

SRRREN

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

再生可能エネルギー源と気候変動の緩和（仮訳）

再生可能エネルギー源と 気候変動の緩和（仮訳）

統括執筆責任者:

William Moomaw (USA), Francis Yamba (Zambia)

執筆責任者:

Masayuki Kamimoto (Japan), Lourdes Maurice (USA), John Nyboer (Canada), Kevin Urama (Kenya/Nigeria), Tony Weir (Fiji/Australia)

執筆協力者:

Thomas Bruckner (Germany), Arnulf Jager - Waldau (Italy/Germany), Volker Krey (Austria/Germany), Ralph Sims (New Zealand), Jan Steckel (Germany), Michael Sterner (Germany), Russell Stratton (USA), Aviel Verbruggen (Belgium), Ryan Wiser (USA)

査読編集者:

Jiahua Pan (China) and Jean - Pascal van Ypersele (Belgium)

本章の引用時の表記方法:

Moomaw, W., F. Yamba, M. Kamimoto, L. Maurice, J. Nyboer, K. Urama, T. Weir, 2011: Introduction. 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. Schlomer, 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 5 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も責任を負いかねますのでご了承ください。

第1章：再生可能エネルギーと気候変動の緩和

目次

目次	2
要約	3
1.1 背景	5
1.1.1 はじめに	5
1.1.2 再生可能エネルギー源と気候変動緩和についての特別報告書	5
1.1.3 気候変動	6
1.1.4 二酸化炭素排出の駆動要因	9
1.1.5 気候変動緩和の選択肢としての再生可能エネルギー	13
1.1.6 緩和の選択肢	16
1.1.7 再生可能エネルギーに関する国際政策の傾向	18
1.1.9 メトリクス及び定義	20
1.2 再生可能エネルギー資源の概要	21
1.2.1 再生可能エネルギーの定義、変換、及び用途	21
1.2.2 再生可能エネルギーの理論的ポテンシャル	25
1.2.3 再生可能エネルギー技術の技術ポテンシャル	25
1.2.4 統合に関する再生可能エネルギーの特色	26
1.2.5 エネルギー効率と再生可能エネルギー	27
1.3 エネルギーのサービスのニーズと現状の合致	29
1.3.1 現在の再生可能エネルギー・フロー	29
1.3.2 再生可能エネルギーの現在のコスト	29
1.3.3 再生可能エネルギーの地域的側面	32
1.4 機会、障壁、問題	33
1.4.1 機会	33
1.4.1.1 社会的及び経済的発展	33
1.4.1.2 エネルギーアクセス	33
1.4.1.3 エネルギー安全保障	34
1.4.1.4 気候変動の緩和と環境、健康への影響の軽減	34
1.4.2 障壁	36
1.4.2.1 市場の失敗及び経済的障壁	36
1.4.2.2 情報・意識啓発上の障壁	37
1.4.2.3 社会文化的な障壁	38
1.4.2.4 制度的及び政策的障壁	39
1.4.3 問題	40
1.5 政策、研究、開発、普及、及び実施戦略の役割	40
1.5.1 政策の選択肢：傾向、経験及び評価	40
1.5.2 促進的環境	42
1.5.2.1 再生可能エネルギー政策及び非再生可能エネルギー政策の補完	42
1.5.2.2 再生可能エネルギーのインフラ、ネットワーク及び市場の提供	42
1.5.3 構造的転換	42
REFERENCES	44
第1章付録	53

要約

すべての社会は人間の基本的欲求（照明、調理、空間の快適さ、移動、通信など）を満たし、生産的なプロセスを提供するエネルギーのサービスを必要とする。発展を持続可能にするためには、エネルギーのサービスの供給を確保し、環境への影響を低減させる必要がある。

そのためには、持続可能な社会及び経済発展に不可欠なエネルギーのサービスを供給し続けるために必要なエネルギー資源が、妥当な価格で確実に利用出来ることが必要となる。これは、経済発展のさまざまな段階において、さまざまな戦略が応用されることを意味する。環境に配慮するため、環境への影響及び温室効果ガス（GHG）の排出量を削減し、エネルギーのサービスを提供しなければならない。しかし、世界経済を左右する現在の一次エネルギーの 85%が化石燃料の燃焼によるものであり、化石燃料の消費は温室効果ガスの人為的排出の原因の 56.6%を占めている。

再生可能エネルギー源は持続可能な方法でエネルギーのサービスを提供し、特に気候変動を緩和する役割を担っている。再生可能エネルギー源と気候変動の緩和に関する本特別報告書では、持続的な社会的及び経済的発展の過程に対しエネルギーのサービスを提供する再生可能エネルギー（RE）源の現在の貢献及び将来のポテンシャルを調査する。本報告には、利用可能な再生可能エネルギーの資源及び技術、コスト及び相乗便益、拡大要件・統合要件に対する障壁、将来のシナリオ及び政策オプションの評価が含まれる。

エネルギーのサービスの供給に伴う温室効果ガスの排出は気候変動の主な原因となっている。IPCC 第 4 次評価報告書（AR4）は「20 世紀半ば以降に観測される地球の平均気温の上昇の多くは、人為的な温室効果ガス濃度の上昇が原因である可能性が非常に高い。」と結論づけた。二酸化炭素の濃度は上昇を続け、2010 年末までに、産業革命以前に比べ 39%以上増加し、390ppm CO₂を超えている。

AR4 を再確認した長期のベースラインシナリオは、エネルギー強度の予測される減少と、推定される世界的な国内総生産の増加の影響とは相殺出来ないことを示している。そのため、多くのシナリオでは今世紀を通して一次エネルギー供給が確実に上昇していくことを示している。気候政策が存在しない場合、圧倒的多数のベースラインシナリオが、2000 年と比べて 2100 年は大幅に排出量が増加することを示しており、同時に二酸化炭素濃度が上昇、つまり温暖化が進むことを示唆している。

基本的な社会経済シナリオによると、また増大する不確定性を考慮すると、地球の平均気温は上昇し、今世紀末までに 1980 年から 1990 年の平均よりも 1.1~6.4℃高くなると予測される。

気候システムにおける急激な不可逆変化の可能性がある水資源、生態系、食の安全、人間の健康及び沿岸域の居住地に対するそのような気候変化の悪影響を避けるため、カンクン合意において産業革命以前の値より 2℃以上高い値にならないよう世界平均気温を制限することを提唱している。また、世界平均気温の上昇の割合を 1.5℃までに抑えることに合意した。平衡温度上昇を 2~2.4℃に確実に抑えるためには、温室効果ガス濃度を 445~490ppm CO₂eq の範囲に安定させる必要があるだろう。

必要なエネルギーのサービスを提供したとしても、エネルギーシステムからの温室効果ガスの排出を低減する複数の手段がある。再生可能エネルギー技術は多様性を持ち、全種のエネルギーのサービスのニーズに応えることが出来る。様々なタイプの再生可能エネルギーは電力、熱エネルギー及び機械エネルギーを供給でき、複数のエネルギーのサービスのニーズを満たすことが出来る燃料を産出出来る。再生可能エネルギーとは、消費の速度と同じ、またはそれを超える速度で自然過程によって補給される太陽や地球物理学的・生物学的資源とするあらゆる形のエネルギーのことである。化石燃料とは異なり、大部分の再生可能エネルギーでは、二酸化炭素はほとんど、または全く排出されない。

低炭素技術のポートフォリオにおける再生可能エネルギーの寄与は、その技術間の経済的競争及び（気候変動の範囲を超えた）相対的な環境負荷に加え、安全面及び社会的側面にも大きく依存している。

緩和オプションのあらゆるポートフォリオの総合的推定は、それぞれの緩和ポテンシャルと、関連リスク、コスト及び持続可能な開発に対する寄与の評価を含むだろう。気候変動緩和に対する動きがなかったとしても、本報告書にて分析するシナリオから、エネルギーのサービスに対する需要の高まりが、再生可能エネルギーを今日のエネルギー使用量を超えるレベルにすると期待されているということがわかる。

世界規模では、2008 年の、492EJ の総一次エネルギー供給の 12.9%を再生可能エネルギーが占めると推定されている。発展途上国では、再生可能エネルギーに占める最も大きな寄与はバイオマス（10.2%）であり、バイオマス燃料の大部分（およそ 60%）が調理及び暖房のような従来の用途に使用されていたが、近代的バイオマスの使用が急速に増えてきている。¹水力は 2.3%とされるが、それに対し、その他の再生可能エネルギー源は 0.4%を占める。

¹ 非公式部門で使用される新たな伝統的バイオマスの推定値 20~40%は本報告書及び公式データベースでは計上していない (2.1)。

2008年では、再生可能エネルギーは全世界の電力供給のおよそ19%（水力16%、その他の再生可能エネルギー3%）を占め、バイオ燃料は全世界の道路輸送用燃料供給の2%を占めている。また、伝統的バイオマス（17%）、近代的バイオマス（8%）、太陽熱及び地熱エネルギー（2%）を合わせると、世界の熱需要の27%を占めている。一次エネルギー供給に対する再生可能エネルギーの占める割合は国や地域によって大きく異なる。低程度の温室効果ガスのシナリオの将来像は、再生可能エネルギー、原子力と組み合わせた再生可能エネルギー、及び二酸化炭素回収・貯留を行う石炭及び天然ガスを想定している。

世界のエネルギー消費量に対する再生可能エネルギーの割合はいまだ比較的小さいが、一方で再生可能エネルギーの普及はここ数年で急速に拡大している。2008年から2009年の2年間で増加した世界における約300GWの新たな発電量のうち、140GWは新たに加わった再生可能エネルギーによるものであった。2009年における世界の再生可能エネルギーの発電能力のうち、53%が発展途上国で発電されたものである。ほとんどの場合、エネルギー構成における再生可能エネルギーの割合の増加は、エネルギーシステムの変化を促進する政策を必要とする。政府の政策、多くの再生可能エネルギー技術のコスト低減、化石燃料の価格の変化、及び他の因子は、再生可能エネルギーの消費の継続的な増加を支援してきた。これらの進展は、再生可能エネルギーが先進国及び発展途上国の両方で、今後数十年にわたり非常に大きな役割を果たす可能性を示唆している。

一部の再生可能エネルギー技術は、地方部及び都市部環境の使用場所に導入される（分散化）可能性があるが、その一方で、他の再生可能エネルギー技術は、主に巨大なエネルギー・ネットワーク内で使用（集中化）される。多くの再生可能エネルギー技術は技術的に成熟し、大規模な導入が行われているが、それ以外の再生可能エネルギー技術は技術的成熟及び商業展開の初期段階にある。

再生可能エネルギーの理論的ポテンシャルは、世界中のすべての経済圏で使用されている全エネルギーを大きく上回る。世界的な再生可能エネルギー源の技術ポテンシャルは、継続する市場の成長を抑制することもない。文献に広範囲にわたる評価がなされているが、調査は一貫して、再生可能エネルギーの世界における技術的ポテンシャルの全体は、現在及び予想される将来の世界的なエネルギー需要の両方を大幅に上回ることを発見している。太陽エネルギーの技術ポテンシャルは、再生可能エネルギー源の中でも最も高いが、すべての形式の再生可能エネルギーに大きな技術ポテンシャルが存在する。世界における再生可能エネルギー全体の無限の技術ポテンシャルは、再生可能エネルギーの普及を制約する可能性は低い。

風力及び太陽発電を含む一部の再生可能エネルギーは変動性があり、必要な時に必ず送電出来るものではない。一部の再生可能エネルギーのエネルギー密度は比較的低いので、最終消費エネルギーサービスの供給に必要な送電エネルギーを減少させることは、特に再生可能エネルギーにとっては重要であり、また全てのエネルギー形態にとっても利益をもたらす。

一部では、再生可能エネルギーはすでに経済的な競争力を持っているが、多くの再生可能エネルギー技術の均等化発電原価は、今のところ既存のエネルギー価格よりも高い。商業的に使用可能な特定の再生可能エネルギー技術の現在の均等化発電原価の幅は広く、それは、技術の特徴、コストや性能における地域的ばらつき、及び割引率の違いなどの多数の要因による。

再生可能エネルギーは多くの機会を提供し、気候変動緩和への取り組みが出来るだけでなく、持続的かつ衡平な経済発展、エネルギーアクセス、エネルギー供給の確保及び地域環境及び健康に対する影響への取り組みも可能である。市場の失敗、先行するコスト、金融リスク、データや能力の不足、公的及び制度的意識、認識する社会規範及び価値の構造、現行のインフラ及び現在のエネルギー市場の規制、不適切な知的財産法、取引規制、変化に敏感なポリシーやプログラムの不足、再生可能エネルギー電力の減少、及び土地利用紛争は、再生可能エネルギーの消費拡大に対する現存する障壁及び問題の一部である。

一部の政府では、エネルギーシステムへの再生可能エネルギーの統合の様々な要素へ取り組むうえでの様々な原因に誘引され、様々な再生可能エネルギーの政策の導入に成功している。これらの政策によりここ数年において、再生可能エネルギー技術の段階的な成長が促されてきた。これらの政策は財政的インセンティブ、公共財政支援及び規制に分類することが出来る。これらの政策は一般的に以下の2つの市場の失敗に取り組んでいる。1) 温室効果ガス排出の外部コストが適切な水準の値になっていない。2) 再生可能エネルギーは、イノベーターの想定を超える社会に対する便益を生み出すが、かかる取り組みに対する投資は過小なものとなる。いくつかの研究において、一部の固定価格買取制度は再生可能エネルギー電力の促進において、効果的かつ効率的であると結論付けられてきた。割り当て政策はリスク低減のために設計される場合に効果的かつ効率的になりうる。再生可能エネルギーを利用した冷暖房に財政的インセンティブを採用する国が増えつつある。運輸部門では、再生可能エネルギー燃料の義務または混合要件が最新のバイオ燃料産業の発展におけるキードライバーとなっている。政策は国際的なバイオ燃料取引の発展に影響を与えてきた。最も重要な課題は、再生可能エネルギー及び炭素価格政策への道を見つけ、トレードオフよりも相乗効果を利用出来るよう相互に作用することである。再生可能エネルギー技術は、「促進的」政策と連動して導入される場合に、より重要な役割を果たすことが出来る。

1.1 背景

1.1.1 はじめに

すべての社会は人間の基本的欲求（照明、調理、空間の快適さ、移動、通信など）を満たし、生産的なプロセスを提供するエネルギーのサービスを必要とする。発展を持続するためには、エネルギーのサービスの供給を確保し、環境への影響を低減させる必要がある。そのためには、持続可能な社会及び経済発展には不可欠なエネルギーのサービスを供給し続けるために必要なエネルギー資源が、妥当な価格で確実に利用出来ることが必要である。これは、経済発展のさまざまな段階において、さまざまな戦略が応用されることを意味する。環境に配慮するため、環境への影響及び温室効果ガス（GHG）の排出量を削減しエネルギーのサービスを提供しなければならない。

IPCC 第4次評価報告書（AR4）は、化石燃料が2004年において一次エネルギー全体の85%を占めており（Sims et al., 2007）²、これは2008年においても同じ値である（IEA 2010a; Table A.II.1）。また、化石燃料の燃焼は、2004年において人為的な温室効果ガス排出量全体の56.6%（CO₂eq）を占める（Rogner et al., 2007）³。不可欠な商品やサービスを先進国及び発展途上国の市民に提供する能力がある持続可能な経済を維持したり、支援する地球規模の気候システムを維持したりするには、いかにエネルギーを生産し活用するかという点において大きな変化が必要となる（Nfah et al., 2007; Kankam and Boon, 2009）。しかし、化石燃料よりも大幅に二酸化炭素排出量が少ない再生可能エネルギー技術は成長している。第10章では、将来の低炭素社会の発展に寄与する再生可能エネルギーのポテンシャルを調査するための、100を超えるシナリオについて分析する。

1.1.2 再生可能エネルギー源と気候変動緩和についての特別報告書

再生可能エネルギー（RE）源は、持続可能な方法でエネルギーのサービスを提供し、特に気候変動を緩和する役割を担っている。再生可能エネルギー源と気候変動の緩和に関する本特別報告書は、持続可能な社会的及び経済的発展の過程に対し、エネルギーのサービスを提供する再生可能エネルギー（RE）源の現在の貢献及び将来のポテンシャルを調査する。本報告書には、利用可能な再生可能エネルギーの資源及び技術、コスト及び相乗便益、拡大要件・統合要件に対する障壁、将来のシナリオ及び政策オプションの評価が含まれる。本報告書は11の章で構成される（図1.1）。第1章は再生可能エネルギーと気候変動の概要を、第2章から7章までは、6タイプの再生可能エネルギー技術（バイオマス、太陽熱、地熱、水力、海洋及び風力）についての情報を、第8章から11章までは統合問題の処理（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、持続可能な開発の下での再生可能エネルギー、緩和ポテンシャルとコスト、政策、融資及び実施）について示している。本報告書では、必要に応じて、不確実性についても触れている。⁴

温室効果ガスの削減目標を満たす再生可能エネルギー源のポテンシャルについての情報を以下に示す。

- ・再生可能エネルギー資源と利用可能な技術、及びその資源に対する気候変動の影響の分析（第2～第7章）
- ・技術及び市場状況、将来における開発、及び推定導入率（第2～7章、第10章）
- ・エネルギー貯蔵、送電方式、既存システムへの統合、及びその他のオプションを含めたエネルギー供給システム。その他の市場への統合のオプション及び制約（第8章）
- ・再生可能エネルギー成長、機会、及び持続可能な開発の関連性（第9章）
- ・安全なエネルギー供給への影響（第9章）
- ・導入の経済的、環境的コスト、便益、リスク、及び影響（第9章、第10章）
- ・再生可能エネルギー資源の緩和ポテンシャル（第10章）
- ・持続可能な形で導入を早める可能性がある方法を実証するシナリオ（第10章）
- ・能力育成、技術移転、及び財政支援（第11章）
- ・政策オプション、結果、及び有効性の条件（第11章）

² AR4で提示された数字は80%であるが、本報告書ではエネルギー計算に直接等価法（direct equivalent method）を使用しているため、物理体積法（physical content method）から直接等価法へ変換している。方法の詳細については1.1.9及びAnnex II（A.II.4）を参照。

³ 他の供給源やガスからのもの（Rogner et al., 2007の図1.1bを参照）は、森林減少、バイオマスの腐朽などからの二酸化炭素（17.3%）、その他からの二酸化炭素（2.8%）、メタン（14.3%）、亜酸化窒素（7.9%）、及びフッ素化ガス（1.1%）となっている。森林からのものを含む、分類項目ごとの排出量についての詳細情報は、Rogner et al., 2007の図1.3bと関連する注釈を参照。

⁴ 本報告書では、例えば感度分析の結果の提示や、コスト値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のため、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。

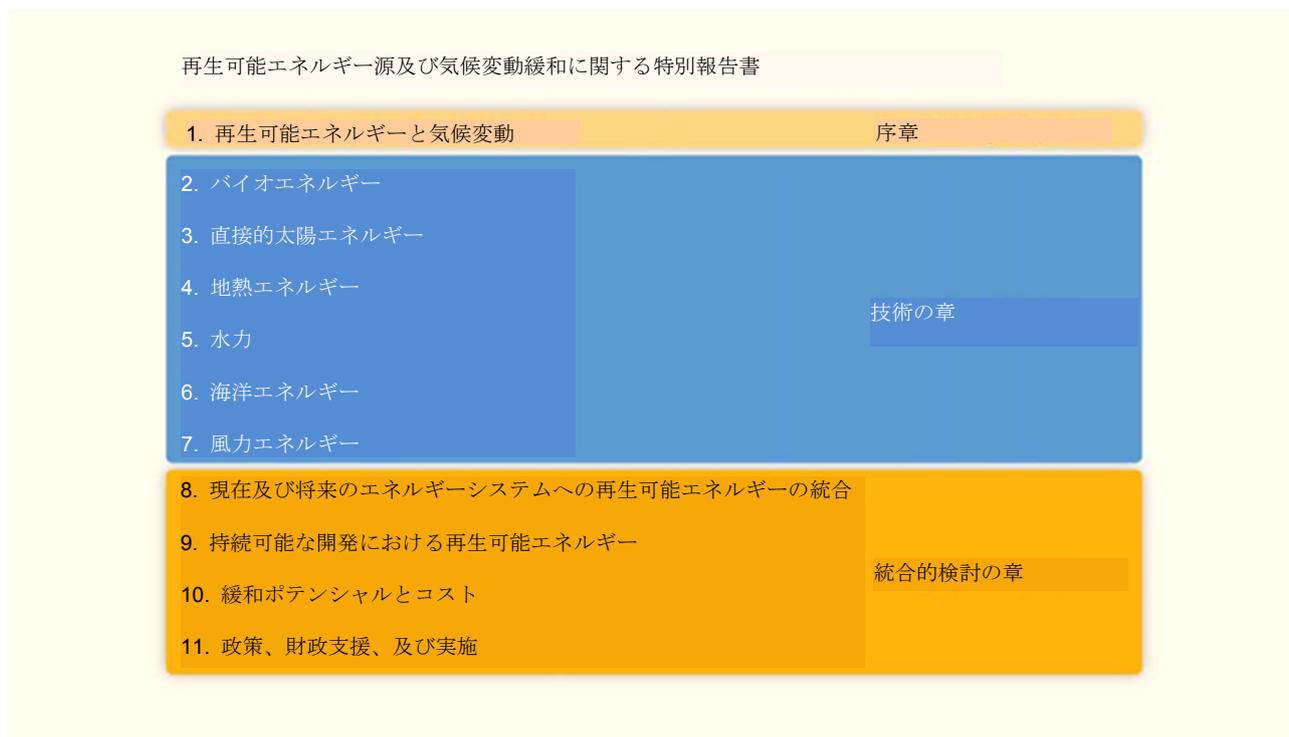


図 1.1: SRREN の構成

1.1.3 気候変動

エネルギーのサービスの供給に伴う温室効果ガス排出は気候変動の主な原因である。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 (GHG) 濃度上昇が原因である可能性が非常に高い」と結論付けている。AR4 以降、濃度は上昇を続け、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、二酸化炭素濃度で 390ppm を超えている (IPCC, 2007b; NOAA, 2010)。2001 年から 2005 年間の地球の平均気温は 1850 年から 1899 年間の気温と比べ、 0.76°C ($0.57\sim 0.95^{\circ}\text{C}$) 上昇し、温暖化傾向は過去 50 年で大幅に増大している (IPCC, 2007b)。この報告書ではエネルギー部門、森林開拓と火災、及び土地利用の変化に焦点を当てているが、工業、商業及び農業からの非二酸化炭素ガスの放出も地球温暖化に寄与している (IPCC, 2007b)。

長期シナリオの広範囲にわたるレビュー (Fisher et al., 2007) は、経済成長が、21 世紀における国内総生産 (GDP) の大幅な上昇をもたらし、対応するエネルギーのサービスの需要拡大に関連すると予想されている (図 1.2 の左側を参照) ことを明らかにしている。歴史的には、人類は GDP の 1 単位を生産するのに必要な一次エネルギー投入 (いわゆる一次エネルギー強度) を減らすことが可能であった。また、将来においてはさらに減少させることが期待されている (図 1.2 の右側を参照)。

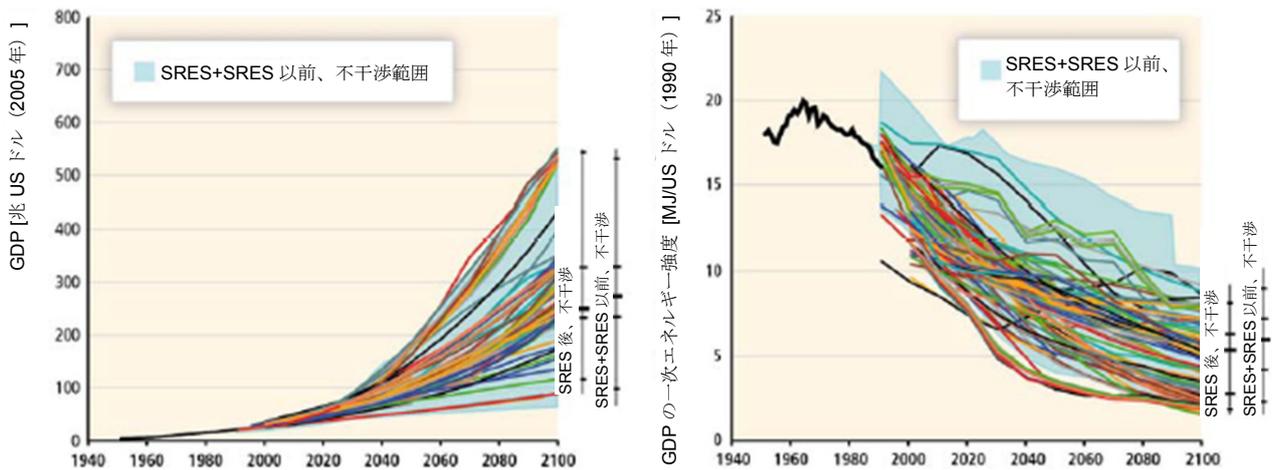


図 1.2: 左側の図：以前のシナリオにおいて使用された GDP 予測と SRES（排出シナリオについての特別報告書）後の排出シナリオにおける GDP 予測の比較。新しいシナリオの中央値は SRES 以前や SRES シナリオ文献の中央値を約 7% 下回る。右側の 2 つの縦線は 2100 年までのシナリオ分布の最小値から最大値までを示している。右側の図：GDP の一次エネルギー強度の推移。SRES シナリオ後と比較した SRES 及び SRES 以前のシナリオから得た過去の上昇と予測。Fisher et al., 2007, pp. 180 and 184 をもとに作成。

検討するシナリオにおいては、エネルギー効率の増加は予測される経済成長による補償を上回る。そのため、旧態依然なケースでは、世界の一次エネルギーに対する需要は、21 世紀に大幅に増加すると予測される（図 1.3 の左側を参照）。

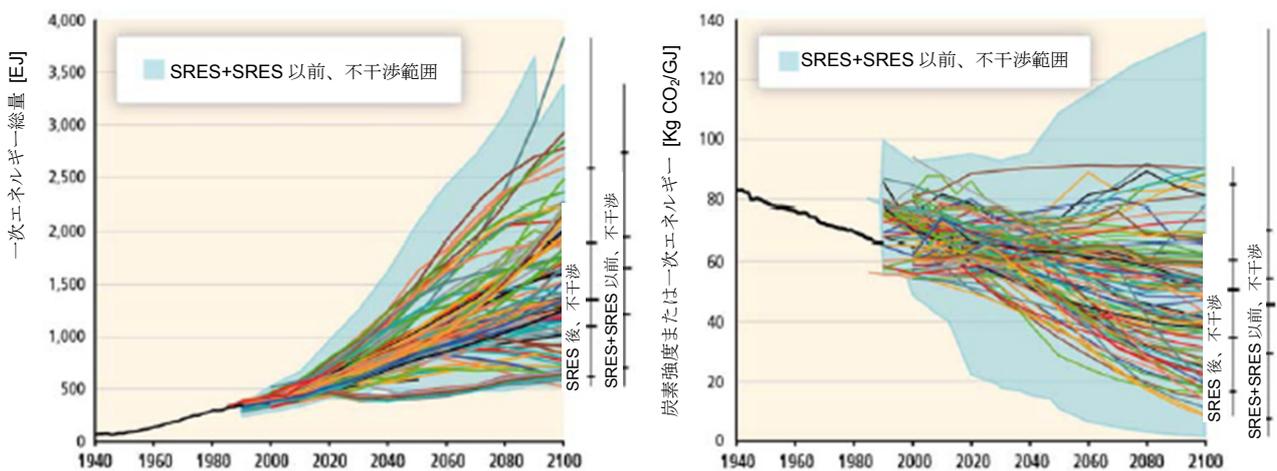


図 1.3: 左側の図：予測される一次エネルギー供給の増加。133 を超える現在の SRES 後シナリオと比較した文献中の 153 の SRES と SRES 以前のベースラインエネルギーシナリオの比較。それぞれの範囲は同程度であり、下部境界と上部境界に小さな変化がみられる。右側の図：予測される炭素強度の変化。SRES 後のシナリオと比較した、SRES 及び SRES 以前のシナリオの過去の推移と予測。Fisher et al., 2007, pp. 183 and 184 をもとに作成。

一次エネルギー強度の挙動と同様に、炭素強度（一次エネルギーの一単位当たりの二酸化炭素排出量）は、まれに例外もあるが、減少すると予測されている（図 1.3 右側の図を参照）。関連して行われる大幅な脱炭素にもかかわらず、不干涉排出予測の大多数は 2100 年において 2000 年よりも遥かに高い排出量を示している（図 1.4 左側の図のグレー部分を参照）。排出量が自然に取り除かれる量を大幅に超えるため、濃度は上昇し続け、地球の平均気温を上昇させる。図 1.4 の右図は、図 1.4 の左側の図に示されている一連の排出シナリオから得た、代表的な排出シナリオ（いわゆる SRES（排出シナリオに関する特別報告書）、IPCC (2000a)を参照）のそれぞれの変化を示している。

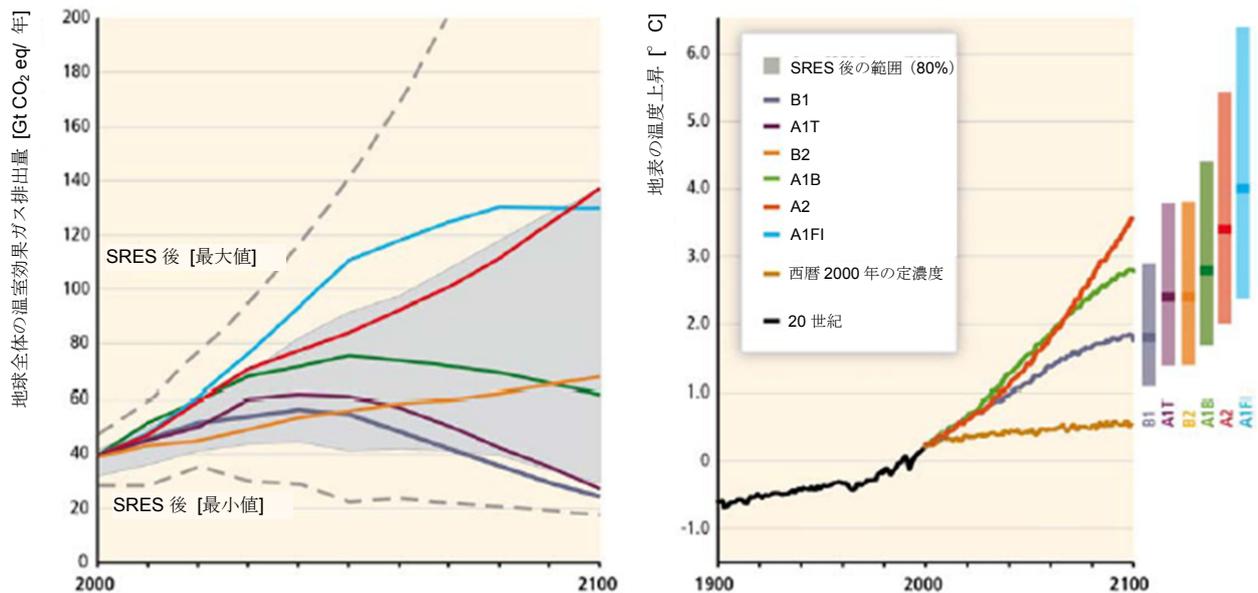


図 1.4: 左側の図: 気候政策がない場合の地球全体の温室効果ガス排出量 (Gt CO₂eq)、6つの例示 SRES 指標シナリオ (色のついた線) と SRES 以降 (SRES 後) に発表された最近のシナリオの 80 パーセント範囲 (グレー部分)。破線は SRES 後のシナリオの全範囲を示す。排出量には二酸化炭素、メタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O) 及びフッ素化ガスを含む。右側の図: 実線は、20 世紀のシミュレーションの続きを示す SRES シナリオ A2、A1B、及び B1 において予測される地表温度上昇の複数モデルにおける世界平均である。この予測は一時的な温室効果ガス及びエアロゾルの排出も考慮に入れている。茶色の線はシナリオではなく、大気中の濃度を西暦 2000 年の値に固定した場合の大気海洋大循環モデルのシミュレーションである。図の右側にある縦棒は、2090 年から 2099 年の推定最良値 (各縦棒の内側にある実線) と、6つの SRES 指標シナリオを評価する推定範囲を示す。すべての温度は 1980 年から 1999 年の期間に関係している (IPCC, 2007a, Figure SPM 5, page 7)。

新たな気候政策が存在しない場合、IPCC は (2007a、図 1.4 参照)、社会経済シナリオ (IPCC, 2000a) によると、地球の平均気温が今世紀全体で 1980 年から 1999 年の平均に比べ 1.1~6.4°C 上昇すると予測している。この不確実性の範囲は、将来排出されるであろう温室効果ガスの量についての不確実性、及び気候感度についての不確実性からくるものである。潜在的に不可逆で急激な気候システムの変化の調査に加え、IPCC は、水資源、生態系、食料安全保障、人間の健康、及び沿岸集落へのこのような気候変動 (関連する海面上昇や海洋の酸性化も含めて) の悪影響を評価した (IPCC, 2007c)。

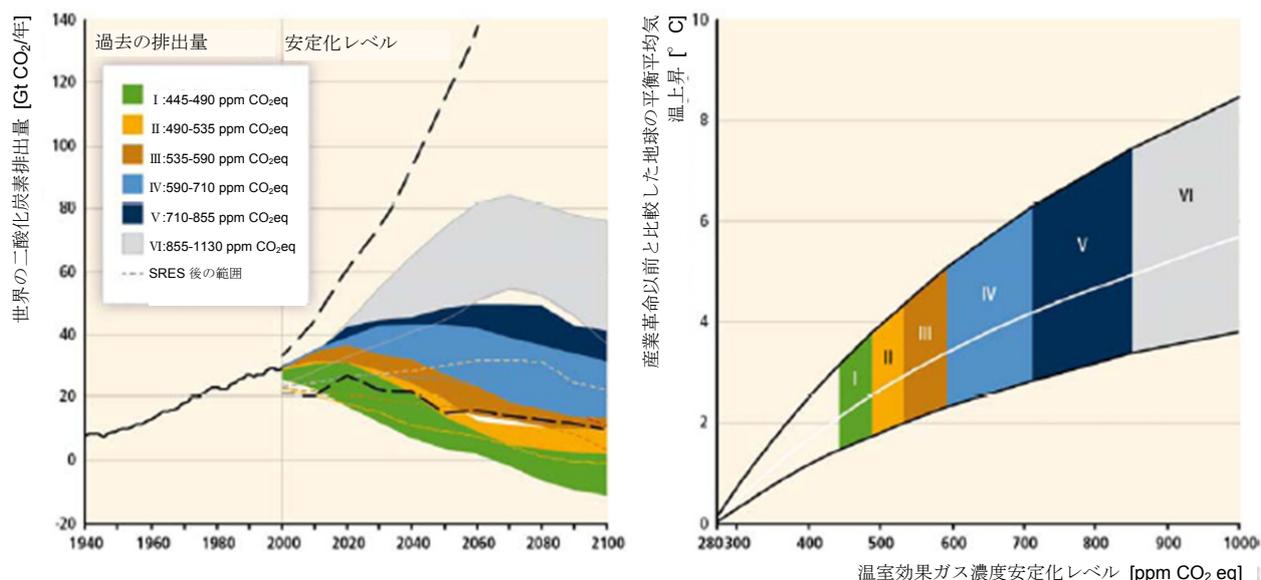


図 1.5: 世界の 1940 年から 2000 年の二酸化炭素排出量と 2000 年から 2100 年の安定化シナリオの分類ごとの排出量範囲（左図）。及び左図に対応する、安定化目標と産業革命以前と比較した地球の平衡平均気温上昇（右図）の関係。色つき部分は異なる目標に基づいてグループ化された安定化シナリオを示す（安定化分類 I から VI）。右側の図は産業革命以前を上回る地球の平均気温の変化の幅を以下を用いて示している。(1) 「最もよい評価」の気候感度は 3°C（色つき部分の中央の線）(2) 起こりうる範囲の気候感度の上限は 4.5°C（色つき部分の上部の線）(3) 起こりうる範囲の気候感度の下限は 2°C（色つき部分の下部の線）（IPCC, 2007a, Figure SPM-11, page 21）

カンクン合意（2010 年）では、地球の平均気温の上昇を産業革命以前と比べわずか 2°C までに抑えることが求められており、その目標を 1.5°C にすることも同意されている。図 1.5 の分析は平衡温度上昇を確実に 2~2.4°C に抑えるためには、大気中の温室効果ガス濃度を 445~490ppm CO₂ eq の範囲にする必要があるだろうということを示している。これは、世界的な二酸化炭素排出量を 2015 年までに削減し始め（現在の上昇を続けず）、2050 年までに 2000 年の水準から 50~80%削減する必要がある（IPCC, 2007a）。この濃度の範囲における気温の推定結果の範囲には無視出来ないものがあることに注意する。新たなシナリオ分析及び温室効果ガス濃度安定化レベルを下回る緩和コストは第 10 章にて分析を行う。本報告書は気候変動からの損害の経済的コストについて分析は行わない。

1.1.4 二酸化炭素排出の駆動要因

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、バイオエネルギーの従来の使用の大半と入れ替わり、新しいサービスが提供されるようになった。化石燃料の燃焼の急速な増加（ガスの燃料を含む）は、対応する急速な二酸化炭素排出量上昇をもたらす（図 1.6 参照）。

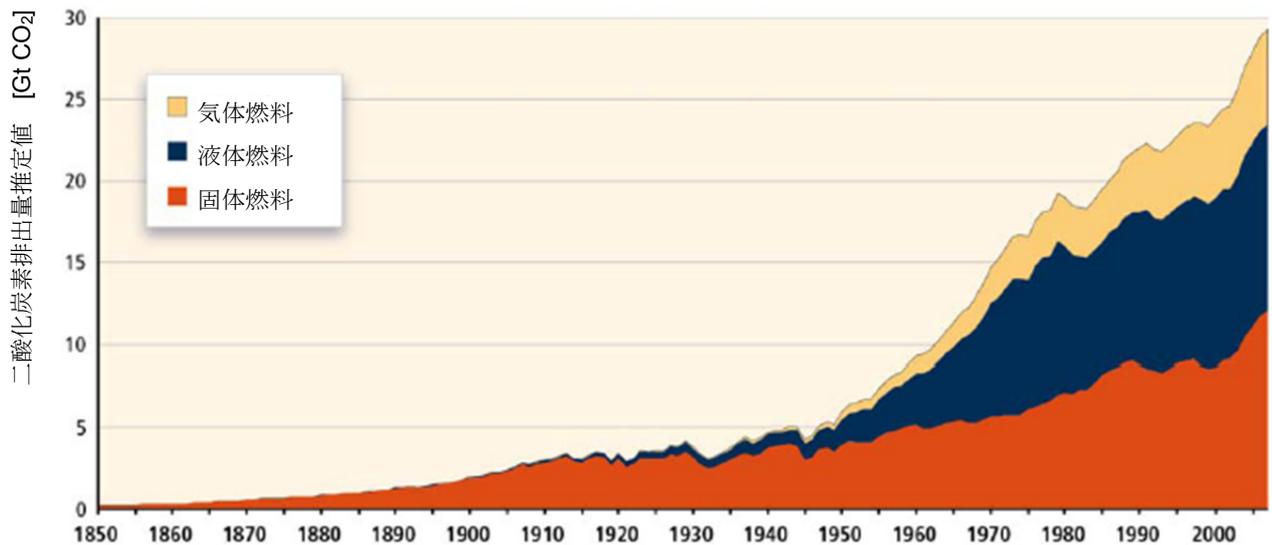


図 1.6: 1850 年から 2007 年における化石燃料の燃焼からの世界的な二酸化炭素排出量。気体燃料には天然ガスの燃焼を含む。推定排出量の単位はすべて、Gt CO₂ である。出典: Boden and Marland, 2010.

まだ燃焼されていない埋蔵化石燃料及び化石燃料資源中の炭素（非従来型の石油やガス源、及び豊富な石炭）は、将来において燃焼させた場合、大気中の二酸化炭素を増加させるポテンシャルを持っている。その二酸化炭素増加量は、図 1.5 または第 10 章で念頭に置かれているどのシナリオの範囲も超えるだろう (Moomaw et al., 2001; Knopf et al., 2010)。図 1.7 は炭素含有量の観点から見た化石燃料資源及び埋蔵化石燃料の現在の推定量についてまとめ、これらを二酸化炭素として大気中に既に放出した量と比較している。埋蔵とは、今日の技術を用いて現在のエネルギー一価格にて抽出出来ることを意味する。資源とは、それを抽出する技術的または経済的な実現可能性を問わず、使用可能な推定総量を示す (IEA, 2005)。

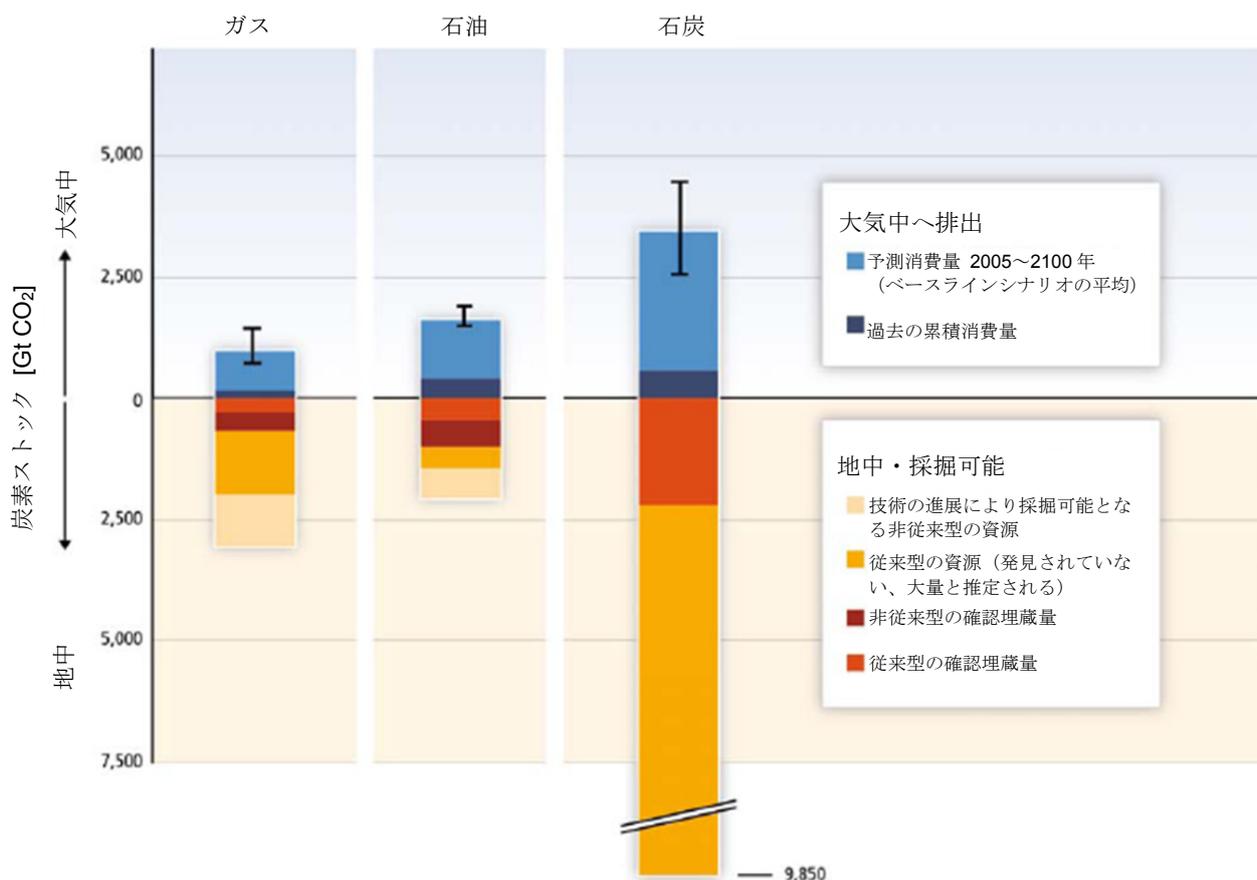


図 1.7：大気中に放出された二酸化炭素（正の値）及び地中の化石燃料から採掘可能な炭素ストック（負の値、二酸化炭素に換算）。地中の炭素ストックの推定値は IPCC（2000a, Table 3-5）より取得した。炭素ストック残量の推定値は BGR（2009）より、過去の累積炭素消費量（1750～2004 年）は Boden et al.（2009）より、将来の推定消費量（2005～2100 年）はエネルギー経済のベースラインシナリオの平均及び第 10 章（表 10.1）の分析にて考慮されている総合評価モデルより算出。これらのシナリオは 2100 年までのすべてのデータセットが使用可能な場合にのみ考慮される（すなわち、12 のモデルからの 24 のシナリオ）。積み重ね棒グラフの淡い青の部分はベースライン予測の平均を、黒いエラーバーは標準偏差を示す。化石エネルギーストックは、IPCC（2006）からの排出要因を用いて、二酸化炭素排出量に換算される。Knopf et al.（2010）をもとに作成。

二酸化炭素排出量削減に向けた戦略の立案において、茅恒等式を用いると、エネルギー関連の二酸化炭素排出量を 4 つの要素に分解することが出来る。その 4 つの要素は、1) 人口、2) 一人当たり国内総生産（GDP）、3) エネルギー強度（すなわち GDP 当たりの総一次エネルギー供給量（TPES））、及び 4) 炭素強度（すなわち TPES 当たりの二酸化炭素排出量）である、（Ehrlich and Holdren, 1971; Kaya, 1990）。

茅恒等式は以下のとおりである。

$$\text{二酸化炭素排出量} = \text{人口} \times (\text{GDP}/\text{人口}) \times (\text{TPES}/\text{GDP}) \times (\text{CO}_2/\text{TPES})$$

これは次のように書かれる時もある。

$$\text{二酸化炭素排出量} = \text{人口} \times \text{豊かさ} \times \text{エネルギー強度} \times \text{炭素強度}$$

再生可能エネルギー供給源は、一般にエネルギー出力 1 単位当たりの排出量が化石燃料の 1 から 10% であり、低炭素強度であるため、二酸化炭素排出量削減に効果的である（図 1.13 及び第 10 章を参照）。また、二酸化炭素排出量の削減はエネルギーのサービスを提供するのに必要なエネルギー強度を下げることで達成可能である。これらの 2 つの戦略の役割とその相互作用についての詳細は、1.2.6 節にて説明する。

図 1.8 に茅恒等式の要素をもとにした、世界の二酸化炭素排出量の年間絶対変化（a）及び年間増加率（b）を示す（Edenhofer et al., 2010）。

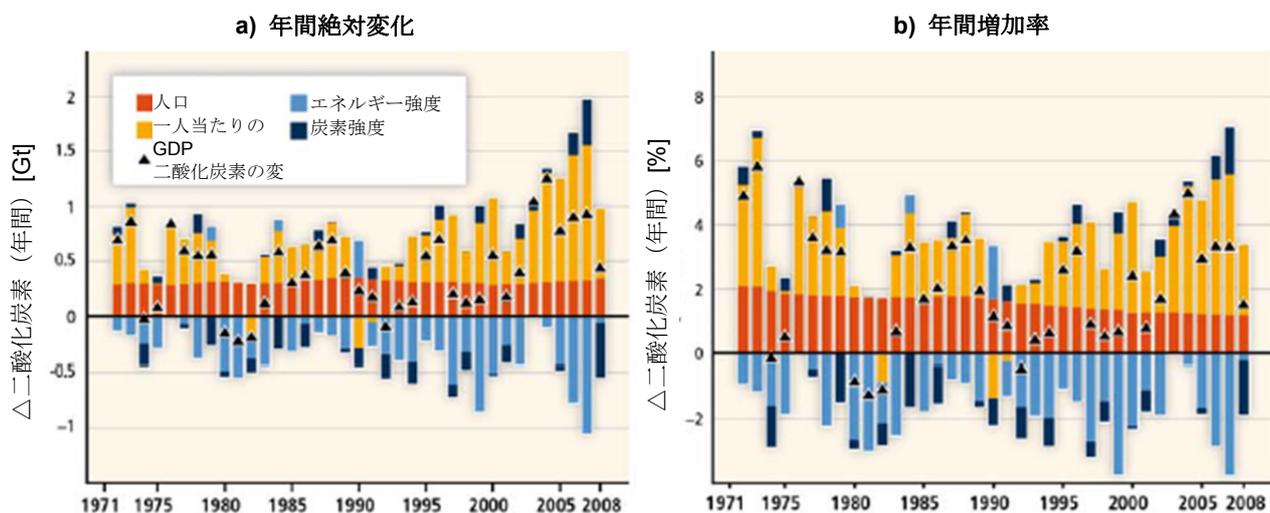


図 1.8: 1971 年から 2008 年にかけての茅恒等式の要素（人口（赤）、一人当たりの GDP（オレンジ）、エネルギー強度（ライトブルー）、及び炭素強度（ダークブルー））による世界のエネルギー関連の二酸化炭素排出の a) 年間絶対変化及び b) 年間増加率の分解。色は各要素が、他の要素が一定であった場合に起こると思われる変化を示している。黒の三角形は総年間変化を示している。出典：IEA（2010a）

以前は排出量増加に対して最も大きな影響を持っていたのは一人当たりの GDP 及び人口増加であったが、1971 年から 2008 年にかけてエネルギー強度が低下し、排出量の増加がかなり抑制された。そして、さらに遡った 1970 年代から 1980 年代にかけては、特に附属書 I 諸国によって進められたエネルギー効率の改善、石炭から天然ガスへの転換、及び原子力エネルギーの拡大によって炭素強度が低下した。しかしながら、⁵最近（2000 年から 2007 年）では、石炭及び石油の使用量が 2007 年からわずかに低下しているにもかかわらず、開発途上国及び先進国両方における石炭の使用が拡大しており、その事が炭素強度の増加の主な原因となっている。その後は、2008 年の金融危機によってこの傾向は崩れたものの、2000 年代前半以来、エネルギー供給における炭素依存度が高まってきており、その結果、再び一人当たりの GDP が成長したことによる排出量増加が加速している（Edenhofer et al., 2010）。

過去において、先進国は世界の二酸化炭素累積排出の多くに寄与しており、現在でも累積の排出総量は最も高く、一人当たりの排出量も最も多い（World Bank, 2009）。現在、発展途上国の年間排出量が全体の半分以上まで増加しており、中国は 2007 年の年間排出量において、米国を上回った（IEA, 2010f）。図 1.9 に、1971 年から 2008 年にかけての国別及び国グループ別の排出量の年間絶対変化を示す（Edenhofer et al., 2010）。

⁵ 附属書 I 国の定義については用語集（Annex I）を参照のこと。

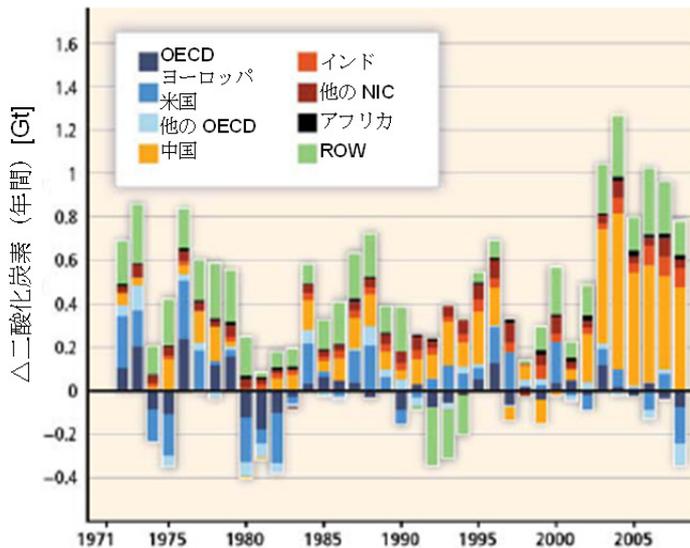


図 1.9：1971 年から 2008 年にかけての二酸化炭素排出に関する世界的な変化に対し、特定の国及び国グループが与える影響 ROW:残りの国。出典: IEA (2010a)

注: 「OECD」とは経済協力開発機構のことである。「他の新興工業国 (NIC)」にはブラジル、インドネシア、韓国、メキシコ及び南アフリカを含む。「他の OECD」には韓国及びメキシコは含まれない。「アフリカ」には南アフリカは含まれない。

1.1.5 気候変動緩和の選択肢としての再生可能エネルギー

世界的に見た場合、2008 年には再生可能エネルギーが総一次エネルギー供給量の 492EJ の 12.9%を占めていると推定されている。再生可能エネルギーの中でも最も大きな割合を占めているのがバイオマス (10.2%) で、バイオマス燃料の大部分 (約 60%) は開発途上国における伝統的な調理・暖房用途で使用されているが、近代的バイオマスの使用も急増している⁶。水力は 2.3%であり、その他の再生可能エネルギー源は 0.4%を占めている (図 1.10)。

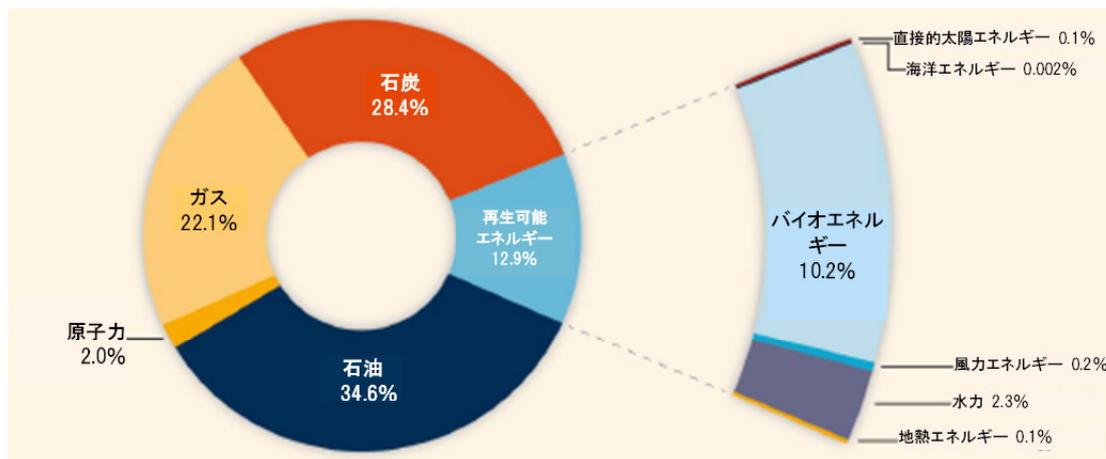


図 1.10:世界の総一次エネルギー供給量 (492EJ、2008 年) に占めるエネルギー源の割合。近代的バイオマスはバイオマスの割合全体の 38%を占める。データ出典: IEA (2010a)

注: 数字の基礎データは、一次エネルギー供給の計算の際に、直接等価法に変換されている (Annex II.4)。

再生可能エネルギーの発電への貢献を図 1.11 にまとめた。2008 年には、再生可能エネルギーは世界の電力供給の約 19%を占めている (水力 16%、その他の再生可能エネルギー3%)。世界全体の 2008 年の発電量は 20,181TWh (72.65EJ) だった (IEA, 2010a)。

⁶ インフォーマル部門で使用される追加的な伝統的バイオマスの推定値 20~40%は、本書、または公式データベースでは計上していない。

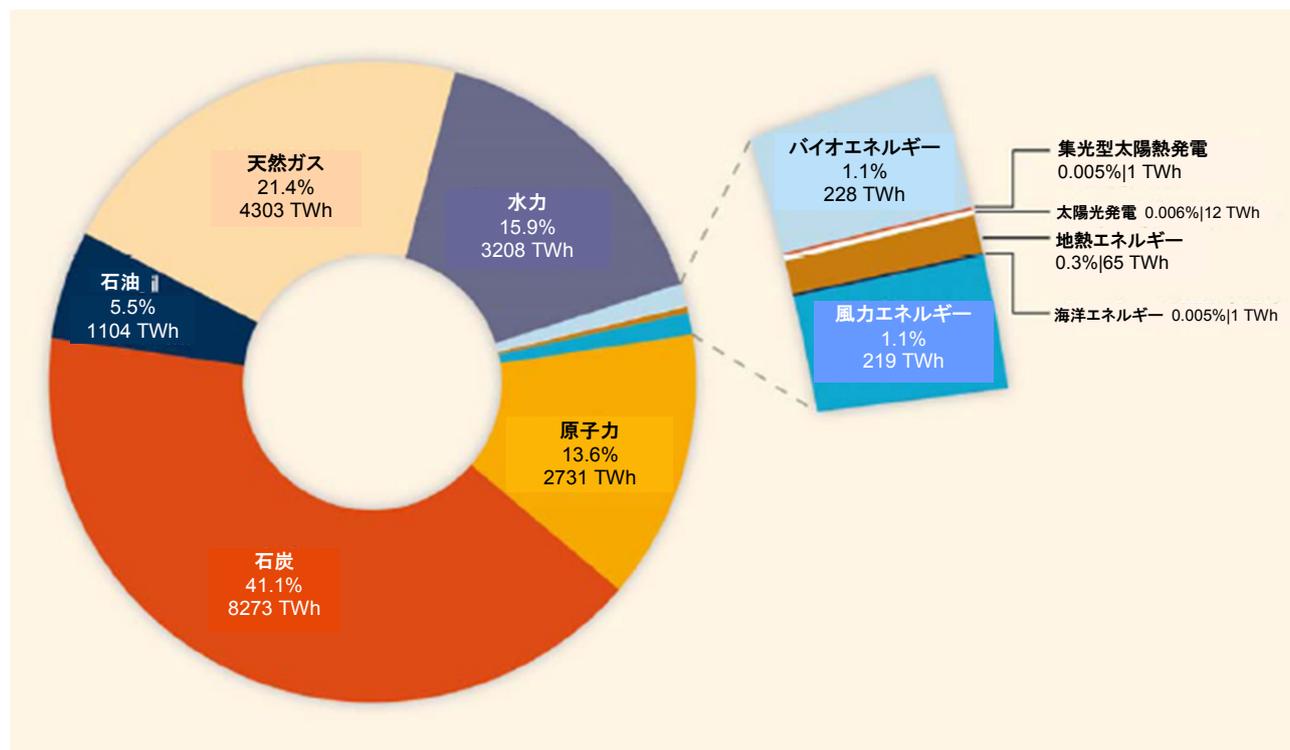


図 1.11: 世界の発電における一次エネルギー源の割合 (2008 年)。データ出典は、再生可能エネルギー源が IEA (2010a)、化石燃料と原子力が IEA (2010d) である。

近年、再生可能エネルギーの導入は急速に進んできている。ほとんどの場合、エネルギー構成における再生可能エネルギーの割合増加には、エネルギーシステムの変化を促す政策が必要とされる。政府の政策、多くの再生可能エネルギー技術のコスト低下、化石燃料の価格変化、及びその他の要素が、再生可能エネルギー使用の継続的な増加を支えてきた。再生可能エネルギーの割合はまだ比較的小さいが、図 TS.1.4 に示すように近年その増加率は大きくなってきている。2009 年には、世界的な金融危機にもかかわらず、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、発電設備容量 38GW 増加)、水力 (3%増、発電設備容量 31GW 増加)、系統連系型太陽光発電 (53%増、発電設備容量 7.5GW 増加)、地熱発電 (4%増、発電設備容量 0.4GW 増加)、太陽熱給湯・暖房 (21%増、発電設備容量 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 年には約 3%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。

2008 年から 2009 年にかけて世界規模では約 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だった。開発途上国全体で世界の再生可能エネルギー発電設備容量の 53% (あらゆる規模の水力を含む) を占め、2009 年は中国による再生可能エネルギー発電設備容量の追加が最大であった。2009 年には、アメリカとブラジルがそれぞれ世界のバイオエタノール生産の 54%と 35%を占めており、中国が太陽熱給湯でトップとなっている。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})、太陽エネルギー (180GW_{th})、地熱エネルギー (60GW_{th}) がある。へき地のエネルギーの需要に対応するため、小規模水力発電所、近代的バイオマスの様々な選択肢、家庭及び村単位の太陽光発電 (PV)、風力システムや多様な技術を組み合わせたハイブリッド・システムなど、再生可能エネルギーの使用 (伝統的バイオマスを除く) も増えている (REN21, 2010)。

国連環境計画 (UNEP) の調査では、2008 年、エネルギー全体への投資は減少したが、再生可能エネルギー発電への投資は世界で 5%増加の 1,400 億 US ドル (1,270 億 US ドル、2005 年) となり、化石燃料の発電設備容量への投資額 1,100 億 US ドル (1,000 億 US ドル、2005 年) を超えた (UNEP, 2009)。

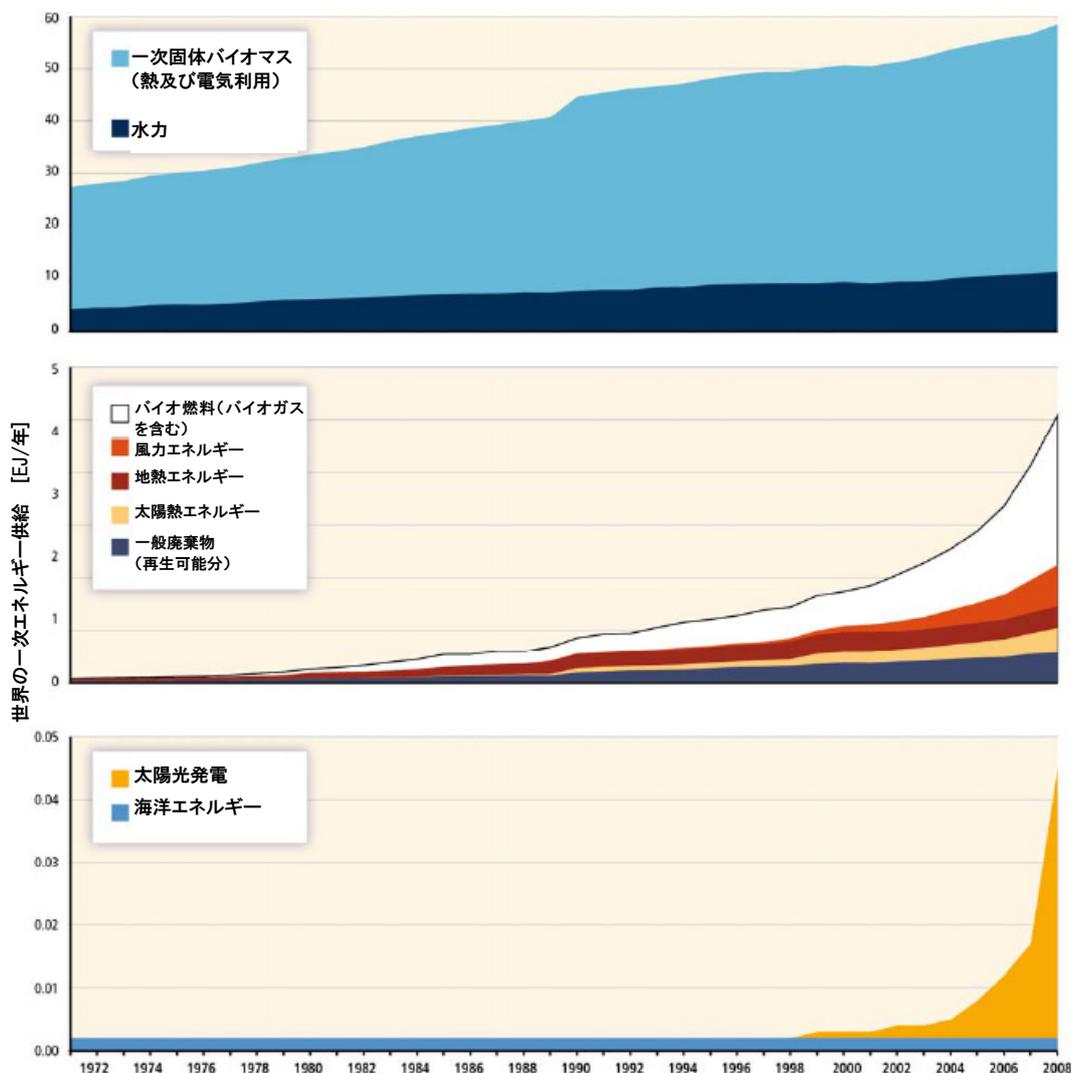


図 1.12: 世界の一次エネルギー供給における再生可能エネルギー供給量の変遷 (1971~2008 年)。データ出典: IEA (2010a)

注: データラベルの技術名には、各項目を区別する以外の目的はない。数字の基礎データは、一次エネルギー供給の計算の際に、「直接等価」法に変換されている (1.1.9 節と Annex II.4 参照)。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、多くなると見込まれる [2.3 節と 2.4 節])。

これらの成長から、今後数十年にわたり、再生可能エネルギーは先進国、開発途上国の双方でより大きな役割を果たすであろうことが示されている (Demirbas, 2009)。特に、アメリカ、中国、EU で導入された新政策が追い風となっている (第 11 章)。

図 1.13 は、化石燃料、原子力と比較した場合の、再生可能エネルギー発電技術のライフサイクル二酸化炭素強度の推定値を示す。詳細は第 9 章で論じる。再生可能エネルギー技術と原子力技術は、発電による二酸化炭素排出を $g\ CO_2/kW$ で表示する場合、化石燃料より 1~2 桁低い (Weisser, 2007; Sovacool, 2008; Jacobson, 2009)。

大半の再生可能エネルギー技術は、その大気中への二酸化炭素排出が化石燃料に比べ少ないため、気候変動の解決に有効なツールである (図 1.13 参照)。再生可能エネルギーが持続可能であるためには、枯渇してはならず、また、気候系を含む環境財・サービスの提供を損なわないようにする必要がある。たとえば、持続可能な再生可能エネルギーを実現するには、バイオ燃料生産が二酸化炭素排出量の純増につながるべきではないし、食糧安全保障に悪影響を与えるべきではない。水や化学物質を過剰に使用するべきでも、生物多様性を脅かすべきでもない。エネルギーが持続可能であるためには、長期的に経済的に使用しやすい価格 (economically affordable) であることも不可欠であるし、社会的ニーズへの対応、現在と将来の社会的規範への適合も必須である。実際、再生可能エネルギー使用の加速に伴い、持続可能な開発の持つ複数の面で均衡を図る必要が出てくる。持続可能性のすべての側面が確実に満たされるには、各エネルギー源のライフサイクル全体を評価することが重要である (1.4.1.4 節と 9.3.4 節)。

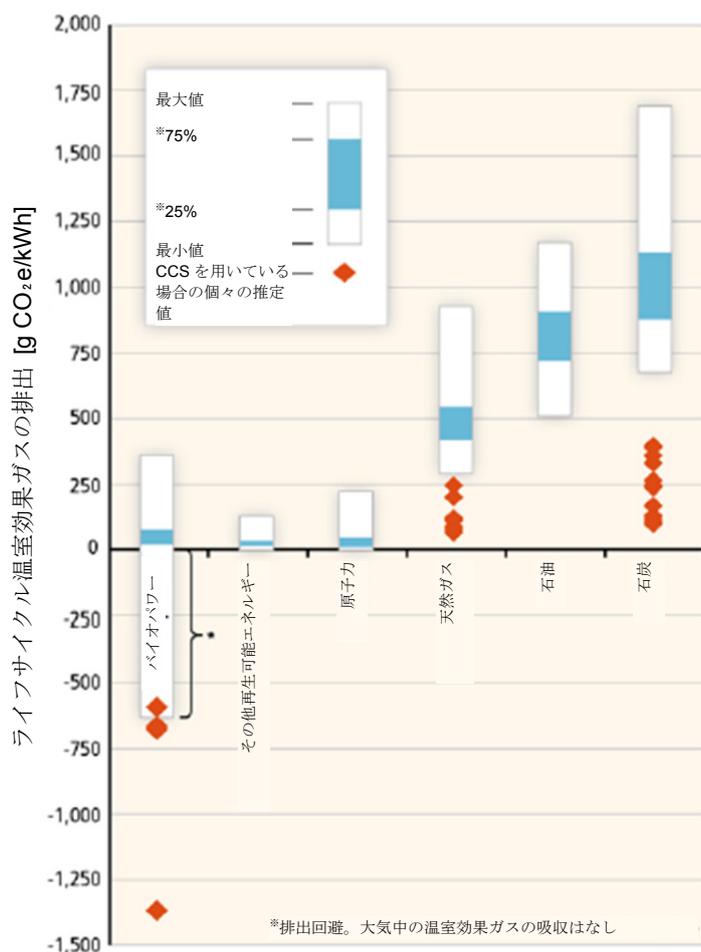


図 1.13: 再生可能エネルギー、原子力、化石燃料のライフサイクル温室効果ガス排出量（第 9 章、図 9.8）。

1.1.6 緩和の選択肢

要求されるエネルギーのサービスを提供しながら、エネルギーシステムからの温室効果ガス排出量を下げる手段はいくつか存在する (Pacala and Socolow, 2004; IPCC, 2007d)。エネルギーのサービスとは、エネルギーを使用して実行される仕事である。排出削減には、多くの選択肢や組み合わせが可能である。このため、世界的な気候変動緩和に再生可能エネルギーが果たし得る貢献を評価するために、競合する緩和の選択肢も同様に検討する必要がある (第 10 章)。

AR4 では、要求されるエネルギーのサービスを提供しながらエネルギー源からの温暖化につながるガス排出量を低下させる方法を複数定義している。これらには、以下のものがある。

- ・ コージェネレーション利用を含めたエネルギー変換・輸送・配給の供給サイドの効率の改善
- ・ 各部門及び利用方法（建築物、製造・農業過程、輸送、暖房、冷房、照明など）における需要サイドの効率改善 (Weizsäcker et al., 2009 も参照)
- ・ 石炭、石油などの高温室効果ガスエネルギーキャリアから、天然ガス、核燃料、再生可能エネルギー源などの低温室効果ガスエネルギーキャリアへの転換 (第 2～7 章)
- ・ 燃焼または製造過程に伴う、二酸化炭素を大気中に拡散させない二酸化炭素回収・貯留 (CCS) の利用。二酸化炭素回収・貯留によって、燃焼や発酵を経てバイオマスを加工する際などに二酸化炭素を大気から隔離出来る可能性がある (IPCC, 2005 も参照)
- ・ より効率の良いエネルギー利用、または炭素・エネルギー依存のより少ない製品及びサービスを利用するような行動の変更 (Dietz et al., 2009 も参照)

温室効果ガス削減には、さらに 2 つの意味がある。具体的には、森林、土壌、草地のシンク能力強化による大気中

の二酸化炭素吸収 (IPCC, 2000b) と、ディーゼルエンジン、バイオマス燃料や焼畑から排出されるブラックカーボンエアロゾルや微粒子の削減である (Bond and Sun, 2005)。二酸化炭素以外の温室効果ガス排出 (メタン、一酸化二窒素、ヒドロフルオロカーボン、六フッ化硫黄) をさらに削減すれば、地球温暖化の緩和につながる可能性がある (Moomaw et al., 2001 とその Appendix; Sims et al., 2007)。

気候変動のその他の側面に対応するため、地球工学的な解決策が提案されている。たとえば、地表面アルベド (反射率) 増加による地球の熱収支の改変、高緯度のミラーや大気エアロゾルによる入射した太陽放射の反射などである。鉄分による海洋肥沃化 (ocean fertilization) を通じた大気中の二酸化炭素の吸収強化も、提案、実験されている (Robock et al., 2009; Royal Society, 2009)。

地球温暖化の規模を低減し得る手段の組み合わせは複数存在する。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、すべての付随するリスク、コスト、及び持続可能な開発への貢献の評価が必要となる。本報告書では、化石燃料を低炭素の再生可能エネルギーで代替することによる温室効果ガス削減に注目するとともに、再生可能エネルギーと世界的な気候変動に対応するその他の選択肢との競合も検証している (図 1.14 参照)。

世界平均気温の変化を許容可能範囲内に抑えることを考慮して気候保護目標を設定することによって、長期的な付随する大気中の二酸化炭素濃度と排出枠の限度が (想定する気候感度に応じて) 概ね定まる (図 1.5 の右側参照) (Meinshausen et al., 2009)。この排出枠は、広い意味では時間依存の排出経路内とも考えられ、上限または (残存時間の柔軟性が考慮される場合) 付随する許容可能な排出の経路 (図 1.5 の左側参照) として機能する。土地利用変化と土地被覆変化による二酸化炭素排出予測を差し引く場合、許容可能な二酸化炭素排出が制約される。これは、二酸化炭素排出量の多い化石燃料 (二酸化炭素回収技術を用いない石炭、石油、ガスの燃焼) で実現され得る。

付随する化石燃料供給は、一次エネルギー供給総量の一部である (図 1.14 参照)。一次エネルギー総供給量の残りは、再生可能エネルギー、原子力、二酸化炭素回収・貯留を組み合わせた化石燃料の燃焼など、ゼロ・低炭素のエネルギー技術で供給される (Clarke et al., 2009)。

排出量の多い化石燃料の許容可能量は主に、気候保護の目標で定まり、ゼロ・低炭素エネルギーの一次エネルギー供給への補完的寄与は要求されるエネルギーのサービスの「規模」とこれらのサービスが提供可能な全体的な効率によって影響を受ける。

図 1.2 の右側が明確に示すように、エネルギー強度はすでに政府不干涉シナリオで大幅に低下すると予測される。技術向上と構造的変化により、他の方法による見込みに比べ、排出量はかなり減少すると予想される。全体的なエネルギー効率を向上させる低コストの選択肢は、その多くがすでに政府不干涉シナリオの一部に取り込まれている (Fisher et al., 2007)。そうした状況のなか、気候変動緩和のためにエネルギー強度を低下させる その他の 機会に限られている (Bruckner et al., 2010)。世界の気温変化を 2°C 以下で安定化させるといった意欲的な気候保護の目標を達成するためには、エネルギー効率の改善だけでは不十分であり、ゼロ・低炭素技術が追加が必要となる。

第 10 章では、100 以上のエネルギー需給シナリオについて包括的評価を行い、温室効果ガス削減により気候変動を緩和する再生可能エネルギーの選択肢のコストと便益を評価している。これらの低炭素技術のポートフォリオ内における再生可能エネルギーの寄与は、これらの技術間の経済的競争 (第 10 章)、付随する (気候変動の範囲を超えた) 相対的な環境負荷に加え、安定的なエネルギー供給及び社会的側面にも大きく依存している (図 1.14)。しかしながら、本報告書で検証されたシナリオでは、気候変動の緩和に後押しがない場合であっても、エネルギーのサービスへの需要増加により、再生可能エネルギーは現在のエネルギー使用を超えた水準に達することが見込まれている。経済成長、人口増加、より効率の良い技術の開発と普及、再生可能エネルギーの初期コストの障壁、選好、環境上の配慮、その他障壁を克服する能力についての予測に、大きな不確実性が伴う。

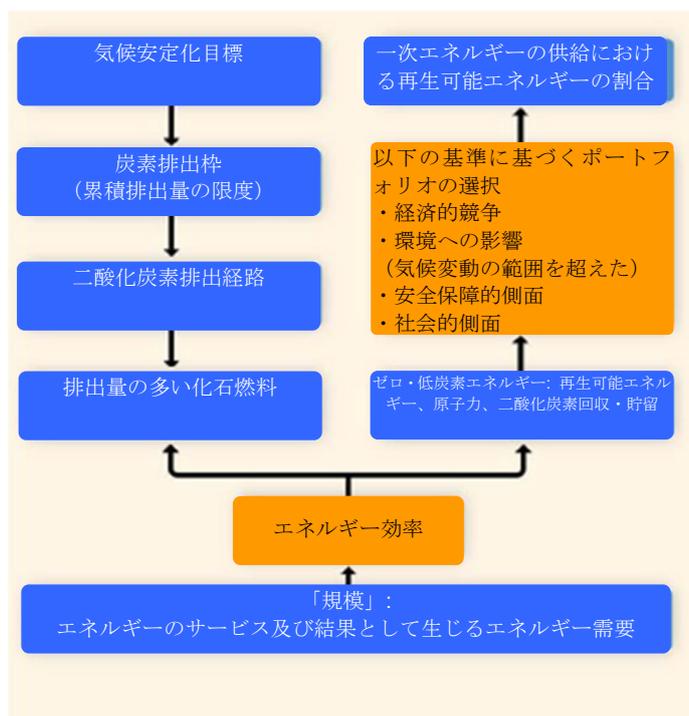


図 1.14: ゼロ又は低炭素緩和オプションのポートフォリオにおける再生可能エネルギーの役割 (定性的記述)

1.1.7 再生可能エネルギーに関する国際政策の傾向

再生可能エネルギーに関する国際的な議論は、1970年代の燃料危機を機に始まった。このとき、多くの国が代替的なエネルギー源を模索しだした。これ以降、再生可能エネルギーは環境と開発に関する国際連合の議題として、様々な取り組みや活動を通じて、顕著に取り上げられている (WIREC, 2008; Hirschl, 2009)。

1981年の再生可能エネルギー国連会議で、ナイロビ行動計画 (Nairobi Programme of Action) が採択された。持続可能なエネルギーと大気保護を通じた持続可能な開発の実行を目的とした1992年の環境と開発に関する国連会議、アクションプランは、2002年の持続可能な開発に関する世界首脳会議で強化されている。この場では、複数の再生可能エネルギー・パートナーシップが調印された。2001年の持続可能な開発会議 (CSD, 2001) では、「持続可能な開発に関するエネルギー」で再生可能エネルギーの重要性が強調された。再生可能エネルギーに関する主要な会合は、ボン (2004年)、北京 (2005年)、ワシントンDC (2008年) で開催された。

IEAは、OECD諸国がエネルギー上の課題について論じるフォーラムを開催し、再生可能エネルギーを含むあらゆる形態のエネルギーに関する年間報告書を作成している。IEAはまた、一次エネルギー源、エネルギー効率化、二酸化炭素排出を様々な組み合わせで活用する選択的未來についても、シナリオを準備している。非政府組織のREN21は、産業界や公的部門の報告書に基づき、再生可能エネルギー源の直近のデータを編纂している。2009年には、新たな国際組織として国際再生可能エネルギー機関 (IRENA) が設立され、署名国は149か国、加盟国は57か国となっている。⁷

1.1.8 再生可能エネルギーに関する知見の進歩

再生可能エネルギーや温室効果ガス緩和目標の達成に向けた、再生可能エネルギー寄与の可能性についての科学的知識は、本報告書でまとめ評価したように膨大である。それでもなお、再生可能エネルギーの地域依存的性質、再生可能エネルギー技術の多様性、その技術が供給しうる多用途のエネルギーサービス需要、統合を司る市場と規制、及びエネルギーシステムの転換の複雑性も手伝って、再生可能エネルギーやその気候緩和ポテンシャルに関する知識は、進歩し続けている。今後も、再生可能エネルギー及び温室効果ガス排出量削減において再生可能エネルギーが果たしうる役割に関係する多くの分野においては、新たな知識が得られるだろう。

本報告書でまとめたように、これらの各分野においてかなりの知識がすでに蓄積されている。さらなる研究及び経験により不確かさはさらに減少し、ひいては気候変動の緩和における再生可能エネルギーの使用、それに関する政策の意思決定に役立つだろう。

⁷ www.irena.org/参照

包括的とまでは言えないが、現在及び将来に知見の進歩が見込まれる分野を広く選択し、表 1.1 にまとめた。

表 1.1: 知見の進歩が将来的に見込まれる分野一覧

再生可能エネルギー導入の将来的なコストとタイミング	<ul style="list-style-type: none"> ・多様な地域で新たな非電力の再生可能エネルギー技術を導入するコスト ・研究開発 (R&D) が牽引する進歩と普及を視野に入れた学習における、将来のコスト低下 (不確実性を考慮) ・従来型のエネルギー技術と低炭素のエネルギー技術の競合コスト ・大規模なエネルギーモデルにおいて、変動性があり場所に依存する再生可能エネルギーを分析する能力。これには、持続可能な開発とエネルギーアクセスへの再生可能エネルギーの貢献も含まれる。 ・世界、地域レベルにおける再生可能エネルギーの導入ポテンシャルの追加評価 ・シナリオの比較演習を通じた技術特有の緩和ポテンシャルの分析 (不確実性を考慮) ・政策、障壁、促進的環境が導入量とタイミングに与える影響
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	<ul style="list-style-type: none"> ・地域的な再生可能エネルギー源の評価 ・新たな技術と再生可能エネルギー非電力技術の資源アセスメントの改善 ・気候変動が再生可能エネルギーの技術的利用可能量に与える将来的な影響 ・再生可能エネルギー技術、その他の人間の活動やニーズ間に見られる再生可能エネルギー源の競合 (バイオマスなど) ・エネルギー需要の場所 (人口密集地) と再生可能エネルギー源の場所の比較
様々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	<ul style="list-style-type: none"> ・普及レベルの高い再生可能エネルギーを統合する際の技術、制度上の短・長期的な解決策とコストの比較評価 ・変動性のある再生可能エネルギーを OECD の市場とは異なる電力市場に統合する際の、特有の技術、制度上の課題 (風力以外の再生可能エネルギー)、石炭プラントと原子力プラント稼働の課題とコスト ・エネルギー市場への統合のために、複数の再生可能エネルギー源を組み合わせる便益とコスト ・再生可能エネルギーを熱・輸送ネットワークに統合する際の制度的、技術的な障壁 ・エネルギーシステムの潜在的な将来の変更が統合上の課題とコストに与える影響 (集中化・分散化の進展、需要反応の程度、電力部門、現在は別々の熱部門と輸送部門の統合の水準)
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	<ul style="list-style-type: none"> ・一定の再生可能エネルギー技術のライフサイクルの炭素純排出量 (バイオエネルギーの一部の形態、水力など) ・生態系と環境に対する地域的影響の評価 ・人間活動と福祉に対する地域的影響の評価 ・様々な地理的スケールと時間スケールにまたがる幅広い正負の影響の均衡化 ・負の影響を効果的に最小化し管理する政策、正の便益を実現する政策 ・地域のコミュニティにおける社会受容性に関する懸念に対応するための理解と方法
持続可能な再生可能エネルギーのサービスにより開発途上国のニーズに応える機会	<ul style="list-style-type: none"> ・再生可能エネルギーの普及が持続可能な開発の複数の指標に与える影響 ・開発途上国における再生可能エネルギー源の地域的評価 ・分散的な形態の再生可能エネルギーでエネルギーアクセスを改善する利点と限界 ・再生可能エネルギーの効率的使用を実現するための地域の人的資源のニーズ ・手頃な価格を実現するための財政的メカニズムと投資ツール ・効果的な能力育成、技術と知見の移転
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	<ul style="list-style-type: none"> ・様々な国で多様な再生可能エネルギー技術を最も効率よく効果的に普及させる政策の組み合わせ ・再生可能エネルギーへの投資の大幅増加を推進しつつ、公平性の懸念に対応する方法 ・再生可能エネルギーの普及による潜在的な相乗便益 (安全保障、公平性、環境的な便益など) を最大化させるような政策の形成方法 ・再生可能エネルギー特有の政策と炭素価格政策の相乗効果を活用するため、両方の政策の設計とタイミングのバランスの最適化 ・現在のエネルギー技術が持つ固有の利点を克服する最も効果的な方法の発見。これには、再生可能エネルギー技術をロックアウトする規制や基準、再生可能エネルギーをエネルギーシステムに浸透させるために変化が必要な事柄も含まれる。

1.1.9 メトリクス及び定義

用語集を Annex I、慣例、転換要素、方法論を Annex II、再生可能エネルギー技術のコスト一覧を Annex III にそれぞれ掲載した。

すべての低炭素源を一般的に比較するには、一次エネルギーは IEA が推奨する物理体積法ではなく直接等価法に従って測定する。どちらの方法もすべての燃焼型の技術を同一に扱う。しかし、直接等価法は、原子力と地熱エネルギーの場合、一次エネルギーとして生産された電力または熱エネルギーのみを考慮するが、物理体積法は放出された熱の全量を考慮する。2つの方法の違いをより詳細に説明した Box 1.1 と Annex II を参照のこと。

Box 1.1: エネルギーと排出シナリオに関する様々な一次エネルギーの計算基準の示唆

燃焼型のエネルギー源から得られる一次エネルギーは、空気中で燃焼時に放出される熱と定義される。Annex II (A.II.4) と表 1.A.1 で説明したように、非燃焼型再生可能エネルギー源（原子力など）とすべての再生可能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（ただし、バイオエネルギーを除く）。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、非燃焼型エネルギー源から得られた二次エネルギーの一単位を一次エネルギーの一単位として計算することで、すべての非燃焼型再生可能エネルギーを同一の方法で処理する。つまり、1kWh の電力または熱は、3.6MJ の一次エネルギーとして計算される。出力として得られた二次エネルギーの種類によっては、非燃焼型再生可能エネルギーと原子力のエネルギー量は、バイオエネルギーや化石燃料と比較して、大まかにいって 3 分の 1 から 1.2 分の 1、少なく評価される（化石燃料を電力と熱に転換する場合の転換効率をそれぞれ 38%、85%とする場合）。特定の気候安定化シナリオに基づき、他の 2 つの定評ある方法（物理体積法と代替法）と直接等価法を比較し、直接等価法を適用する場合の示唆を図 1.15 と表 1.2 にまとめた。このシナリオは Loulou et al. (2009) が作成したもので、SRREN では 1B3.7MAX と表記される。京都議定書の二酸化炭素濃度 (CO₂eq) は 2100 年までに 550ppm に達する。

3つの計算方法を現在のエネルギー消費に適用した場合、その差異は限定的である。しかしながら、再生可能エネルギーの割合が高くなる長期的シナリオにこれらを適用すると、大きな差異が生ずる。このシナリオの場合、計算結果の差は時間の経過とともに大きくなり、2100年までに 370EJ に達する。2050年までの個々の非燃焼型エネルギー源の割合にも大きな差異が見られ、3つの計算方法の間で、再生可能エネルギーの総一次エネルギー供給量の割合は 24~37%とばらつく。最も大きな絶対差が生ずるエネルギー源は地熱エネルギーで、直接等価法と物理体積法で約 200EJ の差が出る。水力と原子力の差もかなり大きい。これらの様々なアプローチの詳細は、Annex II を参照のこと。

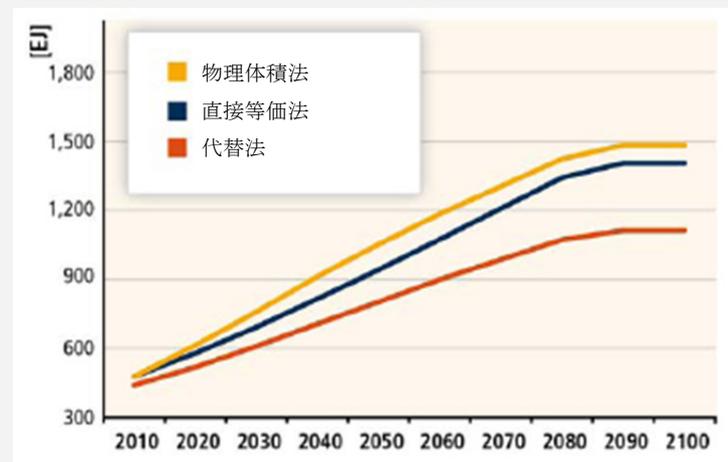


図 1.15: 様々な一次エネルギー計算法を用いた場合の、2010~2100 年における世界の総一次エネルギー供給量の比較 (550ppm CO₂eq の安定化シナリオに基づく)

表 1.2: 様々な一次エネルギー計算法を用いた場合の、2050 年における世界の総一次エネルギー供給量の比較 (550ppm CO₂eq の安定化シナリオに基づく)

	物理体積法		直接等価法		代替法	
	EJ	%	EJ	%	EJ	%
化石燃料	586.56	55.24	581.56	72.47	581.56	61.71
原子力	81.10	7.70	26.76	3.34	70.43	7.47

再生可能エネルギー	390.08	37.05	194.15	24.19	290.37	30.81
バイオエネルギー	119.99	11.40	119.99	14.95	119.99	12.73
太陽	23.54	2.24	22.04	2.75	35.32	3.75
地熱	217.31	20.64	22.88	2.85	58.12	6.17
水力	23.79	2.26	23.79	2.96	62.61	6.64
海洋	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
風力	5.45	0.52	5.45	0.68	14.33	1.52
合計	1,052.75	100.00	802.47	100.00	942.36	100.00

1.2 再生可能エネルギー資源の概要

1.2.1 再生可能エネルギーの定義、変換、及び用途

再生可能エネルギーとは、使用の速度と同じ、またはそれを超える速度で自然過程により補給される、太陽光や地球物理学的・生物学的資源から作られる、あらゆる形態のエネルギーである。再生可能エネルギーは、自然環境で発生する連続的または反復的なエネルギー・フローから得られるものであり、バイオマス、太陽エネルギー、地熱、水力、潮流、波力、海洋温度差エネルギー、及び風力エネルギーなどが挙げられる。しかしながら、バイオマスの成長を上回る率でバイオマスを利用し、熱フローが熱を補給するより速いペースで地熱地帯から熱を取り出すことも可能である。一方で、直接的太陽エネルギーの使用率は、太陽エネルギーが地球に到達する率とまったく関係がない。化石燃料（石炭、石油、天然ガス）は、使用速度に対して短い時間枠内に補給されないため、この定義にあてはまらない。

一次エネルギーがエネルギーキャリアに変換された後、エネルギーのサービスに変換される複数の段階のプロセスがある。再生可能エネルギー技術は多種多様であり、幅広いエネルギーのサービスのニーズに応えることが出来る。様々なタイプの再生可能エネルギーは、電力、熱エネルギー、機械的エネルギーを供給することができ、複数のエネルギーのサービスから求められる燃料も生成出来る（図 1.16）。

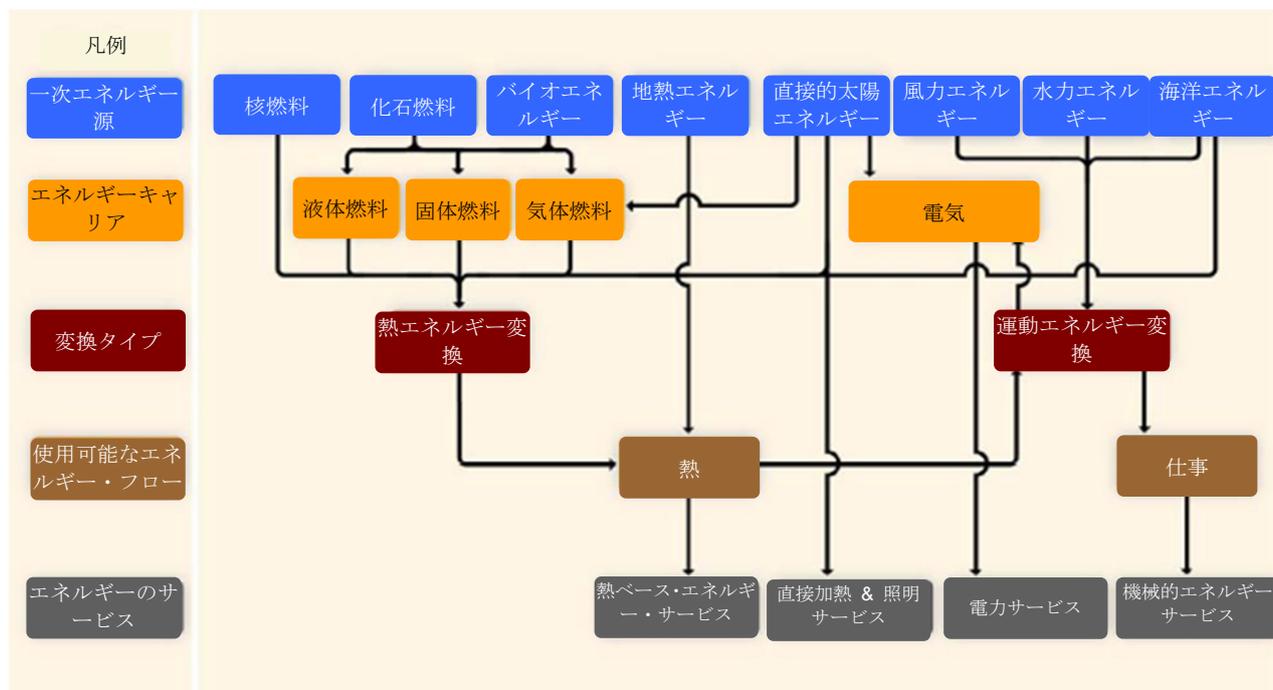


図 1.16: エネルギー源からサービスへのエネルギー経路図。つながった線はすべて有効なエネルギー経路を示している。消費者に供給されるエネルギーのサービスは、量の異なる最終用途エネルギーで提供することが出来る。つまり、エネルギーのサービスは、多かれ少なかれ複数のエネルギー源からの一次エネルギーによって、二酸化炭素排出や他の環境への影響が異なる形で提供出来る。

人々が必要としているのはエネルギーではなく、エネルギーのサービスである。そのため、この過程は二酸化炭素

排出量を最小限に抑える低炭素技術を用いて、一次エネルギーの消費をあまり必要としない効率的な方法でニーズを満たすべきである (Haas et al., 2008)。バイオマスや地熱を含む発電を行う熱転換プロセスでは、約 40~90%のエネルギーロスがあり、内燃機関を用いた輸送に必要な機械エネルギーを供給する場合は、約 80%のエネルギーロスが生じる。このような、転換ロスによって化石燃料を用いた一次エネルギーの占める割合が増え、熱から電力及び機械エネルギーを生成するために必要とされる、化石燃料を用いた一次エネルギー量が上昇する (Jacobson, 2009; LLNL, 2009; Sterner, 2009)。太陽光発電 (PV)、水力、海洋、風力エネルギーから電力への直接的エネルギー転換は、熱から仕事への熱力学的動力サイクルのエネルギーロスがない。ただし、ロスが比較的大きく、減らすことができない自然のエネルギー・フローからエネルギーを取り出す際には、その他の転換の非効率さを実感する (第 2 章~第 7 章)。時間をかけて発電する低炭素源とよりよく比較するために、本報告書は、直接等価法を採用した。その評価方法によれば、あらゆる非燃焼源の一次エネルギーは、たとえば風力エネルギー、地熱、ウラン燃料、太陽放射に代わる電力などの二次エネルギーの 1 単位と定義される (Macknick, 2009; Nakicenovic et al., 1998)。よってエネルギー源から電力への転換時に生じるエネルギーロスは、これらの非燃焼源を用いた一次エネルギーの総量には計算されない (Annex II, A.II.4)。よって、これらのエネルギー源からの 1 単位の電力またはその他の仕事量を生成する一次エネルギーの必要量は、一般に化石燃料またはバイオマス燃焼プロセスに要するよりも少ない。

へき地及び都市環境において、分散的にその使用場所を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。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のものもある。表 1.3 で示された再生可能エネルギー技術と用途の概要に、主な再生可能な一次エネルギー源と技術、その発展状況、及び典型的または主な配給方法 (必要とされる集中的ネットワークや系統、または地方の分散した独立型供給) の簡単な一覧が記載されている。その一覧は包括的なものとは考えられてはいない。たとえば、家畜及び木質バイオマスからエネルギーを得ることによって、多くの耕作において、輸送及び農業に重要なエネルギーのサービスが提供されるが、本報告書ではそれらについては考慮されていない。この表は、技術の章の各章で得られた情報と研究結果から構成されている。

表 1.3: 再生可能エネルギー技術と用途の概要 (第 2~7 章)

再生可能エネルギー源	再生可能エネルギー技術の選択	一次エネルギー部門 (電気、熱、機械的、輸送) ¹	技術成熟度 ²				主要な供給方法 ³	
			研究開発	実証及びパイロットプロジェクト	商業化前期	商業化後期	集中的	分散的
バイオエネルギー ⁴	薪や木炭の伝統的な使用	熱				×		×
	調理用レンジ (原始的及び新型)	熱				×		×
	家庭用暖房システム (ペレット式)	熱				×		×
	小型、大型ボイラー	熱				×	×	×
	バイオガス生成のための嫌気性消化	電気・熱・輸送				×	×	×
	熱電併給 (CHP)	電気・熱				×	×	×
	化石燃料発電設備における混焼	電気				×	×	
	燃焼型発電所	電気				×	×	×
	ガス化発電所	電気			×		×	×
	砂糖、デンプン由来の穀物エタノール	輸送				×	×	
	植物、種子油由来のバイオディーゼル	輸送				×	×	
	リグノセルロース砂糖系バイオ燃料	輸送		×			×	
	リグノセルロース合成ガス系バイオ燃料	輸送			×		×	
	熱分解系バイオ燃料	輸送		×			×	
水生植物由来燃料	輸送		×			×		
気体バイオ燃料	熱				×	×		
直接的太陽	太陽光発電 (PV)	電気				×	×	×
	集光型太陽光発電 (CPV)	電気			×		×	×
	集光型太陽熱発電 (CSP)	電気			×		×	×
	低温太陽熱	熱				×		×
	太陽熱冷房	熱		×				×
	パッシブソーラー建築	熱				×		×
	ソーラーッキング	熱			×			×
	ソーラー燃料	輸送	×				×	
地熱	熱水、フラッシュサイクル	電気				×	×	
	熱水、バイナリーサイクル	電気				×	×	

	地熱井涵養システム (EGS)	電気		×			×	
	海底地熱	電気	×				×	
	直接利用	熱				×	×	×
	地中熱利用ヒートポンプ (GHP)	熱				×		×
水力発電	貯水池式	電気・機械的				×	×	×
	ダム式	電気				×	×	×
	ポンプ揚水による貯水	電気				×	×	
	流体動力学タービン	電気・機械的		×			×	×
海洋エネルギー	波力	電気		×			×	
	潮汐	電気				×	×	
	潮流	電気		×			×	
	海流	電気	×				×	
	海洋温度差発電	電気・熱		×			×	
	塩分濃度差発電	電気		×			×	
風力エネルギー	陸上大型タービン	電気				×	×	
	洋上大型タービン	電気			×		×	
	分散型小型タービン	電気				×		×
	揚水・その他の機械的仕事用タービン	機械的				×		×
	風	輸送		×				×
	高高度風力発電	電気	×			×		

注:

- ここで使用されている一次エネルギー部門とは、再生可能エネルギー技術の現在または予測される主な使用に言及することを目的とする。実際には、再生可能エネルギーによって生成された燃料は、輸送だけでなく、様々なエネルギーのサービスのニーズに応えるために使用することが出来る。たとえば、電力は熱や輸送ニーズを満たすために使用することが可能である。
- 各技術カテゴリ内の成熟度レベルがもっとも高いものが表で特定されている。成熟度が低い技術も、いくつかの技術カテゴリ内に存在している。
- 「集中的」とは、ネットワークを介して最終消費者に配給されるエネルギー供給を指し、「分散的」とは、現地で生産されたエネルギー供給を指す。分類は、「主な」配給方法に基づいている。実際には、すべての技術は、状況によって、集中的及び分散的な方法で使用することが可能であることにも留意する。
- バイオエネルギー技術も二酸化炭素回収・貯蔵と併用される。ただし、二酸化炭素回収・貯蔵技術は成熟の初期段階である。

1.2.2 再生可能エネルギーの理論的ポテンシャル

再生可能エネルギーの理論的ポテンシャルは、現在の世界及び予測上の世界どちらにおいてもエネルギー需要を大きく上回る。しかし、要求されるエネルギーのサービスは、費用効率が良く、環境を破壊しない方法で提供するという課題があるため、上述のポテンシャルからの相当量の割合を回収し、使用しなければならない。再生可能エネルギーの推定される年間フラックスと化石燃料の埋蔵量との比較、492EJの2008年年間消費量が、表1.4に示されている。

表 1.4: 2008年における世界の一次エネルギー供給と比較したEJ/年の年間エネルギーフラックスとして示された再生可能エネルギーの理論ポテンシャル

再生可能エネルギー源	年間フラックス (EJ/年)	割合 (年間エネルギーフラックス/2008年一次エネルギー供給)	埋蔵総量
バイオエネルギー	1,548 ^d	3.1	----
太陽エネルギー	3,900,000 ^a	7,900	----
地熱エネルギー	1,400 ^c	2.8	----
水力発電	147 ^a	0.30	----
海洋エネルギー	7,400 ^a	15	----
風力エネルギー	6,000 ^a	12	----
年間の一次エネルギー源	2008年年間使用量 (EJ/年)	確定埋蔵量の耐用年数 (年)	埋蔵総量 (EJ)
化石燃料総量	418 ^b	112	46,700
ウラン総量	10 ^b	100-350	1,000-3,500
再生可能エネルギー総量	64 ^b	----	----
一次エネルギー供給量	492(2008) ^b	----	----

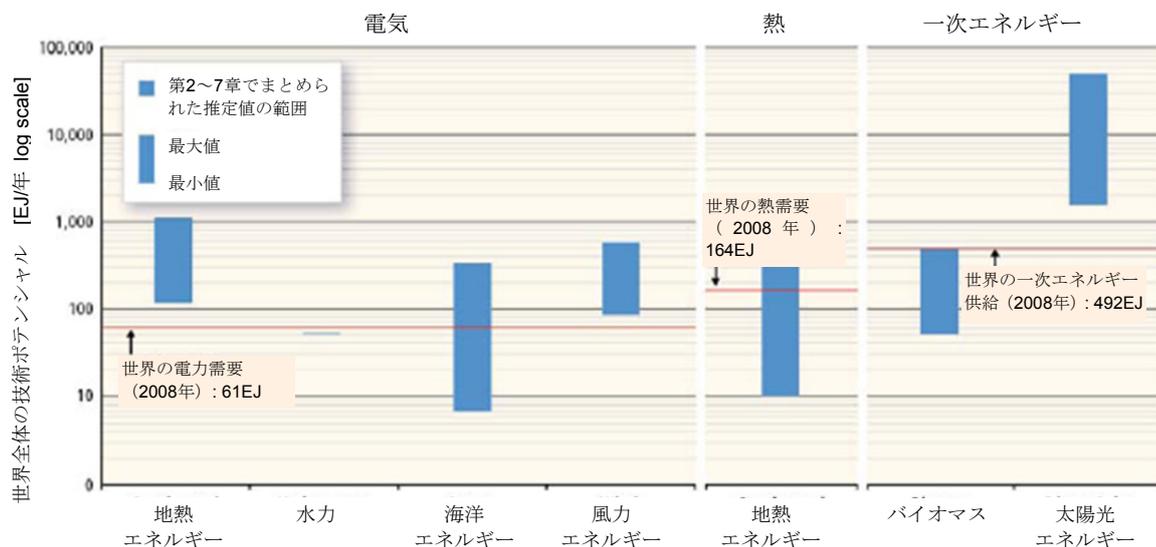
出典: ^aRogner et al. (2000)、直接等価法に転換された ^bIEA (2010c) (Annex II; IEA, 2010d)、^cPollack et al. (1993)、^dSmmets et al. (2007)

1.2.3 再生可能エネルギー技術の技術ポテンシャル

技術ポテンシャルは、実証済み及びこれから開発される可能性の高い技術や実践⁸を全面的に実施することで取得可能となる再生可能エネルギーの出力総量と定義される。本報告書の中で評価されている様々な再生可能エネルギーのタイプの技術的ポテンシャルに関する文献は、それぞれに大きく違っている(第2~7章では詳細及び参照文献が記載されている)。特に、このばらつきの要因は、様々な研究間の方法論的な違い、技術ポテンシャルの定義の違い、技術や資源獲得の手法が時間とともにどのように変わり得るかということについての執筆者間の見解の差からくる違いである。再生可能エネルギー源の世界が持っている技術的ポテンシャルは、持続的な市場の成長を制限するものではない。文献には幅広い推定値が記載されているが、再生可能エネルギーの世界的な技術的利用可能総量は、現在及び予測される将来の世界のエネルギー需要よりもかなり多いという研究結果が常に出されている。図1.17は、各章の議論に基づいた様々な再生可能エネルギーの技術ポテンシャルの範囲の概略を示している。こうした範囲は、本章の付録にある詳細な注や説明を含む表1.A.1のKrewittなど(2009年)による総合的な文献レビューと比較される⁹。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、他の再生可能エネルギー源も大きな技術的ポテンシャルを有している。用語集(Annex I)における技術ポテンシャルの定義によれば、表1.A.1で要約された研究の多くは、広範囲にわたる経済的及び社会政治的な側面もある程度考慮に入れている。たとえば、いくつかの技術に関しては、土地の持続可能性、またはその他の持続可能性要因が含まれており、結果的に技術的ポテンシャルの推定値が低くなるが、再生可能エネルギーの世界的な技術的ポテンシャルの絶対量は、総じて再生可能エネルギーの普及を抑制する可能性が低い。

⁸ 用語集(Annex I)には、この用語と経済的及び市場ポテンシャルのより包括的な定義が記載されている。

⁹ 2009年におけるLoulouなどによる技術的ポテンシャルの定義は、転換効率及びエネルギーの捕捉や移動に関連する局所的・地理的な利用可能性や技術的制約によって抑制されているという点で、ここでの定義と類似しているが同一ではない。表1.A.1の脚注を参照。



世界的な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 1.17: 第 2~7 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。バイオマスと太陽エネルギー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いる。この図は、評価データの範囲が広いので、対数尺度で表示されていることに留意する。

注: ここで報告された技術的ポテンシャルは、年間での再生可能エネルギー供給に対する世界全体の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る一方、バイオマス及び太陽エネルギー資源は、一次エネルギーの観点から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使用されるだろう。推定範囲は様々な方法に基づいて求めており、将来にも適用出来る。従って、得られた範囲は技術全体にわたって厳密に同じというわけではない。図や追加的な注記の基となったデータについては、(基となる章とあわせて)表 A.1.1 を参照のこと。

技術的ポテンシャルの推定値の不確実性を考慮したうえで、図 1.17 及び表 1.A.1 を見れば、読者は現在の世界の電力及び熱需要や世界の一次エネルギー供給を背景とした、再生可能エネルギー源の相対的な技術的ポテンシャルを理解する見通しが得られる。技術的ポテンシャルに関連した技術の進展、持続可能性、資源の利用可能性、土地利用及びその他の要因に関する側面は、いくつもの章で検証されている。技術的ポテンシャルの地域的分布については、第 10 章で取り上げる。

各エネルギーのタイプは他のタイプとは関係なく推定値が出されるため、合計を推定するために多種多様なタイプのエネルギーを必ずしもすべて加算することは出来ないことに留意する(たとえば、評価には土地利用配分は考慮されていない。また、太陽光発電(PV)と集光型太陽熱発電(CSP)は、特定の場所ではどちら対しても適切であるにもかかわらず、同じ空間では使用することが出来ない)。

理論的及び技術的ポテンシャルの議論に加えて、本報告書は、以下の点についても検討する。あらゆる社会的コストを考慮し、完全な情報であると仮定した上での再生可能エネルギー源の経済的ポテンシャル(10.6 節で取り上げる)。既存及び予測される実世界の市場状況に左右される再生可能エネルギー源の市場ポテンシャル(10.3 節で取り上げる)。市場ポテンシャルは、政策、資本の利用可能性及びその他の要因によって形作られる。この各要因については、AR4 で検討され、Annex I で定義されている。

1.2.4 統合に関する再生可能エネルギーの特色

ますます割合が増える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コスト及び課題は、システムの特徴、再生可能エネルギーの現在の割合、利用可能な再生可能エネルギー源、将来におけるシステムの進化、発展の仕方に左右される。電力、冷暖房、ガス燃料または液体燃料にかかわらず、再生可能エネルギーの統合は、ケースバイケースであり、場所に特定され、複雑である。第 8 章では、既存のエネルギーネットワークにおける、統合に特有の再生可能エネルギーの特徴について詳細に検討されている。

再生可能エネルギーは、大陸規模の大規模連系送電系統から小規模の自立建物まであらゆるタイプの電力系統に統合可能である。発電の組み合わせ、ネットワーク・インフラ、エネルギー市場設計及び制度的な規則、立地需要、需要プロファイル、制御・通信能力などのシステムの特徴は重要である。再生可能エネルギー源の場所、分布、変動、予測可能性と併せて考えると、こうした特徴が、統合課題の規模を決定する。部分的に送電可能な風力及び太陽エネルギーは、十分に送電可能な水力発電、バイオエネルギー及び地熱エネルギーよりも統合が難しい。再生可能エネルギーの普及レ

ベルが高まるにつれ、1 つには多くの再生可能エネルギー源の地理的分布と遠隔地への偏在性という理由から、安価で効果的な通信システム及び技術の組み合わせやスマートメータが必要とされる (8.2.1 節)。

部分的に送電可能な再生可能エネルギー電力の普及率が増加するにつれ、システムの信頼性を維持することは、より困難となりコストがかかる。再生可能エネルギー統合のリスクや、コストを最小限に抑えるための解決法のポートフォリオとして、補完的で柔軟な発電を盛り込むことが出来る。それによって、ネットワーク・インフラと連系、供給可能量に対応出来る電力需要、貯水式水力発電などのエネルギー貯蔵技術、規制的及び市場のメカニズムなどが改善された、制度的取り決めを強化拡大する (8.2.1 節)。

再生可能エネルギーの地域冷暖房ネットワーク (8.2.2 節)、ガス供給網 (8.2.3 節) 及び液体燃料システム (8.2.4 節) への統合は、電力系統への統合とは異なるシステム要件及び課題がある。エネルギー貯蔵は、変動性のある再生可能エネルギー源を統合する冷暖房ネットワークの選択肢である。再生可能エネルギーのガス供給網への統合に関しては、適切なガスの品質基準が満たされることが重要である。様々な再生可能エネルギー技術も、すべての最終消費部門 (第一世代のバイオ燃料、建物一体型太陽熱温水器、及び風力発電など) において直接的に使用されることが可能である (8.3 節)。

風力、太陽エネルギーなど変動性のある再生可能エネルギー源の全面的な活用は、エネルギー貯蔵によってさらに強化することが出来る。熱としてエネルギーを貯蔵することは今日でも一般的に行われており、電力を貯蔵する多くの方法がこれまでも開発されてきた。ポンプ揚水による貯水は非常に発達した技術であり、様々なエネルギー源が提供されない場合、既存のダムを利用し電力を供給することが出来る。その他の技術には、運動エネルギーのフライホイール貯蔵、圧縮空気貯蔵及びバッテリーなどがある。バッテリーやその他の蓄電技術は、第 8 章で論じられている。電気自動車が高車両の大部分を占めるようになれば、再生可能エネルギー供給の変動性を管理するためのビークル・ツー・グリッド・システム (vehicle-to-grid system) において、バッテリーを使用することが可能となる (Moomaw, 1991; Kempton and Tomic, 2005; Hawken et al., 2010)。

1.2.5 エネルギー効率と再生可能エネルギー

エネルギーのサービスとは、エネルギーを用いて実行される作業である。特定のエネルギーのサービスは、多くの方法で供給することが可能である。たとえば、照明は日光、ろうそく、石油ランプ、または多種多様な電力によって供給され得る。主要エネルギー源から最終出力へのエネルギーの多重転換の効率は、一定ではなく、特定のエネルギーの組み合わせの下では、二酸化炭素の排出量にもばらつきがある。よって、特定のサービスを供給する方法については多くの選択肢がある。本報告書では、様々な次元の効率に対していくつかの特定の定義を使用している。

エネルギー効率は、システム、変換プロセス、送電、エネルギー貯蔵などによる、エネルギー投入に対する有効なエネルギー、または有効な物理的出力の比である (単位は kWh/kWh、トン/kWh、または輸送したトン km のような、有効な出力を示す他の物理的計測)。エネルギー効率は、エネルギー強度の逆数としても理解することが出来る。よって、電力に変換される可能性がある太陽エネルギー、風力エネルギー、または化石燃料エネルギーを分母とした割合を変換効率という。自動車エンジンまたは蒸気あるいはガスタービンには、熱から仕事への転換効率に対する基本的な限界があり、到達変換効率は常にこの限界を大きく下回っている。現在超臨界状態の石炭を燃料とした蒸気タービンは、熱から電気への 45%の変換率を超えることはめったにないが (Bugge et al., 2006)、高温で稼働するコンバインドサイクルの蒸気及びガスタービンは、60%の変換効率に達した (Pilavachi, 2000; Najjar et al., 2004)。

エネルギー強度は、出力するエネルギーの使用率である。出力が、たとえば鉄鋼生産高のメートルトンのような物理的単位で示される場合、エネルギー強度は、エネルギー生産性またはエネルギー効率の逆数となる。あるいは (より一般的には)、出力は人口の単位 (つまり 1 人当たり)、国内総生産 (GDP)、出荷総額への貢献度のような通貨単位、類似の単位で測定される。国レベルでは、エネルギー強度は、GDP に対する国内の一次 (または最終) エネルギー使用総量の率である。エネルギー強度は、特定された様々な活動の強度を、それらが GDP に占める割合で加重した総計だと解釈することが出来る。全体のマクロレベルでは、GDP の単位当たりのエネルギー、または 1 人当たりのエネルギーで表示されたエネルギー強度は、多くの場合、輸送、工業、または建築部門で、あるいは経済全体に言及する際に用いられる。

エネルギーの節約は、エネルギー投入を必要とする活動を変更することによって、エネルギー強度が減少することから生じる。たとえば、必要のないときに照明を消す、自動車で移動せずに歩く、過度な冷暖房をさけるために暖房またはエアコンの制御を変更する、特定の電気製品の使用を避ける、エネルギーの消費を減らす方法で仕事を行う、などはすべてエネルギー節約の例である (Dietz et al., 2009)。エネルギーの節約は、技術的、組織的、制度的、及び構造的な変化や、行動を変化させることによって、実現する可能性がある。

研究によると、効率向上策の結果として生じるはずのエネルギーの節約は、現実には十分に実現されていない。特定のエネルギーのサービスを提供するエネルギーの総コストを低下させると、エネルギーのサービスの利用増加につながることもあるため、こうした効率向上策の一部が相殺されるというリバウンド効果が生じている可能性がある。リバウンド効果は、マクロ及びミクロのレベルで区別することが出来る。ミクロレベルでは、効果の高いエネルギー効率向上策は、それを実行する事業体にとっては、使用するエネルギー量が減少するため、エネルギーコストの低下につながると

推測されるかもしれない。しかしながら、十分なエネルギーの節約にはつながらない。たとえば、より効率的な車が1kmあたりの運転費用を減らせるため、使用者はさらに多くの距離を運転する可能性があり、また、断熱性の高い家は、節約されたエネルギーの一部を使って、さらに多くの快適さを実現することが可能であるため、完全な省エネを達成することは出来ない場合があるからだ。こうした効果の分析には多くの方法論的困難が山積みである (Guerra and Sancho, 2010) が、OECD 加盟国における家屋の暖房及び自動車使用に関しては、リバウンド効果は飽和効果によっておそらく10~30%までに抑制され、より効率性の高い電気製品や水の加熱に関しては、リバウンド効果は非常に小さいものであると推定される (Sorrell et al., 2009)。しかしながら、経済全体のエネルギー需要を減らすことに成功した効率向上策によって、エネルギー価格も低下した。これは、経済全体のエネルギーコストの削減につながり、効率向上策 (エネルギー価格の低下とエネルギー使用の削減) の対象となっている事業者にとって、ひいては、効率向上策の対象となっていない可能性があるが、エネルギー価格の低下から恩恵をうけるそれ以外の経済活動にとってもさらなるコスト節約につながる。OECD 加盟国におけるエネルギー強度の変化を調査する研究によると、マクロレベルでは、エネルギー効率向上に関連して生じた減少が見られ、リバウンド効果も小さい (Schipper and Grubb, 2000)。ある分析によると、エネルギー価格の低下の影響が考慮される場合、肯定的なリバウンド効果にまさる可能性のある相殺要因がある (Turner, 2009年)。リバウンド効果は開発途上国や貧困層の消費者に対してより大きく影響する可能性があると推測される (Orasch and Wirl, 1997年)。リバウンド効果に対するこうした分析は、エネルギー使用者が経済的節約分を、効率が改善されたエネルギー使用以外のもの (つまり、節約されたエネルギーのサービスよりも、高いまたは低いエネルギー強度を伴うその他の活動) に費やすかどうかを調査するものではない。また、節約が最低の利益ラインにまで浸透している企業の効率率についての研究が存在するようにも思えない。気候変動については、あらゆるリバウンド効果に関する主な懸念は、それが二酸化炭素排出量に与える影響である。これについては、炭素価格を設定することで、効果的に取り組むことが可能である (第11章)。

再生可能エネルギーと組み合わせたエネルギー効率化の役割は、いくぶん複雑であり、まだ研究が進んでいない。最終消費の効率向上策と再生可能エネルギー技術とのコストの合計を調査し、特定のケースにおけるリバウンド効果があるかを判断することが必要である。

さらに、炭素リーケージによって、炭素削減政策の効果も低下するかもしれない。炭素リーケージは、国内での緩和措置を取っている国以外での二酸化炭素排出量の増加を、これらの国々の排出における削減量で割った値であると定義されている。炭素削減政策が部門や行政区全体に一律に採用されない場合、1か所で制御される炭素排出活動が、このような活動が制限されていない別の部門または国に移動することが可能になる (Kallbekke, 2007, IEA 1, 2008a)。しかしながら、最近の研究によると、炭素リーケージの推定値は、あまりにも高いとされている (Paltsev, 2001; Barker et al., 2007; Di Maria and van der Werf, 2008)。

エネルギーのサービス供給段階でのエネルギー削減は、すべてのエネルギー供給燃料及び技術に必要な一次エネルギーを削減する重要な手段である。再生可能エネルギー源は、通常、化石燃料または核燃料よりも出力密度が低いいため、特定のエネルギーのサービスに対して再生可能エネルギー技術を使用するには、多くの場合、最終消費段階におけるエネルギー節約が必要とされる (Twidell and Weir, 2005)。たとえば、現在の低いエンジン効率では、地球上のすべての車両にバイオ燃料で燃料補給をすることは不可能かもしれない。しかし、車両燃料効率が高まると仮定すれば、大部分の車両はバイオ燃料で走行出来るだろう。同様に、需要を抑えることによって、分散型ソーラー・システムの規模やコストが競争力のあるものになるかもしれない (Rezaie et al., 2011)。再生可能エネルギー技術が実現可能な選択肢となるような、建物における最終消費効率の重要性は、立証されてきた (Frankl et al., 1998)。さらに、エネルギー需要が小さくなれば、電気の供給及び管理は簡略化され、システム調整費用は安くなる (第8章参照)。よって、最終消費段階におけるエネルギー効率化によって、再生可能エネルギーの使用は促進される。

多くの場合、価格の低い選択肢とは、新たな技術とより効率的な実行を含む効率向上策によって最終消費エネルギー需要を減らすことである (Hamada et al., 2001; Venema and Rehman, 2007; Ambrose, 2009; Harvey, 2009)。例としては、効率的な電化製品の照明及び冷暖房や、建築部門における冷暖房などが挙げられる。たとえば、コンパクト蛍光灯またはLEDランプは、1ルーメンの光を発生させるのに、従来の白熱電球よりもずっと少ない電力しか消費しない (Mehta et al., 2008)。適切な大きさの可変速電動モータや、冷蔵庫、エアコン、及びヒートポンプ用改良型高効率コンプレッサは、多くの用途において、一次エネルギー使用量を低下させることが可能である (Ionel, 1986; Sims et al., 2007, von Weizsäcker et al., 2009)。ドイツのパッシブハウス (Passivhaus) 設計のように効率の良い住宅や小さい商業ビルは、気密性、断熱性が非常に高いため、従来型の住居の約10分の1のエネルギー量しか必要としない (Passivhaus, 2010)。熱帯諸国においては、エネルギー効率の高い高層ビルの設計により、冷房による排出量を減らし、かなりのコスト削減にもつながるだろう (Ossen et al., 2005, Ambrose, 2009)。

輸送部門の例としては、加速度と性能を強化するよりも燃料消費を減らすために、従来型の内燃機関においてエンジニアリング改善を行うことも挙げられる (Ahman and Nilsson, 2008)。大幅な効率性改善と二酸化炭素排出削減も、ハイブリッド電気系統、バッテリー電気系統、及び燃料電池の使用を通して達成された (8.3.1節参照)。燃料効率が改善すれば、バイオ燃料は、航空機に関して経済的に実現可能となる (Lee, 2010)。電力供給や工業部門におけるエネルギー効率向上の例としては、コジェネレーションシステム (Casten, 2008, Roberts, 2008)、他の方法による廃熱または機械エネルギーの回収 (Bailey and Worrell, 2005; Brown et al., 2005)、その結果商業用及び産業用の熱のために新たな燃料燃焼を避けることなどが含まれる。後者の例は、林産業でしばしば行われている太陽光発電 (PV) やバイオマス電気系統からの熱の回収利用など、再生可能エネルギーからの全体的なエネルギー供給の強化にも適用出来る。

1.3 エネルギーのサービスのニーズと現状の合致

1.3.1 現在の再生可能エネルギー・フロー

2008年におけるキャリアを介した一次エネルギーから最終消費及び損失までの世界の再生可能エネルギー・フロー (IEA、2010a年) を、図 1.18 に示す。ここでいう「再生可能エネルギー」とは、以下のものを指す。可燃性バイオマス、森林及び作物残渣、再生可能な一般廃棄物、本報告書の中で検討されているその他のタイプの再生可能エネルギー、たとえば、太陽光発電 (PV) や太陽熱などの直接的太陽エネルギー、地熱エネルギー、水力発電、及び海洋、風力エネルギーなどである。

「その他の部門」には、農業、商業用、住宅用建物、公共サービス、不特定の部門が含まれる。「輸送部門」には、国際航空及び国際船舶が含まれる。最終消費部門への再生可能電力や熱流に関するデータは、現在入手出来ない。再生可能電力の大部分が系統接続されていることを考えれば、工業、輸送、その他の部門への配分が、電力及び熱の総量の配分と比例するという仮定のもとに推定される。これについては IEA から入手可能である (IEA、2010a年)。

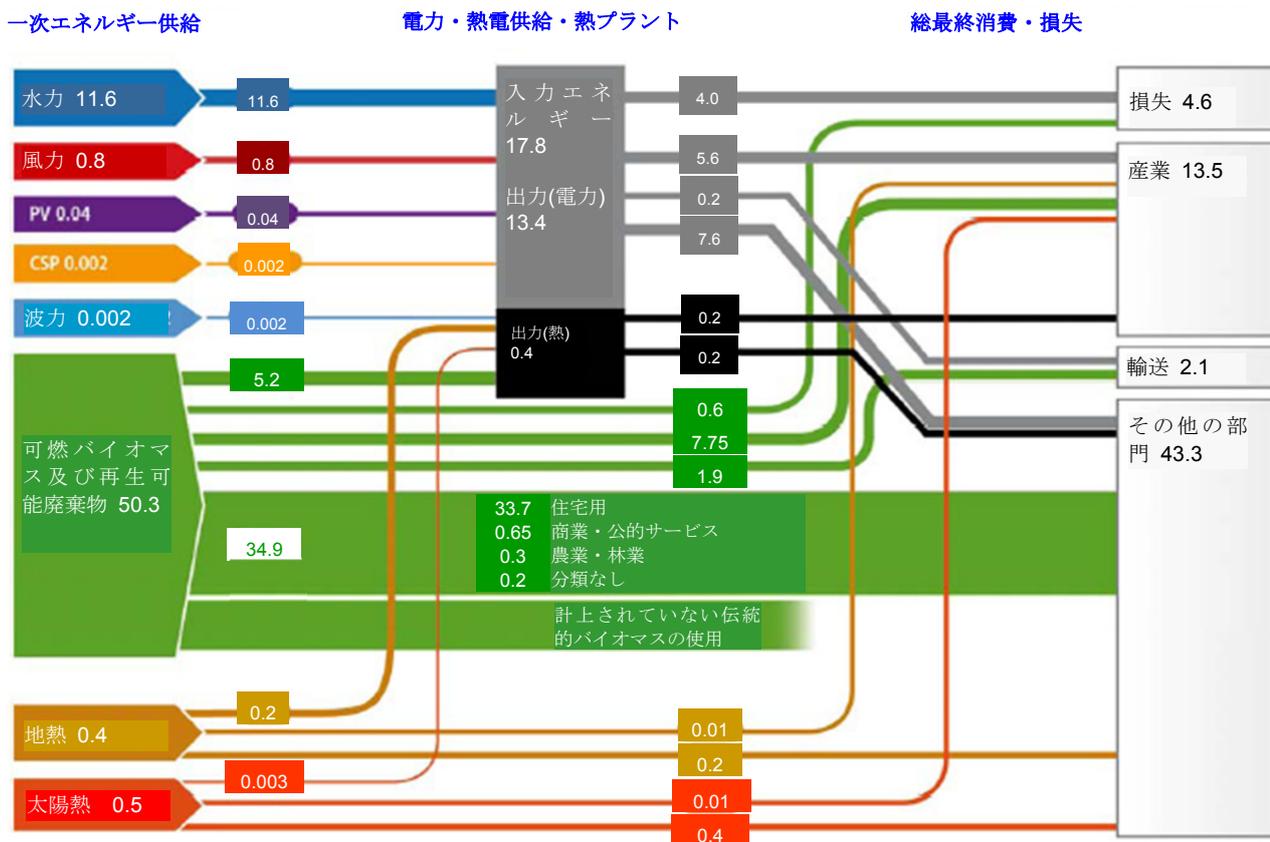


図 1.18: 2008年における、キャリアを介した主要な再生可能エネルギーから最終消費及び損失へのエネルギー・フロー (EJ) 出典: (IEA、2010a)

世界レベルでは、再生可能エネルギー供給は、1990～2007年の間に毎年平均して 1.8%ずつ増加し (IEA、2009b)、一次エネルギー消費総量の増加率 (1.9%) にほぼ匹敵する。

2008年において、世界全体で再生可能エネルギーの約 56%が一般家庭、公共分野及びサービス部門での熱供給のために使用された。基本的にこれは、開発途上国で調理用に広く利用されている木材や木炭を指す。一方、ごくわずかな再生可能エネルギーが、輸送部門で使用されている。電力生産は、最終用途の消費の 24%を占める (IEA、2010a)。2008年において、バイオ燃料は世界の道路輸送用燃料供給の 2%に寄与した。伝統的バイオマス (17%)、近代的バイオマス (8%)、太陽熱及び地熱エネルギー (2%) を合わせると、2008年における世界の熱需要総量の 27%を占める (IEA、2010c)。

1.3.2 再生可能エネルギーの現在のコスト

資源は明らかに豊富であり、理論上、将来長期にわたってあらゆるエネルギーニーズを供給出来るだろう。しかし一方で、多くの再生可能エネルギー技術の均等化発電原価 (LCOE) は、既存のエネルギー価格よりも現在は高い。ただし、様々な状況において、再生可能エネルギーは、経済的な観点からすでに競争力を持っている。特定のエネルギー技術の

均等化発電原価が、その価値や経済的競争力の唯一の決定要因ではないが、本報告書の中では、最近の均等化発電原価の幅が、いくつかのベンチマーク値¹⁰の1つとして提供されている。図 1.19、1.20 と 1.21 では、それぞれ電気、熱、輸送燃料を提供するために、現在商業的に利用可能である特定の再生可能エネルギー技術と関連した均等化発電原価幅の比較が行われている。これらの一部の再生可能エネルギー技術に対する最近の均等化発電原価の範囲は幅広く、とりわけ技術の特徴、コストや性能における地域格差、様々な割引率に左右される。

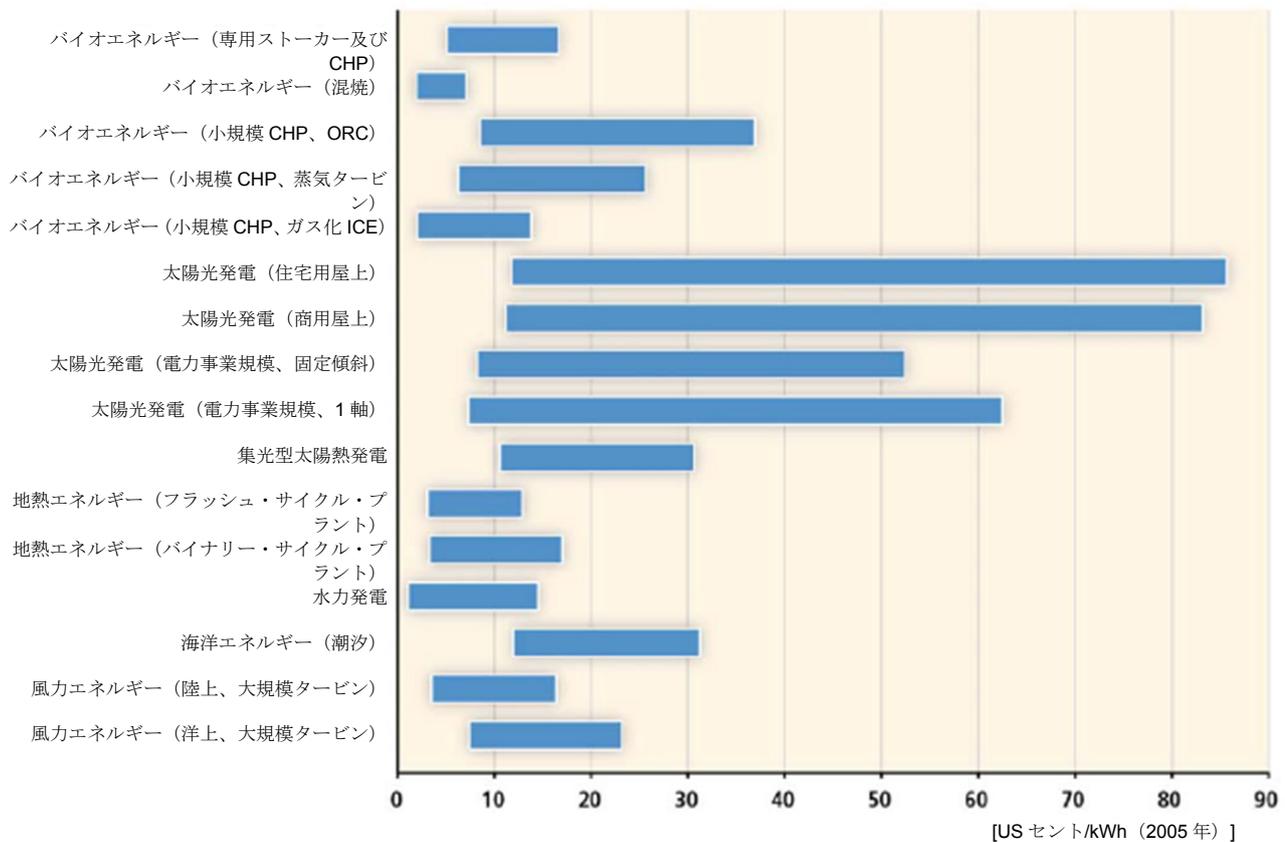


図 1.19: 様々な割引率の範囲をカバーする商業的に利用可能な再生可能エネルギー技術に対する均等化発電原価。すべての技術に対する均等化発電原価の推定値は、Annex III に要約されている入力データと Annex II で概説された方法論に基づいている。均等化原価の範囲の下限は、投資、運転保守（O & M）、（該当する場合）フィードバック・コストの範囲の下限、及び設備利用率、耐用年数の範囲の上限、また（該当する場合）転換効率及び副産物収入の範囲の上限に適用される 3%の割引率に基づいている。均等化原価の範囲の上限は、それに応じて、投資、運転保守、（該当する場合）フィードバック・コストの範囲の上限、及び設備利用率、耐用年数の範囲の下限、また（該当する場合）転換効率及び副産物収入の範囲の下限に適用される 10%の割引率に基づいている。転換効率、副産物収入及び耐用年数は、標準または平均値に設定されている場合もあることに留意する。データや補足情報については、Annex III を参照。

¹⁰ コストと性能に関するデータは、閲覧可能な文献の様々な出典から第 2～7 章の執筆者たちによってまとめられた。そうしたデータは、文献の中で利用可能な最新の情報に基づいている。詳細は、各章に記載されており、Annex III のデータ表に要約されている。あらゆるコストは、Annex II に記載されているように、3%、7%、10%の標準割引分析 (standard discounting analysis) を用いて評価された。データは利用出来ないが、Annex III で提示されている場合、コストと性能のパラメータについての多くのデフォルト時の解釈が、均等化原価を定義するために作成された。

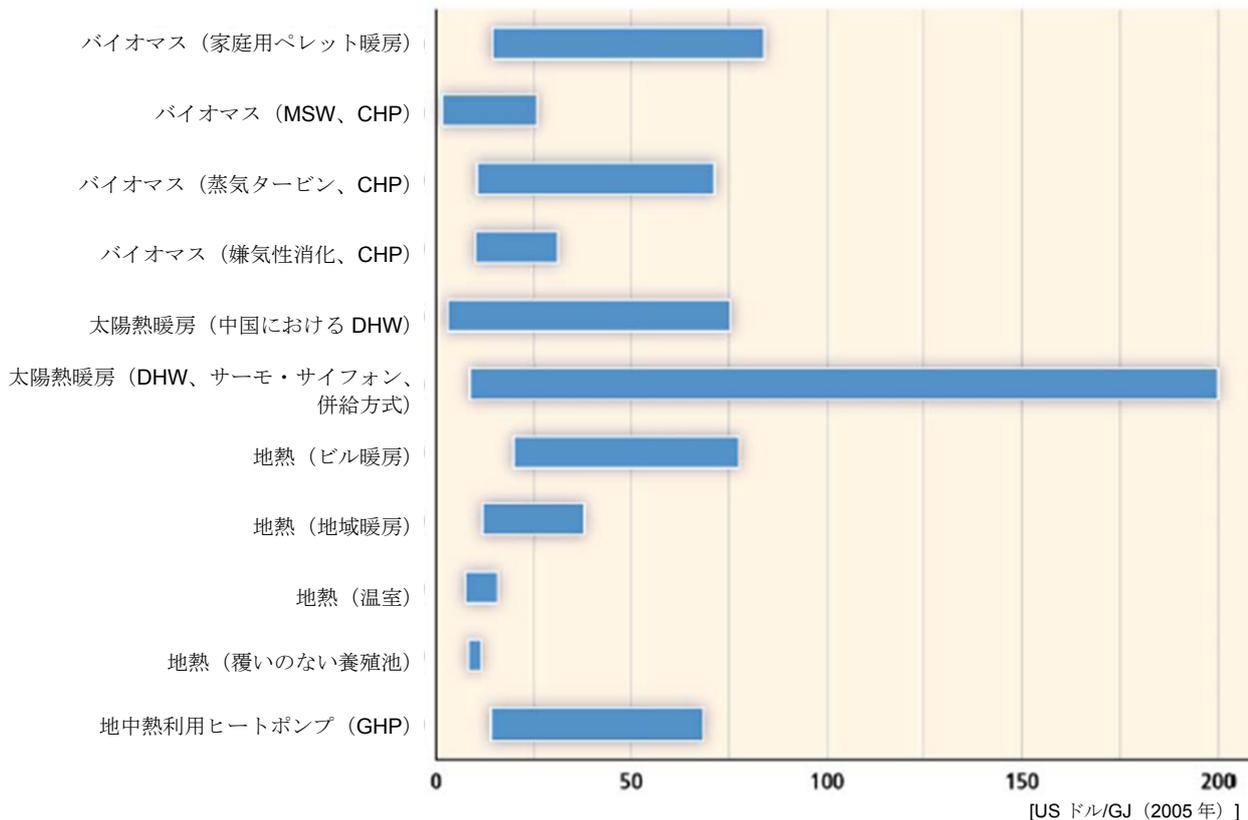


図 1.20 様々な割引率をカバーする商業的に利用可能な再生可能エネルギー技術に対する熱の均等化原価 (Levelized cost of heat: LCOH)。すべての技術に対する熱の均等化原価の推定値は、Annex III で要約されている入力データと Annex II で概説されている方法論に基づいている。均等化原価の範囲の下限は、投資、運転保守 (O & M)、(該当する場合) フィードバック・コストの範囲の下限、及び設備利用率、耐用年数の範囲の上限、また (該当する場合) 転換効率及び副産物収入の範囲の上限に適用される 3%の割引率に基づいている。均等化原価の範囲の上限は、それに応じて、投資、運転保守、(該当する場合) フィードバック・コストの範囲の上限、及び設備利用率、耐用年数の範囲の下限、また (該当する場合) 転換効率及び副産物収入の範囲の下限に適用される 10%の割引率に基づいている。設備利用率及び耐用年数は、標準または平均値に設定されている場合もあることに留意する。データや補足情報については、Annex III を参照。

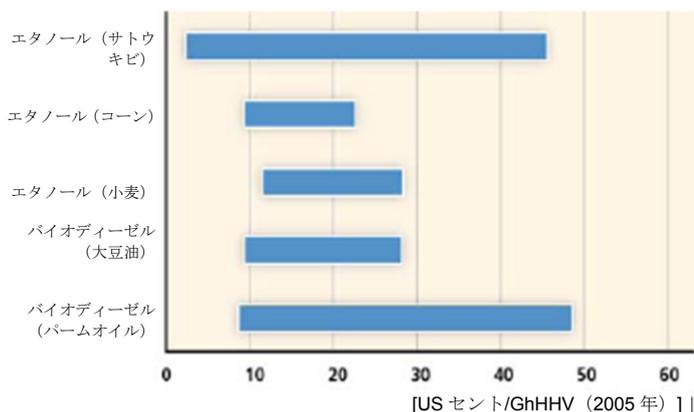


図 1.21: 様々な割引率をカバーする商業的に利用可能なバイオマス転換技術に対する燃料の均等化原価 (Levelized Cost of Fuels: LCOF)。すべての技術に対する燃料の均等化原価の推定値は、Annex III で要約されている入力データと Annex II で概説されている方法論に基づいている。均等化原価の範囲の下限は、投資、運転保守 (O & M)、フィードバック・コストの範囲の下限に適用される 3%の割引率に基づいている。均等化原価の範囲の上界は、それに応じて、投資、運転保守、フィードバック・コストの範囲の上限に適用される 10%の割引率に基づいている。転換効率及び副産物収入、設備利用率、及び耐用年数は、平均値に設定されていることに留意する。HHV は、高位発熱量 (higher heating value) の略である。データや補足情報については、Annex III を参照。

これらの図におけるコストの範囲は幅広く、一般的見地から見ると、コストを取り巻く相当量の不確実性を解決するものではない。よって、上述の技術的ポテンシャルと同様、正確な比較とは対象的に、データは状況のみを提供するものと理解される。

同一技術の均等化原価は、提供されるサービス、再生可能エネルギーの品質、及び投資、財政支援、運転保守の現地コストに左右されるため、世界各地でばらつきがある可能性がある。地域、国、プロジェクト、または投資家特有の状況が考慮される場合は、そのばらつきの幅は狭まる。第2～7章では、こうした枠組み条件に対する均等化発電原価の感度についての詳細をいくつか紹介する。10.5節では、均等化原価に関する割引率の選択の影響を示し、Annex III では、完全なデータと追加的な感度分析を示す。

しかしながら、有利な状況を仮定すると、範囲の下限は、一部の再生可能エネルギー技術については、既存のエネルギー価格において幅広く競争力がある(10.5節も参照のこと)。エネルギー供給の外部コストを収益化することによって、再生可能エネルギーの相対的な競争力が高まるだろう。その他の理由で市場価格が上昇した場合も、同じことが当てはまる(10.6節を参照)。しかしながら、これらのグラフは、使用出来る技術的ポテンシャルについては何も触れていない。10.4節では、この点について、たとえば、エネルギーの供給曲線の概念を検討するなど、詳しく触れている。

さらに、技術に関する均等化原価は、その価値や経済的競争力の唯一の決定要因ではない。特定のエネルギー供給オプションの魅力は、経済全般だけでなく、環境的、社会的側面、及び技術により可能となった特定のエネルギーのサービス充当への貢献(たとえば、電力のピーク需要など)、またはエネルギーシステムに関するアンシラリー・コストの形で課す賦課金(たとえば、統合コストなど)によって決まる。第8～11章では、たとえば、統合コスト、外部費用と便益、経済全体のコストと政策コストなどのコスト問題に関する重要な補足的見解を示す。

大部分の再生可能エネルギー技術のコストは低下し、予測されるさらなる技術進歩の結果として、コスト削減がますます進むであろう。再生可能エネルギー技術の大きな進歩と、関連する長期的なコスト削減が、ここ10年間にわたって実証されてきた。ただし、たとえば、再生可能エネルギーの利用可能な供給量を上回って需要が上昇したために、価格上昇の期間も時折見られた(10.5節を参照)。これらを牽引する様々なドライバー(たとえば、研究開発、規模の経済性、発展志向の学習、再生可能エネルギー供給者の間の市場競争など)は、常に深く理解されているわけではない(2.7節、3.8節、7.8節、10.5節を参照)。

これまでの、及び今後の潜在的なコスト・ドライバーは、技術の章(第2～7章)の大部分と第10章で検討されている。場合によっては、これまでの学習率の評価及び特定の構成条件の下でのコスト削減に対する将来の見通しなども含まれる。さらなるコスト削減が見込まれ、結果として、普及ポテンシャルの増加や気候変動の緩和につながる。技術進歩が見込まれる重要な分野には以下のような例がある。新型及び改良型の原材料生産と供給システム、新しいプロセスによるバイオ燃料生産(リグノセルロースなど次世代バイオ燃料または新型バイオ燃料と呼ばれるもの)、新型バイオリアファイナリー(2.6節)、新型太陽光発電(PV)・集光型太陽熱発電(CSP)技術と製造工程(3.7節)、地熱井涵養システム(EGS)(4.6節)、複数の先端海洋技術(6.6節)、洋上風力発電の基礎とタービン設計(7.7節)など。水力発電に関するさらなるコスト削減は、他の再生可能エネルギー技術よりも重要性が低いと推測されるが、さらに幅広い範囲の場所で、技術的に実現可能な水力発電プロジェクトを行ったり、新規及び既存のプロジェクトの技術性能を改良する研究開発の機会が存在する(5.3節、5.7節、5.8節)。

1.3.3 再生可能エネルギーの地域的側面

再生可能エネルギーが一次エネルギー供給にどの程度対応出来るかは、国や地域ごとに大きく違う。再生可能エネルギーの製造、使用、輸出の地理的分布は、先進諸国から、その他の開発途上国、特に中国などのアジア(UNStats, 2010)へと非常に広がりつつある。中国では、太陽熱による調理や温水製造に対するエネルギーニーズが高まったことで、再生可能エネルギー開発が促進された。中国は、温水製造用の太陽熱パネルの主要な製造国、使用国、輸出国であり、急速に太陽光発電(PV)の製造を拡大している。その製品のほとんどが、輸出され、最近では、世界的に主要な生産国となった。設備能力に関して、中国は、2008年に、熱温水暖房への投資額が世界1位、バイオエタノール生産では世界3位であった(REN21, 2009)。また中国は、2006年以来毎年、風力タービンの設置数を倍増し、2009年には、設備容量が世界第2位となった。インドもまた、風力タービンの主要な製造国であり、今や設置数においては世界の上位5か国の仲間入りをした。導入済みの電力設備容量に関しては、現在は中国が世界のトップに立ち、これにアメリカ、ドイツ、スペイン、及びインドが続いている(REN21, 2009, 2010)。

前述のように、再生可能エネルギーは化石燃料よりも均等に分布しており、特定の再生可能エネルギー資源が豊富な国及び地域は複数存在している。発電に地熱を利用している国が24か国ある。エルサルバドル、ケニア、フィリピン、アイスランドにおいては、国内の電力生産に占める地熱エネルギーの割合が15%以上である(Bromley et al., 2010)。アイスランドでは、一次エネルギーの60%以上が、水力、地熱エネルギーによって供給されている(IEA, 2010a)。ノルウェーでは、年によっては(降水量によって)、必要量以上に水力発電を生産でき、余剰電力をヨーロッパの他の国々に輸出している。ブラジル、ニュージーランド、カナダもまた、電力全体に占める水力発電電力の割合がそれぞれ80%、65%、60%と高い(IEA, 2010c)。ブラジルは、バイオエタノールに大きく依存しており、エタノール生産国(ブラジルのエタノールはサトウキビから生産)としては世界第2位である(EIA, 2010; IEA, 2010e)。

地域の一次エネルギー消費の割合としてのバイオマスに関しては、アフリカが48%と特に高く、次いで、インドの26.5%、中国、インドを除くアジアのOECD非加盟国の23.5%、中国の10%と続く(IEA, 2010a)。大気、地面、水中から蓄熱された太陽エネルギーを取り出すヒートポンプ・システムは、場合によっては、太陽光発電(PV)、風力などの再生可能エネルギーと組み合わせて、先進国の市場に普及している。ヒートポンプ技術については第4章で検討されている。

砂漠や地中海沿岸帯などのサンベルト地域は、法線面直達日射が豊富であり（雲がないため）、集光型太陽熱発電所に適している。太陽エネルギー源や風力エネルギー源が豊富な国々からのこうしたエネルギー発電による電力の輸出は、将来重要になるだろう（Desertec, 2010）。

1.4 機会、障壁、問題

世界共通の重要なエネルギーの課題は、全員にエネルギーのサービスへのアクセスを提供し、エネルギーの気候変動への影響を抑制しながら、伸び続ける需要を満たすために、エネルギー供給を安定させることである。開発途上国、特に最貧国に関しては、製造、所得創出、社会的発展を促進するため、また薪、木炭、糞尿、農業廃棄物の使用により生じる重大な健康問題を低減するためにエネルギーが必要である。先進国に関しては、再生可能エネルギーを促進する主な理由として、気候変動を緩和するための排出量削減、安定したエネルギー供給に関する懸念、雇用の創出などが挙げられる。再生可能エネルギーは、気候変動への適応など、こうした複数の環境的、社会的、経済的発展の側面に取り組む機会を広げる可能性がある。これについては 1.4.1 節で説明されている。

太陽放射、風力、落水、波、潮汐、蓄積された海洋の熱・地球からの熱など、世界のあらゆる場所で何かしらの再生可能資源が利用出来る。さらに、これらの形態のエネルギーを利用する技術も存在している。こうした機会（1.4.1 節）は非常に大きいと考えられるが、再生可能エネルギーを現代の経済に導入することを鈍化させている障壁（1.4.2 節）や問題（1.4.3 節）がある（Asif and Muneer, 2007）。

1.4.1 機会

機会とは、チャンスキャラクター（chance character）という属性をもった行動の状況と定義することが出来る。政策に当てはめると、再生可能エネルギーを導入する可能性はあるが、意図的に目標にしない付加利益に期待することである。これには、4つの主要な機会領域がある。それは、社会的及び経済的発展、エネルギーアクセス、エネルギー安全保障、気候変動の緩和と環境であり、これに加えて健康への影響の軽減が含まれる（1.4.1, 9.2~9.4 節）。

1.4.1.1 社会的及び経済的発展

地球規模では、一人当たりの収入や人間開発指標（HDI）のような幅広い指標は、一人当たりのエネルギー使用量との間に正の相関関係があり、経済成長は、過去 10 年間におけるエネルギー消費増加を背景とする最大の関連要因として特定出来る。経済活動が拡大、多様化するにつれ、より新しく柔軟なエネルギー源への需要が生じる。それゆえ、経済発展は、燃料の直接燃焼からより質の高い電力への転換と関連付けられてきた（Kaufmann, 2004; 9.3.1 節参照）。

特に開発途上国に関しては、社会的及び経済的発展と近代的エネルギーのサービスの必要性との関連は明確である。クリーンで信頼性の高いエネルギーへのアクセスは、特に経済活動、所得創出、貧困撲滅、健康、教育、男女平等などに寄与する人間開発の基本的な決定要因の重要な条件となる（Kaygusuz, 2007; UNDP, 2007）。それらの分散的な性質のために、再生可能エネルギー技術はへき地の発展を促す重要な役割を担うことが出来る（1.4.1.2 節参照）。

（新たな）雇用機会の創出は、先進国及び開発途上国双方における、再生可能エネルギーの長期的なプラス効果と考えられ、多くの国内グリーン成長戦略（green-growth strategies）において重視された。また、政策決定者は、再生可能エネルギーの国内市場の発展を、国際市場への供給において競争上の優位性を得る 1 つの手段として後押ししてきた（9.3.1.4 節及び 11.3.4 節参照）。

1.4.1.2 エネルギーアクセス

近代的なエネルギーのサービスの利用は、再生可能エネルギーによって強化することが出来る。2008 年には、世界 14 億人以上の人々が電力を使用できず、そのうちの 85%がへき地に住み、料理用の伝統的バイオマスに依存する人々の数は、約 27 億人と推定されていた（IEA, 2010c）。貧困層の割合を半減させるというミレニアム開発目標を達成するために、2015 年までに、約 12 億人の人々が電力へのアクセスを必要とし、さらに 19 億人の人々が近代的燃料へのアクセスを必要とする（UNDP/WHO, 2009）。

近代的エネルギーアクセスへの移行は、エネルギーの階梯（the energy ladder）を上がっていくことだと考えられ、伝統的な装置・燃料から、環境的により負荷が少なく、健康への影響も少ない近代的な装置・燃料への前進を意味する。特に開発途上国における様々な取り組み（一部は再生可能エネルギーに基づくもの）の目的は、電気やよりクリーンな調理設備へのアクセスを増加することにより、近代的エネルギーのサービスへの普遍的なアクセスを改善することである（REN 21, 2009; 9.3.2 節及び 11.3.2 節参照）。特に、地方における再生可能エネルギーへの依存、発電のためにその地域で生産されたバイオエネルギーの使用、クリーンな調理施設へのアクセスは、近代的なエネルギーのサービスへの普遍的なアクセスを達成することに寄与する（IEA, 2010d）。

電気に関しては、太陽光発電（PV）（第 3 章）、水力発電（第 5 章）、バイオエネルギー（第 2 章）のような再生可能エネルギー技術の独立型の小規模構造は、多くの場合、ディーゼル発電機のような化石燃料の代替物よりも、より安価に地方のエネルギーニーズを満たすことが出来る。たとえば、太陽光発電（PV）は、照明、清潔な飲料水など基本的な

サービスを提供するための電力源として魅力的である。地域における規模の大きい需要については、小規模な水力発電またはバイオマスの燃焼やガス化技術がよりよい解決法を提供するだろう（IEA, 2010d）。バイオエネルギーについては、前進とは、たとえば、薪、牛糞、農業残渣などの使用から、液体プロパンガスコンロ、再生可能エネルギーを基盤とした新型バイオマス料理用レンジ、またはバイオガスシステムへの移行を意味する（Clancy et al., 2007; UNDP, 2005; IEA, 2010d; 2.4.2 節及び 9.3.2 節参照）。

1.4.1.3 エネルギー安全保障

全般的に、エネルギー安全保障は、エネルギー供給の（突然の）中断に対する頑健性であるといえる。さらに具体的に言えば、資源の利用可能性及び供給、またエネルギー供給の変動性や信頼性もまた 2 つの主要なテーマであると認識され得る。

現在のエネルギー供給の大部分は化石燃料（石油及び天然ガス）に頼っており、その価格の不安定さが、とりわけ石油を輸入する発展途上国に大きな影響を与え得る（ESMAP, 2007）。燃料の地政学的な利用可能性についての国の安全保障上の懸念もまた、多くの国々が再生可能エネルギーを考慮する主要なドライバーとなってきた。たとえば、アメリカでは軍が率先して航空機への燃料供給を拡大・多様化させ、また持続可能な代替燃料を主な駆動力とすることでエネルギー安全保障を改善している（Hileman et al., 2009; Secretary of the Air Force, 2009; USDOD, 2010）。

各地域における再生可能エネルギーの選択肢は、エネルギー供給を多様化し、限られた供給者への依存を減らしていくことで、エネルギー安全保障の目標に寄与することが出来る。ただし、再生可能エネルギー特有の統合への課題について検討しなければならない。加えて、再生可能エネルギー技術の採用率の増加は、外貨の流れを、エネルギー輸入から、地域では生産出来ないハイテク資本財商品の輸入に方向転換する手段となるだろう。このことは、石油の輸入割合が高い発展途上国にとって特に重要であろう（9.3.3 節, 9.4.3 節及び 11.3.3 節）。

1.4.1.4 気候変動の緩和と環境、健康への影響の軽減

気候変動の緩和は、再生可能エネルギー技術への需要の高まりを背景とした、主要な推進力の 1 つである。再生可能エネルギー技術は、温室効果ガス排出の削減に加えて、化石燃料と比較すると、大気汚染や健康に関する恩恵ももたらす（9.3.4 節参照）。再生可能エネルギーのこうした重要な利点にもかかわらず、大規模な技術の導入には、たとえば誘発される土地利用変化のようなトレードオフが必ず必要となる。よって、可能性のある相殺取引や潜在的な相乗効果を特定する目的で、影響を受ける幅広い範疇を考慮に入れながら、環境や社会に与えるエネルギーシステムからの全体的な負荷の評価が義務付けられている。

ライフサイクル評価は、様々なエネルギー技術全体にわたる「ゆりかごから墓場まで」の排出量の定量的な比較に有用である（9.3.4.1 節参照）。図 1.22 は、二酸化炭素排出量を分析するためのライフサイクル構造を説明するとともに、再生可能エネルギー、原子力、及び化石燃料に対する温室効果ガスの相対的意義についても質的に示している。一般に知られている化石燃料燃焼からの二酸化炭素生成経路と併せて、天然ガス生産（及び輸送）と炭鉱は、強力な温室効果ガスであるメタンの排出源であり、制御不能な炭鉱火災によって、大気中に大量の二酸化炭素が放出される。

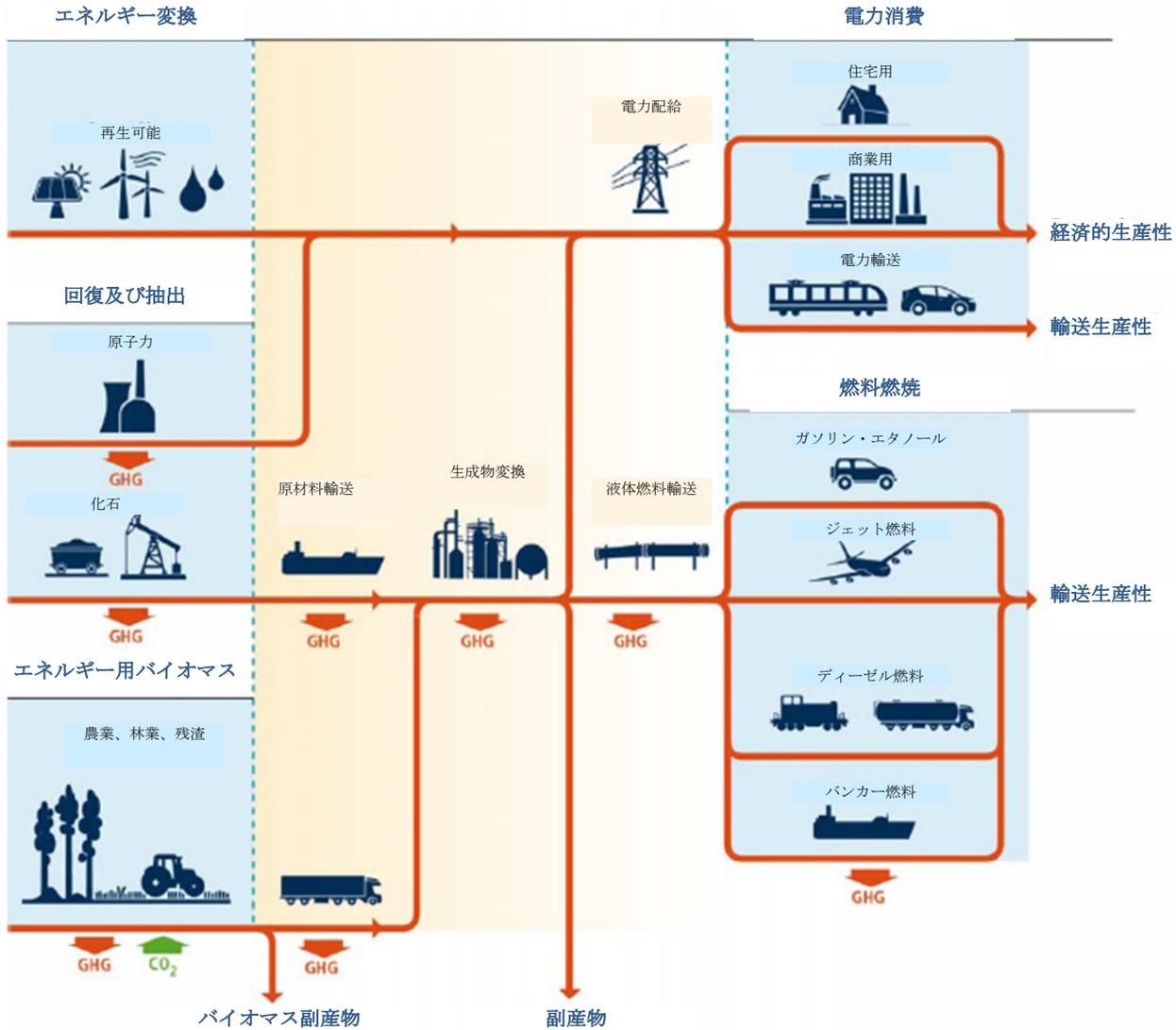


図 1.22: 再生可能エネルギーと他の生産オプションの役割を示す、エネルギー生産と使用の体系。ライフサイクル・アセスメントを行うためには系統的アプローチが必要となる。

伝統的バイオマスの使用は、その他の汚染物質の中でも特に高濃度の粒子状物質や一酸化炭素により、健康へ悪影響をもたらす。長期的にバイオマス煙にさらされると、子どもが急性呼吸器感染症を発症する危険性が増加し、発展途上国においては、疾病率、死亡率の主要な原因となる（WEC/FAO, 1999）。

これと関連して、非燃焼型再生可能エネルギー発電技術は、化石燃料を基盤とした発電と比較すると、地域的な大気汚染を大幅に減少させ、関連する健康への影響を軽減させる可能性がある。伝統的バイオマスの使用を改善すれば、持続可能な開発（SD）に与える悪影響を減せる。たとえば、地域的及び室内汚染、温室効果ガス排出、森林減少、森林劣化などへの影響である（2.5.4 節, 9.3.4.2 節, 9.3.4.3 節及び 9.4.2 節参照）。

エネルギーシステムによる水源への影響は、技術の選択や地域的な状況に大きく左右される。たとえば、風力や太陽光発電（PV）による電力生産は、熱変換技術と比較すると水をほとんど必要としないため、水や大気の水質にまったく影響を与えない。熱発電所の冷却に使用出来る水は限られているため、その効率を下げ、石炭、バイオマス、ガス、原子力及び集光型太陽熱による発電所の運転に影響を与える（9.3.4.4 節参照）。最近、アメリカやフランスでは、干ばつ時に原子力と石炭で大幅な電力減少が見られた。

特に露天鉱での石炭の採掘によって、土地は大きく変わる。たとえば、炭鉱から酸性鉱山廃水が発生することもある。石炭灰がたまって地表水と地下水を汚染する可能性もある。石油の生産や輸送は大量の土地や水の流出につながってきた。大部分の再生可能エネルギーは、化石燃料と比較して、従来型の大気汚染物質や水質汚染物質の生成を減少させるが、たとえば貯水式水力発電、風力エネルギー及びバイオ燃料のように大量の土地を必要とする場合がある（9.3.4.5 節参照）。

今やある程度の気候変動も避けられないため、気候変動への適応も持続可能な開発の不可欠な要素である（IPCC, 2007e）。適応とは、変動する気候についての予測の場合もあれば、それに対する反応の場合もある。一部の再生可能エネルギー技術は、気候変動への適応の一助となるものもあるが、通常は本来予測的のものである。AR4 には、気候変動の緩和（温

室効果ガスの排出削減)と気候適応(気候変動への適応に役立つ可能性など)との関連性についての章がある(Klein et al., 2007a, b)。

- ・ 建物のアクティブ及びパッシブの太陽熱利用冷房が、平均気温上昇による人間への直接的影響を抑制する一助となる(第3章)。
- ・ 水力発電用のダムが、気候変動と共に増加すると予測される干ばつ及び洪水の影響を管理するのに重要となる場合もある。実際には、これが、まず第一に、そのようなダムを建設する理由の1つである(5.10節; 世界ダム委員会(WCD, 2000)参照)。
- ・ 太陽光発電(PV)と風力は、稼働に水を必要としない。よって、干ばつや河川の水温上昇により、熱発電所の出力が制限されるため、ますます重要になる可能性がある(9.3.4節)。
- ・ 送電系統から遠く離れた地方での給水ポンプは、気候により誘発され増加した乾季や干ばつの時期において、農業の生産性を高めるために、太陽光発電(PV)(第3章)または風力(第7章)を利用することが出来る。
- ・ 沿岸や河川の堤防に沿った植樹や森林保全は、気候変動による沿岸浸食の影響を軽減するための重要な戦略である。樹種の適切な選択や育林の実施と併せて、こうした植樹により、たとえば定期伐採(coppicing)により、エネルギー用の持続可能なバイオマス源も生み出すことが出来る(2.5節)。

1.4.2 障壁

障壁はAR4で、「政策やプログラムまたは方策により克服、もしくは軽減可能な適応や緩和ポテンシャル、といった目標の達成を妨げるあらゆる障害」と定義されている(IPCC, 2007d; Verbruggen et al., 2010)。たとえば、現在利用可能な技術は、望ましい適用規模に適していない可能性がある。この障壁は、原則として、技術開発(研究開発)によって軽減されるだろう。

この節では、気候変動の緩和と適応及び持続可能な開発のための再生可能エネルギー使用に対する主要な障壁と問題点の一部について説明する。この序章で述べたように、例は事例的なものであり、包括的なものではない。1.5節(簡潔に)及び11.4節(詳細に)では、これらの障壁を克服する可能性のある政策や財政支援のメカニズムに目を向ける。ある障壁が、特定の技術に特に関連しているものである場合、該当する技術の章(例: 第2~7章)において説明する。

様々な障壁は以下のように分類されている。1) 市場失敗・経済的障壁、2) 情報・意識障壁、3) 社会文化的障壁、及び4) 及び組織・政策障壁(表1.5参照)。多くの場合、障壁はいくつかのカテゴリーにまたがっているため、この分類は、いくぶん任意的なものである。さらに重要なことは、特定のプロジェクトまたは状況に関して、1つの特定の障壁を選ぶことは通常難しいということだ。それらは相互に関連しているため、包括的に対処される必要がある。

表 1.5: 再生可能エネルギー導入に対する障壁の分類

節	障壁のタイプ	可能性のある政策手段 (第11章参照)
1.4.2.1	市場の失敗及び経済的障壁	炭素税、排出量取引制度、研究開発に対する公的支援、投資や小規模融資を支援する経済環境
1.4.2.2	情報・意識啓発上の障壁	エネルギー基準、情報キャンペーン、技術的研修
1.4.2.3	社会文化的な障壁	土地利用計画の改良プロセス
1.4.2.4	制度的及び政策的障壁	イノベーション、改良技術規則に対する促進的環境、たとえばUNFCCCに基づいた技術的移転に対する国際的支援、エネルギー産業の自由化

1.4.2.1 市場の失敗及び経済的障壁

市場の失敗

経済学においては、多くの場合、市場の失敗と市場の障壁は区別される。理論上の理想的な市場の状況(Debreu, 1959; Becker, 1971)に関して、福祉の損失が実証しているように、実際の市場はすべて、ある程度は失敗している(Bator, 1958; Meade, 1971; Williamson, 1985)。市場の失敗(不完全性)は、多くの場合、外部性または外部効果によるものである。これらは、人間の活動により引き起こされ、それはその活動に責任のある行政が、その活動の他へ与える影響をまったく考慮しなかった場合に生じる。外部性はマイナス(外部費用)の場合もあれば、プラス(外部便益)の場合もある。外部便益は、生産者が十分な報酬を得られないため、社会的観点から見て有益な活動(たとえば公共財など)の供給不足につながる。外部コストは、消費者が、全(社会的)コストを負担しないため、有害な活動の需要過多につながる。もう1つの市場の失敗は、独占的な事業者による利益の占有である。再生可能エネルギーの普及に関する場合、以下のような現象として現れる可能性がある。

- ・ 導入者たちが、尽力に対して独占的財産権から利益を得ることが出来ないために起こる、再生可能エネルギー技術における発明及びイノベーションへの過少投資 (Margolis and Kammen, 1999; Foxon and Pearson, 2008)。
- ・ 経済的な主体がその活動の全費用を内在化する義務がない場合に起こる、エネルギー使用による価格をつけられない環境への影響とリスク (Beck, 1995; Baumol and Oates, 1998)。温室効果ガス排出とその結果として生じる気候変動が、明白な例である (Stern, 2007; Halsnaes et al., 2008) が、一部の再生可能エネルギープロジェクトやその他の低炭素技術 (原子力、二酸化炭素回収・貯留) の影響やリスクもまた、常に価格をつけることが出来るわけではない。
- ・ エネルギー市場において売手一人による独占力、または買手一人による独占力が発生した場合、供給者または需要者間の競争が制限され、市場への自由な参入及び撤退の機会を減少させる (1.4.2.4 節参照)。独占及び寡占力は、意図的な集中、支配、談合によるものかもしれない。単独の運営者によって提供される場合、ネットワークサービスは最小コストであるため、特定の領域内の規制された相互接続ネットワーク産業 (たとえば、電気、ガス、熱伝送網) は、自然独占である (Baumol et al., 1982, p.135)。

福祉が喪失し、不完全性排除によって市場の力が無能である可能性が高いという状況で、こうした不完全性を市場の失敗として特徴づけることによって、失敗を修復するための公的な政策介入に関する激しい論争が行われる (Coase, 1960; Bromley, 1986)。市場の失敗として分類される不完全性に加えて、様々な要因が市場の主体たちの行動に影響を与えるが、ここではその他のタイプの障壁に分類される。

先行投資費用

再生可能エネルギー設備容量の 1 単位における初期投資費用は、非再生可能エネルギーのエネルギーシステムの費用よりも高くなる。そのようなシステムの費用は大部分が先行投資となるため、ほとんどの潜在顧客、特に発展途上国の潜在顧客にとっては負担しきれない額となるだろう。ただし、そうした潜在顧客が、再生可能エネルギーのサービスを灯油の料金として支払うように、毎月支払うことが出来るような財政機構が確立されている場合を除く。初期段階の設備が海外の代理店から寄付されたとしても、技術支援、スペアパーツ、そのシステムに代わる最終的なシステムに対して代金を支払うために、こうした財政機構は依然として必要である。これらの制度的な要素を適切に設置できなかったことが、太平洋諸島における再生可能エネルギーの使用を妨げる主な原因となった。太平洋に点在する熱帯の島々の地域社会には、小規模の太陽光発電 (PV) システムが、自然に適応するようである (Johnston and Vos, 2005; Chaurey and Kandpal, 2010)。

金融リスク

すべての電力プロジェクトには、そのエネルギー源にかかわらず、将来の電気料金における不確実性のために、財政的リスクが伴い、民間投資家または一般投資家が将来的な投資収益を予測することが困難になる。さらに、当初の資本コストが、再生可能エネルギーシステムの経済的コストの大部分を占めるため、再生可能エネルギーシステムの財政的実行可能性は、資本の利用可能性とそのコスト (金利) に大きく左右される。このようなコストの予測可能性は、再生可能エネルギーシステムの相対的な利点となる一方で、多くの再生可能エネルギー技術は、依然として開発の初期段階にあるため、最初の商用プロジェクトに関連するリスクは高くなる。民間資本市場では、このようなリスクの高い投資に対しては、確立された技術に対するよりも高い収益が義務付けられているため、再生可能エネルギープロジェクトのコストが上昇する (Gross et al., 2010; Bazilian and Roques, 2008)。

電力部門外での再生可能エネルギーシステムの金融リスクの一例として、航空機用のバイオ燃料の開発が挙げられる。2009 年には、将来性のあるバイオジェット燃料精製業者も航空会社も、利害関係のある金融機関がある場合、信用力があり、その結果、資金提供を受ける可能性のある取引をどのように構成するか完全には理解していなかった (Slade et al., 2009)。

1.4.2.2 情報・意識啓発上の障壁

天然資源に関する不完全なデータ

再生可能エネルギーは、広範囲に分散しているが、化石燃料システムのように適用場所により異なるものである。たとえば、風力タービンの出力は、ディーゼル発電機の出力とは違い、その土地の風況に大きく左右される。風に関する広範なデータは、合理的に気象記録から利用可能である一方で、地域的な地形についてはほとんど考慮されていない。これは、一定のタービンの出力は、地域の丘の頂上では、そこから数百メートル離れた溪谷よりも 10~50% 高くなることを意味する場合もある (Petersen et al., 1998)。このような適用場所により異なるデータを取得するためには、少なくとも現地で 1 年間の測定及び詳細なモデリングが必要となる。同様のデータ不足は、ほとんどの再生可能エネルギー源について言えることであるが、そうしたエネルギー源をより適切に測定するための特定のプログラムによってデータ不足が解消される可能性がある (Hammer et al., 2003)。

スキルを身につけた人材 (能力)

再生可能エネルギー源の開発には、他のエネルギー源と同様、機械、化学、及び電気工学、経営管理、社会科学におけるスキルが必要となる。しかし、必要とされるスキルは、細かく言えば、それぞれの技術ごとに違っており、特定の研修が必要になる。再生可能エネルギー「ハードウェア」を運用し維持するために、技術を開発することは、再生可能エネルギープロジェクトの成功に非常に重要である (Martinot, 1998)。バングラデシュのようにこうした障壁を克服した発展途上国においては、再生可能エネルギーシステムの大規模な設置が行われた (Barua et al., 2001; Ashden Awards for Sustainable Energy, 2008; Mondal et al., 2010)。再生可能エネルギーの利用者が、具体的な運転状況や再生可能エネルギー源の利用可能性について理解することも重要である。このことが重要である 1 つの事例は、発展途上国の地方においてである。発展途上国の地方における太陽光発電 (PV) システムなど、普及した再生可能エネルギーの技術支援には、従来のエネルギーシステムにはありがちであったように高度なスキルを身につけた少数の人よりも、基本的なスキルを身につけた多くの人々が必要である。このような人々を研修し、確実にスペアパーツをすぐに利用出来るようにするためには、新たなインフラの確立が必要である。

多くの場合、一部の開発途上国では、再生可能エネルギーのアンシラリー産業 (専門的なコンサルティング、工学、調達、運転保守など) の不足は、プロジェクト開発により高いコストがかかることを意味し、普及へのさらなる障壁となる。

社会的・制度的な意識啓発

1973 年、1980 年、1991 年、及び 2008 年に、石油 (及びガス) の価格がピークに達したことで、先進国及び発展途上国双方の消費者、政府、及び産業は、代替エネルギー源を探し求めている。こうした価格の急騰は、電力生産に関して石炭への一部移行を招いた一方で、特に太陽、風、バイオマスなど、より多くの再生可能エネルギーを採用するための行動も生み出した (Rout et al., 2008; van Ruijven and van Vuuren, 2009; 第 7 章)。しかしながら、代替一次エネルギー源 (特に再生可能エネルギー) への継続的な移行を実施するにあたっての、技術及び財政問題を認識するには限界がある (Henriques and Sadorsky, 2008)。石油のように値動きが激しく不安定な化石燃料からの転換にかかる経済的及び取引費用は多く見積もられ過ぎたため、価格高騰が落ち着くと、こうした化石燃料への逆戻りが常に起こる。制度的、経済的、社会的ロックインのため、なじみのあるエネルギー源からの転換がなかなか進まない確率が非常に高い (Unruh and Carillo-Hermosilla, 2006)。動機付けを行う 1 つの方法は、高い石油価格の経済的福祉コストが、効果的な気候政策のコストを上回るという現象を実現することである (Viguer and Vielle, 2007)。

1.4.2.3 社会文化的な障壁

社会文化的な障壁または懸念は、それぞれ起源が異なり、本質的に社会的及び個人的な価値観と規範に関連している。こうした価値観と規範は、再生可能エネルギー技術の認知と承認、及びこうした技術の普及によって個人、グループ、社会が与える潜在的効果に影響を及ぼす。障壁は、このような社会文化的懸念に十分な注意を向けていないことから生じる可能性があり、行動、自然の生息地、自然及び文化遺産に与える影響に関連している可能性がある。これには、生物多様性、生態系、景観美学、水・土地の利用、水・土地の使用権、また競合する使用に関する使用可能性に与える影響も含まれる (9.5.1.1 節参照)。

自分の土地に風力発電基地が建設されている農業従事者は、めったに異議を唱えない。実際に、タービンの下で、農業や放牧を継続して行いながら、彼らは常にタービンを、歓迎すべき追加収入源として、所有者 (デンマーク) または土地の貸与者 (アメリカ) の立場から見ている。しかしながら、再生可能エネルギーの別の形態では、土地の多重使用は不可能である (Kotzebue et al., 2010)。水力発電用のダム建設のため、娯楽や風景を楽しむ河川を奪い合うことになり (Hynes and Hanley, 2006)、貯水池のために土地を農業、森林、または都市開発のために使用することができなくなる。大規模な太陽エネルギーや風力は、他の価値観と対立する可能性があり (Simon, 2009)、自然保護区や景観の美しさなど土地に対するその他の社会的価値観と対立する可能性もある (Groothuis et al., 2008; Valentine, 2010)。特定のプロジェクトは、貧困層に否定的な意味合いを持つ可能性もある (Mariita, 2002)。土地の利用は、一部の開発途上国では、論争を招く問題になり得る。たとえば、パプア・ニューギニアの村人たちが、自分たちが唯一の受益人である小水力発電システムなどに対して、自分たちの土地の使用に対する料金の支払いを主張することもあるだろう (Johnston and Vos, 2005)。

よって、気候変動緩和目標達成の後押しをするために、再生可能エネルギーの導入を急速かつ大規模に拡大する必要性がある場合、社会的な承認は、重要な要素なのである。なぜなら、大規模な実施は、一般の人々の理解やサポートがあって初めてうまく進むからである。再生可能エネルギーの社会的な承認は、一般的に広がりつつある。家庭用太陽光発電 (PV) または家庭用温水システムを屋上に設置することは、家の所有者が環境的な取り組みを行っていることの象徴となった (Bruce et al., 2009)。しかしながら、風力発電基地に関しては、設置に至るまでに、依然として地域の反対意見と戦わなければならない (Pasqualetti et al., 2002; Klick and Smith, 2010; Webler and Tuler, 2010)。また、従来のエネルギー源同様、大規模な再生可能エネルギーの発電施設から伸びる地上の送電線に対する反対意見もある (Furby et al., 1988; Hirst and Kirby, 2001; Gerlach, 2004; Vajjhala and Fischbeck, 2007; Puga and Lesser, 2009)。

こうした障壁を克服するためには、再生可能エネルギー技術の大規模な用途に関連したより客観的な機会同様、主観的及び心理学的な側面に関連した献身的なコミュニケーション活動が必要になるだろう。同時に、計画決定への一般参加

に加えて、再生可能エネルギーの導入に関する利益や費用を分配する際の公平性と平等性は、等しく重要な役割を担い、避けることが出来ない (9.5.2 節参照)。地方における計画策定問題がどのように再生可能エネルギーの取り入れに影響を与えるかという議論については、第 7～11 章を参照のこと。第 11 章では、再生可能エネルギーシステムへの移行に必要な社会的かつ制度的な促進的環境についてのさらに幅広い議論が展開される。不要なプロジェクトに対する反対意見は政策に影響され得るが、社会受容性は、ゆっくりと変わる可能性がある。

1.4.2.4 制度的及び政策的障壁

既存の産業、インフラ、エネルギー市場の規制

独占力は、市場の失敗 (上記参照) につながるだけでなく、エネルギー市場の規制によって適切に対処されなければ、制度的障壁として認識され得る。

大部分の国のエネルギー産業は、少数の企業の上に成り立っており (電気やガスの供給など、特定の区分では 1 企業の場合もある)、きわめて集中型のインフラを運営している。これらのシステムは、垂直的に統合された独占企業として発展した。こうした独占企業は、手頃な値段の信頼性がある電気またはガスを確実に供給出来るようにするため、政策によって支えられた大規模な従来の中央発電施設にのみ力を注いでいる可能性がある。そうした独占企業は、分散型のより小規模な供給技術に対して排他的である場合もある (World Bank, 2006)。

よって、多くの国々では、エネルギー関連企業に適用される規制は、依然として独占または独占に近い供給者向けに作成されている。また、エネルギーシステムは、大規模かつ集中型で、高出力密度、高電圧であると仮定して、技術規制や基準は発展してきたため、再生可能エネルギーシステムに対して不必要に制限的である場合がある。歴史的な発展プロセスにおいて、海上交通路や沿岸地域に適用される規則のほとんどは、洋上風力発電及び海洋エネルギーシステムが開発されつつあるずっと以前に作成されたため、このようなシステムを含む複数の使用法の可能性を考慮していない (第 7 章参照)。

エネルギー市場の自由化が、1990 年代にいくつかの国で起こり、過去 10 年間にはヨーロッパの広範囲で実現した。こうした規制の一部の変化によって、独立系発電事業者の操業が可能となるが、アメリカでは、多くの小規模な再生可能エネルギープロジェクト計画は、規制により義務付けられた規模により、ほとんどの場合、排除された (Markard and Truffer, 2006)。多くの国々では、現在の規制は、依然として主要な集中型生産、送電、配電システムを保護し、再生可能エネルギーなどの代替技術の導入を困難にするものである。現行の法律及び規制の検証及び修正が、とりわけ再生可能エネルギーを電力系統へ統合するための、技術導入の最初の一步となる (Casten, 2008)。

発電部門に対処する規制に加えて、局所的な建築基準法によって、美観または歴史的保全の理由から、屋上のソーラーパネルの設置、または風力タービンの導入が出来ない場合もある (Bronin, 2009; Kooles, 2009)。

知的所有権

知的所有権は、複雑で相反する役割を担う。再生可能エネルギーの技術開発は、特に太陽光発電 (PV) や風力発電において、近年急速に行われるようになってきた (Lior, 2010; 第 8 章と 11 章) 参照)。基礎技術の大部分は、公有財産であり、産業への過少投資につながる可能性がある。特許によってこれらの新しい開発の多くが守られるため、研究開発への民間投資が促進される (Beck, 1995; Baumol and Oates, 1998)。こうした便益を無効にするものが、特許によって、発展途上国が低コストのこれらの新技術へアクセスすることを不当に制限するという懸念である。こうしたことは、新薬に関してよく生じる (Barton, 2007; Ockwell et al., 2010; 第 3 章と第 7 章)。同様に、発展途上国の企業が、自社の製品に対する特許権保護を必要としている状況も確かに存在する。

国際貿易における関税

数か国によって課された関税障壁 (輸入関税) 及び非関税障壁は、一部の再生可能エネルギー技術における取引を大幅に減少させる。再生可能エネルギーなどの環境に配慮する商品やサービスに課された関税の引き下げまたは撤廃についての検討は、2001 年以来、貿易交渉のドーハ・ラウンドに組み込まれてきた。多くの開発途上国は、こうした関税の引き下げは、主として先進国に経済的な恩恵をもたらすと主張しており、これまでのところ、何の解決にも至っていない。先進国は、多くの場合発展途上国で生産されているバイオ燃料を輸入する際に関税を課してきたため、その幅広い使用を妨げている (Elobeid and Tokgoz, 2008; 2.4.6.2 節参照)。

政府の財政支援の配分

1940 年代以来、先進国の政府は、多額の公的資金をエネルギー関連の研究、開発、実証に費やしてきた。この中で割合が群を抜いて多かったのが、原子力エネルギーシステムであった (IEA, 2008b; 10.5 節も参照)。しかしながら、2008 年から 2009 年にかけての金融危機を受けて、数か国の政府が一部の「景気刺激策」を活用し、再生可能エネルギーまたはエネルギー効率化を促した (9.3.1.3 節)。同様に、個人消費に対する税額控除は、再生可能エネルギーへの最近の政策減税にもかかわらず、非再生可能エネルギー源 (たとえば石油探査または新しい石炭燃焼システムなど) に偏っている

(GAO, 2007; Lior, 2010)。開発中の新型エネルギーシステムの政府支援に対する政策合理性については、1.5 節及び第 11 章で議論される。

1.4.3 問題

問題 を政策及びプログラムへ簡単に適用することは出来ない。

資源があまりにも少ないため、特定の場所や目的で役に立たないという問題もある。たとえば、風速があまりにも弱く変動性があるため、信頼性の高い電力を生産出来ない場合、地形が平坦であったり、水流が不十分なため、水力発電のためのマイクロ水力発電や貯水池式発電システムを維持出来ない場合、工業への需要が非常に大きいために、地域的な再生可能エネルギー源では、供給しきれない場合などである (Painuly, 2001)。

風力や太陽エネルギーなどの再生可能エネルギー源は、変動性があり、必要な時に送電が常に可能であるとは限らない (第 8 章)。その上、多くの再生可能エネルギー源のエネルギー密度が比較的低いため、非常に大規模な産業施設のような目的に対しては、単独での電力レベルが不十分な場合もある。バイオマス生産のための大規模な植林、または広域な貯水池の建設が、森林伐採につながる可能性もあり、二酸化炭素やメタンの直接及び間接的排出や土壌の流出など関連する悪影響を伴う場合もある (Melillo et al., 2009; 第 2 章及び 5.6.1 節)。

1.5 政策、研究、開発、普及、及び実施戦略の役割

さらなる増加と多種多様な再生可能エネルギー政策は、様々な要因に刺激され、近年、再生可能エネルギー技術の急成長を後押しした (11.2 節)。二酸化炭素排出量の削減に加えて、以下のような多くの目的を達成するために、政府は、再生可能エネルギー政策を制定した。地域の環境及び健康上の利益の創出、特に地方でのエネルギーアクセスの促進、エネルギー技術や資源のポートフォリオを多様化することによるエネルギー安全保障上の目的の推進、潜在的な雇用機会を通じた社会経済の発展の促進などである。一般的に、発展途上国では、エネルギーアクセスが、主要なドライバーとなってきた。その一方で、先進国では、エネルギー安全保障及び環境への懸念が、最重要事項であった (第 9 章及び 11.3 節)。

気候変動の緩和目標として、再生可能エネルギー技術の開発と普及の支援を望んでいる政策決定者にとって、再生可能エネルギーがライフサイクルの観点から、排出量を削減する可能性 (各技術の章で取り扱っている問題) を検討することが重要である。たとえば、バイオ燃料の使用によって、化石燃料からの温室効果ガス排出量が相殺される一方で、純便益¹¹を決定するために直接的及び間接的土地利用の変化も評価されなければならない。場合によっては、これが、二酸化炭素吸収からの利益を凌駕する可能性があり、温室効果ガス排出量の増加につながることもさえないのだ (Fargione et al., 2008; Scharlemann and Laurance, 2008; Searchinger et al., 2008; Krewitt et al., 2009; Melillo et al., 2009)。この影響についての本格的な議論に関しては、2.5.3 節及び 9.3.4 節で参照可能である。

様々な政策は、研究開発、試験、導入、商業化、市場準備、市場浸透、運転保守、監視、既存システムへの統合など、開発連鎖のあらゆる段階に取り組むために策定された。こうした政策は、上記で検討された障壁や市場の失敗を克服するために、策定、実施される (1.4.2 節, 11.1.1 節, 11.4 節及び 11.5 節)。

典型的に取り扱われる主要な 2 つの市場での失敗は、以下の通りである。1) 温室効果ガスの外部費用が適切なレベルで価格化されていない、2) 再生可能エネルギーのような低炭素技術の導入によって、イノベーターが得た収益を上回る社会への便益が生み出され、こうした取り組みへの過少投資につながる (11.1 節及び 11.4 節)。もし a) イノベーション市場の失敗の否定的な結果が軽減され、b) 気候保護を超えるその他の目標に取り組むのであれば、気候変動の緩和政策 (一般に低炭素技術の奨励) に加えて再生可能エネルギー政策の実施 (再生可能エネルギーのみを推進する政策) が正当化され得る。

1.5.1 政策の選択肢: 傾向、経験及び評価

再生可能エネルギー政策の焦点は、冷暖房や輸送部門を取り込むために、ほぼ電力集中の状態から転換することである。こうした傾向は、様々な再生可能エネルギー技術の開発やその生産と実施 (第 2~7 章参照) における成功例の増加に加え、特に 2004~2005 年以降の再生可能エネルギーへの年間投資額の急増や融資機関の多様化などと一致する (11.2.2 節)。

政策及び意思決定者は、以下のような様々な方法で市場にアプローチする。税金や補助金の条件を等しくする、資源の効果的な使用に対する規制環境を整える、すべての選択肢の外部性を内在化し、税金や補助金を介した価格を修正、設定する、指示や管理規定を制定する、研究開発に対する政府の支援を提供する、政府調達優先事項を提供する、市場志向の規制を制定するなどの方法であるが、これらすべてによって新技術の市場が形成される。価格のようなこうした選択肢の一部は、関連した消費者の好みを修正し、需要の牽引を提供し、特定の技術の使用を強化する。政府支援の研

¹¹ このような土地利用の変化は、バイオマスを基盤とした再生可能エネルギーに限定されるわけではないことに留意する。たとえば、風力発電や水力開発、また石炭の露天採掘や燃焼灰の貯留なども、土地利用に悪影響を与える。

究開発などの他の選択肢は、供給圧力を介して新製品開発の努力につながる (Freeman and Soete, 2000; Sawin, 2001; Moore, 2002)。世界的に承認された再生可能エネルギー政策の選択肢や分類の一覧は、存在しない。簡略化するために、本報告書の中では、以下の分類によって研究開発や普及政策を体系化した (11.5 節)。

- ・ **財政的インセンティブ**: 個人、家庭、企業などのアクターが、所得税やその他の税を介して、国庫への負担を減額される。
- ・ **公共財政支援**: 財務リターンが期待出来る公的支援 (ローン、株式) や、金融債務の負担 (保障)
- ・ **規制**: 適用されるものの行為を指導または制御する規則

新しい低炭素技術の研究開発、イノベーション、普及、展開は、イノベーターが得たものを上回る社会への便益が生み出されるため、このような取り組みに対しては過少投資となってしまう。そのため、政府の研究開発は、再生可能エネルギー技術の促進において重要な役割を担う。すべての政府が公的資金によって研究開発を支援出来る財政的余裕があるわけではないが、ある程度の支援が可能な大部分の国では、再生可能エネルギーへの公的な研究開発によって、初期段階の技術の実行を強化されたため、初期採用者のニーズを満たすことが可能になった。公的な研究開発は、すでに商業的環境で機能する既存の技術開発も改良する。研究開発に関する政策についての本格的な議論は、11.5.2 節で参照可能である。

公的な研究開発への投資は、その他の政策手段、とりわけ同時に新しい再生可能エネルギー技術の需要を促進する、普及政策によって補完された場合に、もっとも効果を上げる。そして、研究開発及び普及政策を合わせて実行することで、研究開発への民間部門の投資など、プラスのフィードバックサイクルを生み出すのである。技術開発における比較的初期段階の普及政策によって、民間の研究開発や使用、コスト削減を通して学習を加速する (11.5.2 節)。多くの素晴らしい技術が研究開発段階から商業化へ移行する段階で失敗したことは、新製品の「死の谷 (valley of death)」という言葉を生み出した (Markham, 2002; Murphy and Edwards, 2003; IEA, 2009b; 11.5 節)。石油ショック後に、再生可能な技術を市場の主流に組み込む試みは、大部分の先進国で失敗に終わった (Rouleau and Loyd, 2008)。多くの技術は、十分に発達しておらず、費用競争力にも到達していなかったため、いったん石油価格が再び下がると、こうした技術を実施する関心も消えてしまった。太陽熱温水ヒーターは、いつでも市場に参入する準備が整い、こうした多くのシステムに導入された政策減税を受けた技術であった。しかし、こうした政策減税がなくなると、市場はおおむね崩壊した (Dixit and Pindyck, 1994)。

一部の政策は、再生可能エネルギーの普及を急増させることに、より効果的・効率的であると示された。しかし、万能な政策はなく、政策やその設計や実施は地域ごとにばらつきがあり、優勢な状態に左右される。事例によれば、様々な政策やその組み合わせによって、技術の成熟度や適切な額の資本の利用可能性、国内及び地域的な再生可能エネルギー資源基盤などの要因次第で、より効果的かつ効率的になり得る。主要な政策要素には、コストをカバーする適切な価値が含まれており、社会的便益、包括性、管理の簡便性から成る。さらに、政策設計や実施の詳細には、技術、市場、その他の要因の進展に適応する柔軟性も含まれるが、それらは、使用される特定の政策と、効果や効率を決定する際に同じくらい重要であり得る (11.5 節)。明白で持続的な矛盾のない動機 (特定の政策の予測可能性から炭素価格やその他の外部性、再生可能エネルギーの長期的な目標まで) は、適切な普及率や低コストの用途の進展を可能にするための投資リスクを十分に軽減するために不可欠であるとみなされている (11.2 節, 11.4 節及び 11.5 節)。

再生可能エネルギー電力を重視した普及政策に関しては、定量的な政策 (割り当て、どの程度の発電量が再生可能エネルギー源由来であるべきかを定義する再生可能エネルギー利用割合基準(RPS)、入札・競売政策など) や価格に基づいた政策 (固定価格、割増価格の固定価格買取制度 (FIT))、主として割り当てや固定価格買取制度を、効果や効率基準を重視して評価する豊富な文献がある。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。多くの研究によって、「適切に策定され」「うまく実施されている」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支援政策の中で、これまででもっとも効率的 (受けた支援と発電コストとの比較で定義) かつ効果的 (消費電力のうち再生可能エネルギー電力の割合を増加させる能力) であったことを裏付けている (Ragwitz et al., 2005; Stern, 2007; de Jager and Rathmann, 2008; 11.5.4 節)。割り当て政策は、ある程度はうまく機能しており、たとえば、長期的な協定などでリスクを低減するように策定されれば、効果的かつ効率的になり得る。

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。これまで、財政的インセンティブは、もっとも一般的に適用されるインセンティブである補助金とともに、再生可能エネルギーの冷暖房を後押しするためによく用いられる政策であった。再生可能エネルギー熱を使用する義務は、公的な財政支援を受けずに成長を奨励する可能性を持つ、と注目を集めている (11.5.5 節)。

様々な政策が、輸送用の再生可能エネルギーの普及を後押しするために実施されてきた。ただし、こうした政策や関連する事例の大多数が、バイオ燃料に特有のものであった。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、直接的な政府支払や減税などがある。輸送の燃料消費においてバイオ燃料がもっとも高い割合を占める国々には、罰金などの義務化と財政インセンティブ(最

大の税額控除) とを組み合わせる混合システムがあった。政策は、国際的なバイオ燃料・ペレット取引の発展に影響を与えてきた (11.5.6 節)。

再生可能技術の使用を増加させることを目的とするいくつかのタイプの政策に関しては、今や多くの実例がある。デンマークは、再生可能な電力生産に関する長期的な契約を制定することで、大規模風力タービンの生産と普及において世界トップとなった (REN21, 2009)。中でも、ドイツとスペインは、一定の長期期間にわたって生産者に対して再生可能エネルギー電気料金を十分に高いものとして保証する固定価格買取制度によって、同様の需要牽引型メカニズムを活用してきた。ドイツは世界有数の太陽光発電 (PV) 導入国であるが、2008 年には、風力タービンでも世界最大の設備容量を持つ国となった (REN21, 2009)。アメリカでは、再生可能エネルギー技術に関して、大部分を政府の補助金に頼ってきたが、この供給圧力型のアプローチは、需要牽引型ほどはうまくいかなかった (Lewis and Wiser, 2007; Butler and Neuhoff, 2008)。中国では、温水暖房、太陽光発電 (PV)、風力タービンの再生可能エネルギー技術を、直接これらの技術に投資することによって奨励してきた。中国はすでに、輸出と国内利用の双方において太陽熱温水システムの主要生産国となっており、太陽光発電 (PV) 技術の生産国としては今や世界トップを誇っている (REN 21, 2009)。

1 つの重要な課題は、再生可能エネルギーと炭素価格政策がお互いにトレードオフではなく、相乗効果になるような方法を見つけ出すことである (11.5.7 節)。政策の選択、設計、実施レベル (地域的、国、世界) によって、影響はプラスにもマイナスにもなり得る。マイナスの影響としては、炭素リーケージやリバウンド効果の危険性があるだろう。こうしたケースについては、政策設計の際に考慮に入れる必要がある。長期的には、再生可能エネルギーの供給技術やプロセスの開発事業者や管理者に対する知見を強化すれば、緩和コストの削減にも役立つ可能性があり、また炭素の価格付けによって、再生可能エネルギーの競争力を高めることが出来る (11.1.1 節及び 11.5.7 節)。

1.5.2 促進的環境

再生可能エネルギー技術は、「促進的な」政策と併せて実施された場合、より大きな役割を果たすことが出来る。再生可能エネルギーに有利な、あるいは「促進的な」環境は、次のようにして作り出すことが出来る。特定の政策と他の再生可能エネルギー政策、さらにその他の非再生可能エネルギー政策との間に起こり得る相互作用に対処することによって、プロジェクトの構築や配置のための財政及び建築許可を、再生可能エネルギーの開発事業者が得る可能性を理解することによって、再生可能エネルギーの導入や発電のためにネットワークや市場へのアクセスの障壁を取り除くことによって、教育や意識啓発を促進することによって、また技術転移を可能にすることによってである。同様に、「促進的」環境が存在すれば、再生可能エネルギーを促進するための政策の効率や効果を高めることが出来る (11.6 節)。

1.5.2.1 再生可能エネルギー政策及び非再生可能エネルギー政策の補完

あらゆる形態の再生可能エネルギーの回収と生産には、空間的な配慮が不可欠であるため、政策は、土地利用、雇用、輸送、農業、水、食糧安全保障、通商上の懸念、既存のインフラ、及びその他の部門特有の問題を考慮する必要がある。お互いに補完しあう政府政策は、成功する可能性がより高いが、個々の再生可能エネルギー政策の設計も、他の政策との連携がうまくいくかどうかに影響を与える。たとえば、エネルギーから農業や水関連の政策など複数の部門にわたる政策の相補性を、それぞれの独立した目標も考慮しながら、積極的に促進する試みは、簡単な課題ではなく、可能な相殺によって、勝つか負けるか、またはお互いに有利な状況を作り出す可能性がある。

1.5.2.2 再生可能エネルギーのインフラ、ネットワーク及び市場の提供

たとえば、電力部門における再生可能エネルギーを促進すれば、政策によって、技術的 (第 8 章) 及び制度的 [第 11 章] の双方の観点から、送電、配電システムへの統合に取り組むことが必要となる。送電システムは従来の多くの場合、集中的な供給と変動的で分散的であることが多い、近代的な再生可能エネルギーの供給の、両方を扱えなければならず、多くの場合、再生可能エネルギーの供給は変動的で分散的であり (Quezada et al., 2006; Cossent et al., 2009)、システムの管理は、アクセスを容易にし、また調和するための調整を行う必要がある。現行の規則と法律は、現在の集中的グリッドの信頼性を保証する目的で策定されたが、再生可能電力技術の幅広い導入を妨げている可能性がある。

輸送部門では、バイオ燃料用インフラ、水素補給用インフラ、バッテリーないしハイブリッド車 (系統または非系統の再生可能な発電から「燃料供給」される) に必要なインフラ需要にも取り組む必要がある (Tomic and Kempton, 2007; 1.4.2.4 節及び 11.6.5 節)。

ブラジルは、サトウキビにまつわる地方の農業開発プログラムの策定に、特に効果的である。ブラジルでは、サトウキビから生産されたバイオエタノールは、現在では、火花点火の伝播の約 40% を占め、ディーゼルバスや農業散布機への使用も実証済みである。本来なら廃棄されているバガスは、気化され、発電用ガスタービンの運用に使用されている一方で、「廃」熱は、砂糖からバイオエタノールへのバイオリファイナリープロセスで使用される (Pousa et al., 2007; Searchinger et al., 2008)。

1.5.3 構造的転換

意思決定者が再生可能エネルギーの割合を増加させ、同時に意欲的な気候変動緩和の目標を達成しなければならない場

合、長期にわたる取り組みや実例から学ぶことは重要である。一部の分析によれば、原子力や二酸化炭素回収・貯蔵を伴う大規模な石炭（天然ガス）発電所のような、大規模で低炭素の施設は、急速な機能向上が可能であるため、もし有効であれば、二酸化炭素の削減目標に到達することが出来る（MIT, 2003, 2007, 2009）。あるいは、北アメリカ及びヨーロッパにおける過去 10 年間の天然ガス使用タービンの拡大や、発電用の風力や太陽熱技術の急速な成長（図 1.12）によって、モジュール方式やさらに広範囲にわたって分散された小規模ユニットも急速に機能が向上し、大規模なエネルギー需要に対応出来るようになることが実証されている。これらのアプローチやそのコストの各々に対する技術的かつ経済的ポテンシャルは、気候変動に取り組む際の再生可能エネルギーの規模や役割に重要な影響力を与える（Pilavachi, 2002; MIT, 2003, 2007, 2009; Onovwiona and Ugursal, 2006）。高い割合で再生可能エネルギーを組み込んだ温室効果ガス濃度安定化レベルに到達するために、今日のエネルギーシステムにおける構造的転換は、今後数十年間にわたって避けられない。低炭素エネルギーへのこのような推移は、以前の推移（たとえば、木材から石炭、石炭から石油への推移）とは違っている。なぜなら、可能な数十年内の期間では、再生可能エネルギーは高い割合で普及している未来とは異なり、既存のエネルギー構造に照らし合わせて構成されたシステムに、統合されなければならないからだ（11.7 節及び第 10 章）。

再生可能エネルギーを基盤としたエネルギーシステムの構造的転換は、再生可能エネルギーを併用することでエネルギー効率に対し顕著な効率を現す。そして、研究開発を超えて技術導入を支援する追加的な政策が必要である。それは、教育や意識啓発などの促進的環境の創出、農業、運輸、水管理、都市計画など幅広い部門にかかわる統合的な政策の体系的発展などである（11.6 節 and 11.7 節）。手段を適切かつ信頼性のあるやり方で織り交ぜることは、エネルギーインフラが依然として開発されておらず、エネルギー需要が将来大幅な増加を予測されている場合、さらに重要である（11.7 節）。

REFERENCES

- Ahman, M., and L.J. Nilsson (2008).** Path dependency and the future of advanced vehicles and biofuels. *Utilities Policy*, **16**(2), pp. 80-89.
- Ambrose, M. (2009).** Energy-efficient planning and design. In: *Technology, Design, and Process Innovation in the Built Environment*. P. Newton, K.D. [Hampson](#), and R. [Drogemuller \(eds.\)](#), Taylor and Francis, New York, pp. 238-249.
- Archer, C.L. and Jacobson M.Z (2005).** Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical Research*, **110**, D12110.
- Ashden Awards for Sustainable Energy, 2008.** *Rapidly growing solar installer also provides clean cooking*. Ashden Awards for Sustainable Energy, London, UK. Available at: www.ashdenawards.org/winners/grameen08.
- Asif, M., and T. Muneer (2007).** Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**(7), pp. 1388-1413.
- Bailey, O., and E. Worrell (2005).** *Clean Energy Technologies: A Preliminary Inventory for the Potential for Electricity Generation*. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA.
- Barker, T., I. Bashmakov, A. Alharthi, M. Amann, L. Cifuentes, J. Drexhage, M. Duan, O. Edenhofer, B. Flannery, M. Grubb, M. Hoogwijk, F.I. Ibitoye, C.J. Jepma, W.A. Pizer, and K. Yamaji (2007).** Mitigation from a cross-sectoral perspective. In: *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, and L.A. Meyer (eds), Cambridge University Press.
- Barton, J.H. (2007).** *Intellectual Property and Access to Clean Energy Technologies in Developing Countries: An Analysis of Solar Photovoltaic, Biofuel, and Wind Technologies*. Issue Paper No.2, International Center for Trade and Sustainable Development, Geneva, Switzerland.
- Barua, D.C., T.P. Urmee, S. Kumar, and S.C. Bhattachary (2001).** A photovoltaic solar home system dissemination model. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **9**(4), pp. 313-322.
- Bator, F.M. (1958).** The anatomy of market failure. *The Quarterly Journal of Economics*, **72**(3), pp. 351-379.
- Baumol, W.J., and W.E. Oates (1998).** *The Theory of Environmental Policy*. Cambridge University Press.
- Baumol, W.J., J.C. Panzar, and T.D. Willig (1982).** *Contestable Markets and the Theory of Industry Structure*. Harcourt Brace Jovanovich, New York, NY, USA.
- Bazilian, M., and F. Roques (2008).** *Analytical Methods for Energy Diversity And Security: Mean- Variance Optimization for Electric Utilities Planning: A Tribute to the Work of Dr. Shimon Awerbuch*. 1st ed. Elsevier, Boston, MA, USA.
- Beck, U. (1995).** *Ecological Politics in an Age of Risk*. Blackwell Publishers, Inc., Malden, MA, USA.
- Becker, G.S. (1971).** *Economic Theory*. Alfred A. Knopf, New York, NY, USA.
- BGR (2009).** *Energierohstoffe 2009. Reserven, Ressourcen, Verfügbarkeit*. Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Germany.
- Bodart, M., and D. Herde (2001).** Global energy savings in office buildings by the use of daylighting. *Energy and Buildings*, **34**, pp. 421-429.
- Boden, T. and G. Marland (2010).** *Global CO₂ Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-2007*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA. Available at: cdiac.ornl.gov/ftp/ndp030/global.1751_2007.ems.
- Boden, T.A., G. Marland, and R.J. Andres (2009).** *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, TN, USA. Available at: cdiac.ornl.gov/trends/emis/overview_2007.html.
- Bond, T., and H. Sun (2005).** Can reducing black carbon emissions counteract global warming? *Environmental Science and Technology*, **39**(16), pp. 5921-5926.
- Bromley, C.J., M.A. Mongillo, B. Goldstein, G. Hiriart, R. Bertani, E. Huenges, H. Muraoka, A. Ragnarsson, J. Tester, and V. Zui, (2010).** Contribution of geothermal energy to climate change mitigation: the IPCC renewable energy report. In: *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-30 April 2010*. Available at: www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/0225.pdf.
- Bromley, D.W. (ed.) (1986).** *Natural Resource Economics: Policy Problems and Contemporary Analysis*. Kluwer Nijhoff, Hingham, MA, USA.
- Bronin, S.C. (2009).** *Solar rights*. Boston University Law Review, **89**, pp. 1217.
- Brookes, L.G. (2000).** Energy efficiency fallacies revisited. *Energy Policy*, **28**(6-7), pp. 355-366.
- Brown, D., F. Marechal, and J. Paris (2005).** A dual representation for targeting process retrofit, application to a pulp and paper process. *Applied Thermal Engineering*, **25**(7), pp. 1067-1082.
- Bruce, A., M.E. Watt, and R. Passey (2009).** Who buys PV systems? A survey of New South Wales residential PV rebate recipients. In: *47th Annual Conference of the Australia and New Zealand Solar Energy Society*, Townsville, Australia, 29 September – 2

October 2009.

- Bruckner, T., O. Edenhofer, H. Held, M. Haller, M. Lüken, N. Bauer, and N. Nakicenovic (2010).** Robust options for decarbonisation. In: *Global Sustainability – A Nobel Cause*. H.J. Schellnhuber, M. Molina, N. Stern, V. Huber, and S. Kadner (eds.), Cambridge University Press, pp. 189-204.
- Bugge, J., S. Kjaer, and R. Blum (2006).** High-efficiency coal-fired power plants development and perspectives. *Energy*, **31**(10-11), pp. 1437-1445.
- Butler, L., and K. Neuhoff (2008).** Comparison of feed-in tariff, quota, and auction mechanisms to support wind power development. *Renewable Energy*, **33**(8), pp. 1854-1867.
- Cancun Agreements (2010).** Cancun Agreements. *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*, Cancun, Mexico. available at: <http://unfccc.int/documentation/decisions/items/3597.php?such=j&volltext=%22cancun%20agreements%22#beg>
- Casten, T.R. (2008).** Recycling energy to reduce costs and mitigate climate change. In: *Sudden and Disruptive Climate Change: Exploring the Real Risks and How We Can Avoid Them*. M.C. MacCracken, F. Moore, and J.C. Topping, Jr. (eds.), Earthscan, London, UK.
- Chasapis, D., I. Papamechael, A. Aidnis, and R. Blanchard (2008).** Monitoring and operational results of a hybrid solar-biomass heating system. *Renewable Energy*, **33**, pp. 1759-1767.
- Chaurey, A., and T. Kandpal (2010).** Assessment and evaluation of PV based decentralized rural electrification: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(8), pp. 2266-2278.
- Clancy, J.S., F.U. Malik, I. Shakya, and G. Kelkar (2007).** Appropriate gender-analysis tools for unpacking the gender-energy-poverty nexus. *Gender & Development*, **15**(2), pp. 241-257.
- Clarke, L., J. Edmonds, V. Krey, R. Richels, S. Rose, and M. Tavoni (2009).** International climate policy architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios. *Energy Economics*, **31**(Supplement 2), pp. 64-81.
- Cleveland, C.J., R. Costanza, C.A.S. Hall, and R.K. Kaufmann (1984).** Energy and the US economy: A biophysical perspective. *Science*, **225**, pp. 890-897.
- Coase, R.H. (1960).** The problem of social cost. *Journal of Law and Economics*, **3**, pp. 1-44.
- Cossent, R., T. Gomez, and P. Frias (2009).** Towards a future with large penetration of distributed generation: Is the current regulation of electricity distribution ready? Regulatory recommendations under a European perspective. *Energy Policy*, **37**, pp. 1145-1155.
- CSD (2001).** *Commission on Sustainable Development. Report of the Ninth Sessions, 5 May 2000 and 16-27 April 2001*. Official Records 2001, Supplement No. 9, Economic and Social Council, United Nations, New York, NY, USA. Available at: www.un.org/esa/sustdev/csd/ecn172001-19e.htm.
- de Jager, D., and M. Rathmann (2008).** *Policy Instrument Design to Reduce Financing Costs in Renewable Energy Technology Projects*. ECOFYS, Utrecht, The Netherlands, 142 pp.
- Debreu, G. (1959).** *Theory of Value: An Axiomatic Analysis of Economic Equilibrium*. Yale University Press, New Haven, CT, USA.
- Demirbas, A. (2009).** Global renewable energy projections. *Energy Sources*, **4**, pp. 212-224.
- Desertec (2010).** *Desertec: An Overview of the Concept*. Desertec Foundation, Hamburg, Germany.
- de Vries, B., M.M. Hoogwijk, and D. van Vuuren (2007).** Renewable energy sources: Their global potential for the first half of the 21st century at a global level: An integrated approach. *Energy Policy*, **35**(4), pp. 2590-2610.
- Di Maria, C., and E. van der Werf (2008).** Carbon leakage revisited: unilateral climate policy with directed technical change. *Environmental and Resource Economics*, **39**(2), pp. 55-74.
- Dietz, T., G.T. Gardner, J. Gilligan, P.C. Stern, and M.P. Vandenberg (2009).** Household actions can provide a behavioral way to rapidly reduce US carbon emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**(44), pp. 18452-18456.
- Dixit, A.K., and R.S. Pindyck (1994).** *Investment Under Uncertainty*. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA.
- Dornburg, V., D. van Vuuren, G. van de Ven, H. Langeveld, M. Meeusen, M. Banse, M. van Oorschot, J. Ros, G.J. van den Born, H. Aiking, M. Londo, H. Mozaffarian, P. Verweij, E. Lysen, and A. Faaij (2010).** Bioenergy revisited: Key factors in global potentials of bioenergy. *Energy & Environmental Science*, **3**, pp. 258-267.
- Edenhofer, O., B. Knopf, G. Luderer, J. Steckel, and T. Bruckner (2010).** *More Heat than Light? On the Economics of Decarbonization*. Routledge, London, UK.
- Ehrlich, P.R., and J.P. Holdren (1971).** Impact of population growth. *Science*, **171**(3977), pp. 1212-1217.
- EIA (2010).** *Independent Statistics and Analysis, International Data*. United States Energy Information Administration, Washington, DC, USA.
- Elobeid, A. and S. Tokgoz (2008).** Removing distortions in the U.S. ethanol market: What does it imply for the United States and Brazil? *American Journal of Agricultural Economics*, **90**(4), pp. 918-932.

- EPRI (1978).** *Geothermal Energy Prospects for the Next 50 Years*. ER-611-SR, Special Report for the World Energy Conference, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA.
- ESMAP (2007).** *Technical and Economic Assessment of Off-grid, Mini-grid and Grid Electrification Technologies*. Energy Sector Management Assistance Program, The World Bank Group, Washington, DC, USA.
- Fargione, J., J. Hill, D. Tilman, S. Polasky, and P. Hawthorne (2008).** Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*, **319**(5867), pp. 1235-1238.
- Fellows, A. (2000)** *The Potential of Wind Energy to Reduce Carbon Dioxide Emissions*. Garrad Hassan and Partners Ltd., Glasgow, Scotland.
- Fisher, B., N. Nakicenovic, K. Alfsen, J. Corfee Morlot, F. de la Chesnaye, J.-Ch. Hourcade, K. Jiang, M. Kainuma, E. La Rovere, A. Matysek, A. Rana, K. Riahi, R. Richels, S. Rose, D. van Vuuren, and R. Warren (2007).** Issues related to mitigation in the long term context. In: *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, and L.A. Meyer (eds.), Cambridge University Press, pp. 169-250.
- Foxon, T., and P. Pearson (2008).** Overcoming barriers to innovation and diffusion of cleaner technologies: some features of a sustainable innovation policy regime. *Journal of Cleaner Production*, **16**(1, Supplement 1), pp. S148-S161.
- Frankl, P., A. Masini, M. Gambrale, and D. Toccaceli (1998).** Simplified life-cycle analysis of PV in buildings: Present situation and future trends. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **6**, pp. 137-146.
- Freeman, C., and L. Soete (2000).** *The Economics of Industrial Innovation*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Furby, L., P. Slovic, B. Fischhoff, and G. Gregory (1988).** Public perceptions of electric powerlines. *Journal of Environmental Psychology*, **8**(1), pp. 19-43.
- GAO (2007).** *Federal Electricity Subsidies: Information on Research Funding, Tax Expenditures and Other Activities that Support Electricity Production*. Report to Congressional Requesters, Government Accountability Office, Washington, DC, USA.
- Gerlach, L.P. (2004).** Public reaction to electricity transmission lines. In: *Encyclopedia of Energy*. Elsevier, New York, pp. 145-167.
- Groothuis, P.A., J.D. Groothuis, and J. C. Whitehead (2008).** Green vs. green: Measuring the compensation required to site electrical generation windmills in a viewshed. *Energy Policy*, **36**(4), pp. 1545-1550.
- Gross, R., W. Blyth, and P. Heptonstall (2010).** Risks, revenues and investment in electricity generation: Why policy needs to look beyond costs. *Energy Economics*, **32**(4), pp. 796-804.
- Guerra, A.-I., and F. Sancho (2010).** Rethinking economy-wide rebound measures: An unbiased proposal. *Energy Policy*, **38**(11), pp. 6684-6694.
- Haas, R., N. Nakicenovic, A. Ajanovic, T. Faber, L. Kranzl, A. Mueller, and G. Resch (2008).** Towards sustainability of energy systems: A primer on how to apply the concept of energy services to identify necessary trends and policies. *Energy Policy*, **36**(11), pp. 4012-4021.
- Halsnaes, K., P.R. Shukla, and A. Garg (2008).** Sustainable development and climate change: lessons from country studies. *Climate Policy*, **8**(2), pp. 202-219.
- Hamada, Y., M. Nakamura, K. Ochifuji, K. Nagano, and S. Yokoyama (2001).** Field performance of a Japanese low energy home relying on renewable energy. *Energy and Buildings*, **33**, pp. 805-814.
- Hammer, A., D. Heinemann, C. Hoyer, R. Kuhlemann, E. Lorenz, R. Muller, and H. Beyer (2003).** Solar energy assessment using remote sensing technologies. *Remote Sensing of Environment*, **86**, pp. 423-432.
- Harvey, L. (2009).** Reducing energy use in the buildings sector: measures, costs, and examples. *Energy Efficiency*, **2**(2), pp. 139-163.
- Hawken, P., A.B. Lovins, and L.H. Lovins (2010).** *The Next Industrial Revolution*. 2nd ed., Earthscan, London, UK and Sterling, VA, USA.
- Henriques, I., and P. Sadorsky (2008).** Oil prices and the stock prices of alternative energy companies. *Energy Economics*, **30**(3), pp. 998-1010.
- Hileman, J.I., D.S. Ortiz, J.T. Bartis, H.M. Wong, P.E. Donohoo, M.A. Weiss, and I.A. Waitz (2009).** *Near-Term Feasibility of Alternative Jet Fuels*. RAND Corporation and Massachusetts Institute of Technology, Santa Monica, CA, USA.
- Hirschl, B. (2009).** International renewable energy policy—between marginalization and initial approaches. *Energy Policy*, **37**(11), pp. 4407-4416.
- Hirst, E., and B. Kirby (2001).** Key transmission planning issues. *The Electricity Journal*, **8**, pp. 59-70.
- Hofman, Y., D. de Jager, E. Molenbroek, F. Schilig, and M. Voogt, (2002)** *The potential of solar electricity to reduce CO₂ emissions*. Ecofys, Utrecht, The Netherlands, 106 pp.
- Hoogwijk, M. (2004).** *On the Global and Regional Potential of Renewable Energy Sources*. Utrecht University, Department of Science, Technology and Society, Utrecht, The Netherlands.
- Hynes, S., and N. Hanley (2006).** Preservation versus development on Irish rivers: whitewater kayaking and hydro-power in Ireland.

Land Use Policy, **23**(2), pp. 170-180.

- IEA (2005)**. *Resources to Reserves, Oil and Gas Technologies for the Energy Markets of the Future*. International Energy Agency, Paris, France.
- IEA (2008a)**. *Issues Behind Competitiveness and Carbon Leakage, Focus on Heavy Industry*. International Energy Agency, Paris, France.
- IEA (2008b)**. *World Energy Outlook 2008*. International Energy Agency, Paris, France, 578 pp.
- IEA (2009a)**. *Statistics and Balances*. International Energy Agency, Paris, France.
- IEA (2009b)**. *World Energy Outlook 2009*. International Energy Agency, Paris, France, 696 pp.
- IEA (2010a)**. *Energy Balances of Non-OECD Countries*. International Energy Agency, Paris, France.
- IEA (2010b)**. *Key World Energy Statistics 2010*. International Energy Agency, Paris, France.
- IEA (2010c)**. *World Energy Outlook 2010*. International Energy Agency, Paris, France, 736 pp.
- IEA (2010d)**. *World Energy Outlook 2010. Energy Poverty: How to make modern energy access universal.*, International Energy Agency, Paris, France.
- IEA (2010e)**. *Midterm Oil and Gas Markets 2010*. International Energy Agency, Paris, France.
- IEA (2010f)**. *CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights 2010*. International Energy Agency, Paris, France.
- Ionel, I.I., (1986)**. *Pumps and Pumping*. Elsevier, New York, NY, USA.
- IPCC (2000a)**. *Special Report on Emission Scenarios*. N. Nakicenovic and R. Swart (eds.), Cambridge University Press, 570 pp.
- IPCC (2000b)**. *Land Use, Land Use Change and Forestry*. R.T. Watson, I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo and D.J. Dokken (eds.), Cambridge University Press, 375 pp.
- IPCC (2005)**. *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, and L. Meyer (eds.), Cambridge University Press, 431 pp.
- IPCC (2006)**. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Hayama, Kanagawa, Japan.
- IPCC (2007a)**. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, R.K. Pachauri, and A. Reisinger (eds.), Cambridge University Press, 104 pp.
- IPCC (2007b)**. Summary for policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, pp. 1-18.
- IPCC (2007c)**. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson (eds.), Cambridge University Press, pp. 7-22.
- IPCC (2007d)**. *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, and L.A. Meyer (eds.), Cambridge University Press, 851 pp.
- Jacobson, M. (2009)**. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy and Environmental Science*, **2**, pp. 148-173.
- Johnston, P., and J. Vos (2005)**. *Pacific Regional Energy Assessment 2004: A Regional Overview Report*. Secretariat of the Pacific Regional Environmental Programme (SPREP), Apia, Samoa.
- Kallbekken, S. (2007)**. Why the CDM will reduce carbon leakage. *Climate Policy*, **7**, pp. 197-211.
- Kankam, S., and E. Boon (2009)**. Energy delivery and utilization for rural development: Lessons from Northern Ghana. *Energy for Sustainable Development*, **13**(3), pp. 212-218.
- Kaufmann, R.K. (2004)**. The mechanisms of autonomous energy efficiency increases: a cointegration analysis of the US energy/GDP ratio. *The Energy Journal*, **25**, pp. 63-86.
- Kaya, Y. (1990)**. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios. In: *IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Workshop*, Paris, France.
- Kaygusuz, K. (2007)**. Energy for sustainable development: Key issues and challenges. *Energy Sources*, **2**, pp. 73-83.
- Kempton, W., and J. Tomic (2005)**. Vehicle to grid implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. *Journal of Power Sources*, **144**(1), pp. 280-294.
- Klein, R.J.T., S.E.H. Eriksen, L.O. Naess, A. Hammill, T.M. Tanner, C. Robledo, and K.L. O'Brien (2007a)**. Portfolio screening to support the mainstreaming of adaptation to climate change into development assistance. *Climatic Change*, **84**(1), pp. 23-44.

- Klein, R.J.T., S. Huq, F. Denton, T.E. Downing, R.G. Richels, J.B. Robinson, and F.L. Toth (2007b).** Inter-relationships between adaptation and mitigation. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson (eds.), Cambridge University Press, pp. 745-777.
- Klick, H., and E.R.A.N. Smith (2010).** Public understanding of and support for wind power in the United States. *Renewable Energy*, **35**(7), pp. 1585-1591.
- Knopf, B., O. Edenhofer, C. Flaschland, M. Kok, H. Lotze-Campen, G. Luderer, A. Popp, and D. van Vuuren (2010).** Managing the low carbon transition: from model results to policies. *Energy Journal*, **31**(Special Issue), pp. 223-245.
- Kooles, K. (2009).** Adapting historic district guidelines for solar and other green technologies. *Forum Journal*, **24**, pp. 24-29.
- Kotzebue, J., H. Bressers, and C. Yousif (2010).** Spatial misfits in a multi-level renewable energy policy implementation process on the Small Island State of Malta. *Energy Policy*, **38**(10), pp. 5967-5976.
- Krewitt, W., K. Nienhaus, C. Kleßmann, C. Capone, E. Stricker, W. Graus, M. Hoogwijk, N. Supersberger, U. von Winterfeld, and S. Samadi (2009).** *Role and Potential of Renewable Energy and Energy Efficiency for Global Energy Supply*. Climate Change 18/2009, ISSN 1862-4359, Federal Environment Agency, Dessau-Roßlau, Germany, 336 pp.
- Lee, J. (2010).** Can we accelerate the improvement of energy efficiency in aircraft systems? *Energy Conversion and Management*, **51**(1), pp. 189-196.
- Leutz, R., T. Ackermann, A. Suzuki, A. Akisawa, and T. Kashiwagi (2001).** Technical offshore wind energy potentials around the globe. In: *Proceedings of the European Wind Energy Conference and Exhibition*, Copenhagen, Denmark, 2-6 July 2001.
- Lewis, J., and R. Wiser (2007).** Fostering a renewable energy technology industry: an international comparison of wind industry policy support mechanisms. *Energy Policy*, **35**(3), pp. 1844-1857.
- Lior, N. (2010).** Sustainable energy development: The present (2009) situation and possible paths to the future. *Energy*, **32**(8), pp. 1478-1483.
- LLNL (2009).** *Estimated World Energy Use in 2006*. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA.
- Loulou, R., M. Labriet, and A. Kanudia (2009).** Deterministic and stochastic analysis of alternative climate targets under differentiated cooperation regimes. *Energy Economics*, **31**(Supplement 2), pp. S131-S143.
- Lund, H. (2007).** Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy*, **32**, pp. 912-919.
- Lund, J. (2003).** Direct-use of geothermal energy in the USA. *Applied Energy*, **74**, pp. 33-42.
- Macknick, J. (2009).** *Energy and Carbon Dioxide Emission Data Uncertainties*. IR-09-032, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- Margolis, R.M., and D.M. Kammen (1999).** Underinvestment: the energy technology and R&D policy challenge. *Science*, **285**(5428), pp. 690-692.
- Mariita, N. (2002).** The impact of large-scale renewable energy development on the poor: environmental and socio-economic impact of a geothermal power plant on a poor rural community in Kenya. *Energy Policy*, **30**(11-12), pp. 1119-1128.
- Markard, J., and B. Truffer (2006).** Innovation processes in large technical systems: Market liberalization as a driver for radical change? *Research Policy*, **35**(5), pp. 609-625.
- Markham, S.K. (2002).** Moving technologies from lab to market. *Research-Technology Management*, **45**(6), pp. 31.
- Martinot, E. (1998).** Energy efficiency and renewable energy in Russia: Transaction barriers, market intermediation and capacity building. *Energy Policy*, **26**, pp. 905-915.
- Meade, J.E. (1971).** *The Controlled Economy*. State University of New York Press, Albany, NY.
- Mehta, R., D. Deshpande, K. Kulkarni, S. Sharma, and D. Divan (2008).** LEDs: A competitive solution for general lighting applications. In: *Energy 2030 Conference: ENERGY 2008 IEEE*, Atlanta, GA, USA, 17-18 November 2008, doi:10.1109/ENERGY.2008.4781063.
- Meinshausen, M., N. Meinshausen, W. Hare, S.C.B. Raper, K. Frieler, R. Knutti, D.J. Frame, and M.R. Allen (2009).** Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2° C. *Nature*, **458**, pp. 1158-1163, doi:10.1038/nature08017.
- Melillo, J.M., J.M. Reilly, D.W. Kicklighter, A.C. Gurgel, T.W. Cronin, S. Palstev, B.S. Felzer, X. Wang, A.P. Sokolov, and C.A. Schlosser (2009).** Indirect emissions from biofuels: how important? *Science*, **326**, pp. 1397-1399.
- MIT (2003).** *The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary Study*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- MIT (2007).** *The Future of Coal: An Interdisciplinary MIT Study*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- MIT (2009).** *Update of the MIT 2003 Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary Study*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.
- Moomaw, W. (1991).** Photovoltaics and materials science: helping to meet the environmental imperatives of clean air and climate change. *Journal of Crystal Growth*, **109**, pp. 1-11.

- Moomaw, W.R., J.R. Moreira, K. Blok, D. Greene, K. Gregory, T. Jaszay, T. Kashiwagi, M. Levine, M. MacFarland, N.S. Prasad, L. Price, H. Rogner, R. Sims, F. Zhou, E. Alsema, H. Audus, R.K. Bose, G.M. Jannuzzi, A. Kollmuss, L. Changsheng, E. Mills, K. Minato, S. Plotkin, A. Shafer, A.C. Walter, R. Ybema, J. de Beer, D. Victor, R. Pichs-Madruga, and H. Ishitani (2001).** Technological and economic potential of greenhouse gas emissions reduction. In: *Climate Change 2001: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 167-299.
- Mondal, M.A.H, L.M Kamp, and N. I. Pachova (2010).** Drivers, barriers, and strategies for implementation of renewable energy technologies in rural areas in Bangladesh-An innovative system analysis. *Energy Policy*, **38**, pp. 4626-4634.
- Moore, G. (2002).** *Crossing the Chasm: Marketing and Selling Products to Mainstream Customers*. Harper, New York, NY.
- Murphy, L.M., and P.L. Edwards (2003).** *Bridging the Valley of Death: Transitioning from Public to Private Sector Financing*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA.
- Najjar, Y.S.H., A.S. Alghamdi, and M.H. Al-Beiruty (2004).** Comparative performance of combined gas turbine systems under three different blade cooling schemes. *Applied Thermal Engineering*, **24**, pp. 1919-1934.
- Nakicenovic, N., A. Grubler, and A. McDonald (eds.) (1998).** *Global Energy Perspectives*. Cambridge University Press.
- Nfah, E., J. Ngundam, and R. Tchinda (2007).** Modelling of solar/diesel/battery hybrid power systems for far-north Cameroon. *Renewable Energy*, **32**(5), pp. 832-844.
- NOAA (2010).** Trends in Carbon Dioxide. National Oceanic and Atmospheric Administration Earth Systems Research Laboratory, Washington, D.C, USA.
- Ockwell, D., R. Haum, A. Mallett, and J. Watson (2010).** Intellectual property rights and low carbon technology transfer: conflicting discourses of diffusion and development. *Global Environmental Change*, **20**(4), pp. 729-738.
- Onovwiona, H., and V. Ugursal (2006).** Residential cogeneration systems: review of the current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**, pp. 482-496.
- Orasch, W., and F. Wirl (1997).** Technological efficiency and the demand for energy (road transport). *Energy Policy*, **25**(14-15), pp. 1129-1136.
- Ossen, D., M. Hamdan Ahmad, and N.H. Madros (2005).** Optimum overhang geometry for building energy saving in tropical climates. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, **4**(2), pp. 563-570.
- Ozgener, O., and A. Hapbasili (2004).** A review on the energy and exergy analysis of solar assisted heat pump systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**, pp. 482-496.
- Pacala, S., and R. Socolow (2004).** Stabilization wedges: Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science*, **305**(5686), pp. 968-972.
- Painuly, J. (2001).** Barriers to renewable energy penetration: a framework for analysis. *Renewable Energy*, **24**(1), pp. 83-89.
- Paltsev, S. (2001).** The Kyoto Protocol: Regional and sectoral contributions to the carbon leakage. *Energy Journal*, **22**(4), pp. 53-79.
- Pasqualetti, M.J., P. Gipe, and R.W. Righter (2002).** *Wind power in view : energy landscapes in a crowded world*. Academic Press, San Diego, xi, 234 p.pp.
- Passivhaus (2010).** *What is a Passive House?* Passivhaus Institute, Darmstadt, Germany. Available at: www.passiv.de/07_eng/index_e.html.
- Petersen, E.L., N.G. Mortensen, L. Landberg, J.R. Højstrup, and H.P. Frank (1998).** Wind power meteorology. Part II: siting and models. *Wind Energy*, **1**(2), pp. 55-72.
- Pilavachi, P.A. (2000).** Power generation with gas turbine systems and combined heat and power. *Applied Thermal Engineering*, **20**, pp. 1421-1429.
- Pilavachi, P.A. (2002).** Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power. *Applied Thermal Engineering*, **22**(18), pp. 2003-2014.
- Pollack, H.N., S.J. Hurter, and J.R. Johnson (1993).** Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Reviews of Geophysics*, **31**(3), 267-280, doi:10.1029/93RG01249.
- Pousa, G.P.A.G., A.L.F. Santos, and P.A.Z. Suarez (2007).** History and policy of biodiesel in Brazil. *Energy Policy*, **35**(11), pp. 5393-5398.
- Puga, J., and J. Lesser (2009).** Public policy and private interests: why transmission planning and cost-allocation methods continue to stifle renewable energy policy goals. *The Electricity Journal*, **22**(10), pp. 7-19.
- Quezada, V., J. Abbad, and T. San Roman (2006).** Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, **21**(2), pp. 533-540.
- Ragwitz, M., A. Held, G. Resch, T. Faber, C. Huber, and R. Haas, 2005.** *Final Report: Monitoring and Evaluation of Policy Instruments to Support Renewable Electricity in EU Member States*. Fraunhofer Institute Systems and Innovation Research and Energy Economics Group, Karlsruhe, Germany and Vienna, Austria.

- REN21 (2009).** *Renewables Global Status Report: 2009 Update*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century Secretariat, Paris, France.
- REN21 (2010).** *Renewables 2010: Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century Secretariat, Paris, France, 80 pp.
- Rezaie, B., E. Esmailzadeh, and I. Dincer (2011).** Renewable energy options for buildings: case studies. *Energy and Buildings*, **43**(1), pp. 56-65.
- Richter, A. (2007).** *United States Geothermal Energy Market Report*. GlitnirBank, Reykjavik, Iceland.
- Roberts, S. (2008).** Infrastructure and challenges for the built environment. *Energy Policy*, **36**(12), pp. 4563-4567.
- Robock, A., A. Marquardt, B. Kravitz, and G. Stenchikov (2009).** Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. *Geophysical Research Letters*, **36**, L19703.
- Rogner, H.-H., F. Barthel, M. Cabrera, A. Faaij, M. Giroux, D. Hall, V. Kagramanian, S. Kononov, T. Lefevre, R. Moreira, R. Nötstaller, P. Odell, and M. Taylor (2000).** Energy resources. In: *World Energy Assessment. Energy and the Challenge of Sustainability*. United Nations Development Programme, United Nations Department of Economic and Social Affairs, World Energy Council, New York, USA, pp. 30-37
- Rogner, H.-H., D. Zhou, R. Bradley, P. Crabbé, O. Edenhofer, B.Hare (Australia), L. Kuijpers, and M. Yamaguchi (2007).** Introduction. In: *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, and L.A. Meyer (eds.), Cambridge University Press, pp. 95-116.
- Rouleau, T., and C. Loyd (2008).** International policy issues regarding solar water heating, with a focus on New Zealand. *Energy Policy*, **36**(6), pp. 1843-1857.
- Rout, U., K. Akomoto, F. Sano, J. Oda, T. Homma, and T. Tomada (2008).** Impact assessment of the increase in fossil fuel prices on the global energy system, with and without CO₂ concentration stabilization. *Energy Policy*, **36**(9), pp. 3477-3484.
- Rowley, J.C. (1982).** Worldwide geothermal resources. In: *Handbook of Geothermal Energy*. L.M. Edwards, G.V. Chilingar, H.H. Rieke III, and W.H. Fertl (eds.), Gulf Publishing, Houston, TX, USA, pp. 44-176.
- Royal Society (2009).** *Geoengineering the Climate: Science, Governance, and Uncertainty*. The Royal Society, London, UK.
- Rubin, E., C. Chen, and A. Rao (2007).** Cost and performance of fossil fuel power plants with CO₂ capture and storage. *Energy Policy*, **35**, pp. 4444-4454.
- Sanner, B., C. Karytsas, D. Mendrinós, and L. Rybach (2003).** Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics*, **32**, pp. 579-588.
- Sawin, J. (2001).** *The Role of Government in the Development and Diffusion of Renewable Energy Technologies*. UMI Proquest, Ann Arbor, MI, USA, 618 pp.
- Scharlemann, J.P.W., and W.F. Laurance (2008).** How green are biofuels? *Science*, **319**(5859), pp. 43-44.
- Schipper, L., and M. Grubb (2000).** On the rebound? Feedback between energy intensity and energy use in IEA countries. *Energy Policy*, **28**, pp. 367-388.
- Searchinger, T., R. Heimlich, R.A. Houghton, F. Dong, A. Elobeid, J. Fabiosa, S. Tokgoz, D. Hayes, and T.-H. Yu (2008).** Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, **319**, pp. 1238-1240.
- Secretary of the Air Force (2009).** *Air Force Energy Policy Memorandum*. Secretary of the Air Force, Department of Defense, Washington, DC, USA.
- Simon, C. (2009).** Cultural constraints on wind and solar energy in the U.S. context. *Comparative Technology Transfer and Society*, **7**(3), pp. 251-269.
- Sims, R.E.H., R.N. Schock, A. Adegbululge, J. Fenhann, I. Konstantinaviciute, W. Moomaw, H.B. Nimir, B. Schlamadinger, J. Torres-Martínez, C. Turner, Y. Uchiyama, S.J.V. Vuori, N. Wamukonya, and X. Zhang (2007).** Energy supply. In *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, and L.A. Meyer (eds.), Cambridge University Press, pp. 251-322.
- Slade, R., C. Panoutsou, and A. Bauen (2009).** Reconciling bio-energy policy and delivery in the UK: Will UK policy initiatives lead to increased deployment? *Biomass and Bioenergy*, **33**(4), pp. 679-688.
- Smeets, E.M.W., A.P.C. Faaij, I.M. Lewandowski, and W.C. Turkenburg (2007).** A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050. *Progress in Energy and Combustion Science*, **33**, pp. 56-106.
- Sorrell, S., J. Dimitropoulos, and M. Sommerville (2009).** Empirical estimates of the direct rebound effect: a review. *Energy Policy*, **37**, pp. 1356-1371.

- Sovacool, B. (2008).** Valuing the emissions from nuclear power: a critical survey. *Energy Policy*, **26**, pp. 2940-2953.
- Stern, N. (2007).** *The Economics of Climate Change*. Cambridge University Press, 712 pp. Available at: webarchive.nationalarchives.gov.uk/+/http://www.hm-treasury.gov.uk/sternreview_index.htm.
- Sterner, M. (2009).** *Bioenergy and Renewable Power Methane in Integrated 100% Renewable Energy Systems: Limiting Global Warming by Transforming Energy Systems*. University of Kassel, Kassel, Germany.
- Tester, J.W., E.M. Drake, M.W. Golay, M.J. Driscoll, and W.A. Peters (2005).** *Sustainable Energy – Choosing Among Options*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 850 pp.
- Tester, J.W., B.J. Anderson, A.S. Batchelor, D.D. Blackwell, R. DiPippo, and E.M. Drake (2006).** *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems on the United States in the 21st Century*. Prepared by the Massachusetts Institute of Technology, under Idaho National Laboratory Subcontract No. 63 00019 for the U.S. Department of Energy, Assistant Secretary for Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Geothermal Technologies, Washington, DC, USA, 358 pp. Available at: geothermal.inl.gov.
- Tomic, J., and W. Kempton (2007).** Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. *Journal of Power Sources*, **168**(2), pp. 459-468.
- Trieb, F. (2005).** *Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region. Final Report*. German Aerospace Centre (DLR), Stuttgart, Germany, 285 pp.
- Trieb, F., M. O’Sullivan, T. Pregger, C. Schillings, and W. Krewitt (2009).** *Characterisation of Solar Electricity Import Corridors from MENA to Europe - Potential, Infrastructure and Cost*. German Aerospace Centre (DLR), Stuttgart, Germany, 172 pp.
- Turner, K. (2009).** Negative rebound and disinvestment effects in response to an improvement in energy efficiency in the UK economy. *Energy Economics*, **31**(5), pp. 648-666.
- Twidell, J., and A.D. Weir (2005).** *Renewable Energy Resources*. 2nd Ed. Taylor & Francis, London, UK and New York, NY, USA.
- UNEP (2009).** *Global Trends in Sustainable Energy Investment 2009: Analysis of Trends and Issues in the Financing of Renewable Energy and Energy Efficiency*. United Nations Environment Programme, Paris, France.
- UNDP (2005).** *Energy Challenge for Achieving the Millennium Development Goals 2010*. United Nations Development Programme, New York, NY, USA.
- UNDP (2007).** *Human Development Report 2007*, United Nations Development Programme, New York, NY, USA.
- UNDP/WHO (2009).** *The Energy Access Situation in Developing Countries: A Review Focusing on the Least Developed Countries and sub-Saharan Africa*. United Nations Development Programme, New York, NY, USA.
- Unruh, G.C., and J. Carillo-Hermosilla (2006).** Globalizing carbon lock-in. *Energy Policy*, **34**, pp. 1185-1197.
- UNStats (2010).** *Energy Balances and Electricity Profiles – Concepts and Definitions*. United Nations Statistics Division, New York, NY, USA.
- USDOD (2010).** *Quadrennial Defense Review Report*. US Department of Defense, Washington, DC, USA.
- Vajjhala, S., and P. Fischbeck (2007).** Quantifying siting difficulty: A case study of US transmission line siting. *Energy Policy*, **35**(1), pp. 650-671.
- Valentine, S. (2010).** A step toward understanding wind power development policy barriers in advanced economies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(9), pp. 2796-2807.
- van Ruijven, B., and D. van Vuuren (2009).** Oil and natural gas prices and greenhouse gas emission mitigation. *Energy Policy*, **37**(11), pp. 4797-4808.
- Venema, H., and I. Rehman (2007).** Decentralized renewable energy and the climate change mitigation-adaptation nexus. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **12**, pp. 875-900.
- Verbruggen, A., M. Fishedick, W. Moomaw, T. Weir, A. Nadaï, L.J. Nilsson, J. Nyboer, and J. Sathaye (2010).** Renewable energy costs, potentials, barriers: Conceptual issues. *Energy Policy*, **38**(2), pp. 850-861.
- Viguié, L., and M. Vielle (2007).** On the climate change effects of high oil prices. *Energy Policy*, **35**(2), pp. 844-849.
- von Weizsäcker, E., K. Hargroves, M.H. Smith, C. Desha, and P. Stasinopoulos (2009).** *Factor Five: Transforming the Global Economy through 80% Improvements in Resource Productivity: A Report to the Club of Rome*. Earthscan/The Natural Edge Project, London, UK, 400 pp.
- WCD (2000).** *Dams and Development: A New Framework for Decision-Making: The Report of the World Commission on Dams*. World Commission on Dams, Earthscan, London, UK. Available at: www.dams.org/index.php?option=com_content&view=article&id=49&Itemid=29.
- Webler, T., and S.P. Tuler (2010).** Getting the engineering right is not always enough: Researching the human dimensions of

the new energy technologies. *Energy Policy*, **38**(6), pp. 2690-2691.

WEC (1994). *New Renewable Energy Resources: A Guide to the Future*. World Energy Council, Kogan Page, London, UK.

WEC/FAO (1999). *The Challenge of Rural Energy Poverty in Developing Countries*. World Energy Council and Food and Agricultural Organization of the United Nations, London, UK.

Weisser, D. (2007). A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy*, **32**, pp. 1543-1559.

Williamson, O.E. (1985). *The Economic Institutions of Capitalism*. The Free Press, New York, NY, USA.

WIREC (2008). WIREC 2008: The power of independence. In: *Washington International Renewable Energy Conference*, Washington, DC, 4-6 March 2008. Available at: www.iisd.ca/ymb/wirec2008/html/ymbvol95num8e.html.

World Bank (2006). *Reforming Power Markets in Developing Countries: What Have We Learned?* World Bank, Washington, DC, USA.

World Bank (2009). *World Development Indicators – CO₂ emissions (kt)*. World Bank, Washington, DC, USA. Available at: data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT/countries/1W?display=graph.

第1章付録

表 1.A.1: 再生可能エネルギー源の世界全体の技術ポテンシャル (2008 年の世界の一次エネルギー供給 492EJ と比較) ※

		技術ポテンシャル [EJ/年]					推計値の範囲に関する注及び出典、Krewitt et al. (2009) の推計値に関する注
		Krewitt et al. (2009) ¹			第2～7章の推計値の範囲 ²		
		2020	2030	2050	低	高	
電力 (EJ/年)	太陽光発電 (PV) ³	1,126	1,351	1,689	1,338	14,778	第3章 - Hofman et al. (2002) ; Hoogwijk (2004) ; de Vries et al. (2007)。Krewitt et al. (2009) で使用された方法論は、太陽光 (PV) と集光型太陽熱発電 (CSP) で異なる。詳細は第3章で論じる。
	集光型太陽熱発電 (CSP) ³	5,156	6,187	8,043	248	10,791	第3章 - Hofman et al. (2002) ; Trieb (2005) ; Trieb et al. (2009)。Krewitt et al. (2009) の方法論は、太陽光発電 (PV) と集光型太陽熱発電 (CSP) で異なる。詳細は第3章で論じる。
	地熱 ⁴	4,5	18	45	118	1,109	Hydrothermal 及び EGS: 第4章 - EPRI (1978) ; Rowley (1982) ; Stefansson (2005) ; Tester et al. (2005, 2006)。
	水力	48	49	50	50	52	第5章 - Krewitt et al. (2009) ; International Journal of Hydro & Dams (2010)。
	海洋 ⁵	66	166	331	7	331	第6章 - Sims et al. (2007); Krewitt et al. (2009) ; 技術ポテンシャルの推定値は、すべての海洋エネルギー技術を含んでいない場合がある。Sims et al. (2007) の推定値は「活用可能で利用可能な推定エネルギー資源 (exploitable estimated available energy resource)」として言及される。
	陸上風力	362	369	379	70	450	第7章 - 低い推定値は WEC (1994)、高い推定値は Archer and Jacobson (2005) より。「沿岸」を含む。直近の推定値は上限よりになる傾向がある。
	洋上風力 ⁶	26	36	57	15	130	第7章 - 低い推定値は Fellows (2000)、高い推定値は Leutz et al. (2001) より。比較的浅い水域及び沿岸の用途のみ検討。深水域の用途を検討する場合、技術ポテンシャルが大きくなる (Lu et al., 2009; Capps and Zender, 2010)。
熱 (EJ/年)	太陽熱	113	117	123	なし	なし	技術ポテンシャルは主に、熱需要に限定される。Krewitt et al. (2009) の基礎推定値は、使用可能な屋上と太陽熱温水のみ扱う。屋上以外の用途と加工熱を考慮した技術ポテンシャルは、これらの推定値大きく超えるだろう。
	地熱	104	312	1,040	10	312	熱水: 第4章 - Stefansson

							(2005)。Krewitt et al. (2009) の推定値は Stefansson (2005) に基づくが、Krewitt et al. (2009) は第4章に比べ高い設備容量を想定している。
一次エネルギー (EJ/年)	太陽熱 ⁷	なし	なし	なし	1,575	49,837	太陽エネルギー全体の技術ポテンシャル: 第3章 - Rogner et al. (2000)
	バイオマスエネルギー作物 ⁸	43	61	96	低	120	余剰の農地や牧草地におけるバイオマスに特化した生産: 第2章 - Dornburg et al. (2010)
					低	140	農業のさらなる集約化: 第2章 - Dornburg et al. (2010)
					低	70	限界耕地、荒廃地におけるバイオマスに特化した生産: 第2章 - Dornburg et al. (2010)
					低	100	森林管理の強化: 第2章 - Dornburg et al. (2010)
	バイオマス残渣 ⁸	59	68	88	40	100	農業残渣、森林残渣、その他の有機廃棄物、糞など: 第2章 - Dornburg et al. (2010)
バイオマス合計 ⁸	102	129	184	50 ⁹	500 ¹⁰	第2章の専門家による技術ポテンシャル評価のレビューに基づき、数字は四捨五入している。	

注:

※上記の技術ポテンシャルは、再生可能エネルギーの年間供給の世界全体のポテンシャルを示し、既にエネルギー生産に活用中のポテンシャルは一切差し引かれていない。2008年の再生可能エネルギー源による一次エネルギー供給総量を直接等価法で見ると、バイオエネルギー (50.33EJ)、水力 (11.55EJ)、風力 (0.79EJ)、太陽熱 (0.50EJ)、地熱 (0.41EJ)、海洋 (0.002EJ) である。用語集 (Annex I 参照) における技術ポテンシャルの定義によると、本報告書で概要を示した研究の多くは、より幅広い経済的、社会経済的な考慮を取り入れている。たとえば、一部の技術では、土地の適合性やその他の持続可能性の要因が取り込まれているため、結果的に技術ポテンシャルの推定値が低くなっている。

¹ 2020年、2030年、2050年の技術ポテンシャルの推定値は、Krewitt et al. (2009) の研究のレビューに基づく。研究間で方法論や計算方法が異なることから、技術や地域全体、一次エネルギー需要に対してこれらの推定値を比較する場合は、注意すべきである。第2章から第7章で示したデータは、方法論が異なるため、これらの数字と一致しない場合がある。Krewitt et al. (2009) や本表のその他の研究の多くは、部分的には技術の進歩のため、技術ポテンシャルは時の経過とともに増加すると想定している。

² 推定値の範囲は第2章から第7章の研究から引用した (Krewitt et al. (2009) のレビューで報告された研究の一部も含まれる場合がある)。結果として、範囲は Krewitt et al. (2009) が示した数字を常に網羅しているわけではない。範囲は、様々な方法をベースにしており、様々な将来の年に適用している。その結果、Krewitt et al. (2009) に関しては、結果として生ずる範囲は技術全体で厳密に比較出来ない。

³ Krewitt et al. (2009) における太陽光発電 (PV) と集光型太陽熱発電 (CSP) の推定値は、様々なデータと方法論に基づいているため、集光型太陽熱発電 (CSP) に関する太陽光発電 (PV) の技術ポテンシャルが大きく見積もられる傾向がある。そのこともあって、太陽光エネルギー全体の技術ポテンシャルは、Rogner et al. (2000) に基づく一次エネルギーのカテゴリで示される。様々な研究が使用されているため、この太陽光エネルギー全体の技術ポテンシャルは、本表の3つの技術 (太陽光発電 (PV)、集光型太陽熱発電 (CSP)、太陽熱) の合計ではない点に注意を要する。また、特定の太陽エネルギー利用技術で土地競合の可能性があるため、本表の太陽光発電 (PV)、集光型太陽熱発電 (CSP)、太陽熱は厳密に追加出来ない。

⁴ Krewitt et al. (2009) の地熱発電の推定値は、熱水資源のみをかなり考慮していると思われる。第4章の推定値の範囲は EPRI (1978)、Rowley (1982)、Stefansson (2005)、Tester et al. (2005, 2006) から引用しており、熱水と地熱井涵養システム双方のポテンシャルを含む。

⁵ 海洋エネルギーの技術ポテンシャルの絶対的範囲は、非常に不確かである。これは、海洋エネルギー技術は依然として研究開発段階にあるものが多く、大規模に商用展開されていないため、技術ポテンシャルがほぼ推定されることがないことがある。

⁶ Krewitt et al. (2009) における洋上風力エネルギーの推定値と、本表で示されたその推定値の範囲は、双方とも比較的浅水域と沿岸の用途に基づく。洋上風力エネルギー技術ポテンシャルは、深水域の用途を検討する際、増大するが、その用途は浮体式の風力タービン設計に依存するだろう。

⁷ 太陽熱一次エネルギー全体の技術ポテンシャルは、本表の3つの技術 (太陽光発電 (PV)、集光型太陽熱発電 (CSP)、太陽熱) の合計ではない。これは様々な研究が使用されているためである。また、特定の太陽エネルギー利用技術で土地競合の可能性があるため、本表の太陽光発電 (PV)、集光型太陽熱発電 (CSP)、太陽熱の推定値を合計して太陽一次エネルギー全体の技術ポテンシャルを算出することは、不適切である点に留意が必要である。本表に示した太陽エネルギー全体の技術ポテンシャルでは、様々な太陽光転換技術で区分されておらず、平均的な転換効率、利用可能な土地面積、方法論の条件を考慮しているだけである。一定の立地では、上述のすべての太陽エネルギー利用技術を使用出来るし、消費者はどの技術からどのようなサービスが必要なのかを決定する。

⁸ バイオマス由来の一次エネルギー（直接等価法）は、電力、発熱、輸送のニーズへの対応に使用されるだろう。一次エネルギーからの転換ロスはいずれも約 20～80%である。このため、一次エネルギーの観点からバイオマスの技術ポテンシャルと、二次エネルギー供給（電力と熱）の形態を取る他の再生可能エネルギーの技術ポテンシャルを比較する場合には、注意すべきである。

⁹ 技術ポテンシャルの低い推定値に基づく条件は、食料需要が高く、エネルギー作物栽培が可能な余剰な土地がないと同時に、農業生産性の向上が世界的に足踏みする状況で、出現する。限界耕作地や荒廃地が活用されず、バイオマス残渣の流量の大部分は、バイオエネルギー向けではなく他部門のバイオマスとして使用される想定である。しかしながら、低品質の残渣、糞、一般廃棄物は、こうした状況でも引き続きバイオエネルギーに使用可能である可能性が高い。

¹⁰ バイオマスのポテンシャルの上限は、条件付きであり、適切な土地管理、農業生産力の大幅な向上、森林管理の強化を前提とする。こうしたポテンシャルを実現するには、土地利用の監視と良好なガバナンスが有効であり、持続可能性の枠組みが実行されている場合のみ、持続可能である。