

SRREN

ipcc

気候変動に関する政府間パネル
第 3 作業部会 - 気候変動の緩和（策）

再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書
最終版

政策決定者向け要約（仮訳）

本政策決定者向け要約は
2011 年 5 月 5 日から 8 日にアラブ首長国連邦アブダビで開催された
IPCC の第 11 回第 3 作業部会総会において
正式承認された。

政策決定者向け要約

総括執筆責任者:

Ottmar Edenhofer(Germany), Ramon Pichs-Madruga(Cuba), Youba Sokona(Ethiopia/Mali), Kristin Seyboth(Germany/USA)

執筆責任者:

Dan Arvizu(USA), Thomas Bruckner(Germany), John Christensen(Denmark), Helena Chum(USA/Brazil) Jean-Michel Devernay(France), Andre Faaij(The Netherlands), Manfred Fischedick(Germany), Barry Goldstein(Australia), Gerrit Hansen(Germany), John Huckerby(New Zealand), Arnulf Jäger-Waldau(Italy/Germany), Susanne Kadner(Germany), Daniel Kammen(USA), Volker Krey(Austria/Germany), Arun Kumar(India), Anthony Lewis(Ireland), Oswaldo Lucon(Brazil), Patrick Matschoss(Germany), Lourdes Maurice(USA), Catherine Mitchell(United Kingdom), William Moomaw(USA), José Moreira(Brazil), Alain Nadai(France), Lars J. Nilsson(Sweden), John Nyboer(Canada), Atiq Rahman(Bangladesh), Jayant Sathaye(USA), Janet Sawin(USA), Roberto Schaeffer(Brazil), Tormod Schei(Norway), Steffen Schlömer(Germany), Ralph Sims(New Zealand), Christoph von Stechow(Germany), Aviel Verbruggen(Belgium), Kevin Urama(Kenya/Nigeria), Ryan Wiser(USA), Francis Yamba(Zambia), Timm Zwickel(Germany)

特別顧問:

Jeffrey Logan(USA)

本政策決定者向け要約の引用時の表記方法:

IPCC, 2011: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

注意

本報告書は、IPCC「Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation」Final Release を翻訳したものです。この翻訳は、IPCC ホームページに掲載されている報告書

<http://srren.ipcc-wg3.de/>

を元に行っています。また、翻訳は 2011 年 6 月 9 日リリースの初版に基づいて行っており、その後 IPCC によって行われた修正、追加、削除等の変更には対応しておりませんので、ご注意ください。

本報告書「再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書」は上記報告書の仮訳であり、IPCC の公式訳ではありません。正本は英文のみで提供されており、本日本語仮訳を引用して問題が生じてても責任を負いかねますのでご了承ください。

1. 序論

第3作業部会の再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書（SRREN）は、気候変動緩和に対して6つの再生可能エネルギー（RE）源が果たす、科学、技術、環境、経済及び社会的側面の貢献に関する文献の評価を示す。SRRENの目的は、政府、政府間プロセスおよびその他関係機関に対して政策に関連する情報を提供することにある。本政策決定者向け要約（SPM）は、SRRENの概要を示し、その重要な知見を要約したものである。

SRRENは全11章で構成されている。（図SPM.1参照）。

再生可能エネルギー源及び気候変動緩和に関する 特別報告書（SRREN）

1. 再生可能エネルギーと気候変動

序章

- 2. バイオエネルギー
- 3. 直接的太陽エネルギー
- 4. 地熱エネルギー
- 5. 水力
- 6. 海洋エネルギー
- 7. 風力エネルギー

技術の章

- 8. 現在及び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
- 9. 持続可能な開発における再生可能エネルギー
- 10. 緩和ポテンシャル及びコスト
- 11. 政策、財政支援、及び実施

統合的検討 の章

図 SPM.1: SRREN の構成 [図 1.1, 1.1.2]

本報告書では、必要に応じて、不確実性（uncertainty）に触れている¹。

2. 再生可能エネルギーと気候変動

社会経済の発展、人々の福利や健康の促進のため、エネルギーおよび関連サービスへの要求が高まっている。すべての社会は、人間の基本的要求（照明、調理、空間の快適さ、交通、通信など）を満たすため、また、生産プロセスに使用するため、エネルギーのサービスを必要としている [1.1.1, 9.3.2]。1850年頃から、化石燃料（石炭、石油、ガス）の使用が世界的に増え、エネルギー供給の大半を占めるようになり、二酸化炭素（CO₂）排出量が急増した [図 1.6]。

エネルギーサービスを提供することによって排出される温室効果ガス（GHG）は、大気中の温室効果ガス濃度が歴史的に増加する大きな原因となってきた。IPCC 第4次評価報告書（AR4）は、「20世紀半ば以降に観測された地球の平均気温の上昇は、人為的な温室効果ガスの濃度上昇が原因である可能性が非常に高い²」と結論付けている。

¹ 本報告書では、たとえば感度分析の結果の提示や、コストの数の幅及びシナリオの結果の幅を定量的に示すことにより、不確実性を表現している。IPCCの不確実性のガイダンスは本報告書の承認時点では見直し中だったため、本報告書ではIPCCの公式な不確実性の用語を用いていない。

² AR4の不確実性の公式定義によると、可能性が非常に高い（very likely）という用語は、90%を超える確率で発生するという評価を指す。

地球上における人為的な温室効果ガス排出の大部分は化石燃料の消費によるものであることが、近年のデータによって裏付けられている³。排出量の増加は続いており、2010 年末までに、二酸化炭素の濃度は産業革命以前に比べ 39%以上増加し、390ppm を超えている [1.1.1, 1.1.3]。

エネルギーサービスに対する世界の需要を満たしつつ、エネルギーシステムからの温室効果ガス排出量を低減するためには、さまざまな方策がある [1.1.3, 10.1]。これらの可能性のある方策のうち、省エネルギーや効率化、化石燃料からの燃料転換、再生可能エネルギー、原子力、炭素回収・貯留（CCS）などの評価が AR4 で行なわれた。緩和オプションのポートフォリオの包括的評価には、それぞれの緩和ポテンシャルの評価に加え、持続可能な開発への貢献、すべての付随するリスクとコストの評価が必要となる[1.1.6]。本報告書では、再生可能エネルギー技術の導入がこのような緩和オプションのポートフォリオの中で果たせる役割に着目する。

再生可能エネルギーは気候変動の緩和ポテンシャルが大きいだけでなく、より広範な便益を提供することが可能である。再生可能エネルギーが適切に実用化されれば、社会経済の発展、エネルギーアクセス、エネルギーの安定供給、環境や健康への悪影響の減少などに貢献するだろう [9.2, 9.3]。

エネルギー構成の中で再生可能エネルギーの比率を増加させるためには、ほとんどの場合エネルギーシステムの変化を促すような政策が必要である。再生可能エネルギー技術の導入は近年急速に進んでおり、最も意欲的な緩和シナリオでは再生可能エネルギーの比率は大幅に高まると予測されている [1.1.5, 10.2]。技術やインフラに対する必要な投資の増加を促すために、追加的な政策が求められる [11.4.3, 11.5, 11.6.1, 11.7.5]。

3. 再生可能エネルギーの技術と市場

再生可能エネルギーは様々な種類の技術から構成されている（Box SPM.1）。様々なタイプの再生可能エネルギーは、電気、熱エネルギー、力学的エネルギーを供給することができ、さらに、多様なエネルギーサービスのニーズを満たし得る燃料も生産出来る [1.2]。へき地及び都市環境において（分散的に）その使用場所で展開出来る再生可能エネルギー技術もあれば、主に大規模な（集中型）エネルギー・ネットワーク内で使用されるものもある [1.2, 8.2, 8.3, 9.3.2]。多くの再生可能エネルギーは技術的に成熟し、大規模に展開されつつあるが、技術的成熟度や商業展開の点でまだ初期段階、特定のニッチな市場に導入されているものもある [1.2]。再生可能エネルギー技術のエネルギーの出力形態は多様であり、（i）異なる時間スケール（分単位～年単位）の変動性があり、ある程度まで予測できない出力、（ii）変動性がある、予測できる出力、（iii）一定した出力、（iv）制御可能な出力に分類される [8.2, 8.3]。

Box SPM.1: 本報告書で検討される再生可能エネルギー源と再生可能エネルギー技術

バイオエネルギーは、木質系、農業系、家畜糞尿、短期伐採される森林植林、エネルギー作物、一般廃棄物の有機成分、他の有機廃棄物など、多様なバイオマスから得られる。これらのバイオマスは、様々なプロセスを経て、発電や熱として直接利用でき、気体燃料、液体燃料、固体燃料の生産にも利用出来る。バイオエネルギー技術の幅は広く、技術によって成熟度は様々である。商用可能な技術としては、小型及び大型ボイラー、家庭用ペレット暖房システム、糖類やでんぷんからのエタノール製造などがある。商用の前の段階のものとしては、バイオマス統合ガス化コンバインドサイクル発電所設備、リグノセルロース系輸送燃料など、研究開発（R&D）段階のものには藻類を使用した液体バイオ燃料や、他の生物を使った変換方法がある。バイオエネルギー技術は、集中型設備、分散型設備のどちらでも利用でき、最も広く普及している利用形態⁴は開発途上国における伝統的利用である。バイオエネルギーは一般に、一定あるいは制御可能な出力を提供することが可能である。バイオエネルギー・プロジェクトは通常、地方或いは地域の燃料供給事情に左右されるが、最近では、固体バイオマスや液体バイオ燃料の国際的な取引も増加している [1.2, 2.1, 2.3, 2.6, 8.2, 8.3]。

直接的太陽エネルギー技術は、太陽光発電（PV）や集光型太陽熱発電（CSP）を用いての発電、熱エネルギー（パッシブ及びアクティブな手段による冷暖房）の生成、直接的な照明利用などにより太陽放射エネルギーを利用するものである。輸送やその他の目的で利用できるソーラー燃料生産の可能性もある。このエネルギー技術の成熟度は様々で、研究開発段階のもの（ソーラー燃料など）、比較的成熟段階にあるもの（集光型太陽熱発電など）、成熟段階にあるもの（パッシブ及びアクティブの太陽熱利用やウェハをベースにしたシリコン系太陽光発電など）があ

³ 二酸化炭素に換算した値で見た 2004 年の人為的な温室効果ガス排出量の個別内訳（出展: AR4）：化石燃料利用による二酸化炭素（56.6%）、森林減少、バイオマス腐朽などによる二酸化炭素（17.3%）、その他の排出源による二酸化炭素（2.8%）、メタン（14.3%）、一酸化二窒素（7.9%）、フッ素化ガス（1.1%）[AR4, WG3, 第 1 章 図 1.1b。森林管理を含む部門別排出量に関する詳細は、図 1.3b と関連の注も参照]

⁴ 伝統的バイオマスは、国際エネルギー機関（IEA）の定義によると、開発途上国の家庭部門におけるバイオマス消費である。また、木質系、木炭、農業系残渣、家畜糞尿を調理や暖房のために持続不可能な形で多用することを指す。その他のバイオマスはすべて近代的バイオマスとして定義される [Annex I]。

る。直接的太陽エネルギー技術の多くは本来モジュール化できるため、集中型および分散型エネルギーシステムのどちらでも利用出来る。太陽エネルギーは変動し、ある程度までしか予測できないが、状況によっては出力の日変化がエネルギー需要に比較的良好に相関することもある。集光型太陽熱発電やソーラー暖房などの一部の技術では、蓄熱すれば出力制御がより良く出来る [1.2, 3.1, 3.3, 3.5, 3.7, 8.2, 8.3]。

地熱エネルギーは、地球内部からアクセス可能な範囲の熱エネルギーを利用する。地熱貯留層から坑井などを用いてエネルギーを取り出す。天然のままで十分高温で透水性がある貯留層は熱水貯留層、十分高温であるが水圧の刺激により改善される貯留層は涵養地熱システム (EGS) と呼ばれる。地表に達した様々な温度の温水を、発電または熱エネルギーを必要とする用途に対してより直接的に利用することが出来る。これらには、地域熱供給、または浅井戸からの低温熱を利用した冷暖房用途の地中熱ヒートポンプなどがある。熱水発電プラントや地熱エネルギーの熱利用は成熟した技術であるが、一方で、涵養地熱システムのプロジェクトは実証及びパイロット段階であり、研究開発が同時並行で進められている。地熱発電プラントは、一般に発電において安定した電力を提供出来る [1.2, 4.1, 4.3, 8.2, 8.3]。

水力は、高所から低所へ流下する水のエネルギーを利用するもので、主に発電に用いられる。水力発電プロジェクトは、貯水池を有するダムプロジェクト、自流式や流れ利用のプロジェクトを含み、プロジェクトスケールでは複数の連続設置された水力発電所もカバーする。このように多様な形態を取れるため、大規模で集中型の都市ニーズだけでなく、へき地の分散型のニーズにも対応出来る。水力発電技術は成熟している。水力発電プロジェクトは時間的に変動する資源を利用するが、貯水池を持つ水力発電設備の出力は制御可能で、電力需要のピークに対応させることができるため、出力が変動する再生可能エネルギーを大量に抱える電力系統の調整に貢献している。水力発電用貯水池の運用は、エネルギー供給に加えて、飲料水、灌漑、洪水や干ばつの制御、航行など多様な用途をもたらすことが多い [1.2, 5.1, 5.3, 5.5, 5.10, 8.2]。

海洋エネルギーは、海水の持つ位置エネルギー、運動エネルギー、熱エネルギー、化学エネルギーを変換し、電気や熱や飲料水を提供する。潮汐発電、潮流・海流発電、海洋温度差発電、波力発電、塩分濃度差発電など、広範な技術の可能性がある。海洋エネルギー技術は、潮汐発電を除き、実証段階かパイロット・プロジェクト段階にあり、多くはさらに研究開発が必要である。出力が変動し、かつ予測可能性もまちまちである技術（波力発電、潮汐発電、海流発電など）がある一方、出力がほぼ一定か制御可能な技術（海洋温度差発電、塩分濃度差発電など）もある [1.2, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.6, 8.2]。

風力エネルギーは、移動する空気の運動エネルギーを利用する。気候変動の緩和に貢献するのは主に、陸地（陸上）及び海域・淡水域（洋上）の大型風力発電である。陸上風力エネルギー技術はすでに成熟し、大規模に導入されている。洋上風力エネルギー技術は継続的に技術的な進歩を遂げるポテンシャルが大きい。風力発電には変動性があり、ある程度予測困難な面があるが、多くの地域で得られた経験や詳細な研究を見る限り、一般に、風力エネルギーを電力系統に連携する上で克服不可能な技術的障壁はない [1.2, 7.1, 7.3, 7.5, 7.7, 8.2]。

2008 年の世界の総一次エネルギー供給量の 492 エクサジュール (EJ) ⁵ のうち、再生可能エネルギーは 12.9% を占めると見積もられる (Box SPM.2 と図 SPM.2)。再生可能エネルギーの主役はバイオマス (10.2%) で、その多く (約 60%) ⁶ は開発途上国において調理や暖房などの用途に使われている伝統的バイオマスであるが、近代的バイオマスも急速に普及が拡大している。水力は、492EJ のうち 2.3% を占めるが、その他の再生可能エネルギー源は 0.4% である [1.1.5]。2008 年には、再生可能エネルギーは世界の電力供給の約 19% (水力 16%、その他 3%)、バイオ燃料は世界の自動車燃料供給の 2% を供給し、伝統的バイオマス (17%)、近代的バイオマス (8%)、太陽熱・地熱エネルギー (2%) は合計で世界の熱需要総量の 27% を供給している。一次エネルギー供給における再生可能エネルギーの比率は、国や地域により大きく異なる [1.1.5, 1.3.1, 8.1]。

BOX SPM.2: SRREN における一次エネルギーの計算

非燃焼型再生可能エネルギー源や原子力など、非燃焼型エネルギー源から得られる一次エネルギーの計算方法は、明確で統一的方法はない。SRREN では、一次エネルギー供給の計算に「直接等価」法を用いる。この方法では、化石燃料とバイオエネルギーは、その熱量で計算される。一方、非燃焼型エネルギー（原子力、すべての非燃焼型再生可能エネルギーなど）は、出力として得られた二次エネルギーを計上する。このような方法では、非燃焼型再生可能エネルギー源と原子力のエネルギー量は、バイオエネルギーと化石燃料と比較して、おおよそ 3 分の 1 から 1.2 分の 1、少なく評価される。この計算方法の選択は、個々のエネルギー源の比率にも影響する。SRREN のデータや図で行われている化石燃料とバイオエネルギーと或いは非燃焼型再生可能エネルギーと原子力との比較は、この計算方法を反映している [1.1.9, Annex II.4]。

⁵ 1 エクサジュール(EJ)=10¹⁸ ジュール(J)=23.88 石油換算百万トン (Mtoe)

⁶ 伝統的バイオマスの比率 60% の他に、一次エネルギーの公式データベースにない 20~40% のバイオマス利用 (畜ふん燃料、未計上の木炭生産、違法伐採、燃料用木材の収集、農業残渣の使用など) がある [2.1, 2.5]。

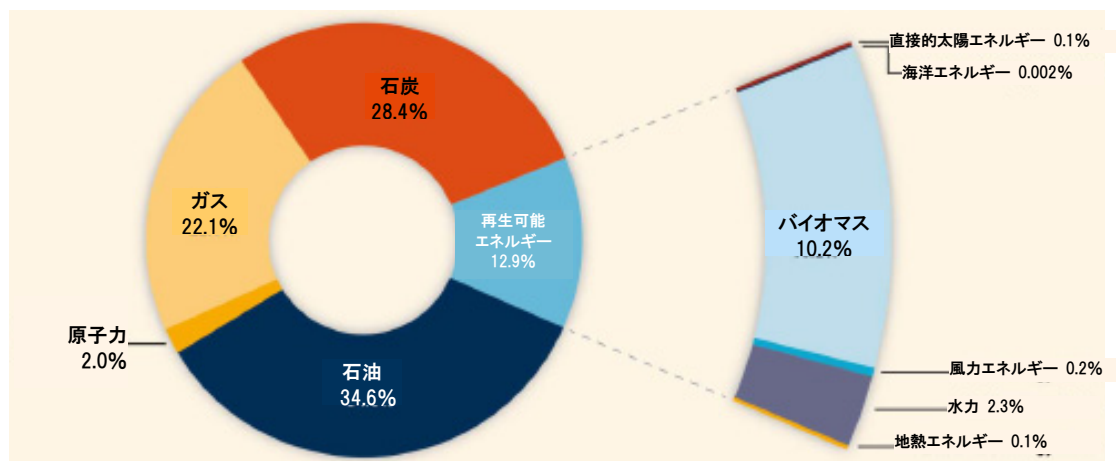


図 SPM.2: 世界の総一次エネルギー供給量 (492EJ, 2008 年) に占めるエネルギー源の割合。近代的バイオマスはバイオマスの割合全体の 38% を占める [図 1.10, 1.1.5]。

注: 図の元となったデータは、一次エネルギー供給の計算の際に、「直接等価」法に基づいて変換されている [Box SMP.2, 1.1.9, Annex II.4]。

近年、再生可能エネルギーの導入が急速に進んでいる (図 SPM.3)。多様な政策、多くの再生可能エネルギー技術のコスト低下、化石燃料価格の変化、エネルギー需要の増加などの要因を受け、再生可能エネルギー利用は伸び続けている [1.1.5, 9.3, 10.5, 11.2, 11.3]。世界的な金融危機にもかかわらず、2008 年の設備容量累計と比較した場合、2009 年に再生可能エネルギーの設備容量は急速な成長を続け、風力 (32% 増、発電容量 38GW 増加)、水力 (3% 増、発電容量 31GW 増加)、系統連系型太陽光発電 (53% 増、発電容量 7.5GW 増加)、地熱発電 (4% 増、発電容量 0.4GW 増加)、太陽熱による温水・暖房 (21% 増、発電容量 31GW_{th} 増加) となっている。バイオ燃料は、2008 年には世界の自動車燃料需要の 2%、2009 年には 3% 近くを占めた。エタノールの年間生産量は 2009 年末までに 1.6EJ (760 億ℓ) に、バイオディーゼルの年間生産量は 0.6EJ (170 億ℓ) に増加した [1.1.5, 2.4, 3.4, 4.4, 5.4, 7.4]。

2008 年から 2009 年の 2 年間に世界では約 300GW の発電容量が新たに追加され、そのうち 140GW は再生可能エネルギーによる追加分であった。合計で世界の再生可能エネルギー発電容量の 53% が開発途上国にある [1.1.5]。2009 年末時点で、給湯・暖房市場で利用される再生可能エネルギーには、近代的バイオマス (270GW_{th})、太陽熱 (180GW_{th})、地熱 (60GW_{th}) がある。へき地の家庭や村レベルでのエネルギーのニーズに対応するため、水力発電所、様々な近代的バイオマス技術群、太陽光発電、風力発電や、複数の技術を組み合わせたハイブリッド・システムなど、分散型の再生可能エネルギーの利用も増えている (ただし伝統的バイオマス利用を除く) [1.1.5, 2.4, 3.4, 4.4, 5.4]。

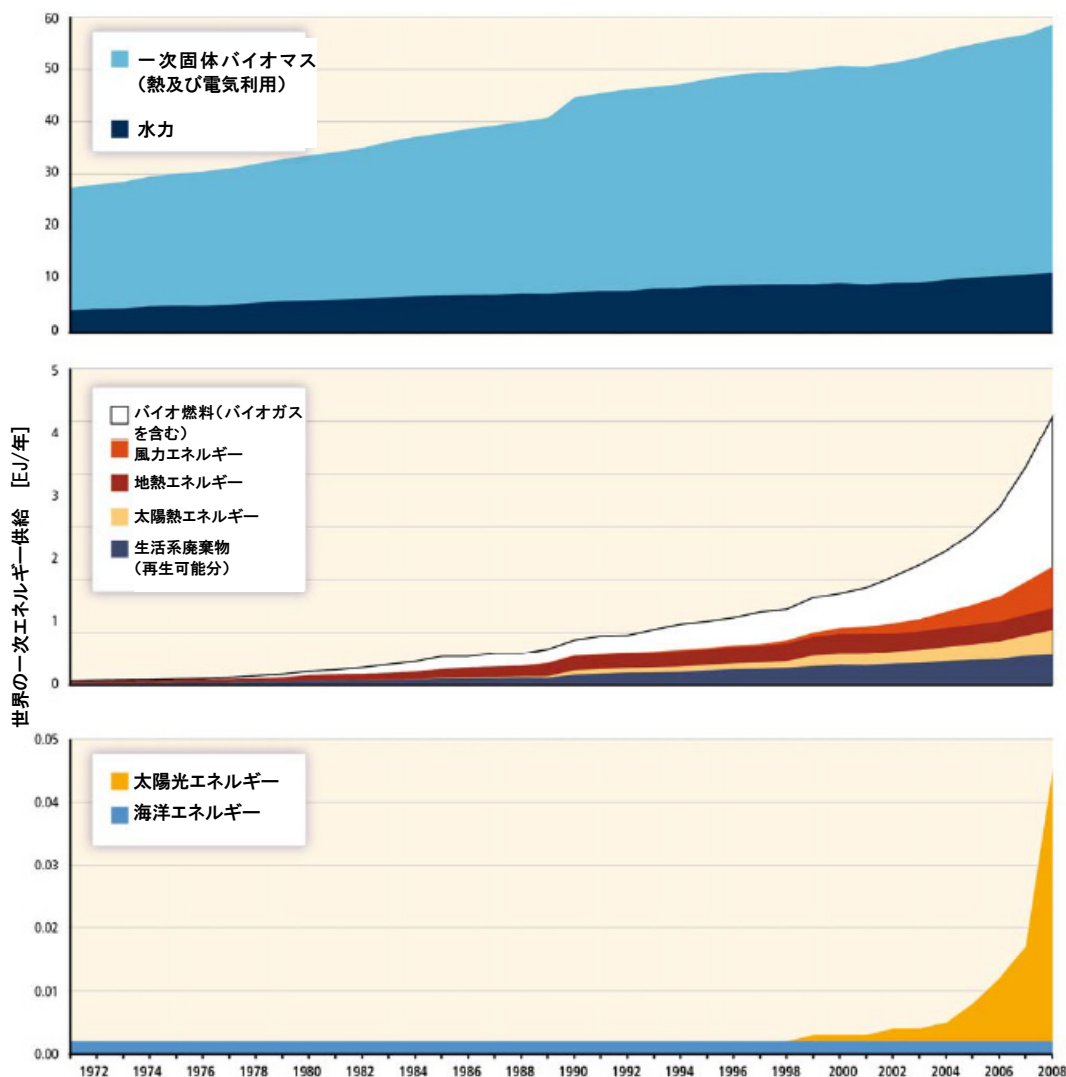
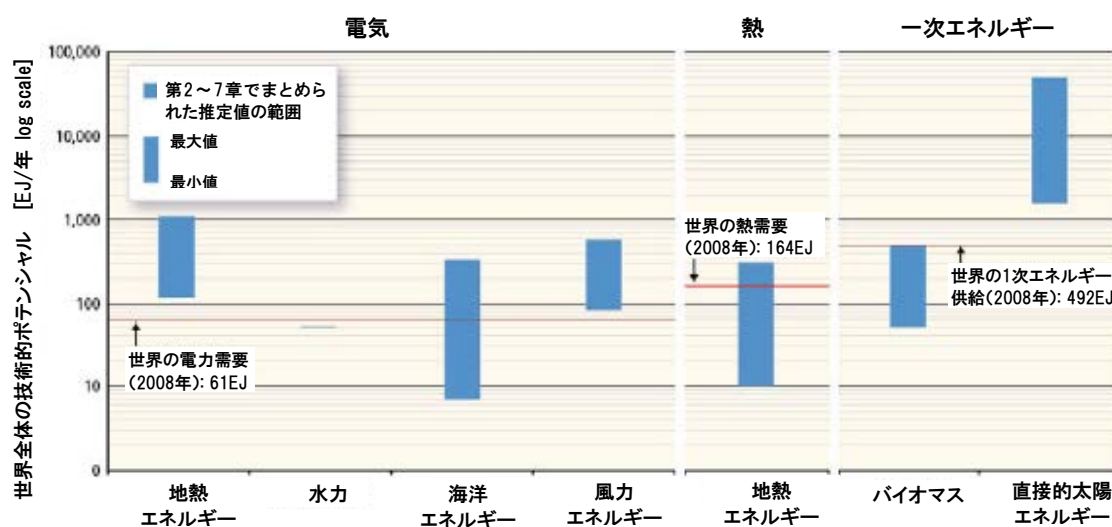


図 SPM.3: 世界の一次エネルギー供給における再生可能エネルギー供給量の変遷 (1971～2008 年) [図 1.12, 1.1.5]

注: 各方式は図を見やすくする目的で縦軸のスケールごとに分類されている。図の元となったデータは、一次エネルギー供給の計算の際に、「直接等価」法に基づいて変換されている [Box SMP.2, 1.1.9, Annex II.4]。ただし、バイオ燃料のエネルギー量は二次エネルギーの項で報告されている (バイオ燃料生産に用いる一次バイオマスは変換損失のため、より多くなると見込まれる [2.3, 2.4])。

世界全体での再生可能エネルギー源の技術的ポテンシャル⁷は、再生可能エネルギーの持続的な利用拡大を制限するものではない。文献では幅広い範囲の値が示されているが、再生可能エネルギーの世界的な技術的ポテンシャルは、現在の世界のエネルギー需要よりもかなり大きいという研究結果が常に出されている (図 SPM.4) [1.2.2, 10.3, Annex III]。太陽エネルギーの技術的ポテンシャルは再生可能エネルギー源のなかで最も大きい、6つの再生可能エネルギー源はどれも大きな技術的ポテンシャルを有している。個々の再生可能エネルギー源の技術的ポテンシャルが比較的低い地域にあっても、現在のレベルと比較して、導入が進むチャンスは一般に相当ある [1.2.2, 2.2, 2.8, 3.2, 4.2, 5.2, 6.2, 6.4, 7.2, 8.2, 8.3, 10.3]。しかし、より長期及び高位の普及段階においては、いくつかの再生可能エネルギー技術の寄与には限度がある。持続可能性の問題 [9.3]、社会的受容性 [9.5]、システム統合及びインフラ上の制約 [8.2]、経済的要因 [10.3]なども、再生可能エネルギー技術の普及を制限する可能性がある。

⁷ 技術的ポテンシャルの定義は研究により大きく異なる。SRRENにおける「技術的ポテンシャル」とは、実証されている技術や事業を最大限実施した場合に得られる再生可能エネルギーの出力の総量を指す。コストや障壁、政策は考慮していない。しかし、文献で報告されている技術的ポテンシャルあるいはSRRENで評価された技術的ポテンシャルの中には、実的な制約が考慮されている場合もあり、それらが明記されている場合は、通常その元となった文献に記されている [Annex I]。



世界における技術ポテンシャルの推定範囲

最大値 (EJ/年)	1109	52	331	580	312	500	49837
最小値 (EJ/年)	118	50	7	85	10	50	1575

図 SPM.4: 第2～第7章に示す研究から得られた再生可能エネルギー源の世界における技術的ポテンシャルの範囲。バイオマスと太陽光はその様々な使用方法から、一次エネルギーとして示してある。この図は、評価データの範囲が広い対数尺度で表示されていることに留意[図 1.17, 1.2.3]。

注: ここで報告された技術的ポテンシャルは、年間の再生可能エネルギー供給に対する世界全体の技術ポテンシャルを示しており、すでに利用されているいかなるポテンシャルも差し引いていない。再生可能エネルギー電力源は、加熱用途にも使用され得る一方で、バイオマス及び太陽エネルギー資源は一次エネルギーとしてのみ報告されているが、様々なエネルギーサービスのニーズを満たすために利用され得ることに留意。推定範囲は様々な方法に基づいて求めており、将来にも幾年かに渡って適用出来る。従って、得られた範囲は技術全体を通して厳密に同じというわけではない。図 SPM.4 や追加の注記の基となったデータについては、第1章の Annex と表 A1.1 を参照のこと(元となった章とあわせて)。

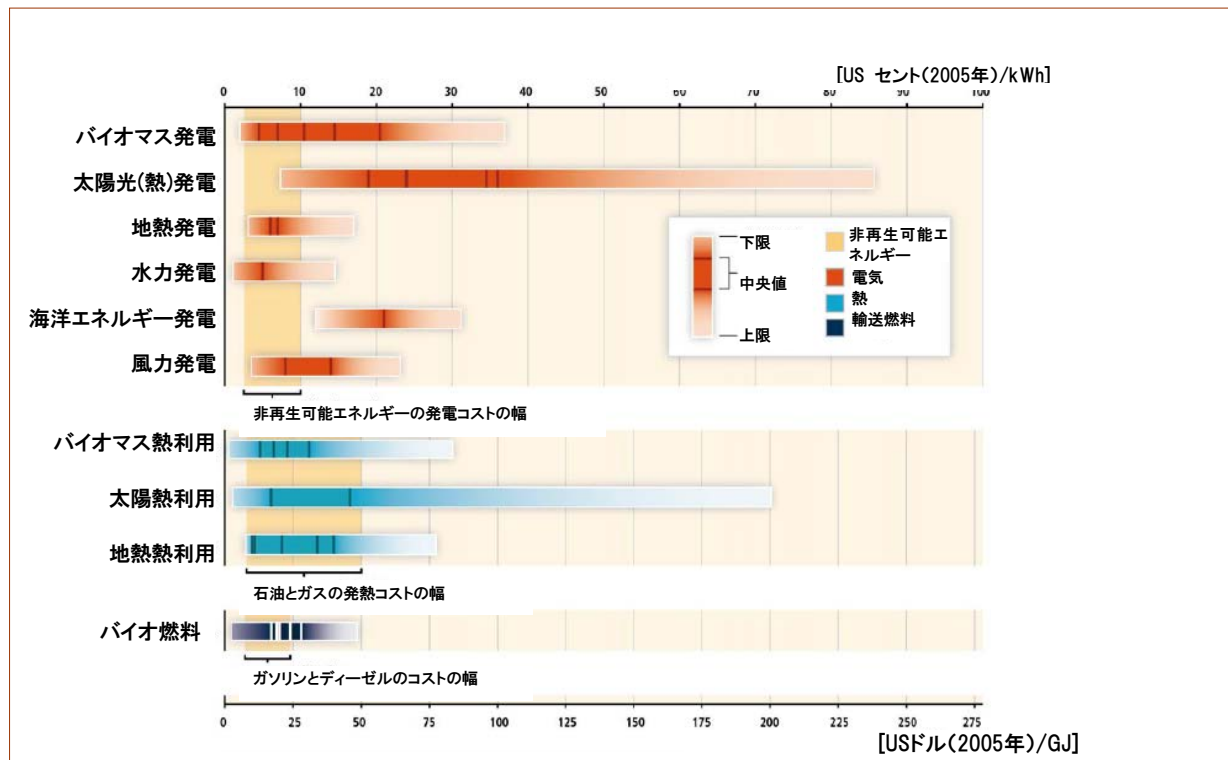
気候変動は、再生可能エネルギー源の技術的ポテンシャルの大きさ及び地理的分布に影響を及ぼす。起こり得る影響の大きさについては、研究が始まったばかりである。再生可能エネルギー源は多くの場合、気候に左右される。このため、気候変動は再生可能エネルギー源の基盤に影響を与えるが、その正確な特徴や影響の程度は不確かである。バイオエネルギーの場合、気候変動は、土壌条件、降水量、作物の生産性等の変化を通じてバイオマス生産に影響を与え、将来のバイオエネルギーの技術的ポテンシャルに影響を及ぼし得る。世界の平均気温の変化が2℃未満の場合、全体的な影響は世界規模では比較的小さいと推測される。しかしながら、地域差はかなり大きいと推測されており、多数のフィードバック・メカニズムが関わるため、他の再生可能エネルギーに比べて、不確かさが大きく評価が難しい [2.2, 2.6]。太陽エネルギーの場合、気候変動は雲の分布や変化に影響すると考えられるが、太陽エネルギーへの全体的影響は小さいと推測される [3.2]。水力発電の場合、世界規模の技術的ポテンシャルへの総合的な影響は、わずかにポジティブと見込まれている。しかし、研究成果では、地域間、また同じ国の中でさえも影響には相当の差異が出る可能性も指摘されている [5.2]。風力については、これまでの研究によれば、その世界規模の技術的ポテンシャルに気候変動が大いに影響することはないが、風力エネルギー源の地域分布が変化すると推測される [7.2]。地熱、海洋エネルギーの場合、気候変動はその量や地理的分布に重大な影響は及ぼさないと見込まれる [4.2, 6.2]。

多くの再生可能エネルギー技術の均等化発電原価 (LCOE)⁸ は既存のエネルギー価格よりも現在は高いが、様々な条件下ですでに経済的競争力を持つ再生可能エネルギーもある。技術の特徴・規模、コストとパフォーマンスの地域的ばらつき、異なる割引率、及びこれらに限らない多くの要素に依存するが、特定の商業的に利用出来る再生可能エネルギー技術の均等化発電原価 (LCOE) の幅は、近年広がっている (図 SPM.5) [1.3.2, 2.3, 2.7, 3.8, 4.8, 5.8, 6.7, 7.8, 10.5, Annex III]。一部の再生可能エネルギー技術は、既存のエネルギー市場価格に対して大きな競争力を持つ

⁸ 均等化発電原価(LCOE)は耐用年数内でのエネルギー生産システムのコストを指す。収支を耐用年数内で考えたとき、特定のエネルギー源を用いて発電を行う必要がある場合の単位あたり価格で計算される。バリューチェーンの上流で発生するすべての民間コストを含むが、最終消費者への配電、連系コスト、環境その他の外部コストを含まない。

ている。その他の再生可能エネルギー技術の多くは、そのエネルギー源が有利な状況にある地域や、他の低価格のエネルギー供給を行うインフラがない地域など、一定の状況では競争力のあるエネルギーサービスを提供出来る。だが、世界の大半の地域では、多くの再生可能エネルギー源の急速な普及を図るためには政策措置が依然として必要である [2.3, 2.7, 3.8, 4.7, 5.8, 6.7, 7.8, 10.5]。

エネルギー供給の外部コストを収益化できれば、再生可能エネルギーの相対的競争力の強化につながるだろう。市場価格が他の理由で上昇する場合も、同じことが言える（図 SPM.5） [10.6]。ある技術の均等化発電原価（LCOE）は、その技術の価値や経済的競争力を決める唯一の要因ではない。特定のエネルギー供給の持つ魅力も、経済、環境、社会の幅広い側面に左右される。また、その技術が特定のエネルギーサービス（電力のピーク需要など）にどの程度対応できるか、あるいは、その技術の使用のために付随コストの形でエネルギーシステムに上乗せされる負担金（統合コストなど）にも影響される [8.2, 9.3, 10.6]。



注: 中央値は前スライドの表のサブカテゴリーに対して示されている。サブカテゴリーは（上図の左→右の）出現順に並べられている。

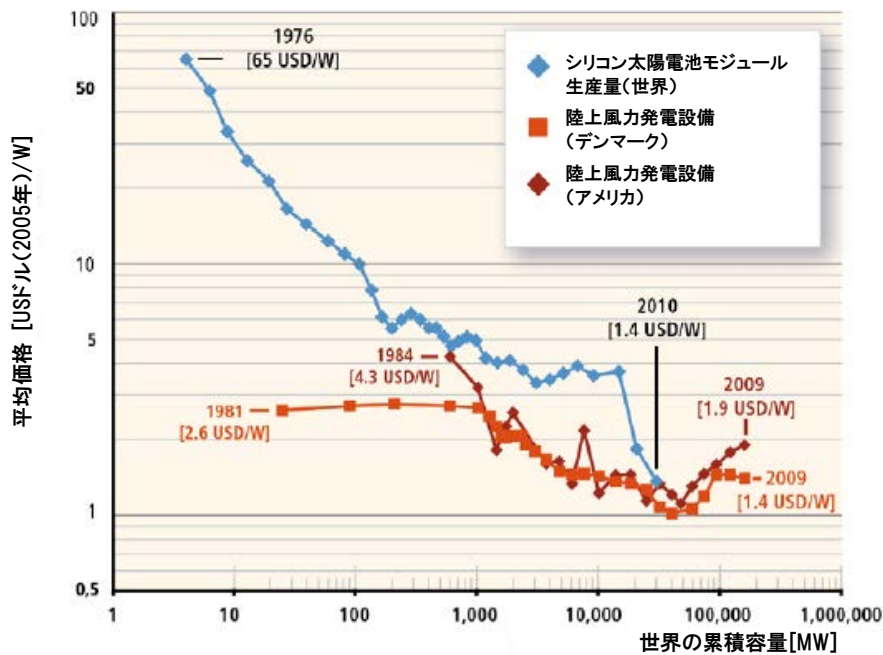
電気	熱	輸送燃料
バイオマス: 1. 混焼 2. 小規模熱電供給（ガス化内燃機関） 3. 専用スターカー及び CHP 4. 小規模熱電供給（蒸気タービン） 5. 小規模熱電供給（有機ランキンサイクル） 太陽光(熱)発電: 1. 集光型太陽熱発電 2. 電気事業規模の太陽光発電（一軸固定傾斜） 3. 商用屋上太陽光発電 4. 住宅用屋上太陽光発電 地熱発電: 1. フラッシュサイクルプラント 2. バイナリーサイクルプラント 水力発電: 1. すべて 海洋エネルギー発電: 1. 潮汐発電 風力発電: 1. 陸上風力 2. 洋上風力	バイオマス熱: 1. 都市固体廃棄物ベースの CHP 2. 嫌気性消化（発酵）ベースの CHP 3. 蒸気タービン CHP 4. 家庭用のペレット暖房システム 太陽熱利用: 1. 中国における家庭用の温水システム 2. （太陽熱）給湯・暖房 地熱熱利用: 1. 温室 2. 覆いのない養殖池 3. （地熱）地域暖房 4. 地熱ヒートポンプ 5. 地熱ビル暖房	バイオ燃料: 1. コーンエタノール 2. 大豆バイオディーゼル 3. 小麦エタノール 4. サトウキビ・エタノール 5. パームオイルバイオディーゼル

各再生可能エネルギー技術における均等化エネルギー生産原価の下限値は、最も有利な入力値の組み合わせに基づいているが、上限値は最も不利な入力値の組み合わせに基づいている。図のバックグラウンドとなる非再生可能エネルギー・オプションの参考の幅は、集中的非再生可能発電の均等化エネルギー生産原価を示している。熱の参考の幅は、石油・ガスベースの熱供給オプションの最近のコストを示している。輸送燃料の参照の幅は、直近の原油スポット価格（40～130US ドル/バレル）、ディーゼルとガス関連のコストに基づく（税を除く）。

図 SPM.5: 最近の非再生可能エネルギーコストと比較した、特定の商業的に利用可能な一部の再生可能エネルギー技術の均等化エネルギー生産原価の幅。技術サブカテゴリーや割引率はこの図にまとめられている。より具体的な数字が必要な場合、[1.3.2, 10.5, Annex III] を参照のこと。

多くの再生可能エネルギー技術のコストは低下しており、技術進歩により、さらにコストは減少すると推測される。過去数十年、価格が上昇する期間があっても（これは例えば、再生可能エネルギーに対する需要が供給可能量を超えたことによる）、再生可能エネルギー技術は大幅に進歩し、関連する長期コストも低下していることが実証されている（図 SPM.6）。だが、これらを牽引する様々な要因（研究開発、規模の経済、導入を前提とした学習、再生可能エネルギー供給事業者間の市場競争力の上昇など）は必ずしも深く理解されているわけではない [2.7, 3.8, 7.8, 10.5]。さらなるコスト削減が推測され、普及ポテンシャルの増加、気候変動緩和をもたらすことが期待される。技術的進歩のポテンシャルが高い重要分野として、新規改良型のバイオマス生産と供給システム、新しい製造工程によるバイオ燃料（次世代または新型バイオ燃料。リグノセルロース物質など）や新型バイオリファイナリー [2.6]、新型太陽光発電・集光型太陽熱発電技術と製造工程 [3.7]、涵養地熱システム [4.6]、新たな複合型の海洋エネルギー技術 [6.6]、洋上風力発電の基盤とタービン設計 [7.7] などがある。水力発電でもさらにコスト減少が推測されるが、他の再生可能エネルギー技術の一部に比べ、減少幅は小さい見込みである。しかし水力発電プロジェクトが技術面で設置可能である地点の範囲を今以上に広げる、新設及び既存の発電所の技術的性能を向上させる、といった研究開発のチャンスは残されている [5.3, 5.7, 5.8]。

(a)



(b)

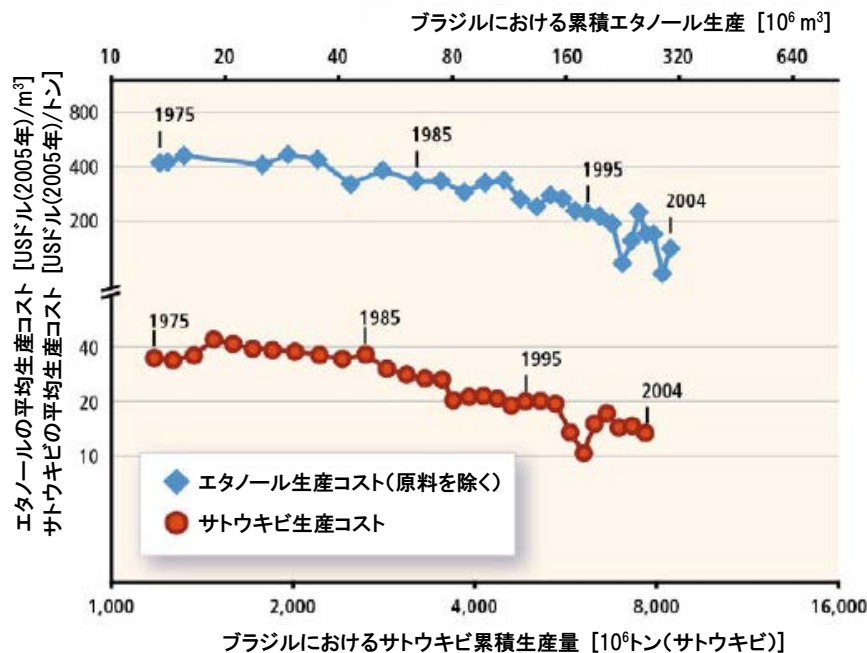


図 SPM.6: 対数尺度による経験曲線: (a) シリコン太陽電池モジュールと陸上風力発電所の発電所容量当たりの価格、(b) サトウキビベースのバイオエタノール生産コスト [図 3.17, 3.8.3, 図 7.20, 7.82, 図 2.21, 2.7.2 のデータ]

注: 設定によっては、様々な地理的スケールでコストが減少する場合がある。上記の国別の事例は、公開された文献に典拠している。世界的な風力発電所の価格やコストのデータセットは容易に手に入らない。ある技術の容量当たりのコストや価格の減少幅は、その技術の性能向上があった場合には均等化発電原価(LCOE)の減少幅を下回る [7.8.4, 10.5]。

再生可能エネルギーにより温室効果ガスの排出を大きく削減するためには、コストに加え、各技術に特有な様々な課題に取り組む必要がある。バイオエネルギーの利用拡大と持続可能な利用のために、持続可能性の枠組みの適切な計画、実行、モニタリングを行う。これにより、社会、経済、環境の問題に関連して、負の影響を最小限に抑えると同時に、便益を最大化出来る [SPM.5, 2.2, 2.5, 2.8]。太陽エネルギーの場合、系統連系や送電問題と同様、規制や制度的障壁は導入を妨げ得る [3.9]。地熱エネルギーでは、涵養地熱システムを経済的、持続的に、広く導入できると証明することが課題として挙げられるだろう [4.5, 4.6, 4.7, 4.8]。新たな水力発電プロジェクトは、その設置場所に特有の生態学的、社会的影響があり、導入拡大のためには、持続可能性の評価ツールと、エネルギー及び水のニーズに取り組むための地域の多様な関係者の協力が必要になる場合がある [5.6, 5.9, 5.10]。海洋エネルギーの導入には、実証プロジェクトのための試験センターや早期の導入を促進する専用政策および規則が役立つ可能性がある [6.4]。風力エネルギーの場合、主に景観への影響に関する公共受容の問題のほか、送電の制約や系統連系に対する技術的・制度的解決策が特に重要になる可能性がある [7.5, 7.6, 7.9]。

4. 現在及び将来のエネルギーシステムへの統合

既に様々な再生可能エネルギー源が、既存のエネルギー供給システム [8.2] と最終消費部門 [8.3] に順調に統合されている (図SPM.7)。

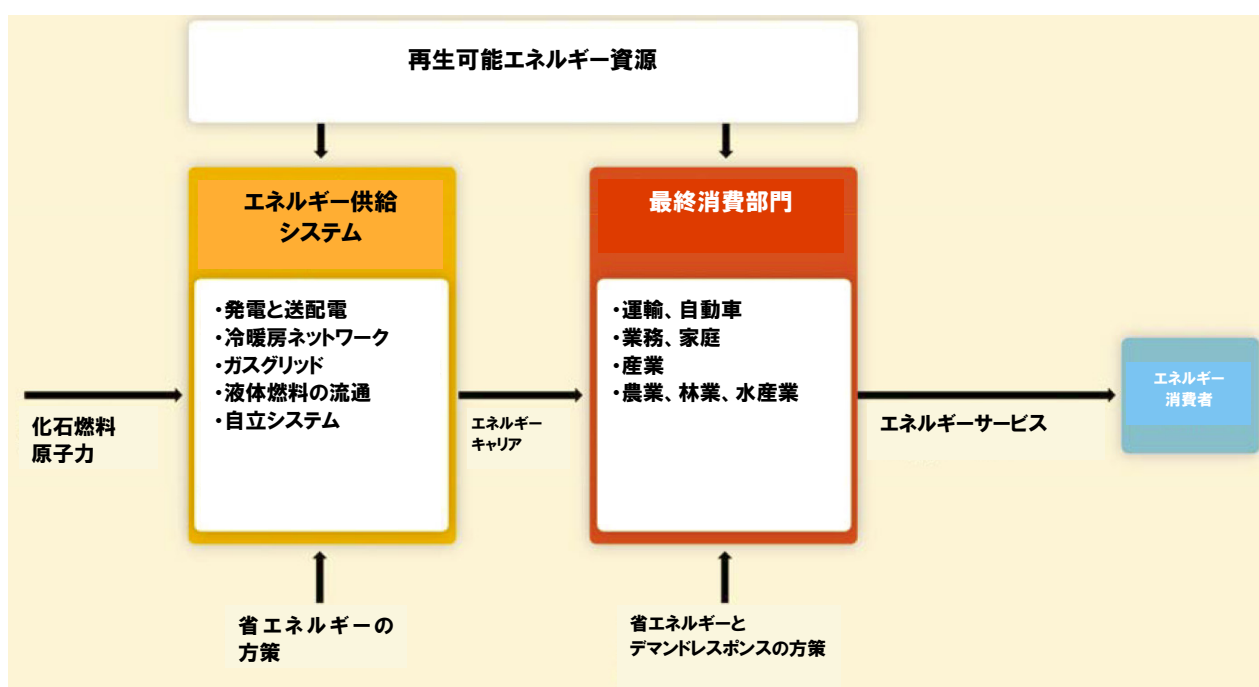


図 SPM.7: エネルギーのサービスの提供に向けた、エネルギー供給システムまたはオンサイトでの最終消費部門に対する再生可能エネルギーの統合の道筋 [図 8.1, 8.1]。

各々の再生可能エネルギー源の特性は、統合時の課題の大きさに影響し得る。一部の再生可能エネルギー源は地理的に大きく分散している。また、大規模な水力発電所などはさらに集中化出来るが、統合するにしても、立地の制約を受ける。ある再生可能エネルギー源は変動性を持ち予想可能性が限定的であり、あるものは物理的なエネルギー密度が低く化石燃料とは異なる技術仕様を持つ。こうした特性のため、特に再生可能エネルギーの比率が高まったとしても、容易に統合できない場合や、システムコストの追加負担が必要になる場合がある [8.2]。

再生可能エネルギーの既存システムへの統合を加速的に進め、その高い比率を実現することは、多くの追加的な課題を生じるが、技術的には可能である。再生可能エネルギーの比率は、温室効果ガス低排出技術のポートフォリオ全体の中で上昇が期待される [10.3, 表 10.4~10.6]。再生可能エネルギーを既存システムに統合するための課題は、最終消費部門への直接的な統合を含め、発電、冷暖房、ガス燃料、液体燃料に共通しており、ケースバイケースであったり、場所に特有な事情に左右されたり、既存のエネルギー供給システムの調整も関係する。 [8.2, 8.3]

再生可能エネルギーを既存のエネルギー供給システムに統合するためのコストと課題は、再生可能エネルギーの現在の比率と利用可能性と特徴、エネルギー供給システムの特徴、将来の発展の方向に依存する。

- 再生可能エネルギーは、大陸規模で大規模に連系された電力系統 [8.2.1] から、独立型の小規模システム、個々の建物に到るまでのあらゆる種類の電力システムに統合可能である [8.2.5]。システム関連の特徴として、発電構成とその柔軟性、送電網インフラ、エネルギー市場の設計や制度的な規則、需要の分布や特性、制御・通信能力がある。風力、太陽光エネルギー、蓄熱構造を持たない集光型太陽熱発電は、ディスパッチ（給電指令）可能な⁹水力やバイオエネルギー、蓄熱構造を持つ集光型太陽熱発電、地熱エネルギーに比べ、統合の難易度は高い可能性がある。

様々な再生可能エネルギー源が導入されるに従い、システムの信頼度を維持することがより難しく、より高コストとなる可能性がある。補完しあう再生可能エネルギー技術のポートフォリオを構築することが、再生可能エネルギー統合のリスクとコストを低下させる一つの解決策になる。他に、補完的かつ柔軟な発電方法の開発や、既存発電システムのより柔軟な運用だけでなく、短期予想の精度向上、システム運用や企画ツールの改善、供給事情に対応可能な電力需要、エネルギー貯蔵技術（貯水型の水力発電など）、制度的取り決めの改正も一助となる。多くの再生可能エネルギー源は、地理的に分散し遠隔地にあるため、システム間の連系を含め、送配電網インフラも場合によっては強化、拡張する必要がある [8.2.1]。

- 地域暖房システムでは、太陽熱、地熱、バイオマス（廃棄物燃料など、競合利用のほぼないエネルギー源も含む）などの低温の再生可能エネルギー熱を使用出来る。地域冷房では、天然の低温の水路を活用出来る。蓄熱や柔軟なコージェネレーションでは、供給と需要の変動性に関する問題を克服可能である。また、電力システムに需要応答プログラムを提供出来る [8.2.2]。
- ガス配送系統では、幅広い用途に、バイオメタン、また将来は再生可能エネルギー由来の水素や合成天然ガスを統合可能であるが、統合を成功させるためには、ガスの適切な品質基準を満たす必要がある。また、場合によってはパイプラインの増強も必要になる [8.2.3]。
- 液体燃料システムは、輸送用、調理用、熱利用にバイオ燃料を統合可能である。純（100%）バイオ燃料や石油系ブレンド燃料は通常、自動車燃料の技術規格を満たすことが求められる [8.2.4, 8.3.1]。

あらゆる最終消費部門で、再生可能エネルギーの比率を高める道筋は多数存在するが、統合が容易にできるかどうかは、地域により、また部門及び技術ごとの特性により差がある。

- 輸送部門の場合、液体及び気体バイオ燃料を燃料供給システムへ既に統合しているか、あるいは統合を続けると見込まれる国は増加しつつある。統合の選択肢には、燃料電池自動車用の再生可能エネルギー水素、鉄道や電気自動車用の再生可能エネルギー電力の分散型オンサイト発電や集中型発電が含まれ [8.2.1, 8.2.3]、インフラ及び自動車の技術開発によって左右される [8.3.1]。電気自動車の将来の需要も、柔軟性のある発電システムの強化につながる可能性がある [8.2.1, 8.3.1]。
- 建築部門では、新築、既存の建物の双方に再生可能エネルギー技術を統合することによって発電や冷暖房を行うことができ、特にエネルギー効率の良い設計であれば余剰のエネルギーを供給することも可能である [8.3.2]。開発途上国においては、中小規模の住居にも再生可能エネルギー供給システムの統合が適用可能である [8.3.2, 9.3.2]。
- 農業、及び食品・繊維産業の場合、オンサイトでの直接的な熱・動力の需要にバイオマスを利用するケースが多い。また余剰の燃料、熱、電気は隣接の供給システムに送ることが出来る [8.3.3, 8.3.4]。産業利用のため再生可能エネルギーの間接的統合（例えば電気・熱技術的、長期的には再生可能エネルギー水素利用等で）を進めることは、いくつかの業種においてはひとつの選択肢である [8.3.3]。

⁹ 計画的に発電でき、かつ必要に応じて発電できる発電所は、ディスパッチ（給電指令）可能な発電所として分類される [8.2.1.1, Annex I]。変動性のある再生可能エネルギー技術は部分的にディスパッチ（給電指令）可能である（再生可能エネルギー源が利用可能な場合のみ）。集光型太陽熱発電プラントは、夜間または太陽光照射エネルギーの低い時期の利用のための蓄熱される場合は、ディスパッチ（給電指令）可能に分類される。

再生可能エネルギーを既存システムに統合するための関連コストは、電力、冷暖房、ガス燃料や液体燃料に関係なく、ケースバイケースである。また、場所により異なり、一般に決定することが難しい。ネットワーク・インフラへの投資、システム運用や損失、その他必要に応じて既存のエネルギー供給システムとの調整に、追加コストが生ずる場合もある。統合コストに関して利用可能な文献は少ない。推計も不足していることが多く、ばらつきが大きい。

再生可能エネルギーの比率を高めていくには、エネルギーシステムの発展、適合が必要になる [8.2, 8.3]。長期的な統合には、インフラへの投資、制度や管理の枠組み修正、社会的側面や市場、計画への配慮、再生可能エネルギーの成長を見込んだ人材育成などが必要である [8.2, 8.3]。さらに、未成熟な技術として、新たなプロセスで製造されるバイオ燃料（新型または次世代型バイオ燃料）、太陽エネルギーから製造される燃料、太陽熱冷房、海洋エネルギー技術、燃料電池と電気自動車などがあるが、これらの統合には、研究開発と実証（RD&D）、人材育成その他の支援策に継続的な投資が必要である [2.6, 3.7, 11.5, 11.6, 11.7]。

再生可能エネルギーは、特に電力において、暖房か輸送燃料のいずれかの部門よりも早い段階で将来のエネルギー供給と最終消費システムを形作ることができ、世界的に再生可能エネルギーの比率が高まると想定される [10.3]。電気自動車 [8.3.1]、電気（ヒートポンプ）を利用した冷暖房 [8.2.2, 8.3.2, 8.3.3]、（スマートメーターを含む）柔軟なデマンドレスポンスサービス [8.2.1]、エネルギー貯蔵とその他の技術と併せて開発していくだろう。

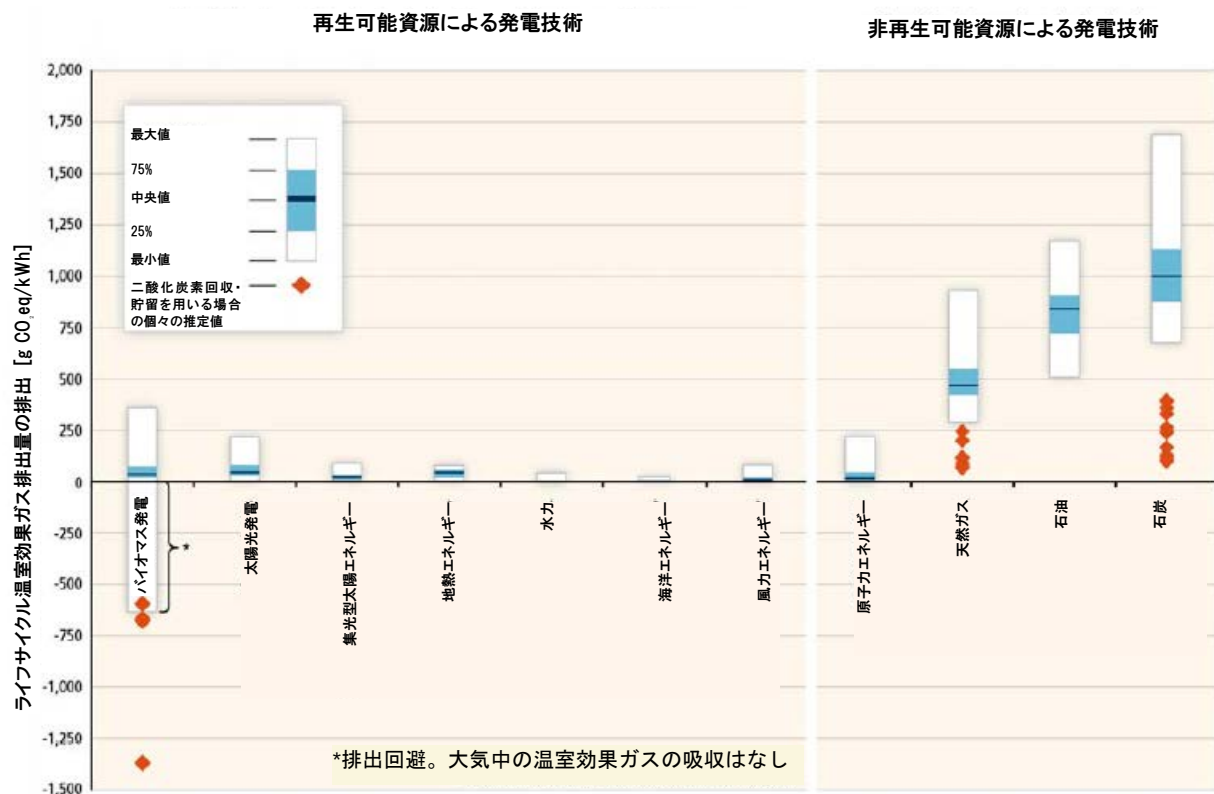
インフラとエネルギーシステムの発達においては、例え複雑性があつたとしても、適切な再生可能エネルギー源が存在するか供給可能な場所においては、エネルギー需要の大きなシェアを満たすような再生可能エネルギー技術の組み合わせを統合するうえでの根本的な技術的制約はあつたとしてもわずかである。しかし、実際の統合の比率と再生可能エネルギーの導入割合は、コスト、政策、環境や社会的側面といった要因に左右されるだろう [8.2, 8.3, 9.3, 9.4, 10.2, 10.5]。

5. 再生可能エネルギーと持続可能な開発

歴史的に見て、経済成長とエネルギー消費及び温室効果ガス排出の増加との間には強い相関があるが、再生可能エネルギーは持続可能な開発（SD）に貢献しつつ、この相関をなくすことに役立つ。再生可能エネルギーが持続可能な開発に対してどの程度貢献しているかを正確に把握するには、国別の評価が必要であるが、再生可能エネルギーは社会の発展と経済成長、エネルギーアクセス、確実なエネルギー供給、気候変動の緩和、環境や健康への悪影響の減少に貢献出来る [9.2]。近代的なエネルギーサービスの提供は、ミレニアム開発目標の達成につながる [9.2.2, 9.3.2]。

- **再生可能エネルギーは社会の発展と経済成長に貢献する。** 好条件下においては、特に集中的なエネルギーへのアクセスのない遠隔地や貧しいへき地において、非再生可能エネルギーの利用に比べコスト削減効果がある [9.3.1, 9.3.2]。エネルギー輸入関連コストも、すでに競争力のある国内の再生可能エネルギー技術が普及すれば、低減できることが多い [9.3.3]。純雇用の規模については、入手可能な研究間でばらつきが見られるが、再生可能エネルギーは雇用創出にも正の影響を与えることが出来る [9.3.1]。
- **再生可能エネルギーはエネルギーへのアクセスを容易にする。特に対象となるのは、電気へのアクセスのない 14 億の人々と伝統的バイオマスを使っているさらに 13 億の人々である。** 近代的なエネルギーサービスに基本的にアクセス可能になれば、コミュニティや家庭には大きな便益がある。多くの発展途上国では、再生可能エネルギーを基盤とした分散型のエネルギー系統や再生可能エネルギーを組み入れた集中的なエネルギー系統が拡大し、エネルギーアクセスは改善している。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提供される。たとえば、水加熱や穀物の乾燥への太陽エネルギーの利用、輸送へのバイオ燃料の利用、暖房（加熱）、冷房（冷却）、調理、照明への近代的バイオマスの利用、また揚水への風力の使用などである [9.3.2, 8.1]。近代的なエネルギーサービスにアクセスできない人々の数は、国内の関連政策が実施されない限り、横ばいで推移すると見込まれる。こうした状況の打開には、必要に応じて、国際的な支援による取り組みや補完が求められる [9.3.2, 9.4.2]。
- **再生可能エネルギーの選択肢は、より安定したエネルギー供給に貢献する。ただし、個別対応には考慮が必要となる。** 競争が活発化しエネルギー源が多様化すれば、再生可能エネルギーの普及により供給支障の脆弱性や市場の変動性が低減する可能性もある [9.3.3, 9.4.3]。シナリオ研究では、エネルギーの安定供給に対する懸念は、輸送部門内の技術的改良がない限り今後も続く可能性があることが指摘されている [2.8, 9.4.1.1, 9.4.3.1, 10.3]。一部の再生可能エネルギー技術の変動する出力特性は、エネルギー供給の信頼度を確保するため、地域の実情に見合う技術的、制度的な措置を必要とする場合が多い [8.2, 9.3.3]。

- 再生可能エネルギー技術は温室効果ガス排出の削減だけでなく、重要な環境上の便益に貢献する。これらの便益の最大化は、再生可能エネルギーの各プロジェクトに特有の技術、管理、現場の特徴に左右される。
- 発電のライフサイクル評価（LCA）によれば、化石燃料の選択肢に比べ、再生可能エネルギー技術による温室効果ガス排出は概して非常に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。各再生可能エネルギーの中央値は 4～46g CO₂eq/kWh だが、化石燃料の場合は 469～1,001g CO₂eq/kWh である（土地利用変化による排出量は除く）（図 SPM.8）。
- バイオ燃料など、多くの現在のバイオエネルギー・システムは温室効果ガス削減につながり、新しいプロセスによるバイオ燃料（新型または次世代バイオ燃料とも呼ばれる）は、より高い温室効果ガス緩和につながり得る。温室効果ガスの収支は、土地利用変化や、それに関連する排出と吸収に影響されるだろう。バイオエネルギーは、埋立処分及び副産物の残渣や廃棄物からの温室効果ガス排出を回避できる可能性がある。バイオエネルギーと二酸化炭素回収・貯留を組み合わせれば、さらに減少が見込まれる場合もある（図 SPM.8 参照）。炭素ストックにおける土地のマネジメントや土地利用変化については、温室効果ガスの推測はかなりの不確実性がある [2.2, 2.5, 9.3.4.1]。
- バイオエネルギーの持続可能性は、とりわけ温室効果ガス排出のライフサイクル評価に関して、土地及びバイオマス資源の管理により影響される。数多くの研究成果に従えば、燃料、電力、熱として利用するためのバイオマス生産によって土地や森林の利用、管理に直接、間接的な変化がもたらされ、陸上の炭素ストックを増減させる可能性がある。これらの研究結果によると、陸上の炭素ストックが間接的に変化すると、かなりの不確実性が生ずることが示されている。また、こうした間接的な変化は直接観測できず、モデル化するには複雑で、単一の原因による説明が難しい。政策決定者にとっては、土地利用の適切な統治、ゾーニング、バイオマス生産システムの選択を考慮することが重要である [2.4.5, 2.5.1, 9.3.4, 9.4.4]。既に実施中の政策には、へき地の開発、農業管理の全体的な向上、気候変動緩和への寄与といった、バイオエネルギーの便益を確実に実現するという目的があるが、その効果は未だ評価されていない [2.2, 2.5, 2.8]。



推定の数	222(+4)	124	42	8	28	10	126	125	83(+7)	24	169(+12)
参考文献の数	52(+0)	26	13	6	11	5	49	32	36(+4)	10	50(+10)

図 SPM.8: 広範なカテゴリの発電技術に加え、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式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¹⁰は、埋立処分及び副産物の残渣や廃棄物からの排出回避の想定に基づく。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できる推計によるものであるが、すべての普及の条件の検討の際に、基礎となる理論的極限值、実際の極限值、あるいは実際の代表値に従うというわけではない [図 9.8, 9.3.4.1]。

- **再生可能エネルギー技術(特に非燃焼型)は、大気汚染及び関連する健康への影響を軽減する** [9.3.4.3, 9.4.4.1]。伝統的バイオマス利用を改善すれば、温室効果ガス排出、森林減少、森林後退だけでなく、地域や室内の大気汚染を大幅に軽減でき、健康への影響 (特に開発途上国の女性や子どもに対する) も緩和可能である [2.5.4, 9.3.4.4]。
- **水の利用可能性は再生可能エネルギー技術の選択に影響する**。従来型の水冷式火力発電所は特に、水不足や気候変動の条件に脆弱である可能性がある。水不足がすでに懸念事項となっている地域では、熱によらない再生可能エネルギー技術、または乾式冷却を用いた再生可能熱エネルギー技術を活用し、水資源に新たな圧迫を加えることなくエネルギーサービスを提供出来る。水力発電や一部のバイオエネルギー・システムは水の利用可能性に依存しており、このため水不足の悪化、緩和のどちらかにつながる可能性がある。影響の多くは立地の検討や総合的なプランニングにより緩和出来る [2.5.5.1, 5.10, 9.3.4.4]。
- **生物多様性に与える再生可能エネルギー技術の影響の度合いは、設置場所により異なる条件によって決定される**。生物多様性に対する再生可能エネルギー特有の影響は、正負の双方が考えられる [2.5, 3.6, 4.5, 5.6, 6.5, 9.3.4.6]。
- **再生可能エネルギー技術の致死率 (fatality rate) は低い**。再生可能エネルギー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、致死率から見た場合、悲惨な結果が生じる可能性は大きく限定される。ただし、一部の水力発電プロジェクトのダムが、設置場所により異なる要因により特定のリスクを生じさせる場合がある [9.3.4.7]。

6. 緩和ポテンシャルとコスト

本特別報告書でレビューされた 164 のシナリオの大多数では、2030 年、2050 年およびそれ以降に再生可能エネルギーの導入量が大幅に増加することが示されている¹¹。2008 年、再生可能エネルギーの総生産量はおよそ 64EJ/年 (一次エネルギー供給総量の 12.9%) であり、このうち伝統的バイオマスは 30EJ/年以上だった。半数以上のシナリオで、再生可能エネルギーの導入量は 2050 年で 173EJ/年を超え、いくつかのケースでは 400EJ/年を上回る (図 SPM.9)。大半のシナリオで伝統的バイオマスの使用が減少する点を考えると、これに対応して、各国の (伝統的バイオマスを除く) 再生可能エネルギーの生産水準はおおよそ 3~10 倍に増加すると予想される。世界の一次エネルギー供給における再生可能エネルギーの割合は、シナリオによって大きく異なる。半数以上のシナリオでは、一次エネルギー供給における再生可能エネルギーの比率は 2030 年に 17%以上に、2050 年に 27%以上になることが示されている。最も高い見込みを示すシナリオにおいては、2030 年に約 43%、2050 年に約 77%の比率となっている [10.2, 10.3]。

ベースラインシナリオの下でも再生可能エネルギーは拡大すると予想される。大半のベースラインシナリオでは、再生可能エネルギーの導入量は 2008 年の 64EJ/年から大幅に増え、2030 年には最大で 120EJ/年になる。多くのベースラインシナリオでは 2050 年には、再生可能エネルギーの導入量は 100EJ/年を超え、いくつかのシナリオでは

¹⁰ SRREN で示すライフサイクル評価の用語では、「負の推定値」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、排出回避では大気中から温室効果ガスは除去されない。

¹¹ この目的のため、本報告書では 16 の大規模な統合モデルから得られた全 164 のシナリオについてレビューした。164 のシナリオは、不確実性の評価を行うには意味があるが、統計的分析に適したランダムサンプリングを代表するものではなく、再生可能エネルギー技術の完全なポートフォリオを代表するものでもない (例えば海洋エネルギーは一部のシナリオで評価されているに過ぎない) [10.2.2]。より詳細な分析のため、164 のシナリオを 4 つの描写シナリオ群に区分した。これらは、4 つの二酸化炭素安定化レベルごとのシナリオで、ベースラインシナリオから、どの程度の幅があるかを示す [10.3]。

最大で約 250EJ/年に達する（図 SPM.9）。これらのベースライン導入量は様々な前提を基にしている。たとえば、21 世紀にはエネルギーサービスの需要の伸びが継続する、再生可能エネルギーはエネルギーアクセスの向上に寄与する、あるいは化石燃料源の使用可能性は長期的には限定的であるといったものである。他の前提（再生可能エネルギー技術のコスト低下や性能向上など）では、気候政策がない場合でも、多くの用途で経済的な競争力が高まるとしている [10.2]。

再生可能エネルギーの普及は、低い温室効果ガス安定化濃度のシナリオにおいて大幅に増加する。低い温室効果ガス安定化濃度のシナリオでは、ベースラインシナリオに比べ、再生可能エネルギーの普及が平均して高い。しかしながら、温室効果ガス濃度の長期目標を考えると、これらのシナリオにおける再生可能エネルギーの普及レベルは幅広い範囲を示している（図 SPM.9）。大気中の二酸化炭素濃度が 440ppm 未満で安定するシナリオでは、2050 年における再生可能エネルギー普及レベルの中央値は 248EJ/年である（2030 年では 139）。最大値は、2030 年の時点で 252EJ/年だが、2050 年までに 428EJ/年に達する [10.2]。

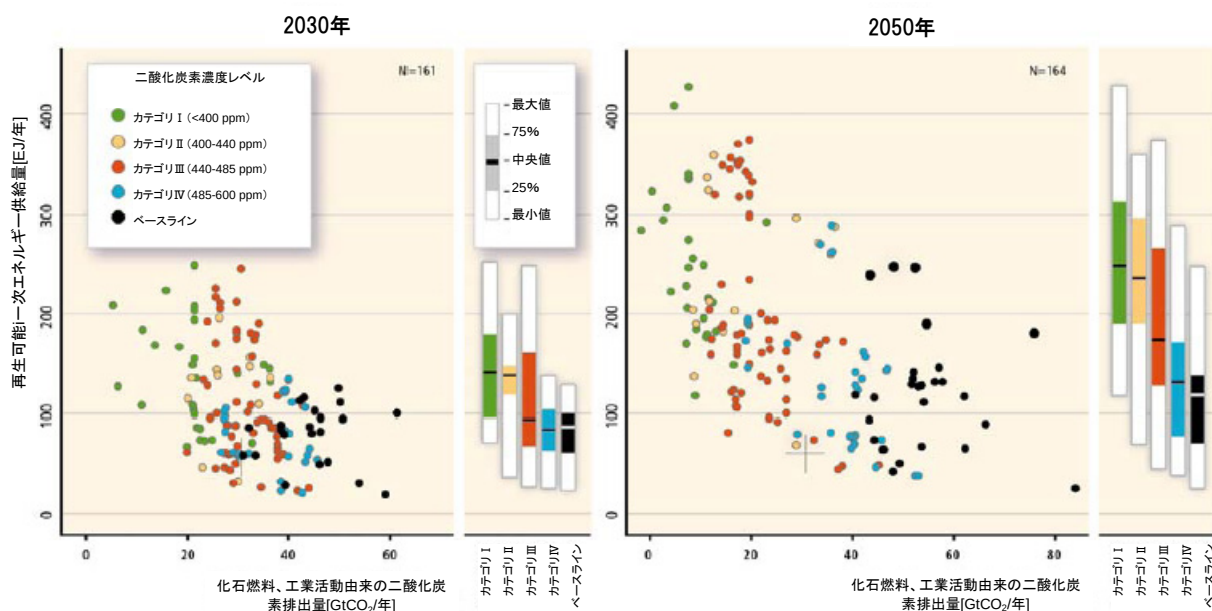


図 SPM.9: 164 の長期的シナリオから得られた、2030 年及び 2050 年における化石燃料と工業由来の二酸化炭素排出量と比較した世界の再生可能エネルギー供給量（直接等価法）。色別の分類は、AR4 の定義による大気中の二酸化炭素安定レベルのカテゴリに基づく。分布図の右側にある図は、大気中の二酸化炭素濃度の各カテゴリにおける再生可能エネルギーの普及レベルを示す。黒の太線は中央値、棒内の着色部分は四分位範囲（25～75%）、白の棒の両端は全ての評価対象のシナリオの全体の範囲を示す。グレーの十字線は 2007 年における値を示す [図 10.2, 10.2.2.2]。

注：評価されたシナリオは 164 あるが、2030 年の結果はデータ報告の都合上 161 のシナリオのみである。再生可能エネルギーの普及レベルが現在を下回るのは、モデル結果と伝統的バイオマスの報告の差異による。一次エネルギー供給計算の「直接等価」法の利用、シナリオ結果の解釈に必要な暗黙の前提について、詳細は Box SPM.2 を参照のこと。すべての安定化シナリオと最も低いベースラインシナリオではそれぞれ、2100 年の二酸化炭素レベルが 600ppm 以下、2100 年までに 600ppm を若干超えるレベルに設定されている都合上、カテゴリ V 及び V 以上は対象になっておらず、また、カテゴリ IV は 570ppm から 600ppm に範囲が拡大されていることに注意。

低炭素エネルギー供給とエネルギー効率向上の組み合わせは、その多くが低い温室効果ガス濃度レベルの実現に貢献することが可能である。その際多くの場合において、2050 年までに再生可能エネルギーが低炭素エネルギー供給の主要なオプションとなる。シナリオの結果は、再生可能エネルギー技術の開発（バイオエネルギーと二酸化炭素回収・貯留の組み合わせを含む）、その関連リソースのベースとコスト、再生可能エネルギー以外の緩和オプション（たとえば、最終消費のエネルギー効率化、原子力、化石燃料と二酸化炭素回収・貯留の組み合わせ）の相対的な魅力、消費パターンと生産パターン、エネルギーサービス需要の主因（将来の人口や経済成長など）、再生可能エネルギーの送電系統への統合の可能性、化石燃料源、気候変動緩和に向けた特定の政策アプローチ、長期的な濃度レベルの排出曲線など様々な過程を含んでいる [10.2]。

本報告書で行ったシナリオ評価は、再生可能エネルギーが大きな温室効果ガス排出の緩和ポテンシャルを有することを示している。4 つの描写シナリオ群は、2010 年から 2050 年の間に化石燃料使用及び工業活動から排出される 1 兆 5,300 億トンの二酸化炭素（IEA の World Energy Outlook 2009 の参照シナリオ）に対して、再生可能エネルギー技術による約 2,200～5,600 億トンの二酸化炭素削減を想定している。緩和ポテンシャルに対して再生可能エネルギーがどの程度貢献するかは、正確には、特定の緩和技術による役割のシナリオ、複雑なシステム、特に再生可能

エネルギーにより代替されるエネルギー源に左右される。このため、考察の際は適切な注意を払うべきである [10.2, 10.3, 10.4]。

シナリオでは、**全体的に再生可能エネルギーの普及が世界で進むとしている**。各地域における再生可能エネルギーの普及状況は、正確にはシナリオによってかなり異なるが、再生可能エネルギーが世界的に普及するという点ではほぼ一致している。また、大半のシナリオでは、再生可能エネルギーの総導入量は長期的には附属書I国に比べ非附属書I国¹²のほうが多いことが示されている（図 SPM.10） [10.2, 10.3]。

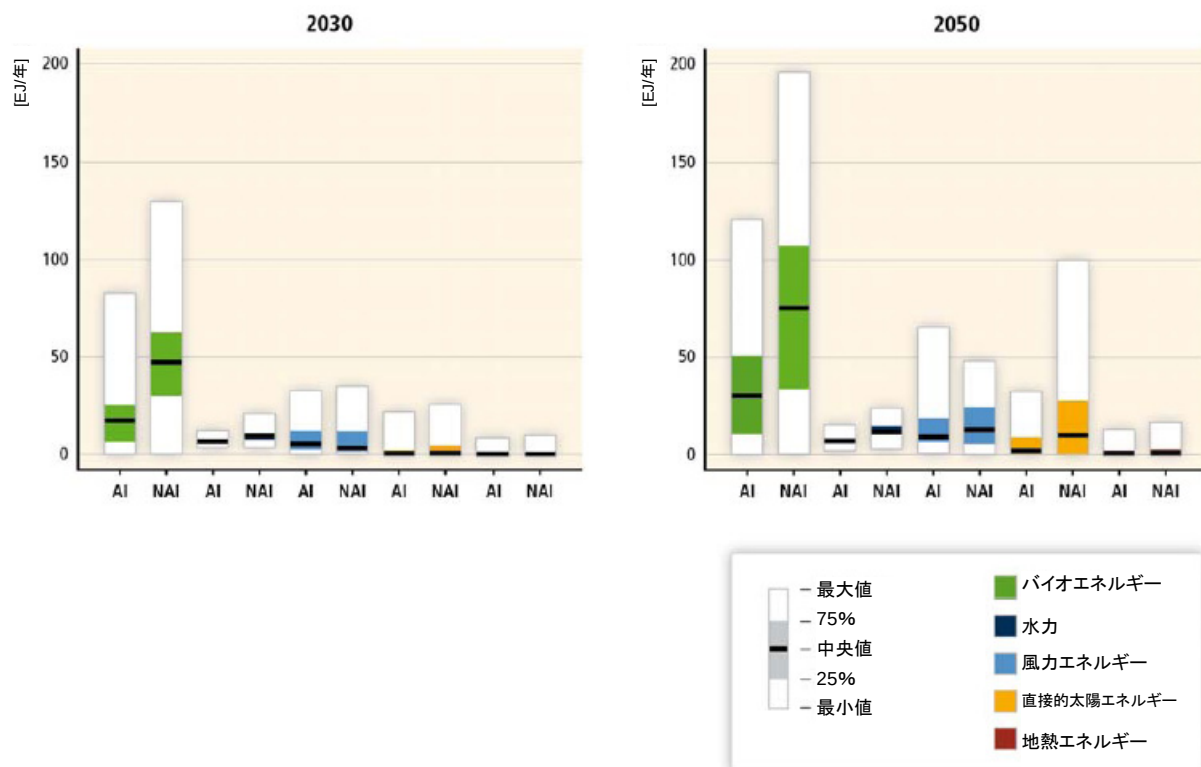


図 SPM.10.: 164 の長期的シナリオにおける附属書I国（AI）、非附属書I国（NAI）におけるエネルギー源別の世界の再生可能エネルギーによる一次エネルギー供給量（直接等価法による）（2030 年、2050 年まで）。黒の太線は中央値、棒内の着色部分は四分位範囲（25～75%）、白の棒の両端は全ての評価対象のシナリオ全体の範囲を示す [図 10.8, 10.2.2.5]。

注：一次エネルギー供給計算の「直接等価」法の適用、シナリオ結果の解釈に必要な非明示的な前提については、Box SPM.2 を参照のこと。より具体的に言うと、バイオエネルギー、風力エネルギー、直接的太陽エネルギーから供給される二次エネルギーの範囲は、2050 年における高導入率シナリオでは、かなりの規模になると考えられる。海洋エネルギーは、ごく一部のシナリオでしか検討されていないため、対象にしていない。

シナリオ評価によると、世界レベルで見ると、いずれかひとつの再生可能エネルギー技術が支配的になるわけではない。また、世界全体の技術的ポテンシャルが、再生可能エネルギーの将来の貢献の制約にはならないことも示している。シナリオによって異なるが、2050 年までには、バイオエネルギー、風力エネルギー、直接的太陽エネルギーの寄与が概して大きい（図 SPM.11）。すべてのシナリオ評価で、技術的ポテンシャルは、再生可能エネルギーの世界的な拡大の制約要因にはならないことが裏づけられている。技術差や地域間の差は大きい、4 つの実証シナリオ群では、再生可能エネルギーの技術的に利用可能なポテンシャルは世界で 2.5%以下としている [10.2, 10.3]。

¹² 附属書I国及び非附属書I国とは、気候変動枠組条約（UNFCCC）の分類を指す。

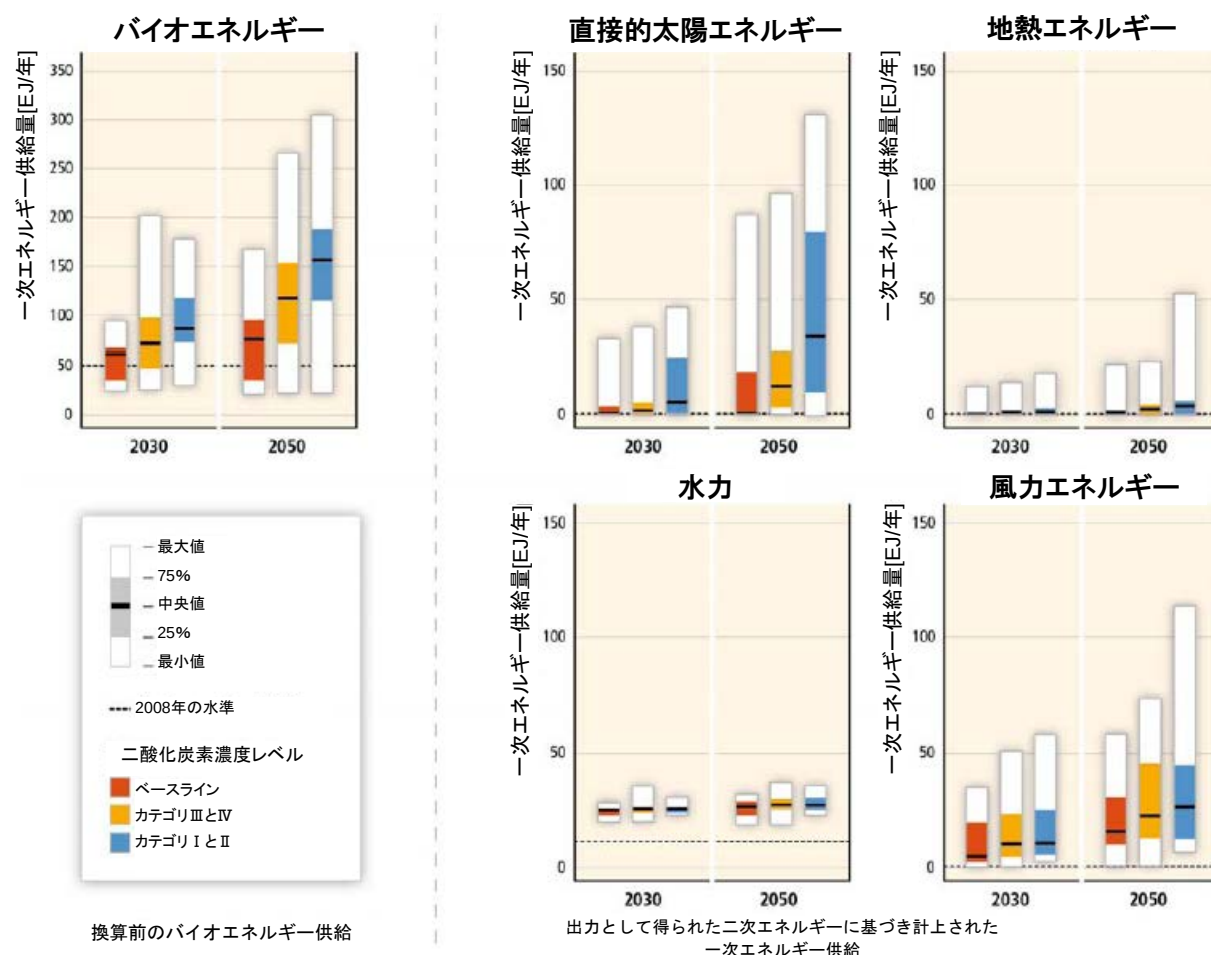


図 SPM.11: 164 の長期シナリオを、AR4 で定義された二酸化炭素濃度レベルでカテゴリ分けして、バイオエネルギー、風力エネルギー、直接的太陽エネルギー、水力、地熱エネルギーの 2030 年と 2050 年の供給量（直接等価法）を比較したもの。黒の太線は中央値、棒内の着色部分は四分位範囲（25～75%）、白の棒の両端は全ての評価対象のシナリオの全体の範囲を示す [図 10.9, 10.2.2.5 より抜粋]

注: 一次エネルギー供給計算の「直接等価」法の適用、シナリオ結果の解釈に要する非明示的な前提については、Box SPM.2 を参照のこと。より具体的に言うと、バイオエネルギー、風力エネルギー、直接的太陽エネルギーから供給される二次エネルギーの範囲は、2050 年における高導入率シナリオでは、かなりの規模になると考え得る。海洋エネルギーは、ほとんどのシナリオで検討されていないため、表示していない。2100 年の二酸化炭素レベルが、すべての安定化シナリオで 600ppm 以下であることと、最も低いベースラインシナリオで 600ppm を若干超えるレベルであることから、カテゴリ V とそれ以上は含まれておらず、またカテゴリ IV については 570ppm から 600ppm に範囲が拡大されていることに留意。

再生可能エネルギーの導入が制限された場合、気候変動の緩和コストは上昇し、温室効果ガスを低濃度で安定化させることはできなくなることが、個々の研究によって示されている。多数の研究が、再生可能エネルギーだけでなく、原子力や二酸化炭素回収・貯留と化石燃料の組み合わせなど、個々の緩和オプションの普及に対する制約を想定するシナリオの感度を研究している。コスト上昇の正確な大きさについては、ほとんど一致しない[10.2]。

再生可能エネルギーが高い比率をもつ低炭素経済への移行には、技術とインフラへの投資増大が必要となる。SRREN で詳細分析を行った 4 つの実証シナリオ群では、再生可能エネルギーへの累積投資額（発電部門のみ、世界全体）は、2011 年から 2020 年までの 10 年間で 1.36～5.10 兆 US ドル（2005 年）、2021 年から 2030 年までの 10 年間で 1.49～7.18 兆 US ドル（2005 年）と推定される。低い数字は IEA World Energy Outlook 2009 の参照シナリオであり、高い数字は大気中の二酸化炭素のみの濃度が 450ppm という安定化シナリオを参照している。必要な投資額の年間平均値は、いずれのシナリオにおいても世界の国内総生産（GDP）の 1%未満である。上記で示された範囲は、これらシナリオの調査に用いられたモデル設計の差異を超え、温室効果ガスの評価濃度の差と許容される緩和技術による制約で主に説明出来る。化石燃料と原子力は一定の電力需要への対応に必要なだが、再生可能エネルギー発電所の導入設備容量が増加すれば、それらの使用量は減少する。再生可能エネルギー発電所に関する投資、運転保守（O&M）および材料費（該当する場合）に加えて、再生可能エネルギーの利用に関連する経済全体の負担を評価するには、回避された燃料コストや代替された投資コストを考慮しなければならない。これらの回避コストを考慮しない場合であっても、上記に示した再生可能エネルギーに対する投資額のうち最も低いものでも 2009 年に報告された当該投資額より低い。再生可能エネルギー発電所部門への年間平均投資額の最も高いものでは、世

界全体における同部門への現在の投資額のほぼ5倍となる [10.5, 11.2.2]。

7. 政策、実施、及び財政支援

再生可能エネルギーに関する政策の増加、多様化は多くの要因に支えられ、近年の再生可能エネルギー技術の発展的な成長を促している [1.4, 11.2, 11.5, 11.6]。再生可能エネルギー技術の普及促進には、政策が極めて重要な役割を果たす。大半の開発途上国ではエネルギーアクセス、社会経済の発展が主な政策要因である一方、先進国ではエネルギーの安定供給と環境問題が最重要となる [9.3, 11.3]。政策の重点は、再生可能エネルギー電力に対する優先的な取組みから再生可能エネルギーによる冷暖房や輸送を含むものへと広がりつつある [11.2, 11.5]。

研究、開発、実証、導入に関する再生可能エネルギー特有の政策は、再生可能エネルギーに公平な競争の場を与えるうえで有効である。政策として考えられるのは、固定価格買取制度、クォータ制、送電系統への優先接続、建築物への導入義務化、バイオ燃料の混合義務、バイオエネルギーの持続可能性に関する基準などである [2.4.5.2, 2.ES, TS.2.8.1]。他にも、財政的インセンティブ（税制など）、直接的政府支払（奨励金や補助金など）、公共ファイナンスメカニズム（融資や保証など）といった政策分野がある。炭素価格制度など温室効果ガス削減を目的とした幅広い政策も、再生可能エネルギー普及を支援するものとなり得る。

政策形成は部門個別に行うことが可能である。また、地域、州・県、国家単位、あるいは一部は地域レベルで実施することや、二国間、地域間、国際間の協調によって補完することも可能である [11.5]。

政策が様々な障壁を克服するのを助け、再生可能エネルギーの設備容量の増加を促進してきた [1.4, 11.1, 11.4, 11.5, 11.6]。再生可能エネルギーの普及を妨げる障壁には、以下のものがある。

- 既存の産業やインフラ、エネルギーシステムの規制に関する制度上あるいは政策上の障壁
- 市場の失敗（環境や健康に対するコストのように、内部化されないコストが当てはまるものも含む）
- 再生可能エネルギーの普及に関する一般的な情報の欠如、データが入手不可能、技術や知見の欠如
- 社会や個人の価値、またそれによって影響される再生可能エネルギー技術への認識や受け入れに関する障壁 [1.4, 9.5.1, 9.5.2.1]

研究開発に対する公的投資は、他の政策手法、とりわけ新技術への需要をも促進するような普及政策によって補完される場合、最も効果的である。研究開発に対する政策と導入政策を併せることで、正のフィードバック・サイクルが形成され、民間部門の投資を誘引する。ある再生エネルギーの開発初期段階で導入政策を実施すれば、民間の研究開発を誘因し、知識の広がりを加速出来る。それにより、更なるコスト低下が実現するだけでなく、その技術を利用するインセンティブが増すことになる [11.5.2]。

いくつかの政策は、急速な再生可能エネルギー導入の増加に有効かつ効率的であることが示されてきたが、万能な政策は存在しない。技術の成熟度、無理のない資本、既存システムへの統合の容易さ、地域や国家における再生可能エネルギー源の基盤などの要因に応じた様々な政策や政策同士の組み合わせによって、政策がより効率的で効果的になることが、これまでの経験から明らかになっている [11.5]。

- いくつかの研究では、一部の固定価格買取制度は、再生可能エネルギー電力を促進する上で、効果的かつ効率的であると結論付けられている。その主な理由として、長期的な固定価格と割増料金の支払いとの組み合わせ、ネットワークの接続、すべての再生可能エネルギー電力の買い取り保証などがある。例えば長期的な協定では、リスクを低減するように策定されれば、割り当て政策も効率的になる[11.5.4]。
- 多くの政府が、再生可能エネルギーの冷暖房に対する財政的インセンティブを採用している。再生可能エネルギー熱を使用する義務化は、公的な財政支援を受けずに成長を支援する可能性を持つことが注目されている [11.5.5]。
- 輸送部門では、再生可能エネルギー燃料の義務化や混合要件は、大部分の近代的バイオ燃料産業の開発におけるキードライバーである。その他の政策には、直接的な政府補助金や減税などがある。これらの政策は、国際的なバイオ燃料の取引の発展に影響与えてきた [11.5.6]。

技術、市場その他要因の発展に応じて調整を行う柔軟性は重要である。政策の効果や効率性を決めるうえで、その設計や実施の内容は重要である[11.5]。透明かつ持続的な政策の枠組みは、投資リスクの軽減、再生可能エネルギー導入と低コストの用途の発展を推進することを可能にする [11.5, 11.6]。

再生可能エネルギーの開発と普及は、それを「実現可能にする」政策によって支えられる。ある政策と他の再生可能エネルギー政策、エネルギー政策と非エネルギー分野の政策（農業、輸送、水管理、都市計画など）の可能な連携に取り組むことによって、再生可能エネルギーにとって有利でその実現を可能にする環境を創出することが出来る。また、再生可能エネルギー開発事業者が容易に資金調達やプロジェクトの立地決定をできるようにする、あるいは再生可能エネルギー導入と出力に対して電力ネットワークや市場への参入障壁をなくす、熱心な意思疎通や対話イニシアティブを通して教育や意識啓発を推進する、技術移転を可能にすることによっても創出出来る。このように「実現可能にする」環境が構築できれば、再生可能エネルギー普及を促す政策の効果や効率を高めることが可能である [9.5.1.1, 11.6]。

2つの個別の市場の失敗が、排出量取引市場（または一般的な温室効果ガス価格政策）が存在していても、技術開発のポテンシャルが高い革新的な再生可能エネルギー技術に対する追加支援を行う理由を作り出している。1つ目の市場の失敗は、温室効果ガス排出の外部費用である。2つ目の市場の失敗はイノベーションの分野にある。つまり、企業が再生可能エネルギー技術の学習に対する投資に際し、将来の便益を過小評価する場合、あるいはこれらの便益を使用できない場合、企業はマクロ経済の観点からは最適とされる額よりも少ない額の投資を行うということである。温室効果ガス価格政策だけではなく、再生可能エネルギー独自の政策も、関連する技術開発の機会があるならば（あるいは気候変動緩和の枠を超えた他の目標が達成されるならば）、経済的な観点から妥当である。ロックイン効果、炭素リーケージ及びリバウンド効果のような潜在的な悪影響も、政策のポートフォリオ設計において考慮されなければならない[11.1.1, 11.5.7.3]。

文献では、再生可能エネルギーの費用対効果と高い導入率を達成するには、再生可能エネルギーの長期的な目標と経験から学ぶための柔軟性が重要になると示されている。このため、リスク軽減を図り、投資期間を通して安定した魅力的なリターンを実現するため、政策の枠組みを系統的に発展させる必要があるだろう。エネルギーのインフラが開発途上の場合や、エネルギー需要が将来増加すると見込まれる場合は、エネルギー効率化政策を含め、政策手段の妥当かつ信頼し得る組み合わせが一段と重要になる [11.5, 11.6, 11.7]。

8. 再生可能エネルギーに関する知見の向上

科学的・工学的な知見を深めることが、再生可能エネルギー技術の性能改善やコスト低減をもたらす。再生可能エネルギーやその温室効果ガス排出に対する役割に関するさらなる知見を、以下の多岐にわたる分野で引き続き広げるべきである [詳細は表 1.1 参照]。

- 再生可能エネルギー導入の将来コストとタイミング
- すべての地理的スケールで実現可能な再生可能エネルギーの技術的ポテンシャル
- さまざまな再生可能エネルギー技術をエネルギーシステムや市場へ統合させる上での、技術的・制度的な課題とそのコスト
- 再生可能エネルギーとその他のエネルギー技術の社会経済・環境面の総合的な評価
- 持続可能な再生可能エネルギーサービスにより開発途上国のニーズに応える機会
- 多様な状況下で、費用対効果の高い再生可能エネルギーの導入を可能にする政策、制度、財政的メカニズム

再生可能エネルギーやその気候変動緩和ポテンシャルについての知見は広がり続けている。既にある科学的知見も多く、政策決定プロセスを促進させることが可能である [1.1.8]。