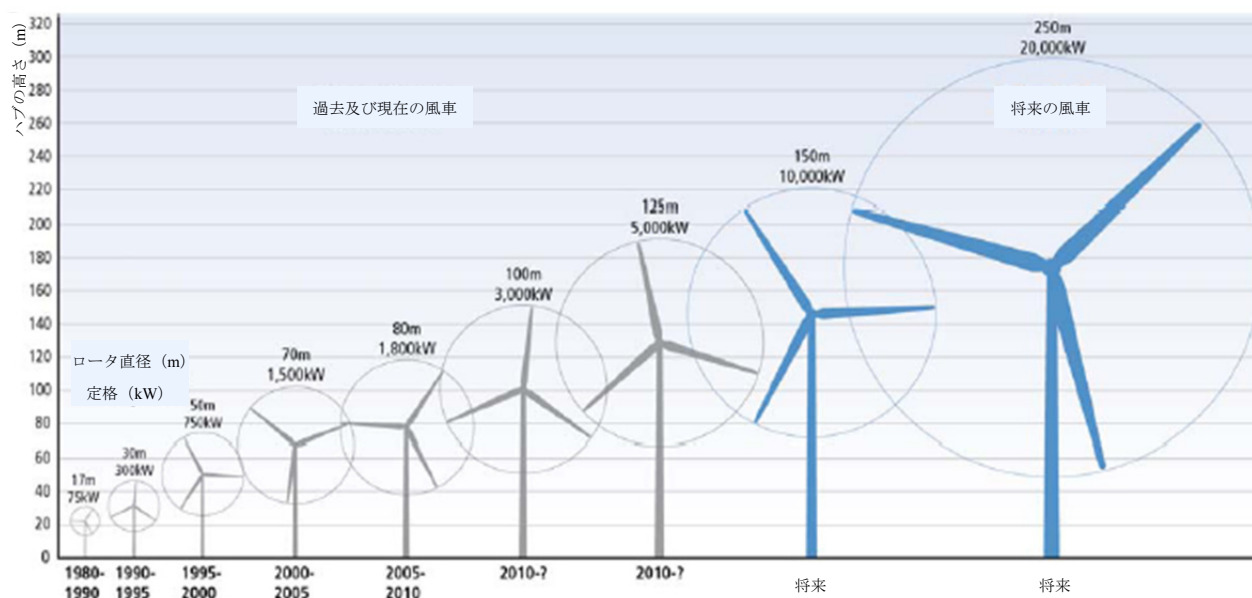


図 TS.7.2: 一般的な商用風車のサイズの発展[図 7.6]

洋上風力発電技術は陸上のものよりも成熟しておらず、投資コストは高い。また、洋上風車は相対的に技術の成熟度が低く、また保守及び補修に大きな課題がある為、一般に発電所の稼働率は低く、運用・保守コストは高くなっている。しかし、ヨーロッパでは洋上風力発電に大きな関心が寄せられており、他の地域でも関心が高まっている。洋上風力発電の開発に対する主な動機は、技術ポテンシャルの限界や他の土地利用との計画、立地上の衝突の為、また陸上風力発電開発が制限される場所において、新たな風資源を入手出来るからである。他の動機としては、海上に存在する高い品質の風資源、さらに大きな風車を利用し、大規模経済の新たな獲得の可能性があること、陸上よりも大規模な発電所を建設でき、発電所並みの規模の経済を得られること、遠く離れた陸上風力発電へアクセスするための、新たな長距離間陸上送電インフラの必要性が減少する可能性、などが挙げられる。これまで洋上風車技術は、いくつかの変更や特殊な自力発電所の基礎部分を使用するだけで、陸上の設計と非常に似たものであった。経験を積むにつれ、水深はより深くなることが予想され、強い風にさらされることの多い場所を利用するようになる。特に洋上での用途のための風力エネルギー技術は、洋上市場が拡大するにつれ、広く普及していく。また、この分野ではより大型の5～10MWの風車が支配的になること予想されている [7.3.1.3]。

風車設計の進化に伴い、設計と試験方法の改善が国際電気標準会議（IEC）規格で体系化されてきた。認証機関は、風車、構成要素、または風力発電所全体が安全性、信頼性、運転性能、及び試験に関する共通のガイドラインを満たしていることを認証するため、規格との整合性を実証する追跡可能な文書を提供する設計・試験機関を認定している [7.3.2]。

電力システムの信頼性の点からみると、風車の重要なポイントは電力変換システムである。現在の風車の場合、可変速度機が市場を占めており、有効・無効電力に加えフォルトライドスルー（FRT）機能の供給が可能になっているが、発電機自体の慣性応答（すなわち、風車が系統電力のインバランスに応じて出力を増減すること）は利用できない。風車製造者は後者については限度を認識しており、様々な解決策を模索している [7.3.3]。

7.4 市場及び産業発達の世界的・地域的状況

風力エネルギー市場は大幅に拡大し、技術と産業について商業的・経済的実現可能性を示してきた。しかし、風力エネルギーの拡大は、限られた地域のみ集中しており、さらに拡大するには、今まで特に風力エネルギーがあまり普及していない地域及び洋上地域において、新しい政策措置が必要となる可能性が高い [7.4]。

風力発電は主流の電力産業の 1 つとして、急速に確立されている。1999 年末の累積容量 14GW から、10 年間に世界の風力の設備容量は 12 倍になり、2009 年末までに約 160GW となった。その容量の大部分は陸上に導入されたものであり、洋上での導入は主にヨーロッパで見られ累計 2.1GW に達している。2009 年末までに導入容量が最も大きな国は、アメリカ (35GW)、中国 (26GW)、ドイツ (26GW)、スペイン (19GW)、インド (11GW) である。2009 年に新たに導入された風力発電所の総投資コストは 570 億 US ドル (2005 年) であり、2009 年における世界の直接雇用は約 500,000 人と推定されている [7.4.1, 7.4.2]。

ヨーロッパとアメリカの両方において、風力発電は電力容量を増加させる主な新しい電源である。2009 年には、アメリカ及び EU における総新設容量の中で、約 39% が風力発電によるものであった。中国では、2009 年の総新設容量の 16% が風力発電によるものである。世界規模では、2000 年から 2009 年に新たに設置された純追加容量約 11% が新設の風力発電によるものであり、2009 年単独ではこの数値はおそらく 20% を超えていた。結果として、多くの国々のそれぞれの電力系統において、風力発電の年間普及率が比較的高くなり始めている。2009 年末までに、デンマークは年間電力需要の約 20% に相当する電力が風力発電容量によって供給可能になっており、この数値はポルトガルでは 14%、スペインでは 14%、アイルランドでは 11%、ドイツでは 8% となっている [7.4.2]。

これらの傾向にもかかわらず、風力発電はまだ全世界の電力供給のうち比較的小さな割合しか占めていない。2009 年末までに導入された風力発電の設備容量の総量は、平均的な年で世界の電力需要のおよそ 1.8% に相当する。さらに、風力発電産業のヨーロッパ市場への依存性は次第に小さくなる傾向にあり、最近ではアメリカ及び中国で大きな拡大が見られるが、市場にはまだ地域的な偏りが残っている。ラテンアメリカ、アフリカ、中東、及び太平洋地域は、それぞれの地域における風力エネルギーの技術的ポテンシャルは大きい、風力発電容量の導入は比較的低いままである (図 TS.7.3) [7.4.1, 7.4.2]。

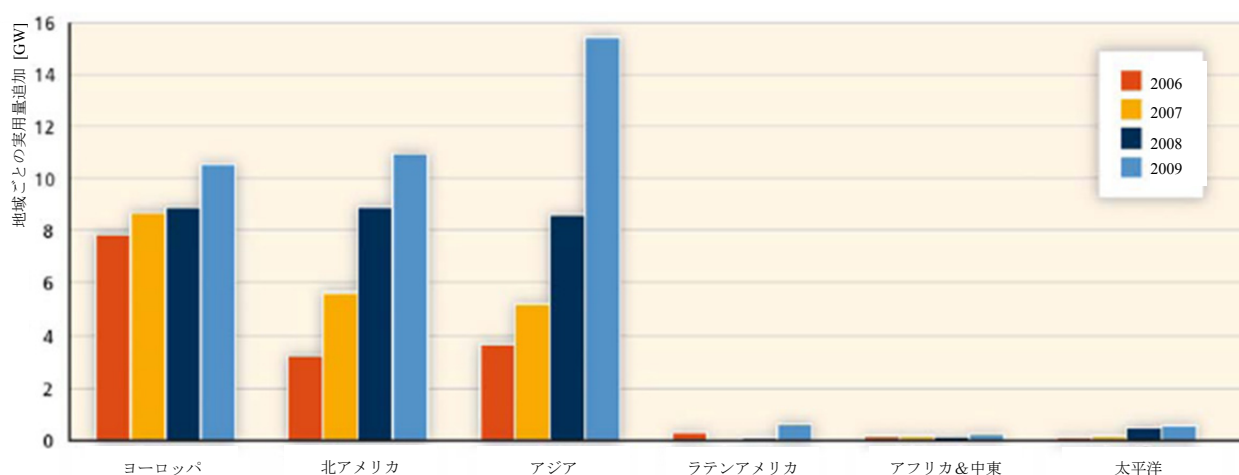


図 TS.7.3: 地域ごとの年間風力発電容量の追加 [図 7.10]

注: 図で示されている地域は、この調査で定義されたものである。

風力エネルギーの普及にあたっては、多くの課題を克服しなければならない。その課題は、以下のものが挙げられる。エネルギー市場価格と比較した際の風力発電の相対的コスト（少なくとも環境への影響が内部化されておらずコストに反映されていない場合）、風力発電の変動性の影響についての懸念、新規送電インフラの敷設に対する課題、面倒で時間のかかる計画立案、洋上風力発電技術の技術的進歩の必要性和高いコスト、現在まで十分な風力エネルギーの普及を経験したことがない地域における制度的及び技術的知識の不足などである。結果として、その成長は政府のさまざまな政策に影響を受ける [7.4.4]。

7.5 系統連系問題の短期的課題

風力発電の普及に伴い、電力系統への連系が問題となってきた。系統連系問題の性質及び規模は、

既存の系統の特性及び風力発電の導入率に依存する。さらに、第8章で取り上げるように、系統連系問題は風力エネルギー特有のものではない。しかしながら、主に一部のOECD諸国での解析や運用実績の結果、風力発電導入率が低～中程度の場合（ここでの定義では電力の平均総需要の20%まで）¹⁴、風力発電の連系には、一般に克服不可能な技術上の障壁はなく、経済的にも維持出来ることが分かっている。同時に、導入率が低～中程度であっても一定の（時には電力系統特有の）技術的・制度上の課題も解決する必要がある。風力発電のエネルギー統合及びそのコストへの問題は、第8章（8.2節）で詳細に分析するように、風力発電の導入に伴い高まるであろう。また、導入率が高い場合でも、柔軟性の向上と需給バランスの維持は、技術的・制度上の追加的な選択肢を利用出来るかどうかに依存し、それによって有利になる場合もある [7.5]。

風力発電には、統合問題として、電力システムの信頼度を保った経済的な運用のための計画・運用の視点から検討しなければならない特徴がある。この特徴とは、風資源の地域的な性質、陸上及び洋上風力発電に新たな送電線が必要になる可能性があること、様々な時間スケールで風力発電の出力が変動性をもつこと、他の発電方式に比べ出力の予測可能性が低いこと、などが挙げられる。集合化された風力発電の出力の変動性と不確実性は、地理的に分散している様々な風力発電所の出力の相関性にある程度依存する。一般に、距離的に遠い風力発電所の出力ほど相関は低く、短時間（分単位）の変動性も長時間（数時間）に比べ相関は低くなる。風力発電の出力予測も短時間になるほど精度が高く、複数の発電所を考慮する場合も同様である [7.5.2]。

将来の電力システムが信頼度を保って経済的に運用を行うために、新しい送電インフラのための詳細な系統計画が行われている。これを行うためには、コンピュータによるシミュレーション・モデルで風力発電の特性を正確にモデリングする必要がある。さらに、風力発電の設備容量の増加に伴い、風力発電所が電力系統の運用性や電力品質の維持に能動的に関わる必要性が出てきている。また、平時及び偶発事故時に風力発電所が電力システムに悪影響を与えることを防ぐために、系統連系の技術基準が実施されている。一方で、送電アデカシー評価によって風資源の立地性を考慮しなければならない。また、送電線への投資額をそれほど多く必要としない質の低い風資源を利用する場合のコストと、送電系統の拡張が必要な質の高い風資源を利用する場合のコストを比較したトレードオフについても、検討しなければならない。風力発電の導入率が低～中程度であっても、質の高い風資源を持つ地域で陸上及び洋上風力発電を大量に追加可能であれば、送電系統の大規模な新設・更新の必要がある場合もある。特定の地域の法規制の枠組みにもよるが、送電系統の拡張にあたり、制度上の課題が大きくなる可能性がある。最終的には、設計者は発電アデカシーへの風力発電の寄与と、電力系統の長期的な信頼度を評価するため、風力発電の出力変動を考慮することが必要になる。方法も目的も地域によって異なるが、発電アデカシーへの風力発電の寄与は通常、特に電力需要が大きい期間など供給不足のリスクが高い期間の風力発電の出力に影響される。一般に発電アデカシーへの風力発電の寄与の限界値は風力発電の導入率が増加するとともに低下するが、適切な送電容量が確保される場合、集合化された広域の風力発電所ではこの低下が緩和する可能性がある。風力発電の発電アデカシーに対する寄与が（化石燃料に比べて）比較的低い場合、大量の風力発電が導入された電力系統は、そうでない電力系統に比べ同規模のピーク時電力需要に対応する総公称容量が大きくなると考えられる。この発電容量の一部はあまり頻繁に発電されないが、それが故に他の発電方式と併せた電源構成は（経済的な見地から）「ベース電源」から柔軟性のある「ピーク電源」及び「ミドル電源」へとシフトする傾向になると予想される [7.5.2]。

風力発電独特の性質は、電力系統の運用に対して重要な点を示唆している。風力発電は非常に低い限界運転コストで発電出来るため、発電可能な時に需要に応じて発電される。他の発電方式は風力発電の利用可能量を差し引いた需要（すなわち、正味の需要）に対応するように配電される。風力発電の導入量が増加するに従い、風力発電の変動性により正味の需要の変化量が全体的に増加し、正味の需要の最小値は低下する。こうした傾向を加味すると、風力発電の出力が増加し、別の電力市場への連系線の送電容量に制限があると、電力卸価格は低下する。他の発電所は、風力発電が存在しない場合に比べ、より柔軟性のある方法での運用が求められる。風力発電の導入率が低～中程度であれば、分単位で変動性が増えることは比較的少ないと予想される。重要な運用上の課題は、1～6時間の時間スケールで出力変動を管理することにある。風力発電の予測を電力系統の運用に組み入れることで、他の発電に求められる柔軟性を減らせる。しかし、精度の高い予測が実現出来たとしても、系統運用者は柔軟性のある発電技

¹⁴ この導入率は、比較的短期的な風力発電の系統連系の必要性を、電力系統の変化についての国際的、長期的、及び非風力に特化した議論（第8章で提示）から緩やかに分離するために選択された。

術の利用、風力発電の出力抑制、電力系統間の協調と連系の強化など、能動的に需給バランスを維持するために幅広い戦略を持つ必要がある。巨大な市場のデマンドレスポンス、エネルギーの大量貯蔵技術、電気自動車の大規模な導入とそれに関連する蓄電充放電制御を通じた系統柔軟性への寄与、風力発電の余剰エネルギーの転用による燃料生産や地域熱供給、風力発電所の立地状況の地理的分散性などは、風力発電の導入率が増加するに伴いその便益に寄与する。課題はあるものの、世界中の様々な場所での実際の運用経験から、風力発電が大きく寄与している電力系統は、信頼度を保った運用が出来ることが実証されている。2010年にデンマーク、ポルトガル、スペイン、アイルランドの4か国では風力発電はすでに年間需要電力量の10%からおよそ20%に達している。特に瞬間導入率が高い時の系統事故に関しての経験は限られているが、風力発電が多様な地域や電力系統で展開されれば風力発電の統合に関する新たな知見が得られると予想される [7.5.3]。

実際の運用経験に加え、風力発電に必要な送電線と電源の拡充について、幅広い方法論と多様な目的のもとに多数の優れた研究が遂行されており、このほとんどがOECD諸国を主に対象としている。これらの研究は様々な方法論を採用しており目的も異なっているが、ほとんどのケースで風力発電を最大20%まで統合する場合、そのコストはさほど大きくないが無視出来る程ではない、という結果が示されている。特に、風力発電の導入率が低～中程度の場合（再び、OECD諸国の主に一部の国では）、電力系統の変動性と不確実性を管理し発電アデカシーを確実にする追加コストと、風力発電の導入による新規送電線の追加コストは系統により異なるが、一般に0.7～3USセント/kWh（2005年のレート。以下同じ）になると示唆している。統合に関する技術上の課題とコストは、風力発電の導入率に伴い増加することが明らかとなっている [7.5.4]。

7.6 環境及び社会的影響

風力発電は、温室効果ガスの排出を削減する（また、すでに削減しつつある）大きな可能性を持つ。さらに、様々な発電方式の影響を相対的に評価する試みによると、一般に風力発電の環境フットプリントは比較的小さいことが示されている [9.3.4, 10.6]。しかし、その他の産業活動と同様に、風力エネルギーは、環境や人間の活動と幸福にも若干の悪影響を与える可能性があり、多くの地域行政や政府が、こうした影響を低減するための計画立案、立地要件を定めてきた。風力エネルギーの普及が進み、大規模な風力発電所が検討され始めると、すでに顕在化している懸念は深刻化し、そして新たな懸念が生ずる場合もある [7.6]。

風力エネルギーによる環境上の大きな便益は化石燃料の代替であるが、こうした便益を推定することは、電力系統の運用特性や、新規発電所への投資の決定などの原因により、いくぶん複雑である。短期的には風力発電の増加で化石燃料を用いた火力発電所を代替しても、長期的に見れば、新規の発電所が必要とされる場合もあり、風力発電の存在が新規に建設される発電所の種類に、影響を与える可能性がある。風車の製造、輸送、設置、運用、解体による影響も検討を要するが、有効な文献を包括的に検討した結果、上記の段階で使用されたエネルギー及び生じた温室効果ガスの排出量は、風力発電所の寿命内の発電されたエネルギー及び回避された排出量に比べ少ないことが分かっている。風力エネルギーによる温室効果ガス排出量は、ほとんどの場合で8～20g CO₂/kWhと推測され、エネルギー回収時間は3.4～8.5ヶ月である。さらに、風力発電の出力変動性の管理がその温室効果ガス排出上の便益を大きく損なうことは認められていない [7.6.1]。

他の研究では、風力発電の開発による地域の生態系への影響が検討されている。陸上及び洋上風力発電所を建設・運用することで、鳥やコウモリの衝突や生息地や生態系の変化により、野生生物に影響が生ずる。これらの影響の性質や規模は場所や種に固有である。洋上風力発電の場合、海底資源、漁業関係者、海洋生物への影響を広く検討する必要がある。また、風力発電所が地域の気候に与える潜在的影響についても研究が進められている。風車への衝突による鳥やコウモリの死亡確率は、環境上の懸念として最も認知されている。これらの影響がどの程度自然や個体群に影響を与えるかについては、今も不明な点が多々ある状況だが、鳥類の死亡確率は0.95～11.67羽/MW/年と報告されている。猛禽類の死亡確率の絶対数はかなり少ないが、一部のケースで特別な懸念が示されている。洋上風力発電の増加に伴い、海鳥への懸念も高まっている。コウモリについては大規模な調査は行われていないが、0.2～53.3匹/MW/年であり、風力発電所がコウモリの個体群に与える影響は、現代の特有な問題である。衝突による鳥やコウモリの死亡確率についての規模と個体群の結果は、人間の活動によって引き起こされる他の死亡確

率の観点からも検証出来る。既存の風力発電所における鳥の衝突死の数は、その他の人為的な鳥の死亡原因より桁違いに少ないと考えられる。陸上の風力発電所は現在、鳥の個体群で有意な減少をもたらしていないことが示されている。他の電源方式も、衝突、生息地の変化、世界的な気候変動への寄与により鳥やコウモリに影響を与えるということが示されている。これらの種に固有な個体群への影響や考えられる緩和を評価する方法は改善の必要がある [7.6.2]。

風力発電所は、その地域の回避や移動、生息地の破壊や生殖の減少により、生息地や生態系にも影響を与える可能性がある。さらに、洋上開発が進むにつれ、風力発電所が海洋生物に与える影響にも焦点が当たっている。洋上風力発電が海洋生物に与える影響は、設置、運用、撤去解体段階で異なり、場所特有の状況に大きく左右され、プラスにもマイナスにもなりうる。潜在的なマイナスの影響としては、水中の音響と振動、電磁場、物理的破壊、及び侵入生物種の形成などがある。しかし、物理的構造により繁殖地や住処が作られる場合もあり、人工岩礁または人工魚礁の機能を果たす。これらの影響と長期的並びに個体群レベルの結果に関する追加的な研究が必要とされたが、その影響は陸上の風力発電と比べて不相応に大きいようには見えない [7.6.2]。

風力エネルギーは市民から一貫して広く受容されていることがさまざまな調査から示されている。しかしながらこの追い風を普及につなげるには、多くの場合、発電所が立地する地域のコミュニティや政策決定者の支持が必要になる。結局のところ、生態系への懸念以外にも、風力発電所が地域のコミュニティに与える影響について多数の懸念が示されることが多い。おそらく最も重要なのは現代の風力発電技術には大規模な構造物がつきものであるという点であり、風車は景観上目立つことが避けられない。他に懸念される影響として、地上や海上の利用（レーダ干渉の可能性など）、騒音や点滅などの近隣への影響、不動産価値への影響がある。社会的・環境的な懸念の種類や程度には関係なく、そうした懸念に対処することは、いかなる風力発電計画やプラント発電所立地プロセスの成功にも不可欠な部分である。また、地域の住民に対するメリットも不可欠な一面である場合が多い。これらの懸念の一部は容易に緩和可能だが、景観への影響などは解決がより難しい。これらの残りの影響の性質及び程度をより深く理解する取り組みと共に、こうした環境を最小化し緩和する取り組みは、風力発電開発の増加と併せて遂行される必要がある。実際、計画やサイト選定に関する規制は管轄によりかなり大きく異なる。国や背景事情によっては、これらのプロセスが風力エネルギーの普及を阻む要因になっている [7.6.3]。

7.7 技術の改良及びイノベーションの見通し

過去 30 年にわたり風車の設計にもたらされたイノベーションにより、コストが大幅に削減されてきている。官民の研究開発プログラムもこれらの技術的な進歩を大きく後押しし、システムや構成部品の技術改良だけではなく、資源量の評価、技術標準、電力系統への連系、風力発電出力予測などでも向上が見られた。1974 年から 2006 年にかけて IEA 加盟国における政府の風力エネルギー関連の研究開発予算は、エネルギー関連の研究開発支出総額の 1% に相当する 38 億 US ドル (2005 年) だった。2008 年には、風力エネルギーに対する OECD の研究費の合計は、1 億 8000 万 US ドルであった [7.7, 7.7.1]。

陸上風力発電技術はすでに成熟し大規模に製造・導入されているが、風車設計の手順改善、より効果的な材料の利用、信頼性とエネルギー効率の向上、保守運用コストの低減、構成部品の長寿命化といった着実な進歩が引き続き期待されている。さらに、洋上風力発電が脚光を浴びるにつれ技術上の新たな課題が発生し、より急速的な技術イノベーションが可能となる。風力発電所と風車は、コストと性能を最適化する統合設計アプローチを必要とする複雑なシステムである。発電所レベルでは、検討事項には、特定の風況に対する風車の選択、風車の立地、間隔、設置手順と運転保守の方法、及び電力系統への連系が含まれる。これまでの研究により、技術進歩が投資コスト、年間発電電力量、信頼性、運転保守コスト、風力発電の統合に変化を与える多くの領域があることが確認された [7.3.1, 7.7.1, 7.7.2]。

構成部品の点では、様々な取り組みが行われつつある。例えば、大型クレーンの必要性を低減し必要な材料を最小化する最新型のタワー、設計改良による最新型のロータと翼、材料や製造方法の改良、エネルギー損失の低減、風車制御及び状態監視の改善による稼働率の向上、ドライブトレイン・発電機・パワーエレクトロニクスの改良、製造工程の学習改善が挙げられる [7.7.3]。

また、いくつかの領域で進められるものとして、運転保守戦略、設置及び組立計画、支持構造物設計、新型風車コンセプトなども含む大規模風車の開発などで、これらは洋上風力発電にさらに固有なもので

ある。特に、基礎構造のイノベーションによって、深水域にアクセスする可能性が生まれるため、風力エネルギーの技術的ポテンシャルは向上する。洋上風車は、これまで主に深さ 30m までの比較的浅水域の、本質的にはタワーの延長であるモノパイル構造上に設置されてきたが、重力式構造のほうが一般的になった。これらの方式と浮体式支持構造など深水域での展開により適した方式などを図 TS.7.4 に示す。さらに、洋上風車の場合、風車の規模は陸上ほどの制限はなく、洋上の基礎のコストが比較的高いため、風車の大型化が迫られている [7.7.3]。

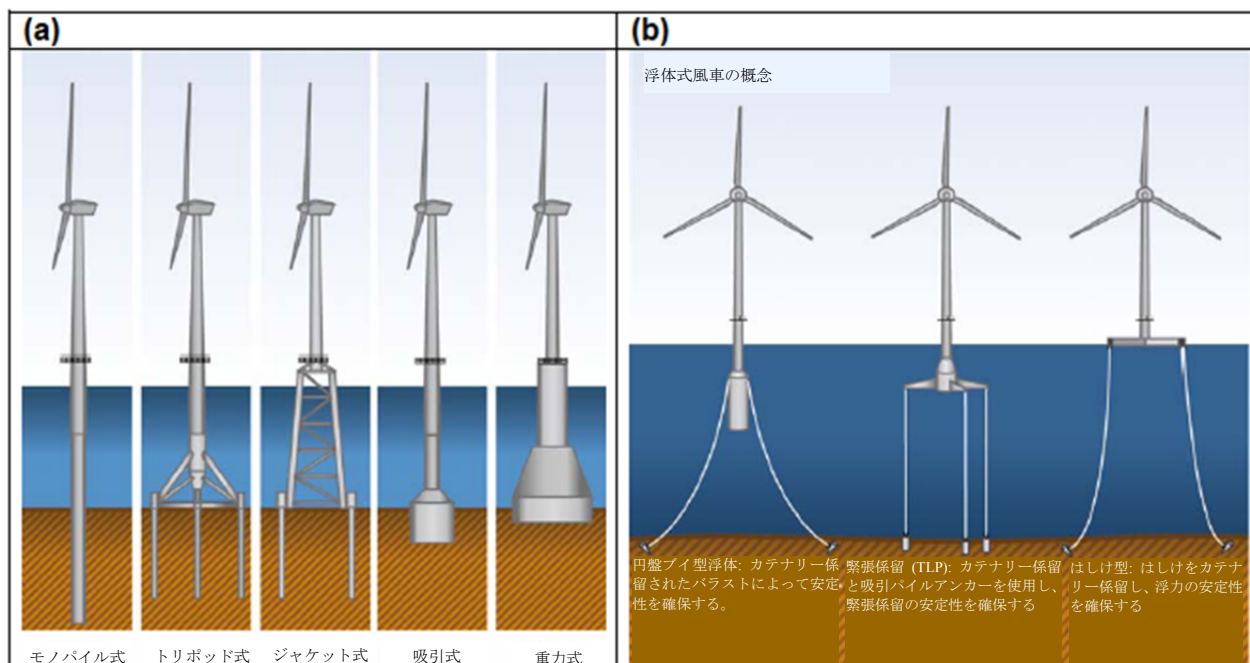


図 TS.7.4: 洋上風車の基礎設計：(a) 短期的コンセプト、(b) 浮体式洋上風車のコンセプト [図 7.19]

風車は、最小限の管理で様々な厳しい条件に耐える設計になっている。このため、信頼性と安全性、コスト効率の高い新しい風車による発電を促進し、風力発電所の立地と設計をさらに最適化するためには、風車の運転環境に対する理解を深めることに多大な努力が必要となる。設計ツールの改良を進め、たとえば、空力弾性、非定常な空気力学、空力音響学、最新の制御システム及び大気科学などの領域における研究は、設計ツールの改良を進め、技術の信頼性を高めてさらなる設計のイノベーションを推し進めることになる。このような分野の基礎研究は、風車の設計、風力発電所の性能推定値、風資源評価、短期的風力発電出力予測、風力発電の大規模な普及が地域の気候に与える影響の推定値、潜在的な気候変動効果が風資源に与える影響を向上させるのに役立つ[7.7.4]。

7.8 コストの動向

風力発電のコストは 1980 年代以降に大幅に低減したものの、世界の大半の地域では、風力発電を迅速に普及するための政策措置が現在でも必要である。ただし、良質な風資源に恵まれた一部の地域では、風力発電のコストは現在のエネルギー市場価格に対して競争力を持っている。さらに、今後見込まれる技術的發展によって、コストはさらに低下すると予想される [7.8]。

陸上及び洋上の風力発電所の均等化発電原価は、年間発電電力量、投資コスト、運転保守コスト、資金調達コスト、発電所の想定耐用年数という 5 つの主要な要因の影響を受ける¹⁵。1980 年代から 2004 年頃にかけて陸上風力発電所の投資コストは低下したが、2004～2009 年の間では投資コストは増加した。その主な原因は、労働及び資材投入コストの高騰、風車製造業者とその供給事業者の利益幅の増加、相対的なユーロ高、風車ロータの大型化とハブ高さの増加である。2009 年に全世界で設置された陸上発電所における平均投資コストはおよそ 1,750US ドル (2005 年) /kW であり、多くの発電所で 1,400～2,100US ドル (2005 年) /kW の範囲内であった。2008 年における中国の投資コストは、約 1,000～1,350US ドル

¹⁵ 他のエネルギーと比較した風力発電の経済競争力は、補助金や環境の外部性などの要因も取り込む必要もあるが、本節では対象にしていない。

/kW である。洋上風力発電所の場合、陸上風力発電所よりはるかに実績が少なく、その投資コストはサイトごとに大きく異なっている。それでもなお、これまで建設された洋上発電所の投資コストは陸上に比べ 50～100%以上高くなっており、保守運用コストも洋上のほうが高い。洋上風力発電のコストに影響を与える要因としては、2004～2009 年の陸上コストの増加と共通の要因もあれば、洋上特有のものもある。最近建設または計画された洋上風力発電所では、投資コストは約 3,200～5,000US ドル/kW とされている。洋上風力発電所の建設水域は徐々に深くなりつつあるが、それにもかかわらず、稼働中の発電所の大多数は比較的浅水域に建設されている。風力発電所の性能はサイトに大きく左右され、主に局所的風況に依存するが、風車の最適設計、性能、稼働率や保守運用手順の効率性にも影響を受ける。このため、性能は立地により異なるものの、一般的には年々向上しており、洋上風力発電所は風資源量に恵まれるケースが多い [7.8.1～7.8.3]。

Annex II の標準的な方法論及び Annex III のコスト・性能データに基づき、大量かつ様々な入力パラメータの組み合わせを用いて、陸上及び洋上風力発電所の LCOE が算出されており、陸上は 3.5～17US セント/kWh、洋上は 7.5～23US セント/kWh の範囲と計算されている [1.3.2, 10.5.1, Annex II, Annex III]。

図 TS.7.5 は、さまざまな組み合わせと範囲のパラメータを用いて算出した陸上及び洋上風力発電の LCOE を示す。この結果から、LCOE は想定投資コスト、発電電力量、割引率により大きく異なることが分かる。陸上風力発電には 2009 年に建設された発電所の推定値が、洋上風力発電には 2008～2009 年にかけて建設された発電所及び 2010 年代前半に竣工予定の発電所の推定値が、それぞれ用いられている。好風況の陸上の平均 LCOE はおよそ 5～10 US セント/kWh であり、風況の悪い地域では 15 US セント/kWh を超える可能性がある。洋上のコスト推定値は不確実性が高いが、比較的浅水域に最近建設された発電所及び建設予定の発電所の場合、典型的な LCOE は 10～20US セント/kWh 超と推定されている。利用可能な陸上風資源量が限定的であれば、洋上風力発電所は陸上発電所に競合出来る可能性もある [7.8.3, Annex II, Annex III]。

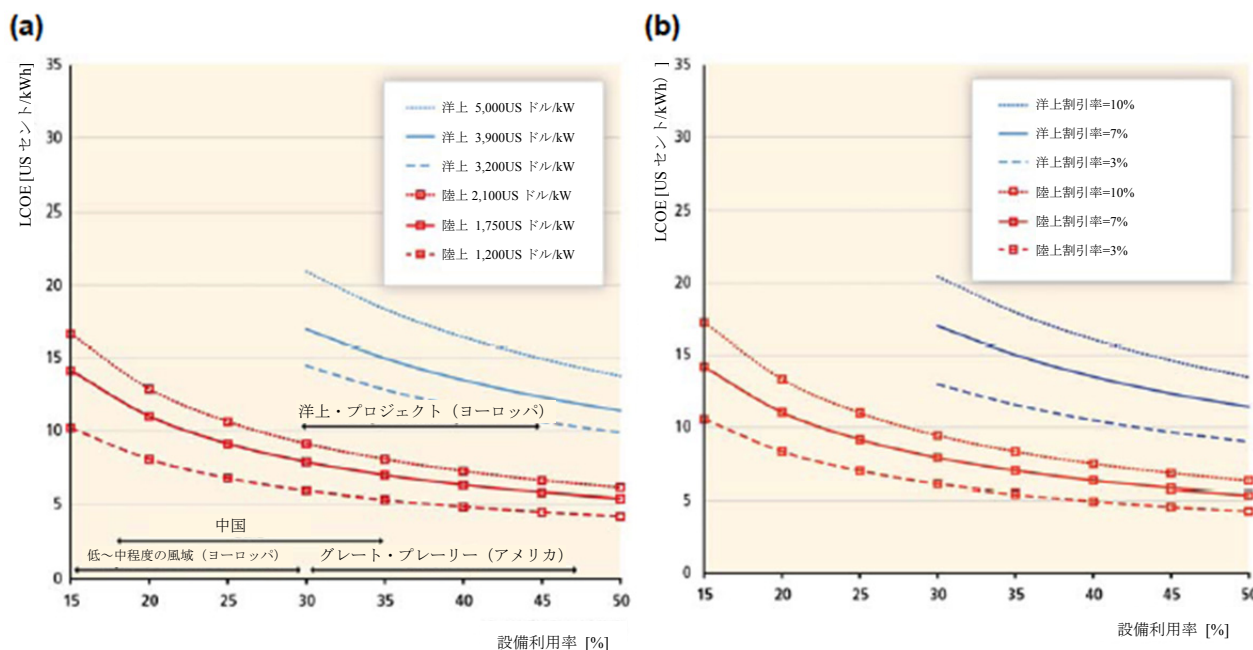


図 TS.7.5: (a)設備利用率と投資コストの関数(※)としての、また(b)設備利用率と割引率の関数(※※)としての陸上、洋上風力風車の均等化発電原価(2009 年) [図 7.23]

注:

※割引率は 7%と想定。

※※投資コストは陸上 1,750US ドル (2005 年) /kW、洋上 3,900US ドル (2005 年) /kW と想定。

学習曲線の推定値、工学モデル、専門家の判断を様々な組み合わせた陸上及び洋上風力発電のコスト軌道予測が、多くの研究で行われている。これらの研究では、予想の開始年、方法論的アプローチ、風力発電導入の想定レベルにばらつきがある。それにもかかわらず、本文献調査の結果、研究開発及び試験・

経験の継続によって陸上風力発電の LCOE が 2020 年までに 10～30%低下することが裏付けられている。洋上風力発電については、市場要因で短・中期的にはコスト増になるというシナリオを確認した研究もあるが、2020 年までに 10～40%コスト削減が見込まれることが期待されている[7.8.4]。

7.9 導入ポテンシャル

風力エネルギーの成熟度とコストを考えると、風力エネルギーの活用が進めば、温室効果ガス排出は短期的には大幅に減少する可能性がある。この可能性は、技術的ブレークスルーにも左右されず、電力系統への風力発電の連系を妨げる技術上克服不可能な障壁も存在しない。この結果、多くの研究では、2000 年から 2009 年にかけて急増した風力発電の発電電力の増加の傾向は、短・中期的にも継続することが予想されている [7.9, 7.9.1]。

さらに、多くの研究では、主に温室効果ガス濃度安定化シナリオの中で風力エネルギーの長期的ポテンシャルの評価が行われている [10.2, 10.3]。文献調査 (164 例の長期シナリオ) と図 TS.7.6 で示すように、風力エネルギーは温室効果ガス削減に対し世界で大きな長期的役割を果たし得る。2050 年までの風力エネルギーの寄与は、温室効果ガス濃度の安定レベルが 440～600ppmCO₂ 及び 440ppm CO₂ 以下の場合、中央値が 23～27EJ/年 (6,500～7,600TWh/年) であり、75%のシナリオでは 45～47EJ/年 (12,400～12,900TWh/年) に増加し、最も高いシナリオでは 100EJ/年 (31,500TWh) を超える。この値を実現するには、中間値を示すシナリオの場合で 2050 年までに世界の電力供給の約 13～14%、75%のシナリオの場合では 21～25%を風力発電で供給する必要がある [7.9.2]。

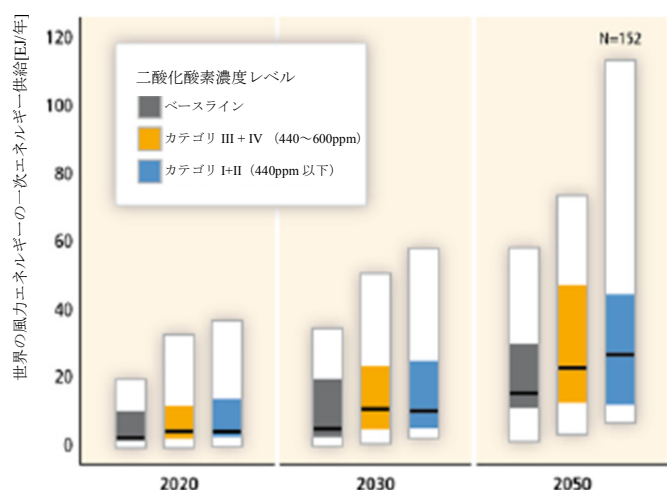


図 TS.7.6: 長期的シナリオにおける世界の総供給電力量に占める風力発電のシェア（中央値、25～75% の範囲、及びシナリオの結果の全範囲。色分けは 2100 年の大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく。数値の基礎となるシナリオの具体的な数を右上の角に示す）[図 7.24]。

全世界での風力エネルギー利用のこの上限値を達成するためには、適正規模の経済支援政策や予測だけでなく、各地域での風力エネルギーの活用拡大、一部地域における洋上風力発電の信頼性の向上、送電の制約や統合に対応する技術的・制度上の解決策、社会的・環境的懸念への対処も必要である。陸上風力発電では、追加的な研究開発が漸進的なコスト低下につながることを期待され、洋上風力発電技術では研究開発費の増強が特に重要になる場合もある。結局、良好な風資源量ポテンシャルを持ち、これからの風力エネルギーの導入が期待される市場では、知見と技術移転の双方が風力発電所の早期の建設を促すことにつながる可能性がある [7.9.2]。

第 8 章: 現在、将来のエネルギーシステムへの再生可能エネルギーの統合

8.1 序論

この数十年、多数の国々においてエネルギー供給システムが発展し、電力、ガス、熱、輸送のエネルギーキャリアが効果的でコスト効率の良い配送を行い、最終消費者に有益なエネルギーのサービスをもたらしている。再生可能エネルギーが高い割合を持つ低炭素な未来 (low-carbon future) への移行には、より柔軟な電力系統、地域冷暖房スキームの拡大、再生可能エネルギー由来のガスや液体燃料の供給システム、エネルギー貯蔵システム、新しい輸送手段、建物における革新的なエネルギー配送・制御システムなどといった、新しい技術やインフラに対する大きな投資が必要となる。再生可能エネルギーの統合が進めば、先進国、開発途上国ともに、コミュニティの規模に関係なくあらゆるエネルギーのサービスの提供につながる可能性がある。長期的には、システムの設計と統合を通じ、国家、地方、地域レベルや、個々の建物での再生可能エネルギーの割合を増加させていくにあたり、技術的な制約は、あるとしてもごくわずかと言っている。これは、現在のエネルギー供給システムにかかわらず、エネルギーが豊富にあるコミュニティかどうかとも関係ない。それでも、その他の障壁は克服する必要がある [8.1, 8.2]。

変換技術の効率を高め、ロスを減少させ、最終消費者へのエネルギーのサービスに関するコストを低下させる目的で、エネルギー供給システムは引き続き発展している。再生可能エネルギーによる冷暖房、輸送燃料、電力の割合を拡大するには、再生エネルギーの普及率を高めて供給増につなげるべく、現行の政策、市場、既存のエネルギー供給システムを長期的に変える必要もあるだろう [8.1]。

あらゆる国々は何らかの再生可能エネルギー資源を利用可能であり、多くの地域ではその量は大きい。これらの再生可能エネルギー源の多くは、化石燃料や原子力発電とは異なる特性がある。太陽光や海洋エネルギーなどの一部のエネルギー源は幅広く分布するのに対し、大規模な水力発電などその他のエネルギー源は分布に制約があるため、統合の選択肢はより集中的になる。一部の再生可能エネルギー源は変動性があるため、予見可能性には制約がある。その他のエネルギー源も、エネルギー密度が低いか、固体、液体、ガスの化石燃料によっては技術特性が異なる。こうした特性のため、特に再生可能エネルギーの割合が高まった際、統合が難しくなり、システムコストの追加負担が生じる可能性がある [8.1, 8.2]。

第 8 章の展開によると、再生可能エネルギー源は、エネルギーキャリアで消費者に供給を行うエネルギー供給網への統合により多様なシェアで利用される可能性があり、輸送、民生、製造業、農業といった最終消費部門への直接の統合により利用される場合がある (図 TS.8.1 参照) [8.2, 8.3]。

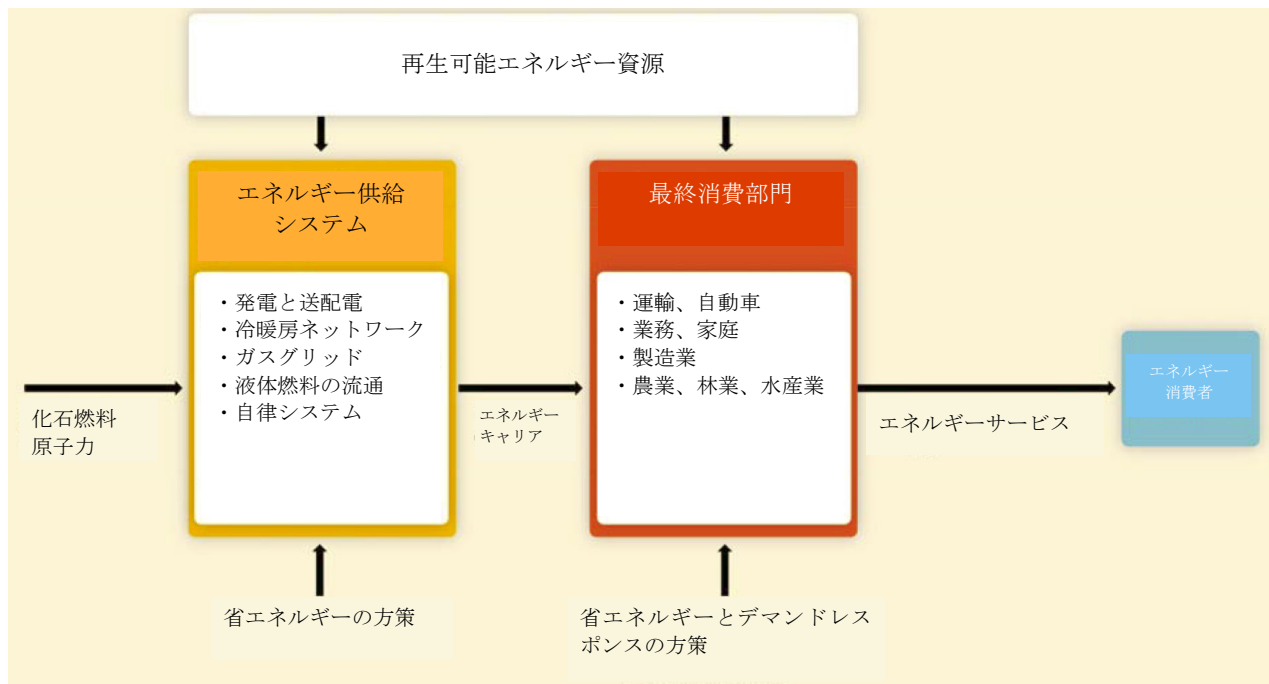


図 TS.8.1: エネルギーのサービスの提供に向けた、エネルギー供給システムまたはオンサイトでの最終消費部門に対する再生可能エネルギーの統合の道筋 [図 8.1, 8.1]。

エネルギー供給システムへの再生可能エネルギーの、より高度な統合をするための一般的な要件と個別の要件は十分理解されている。しかし、再生可能エネルギーの統合上の課題は、適用場所により異なる傾向や、統合の選択肢に対する追加コストの分析を一般的に示すことには限界があり、導入シナリオ作成のためには今後も調査が必要である。たとえば、エネルギー供給システムの分散化の傾向が、熱や電力の集中的な供給の将来のコストやインフラの新設を回避する可能性にどのような影響を与えるかは、明確になっていない [8.2]。

化石燃料を主に使用する集中エネルギーシステムは、固体燃料、液体燃料、ガス燃料、電力、熱といった多様なエネルギーキャリアを通じてコスト効率の良いエネルギーサービスを利用者に提供すべく発展してきた。再生可能エネルギー技術の導入のためには、関連する技術的、経済的、環境的、社会的な障壁を克服して、再生可能エネルギー技術を既存システムへ統合する必要がある。分散的エネルギーシステムの登場は、再生可能エネルギー導入の新たな機会となる可能性もある [8.1, 8.2]。

地域によっては、再生可能エネルギーによる電力が熱と輸送への需要を電力で対応するようになった場合、将来のエネルギー供給の主役になる可能性がある。電気自動車の並行開発、電力による暖冷熱供給（ヒートポンプを含む）の増加、柔軟な需要反応サービス（スマートメータの利用を含む）、その他の革新的な技術は、この電力化を進める要因となり得る [8.1, 8.2.1.2, 8.2.2, 8.3.1～8.3.3]。

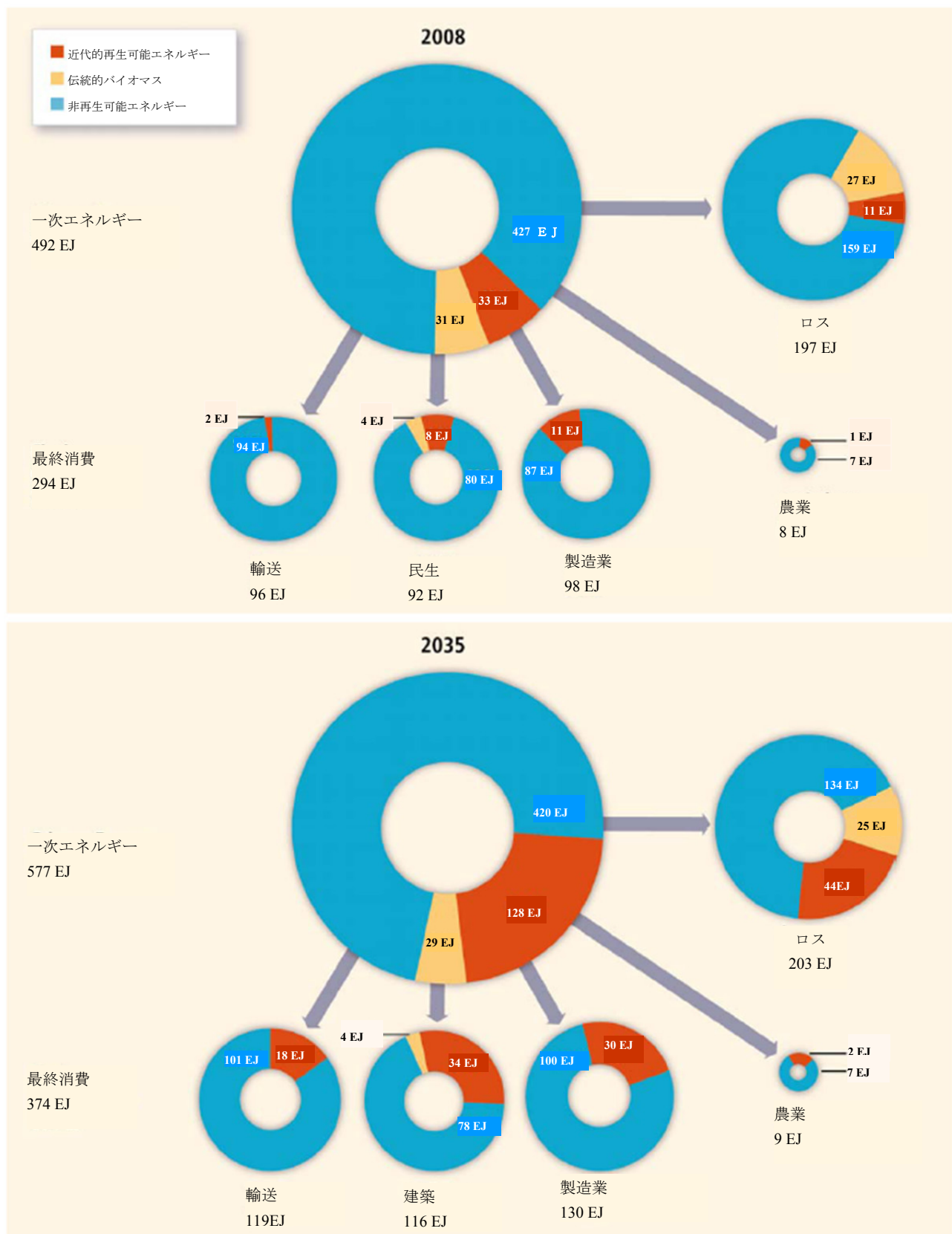


図 TS.8.2: 2008 年における輸送、民生（伝統的バイオマスを含む）、産業、農業の各部門における一次エネルギーと最終消費エネルギーにおける再生可能エネルギーの割合（赤）と、二酸化炭素濃度を 450ppm で安定させるための 2035 年での再生可能エネルギーの割合。

注: 円の面積はおおよその規模を示す。エネルギーシステムのロス、最終消費のためのエネルギーサービスの生産するために、一次エネルギーの転換、精製、配送で生じる。「非再生可能」エネルギー（青）には、石炭、石油、天然ガス（2035 年までの二酸化炭素回収・貯留の有無）、原子力が含まれる。上記のシナリオ例は、IEA の World Energy Outlook 2010 のデータを基にしているが、直接評価

法に換算している [Annex II.4]。ベースラインを超えるエネルギー効率の改善は、2035 年の予測に盛り込まれている。民生部門における再生可能エネルギーは、開発途上国の 27 億人が若干の石炭とともに調理、暖房に利用する伝統的なバイオマス固体燃料（黄）が含まれる [2.2]。2035 年には、一部の伝統的なバイオマスは近代的なバイオエネルギー転換システムで一部代替される。伝統的なバイオマスを除き、再生可能エネルギーシステム全体の効率性は（一次エネルギーから最終消費エネルギーへの転換時に）約 66%にとどまる。

多様なエネルギーシステムは、世界各国や地域で大きく異なり、それぞれが複雑である。その結果、再生可能エネルギーの統合を推進するには、集中化、分散化のいずれにも幅広い取り組みが必要になる。そして、その推進を含むエネルギー供給システムを大幅に変化させるためには、事前に、再生可能エネルギーの利用可能性、技術の適合性、制度的、経済的、社会的な制約、潜在的なリスク、関連する能力育成やスキル開発の必要性を注意深く評価する必要がある [8.1, 8.2]。

大気中の温室効果ガスの濃度が 450ppm/eq で安定化するシナリオの大多数では、低炭素な一次エネルギーにおける再生可能エネルギーの割合が 2050 年には 50%を超える。この移行は多数のシナリオで示されているが、図 TS.8.2 に示す市場割合の増加は、IEA の World Energy Outlook 2010 の「450 政策シナリオ (450 Policy Scenario)」に基づくものである。一次エネルギーと最終エネルギー消費における再生可能エネルギーの割合を、2035 年までにこのレベルまで引き上げるためには、再生可能エネルギー一次供給の年間平均の増加を現在の水準の 3 倍以上である約 4.0EJ/年に高める必要がある [8.1, 10.2, 10.2.2.4]。

輸送、民生、製造業、農業の各部門で再生可能エネルギーの導入を拡大するには、社会的な課題と同様に、戦略的な要素を深く理解する必要がある。統合により再生可能エネルギーの各技術のシェアを高めてゆく移行の道筋は、部門、技術、地域の特性により異なる。エネルギー最終消費者に多くの便益をもたらすことを究極の目的としなければならない [8.2, 8.3]。

再生可能エネルギー技術のうち成熟度の高いいくつかのものはすでに、幅広いエネルギー供給システムへの統合に成功している。比較的低いシェアのものが大半だが、なかには 30%を超える技術（小規模・大規模な水力発電、風力発電、地熱による熱と発電、第一世代のバイオ燃料、太陽熱温水システムなど）も見られる。統合成功の主な要因は、コスト競争力の向上、不安定なエネルギー供給と気候変動の脅威を背景にした支援政策の増加、公衆の支援の拡大があった。例外は、ノルウェーの大規模水力発電、アイスランドの水力/地熱発であり、いくつかの小規模な島や町では再生可能エネルギー発電量の 100%を占める場合が見られる [8.2.1.3, 8.2.5.5, 11.2, 11.5]。

成熟度が低い他の技術は、研究、開発と実証 (RD&D)、インフラ、能力育成、その他支援策に今後も長期的な投資が必要である。この技術には、新型バイオ燃料、燃料電池、太陽エネルギーから製造される燃料、分散発電制御システム、電気自動車、太陽熱による吸収式冷房 (solar absorption cooling)、改良型の地熱システムがある [11.5, 11.6]。

再生可能エネルギーの現在の使用状況は、各最終消費部門によって異なる。障壁を取り除き、さらに統合を進める将来的な道筋は、地域によっても大きな差がある。たとえば、民生部門では、再生可能エネルギー技術の統合は、現在エネルギーサービスへのアクセスが限られている開発途上国の中・小規模の住宅と、エレベータ付の高層商業ビルや大都市の集合住宅では大きく異なる [8.3.2]。

大半のエネルギー供給システムは、再生可能エネルギーのシェアを現在以上に拡大出来、特に、再生可能エネルギーの割合が比較的低い（通常、電力、熱、パイプラインの混合ガス、混合バイオ燃料の割合 20%以下を想定）場合にそれは言える。将来の再生可能エネルギーの割合を拡大するためには、大半のエネルギー供給システムは進化、適応が必要になる。いずれの場合でも、再生可能エネルギーの実用的な最大の割合は、技術、再生可能エネルギーの利用可能量、現在のエネルギーシステムの種別と寿命に影響される。さらなる統合を進め導入拡大を高めるためには、地方、国、そして地域の取り組みの方針が重要である。第 8 章の全般的な目的は、再生可能エネルギーの普及に備えて一貫した枠組みの構築を希望する政府に対し、再生可能エネルギーの統合に関連する機会と課題についての現在の知見を提示することにある。既存の電力供給システム、天然ガス導管網、冷暖房の枠組み、石油による輸送燃料供給ネットワーク、さらに自動車などすべてが、現在に比べて再生可能エネルギーの供給増に適応出来る。再生可能エネルギー技術は、成熟したものもあれば、初期の概念実証段階にあるものもある。新たな技術は、再生可能エネルギーの導入増加を実現し、その統合は市場シェアの拡大のため、コスト効率、社会受容性、信頼性、国家、地域政府レベルの政策支援の影響を受ける [8.1.2, 11.5]。

エネルギーシステム全体に対して統合的アプローチを採用することが、再生可能エネルギーを効率的かつ柔軟に統合していく前提となるだろう。この一環として、異なるエネルギー部門間での相互支援や、インテリジェントな予測・制御戦略と一貫した長期的計画も必要だろう。こうした措置を併せることで、電力、冷暖房、交通をより緊密に連携出来る。再生可能エネルギーの統合によりそのシェアを高める際、技術と社会的メカニズムの最適な組み合わせは、適用場所に特有な条件、使用可能な再生可能エネルギー源の特性、地域のエネルギー需要の制約により異なってくる。現在のエネルギー需給システムが再生可能エネルギーのシェアの増加に、正確にどのように適応し発展出来るのか、また、その統合に要する追加コストは、個々の状況に影響されるため、今後も検討が必要である。特に、既存の発電システムと規模が国や地域で非常に多様である電力部門は、この状況が顕著な事例と言える [8.2.1, 8.2.2, 8.3]。

8.2 電力システムへの再生可能エネルギーの統合

電力システムは 19 世紀末から発展し続けている。現在の電力システムは、規模と技術的成熟度の観点から見ると、北米の東部連系系統から、ディーゼル発電による小規模な自立システムまで多岐にわたり、また中国などいくつかのシステムでは急速な拡大と変革が進んでいる。しかしながら、こうした多様性のなかでも、電力システムは、電力を高い信頼度でコスト効率良く供給するという共通の目的のもと、運用と計画が行われている。将来に向けては、近代的エネルギー供給、長距離のエネルギー輸送、低炭素エネルギー配送の道筋という点で、電力システムの重要性は拡大し続けると期待される [8.2.1]。

電力システムには、再生可能エネルギーの統合上の課題に影響する重要な特性がいくつかある。電力システムの大多数は交流電流 (AC) を使用し、発電の大多数は、地域によって異なるがおよそ 50Hz または 60Hz のいずれかで同期、運用される。電力需要は、電力消費者のニーズにより、日、週、季節によって変動する。需要の総変動は、需給バランスを絶えず維持するため、発電の計画と随時の指示が行われる。発電機とその他の電力システムの設備は、システムの周波数を維持するための有効電力の制御と電圧を特定の制限の間に保つための無効電力制御を行うために用いられる。供給と需要の分単位の変動は、一定制御と負荷追従で発電を自動制御により管理される。時間～日単位のより長い時間帯での変化は、負荷配分と発電計画 (ユニットコミットメントと呼ばれる発電機の始動・停止を含む) で管理する。継続的な需給調整は、この調整に使われるメカニズムによらず必要であり、一部の地域では、始動停止や負荷配分の決定に、整備された電力市場を選択している。自立システムにおいても、(制御可能な発電機、制御可能な負荷、バッテリーなどの貯蔵源を通じ) 需給調整を行う方法が必要である [8.2.1.1]。

電力システムは、需給調整に加え、限られた容量で送電・配電網を通じて発電と需要の間で送電も行わなければならない。適切な発電と送電容量を使用するためには、複数年にまたがる計画が必要である。電力システムの計画には、システムの個別の構成部品 (発電、電力網の構成要素を含む) は定期的に故障する (contingency) という知見も組み込む。ただし、信頼性の目標度は、適切なリソース構築により対応可能である。化石燃料または再生可能エネルギーのいずれであれ、需要に対応する発電の貢献度の重要な評価指標として capacity credit¹⁶と呼ばれるものがある [8.2.1.1]。

電力システムの特徴を考慮すると、再生可能エネルギーの持ついくつかの特性が、電力システムへの統合にあたり重要になる。特に、電力システムにおける運用計画と負荷配分に大きく影響する変動性と予測可能性 (あるいは不確実性)、電力網へのニーズの指標となる場所、例えば火力発電などとの比較のための指標となる設備利用率、容量価値、及び電力プラントの特性である [8.2.1.2]。

一部の再生可能エネルギー発電 (特に、海洋エネルギー、太陽光発電エネルギー、風力エネルギー) は変動し、一部のみ負荷配分可能である。これらのエネルギー源による発電は必要に応じて抑制は可能だが、最大の発電電力はエネルギー源 (潮流、太陽光、風力など) の利用可能性に左右される。容量価値は、需要の多い時期に発電量がうまく相関しない場合に低くなる。さらに、一部の再生可能エネルギーは変動し、一定の精度でしか予測できない。そのため、これらの再生可能エネルギー発電の変動を考慮すると、需給調整力を確保するための負荷配分可能な電源やその他の資源の負担は増加する。変動や発電予測の誤差は、常に同じ時間に同方向に発生するわけではないので、多くの場合、変動や予測精度の限界は、再生可能エネルギー発電の地理的な分布により若干は緩和される。しかしながら、大半の再生

¹⁶ (訳注) kW 価値と呼ばれる。以下「容量価値」とする。

可能エネルギーに共通する一般的な課題は、その資源に地理的な偏りがあるために、場合によっては、集中設備で発電を行ってもかなりの距離の輸送や送電網の拡張が必要になることもある。負荷配分可能な再生可能エネルギー資源（水力、バイオエネルギー、地熱エネルギー、蓄熱構造を持つ集光型太陽熱発電など）は、多くの場合電力システムが他の再生可能エネルギーを統合するために必要な柔軟性を高め、より高い容量価値を持つ [8.2.1.2]。

再生可能エネルギー技術の統合に関する特徴の概要を、表 TS.8.1 に示す [8.2.1.3]。

表 TS.8.1: 再生可能エネルギー技術の統合に関する特徴[表 8.1]

技術		プラント容量	変動性：電力システム運用に関する時間スケールの特性	潜在的な需給調整力	地理的分布ポテンシャル	予測可能性	設備利用率	容量価値	有効電力・周波数制御	電圧・無効電力制御
		MW	時間スケール	下記参照	下記参照	下記参照	%	%	下記参照	下記参照
バイオエネルギー		0.1-100	季節（バイオマスの利用可能量による）	+++	+	++	50-90	火力発電や CHP に類似	++	++
直接的太陽エネルギー	太陽光発電	0.004-100 (モジュラー)	分～年	+	++	+	12-27	<25-75	+	+
	集光型太陽熱発電※ (蓄熱型)	50-250	時～年	++	+***	++	35-42	90	++	++
地熱エネルギー		2-100	年	+++	資料無し	++	60-90	火力発電に類似	++	++
水力	河川流水	0.1-1500	時～年	++	+	++	20-95	0-90	++	++
	ダム	1-20000	日～年	+++	+	++	30-60	火力発電に類似	++	++
海洋エネルギー	潮位差	0.1-300	時～日	+	+	++	22.5-28.5	<10	++	++
	潮流	1-200	時～日	+	+	++	19-60	10-20	+	++
	波力	1-200	分～年	+	++	+	22-31	16	+	+
風力エネルギー		5-300	分～年	+	++	+	20-40 (陸上) 30-45 (洋上)	5-40	+	++

※集光型太陽熱発電は、米国南西部で 6 時間の地熱貯蔵を想定

※※直達日照強度 (DNI) >2,000kWh/m²/年 (7,200MJ/m²/年) の地域における指標

注:

電源容量: 一般的なプラントの発電容量の範囲

時間スケール: 電力システム統合の際に顕著な変動性が生じた場合の、時間スケール

受給調整力: プラントの需給調整力の程度: + 需給調整力は低く、一部のみ可能、++ 一部調整可能、+++ 調整可能

地理的分散性: 技術の導入場所が変動性の緩和と予測可能性の向上につながり得る程度 (送電網を追加する大幅な必要性はなし): + 中程度のポテンシャル、++ 高い分布ポテンシャル

予測可能性: 電力システムの運用を支援するため、関連する時間スケールでプラントの発電量の予測精度: + 中程度の予測精度 (一般に、前日の定格電力の実行値 (RMS) 10%以下), ++ 高い予測精度

有効電力、周波数制御: 平常時に、有効電力制御と周波数制御を行う技術的可能性 (瞬時電圧低下時の運転継続中における有効電力の支援など): + かなり制御可能、++ 完全に制御可能

電圧、無効電力制御: 平常時 (安定状態、動的) や電力網の不具合時 (瞬時電圧低下時の運転継続中における有効電力の支援など) に、電圧制御と無効電力制御を行う技術的可能性: + かなり制御可能、++ 完全に制御可能

再生可能エネルギー源のシェアが大きい場合について、特に水力や地熱発電では電力システムの運用に多くの実例がある。水力の貯蔵性や強い系統連系は、河川の流量の変動を調整する助けとなる。(予想に従う) 計画した発電量と実際の発電量に差が出る場合、変動性が原因でコストが発生する。変動性と不確実性は、需給調整力の必要性を増加する。全般的に、需給調整力が限られる再生可能エネルギーの導入の増加により、需給調整はより難しくなると予測される。研究によれば、変動性のある異なる再生可能エネルギー源の組み合わせと、より広域に分布したエネルギー源を組み合わせることで、電力システム全体での変動性をならし、不確実性を減少出来ることが明確に示されている [8.2.1.3]。

鍵となる課題は、発電プラントから消費者への送配電、需給調整を広域で行うためのネットワーク・インフラの重要性である。電力システムの内部の接続を強化し、系統間の連系線を増強することで、変動し不確実な再生可能エネルギー発電の影響を直接緩和出来る。大半の再生可能エネルギーでネットワークの増強が必要だが、その程度は発電の種類と立地点と既存の電力網インフラの関係によって異なる。他に、架空送電線に対する公衆の反対の中でのネットワーク・インフラの拡大の課題もある。概して、再生可能エネルギー発電の増加の実現には、電源構成、電力システムのインフラ、運用方法において、コスト効率や環境効率は維持しつつ、大きな課題を解決する必要がある。こうした変化には、信頼性が高く安定的な電力供給を維持するために、多額の先行投資が必要になる [8.2.1.3]。

ネットワーク・インフラの改善以外にも、運用経験や検討により、統合上の重要な選択肢がいくつか特定されている。

発電の柔軟性の増加: 変動性の再生可能エネルギー発電の導入が進むと、その発電量の変動性と不確実性に対処する必要性は高まると想定され、より大きな柔軟性が発電構成から必要とされる。発電部門は、発電量の増減やサイクリングを通じ、変動性と不確実性に対応する電力システムの既存の柔軟性の大部分を提供している。柔軟な電源の新設か、既存の電源をより柔軟に運用出来るように改良するかはのいずれが必要になる [8.2.1.3]。

需要側の方策: 需要側の方策は、歴史的には、平均需要やピーク負荷時の需要の抑制を目的として行われている。しかし需要側の方策は、変動性の再生可能エネルギー発電の導入の進展に伴う需給調整の課題解決に適用出来るとされている。先進的な通信技術の発展により、制御センターに接続するスマートメーターが登場し、需要側から柔軟性を大きく高める可能性が出てきた。電力消費者には、様々な時点で異なる電力価格が提示され、特に、需要が高い時期に電力価格が高くなることで、電力消費を変更、削減するインセンティブが生じ得る。需要が高い時期に需要減が実現すれば、変動性の発電の一部では、容量価値が低い影響を緩和出来る。さらに、通告なしで1年いつでも速やかに需要を削減出来れば、電源によるよりも、予備力を確保することが出来る。需要が1日のいつでもスケジューリング出来るか、リアルタイムの電力価格に反応すれば、当日の需給調整に貢献し、変動性の発電により困難が増すと見込まれる運用上の課題を軽減することが出来る [8.2.1.3]。

エネルギーの貯蔵: 再生可能エネルギー発電の出力が大きく需要が少ないときに、電気エネルギーを貯蔵し、再生可能エネルギーの出力が少なく需要が多いときに発電を行う。こうした方法で、再生可能エネルギーの発電抑制を削減でき、電力システムのベース電源の運用もより効率化される。電力貯蔵はまた、送電網の混雑を緩和し、増強のニーズの低減や建設時期の後ろ倒しも可能になる。比較的少ないエ

エネルギー（分～時間単位）を貯蔵するバッテリーやフライホイールなどの技術は、1 時間の時間枠で電力を供給し、需給調整を行うことに、理論上用いることが出来る [8.2.1.3]。

運用・市場及びプランニング方法の改善: 変動電源についての変動性と不確実性に対処するため、発電予測と確率的起動停止計画方法の改善と組み合わせ、需給調整に必要な予備力と最適な電源の起動停止計画の両方を決定出来る。リアルタイムにより近いスケジューリングの決定（市場での gate closure time の短縮化）を数多く行うことで、発電ユニットの負荷配分により新しく精度の高い情報を使用出来る。変動性を伴う電力による発電量が大きくなると、多様で地理的に分散した再生可能エネルギー発電を合計することで便益を得られるため、より大きな地域での需給調整あるいは、地域間の共同の需給調整も有効である [8.2.1.3]。

結論としては、再生可能エネルギー発電は、大陸規模の大規模な連系システムから小規模な自立システムに至るまで、あらゆる種類の電力システムに統合可能である。電力システムには、送配電網インフラ、需要の変化とその地理的分布、電源構成、場所による制御性・通信能力、地理的な到達範囲、再生可能エネルギー源の変動性と予測可能性などの特徴があり、これらの特徴により再生可能エネルギーの統合における課題の大きさが決まる。再生可能エネルギー源の導入量が増加すると、一般には、電力網のインフラ（送電線・配電線）を追加して建設する必要が発生する。変動性の再生可能エネルギー源（風力など）は、変動性のない再生可能エネルギー源（バイオエネルギー発電など）に比べ、統合はより難しい可能性がある。また、導入の進展に伴い、信頼性の維持はより難しくなり、より高コストになる。これらの課題とコストは、電力システムへの連系、補完して働く柔軟な発電技術の開発、需給調整エリアの拡大、1 時間以下の市場取り引き、貯蔵技術、発電予測の精度向上、システム運用や設備計画ツールの改善などの選択肢の組み合わせるにより、最小化可能である。

8.3 冷暖房ネットワークへの再生可能エネルギーの統合

地域暖房（DH）または地域冷房（DC）網では、断熱された地下のパイプラインでエネルギーキャリア（温水、冷水。蒸気の場合もある）を送り出し、多様なエネルギー源（図 TS.8.3）を多数のエネルギー消費者に接続出来る。集中的な温熱生産では、低コストまたは低品質の再生可能エネルギー熱の使用を促進することが可能である。この温熱は、地熱や太陽熱、バイオマス燃焼（廃棄物燃料や廃棄物の副産物など、個々の暖房システムでの使用には適さない場合が多い）で生み出される。CHP（熱併給発電）や産業プロセスからの廃熱も利用出来る。この柔軟性により、多様な熱源、燃料、技術の間の競争を促進することが出来る。多数の小規模な個別ボイラーに比べて、集中的な熱生産では、コスト効率の良い地域の大气汚染を軽減することが出来る。温熱や冷熱源が柔軟性をもつことで、地域冷暖房システムは、いくつかの再生可能エネルギーを継続的に取り込むことができ、競合する化石燃料を徐々にあるいは急速に代替することが出来る [8.2.2]。

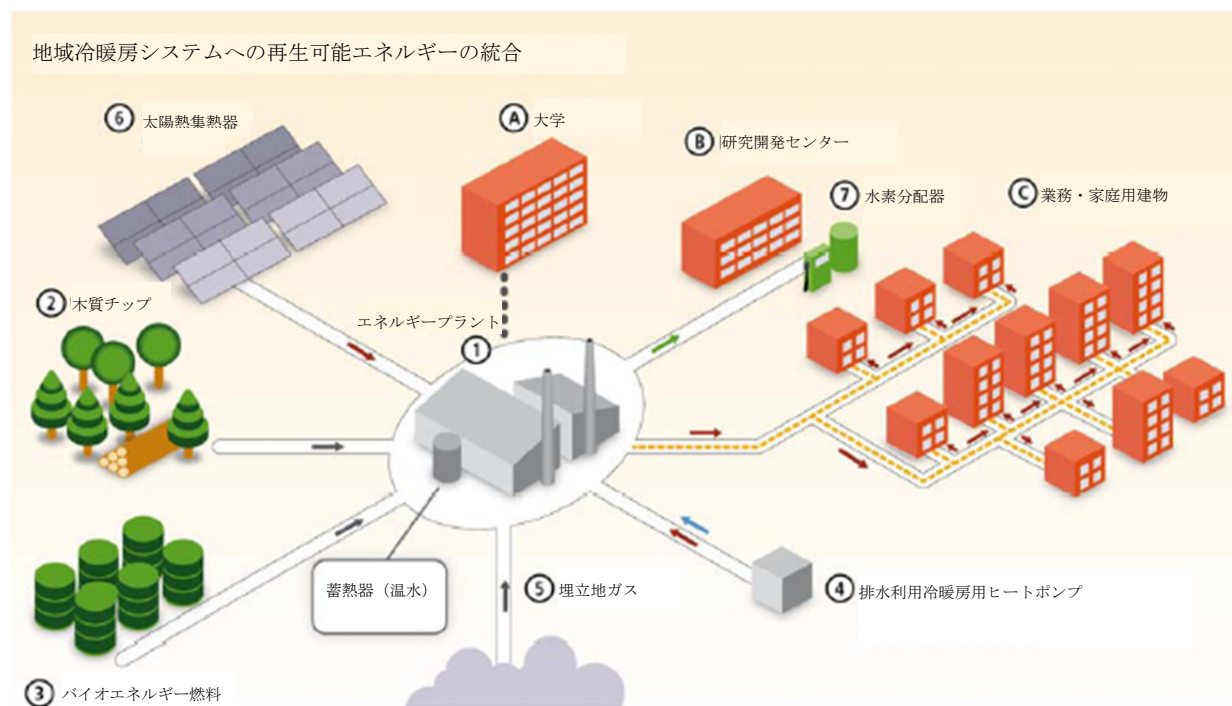


図 TS.8.3: 再生可能エネルギーをベースにした統合的なプラント（ノルウェーのリレストロム）。変動性の再生可能エネルギー源、熱貯蔵、水素の製造分配システムを組み合わせた地域冷暖房システムで、大学、研究開発センター、様々な業務用建物・住宅に供給（投資総額は約 2,500 万 US ドル（2005 年）で、2011 年に完成予定）。（1）1,200m³ のタンク型蓄熱器を持つ中央エネルギーシステム（2）木質燃焼システム（20MW_{th}）（排煙による排熱回復装置つき）、（3）バイオ・オイルバーナー（40MW_{th}）、（4）ヒートポンプ（4.5MW_{th}）、（5）ごみ処分場ガスのバーナー（1.5MW_{th}）とパイプライン（5km）、（6）太陽熱集熱システム（10,000m²）、（7）再生可能エネルギーによる水素生産（水電解と、埋立処分地ガスの収着強化蒸気メタン改質）と自動車用充填システムの実証[図 8.3]

ネットワークに接続する建物の居住者や産業は、専門的に管理される集中システムの便益を享受でき、冷暖房機器を個々に操作、維持する必要がない。高緯度にあるいくつかの国では、すでに、地域暖房市場の普及度は 30～50%に達し、地熱源を使用するアイスランドでは 96%を占める。熱データは不確かだが、地域暖房の年間供給量は世界で約 11EJ と推定されている [8.2.2.1]。

地域暖房では、熱併給発電のシステム設計により電力を供給出来る。また、再生可能エネルギーによる電力をヒートポンプや電気ボイラーで使用し、これらを需要反応の選択肢として再生可能エネルギーの統合を加速させることも可能だ。このような蓄熱システムは、変動的、非継続的、非同期的な暖房システムにおいて、熱の需給ギャップを埋められる。短期的な蓄熱（時間、日単位）には、配送ネットワーク自体の熱容量を使用出来、数百℃で数ヶ月の蓄熱が可能な蓄熱システムの場合は、様々な材料とそれに対応する蓄熱方式により、最大で数 TJ の蓄熱が可能である。温冷熱と電気を組み合わせた生産（トリジェネレーション）と温冷熱の日間や季節間の貯蔵が可能になれば、システム全体の効率が高まり、統合を加速することで再生可能エネルギーのシェアの増加につながる [8.2.2.2, 8.2.2.3]。

商用の地熱、バイオマス熱、熱併給発電のプラントの多くは、公的支援を受けずに、地域暖房システムへの統合に成功している。デンマーク、ノルウェーなどでは、約 10,000m² の集熱器エリアを持つ大規模な太陽熱システム（図 TS.8.3）がいくつか建設されている。温冷熱源、熱の輸送と貯蔵技術の最適な組み合わせは、利用者の需要パターンなど個々の条件に大きく依存する。その結果、熱エネルギーの供給構成は、システムにより大きく異なってしまう [3.5.3, 8.2.2]。

地域暖房スキームの開始や拡大には、パイプライン網の設置のために大きな先行投資が必要となる。配送コストだけで、総コストの約半分に達する可能性があるが、熱需要の密度、断熱パイプライン網建設の地域的な条件によって大きく変動する。都市化が進むと地域暖房は容易になる。ネットワークの資本コストは新開発地では低下し、熱の配送損失も熱需要が高密度の地域では低下するためである。熱の配

送損失は一般に 5～30%だが、どの程度の損失が問題となるか、熱源と熱コストによる [8.2.2.1, 8.2.2.3]。

地域暖房システムに深部地熱とバイオマス CHP プラントの使用を拡大すれば、再生可能エネルギー源の割合増加につながるが、経済的に実行可能にするには、通常、システム全体に大きな熱需要が必要となる。このため、一部の政府は、地域暖房網への投資に公的支援を行ったり、システムで再生可能エネルギーを使用するインセンティブを追加提供している [8.2.2.4]。

近代的な建物の設計と使用は、暖房の追加需要を減少させる傾向にあるが、冷房需要は世界的に高まる傾向にある。快適さを実現する冷房需要は、低緯度の豊かになりつつある国々の地域や、夏季の気温が上昇している高緯度の一部の国々で、増加傾向にあるのだ。しかし、冷房需要の低減も、パンプ型冷房の建築設計やアクティブな再生可能エネルギーの利用（太陽熱吸収冷却）により実現出来る。地域暖房の場合は、冷房需要を低減させるエネルギー効率の取り込み率、新技術の導入、市場の構造が、地域冷房の発展の可能性を決定する。近代的な地域冷房システムは 5～300MW_{th} で、再生可能エネルギーの一形態に分類される天然の帯水層、水路、海洋、深水湖を冷熱源として利用し、これまで長期間運用に成功してきた [8.2.2.4]。

地域暖房と地域冷房のスキームは一般に、中央計画経済、アメリカの大学キャンパス、多目的サービスシステムを導入している西ヨーロッパ諸国、地方自治体の管轄にある街区など、強い計画能力のある状況で発展している。

8.4 ガス導管網への再生可能エネルギーの統合

過去 50 年以上、大規模な天然ガス導管網が世界のいくつかの地域で発展している。最近では、再生可能エネルギー由来のガスを統合することによる「グリーン化」への関心が高まっている。再生可能エネルギーに由来するガス燃料は、主にバイオマスを原料とし、嫌気性消化によるバイオガス（主にメタンと二酸化炭素）か、熱科学的に合成ガス（主に水素と一酸化炭素）が製造される。バイオメタン、合成ガス、そして長期的には再生可能エネルギー由来の水素は、国、地域、地方の規模で既存のガスパイプラインに注入して配送可能である。既存のインフラ、ガスの品質、製造・消費レベルの多様性は、既存のガス導管網に統合して再生可能エネルギー由来のガスのシェア増加計画を難しくする可能性がある [8.2.3, 8.2.3.1]。

バイオガス製造は急速に成長しており、いくつかの大規模なガス会社は現在、国、地域レベルで、求められる品質を満たすバイオガスをガス配送パイプラインに大量に注入する計画を立てている。世界各国で製造されるバイオメタンの大半は、主に暖房用途の地域のガスパイプライン・システムで配送されている。この配送方法は、単位エネルギー当たり（図 TS.8.4）のコストで見ると、距離と年間輸送量にもよるが、トラック輸送の場合（通常、ガス自動車への供給用の充填所まで）に有利に出来る [8.2.3.4]。

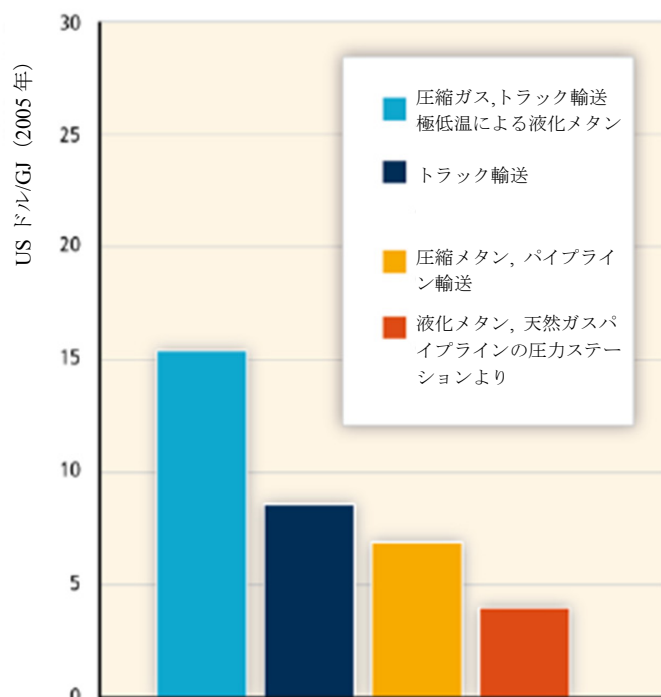


図 TS.8.4: 中規模なバイオメタンの配送と充填コストの比較（圧縮または液化のいずれか。トラックかパイプラインによる配送） [図 8.9]

ガス利用は、熱生産のために燃焼する場合、非常に高効率である。ガスエンジン、ガスボイラー、ガスタービンによる発電、圧縮あるいは多様なプロセスで液化して自動車で使用するといった用途がある。例えば、バイオガスや埋立地ガスはオンサイトで燃焼し熱や電力を生産する、ガス導管網バイオメタンを天然ガスと同等の品質に精製、改質してガス導管網に注入する、あるいは圧縮・液化してガス専用またはデュアル・フューエル自動車用の燃料充填所に配送することが出来る [8.2.3.2～8.2.3.4]。

技術上の課題は、ガス源、ガスの組成と品質である。ガス導管網一定の品質のバイオガスと合成ガスのみが既存のガス導管網に注入可能であり、水、二酸化炭素（除去により発熱量が増加する）、ガス製造からのその他の副産物を除去する精製が非常に重要な工程になる。ガスの改質コストは、施設の規模やプロセスにより異なり、ガスのエネルギー量の約3～6%の損失の可能性がある。再生可能エネルギーのガスシステムには、供給の変動性と季節性に対応するため、大きな貯蔵容量が必要になる可能性が高い。貯蔵施設の規模と形状、ガスの要求品質は、生産の一次エネルギー源とその最終消費に影響される [8.2.3]。

水素ガスは、バイオマスのガス化、バイオメタン改質、水の電気分解などの複数の方法で、再生可能エネルギーから生産出来る。このため、将来の水素製造の再生可能エネルギー源の基盤は、バイオガスや合成ガスより大きい。今後、風力や太陽からの電力など、変動性の再生可能エネルギー源からの電解による水素の生産は、既存の電力システムとの相互作用や余剰容量の程度が大きく影響する。短期的には、水素と天然ガスを混合し（体積で最大20%）、既存のガス導管網で長距離輸送する選択肢がある。長期的には、純粋な水素を輸送するパイプライン建設が可能であり、水素脆化を回避するため特殊鋼が用いられる。水素普及率を制限する要因は、新たな水素インフラの構築に要する資本と時間、変動性の再生可能エネルギー源に対応するための貯蔵に要する追加コストであると考えられる [8.2.3.2,8.2.3.4]。

再生可能エネルギー由来のガスをガス導管網に統合する場合、パイプライン追加建設に要する多額のコストを回避するためにガス源を既存システムの近くに配置する必要がある。ガス源の利用可能性からプラントが遠隔地の場合、輸送と精製を必要としないガスのオンサイトでの利用も考えられる [8.2.3.5]。

8.5 液体燃料への再生可能エネルギーの統合

液体バイオ燃料の需要予測では、需要の大半は輸送目的とされている。しかし、バイオ潤滑油やバイオ

ケミカル（メタノールなど）への産業需要も見込まれる。また、伝統的な固体バイオマスの大部分が、より便利で安全性が高く、健康にも良い液体燃料（再生可能エネルギー由来のジメチルエーテル（DME）やエタノールゲルなど）で代替されることも考えられる [8.2.4]。

バイオエタノールやバイオディーゼル燃料を、通常は食糧用の様々な作物から生産する事例は、よく知られている（図 TS.8.5）。生産されたバイオ燃料は、石油燃料用の既存インフラの構成要素（貯蔵、混合、配送、給油など）を利用することが出来る。ただし、石油製品用のインフラ（貯蔵タンク、パイプライン、トラック）をエタノールや混合燃料と共有する場合、吸湿や機器の腐食の問題が生じる可能性があるため、場合によっては特殊なパイプライン材料やライニングの投資が必要になる。バイオマスの分散生産、季節性、農地の既存の製油所や燃料配給センターからの距離は、サプライチェーンの管理やバイオ燃料の貯蔵に影響を与える。非食料バイオマスからのバイオ燃料や、既存の石油燃料やインフラと互換性が高いバイオ燃料の生産のため、技術発展は継続する。バイオ燃料が適用されるすべての製品仕様を満たせるよう、品質管理手順を実施する必要がある [8.2.4.1, 8.2.4.3, 8.2.4.4]。

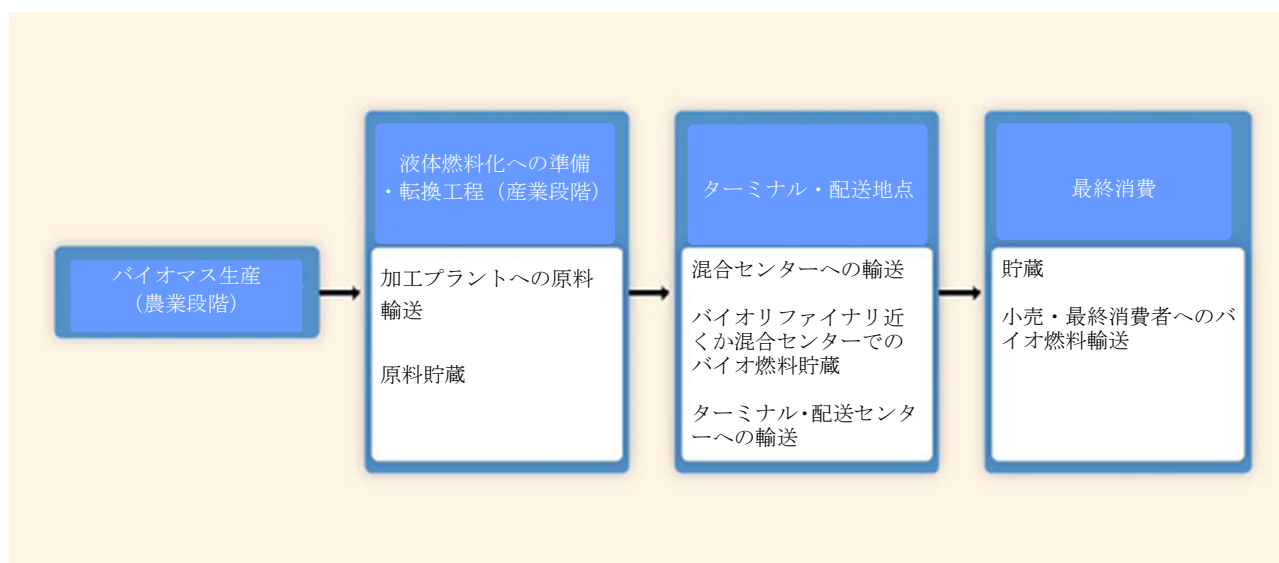


図 TS.8.5: 液体バイオ燃料の生産、混合、配送システム。バイオマス原料によらず類似している[8.2.4][図 8.11]。

ガソリンの一部をエタノール、あるいはディーゼルの一部をバイオディーゼルで代替した混合燃料（一般的には 5～25%の代替率だが、最大 100%もありえる）を使用するには、自動車給油所にタンクやポンプを追加で配備するなど、インフラ投資が必要である。バイオ燃料の配送コストは全体から見るとごくわずかだが、幅広い統合と拡大を進めるために必要な物流管理と資本は、不十分な計画のもとでは大きな障害となる。エタノールの場合、エネルギー密度（体積）はガソリンの約 3 分の 2 しかなく、同量のエネルギーを保存、輸送するためには貯蔵システムの大型化、鉄道車両や船舶の増便、パイプラインの大容量化が必要になり、貯蔵や配送コストは増加する。理論的には、パイプラインが最も経済的な配送方法であり、エタノールのパイプライン建設も実現しているが、技術上、物流上の多数の課題が残っている。一般的に、農業地域における現在のエタノール生産量は、地域の需要対応であれ輸出用であれ非常に少量であり、専用パイプライン建設の投資コスト運用の課題を解くには至っていない [8.2.4.3]。

8.6 自立システムへの再生可能エネルギーの統合

自立エネルギー供給システムは一般的に小規模で、送電系統やネットワークを通じて商用エネルギーが現状利用出来ない非系統連系のへき地、小さな島々、個別の建物に導入されることが多い。自立システムには、たとえば電力、熱、液体燃料、ガス燃料、固体燃料などのうち単一のエネルギーキャリアを用いる場合、複数キャリアを組み合わせる場合など、いくつかの種類がある [8.2.5, 8.2.5.1]。

基本的に、自立システムへの再生可能エネルギー統合上の課題は、大規模電力システムと同様である。たとえば、電力供給システムの需給バランス、冷暖房の方式、地域で使用する再生可能エネルギーガス

生産や液体バイオ燃料の生産の選択が挙げられる。しかし、大規模な電力システムと異なり、小規模な自立システムでは、地域レベルで容易に利用出来る再生可能エネルギー供給の選択肢は少ない場合も多い。さらに、高度な再生可能エネルギーの供給予測、確率的な始動停止計画、厳しい燃料品質基準、地理的、技術的多様性による変動の平滑化などの、大規模な電力システムで統合を管理するための技術的、制度的な選択肢は、小規模な自立システムの場合、より難しく、さらには奨励されない場合もある [8.2.1-8.2.5]。

一般的に、再生可能エネルギーの統合方法は、供給システムの規模が小さくなり、特に様々な再生可能エネルギー源の導入割合が高くなるほど、難しくなる。自立システムは必然的に、供給と需要の一致のため、貯蔵、多様な需要反応、柔軟性の高い化石燃料発電に重きを置く傾向がある。変動性のある再生可能エネルギー源については、他システムとの連系や運用・計画手法に限界があるので、自立システムは必然的に、供給と需要の一致のため、エネルギー貯蔵、多様な需要反応、柔軟性の高い化石燃料発電に重きを置く傾向がある。地域の負荷の形状により合致した、あるいは負荷配分可能な再生可能エネルギー供給が選ばれ、地域の負荷パターンにあまり合致しない変動性の低コストのものが選択されないことが多い。自立システムで再生可能エネルギーの統合管理を行う場合、選択肢が限られ、他の条件が同じであるとしても大規模な電力システムよりもコストが高くなる可能性があるが、離島やへき地などのほとんどの場合では、エネルギー利用者に選択肢はない。これから示唆されることの一つとして、自立電力システムの使用者や設計者は、安価な全体的な供給コストという、相反する目的の難しい選択が求められることが挙げられる [8.2.5]。

自立エネルギーシステムでは、再生可能エネルギー変換技術の転換技術、需給調整の選択肢、最終消費技術の統合は、再生可能エネルギー資源の場所により異なる利用可能性と地域のエネルギー需要といった個別の条件に大きく影響され、これらの条件地域の気候やライフスタイルによって異なる。自立的な電力システムを特に開発途上国のへき地に設計、導入する際、小規模な自立システムでは確実に信頼性の高い供給への追加コストが多額になるため、コストと信頼性のバランスは非常に難しくなる [8.2.5.2]。

8.7 最終消費部門：移行の道筋に向けた戦略的要素

再生可能エネルギー技術は継続的に発展し、輸送、民生、産業、農業、林業、漁業の各部門で導入が進んでいる。すべての部門で導入を拡大するため、技術的課題、技術以外の課題の双方に対応すべきである。各部門に地域差が見られる、この背景には、再生可能エネルギー導入状況、エネルギーシステムの多様な種類、現状の関連インフラ、再生可能エネルギー統合を進める様々な道筋の可能性、克服できていない移行上の課題、国・地方の意欲や文化の多様性に影響される将来の傾向がある [8.3, 8.3.1]。

8.7.1 輸送

近年の傾向と予測によると、世界的に自動車台数が増加するなど、輸送需要は大きく成長すると見込まれている。輸送需要に対応しつつ、確実かつ低炭素なエネルギー供給を実現するには、強力な政策措置、急速な技術進展、金銭的なインセンティブや追加コストを負担する消費者の意思が必要である [8.3.1]。

2008 年、輸送部門の化石燃料使用量は世界の一次エネルギー消費の約 19%を占めた。これは、全エネルギー消費の 30%、温室効果ガス発生の約 22%に相当するとともに、地域の大気汚染排出源の大きな割合を占める。軽量自動車 (Light Duty Vehicle) は世界の輸送用燃料消費量の半分以上を占め、その他は重量自動車 (Heavy Duty Vehicle) 24%、航空 11%、船舶 10%、鉄道 3%である。輸送需要は急速に伸び、車両台数は 2050 年までに 3 倍になると予想され、航空でも同様の成長が見込まれる。このため、現在、輸送燃料の約 94%を石油製品、多くの国々の場合それを輸入に依存する輸送部門では、エネルギー安定供給の維持は深刻な課題である [8.3.1]。

一次エネルギー源の転換、エネルギーキャリア（または燃料）を通じて、燃料・自動車の場合、新型の内燃機関自動車 (ICEV)、バッテリー式電気自動車 (EV)、ハイブリッド電気自動車 (HEV)、プラグイン・ハイブリッド電気自動車 (PHEV)、水素燃料電池自動車 (HFCV) などの最終消費部門に届ける可能な道筋は多数存在する (図 TS.8.6) [8.3.1.2]。

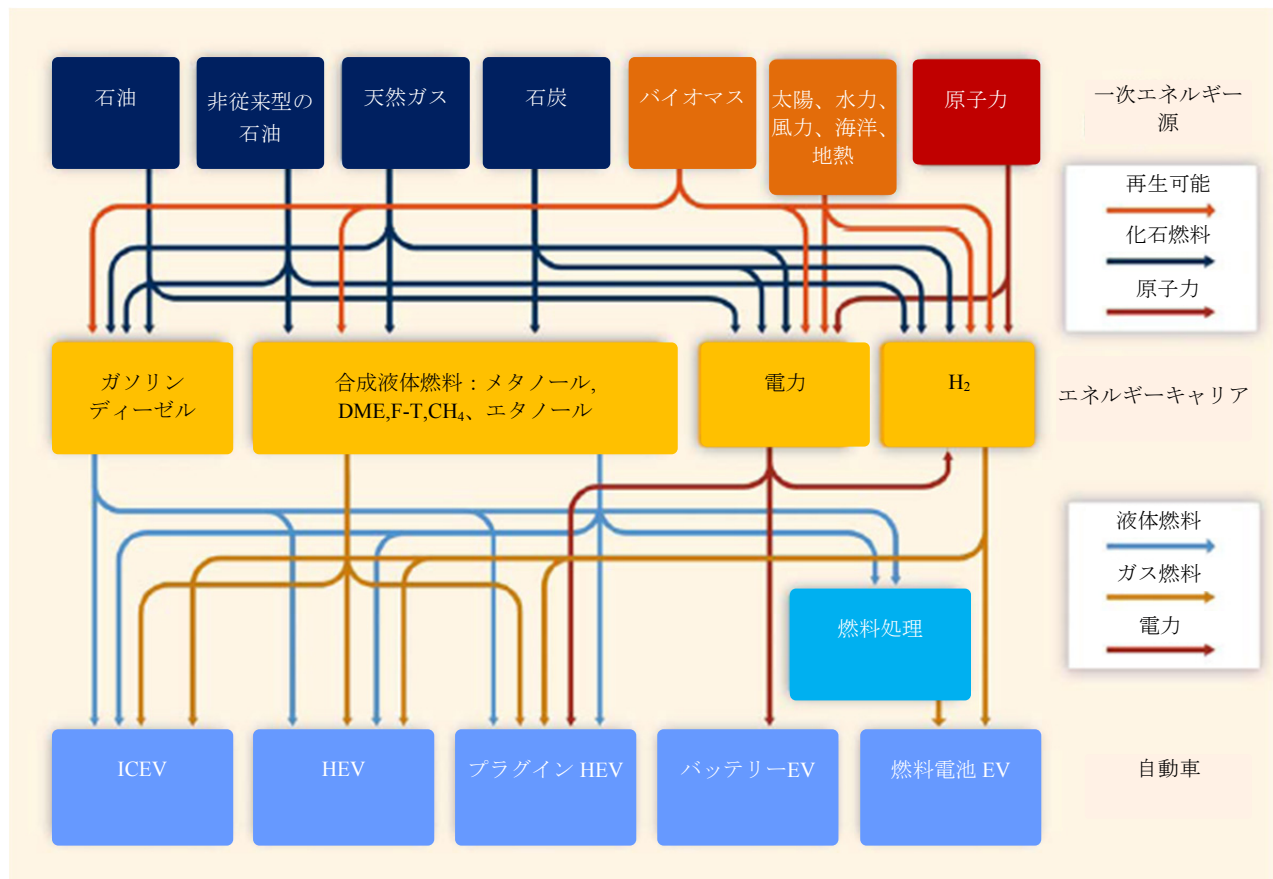


図 TS.8.6: 軽量自動車燃料の道筋の可能性。一次エネルギー源（上）から、エネルギー媒体を通じ、最終消費である自動車駆動系の選択肢（下）へ（再生可能エネルギー源はオレンジ色で表示） [図 8.13]

注: F-T=フィッシャー・トロプシュ法、DME = ジメチルエーテル、ICE = 内燃機関、HEV = ハイブリッド電気自動車、EV = 電気自動車、「非従来型の石油」はオイルサンド、オイルシェールその他重油を指す。

輸送部門の効率向上と脱炭素化は、世界の温室効果ガス排出の長期的な大幅削減には、極めて重要である。輸送に関連する排出を削減する方法としては、移動需要の削減、自動車の効率向上、より効率的な輸送手段への移行、低炭素または炭素排出がほぼゼロの燃料（バイオ燃料、低炭素の一次エネルギー源による電力または水素など）による石油燃料の代替などがある。シナリオ研究によれば、輸送部門のエネルギー需要の伸びに対応しつつ、温室効果ガスを 2050 年までに現在より 50～80%削減するには、複数の技術を組み合わせることが重要と強調されている（図 TS.8.7） [8.3.1.1]。

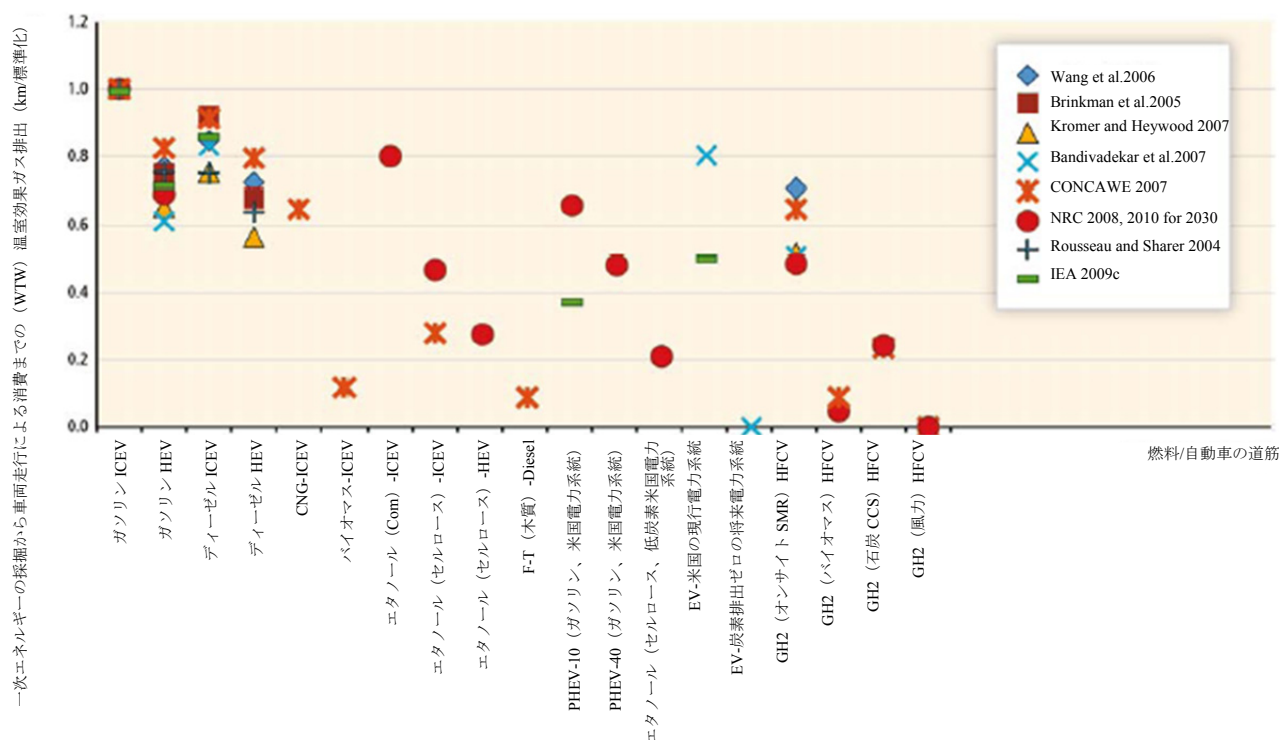


図 TS.8.7: 一次エネルギーの採掘から車両走行による消費温室効果ガス排出削減（移動 km 当たり）。軽量自動車の燃料から自動車の道筋についての複数の研究より抽出。ガソリン内燃機関軽量自動車（ICEV）の温室効果ガス排出量で正規化し、土地利用変化、自動車製造、及び燃料供給設備製造の影響を除いた[図 8.17]。

注: ガソリン ICEV の WTW 温室効果ガス削減（移動 km 当たり）（「ガソリン ICEV」=y 軸上の 1）。各研究から抽出され、範囲は 170~394g CO₂/km で、ガソリン内燃機関自動車から取られた平均排出量により正規化している。すべての水素の道筋で、水素は自動車に圧縮ガス（GH2）として搭載される。SMR=水蒸気メタン改質装置

再生可能エネルギーの輸送への使用は、現在、全エネルギー需要の数パーセントにとどまり、電気鉄道や、液体バイオ燃料の石油製品への混合が主である。自動車での圧縮バイオメタン使用は、圧縮天然ガスでの走行に適しているように、バイオ燃料比率の高い混合燃料で稼動する軽量自動車は世界ですでに数百万台に達し、バイオ燃料技術も商用段階である [8.2.3]。

しかしながら、新しい燃料や車種への移行は、技術、コスト、インフラ、消費者の受け入れ、環境やエネルギー源への影響などを含む、複雑な過程である。移行上の課題は、バイオ燃料、水素、電気自動車で異なり（表 TS.8.2）、明らかに優位にある選択肢はなく、いずれも数十年をかけて大規模に導入する必要がある。バイオ燃料はすでに実証され、2008 年には道路輸送燃料の約 2%に貢献しているが、持続可能性の問題がある [2.5]。水素燃料電池自動車の多くは実証段階を終えたが、燃料電池の耐久性、コスト、車両搭載時の水素貯蔵の課題、水素インフラの使用可能性といった障壁があるため、少なくとも 2015~2020 年まで商用化の可能性は低い。電気自動車とプラグイン・ハイブリッド電気自動車の場合、現状のバッテリー技術のコストと比較的短い寿命、1 充電による走行距離の制約、充電時間が、消費者の受け入れにあたっての障壁となる。近年、世界的に政策インセンティブが導入されたことで、電気自動車、プラグインハイブリッド自動車の設計は急速に開発が進んでおり、複数の企業が発売計画を発表している。1 つの戦略として、バッテリー技術の開発と機能向上を進めつつ、プラグイン・ハイブリッド電気自動車を先行導入する進め方がある。水素自動車、電気自動車の場合、必要なインフラを大規模開発し、実用的な輸送システムを確立するまでには数十年を要する可能性がある。

表 TS.8.2: バイオ燃料、水素、電力を軽量自動車の輸送燃料とする場合の、移行上の課題 [8.3.1 の要約]

	バイオ燃料	水素	電力
技術の状況			
既存・将来の一次エネルギー源	糖料作物、でんぷん作物、油料作物、セルロース作物、森林残渣、農業残渣、固体廃棄物、藻類などバイオ起源油	化石燃料、原子力、すべての再生可能エネルギー。再生可能エネルギー源の基盤は大きい、効率は低く、H ₂ に転換するコストが課題。	化石燃料、原子力、すべての再生可能エネルギー。可能性のある再生可能エネルギー源の基盤は大きい。
燃料生産	第一世代: 糖料とでんぷん作物、バイオメタン、バイオディーゼルから生産したエタノール。 第二世代の新型バイオ燃料: セルロース系バイオマス、バイオ廃棄物、バイオオイル、藻類から生産したエタノール。早くても 2015 年以降。	化石燃料による H ₂ は、産業の大規模用途に対し商用化されているが、輸送燃料としては競争力を持たない。再生可能 H ₂ は一般にコスト高である。	電力はすでに供給されている。再生可能エネルギーによる電力はコスト高の可能性はあるが、ライフサイクルで温室効果ガス低排出であるため、輸送部門で好まれる。
自動車	エタノール使用割合が高いフレキシ・フューエル自動車の台数は数百万台に達する。従来の ICEV では、エタノールの混合濃度には上限 (25%以下) がある。商用化された一部の農業トラクターと機械は、100%バイオディーゼルで駆動出来る。	HFCV は実証段階。商業化は 2015~2020 年までない。	PHEV は実証段階。商業化は 2015~2020 年までない。現在、EV 使用は限定的である。EV 商業化は 2015~2020 年までない。 ¹⁷
コスト* (ガソリン ICE 自動車と比較)			
将来のガソリン ICEV (US ドル、2005 年) と比較時の自動車価格増分	同等の価格	HFCV は 5,300US ドル以上の価格増 (2035 年まで)	PHEV は 5,900US ドル以上、EV は 14,000US ドル以上の価格増 (2035 年まで)
燃料コスト (US ドル、2005 年/km)	km 当たりの燃料コストは、バイオ燃料の種類と農業補助金の額によって異なる。バイオ燃料は、エネルギー当たりの価格がガソリン、ディーゼルの価格と一致すれば、競争可能である。ブラジルのエタノールは補助金なしで競争力を持つ。	燃料の目標コストは、成熟した H ₂ インフラの場合、3~4US ドル/kg (楽観的な数字)。HFCV で使用する場合、ガソリンとは 0.40~0.53US ドル/L で競争力を持つ。HFCV はガソリン ICEV の 2 倍の燃費と想定。再生可能エネルギー由来の H ₂ は、その他のエネルギー由来の H ₂ より、約 1.5~3 倍コスト高である。	電力を 0.10~0.30US ドル/kWh で購入する場合。0.3~0.9US ドル/L で購入するガソリンと競争力を持つ (EV はガソリン ICEV の 3 倍の燃費と想定した場合)
既存インフラとの互換性	既存の石油配送システムと一部互換性あり。エタノールの場合は、個別の配送・貯蔵インフラが必要になる可能性あり。	再生可能な H ₂ 生産源に加え H ₂ の新規インフラが必要。インフラ導入は、自動車市場の成長との連携要。	電力システムがすでに広域に存在。家庭用、公的な充電器コスト、再生可能エネルギー発電源、送電網の更新の追加負担が必要になる (特に急速充電設備)。
消費者の受容	燃料の比較コストによる。アルコール自動車は、ガソリンに比べ 1 給油あたりの走行距離が短い可能性あり。食料用の穀物へのコスト影響の可能性あり。土地利用と水問題も考慮すべき要素になり得る。	自動車本体と燃料の比較コストによる。安全性に対する公衆の認識が重要。市場の立ち上がりの段階では、給油所の使用可能性が低い。	自動車の本体コストが高い。ピーク時の電力チャージコストが高い。PHEV 以外は、走行距離に制約あり。充電時間は中~長時間だが、家庭でも充電可能。厳冬や酷暑では性能が大幅に低下する。市場立ち上がり段階では、充電場所の使用可能性が低い。
温室効果ガス排出	バイオマス原料、利用の道筋、土地利用の課題に影響される*	H ₂ 生産構成による。将来のハイブリッド・ガソリン ICEV に比	電源構成による。石炭専用の電源構成によれば、EV と PHEV

¹⁷ (訳注) 両者とも 2012 現在、各国で発売が開始されている。

	※。バイオマス残渣（サトウキビ）の燃料の場合、少ない。直近では、トウモロコシ原料のエタノールで高くなる可能性あり。二次エネルギー利用の新型バイオ燃料は低くなる可能性が高い	較して、天然ガス由来の H ₂ を使用する HFCV の場合、WTW での温室効果ガス排出は、想定により若干増減する。WTW 温室効果ガス排出は、再生可能エネルギーか原子力を水素源とする場合、ゼロに近づき得る。	の WTW 温室効果ガス排出は、ガソリン HEV と同レベルか、それより高くなる。再生可能エネルギーと低炭素電力の割合が増えれば、低くなる。
石油消費	混合の場合は少ない	非常に少ない	非常に少ない
環境上、持続可能性上の課題			
大気汚染	ガソリンと同様の課題。エタノールの場合、燃料タンクの密封部から揮発有機成分が充満するため、課題が増える。アルデヒドの排出	ゼロ排出	ゼロ排出
水使用	ガソリン以上であり、その程度は、バイオマスと農業水利のニーズによる。	使用料は少ないが、電気分解と水蒸気改質は水を使用するため、その道筋に影響される。	使用料は非常に低いが、発電方式により異なる。
土地使用	農地での食糧、繊維生産と競合の可能性あり	道筋による	道筋による
資材使用		燃料電池のプラチナ、電気モーターのネオジムなどレアアース。資源リサイクル要。	バッテリーのリチウム、電気モーターのネオジムなどレアアース。要資源材リサイクル

注：※ コストは常に、初期の自動車増分コストの資本回収を含むわけではない。

※※バイオ燃料に関係する、間接的な土地利用による温室効果ガス排出は含まれない。

バイオ燃料には、既存の液体燃料インフラと相対的に互換可能であるという利点がある。石油製品と混合可能であり、大半の ICE 自動車はこの混合燃料で走行可能であり、一部のものは最大 100% のバイオ燃料を使用出来る。自動車の性能¹⁸や給油回数では、ガソリンやディーゼルと類似しているが、混合可能な濃度に上限がある場合もあり、また、一般に、改質せずに既存の燃料パイプラインで配送することはできない。一部のバイオ燃料では、使用可能なバイオマス源の持続可能性が深刻な課題になる [2.5, 8.2.4, 8.3.1.2]。

水素 は、温室効果ガス排出ゼロまたはほぼゼロの輸送を実現するための、新たな莫大なエネルギー源となる可能性を秘めている。バイオマスガス化により水素を生産する技術が開発中であり、2025 年以降には競争力を持つだろう。再生可能エネルギーの電力で水を電気分解する水素生産では、技術的な実現可能性やエネルギー源の使用可能性よりも、コストが障壁となる。初期段階では、再生可能エネルギー技術や他の低炭素技術は発電に使用される可能性が高く、将来のエネルギー複合施設では、炭素排出がほぼゼロの水素を電力や熱との併産出来るような開発が考えられる。水素は電力、ガス、ガソリン、ディーゼル、バイオ燃料と比較して現状は広く流通していないが、将来的には、長距離用で比較的短い給油時間が求められる大型の重量自動車用として選択されると考えられる。水素を多数の自動車に導入するには、新しい供給インフラが必要であり、その建設には数十年を要する。しかし、小ネットワークでテスト車両に水素を導入し、充填技術を実証するという第一段階が、数か国で開始されている [2.6.3.2, 8.3.1, 8.3.1.2]。

将来の市場で、多数の電気自動車やプラグイン・ハイブリッド電気自動車に再生可能エネルギーによる電力供給を行うには、バッテリーの開発や、電気自動車が必要なときに充電出来る低価格の電力供給といった、いくつかのイノベーションが不可欠である。夜間のオフピーク時を利用した充電を行えば、新たな発電設備容量はそれほど必要とならず、一部の場所では、風力や水力の発電変動にうまく合わせることが出来る可能性がある。電力システムの柔軟性やエネルギー貯蔵も、再生可能エネルギーの使用可能性と自動車の充電電力のバランスをとるために必要になる可能性がある [8.2.1]。

軽量自動車以外は、他の輸送部門（重量自動車、航空、海運、鉄道）でも再生可能エネルギーの導入と温室効果ガス排出削減を行うことが出来る。バイオ燃料は、この部門で再生可能エネルギーの利用拡大

¹⁸ この事例における性能は、エネルギー量を考えていない。バイオ燃料のエネルギー量は、石油製品に比べ、一般的に少ない。

の鍵になるが、現在の内燃機関は、バイオ燃料の混合率を増加（80%以上）出来るよう設計変更する必要があると考えられる。航空部門では、安全性と燃料の重さと容積の最小化の必要性から、他と比較して燃料転換の可能性は低い。様々な航空会社や航空機製造会社は、様々なバイオ燃料混合の使用によるテスト飛行を実施しているが、航空燃料の厳格な仕様（特に低温時）に確実に対応するため、道路輸送用の燃料に比べ、さらに大幅に特性向上が必要になる。鉄道輸送の場合、約 90%がディーゼル燃料で賄われている状況で、電化の程度を高めること、バイオディーゼルの使用量を増加させることが、再生可能エネルギー導入に向けた 2 つの主要な選択肢となる [8.3.1.5]。

あらゆる不確実性とコスト削減の課題のもとでは、行動変化（例えば、自動車の年間走行距離や飛行距離の削減）、さらなるエネルギー効率を追求した自動車、多様な低炭素燃料など、長期にわたり最善の組み合わせを維持することが重要である [8.3.1.5]。

8.7.2 業務・家庭

業務・家庭部門は、先進国と開発途上国双方で、シェルターや多様なエネルギーのサービスを提供し、人間の生活や幸福を支える。2008 年、業務・家庭部門は世界で最終エネルギー総消費量のおおよそ 120EJ（約 37%）を占めた（調理、暖房用の伝統的バイオマス由来の一次エネルギー 30~45EJ を含む）。業務・家庭部門では、暖房と調理用のエネルギー需要が高い割合を示しており、通常は化石燃料（オイルバーナー、ガス暖房）と電力（扇風機とエアコンディショナー）を使う。多くの地域では、これらは地域冷暖房（DHC）や、または建物内における再生可能エネルギーシステムの直接使用（近代的バイオマスペレット、ストーブ、ヒートポンプ（地中熱利用を含む）、太陽熱給湯と暖房、太陽熱吸収式冷房システムなど）で経済的に代替可能である [2.2, 8.2.2, 8.3.2]。

建物内に統合される再生可能エネルギー発電技術（太陽光発電パネルなど）により、建物がエネルギー消費者でなくエネルギー供給者になる可能性がある。さらなる成長の鍵は、エネルギー効率のよい家庭電化製品や「グリーン建物設計」と組み合わせながら、再生可能エネルギーを既存の都市環境に統合することである。家庭用、業務用の建物両部門で、エネルギー媒体とエネルギーサービスの配送システムは、地方の特性や地域の再生可能エネルギー源、経済力、ストックの改変に影響する建物の平均築年数やインフラの平均経過年数により、多様である [8.3.2]。

既存あるいは新しい建物のエネルギー需要の特徴と条件、再生可能エネルギー統合の見通しは、地方や建物の設計などで個々に異なる。先進国の都市部、地方の双方では、大部分の建物に電力、水、下水が導入されている。先進国では建物のストック回転率がわずか 1%程度であり、エネルギー効率改善ばかりではなく再生可能エネルギーの統合には、既存建物の改修が大きな役割を果たす。たとえば、太陽熱温水器、地熱ヒートポンプ、地域冷房システムの導入や拡張など、温冷熱源を柔軟に使用することで、長い期間で再生可能エネルギーの割合を増加することが出来る。これらは、比較的多額の先行投資と長期の資本回収期間が必要になる可能性があるが、実行可能性が高くエネルギー効率の改善につながる設計、計画への同意と規制の修正、金銭的インセンティブや財政措置などで、これを乗り越えることが出来る [8.2.2, 8.3.2.1]。

開発途上国でも、大半の都市部では電力網供給が使用可能であるが、供給システムは、電源の容量に制限があり、信頼性も低い。地域の再生可能エネルギー資源を使用して再生可能エネルギー技術の統合を進めることで、安定的なエネルギー供給とエネルギーサービスの提供範囲を広げることが出来る。開発途上国の都市や地方の居住区域では、エネルギー消費パターンとして、バイオマスと木炭の持続可能でない形での使用が多く見られる。課題は、伝統的バイオマスの消費増加を逆転させるため、近代的なエネルギーキャリアへのアクセスの改善と統合により再生可能エネルギーの割合を高めることである。エネルギー供給網に接続していないへき地の住宅を含め、太陽を始めとする再生可能エネルギーの分散的な特性は、量ががわずかではあっても、既築あるいは新築の建物への統合において有用である [8.2.2.2, 8.2.5]。

8.7.3 工業

産業は世界の最終エネルギー消費の約 30%を占めるが、その割合は国によって大きく異なる。産業部門の構成は多種多様だが、そのエネルギー消費の約 85%は、エネルギーを大量消費する鉄鋼、非鉄金属、

化学・肥料、石油精製、鉱業、パルプ・紙などの重工業による [8.3.3.1]。

産業部門で、将来的に再生可能エネルギーの直接、間接的使用を拡大するにあたり、重大な技術的制約はない。しかしながら、短期的には、統合は再生可能エネルギー技術のコスト、資本回転率、スペースの制約、高い信頼性と継続的な運転の要求といった要因に制約される。より高い割合の再生可能エネルギーの統合に加え、工業部門のエネルギー需要や温室効果ガス排出削減の重要な指標としては、エネルギー効率、資源リサイクル、セメント製造など二酸化炭素を排出する業種での二酸化炭素回収貯留、化石燃料資源の代替などが挙げられる。さらに、産業は、需要反応の可能な設備を提供でき、変動性の再生可能エネルギー源が導入された将来の電力システムにおいて、より大きな特性となる可能性が高い [8.3.3.1]。

産業における主要な再生可能エネルギー統合には、以下の機会が含まれる。

- ・ バイオマス由来の燃料やプロセス残渣のオンサイト生産に必要な直接使用。バイオ燃料、再生可能エネルギーによる熱、コジェネレーションの使用 [2.4.3]
- ・ 電熱プロセスを含む、再生可能エネルギー電力の使用増加による間接的使用 [8.3.3]
- ・ 熱、液体燃料、バイオガス、そして将来の利用が高まる可能性がある水素を含め、再生可能エネルギーをベースとした各種エネルギーキャリア購入による間接的使用 [8.2.2～8.2.4]
- ・ 現状ほとんど商用例はないが、工業プロセスでの加熱と蒸気の需要への太陽熱エネルギーの直接使用 [3.3.2]
- ・ 工業プロセスでの加熱と蒸気の需要への地熱の直接使用 [4.3.5]

産業は、将来、再生可能エネルギーの使用者であるだけでなく、併産によるバイオエネルギーの供給者にもなりえる。現在、産業で直接使用される再生可能エネルギーは、パルプ、紙、製糖、エタノール産業で副産物として生産されるバイオマスが主であり、熱と電力の併産に使用され、主にオンサイトの工業プロセスで使用されるが、オフサイトにも売却される。バイオマスは、発展途上国の木炭を始めとして、煉瓦製造など、多くの中小企業にとっても重要な燃料である [8.3.3.1]。

エネルギーを大量消費する産業では、再生可能エネルギー使用増加につながる道筋は、業種で異なる。たとえば、バイオマスは技術的に、ボイラー、窯、溶鉱炉の化石燃料や、石油化学製品を、バイオ化学製品や材料により代替可能である。ただし、多くの業種での操業規模からすると、代替行為は地方のバイオマスが十分に供給する可能性の制約になるだろう。太陽利用技術の使用は、年間の日射時間が短い一部の場所では制約される。水力発電をアルミニウム精錬所に直接供給する事例は珍しいものではないが、エネルギーを大量消費する多くのプロセスでは、電力系統からの再生可能エネルギー電力にシフト、将来は水素へのシフトを図り、再生可能エネルギーを間接的に統合する方法が主となる。低炭素の発電の豊富な選択肢と使いやすさにより、様々な産業プロセスで化石燃料を代替において、電熱プロセスが将来的により重要になると考えられる [8.3.3.2]。

エネルギー消費が少ない、食品加工、繊維、家庭用電化製品とエレクトロニクス製造、自動車組立工場、製材工場などの「軽」工業は、事業所数は非常に多いが、エネルギー消費全体に占める割合は重工業に比べ小さい。これら「軽」工業のエネルギー需要の大半は、建物内での照明、冷暖房、換気、オフィス機器用のエネルギー使用となる。「軽」工業は概して、エネルギー大量消費型の産業に比べ、柔軟性が高く、再生可能エネルギーの統合の機会を容易に提供出来る [8.3.3.3]。

約 400℃以下のプロセス加熱への再生可能エネルギーの統合を、太陽熱、直接の地熱エネルギーに加え木炭を含むバイオマス燃焼で行うことは実用段階である。400℃を超えるプロセス加熱需要への統合は、高温の太陽熱を除き、再生可能エネルギー源はそれほど適しているとは言えない (図 TS.8.8) [8.3.3.3]。

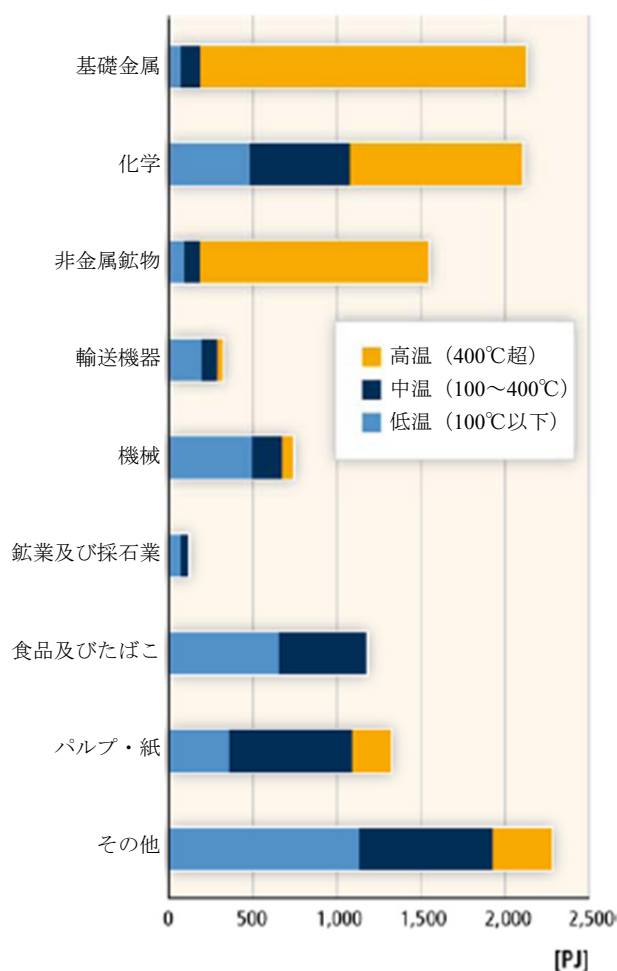


図 TS.8.8: 重工業、軽工業の業種による、温度別の熱需要（ヨーロッパ 32 か国内の評価による）[図 8.23]

産業で再生可能エネルギー使用を拡大する可能性とコストは、産業の複雑性と多様性、地理的条件と地方の気候条件の多様性から、よく理解されているとは言えない。当面の再生可能エネルギーのシェア拡大の方法としては、加工残渣の活用拡大、バイオマスを利用する産業におけるコジェネレーション、加熱用の化石燃料の代替が考えられる。太陽熱技術は、集熱、蓄熱、（低日射時間帯の）バックアップシステム、プロセスの適合と統合を整えることができれば有望である。再生可能エネルギー電力を電気利用技術に用いて再生可能エネルギーの統合を行うことは、短期、長期的に最大の効果を持つ可能性が高い [8.3.3.2, 8.3.3.3]。

産業における再生可能エネルギー使用は、多くの地域で競争力がない時代が続いた。これは、化石燃料が比較的安価だったうえに、エネルギー税や炭素税も安いか、課税そのものがなかったためである。各国で実施される再生可能エネルギー支援政策は、産業よりも輸送部門や業務・家庭部門に重点が置かれる傾向があり、この結果、（産業部門での）再生可能エネルギー統合の可能性は相対的に不確実になる。支援政策が適用されている場合、産業部門での再生可能エネルギーの導入は進んでいる例がある [8.3.3.3]。

8.7.4 農林水産業

農林水産業は、エネルギー消費が比較的少ない部門で、世界のエネルギー消費の 3%程度しか使用していない。農林水産には、大企業が保有する農場や森林から、開発途上国の自給自足農、漁民が含まれる。農林水産業で使用する肥料や機械の製造には比較的多くのエネルギーが間接的に使用され、この使用分は産業部門に含まれる。農場関連のエネルギー需要では、通常、灌漑のための揚水が現地でのエネルギー利用の最大割合を占め、その他、機械用のディーゼル使用、搾乳、冷凍、固定設備用の電力が含まれる [8.3.4.1]。

多くの地域では、耕作地は、再生可能エネルギー生産にも同時使用出来る。農業とエネルギーを目的とした、土地の多目的使用が一般的になりつつある。この例として、放牧地に建設された風力発電、土地に栄養を再循環させながら家畜肥料の処理をするバイオガス・プラント、水路の小規模、マクロ規模の水力発電への利用、作物残渣の熱生産と発電用の回収・燃焼、液体バイオ燃料、熱、発電用のバイオマス資源として栽培、管理されるエネルギー作物（餌や繊維に使用される併産物も伴う）がある [2.6, 8.3.4.2, 8.3.4.3]。

風力、太陽、作物残渣、家畜糞尿などの再生可能エネルギーは、多くの場合、地方で豊富であり、その回収と統合により、土地所有者や農場経営者は、農園の運用に現地でそれらを活用出来る。再生可能エネルギー電力やバイオガスなどのエネルギーキャリアが農園外に出荷することで、別途収入を得ることも出来る [8.3.4]。

多額の資本コスト、資金供給の不足、エネルギー需要からの遠隔性など、再生可能エネルギー技術の導入拡大を阻む障壁はあるが、今後、世界の農業部門で再生可能エネルギーの使用が増加する可能性は高く、一次生産、収穫後の作業における大規模、小規模なエネルギー需要に対応出来るようになると期待される [8.3.4.1～8.3.4.2]。

一次生産部門で再生可能エネルギーの普及を進めるための統合上の戦略は、地方、地域の再生可能エネルギー資源、現地のエネルギー需要パターン、プロジェクト融資機会、既存のエネルギー市場などに部分的に影響される [8.3.4.3]。

第9章: 持続可能な開発における再生可能エネルギー

9.1 序論

持続可能な開発は人間社会と自然の関係に関する問題を軽減する。従来、持続可能な開発は経済、環境、社会の3つを柱として構成されており、開発目標は概略的に3つに分類される。これらは相互依存的、相互支援的に強化し合っているが、開発目標は図式的に分類可能である。別の概念的枠組みでは、持続可能な開発は、弱い持続可能性と強い持続可能性という2つのパラダイムの両極において方向付けが可能である。これらのパラダイムでは、自然資本と人為的資本の代替性の想定が異なる。再生可能エネルギーは、3つの柱で構成される開発目標に貢献でき、また、弱い持続可能性、強い持続可能性双方の観点で評価可能である。これは、再生可能エネルギーの利用は、それによって将来における利用可能性を減少させない限り、持続する自然資本と定義づけられるためである [9.1]。

9.2 持続可能な開発と再生可能エネルギー間の相互作用

再生可能エネルギーと持続可能な開発の関係は、世界的、地域的な考慮が関わる目標と制約のヒエラルキーとして見る事が出来る。再生可能エネルギーが持続可能な開発にどの程度貢献するかを正確に把握するには、国別の評価が不可欠であるが、(1) 社会、経済開発、(2) エネルギーアクセス、(3) エネルギー安全保障、(4) 気候変動の緩和と環境や健康への影響の低減という、持続可能な開発が掲げる多くの重点目標に貢献出来る。危機的な人為的気候変動の緩和は、世界的な再生可能エネルギー使用増加を支える強い原動力の1つと考えられる [9.2, 9.2.1]。

これらの目標は、上記3モデルと弱い持続可能性と強い持続可能性という2つのパラダイムに関連付け出来る。持続可能な開発の概念は、政策決定者が持続可能な開発に対する再生可能エネルギーの貢献を評価し、経済、社会、環境上の妥当な措置を立案する際に、有益な枠組みを提示する [9.2.1]。

指標を使用すれば、エネルギーサブシステム (energy subsystem) の進捗が持続可能性の原則に沿ったものであるかを各国が監視する助けになり得るが、持続可能な開発の指標の分類には多数の異なる方法がある。本報告書と第9章の評価は、帰属するライフサイクル評価 (LCA) によるボトムアップ指標 (bottom-up indicator) またはエネルギー統計、動学的統合モデル (dynamic integrated modelling approach)、定性分析など、様々な方法論的ツールに基づく [9.2.2]。

社会、経済発展に対する再生可能エネルギーの貢献を評価するために、経済成長を測定する従来の基準 (GDP) やより広い概念の人間開発指数 (HDI) の分析が行われる。一部の国で再生可能エネルギー普及を支援する動機になっている雇用機会の可能性と同様、開発途上国の財政支援上の重大な疑義にも、取り組む [9.2.2]。

再生可能エネルギーまたは非再生エネルギーのいずれであっても、近代的エネルギーサービスへのアクセスは、特に発展の初期段階にある国々にとって、発展の評価と密接な相関関係にある。社会の最貧困層に近代的なエネルギーへのアクセスを提供することは、ミレニアム開発目標の8項目のどれひとつをとっても、その達成に非常に重要である。使用する具体的な指標としては、所得関連の一人当たりの最終エネルギー消費、電力アクセスの内訳 (へき地、及び都市部)、へき地、都市部で調理に石炭または伝統的バイオマスを使用する人口などがある [9.2.2]。

「エネルギー安全保障」という用語は、一般に認められた定義こそないものの、エネルギー供給の(突然の)混乱に対する頑健性として最も良く理解されている。資源の可用性と分配、及びエネルギー供給の変動性と信頼性という2つの広範囲のテーマは、現在のシステムまたは将来の再生可能エネルギーシステム計画のいずれにおいてもエネルギー安全保障に関連する問題として認識することが出来る。持続可能な発展のエネルギー安全保障の程度に対して情報を提供するために使用される指標は、埋蔵量、可採年数、一次エネルギー消費全体における輸入の割合、全輸入量におけるエネルギー輸入量の割合、変動性があり予測不可能な再生可能エネルギー源の割合がある [9.2.2]。

エネルギーシステムが環境に与える負荷全体を評価したり、潜在的なトレードオフを特定したりするには、影響とカテゴリの範囲を考慮しなければならない。たとえば、大気や水中への大量排出 (特に温室

効果ガス)、発電ユニット当たりの水使用、エネルギーと土地といったものが考えられ、これらは技術全体で評価される必要がある。ライフサイクル評価は、ある技術の持続可能性に関して可能性のある唯一の回答ではないと認識されているものの、ある技術がシステムに与える全体的影響を決定する際に非常に有益な方法論であり、比較基準となり得る [9.2.2]。

シナリオ分析では、統合モデルが再生可能エネルギーの様々な普及の道筋で、持続可能な開発が掲げる4つの目標をどの程度考慮するかについて、洞察を提示している。道筋は主に、多様なエネルギー技術間の複雑な相互関係を世界的に解決しようとするシナリオ結果として理解される。このため、第9章では主に、統合モデルを使用した世界的なシナリオについて取り上げる。これらは第10章でも分析の中心となる [9.2.2]。

9.3 社会、環境、経済的な影響: 世界及び地域の評価

国によって開発レベルが異なれば、再生可能エネルギー (RE) の進歩に対する動機も異なる。開発途上国の場合、再生可能エネルギー技術を導入する理由として、最も可能性の高いものは、エネルギーアクセスの提供、公式な (即ち法規制がなされ、課税可能な) 経済における雇用機会の創出、エネルギー輸入コストの低減 (または、化石燃料輸出国の場合、その天然資源量の寿命長期化) がある。先進産業国の場合、再生可能エネルギーを推進する主な理由には、気候変動緩和のための二酸化炭素排出削減、エネルギー安全保障の強化、及び縮小する製造部門の雇用減を再生可能エネルギーに付随する新規雇用により緩和するような経済における構造的変化の積極的な推進などがある [9.3]。

9.3.1 社会及び経済の発展

世界的には、1人当たりの収入は1人当たりのエネルギー消費と正の相関があり、経済成長は、過去数十年におけるエネルギー消費量増加の背景にある、最も関連性の高い要因と認識されている。しかし、エネルギー消費とマクロ経済的な生産額の増加との因果関係の方向性には、意見の一致はみられない [9.3.1.1]。

経済活動の拡大と多様化に伴い、より高度で柔軟なエネルギー源への需要が生じている。部門別にみると、発展の初期段階にある国は、居住部門で (次いで農業部門でも) 消費するエネルギーが、一次エネルギー全体のなかで占める割合が最も大きい。新興国経済においては、製造部門が優位に立っている。一方、完全に工業化した国においては、サービス及び輸送が占める割合が徐々に増加している (図 TS.9.1 参照) [9.3.1.1]。

国内総生産とエネルギー使用には強い相関があるが、世界全体では様々な幅広いエネルギー使用パターンがある。一人当たりの国民所得が高い国々では、エネルギー消費は比較的少ないが、その他の国々では、所得は伸び悩むなか、エネルギー使用は増加している。化石燃料源が豊富な国ではエネルギーに多額の補助金が支給されることが多いため、特にこの傾向がある。経済成長がエネルギー原単位を徐々に低下させれば、エネルギー使用から大きく切り離すことが出来るという、1つの仮説が成り立つ。さらに、開発途上国と過渡期の経済は「リープフロッグ」が可能である。つまり、近代的で効率の良いエネルギー技術を適用し、エネルギー使用を抑えることが出来る [9.3.1.1, Box 9.5]。

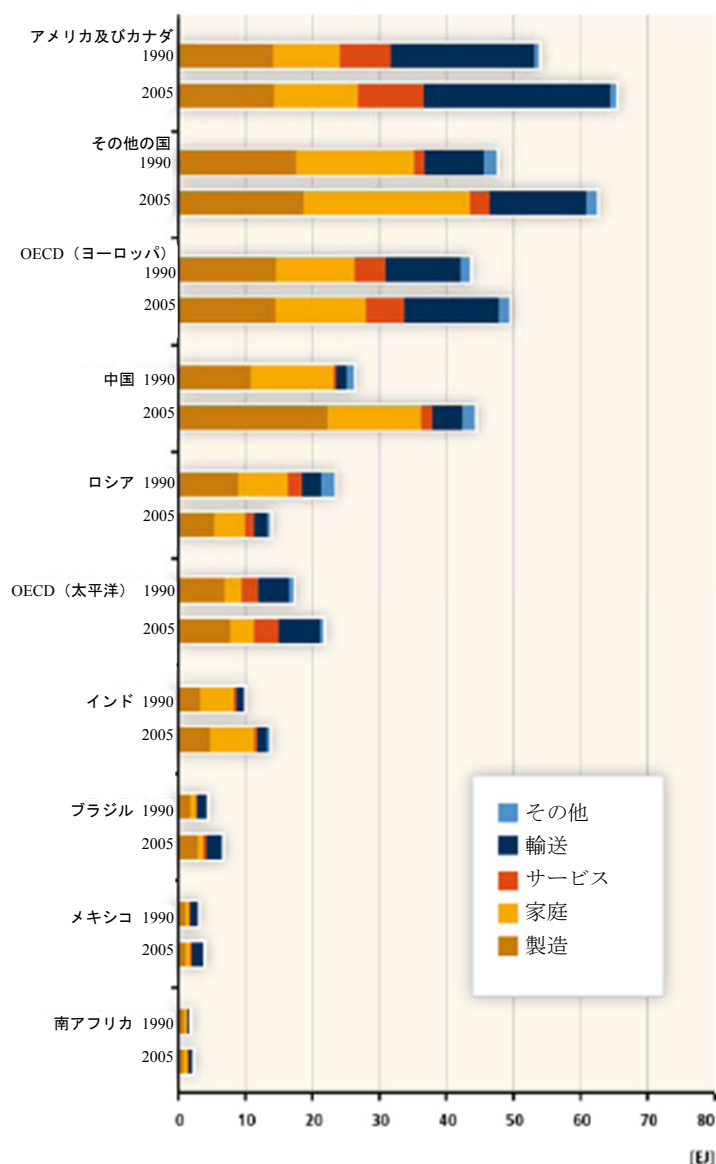


図 TS.9.1: 経済部門別のエネルギー使用（EJ）。基礎データは、直接換算法ではなく IEA の物理量法（physical content method）で計算されている点に留意が必要である。¹⁹ 注: RoW = その他の国 [図 9.2]

クリーンで信頼性のあるエネルギーへのアクセスは、健康、教育、男女平等、環境安全といった人間開発の基本的な決定要因の重要な前提条件である。人間開発指数を代理的指標に用いた場合、同指数が一般に高い水準にある国は、一人当たりのエネルギー消費は比較的多い。非伝統的エネルギー供給に大きなアクセスなくして、この指数が高くなるか平均にさえなる国はない。最低のエネルギー量が満たされて初めて妥当な生活水準（一人当たり 42GJ）が保証され、エネルギー消費の増加が生活の質をわずかに向上させる [9.3.1.2]。

再生可能エネルギーが現在の純雇用に与える影響の推計値は、妥当な方法論の使用について一致が見られないことから、ばらついている。それでもなお、再生可能エネルギーが与える長期的なプラスの影響については、雇用創出への重要な寄与があるとして一致が見受けられる。雇用創出については、国のグリーン成長戦略の多くで強調されている [9.3.1.3]。

一般に、再生可能エネルギーの経済的純コストは、ほとんどの場合、化石燃料によるエネルギー生産を上回る。特に発展途上国においては、関連するコストは、増加するエネルギー需要を満たすために再生可能エネルギーが望まれるかどうかを判断する主要因子であり、エネルギー価格の上昇が途上国の発展

¹⁹ 過去のエネルギーデータは経済部門のエネルギー使用でのみ利用可能である。直接換算法を用いたデータ換算の際に、各経済部門で使用する多様なエネルギーキャリアも明らかにする必要があるだろう。

の可能性を脅かす場合があるという懸念が指摘されている。全体的に言えば、コストの検討は、適用される負担分担の枠組みを切り離して、即ち世界的な公益と位置付けられる温室効果ガス削減から得られる便益のためのコストを誰が引き受けるかを決めずに議論することはできない [9.3.1.4]。

9.3.2 エネルギーアクセス

現在、世界の人口の大部分が、近代的でクリーンなエネルギーのサービスにアクセスできずにいるか、またはアクセスを限定されている。持続可能な開発という観点から見て、現在、エネルギーのサービスにアクセスできずにいるか、またはアクセスを限定されているグループ貧困層（財産、所得またはより統合的な指標で測定）、農村部地域や送電系統に接続していない人々に対するエネルギーのサービスの可用性を高めるために、持続可能なエネルギーの拡大が必要である [9.3.2]。

2009 年の推計値では、利用可能なデータとその質については制約があることを留意し、電力へのアクセスのない人々を約 14 億人としている。調理に伝統的バイオマスを使用する人々は約 27 億人であり、開発途上国で重大な健康問題（特に室内の大気汚染）その他社会的な負担（燃料集めに費やす時間など）を引き起こしている。家計の収入と低品質な燃料の使用には強い相関があることから（図 TS.9.2）、現在よく見られる持続不可能な使用をより持続可能で効率的な代替策にシフトし、不十分なバイオマスの消費というパターンを打ち破ることが、大きな課題となる [9.3.2]。

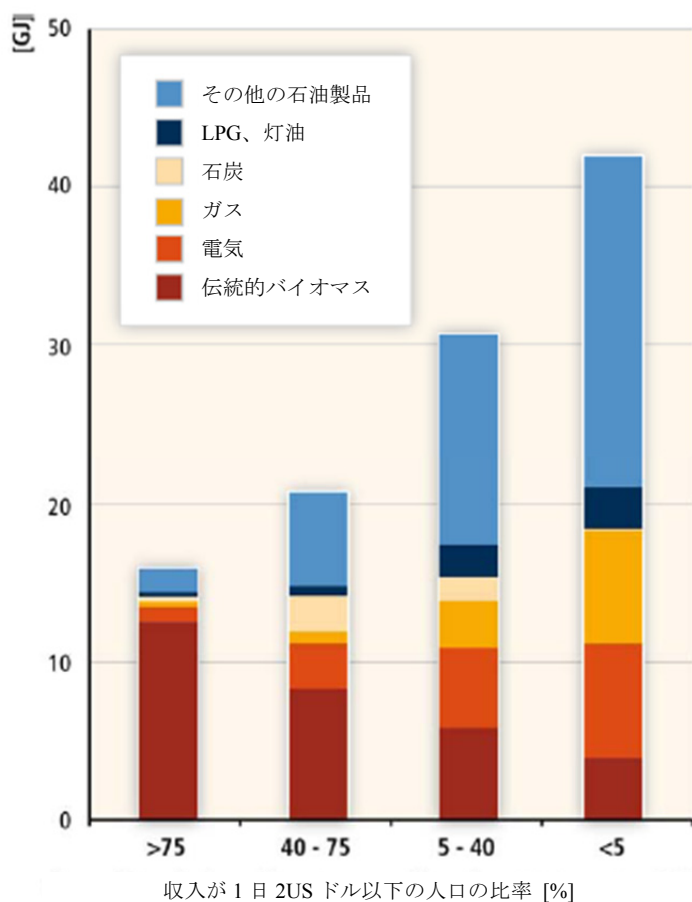


図 TS.9.2: 発展途上国における一人当たりの最終エネルギー消費と収入の関係。2000～2008 年の入手可能な最新データを参照。注: LPG = 液化石油ガス [図 9.5]。

エネルギーアクセスを「調理、暖房、照明、通信、生産的な用途、クリーンで信頼性があり手頃なエネルギーのサービスに、アクセス出来ること」と定義すると、エネルギーの階梯（energy ladder）を登る漸進的なプロセスが説明される。近代的エネルギーのサービスへのアクセスが基本的な水準であっても、コミュニティまたは家庭は大きな便益を得ることが出来る [9.3.2]。

開発途上国では、再生可能エネルギーを基盤とした分散的な網が拡大し、エネルギーアクセスは改善し

ている。この分散された系統は一般に、全国的な系統から相当な遠距離にあるへき地においてより競争力を持つ。へき地の電化は遅れているため、再生可能エネルギーを基盤とした小規模系統には大きな機会がある。加えて、非電力の再生可能エネルギー技術により、エネルギーのサービスの直接近代化を図る機会が生ずる。たとえば、温水や穀物の乾燥への太陽エネルギーの使用、輸送へのバイオ燃料の使用、暖房（加熱）、冷房（冷却）、調理、照明への近代的バイオマスの使用、また揚水への風力の使用などの複数の非電力技術などが考えられる。より持続可能な方法によるエネルギーアクセス提供において、再生可能エネルギー特有の役割はあまり理解されていないが、これらの技術の一部を用いたエネルギーアクセスは地域コミュニティのエネルギーの選択肢を増やしたり、経済を刺激するとともに、地方の起業に対しインセンティブを与え、照明や調理に関する基本的なニーズとサービスに対応することで、付随的な健康や教育に対する便益ももたらしている [9.3.2]。

9.3.3 エネルギー安全保障

再生可能エネルギーを使用すると、枯渇が進む化石燃料の供給から代替が可能になる。可採埋蔵量（ratio of proven reserves to current production）の現在の推計値によると、石油は約 40 年以内、天然ガスは約 60 年以内に世界的に枯渇する見通しである [9.3.3.1]。

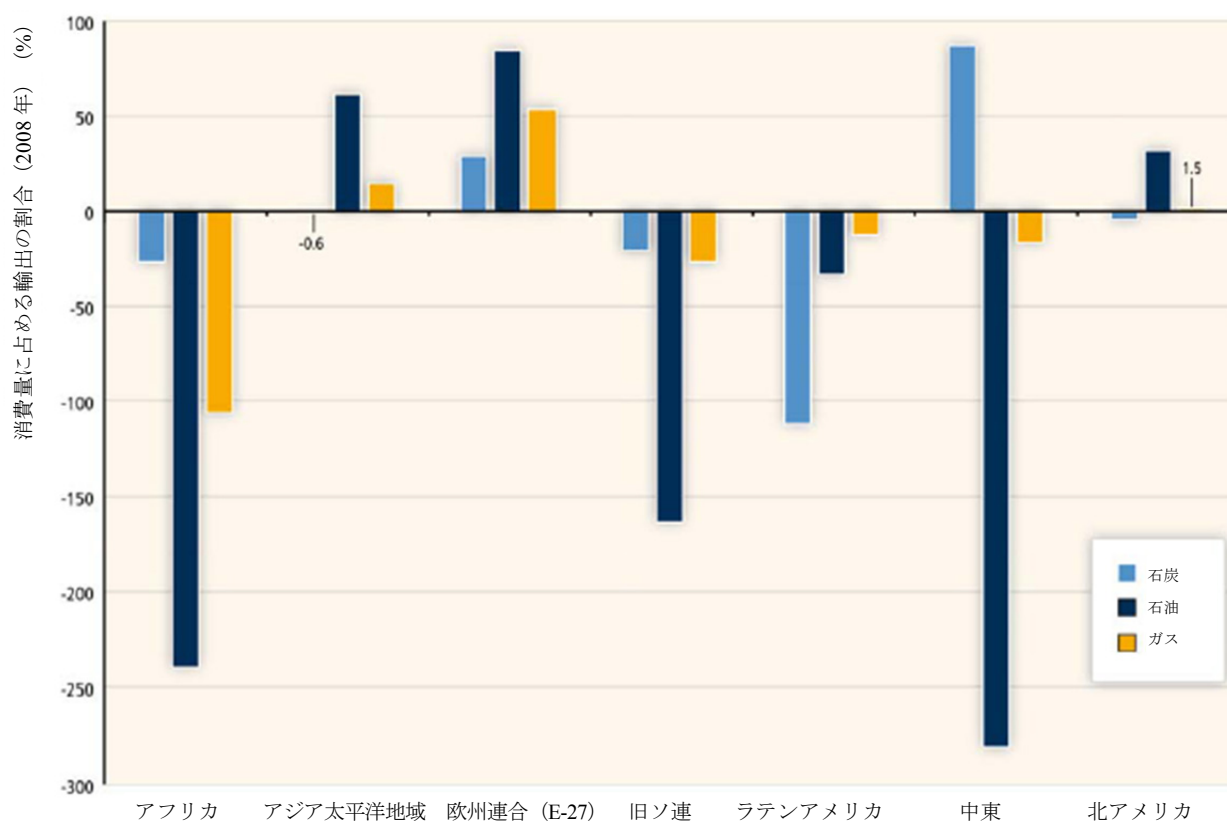


図 TS.9.3: 世界の特定の地域における総一次エネルギー消費量に占める石炭（硬質炭及び褐炭）、原油、天然ガスのエネルギー輸入の割合（2008 年）（%）。マイナスの値はエネルギーキャリアの純輸出を示す [図 9.6]。

再生可能エネルギー源の多くが局在し、国際取引が不可能であるなか、国のエネルギーポータフォリオでその割合が増加し、化石燃料輸入への依存が減少している。化石燃料は、埋蔵、生産、輸出の空間的分布が非常に不均一で、いくつかの地域への集中度が高い（図 TS.9.3）。再生可能エネルギー市場がこのように地理的に集中した供給とならなければ、エネルギー源のポートフォリオの多様化と価格変動への経済的脆弱性の低減につながる。石油を輸入する開発途上国では、再生可能エネルギーの使用が拡大すれば、地域で生産出来ない製品（ハイテクの資本財など）の輸入に対して、エネルギー輸入から外国為替フローに流用する手段になり得る。たとえば、ケニア及びセネガルでは、輸出収入の半分以上をエネルギー輸入に使用しているが、インドでは 45%超である [9.3.3.1]。

すべての産業にとって必要な希少無機鉱物の原材料を正当な価格で安定的に入手できるかどうかは次の課題となっているなか、再生可能エネルギー導入に必要な技術にも、輸入に依存することが考えられる [9.3.3.1]。

一部の再生可能エネルギー技術の出力の変動性に対しては、継続的で信頼性のあるエネルギー供給の確保のため、地域の実情に合った技術上・制度上の措置が必要になる場合が多い。信頼性のあるエネルギーアクセスは開発途上国特有の課題であり、インフラサービスの信頼性の指標で示されるように、サハラ以南のアフリカではほぼ半数の企業が自家発電の設備を維持している。このため、多くの開発途上国が、エネルギー安全保障の定義を拡大させ、地域の供給の安定性と信頼性も取り込み、これにより、特にエネルギーアクセスとエネルギー安全保障上の課題に関連性を持たせている [9.3.3.2]。

9.3.4 気候変動の緩和と環境、健康への影響の軽減

持続可能な開発では、環境の質を確保しつつ、過度な環境被害を回避しなければならない。多くの文献を参照すると、大規模な技術導入には環境的なトレードオフがつきものであり、ボトムアップの視点からエネルギー技術が環境に与える様々な影響を評価している多くの文献が参照可能である [9.3.4]。

温室効果ガス排出を通じた気候への影響は、一般によく研究されており、技術全体での「ゆりかごから墓場まで」の排出について、ライフサイクル [Box 9.2] で定量比較が容易に評価できる。非常に多くの研究で、大気汚染物質の排出、関連する健康への影響、及び運用に必要な水使用に関する報告が行われているが、大気汚染に関連する証拠に比べ、水の（ライフサイクルの）排出、土地利用、及び健康への影響については、証拠は少ない。評価は、温室効果ガス排出に関する発電、輸送燃料など、文献で取り扱われた部門に集中している。暖房や家庭へのエネルギーについては、大気汚染と健康のみに関連して、ごくわずかしかな論じられていない。生物多様性や生態系への影響はほぼ場所依存しており、定量化が難しいため、より定性的な方法で行われている。通常運用とは対照的な事故関連の負荷を説明するためには、9.3.4.7 節ではエネルギー技術関連のリスクの概要を示す [9.3.4]。

発電のライフサイクル評価では、化石燃料の選択肢に比べ、再生可能エネルギー技術からの温室効果ガス排出は概してかなり低いことが示されている。また、いくつかの条件では二酸化炭素回収・貯留を併用した化石燃料に比べても、低いとされている。集光型太陽熱発電（CSP）、地熱、水力、海洋、風力エネルギーの最大推計値は 100g CO₂eq/kWh 程度かそれ以下であり、再生可能エネルギーの全範囲の中央値は 4~46 g CO₂eq/kWh である。太陽光発電（PV）とバイオマス発電の推計値の場合、原子力の場合も同様に、分布の上位四分位点は他の再生可能エネルギー技術の最大値の 2~3 倍になる。ただし、バイオエネルギー生産の温室効果ガスの収支では不確かさが高い。バイオマス発電（土地利用変化を除く）は化石燃料システムと比べた場合、温室効果ガス排出を削減する可能性があり、埋立処分や副産物の残渣や廃棄物からの温室効果ガス排出の回避につながる可能性がある。バイオエネルギーと二酸化炭素回収・貯留を併用すれば、さらに削減出来るだろう（図 TS.9.4） [9.3.4.1]。

生産エネルギーの質の違い、変動性のある発電源の追加に関して系統運用に加わる潜在的な影響や、直接または間接 LCU を計上すれば、再生可能エネルギー発電へのシフトから得られる温室効果ガス排出の便益は減少しかねないが、この便益を否定するものではない [9.3.4.1]。

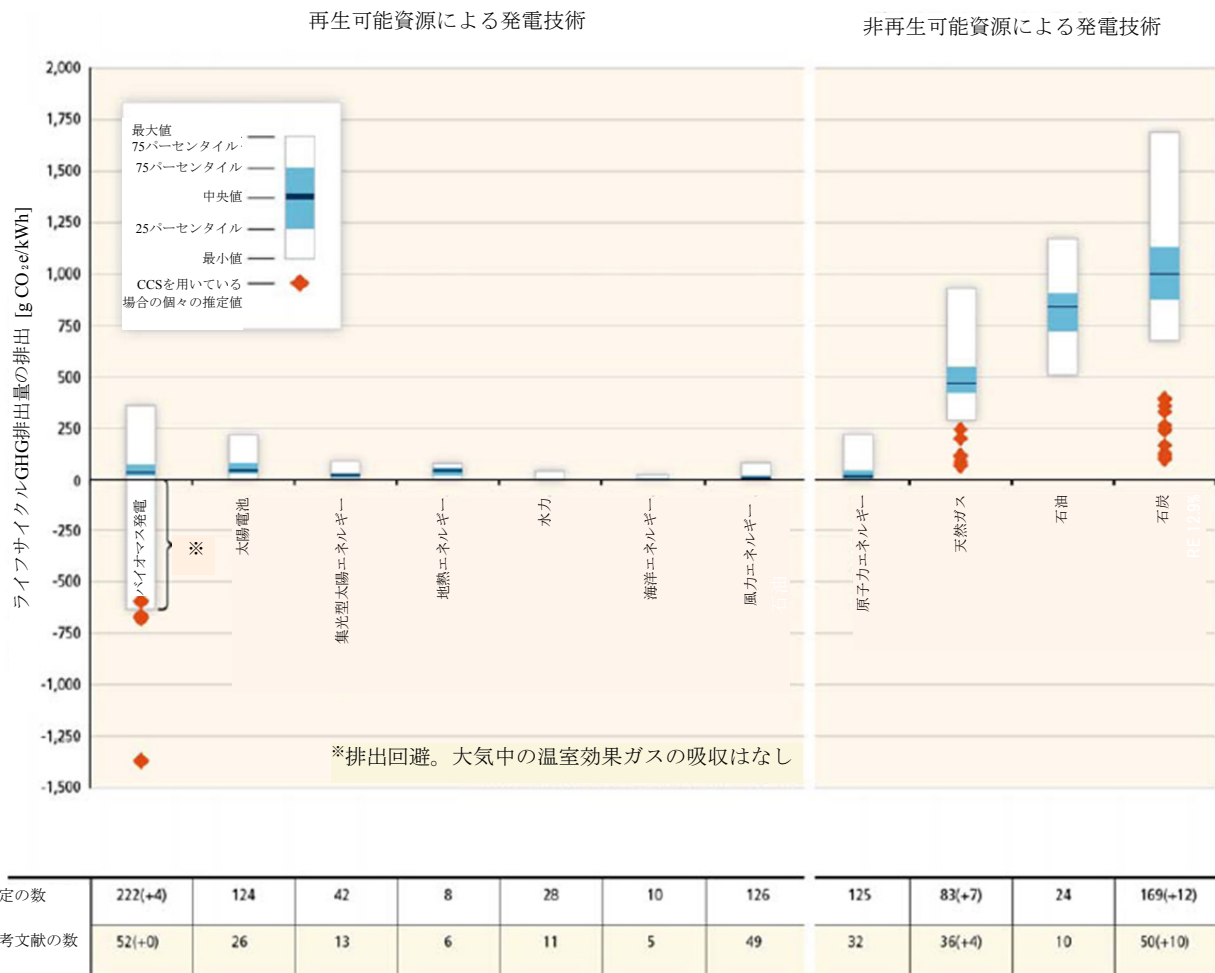


図 TS.9.4: 広範なカテゴリーの発電技術に加え、二酸化炭素回収・貯留を組み合わせた一部技術におけるライフサイクル温室効果ガス排出量 (g CO₂eq/kWh) の推定。土地利用に関連する炭素ストックの正味の変化（バイオマス発電及び貯水池からの水力が主に該当する）と土地管理の影響は除外している。バイオマス発電の負の推定値²⁰は、埋立処分及び副産物の残渣や廃棄物からの排出回避についての想定に基づく。レビューの参考文献及び方法は、Annex II で報告されている。推計の数が参考文献の数を上回るのは、多くの研究で複数のシナリオを検討しているためである。丸括弧内に報告した数は、二酸化炭素回収・貯留を併用した技術を評価した追加の参考文献及び推定値に関するものである。分布情報はライフサイクル評価関連の文献から現在入手出来る推計にするものであるが、あらゆる普及の条件の検討には、基礎となる理論的極限值、実際の極限值（practical extrema）、あるいは実際の中心となる傾向には必ずしも関連しない [図 9.8]。

エネルギー回収期間などの値は、技術や燃料のエネルギー上の効率を示しており、近年、技術的な進歩と規模の経済の恩恵で、一部の再生可能エネルギー（風力や太陽光など）で急速に低下している。化石燃料技術と原子力技術の場合は、燃料の抽出と加工が継続的に必要というエネルギー的要件が特徴的である。これは、従来型の燃料供給が減少し、非従来型の燃料の割合が増加するなか、重要度が高まるだろう [9.3.4.1]。

輸送燃料からの温室効果ガス排出を評価するためには、特定の石油燃料、第一世代のバイオ燃料（砂糖やデンプンから生産したエタノール、油糧種子から生産したバイオディーゼル、再生可能ディーゼル）、リグノセルロース系バイオマス由来の特定の次世代バイオ燃料（エタノールやフィッシャー・トロプシュタイプディーゼル）について、一次エネルギーの採掘から車両走行による消費まで（well-to-wheel）で比較する。この際、土地利用変化（直接、間接）からの温室効果ガス排出とその他の間接的影響（石

²⁰ 本報告書で示すライフサイクル評価の用語では、「マイナスの推計」は排出回避を指す。二酸化炭素回収・貯留と組み合わせてバイオエネルギーを用いる場合と異なり、排出回避は大気中から温室効果ガスを取り除くものではない。

油消費量の回復など)は除外されているが、以下のように個別に検討される。石油燃料をバイオ燃料で代替する方法は、燃料供給網に直接関連してライフサイクル上の温室効果ガス排出を削減する可能性がある。第一世代のバイオ燃料は結果的に、温室効果ガス緩和ポテンシャルは比較的中程度(第一世代のバイオ燃料の場合は $-19\sim 77\text{g CO}_2\text{eq/MJ}$ に対し、石油燃料は $85\sim 109\text{g CO}_2\text{eq/MJ}$)だが、大半の次世代バイオ燃料(ライフサイクル上の温室効果ガス緩和ポテンシャルは $-10\sim 38\text{g CO}_2\text{eq/MJ}$)はそれ以上の気候緩和効果をもたらし得る。ライフサイクル上の温室効果ガス緩和ポテンシャルの推計は、バイオ燃料と石油燃料の双方とも変動し、不確かである。これは主に、生物物理パラメータの想定、方法論上の課題、バイオマスの生産地や生産方法が原因である [9.3.4.1]。

土地利用変化による ライフサイクル上の 温室効果ガス排出 は定量化が難しい。土地管理やバイオマス源管理の慣行が温室効果ガス排出削減の便益に大きく影響し、それ自体がバイオエネルギーの持続可能性に影響するためである。土地利用や土地管理の変化は、燃料、電力、熱として用いられるバイオマス生産によって直接、間接的に起こる。この変化は、土地利用に関する炭素ストックの変化につながる可能性がある。転換した土地の前提条件によるが、可能性があるのは、大幅な先行排出が生じ、正味の削減 (net saving) 達成までに数十年から数世紀のタイムラグが必要になるか、または土壌や地上のバイオマスへの炭素の純取り込みの向上につながるかの、いずれかである。バイオエネルギーの温室効果ガスの正味の影響を評価しようにも、間接的な土地利用変化の観察、測定、特定に課題があるため難しい。環境的、経済的、社会的、政策的な見地に左右され、直接の観察も出来ず、単一の原因に帰属させることも簡単ではない。複数の第一世代バイオ燃料の道筋が誘導する、直接、間接の土地利用変化に関連した温室効果ガス排出の例示的推計で、30年の時間枠では中央の傾向を示すことができる(様々な報告方法に基づく)。これによるとエタノールの場合(EUの小麦、アメリカのトウモロコシ、ブラジルのサトウキビ)は $5\sim 82\text{g CO}_2\text{eq/MJ}$ で、ディーゼルの場合(大豆と菜種)は $35\sim 63\text{g CO}_2\text{eq/MJ}$ である [9.3.4.1]。

地域の大気汚染の影響は、大気汚染物質(粒子状物質(PM)、亜酸化窒素(NO_x)、二酸化硫黄(SO_2)、非メタン炭化水素(NMVOC))が世界 [Box 9.4]、地域で影響を与えるなか、別の重要な評価カテゴリである。化石燃料による発電に比べ、非燃焼型の再生可能エネルギーによる発電技術は、地域の大気汚染とそれに伴う健康への影響を大幅に緩和するポテンシャルを有する(この節の以下を参照)。しかしながら、輸送燃料については、バイオ燃料への転換が排ガスに与える影響は今のところはっきりしていない [9.3.4.2]。

化石燃料とバイオマス燃焼から生ずる地域の大気汚染物質排出は、エネルギーが 人間の健康 に与える最も重要な影響である。環境大気汚染は、石炭や伝統的バイオマスの燃焼から生ずる屋内汚染物質への曝露と同様に、特に開発途上国の女性と子どもにとって、健康に大きな影響を与え、世界の疾病や死亡の最も重要な原因のひとつと認識されている。たとえば、健康リスクの定量比較(2000年)によると、160万人以上の死亡者と3,850万人以上の障害調整生存年数(DALY)の原因が固体燃料から生ずる屋内の煙と考えることが出来る。燃料の転換に加え、改良型の調理ストーブ、換気や建物の設計、行動変化も緩和の選択肢である [9.3.4.3]。

水への影響は、エネルギー技術の運用による消費と上流の水消費、水質に関連している。これらの影響は場所に特有であり、地域の資源とニーズに関して検討する必要がある。水力や一部のバイオエネルギーシステムなどの再生可能エネルギー技術は、水の使用可能性に依存し、水不足の悪化、緩和のいずれにもつながる可能性がある。水不足の地域では、非熱型の再生可能エネルギー技術(風力や太陽光発電など)が、水資源に追加のストレスを与えずにクリーンな電力を提供出来る。従来、冷却型の熱再生可能エネルギー技術(集光型太陽熱発電、地熱、バイオマス発電など)は、非再生可能エネルギー技術に比べて運用時に水を多く使用する可能性があるが、乾式冷却の形態をとるとこの影響を緩和出来る(図 TS.9.5)。上流工程で用いる水は、一部のエネルギー技術(特に燃料抽出やバイオマス生産)で高くなる可能性がある。バイオマス生産も含め、バイオマスによる発電に関する現在の水フットプリントは、地熱発電プラント運用の際に消費される水の量に比べ、最大で数百倍に達する可能性がある。バイオマス生産、鉱山操業、燃料加工も水質に悪影響を与える可能性がある [9.3.4.4]。

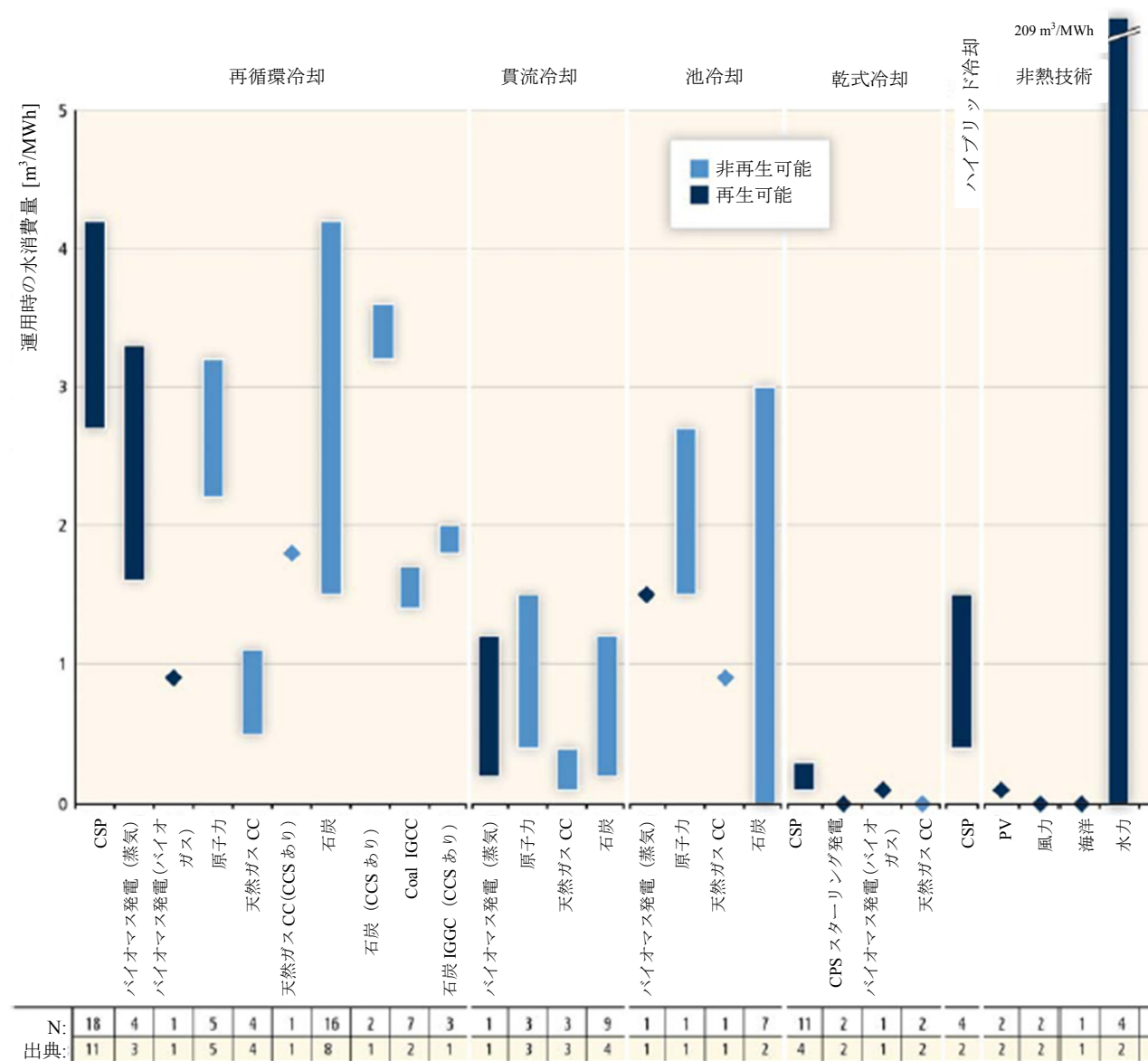


図 TS.9.5: 非熱発電技術と熱による発電技術で見た場合の、運用に必要な水消費量の範囲（利用可能な文献のレビューに基づく (m³/MWh)）。棒は、利用可能な文献における絶対範囲、ダイヤモンドは単一の推計を示す。n は出典で報告された推計値の数を示す。水力の上限値は総蒸発量を測定したいくつかの研究によるもので、代表的なものではない場合があることに留意が必要である（Box 5.2 参照）[図 9.14]。

注: CSP: 集光型太陽熱発電、CCS: 二酸化炭素回収・貯留、IGCC: 石炭ガス化複合発電、CC: コンバインドサイクル発電、PV: 太陽光

大半のエネルギー技術には、サプライチェーン全体が含まれる場合、かなりの土地が必要になる。ただし、エネルギー技術による土地利用のライフサイクル推定値を報告した文献は乏しい。利用可能な証拠は限られているが、化石燃料チェーンの土地利用のライフサイクル値は、再生可能エネルギー源の土地利用と同程度かそれ以上である可能性があるとしている。ほとんどの再生可能エネルギー源では、土地利用の需要は運用段階において最大となる。例外は専用の原材料で生産するバイオエネルギーの土地利用強度であり、これは他のエネルギー技術に比べてかなり高く、原材料の違いや気候エリアの違いによってヘクタールあたりのエネルギー収量の変動は大きい。再生可能エネルギー技術（風力、波力、海洋）の多くは、その面積は大きい、農業、漁業、レクリエーション活動などの二次利用にも活用出来る [9.3.4.5]。土地利用と関連するのは生態系や生物多様性に対する（場所に特有の）影響である。多様な道筋を通じて、最も顕著な影響は、生息地に大規模かつ直接的に物理的変更を加えることにより生じたり、さらに間接的な生息地の悪化という形で生じたりする [9.3.4.6]。

事故リスクの比較評価は、現在・将来のエネルギーシステムと関連して、エネルギー安全保障や持続可能性の実績を包括的に評価するうえで、極めて重要な側面である。エネルギー技術が社会や環境にもたらすリスクは、実際の発電時だけでなく、エネルギーのサプライチェーンの全段階で生ずる。再生可能エネルギーは、その事故リスクは軽微というわけではない。だが、分散的な構造が多いため、死亡をもたらす確率から見た場合、悲惨な結果が生ずる可能性は大きく限定される。再生可能エネルギー技術の死亡をもたらす確率は全般的に低い、一部の水力発電に付随するダムは、場所特有の要因により、特有のリスクが生ずる場合がある [9.3.4.7]。

9.4 再生可能エネルギーに関する持続可能な開発の道筋の示唆

現在及び生まれつつある再生可能エネルギーシステムが持続可能な開発の4つの目標に与える影響をより統計的に分析した結果によると、再生可能エネルギーの普及に関して可能性のある道筋はより動的な方法で評価されるため、持続可能な開発についての時点をまたいだ懸念も組み入れている。将来の再生可能エネルギーと持続可能な開発の道筋の相互関係は、個別のエネルギー技術の部分的な分析によって予測することはできないため、議論は、一般に、世界または地域規模のエネルギーシステムにおける代替技術のポートフォリオを扱っているシナリオ文献の結果を基に行う [9.4]。

本節（第10章10.2節参照）で検討した長期的シナリオの圧倒的多数は、コンピュータによるモデリングのツールを使用して構築された。これらのツールでは、エネルギーの供給、変換、使用の様々な選択肢の間の相互作用を最低限扱っている。モデルは、地域のエネルギー経済的モデルから統合評価モデル（IAM）にまたがり、ここでは統合モデルとして参照される。歴史的に見て、これらのモデルはエネルギー移行の技術的、マクロ経済的側面に強く注目しており、そのプロセスでは、技術的な普及の大規模な総体的措置か、特定の供給源による発電が生まれた。持続可能な開発と再生可能エネルギーの相互作用の理解を促すための長期的なシナリオ形成とそのポテンシャルにおいて、これらのモデルの価値は、様々な地域や時間スケールで幅広い人間活動全体の相互作用を検討出来るかにかかっている。統合モデルは開発が継続しており、その一部は将来における持続可能性の懸念を提示するうえで非常に重要になる。たとえば、時間分解能や空間分解能の増加、人口全体での富の分配による正確な表示、人間や物理的な地球システムの特性のきめ細かな取り込みなどが挙げられる [9.4]。

評価では、モデル分析が持続可能な開発の道筋に関して現在伝える必要のある事柄や再生可能エネルギーの役割について重点を置き、将来の持続可能性の課題を深く理解するためにモデル分析を向上させる方法を評価している [9.4]。

9.4.1 社会、経済の発展

統合モデルは通常、マクロ的視点が強く、福祉策の進歩を考慮していない [9.2.2, 9.3.1]。その代わりに経済成長に重点を置く。経済成長それ自体は持続可能性にとって不十分な手段だが、様々な安定化の道筋という点では福祉を測る指標として使用出来る。緩和シナリオは通常、将来の温室効果ガス排出に上限を設け、一時的に強い持続可能性の制約を課している。この結果、緩和技術の使用可能性とコストの想定に基づき、福祉の損失（通常、国民総生産や先立つ消費として測定される）が生ずる。温室効果ガスのさらなる抑制のために技術的代替の使用可能性を制限すれば、福祉の損失は増加する。様々な温室効果ガス安定化濃度で再生可能エネルギーを抑制する影響を具体的に評価した研究では、すべての再生可能エネルギー技術の幅広い使用可能性が安定化濃度の低下には必須であること、安定化濃度がそれほど厳しくない場合でも、低炭素技術（再生可能エネルギーを含む）の全面的な使用可能性が緩和コストを比較的強く抑えるために極めて重要であることが示されている [9.4.1]。

地域的な影響については、シナリオ分析では、再生可能エネルギーの生産拡大は、その大部分が開発途上国で行われる可能性が高いとしている。再生可能エネルギー技術の高い均等化発電原価を克服するという課題は今だに解決途上だが、これらの結果から、開発途上国は先進国がこれまで辿ってきた排出集約度の高い開発の道のりをリープフロッグするポテンシャルがあることが示されている。しかしながら、地域における緩和の機会、技術の使用可能性、人口や経済成長といった多くの要因に左右され、多様である。コストも、世界的な気候変動緩和の枠組みに基づき、取引可能な排出量の割り当てに左右される（当初、長期双方の割り当てに該当する） [9.4.1]。

一般に、シナリオ分析では、再生可能エネルギー、緩和、経済成長の間に先進国、開発途上国で同一の関連性が見られることが指摘される。影響力のみは概して、附属書 I 諸国に比べ非附属書 I 諸国で大きい、これは、経済成長の想定速度が速く、結果的に長期の緩和負担も増大することにつながる。ただし、長期の世界的シナリオの形成に使用されたモデル構造は一般に、世界の全地域で経済市場と制度的なインフラが完全に機能すると想定している。また、すべての国、特にこれらの想定 of 根拠が薄弱な開発途上国に広がる特殊な状況を割り引いている。差異の性質や、各国の社会的、経済的発展に与えかねない影響は、積極的な将来の研究で取り上げられるべきである [9.4.1]。

9.4.2 エネルギーアクセス

統合モデルは、先進国の情報と経験を基にすることが非常に多く、世界の他の地域や様々な発展段階にある地域のエネルギーシステムについては、同様の推移が見られるという想定に頼っている。通常、モデルでは開発途上国における重要かつ決定的なダイナミクス（燃料の選択肢、行動の不均一性、非公式経済など）を捉えていない。このために、再生可能エネルギーとエネルギーのサービスにおける将来の使用可能性に見られる相互作用を様々な人口で評価出来ない。これらには、基本的な家事や輸送、商業、製造、農業用途のエネルギーが含まれる。しかしながら、一部のモデルでは、可能性のある供給不足、非公式経済、多様な所得層といった要因を統合したり、分布的な分解能（distributional resolution）を増加したりし始めている [9.4.2]。

利用可能なシナリオ分析は今でも、多くの不確かさで特徴付けられる。インドの場合、社会の所得分布が、所得増加と同様にエネルギーアクセスの拡大に重要であることが分かっている。また、エネルギーアクセスの拡大は、持続可能な開発のすべての側面に必ずしも有益なわけではない。たとえば、伝統的バイオマスから近代的エネルギーへのシフトは、単に化石燃料へのシフトかもしれない。再生可能エネルギーへのシフトを強要し、近代的エネルギーのサービスへのアクセスを提供すると、家計の予算に負の影響を与える可能性もあるが、利用可能なシナリオ分析は概して、エネルギーアクセスの拡大に政策や財政支援が果たす役割に注目している [9.4.2]。

供給能力と構造的硬直性（エネルギー技術の活用の根底にある社会的現象と構造的変化を、多くのモデルが把握できない）をさらに改善することは、特に難しい。国内の最貧層、女性、特定の民族、または特定の地理的地域の人々を対象としたエネルギーの結果の明示的な提示は、現在の世界規模のモデル出力の範疇外になる傾向がある。エネルギーアクセスの選択肢で可能性のある範囲をより包括的に提示するために、将来のエネルギーモデルは、関連する決定要因（伝統的燃料、電化モード、所得分布など）をより陽的に表現し、これらを開発の代替的な道筋の表現に結び付けることを目的とするべきである [9.4.2]。

9.4.3 エネルギー安全保障

再生可能エネルギーは、資源の使用可能性と分布、エネルギー源の変動性に関する懸念を緩和し、エネルギー安全保障に影響を与えることが出来る [9.2.2, 9.3.1]。緩和シナリオにおける再生可能エネルギーの普及が、エネルギー・ポートフォリオの多様化により混乱の全体的リスクを軽減する限り、エネルギーシステムは、エネルギー供給の（突然の）混乱に左右されない。シナリオでは、再生可能エネルギーが果たすこの役割はエネルギーの形態により異なる。太陽、風力、海洋エネルギーは発電と緊密な関係があり、建築部門や産業部門において集中的に使用され、枯渇が進む化石燃料を代替するポテンシャルがある。適切な炭素緩和政策が実行されれば、発電は比較的簡単に脱炭素化出来る。対照的に、輸送部門における液体燃料への需要は、技術的ブレークスルーがない限り、引き続き非弾力的である。バイオエネルギーは重要な役割を果たし得るが、これは二酸化炭素回収・貯蔵の使用可能性による。二酸化炭素回収・貯蔵との組み合わせで、発電に流用出来るだろう。この結果、エネルギーシステムは負の炭素純排出となり、全体的な緩和努力が大幅に円滑になる [9.4.1, 9.4.3]。

こうした背景の下、過去の石油供給の混乱に関連して生じたエネルギー安全保障上の懸念が今後も引き続き関連する可能性が高い。開発途上国の場合、すべての評価シナリオで世界の石油総消費量における途上国の割合が高まるため、この課題はさらに重要になる（図 TS.9.6b）。輸送部門のバイオ燃料や電化など、石油の技術的代替がシナリオ分析で優位な役割を果たさない限り、大半の緩和シナリオでは、

石油の累積消費量に関して、ベースラインと政策シナリオの間に大幅な差異は生じない (図 TS.9.6a) [9.4.3]。

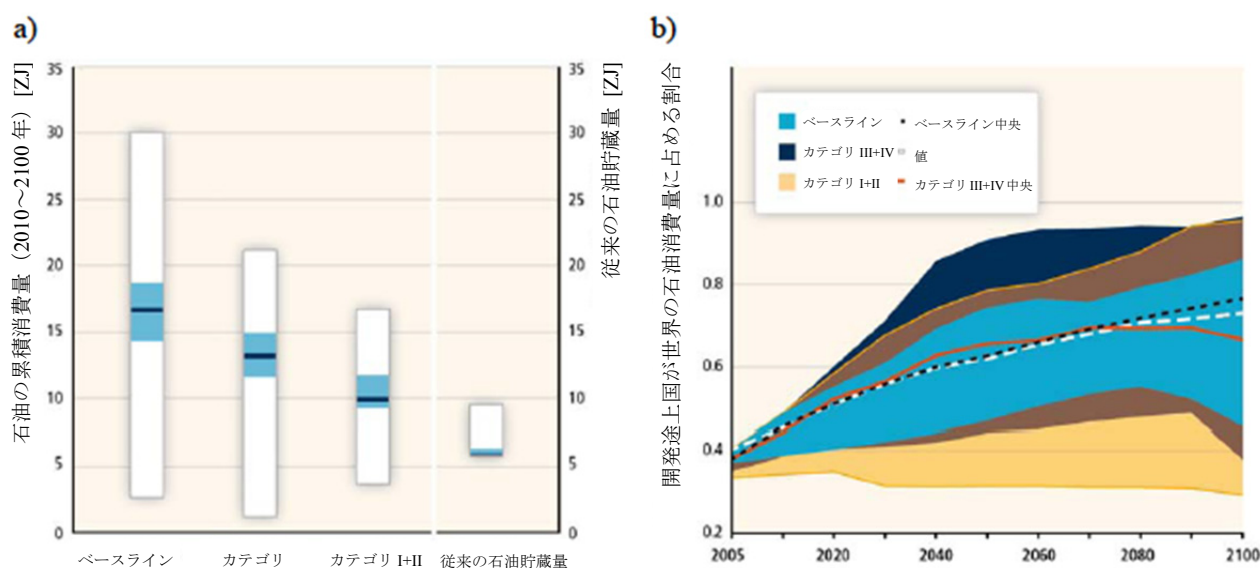


図 TS.9.6: a) 第 10 章で評価された様々なシナリオ群（ベースライン、カテゴリ III、カテゴリ IV、カテゴリ I+II（二酸化炭素安定化濃度が低い場合））における、従来の石油埋蔵量と 2010～2100 年の石油の累積消費量予想の比較 (ZJ)。濃い青の太線は中央値、淡い青の棒は四分位間範囲（25～75 パーセントイル）、周囲にある白い部分はすべての評価シナリオの全範囲を示す。最後の列は、従来の確認可採埋蔵量（淡い青の棒）と推定の追加埋蔵量（周りにある白い棒）を示す。b) 様々な長期シナリオ群を対象とした、非附属書 I 諸国の石油消費量が世界に占める割合。第 10 章の評価シナリオに基づく [図 9.18]。

バイオエネルギー市場の成長は、販売者が少数で現在の石油市場と類似していた場合、将来的にはエネルギー安全保障上にさらに課題が生じ得る。こうした環境では、食糧価格が変動するバイオエネルギー市場に連動し得るリスクは、食糧価格の高騰と変動が明らかに貧困層に打撃を与える状況であれば、持続可能な開発に対する重大な影響を回避するために緩和しなければならない [9.4.3]。

変動する再生可能エネルギー技術の導入により、新たに懸念が生ずる。これはたとえば、極度の自然現象や国際的な価格変動などがあり、大規模な統合モデルでは今のところ十分に解決されていない。システムの信頼性を高める追加的な取り組みを行うと、追加コストやバランスの必要性（エネルギー貯蔵の保有など）、補完的で柔軟な発電の開発、ネットワーク・インフラと連系の強化、エネルギー貯蔵技術、制度上の取り決めの改定（調節機構や市場メカニズムなど）を伴う可能性が高い [7.5, 8.2.1, 9.4.3]。

現在、エネルギー安全保障上の考慮は、通常の場合、最近の記憶に新しい最も顕著なエネルギー安全保障上の課題に重点を置く。しかしながら、エネルギー安全保障の将来の側面は、たとえば、再生可能エネルギー技術の重大な物質投入量に関連する事柄など、これらの課題を超えた領域にある場合もある。これらの幅広い懸念と、これらを解決するリサイクルなどの選択肢は、将来の緩和シナリオや再生可能エネルギーのシナリオから大部分が欠落している [9.4.3]。

9.4.4 気候変動の緩和と環境、健康への影響の低減

化石燃料を再生可能エネルギーや他の低炭素技術に代替すれば、窒素酸化物と硫黄酸化物の排出削減に大きく貢献出来る。環境や健康への影響に関連して、硫酸による汚染などの要因に陽的表現を取り込んでいるモデルは複数ある。ここでは、気候政策は、地域の大気汚染改善につながる可能性があるが、大気汚染の緩和政策は必ずしも温室効果ガス排出削減にはつながらないことが示された。他に示唆されるいくつかの潜在的なエネルギーの軌道の 1 つは、バイオ燃料生産支援へ土地が流用される可能性である。シナリオ結果は、気候政策は他の政策措置と併用されない場合、広範な森林減少をもたらす可能性を指摘している。土地利用がバイオエネルギー作物栽培に転換されつつあり、温室効果ガス排出を含め、

持続可能な開発に悪影響を与える可能性がある [9.4.4]。

残念なことに、先述の関連（土地利用（変化）、二酸化硫黄、及び粒子状物質の排出）を除き、既存のシナリオ文献では、水使用、エネルギーの選択肢が家庭向けサービスに与える影響、屋内の空気の質など、持続的なエネルギー発展の持つ非排出関連の要素の多くを明確に扱っていない。これは、所得分布や地理的分布の詳細がない場合にも、相当広い地域を検討する目的のモデルで部分的に説明出来る。環境的な影響を地域で幅広く評価する場合、モデルは地理的影響を小さい規模で見る必要があるが、これは現在、継続中の研究が抱える問題である。結局のところ、多くのモデルはライフサイクル評価の影響を異なるシナリオに取り入れることは明確に出来ていない。これらはどんな影響を持つか、カテゴリ全体で比較するかどうか、またその比較方法や、将来のシナリオに取り込まれるかどうかは、将来の研究で有益な分野を成す [9.4.4]。

9.5 持続可能な開発における再生可能エネルギーの障壁と機会

持続可能な開発の文脈において再生可能エネルギーの普及戦略を追求することは、すべての環境面、社会面、経済面における効果を明示的に考慮することを意味する。計画、政策及び実施プロセスの統合は、再生可能エネルギーの普及のためにおこりうる障壁を予測し、乗り越え、普及の機会を探索することで、これを支えることが可能である [9.5]。

持続可能な開発に特に関連する障壁や、再生可能エネルギーの普及を妨げたり持続可能性基準のトレードオフにつながるような障壁については、社会文化的な障壁、情報・意識啓発上の障壁、市場関連の障壁、経済的障壁に関連する [9.5.1]。

社会文化的な障壁や懸念は、様々な起因から生じ、本来は、社会、個人の価値観や規範と関連する。こうした価値観や規範は、再生可能エネルギー技術の認識と受容、それに個人、集団、社会による普及の潜在的効果に対し影響を与える。持続可能な開発の見地から見た場合、こうした社会文化的な懸念にあまり注意を払わないために障壁が生ずる場合がある。その例として、生物多様性と生態系、景観美学、水や土地の利用とその権利、競合利用の際の使用可能性などへの影響を含む行動、自然生息地、自然遺産と人的遺産に関する障壁が挙げられる [9.5.1.1]。

再生可能エネルギーの普及を急速かつ大規模に進め、気候変動緩和の目標達成に寄与するには、国民の意識と受容も重要な要素である。再生可能エネルギーの大規模な導入は、世論の理解及び支持があつてこそ成功可能である。このため、目標の達成、幅広い適用機会に関連するコミュニケーションに特化した取り組みも必要になる。ただし同時に、計画決定における国民参加、便益分配における公平性と平等性の考慮、再生可能エネルギー普及のコストも同様に重要な役割を果たし、これらは避けて通ることは出来ない [9.5.1.1]。

開発途上国では、乏しい技術スキルやビジネススキル、技術的なサポートシステムの不足が、特にエネルギー部門で顕著であり、使用可能で適切な再生可能エネルギーの選択肢に関して、潜在的な消費者に意識啓発と情報発信を行っていくことが理解と市場形成の主な決定要因である。この意識の落差は、経済成長に貢献する再生可能エネルギーの普及と中小企業の発展に影響を与える最も重要な要因と認識される場合が多い。また、マクロレベルや企業レベルでの技術上、ビジネス上の能力向上など、再生可能エネルギーの開発、導入、普及を進める民間アクターの能力に注目する必要がある [9.5.1.2]。

合理性に加え、再生可能エネルギーに対する態度は感情や心理的問題に左右されることを示唆している。再生可能エネルギーの普及、情報・意識啓発の取り組みと戦略を成功させるには、この点を明確に考慮する必要がある [9.5.1.2]。

持続可能な開発を背景に再生可能エネルギーの経済的側面を評価するには、社会的なコストや便益を明確に検討する必要がある。再生可能エネルギーは、コスト効率性、地域の妥当性、環境への影響や分布への影響を対象とした定量的基準をベースに評価されるべきである。系統の規模及び技術は、再生可能エネルギーの経済的実現性と、非再生可能エネルギーと比較した場合の、競争力が主な決定要因になる。経済的実現性のある適正な再生可能エネルギー技術は、農村部地域における非系統連系のエネルギーのアクセス拡大に有効な場合が多いことが分かっている [9.5.1.3]。

再生可能エネルギー導入が経済的観点から実現可能な場合、他の経済的・財政的な障壁がその普及に悪影響を与えるかもしれない。設置コストや系統接続コストなど、多額の先行投資コストが、再生可能エネルギー普及にあたり頻繁に障壁となりうる例である。開発途上国では、経済成長と持続可能な開発を刺激し、農村地域と都市近郊の貨幣経済を調和させるためには、再生可能エネルギーの普及とともに政策や起業支援システムが必要となる。適切な資源の潜在的データがないと、資源の使用可能性に関する不確かさに直接影響が及び、投資家やプロジェクト開発事業者にとってはリスクプレミアムの上昇につながるだろう。環境的、社会的外部性の内部化により、多様なエネルギー源や技術のランキングに変化が起こり、持続可能な開発上の目的と戦略に重要な教訓となる [9.5.1.3]。

持続可能な開発に関する国際間、国、地域レベルの戦略、民間の戦略、社会の非政府部門の戦略は、再生可能エネルギーと持続可能な開発の政策や慣行を統合することによって、障壁の克服と再生可能エネルギー普及の機会の創出に役立つことが出来る [9.5.2]。

再生可能エネルギー政策を（2002 年の持続可能な開発に関する世界首脳会議で明確に認知された）国、地域レベルの持続可能な開発の戦略に統合すれば、持続可能な開発と再生可能エネルギーの有効な戦略を選択し、これらを国際的な政策措置と調整させる枠組みを国は得られる。結局、国の戦略には、持続可能な開発を阻害する既存の財政的メカニズムの撤廃が含まれる。たとえば、化石燃料への補助金を撤廃すれば、再生可能エネルギーの使用拡大や市場参入にも道が開ける可能性があるが、再生可能エネルギー技術の使用のために補助金改革を実行するには、貧困層の特定のニーズを解決する必要性や、ケースバイケースの分析が要求される [9.5.2.1]。

京都議定書で設立されたクリーン開発メカニズムは、環境的、社会的外部性を内部化する持続可能な開発メカニズムの実践例である。しかしながら、持続可能性承認に関して、既存システムの弱みに対応するための持続可能性評価に関する国際的基準（持続可能な開発の比較可能な指標も含む）はない。2013 年以降の気候変動枠組みに向けた交渉のインプットとして、持続可能な開発の改善された新メカニズムをさらに達成していくためのクリーン開発メカニズムの改善方法について、多くの提案が行われている [9.5.2.1]。

再生可能エネルギーが持続可能な開発の国家的戦略で役割を果たす機会には、グリーン成長、低炭素、持続可能な開発（リープフロッグを含む）の目標に貢献する持続可能な開発と再生可能エネルギーの目標を開発政策に統合し、再生可能エネルギーの部門別戦略を開発することでアプローチ出来る。 [9.5.2.1]。

地域レベルでは、市、地域政府、民間組織、非政府組織が実行する持続可能な開発の取り組みが、変化を牽引し、再生可能エネルギーの設置に対する地域の抵抗を克服する助けになり得る [9.5.2.2]。

9.6 統合、知見のギャップと将来の研究ニーズ

再生可能エネルギーは、程度は様々であるが、持続可能な開発や本章で評価された 4 つの目標に貢献出来ることが示された。環境及び健康への影響の低減に関する便益は、より明確であるように思える一方で、たとえば社会経済の発展への正確な貢献度はより曖昧である。また、発展のレベルに応じて、国々も 4 つの持続可能な開発目標の優先順位を付ける可能性がある。しかし、ある程度は、持続可能な開発目標も互いに強い相関関係がある。気候変動緩和はそれ自体が、多数の開発途上国における社会経済の発展の成功に必要な前提条件である [9.6.6]。

この論理に従えば、緩和目標が将来の開発経路の制約として課された場合、気候変動緩和は、強力な持続可能な開発パラダイムのもとで評価されることが可能である。気候変動緩和が、経済成長または社会経済的基準との釣り合いを保っている場合、問題は、これらの目標間の相殺を考慮し、これらの優先順位付けにおける指針を提供する目的で費用と便益タイプの分析を使用しながら、弱い持続可能な開発のパラダイム内で作り上げられる [9.6.6]。

しかし、あらゆる発展経路固有の要素としての不安定さや無知の存在と同様、関連するおそらく「受容できないほど高額な」機会コストが存在するため、継続的な調整が不可欠となる。将来には、統合モデ

ルは、意思決定プロセスに関して弱い持続可能な開発パラダイムと強い持続可能な開発パラダイムをより適切に関連付けるのに有利な立場となりうる。きちんと定義されたガードレールのなかで、統合モデルは、重要かつ適切なボトムアップ指標を含むことによって、残りの持続可能な開発目標を考慮しながら、様々な緩和の道筋に関するシナリオを探究するだろう。モデルタイプに従い、これらの代替的開発経路は、社会的に有益な結果のために最適化されるだろう。しかしながら同様に、温室効果ガス排出量関連のライフサイクル評価データを組み込むことも、初期の段階での適切な温室効果ガス濃度安定化レベルの明確な定義に関して不可欠である [9.6.6]。

結論として、特に持続可能な開発と再生可能エネルギーの間の相互関係に関する知識は、依然として非常に限定されている。効果的かつ経済効率がよく、社会的に受容されるエネルギーシステムの変革をどのようにすれば実現出来るかという疑問に答えるには、持続可能性の持つ多様な面を反映するために、社会科学、自然科学、経済学の洞察を（たとえばリスク分析手法を通して）さらに緊密に統合することが求められる。これまで、ナレッジベースは、特定の研究分野からの非常に偏狭な見解に限定されている。これは、この問題の複雑さを十分には説明してはいない [9.7]。