

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

技術要約（仮訳）

技術要約（仮訳）

執筆責任者:

Dan Arvizu (USA), Thomas Bruckner (Germany), Helena Chum (USA/Brazil), Ottmar Edenhofer (Germany), Segen Estefen (Brazil) Andre Faaij (The Netherlands), Manfred Fischedick (Germany), Gerrit Hansen (Germany), Gerardo Hiriart (Mexico), Olav Hohmeyer (Germany), K. G. Terry Hollands (Canada), John Huckerby (New Zealand), Susanne Kadner (Germany), Ånund Killingtveit (Norway), Arun Kumar (India), Anthony Lewis (Ireland), Oswaldo Lucon (Brazil), Patrick Matschoss (Germany), Lourdes Maurice (USA), Monirul Mirza (Canada/Bangladesh), Catherine Mitchell (United Kingdom), William Moomaw (USA), José Moreira (Brazil), Lars J. Nilsson (Sweden), John Nyboer (Canada), Ramon Pichs - Madruga (Cuba), Jayant Sathaye (USA), Janet L. Sawin (USA), Roberto Schaeffer (Brazil), Tormod A. Schei (Norway), Steffen Schlömer (Germany), Kristin Seyboth (Germany/USA), Ralph Sims (New Zealand), Graham Sinden (United Kingdom/Australia), Youba Sokona (Ethiopia/Mali), Christoph von Stechow (Germany), Jan Steckel (Germany), Aviel Verbruggen (Belgium), Ryan Wiser (USA), Francis Yamba (Zambia), Timm Zwickel (Germany)

査読編集者:

Leonidas O. Girardin (Argentina), Mattia Romani (United Kingdom/Italy)

特別顧問:

Jeffrey Logan (USA)

本技術要約の引用時の表記方法:

Arvizu, D., T. Bruckner, O. Edenhofer, S. Estefen, A. Faaij, M. Fischedick, G. Hiriart, O. Hohmeyer, K. G. T. Hollands, J. Huckerby, S. Kadner, Å. Killingtveit, A. Kumar, A. Lewis, O. Lucon, P. Matschoss, L. Maurice, M. Mirza, C. Mitchell, W. Moomaw, J. Moreira, L. J. Nilsson, J. Nyboer, R. Pichs - Madruga, J. Sathaye, J. Sawin, R. Schaeffer, T. Schei, S. Schlömer, K. Seyboth, R. Sims, G. Sinden, Y. Sokona, C. von Stechow, J. Steckel, A. Verbruggen, R. Wiser, F. Yamba, T. Zwickel, 2011: Technical Summary. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs - Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

注意

本報告書は、IPCC「Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation」Final Release を翻訳したものです。この翻訳は、IPCC ホームページに掲載されている報告書
<http://srren.ipcc-wg3.de/>

を元に行っています。また、翻訳は 2011 年 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責任を負いかねますのでご了承ください。

目次

第1章: 気候変動及び再生可能エネルギーの概要	5
1.1 背景	5
1.2 再生可能エネルギー資源・ポテンシャルの概要	11
1.3 エネルギーのサービスのニーズと現状の合致	14
1.4 機会、障壁、問題	17
1.5 政策、研究、開発、普及、及び実施戦略の役割	19
第2章: バイオエネルギー	22
2.1 バイオマス及びバイオエネルギーの概論	22
2.2 バイオエネルギー資源ポテンシャル	23
2.3 バイオエネルギー利用技術及びその用途	25
2.4 世界的・地域的な市場及び産業の展開の状況	26
2.5 環境及び社会的影響	27
2.6 技術の改善及び統合の展望	31
2.7 現在のコスト及び動向	32
2.8 潜在的な普及段階	36
第3章: 直接的太陽エネルギー	41
3.1 はじめに	41
3.2 資源ポテンシャル	41
3.3 技術及び用途	41
3.4 市場・産業展開の世界的・地域的状況	44
3.5 広範囲のエネルギーシステムへの統合	47
3.6 環境及び社会的影響	48
3.7 技術の改良及びイノベーションの見通し	50
3.8 コストの傾向	51
3.9 普及のポテンシャル	55
第4章: 地熱エネルギー	58
4.1 はじめに	58
4.2 資源ポテンシャル	58
4.3 技術及び用途	59
4.4 市場及び産業開発の世界的・地域的状況	60
4.5 環境及び社会的影響	61
4.6 技術の改善、イノベーション及び統合の展望	62
4.7 コストの傾向	63
4.8 普及の可能性	65
第5章: 水力	67
5.1 はじめに	67
5.2 資源ポテンシャル	67
5.3 技術及び用途	68
5.4 市場、産業の発達の世界的、地域的状況	69
5.5 より幅広いエネルギーシステムへの統合	70
5.6 環境及び社会的影響	71
5.7 技術の改善及びイノベーションの展望	73
5.8 コストの傾向	73
5.9 普及のポテンシャル	74
5.10 水管理システムへの統合	75
第6章: 海洋エネルギー	76
6.1 はじめに	76
6.2 資源ポテンシャル	76
6.3 技術及び用途	78
6.4 市場及び産業の開発の世界的及び地域的状況	81
6.5 環境及び社会的影響	82
6.6 技術の向上、イノベーション、及び統合の展望	83
6.7 コストの傾向	83
6.8 普及のポテンシャル	84
第7章: 風力エネルギー	86
7.1 はじめに	86

7.2 資源ポテンシャル	86
7.3 技術及び応用	87
7.4 市場及び産業発達の世界・地域状況	88
7.5 系統連系問題の短期的課題	89
7.6 環境及び社会的影響	91
7.7 技術の改良及びイノベーションの見通し	92
7.8 コストの動向	93
7.9 導入ポテンシャル	95
第8章: 現在、将来のエネルギーシステムへの再生可能エネルギーの統合	96
8.1 序論	96
8.2 電力システムへの再生可能エネルギーの統合	100
8.3 冷暖房ネットワークへの再生可能エネルギーの統合	104
8.4 ガス導管網への再生可能エネルギーの統合	106
8.5 液体燃料への再生可能エネルギーの統合	107
8.6 自立システムへの再生可能エネルギーの統合	108
8.7 最終消費部門: 移行の道筋に向けた戦略的要素	109
第9章: 持続可能な開発における再生可能エネルギー	118
9.1 序論	118
9.2 持続可能な開発と再生可能エネルギー間の相互作用	118
9.3 社会、環境、経済的な影響: 世界及び地域の評価	119
9.4 再生可能エネルギーに関する持続可能な開発の道筋の示唆	127
9.5 持続可能な開発における再生可能エネルギーの障壁と機会	130
9.6 統合	131
第10章: 緩和ポテンシャルとコスト	133
10.1 序論	133
10.2 様々な再生可能エネルギー戦略に関する緩和シナリオの統合	133
10.3 様々な再生可能エネルギー戦略に対する代表的な緩和シナリオの評価	140
10.4 再生可能エネルギー源による緩和に対する地域的な費用曲線	145
10.5 商業化と普及のコスト	146
10.6 社会的、環境的コストと便益	153
第11章: 政策、財政支援及び実行	155
11.1 序論	155
11.2 現在の動向: 政策、財政支援及び投資	156
11.3 キー・ドライバー、機会と便益	158
11.4 再生可能エネルギーの政策立案、実行、及びファイナンスに対する障壁	158
11.5 政策オプションの経験及び評価	158
11.6 促進的環境と地域問題	166
11.7 構造的変化	169

地図に関する免責条項: 本技術要約の地図上に表示された国境と名称、及び使用された記号は、国連から公式に承認または承諾を得たものではない。SRREN 用に作成された地図において、ジャンムー及びカシミールにある点線は、インド及びパキスタンが合意したおおまかな停戦ラインを示す。ジャンムーとカシミールの最終的な状況に関しては、いまだ両国による合意に至っていない。

第1章: 気候変動及び再生可能エネルギーの概要

1.1 背景

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。しかし、IPCC 第4次評価報告書（AR4）によると、化石燃料は2004年の総一次エネルギーの85%を供給しており¹、これは2008年においても変わっていないことが報告されている。さらに、2004年における総人為的温室効果ガス排出量（CO₂eq）²のうち、化石燃料の燃焼によるものは56.6%を占めている [1.1.1, 9.2.1, 9.3.2, 9.6, 11.3]。

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。特に、以下に関する、政策決定者、民間部門、及び市民社会向けの情報を提供している。

- ・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章～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章～第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]

本報告書は全11章で構成されている。第1章では、再生可能エネルギー及び気候変動の現状について説明している。第2章～第7章では6つの再生可能エネルギー技術についての情報を提供し、第8章～第11章では統合的問題を扱っている（図TS.1.1参照）。本報告書では、不確かさ（uncertainty）を表現している箇所がある³。本技術要約（TS）は、本報告書の概要を示し、本質的な調査結果を要約したものである。

¹ AR4によれば80%であるが、これはエネルギー計算について物理的手法（physical content method）から、この報告書の後で述べる方法である直接等価法（direct equivalent method）へ変換されたものである。1.1.9節及びAnnex II（A.11.4節）を参照のこと。

² 他の主な供給源やガスの寄与としては以下がある：森林伐採やバイオマスの腐敗からのCO₂（17.3%）、他からのCO₂（2.8%）、CH₄（14.3%）、N₂O（7.9%）及びフッ化ガス（1.1%）

³ 本報告書では、たとえば感度分析の結果の提示や、コストナンバーの幅及びシナリオの結果の幅を定量的に示すことにより、不確実性を表現している。IPCCの不確実性のガイダンスは本報告書の承認時点では見直し中だったため、本報告書ではIPCCの公式な不確実性の用語を用いていない。

再生可能エネルギー源及び気候変動緩和に関する 特別報告書 (SRREN)

1. 再生可能エネルギーと気候変動

序章

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

技術の章

8. 現在及び将来のエネルギーシステムへの再生可能エネルギーの統合
9. 持続可能な開発における再生可能エネルギー
10. 緩和ポテンシャル及びコスト
11. 政策、財政支援、及び実施

統合的検討
の章

図 TS.1.1: SRREN の構成 [図 1.1]

本 TS はおおむね報告書全体の構造に準拠しているが、様々な関連する章及び節への参照を角括弧内の該当する章・節番号で示している。本 TS で用いる用語、略語、化学記号は、Annex I で参照出来る。コスト決定に関する慣例や方法、一次エネルギー、他の分析トピックスについては Annex II で説明する。再生可能エネルギーの共通基準コストに関する情報は、Annex III で示している。

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 の発行以降も、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。1850 年頃から、化石燃料 (石炭、石油、ガス) の使用が世界的に増え、エネルギー供給の大半を占めるようになり、二酸化炭素 (CO₂) 排出量は急増した [図 1.6]。まだ燃焼されていない化石燃料の貯蔵物と資源の中の炭素 [図 1.7] 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、AR4 [図 1.5] または本報告書の第 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 [1.1.3, 1.1.4]。

関連する脱炭素化が相当行われているにもかかわらず、政策的な干渉のない排出の大半は、2100 年において 2000 年よりも遥かに高い予測を示している。これは、温室効果ガス濃度の上昇、ひいては世界的な平均気温の上昇を意味する。潜在的に不可逆である気候システムの急変による水資源、生態系、食料安全保障、人間の健康、沿岸集落への悪影響を避けるために、カンクン合意において、世界的な平均気温の上昇を産業革命以前と比べ 2℃ の上昇以下に抑えることが求められており、その上昇を 1.5℃ まで抑える検討を行うことも合意されている。平衡温度への上昇を確実に 2～2.4℃ に抑えるためには、大気中の温室効果ガス濃度を大気中の二酸化炭素換算量で 445～490ppm の範囲で安定させる必要がある。そのためには、世界的な二酸化炭素排出量を (現在の上昇を続ける代わりに) 2015 年までに削減し始め、2050 年までには 2000 年の水準から 50～80% を削減しなければならない [1.1.3]。

二酸化炭素排出量削減へ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 [1.1.4]。

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

これら 4 つの要素の年間変化は、図 TS.1.2. [1.1.4] に示されている。

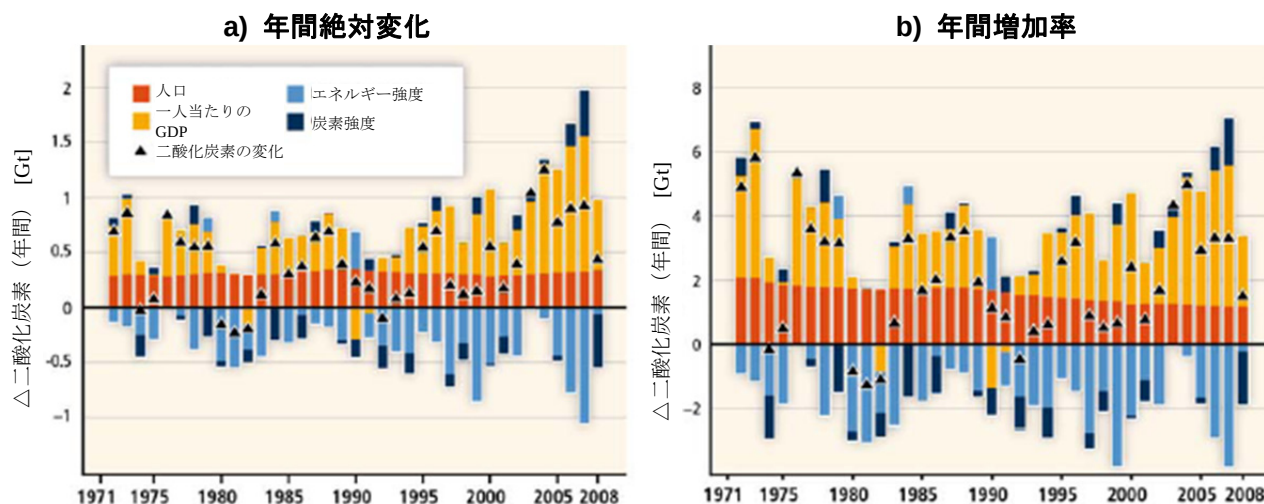


図 TS.1.2: 1971 年から 2008 年にかけての茅恒等式の要素(人口(赤)、一人当たりの GDP(オレンジ)、エネルギー強度(ライトブルー)、及び炭素強度(ダークブルー))による世界のエネルギー関連の二酸化炭素排出の a) 年間絶対変化及び b) 年間増加率の分解。色は各要素が、他の要素が一定であった場合に起こると思われる変化を示している。黒の三角形は総年間変化を示している [図 1.8]。

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 Annex 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⁴。しかしながら、最近(2000～2007 年)では、開発途上国及び先進国における石炭及び石油の使用量が 2007 年からわずかに低下してきているにも関わらず、石炭の使用が拡大しており、その事が炭素強度増加の主な原因となっている。その後、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 [1.1.4]。

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⁵。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 TS.1.3)。2008 年においては、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(水力が 16%、その他の再生可能エネルギー3%) [1.1.5]。

⁴ Annex I 諸国の定義については用語集 (Annex I) を参照のこと。

⁵ 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。

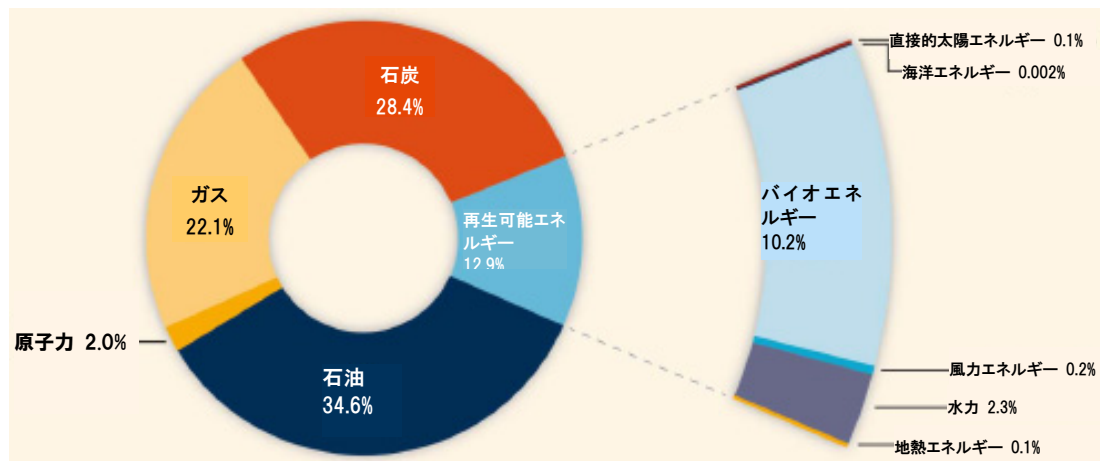


図 TS.1.3:世界の総一次エネルギー供給量（492EJ、2008 年）に占めるエネルギー源の割合。近代的バイオマスはバイオマスの割合全体の 38%を占める [図 1.10]。

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 [1.1.5]。

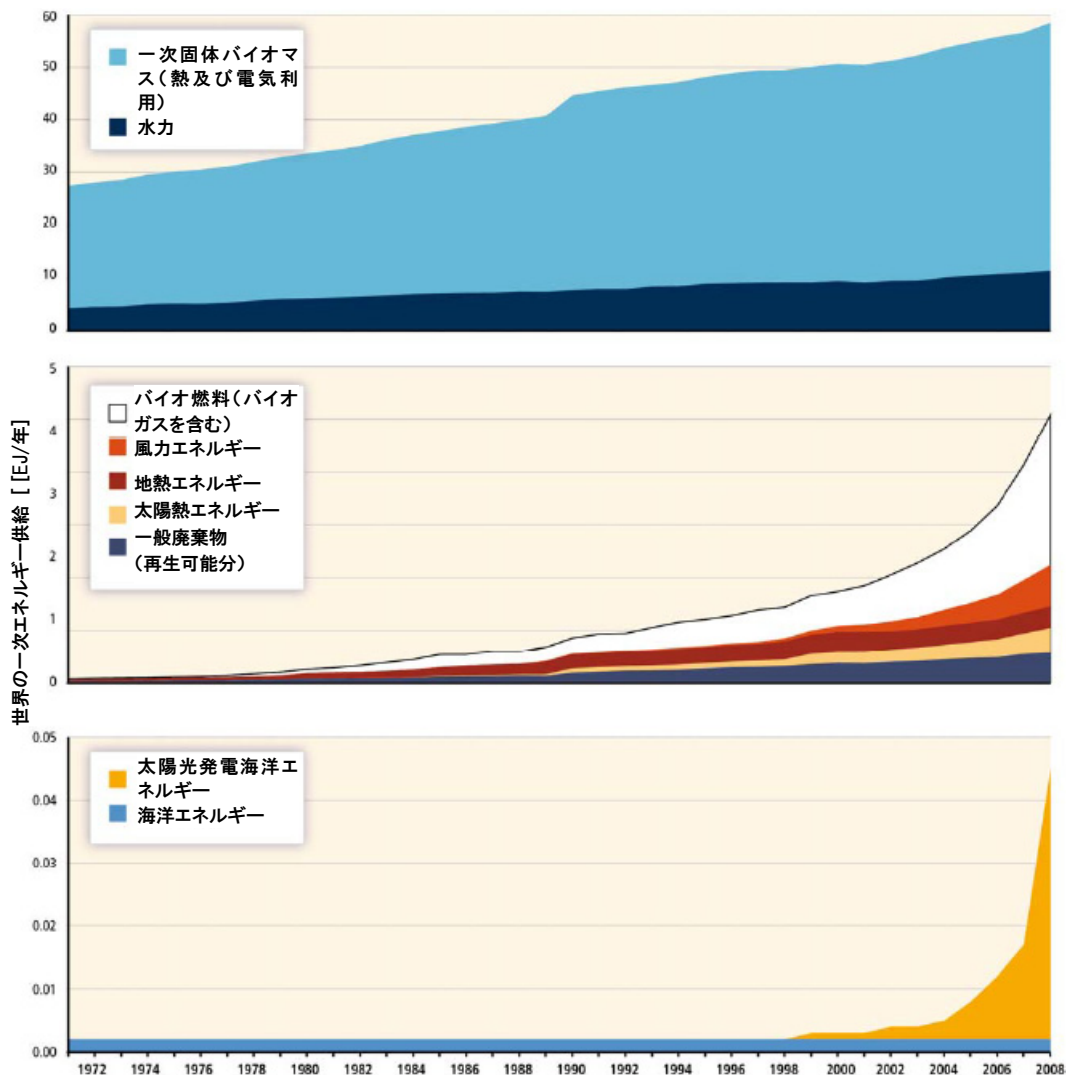


図 TS.1.4: 世界の一次エネルギー供給における再生可能エネルギー供給量の変遷 (1971～2008 年) [図 1.12]

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, Annex II.4]。ただし、バイオ燃料のエネルギー量は二次エネルギーの項で報告されている (バイオ燃料生産に用いる一次バイオマスは変換損失のため、多くなると見込まれる [2.3, 2.4])。

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。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 [1.1.6]。

- ・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
- ・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
- ・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
- ・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

再生可能エネルギー利用の将来的な割合は、ゼロ又は低炭素技術のポートフォリオ（図 TS.1.5）内におけるその優劣だけでなく、気候変動緩和の目標、要求されるエネルギーのサービス、及びその結果として生じるエネルギー需要にも大きく依存する。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 [1.1.6]。

世界の平均気温の変化を許容な可能範囲に抑えることを考慮して気候保護目標を設定すると、付随する二酸化炭素排出枠及びそれに続く時間依存の排出経路内において、対応する温室効果ガス濃度の限度が概ね定まり、これによって排出量の多い化石燃料の許容量も決定出来る。ゼロ又は低炭素エネルギーが、一次エネルギーの供給への補完的な貢献は、要求されるエネルギーのサービス「規模」の影響を受ける [1.1.6]。

全体的なエネルギー効率を改善する多くの低コストオプションが、すでに政府不干渉のシナリオに組み込まれているため、気候変動緩和のためにエネルギー強度を低下させる他の機会は限られている。大規模な気候保護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、さらなるゼロ又は低炭素技術が必要となる。その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、その安全保障的側面や社会的側面に加え技術間の経済的な競争や、関係する相対的な環境負荷（気候変動に加えて）に大きく依存している（図 TS.1.5） [1.1.6]。

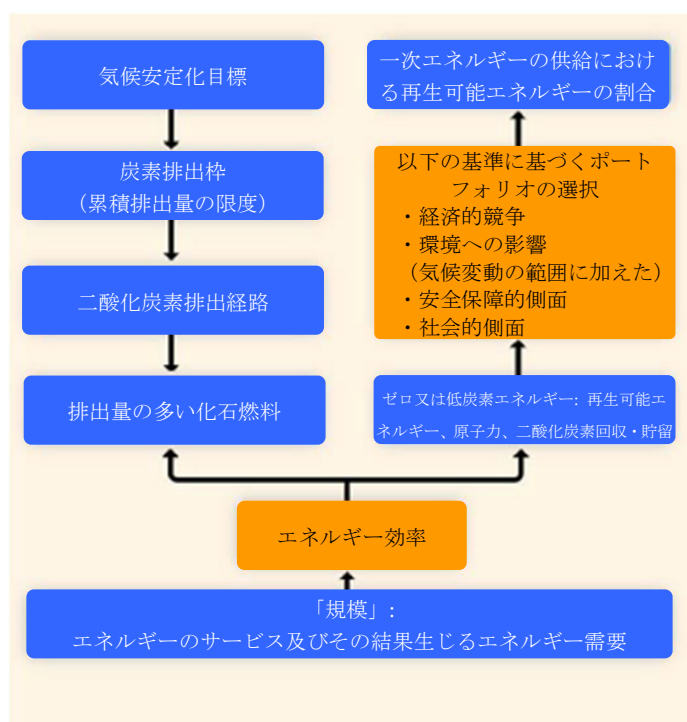


図 TS.1.5: ゼロ又は低炭素緩和オプションのポートフォリオにおける再生可能エネルギーの役割（定性的記述） [図 1.14]

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 [1.1.8]。

- ・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

- ・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
- ・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
- ・再生可能エネルギーとその他のエネルギー技術の社会経済・環境面の総合的な評価
- ・持続可能な再生可能エネルギーのサービスにより開発途上国のニーズに応える機会
- ・多様な状況下で、費用対効果の高い再生可能エネルギーの導入を可能にする政策、制度、財政的メカニズム

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、それに関係する政策の意思決定に役立つだろう [1.1.6]。

1.2 再生可能エネルギー資源・ポテンシャルの概要

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[1.2.1]。

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 TS.1.6 は、多段階の変換過程を示している [1.2.1]。

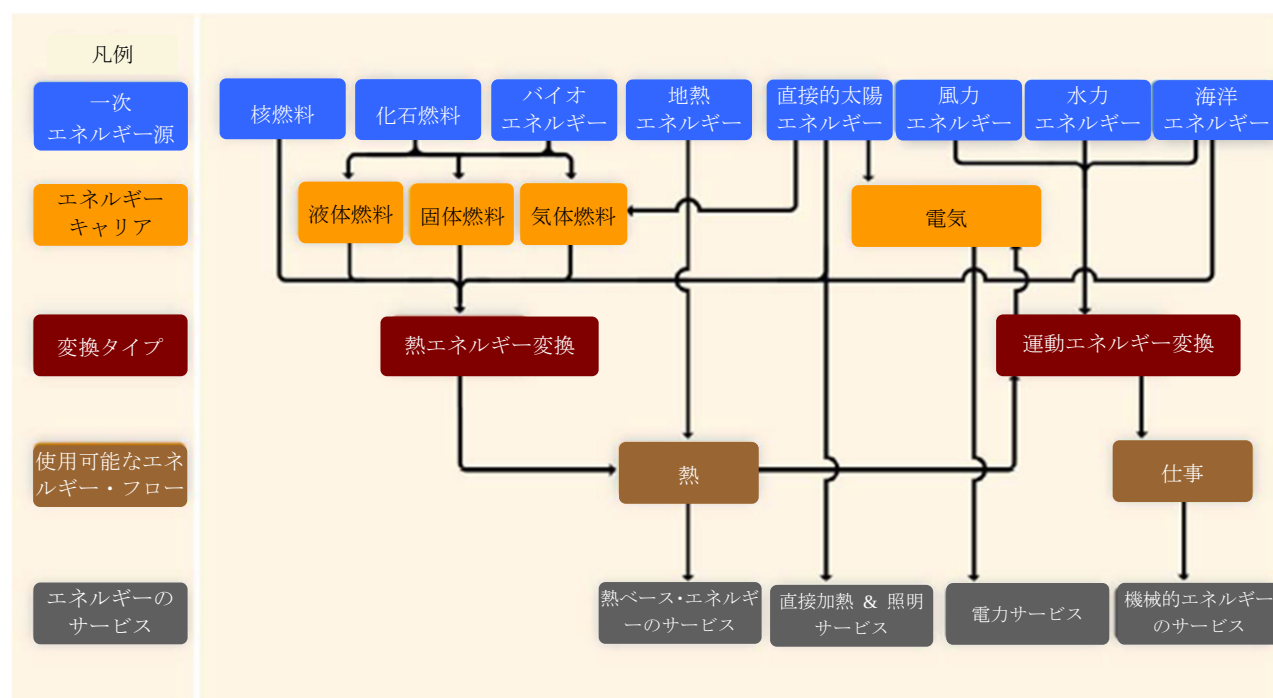


図 TS.1.6: エネルギー源からサービスへのエネルギー経路図。つながった線はすべて有効なエネルギー経路を示している。消費者に供給されるエネルギーのサービスは、量の異なる最終用途エネルギーで提供することが出来る。つまり、エネルギーのサービスは、多かれ少なかれ複数のエネルギー源からの一次エネルギーによって、二酸化炭素排出や他の環境への影響が異なる形で提供出来る[図 1.16]。

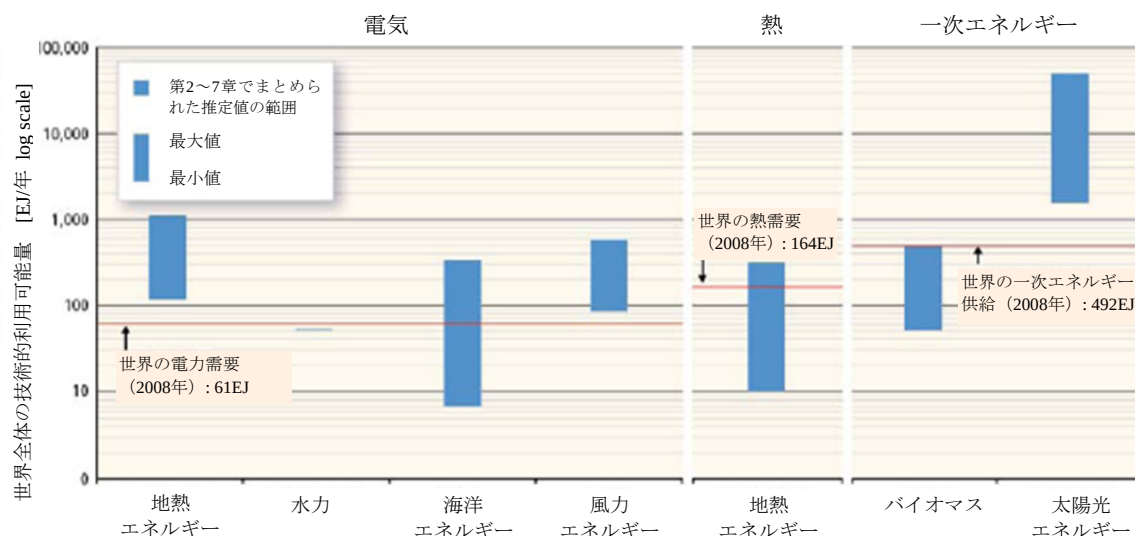
人々が必要としているのはエネルギーではなく、エネルギーのサービスである。そのため、この過程は二酸化炭素排出量を最小限に抑える低炭素技術を用いて、一次エネルギーの消費をあまり必要としない効率的な方法でニーズを満たすべきである。バイオマスや地熱を含む発電を行う熱転換プロセスでは、約 40～90%のエネルギーロスがあり、内燃機関を用いた輸送に必要な機械エネルギーを供給する場合は、約 80%のエネルギーロスが生じる。このような、転換ロスによって化石燃料を用いた一次エネルギーの占める割合が増え、熱から電力及び機械エネルギーを生成するために必要とされる、化石燃料を用いた一次エネルギー量が上昇する。太陽光発電（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） [1.2.1]。

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[1.2.1]。

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の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[1.2.2]。

また、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。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。そして、再生可能エネルギーの世界が持っている技術的ポテンシャルの絶対的な大きさが、再生可能エネルギー導入の制約となる可能性は低い [1.2.3]。

図 TS.1.7 は、2008 年において太陽光エネルギーの技術ポテンシャル⁶が世界の電気・熱需要に加え、世界の一次エネルギー供給を大きく上回っていることを示している。この図は、現在のエネルギー需要・供給の視点から見ると、相対的に再生可能エネルギーポテンシャルが大きいことを示しているが、技術的ポテンシャルの不確実性が高いことには注意しておく必要がある。第 1 章の Annex の表 A.1.1 には、より詳細な注記及び説明が含まれている [1.2.3]。



世界の技術的ポテンシャルの推定範囲

最大値 (EJ/年)	1,109	52	331	580	312	500	49,837
最小値 (EJ/年)	118	50	7	85	10	50	1,575

図 TS.1.7: 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[図 1.17、1.2.3]。

注: ここで報告された技術的ポテンシャルは、年間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。

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。電力、暖房、冷房、気体燃料、固体燃料などの要素に関わらず、再生可能エネルギーの統合はケースバイケースであったり、場所特有な事情に左右されるなど複雑なものである。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。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。再生可能エネルギーが浸透することによって、安価かつ効率的な通信システムと技術の併用に加え、スマートメータも必要となる [1.2.4]。

エネルギーのサービスは、エネルギーを使用して実施されるタスクである。ある特定のエネルギーのサービスは様々な方法で提供可能であるため、エネルギー効率の高低、即ち（任意のエネルギー構成の下における）相対的な二酸化炭素放出量の大きさによって特徴づけられる。エネルギー効率向上は、エネ

⁶ 技術的ポテンシャルの完全な定義については Annex I を参照。

ルギーサービス提供段階でのエネルギー需要の削減につながる。これは、一次エネルギー需要を削減するための重要な手段である。再生可能エネルギー資源は、一般的に化石・核燃料よりも出力密度が低いため、この手段が特に重要となる。エネルギー効率向上技術は、最終用途エネルギー需要削減のオプションの中でも、最もコストがかからないことが多い。本報告書では、効率の異なる範囲についての具体的な定義を示している [1.2.5]。

実際には、エネルギー効率向上技術によるエネルギーの節約は、必ずしも実現するとは限らない。ある特定のエネルギーのサービスでは、（エネルギー使用量の低下による）エネルギー効率が向上したことで総コストが低下し、エネルギーのサービスの利用増加を招くというリバウンド効果が生じる場合もある。このリバウンド効果は、経済協力開発機構（OECD）加盟国の家庭での暖房・自動車の使用においては飽和効果によって 10～30%に抑えられ、もっと効率の高い電化製品及び給湯においてはさらに小さくなると推定されている。しかし、経済全体のエネルギー需要削減につながるエネルギー効率向上技術はエネルギーの価格も下げるため、経済全体のエネルギーコスト低下及び追加コスト節約（エネルギー価格の下落及びエネルギー使用の低下）につながる。なお、リバウンド効果は開発途上国及び貧しい消費者においてより大きくなると予想されている。リバウンド効果の主な問題は二酸化炭素排出量への影響である [1.2.5]。

また、炭素リーケージが炭素削減政策の効果を損ねてしまう可能性がある。これは、部門及び行政区を超えて統一的に政策が適用されていない場合に、炭素排出活動自体が、政策に適用されていない部門及び行政区に移ってしまうことである。最近の研究では炭素リーケージが発生する可能性は非常に高いことが示されている [1.2.5]。

1.3 エネルギーのサービスのニーズと現状の合致

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再生可能エネルギー・フローを、図 TS.1.8 に示す [1.3.1]。

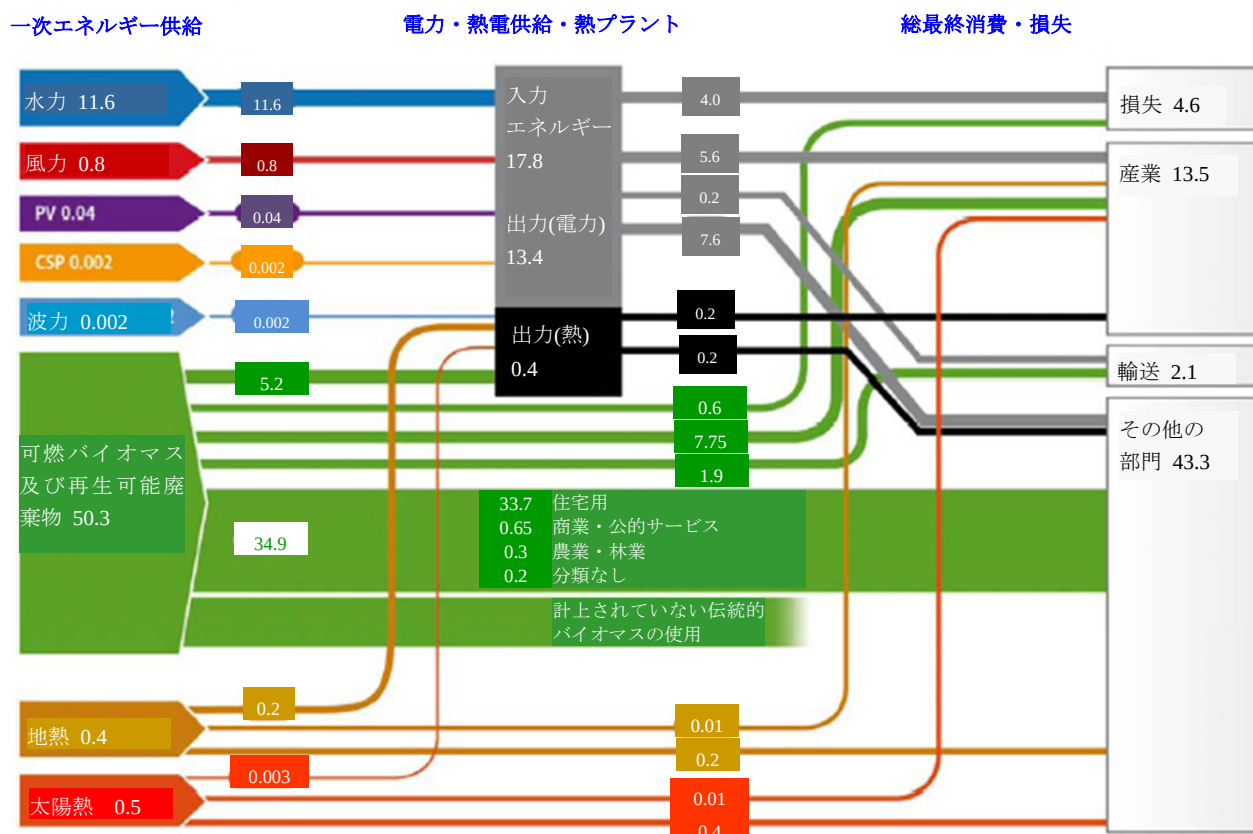
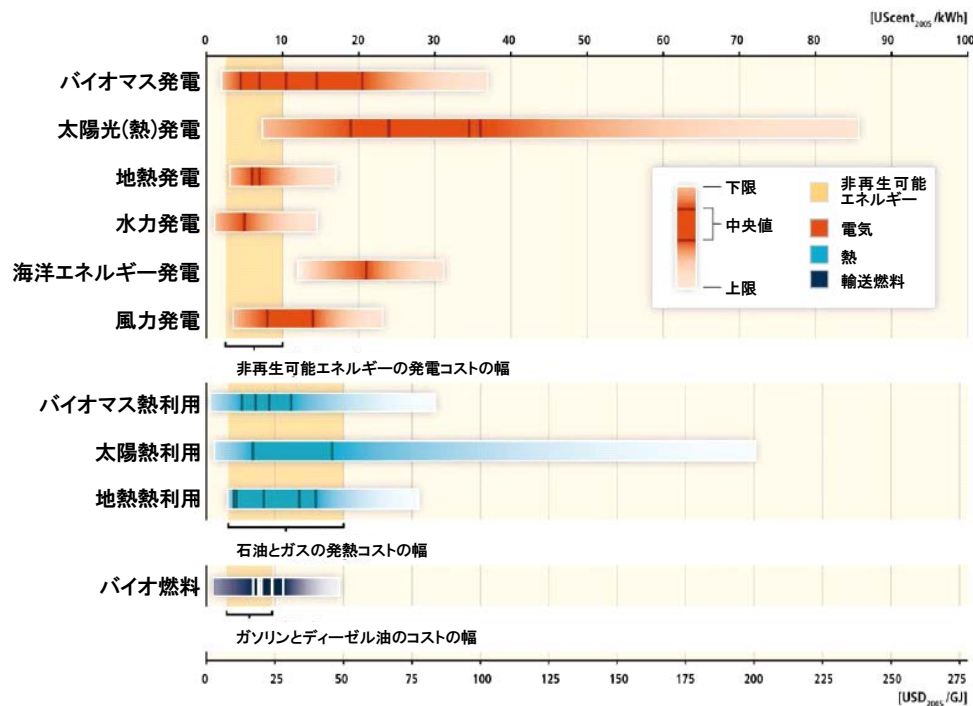


図 TS.1.8: 2008 年における、キャリアを介した主要な再生可能エネルギーから最終消費及び損失へのエネルギー・フロー（2008 年の EJ）（国際エネルギー機関（IEA）のデータに準拠）。「その他の部門」には、農業、商業用、住宅用建物、公共サービス、不特定の部門が含まれる。「輸送部門」には、国際航空及び国際船舶が含まれる [図 1.18]。

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。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 [1.3.1]。

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は、既存のエネルギー価格よりも現在は高い。技術の特徴・規模、コストとパフォーマンスの地域的ばらつきや、異なる割引率、及びこれらに限らない多くの要素によって、特定の商業的に利用出来る再生可能エネルギー技術の均等化発電原価の幅は、最近広がっている（図 TS.1.9） [1.3.2, 2.3, 2.7, 3.8, 4.8, 5.8, 6.7, 7.8, 10.5, Annex III]。

ほとんどの再生可能エネルギー技術のコストは低下してきており、今後予想される技術の進展によってさらにコストが削減されるだろう。このコスト削減及びエネルギー供給の外部コストの内部化によって、再生可能エネルギーの相対的な競争力の改善が予想される。これは、他の理由によって市場価格が上昇した場合も同様である [1.3.2, 2.6, 2.7, 3.7, 3.8, 4.6, 4.7, 5.3, 5.7, 5.8, 6.6, 6.7, 7.7, 7.8, 10.5]。



注: 中央値は以下のサブカテゴリーに対して示されている。サブカテゴリーは（上図の左→右の）出現順に並べられている。

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

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

図 TS.1.9: 最近の非再生可能エネルギーコストと比較した、特定の商業化可能な再生可能エネルギー技術の均等化エネルギー生産原価の幅。技術サブカテゴリーや割引率はこの図にまとめられている。そのようなまとめを行っていない関連する図については、[1.3.2, 10.5, Annex III] を参照のこと。非再生可能エネルギー供給オプションのコストに関する追加情報は [10.5] [図 10.28] で示されている。

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へと非常に広がりつつある。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っており、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。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 [1.3.3]。

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 [1.4, 1.4.1]。

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]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]や問題[1.4.3]がある [1.4]。

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]。

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 [1.4.1, 9.3.1]。

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。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（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いて、再生可能エネルギーの長期的なプラス効果と考えられる [1.4.1, 9.3.1.4, 11.3.4]。

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。特にへき地での再生可能エネルギーへの依存、電力生産用に現地で生産されたバイオエネルギーの使用、クリーンな調理設備の利用は、近代的なエネルギーのサービスへ、世界的なアクセスの実現に貢献する。近代的なエネルギー利用への移行は、エネルギーの梯子を登ることであり、伝統的な装置・燃料から、より環境にやさしく、健康に悪影響が少ない近代的なものへの進行を意味している。この移行は、所得水準へ影響を与える [1.4.1, 9.3.2]。

資源の利用可能性や分布に加え、エネルギー供給の変動及び信頼性として位置づけられる、エネルギー安全保障についても、再生可能エネルギーの導入によって強化される可能性がある。再生可能エネルギー技術は、エネルギー源のポートフォリオの多様化、価格変動に対する経済の脆弱性の低減、及び外貨為替に関連するエネルギー輸入からの方向転換を助け、環境の違いによるエネルギー供給の不公平性を緩和する。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）によって占められている。その価格は、過去数十年間にわたって不安定な状態が続いており、特に開発途上国及び燃料の輸入依存

度が高い国においては、社会的・経済的・環境的持続可能性に対して大きな影響を与えてきた [1.4.1, 9.2.2, 9.3.3, 9.4.3]。

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。しかし、環境や社会に対するエネルギーシステムの全体的な負荷の評価と、潜在的なトレードオフとの相乗効果を評価するためには、温室効果ガス排出量及びそれ以外の環境への影響も考慮に入れる必要がある。また資源は気候変動にも影響を受ける場合がある。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。図 TS.1.10 では、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[1.4.1, 9.2.2, 9.3.4, 11.3.1]。

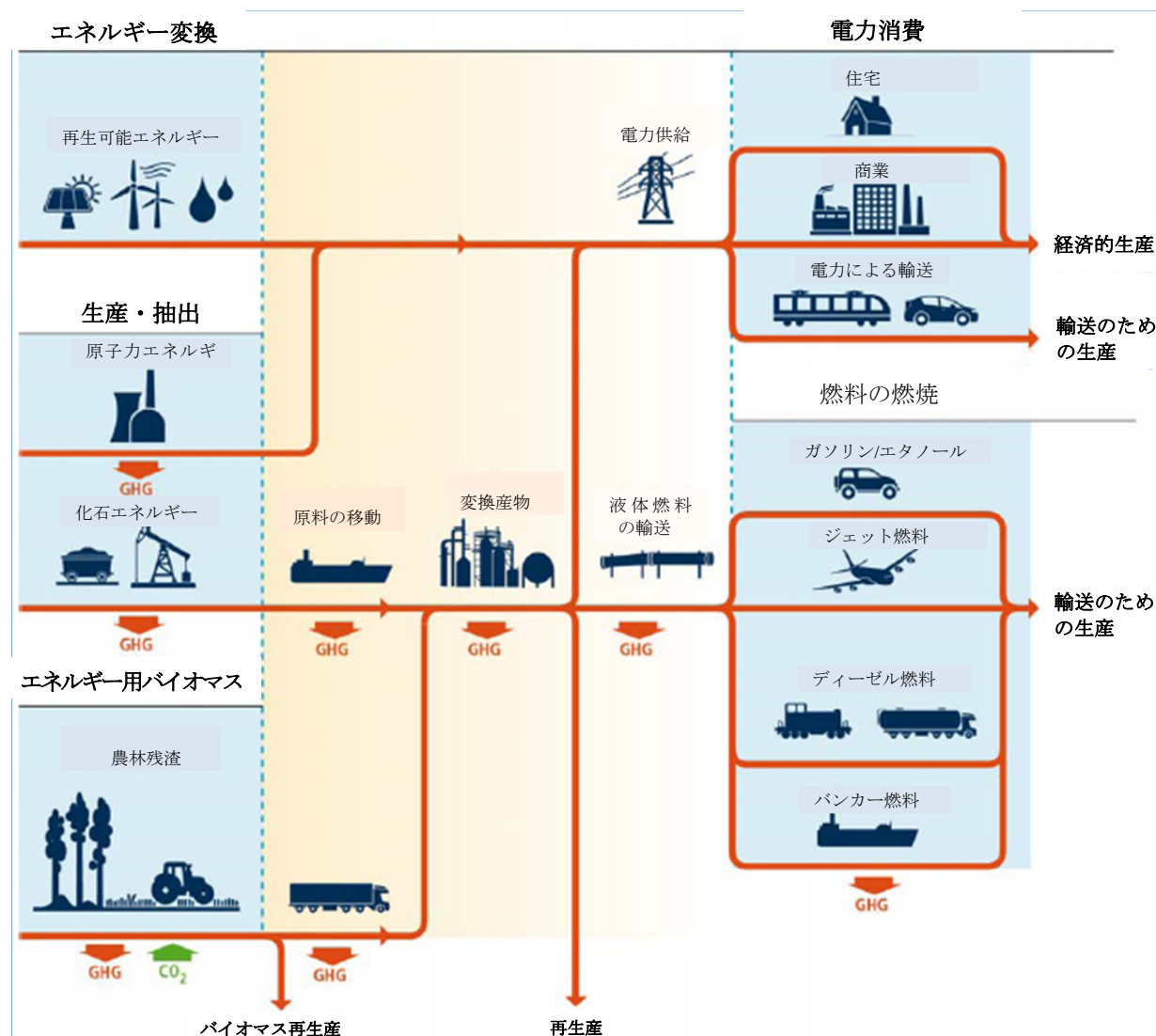


図 TS.1.10: 再生可能エネルギーと他の生産オプションの役割を示す、エネルギー生産と使用の体系。ライフサイクル・アセスメントを行うためには系統的アプローチが必要となる[図 1.22]。

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。これに関連して、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らせる。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 [1.4.1, 2.5.4, 9.3.4, 9.3.4, 9.4.2]。

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。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。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 [1.4.1, 9.3.4]。

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。様々なREの使用に対する障壁は、市場失敗・経済的障壁、情報・意識障壁、社会文化的障壁、及び組織・政策障壁に分類出来る。これらの障壁を克服するための政策や財政支援のメカニズムは、第11章において広く評価している。障壁がある特定の技術に特に関係している場合は、本報告書の適切な「技術」の章で考察している[第2～7章]。障壁及びその障壁を克服する可能性のある政策手段の要約は、第1章の表1.5で示している。市場失敗は多くの場合、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。もう1つの市場の失敗は、独占的な事業体による利益の占有である。再生可能エネルギー導入の場合、これらの市場での失敗は、再生可能エネルギー技術の発明とイノベーションへの過小投資、値の付かない環境への影響、及びエネルギー使用のリスクに加え、エネルギー市場における独占力（供給元が1つ）または買手独占力（供給先が1つ）が出現する場合がある。他の経済的障壁としては、先行投資コスト及び資金リスクが挙げられる。後者は技術の成熟度の低さに起因する場合がある [1.4.2, 1.5, 11.4]。

情報・意識啓発上の障壁として、天然資源に関するデータの不足があげられる。その主な原因は、場所の特異性（地域的な風況など）、特に開発途上国のへき地における高い技術を持つ人材（能力）の不足、及び公的・制度的意識の欠如である。社会文化的障壁は、再生可能エネルギーの認識と許容に影響するが、変化しにくい社会的・個人的価値や基準とも本質的に結びついている。制度的・政策的障壁には、既存の産業、インフラ、及びエネルギー市場の規制が含まれる。1990年代に複数の国においてエネルギー市場が自由化されたにもかかわらず、現在の産業構造は非常に集中的で、多くの国でエネルギー・ビジネスの規制は独占または寡占供給者を前提として設計されている。技術規制・基準は、エネルギーシステムが大規模で集中し、出力密度や電圧が高いことを前提として発達してきた。知的財産権、国際貿易における関税、及び政府による財政支援の割り当ての不足によって、障壁がさらに高くなる場合もある [1.4.2]。

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。風力・太陽エネルギーなど、いくつかの再生可能資源は変動しやすく、必要な時に送電が常に可能であるとは限らない。その上、多くの再生可能エネルギー源のエネルギー密度は比較的低いため、非常に大規模な産業施設などの目的に対しては、単独での電力レベルが不十分な場合もある [1.4.3]。

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。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。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 [1.4.1, 1.4.2, 9.3.4, 11.1.1, 11.2, 11.4, 11.5]。

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 [1.4, 1.5, 11.1, 11.4]。

政策・意思決定者は、様々な方法で市場にアプローチしている。世界的に認められた再生可能エネルギー政策オプション、または分類のリストは存在しない。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 [1.5.1, 11.5]。

- ・ **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
- ・ **公的ファイナンス**：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**：適用される者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。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 [1.5.1, 11.5.2]。

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が、どのような状況にも対応出来る政策は存在しない。技術的成熟度、使用可能な資本、既存システムへの統合の易しさや、地域や国家の再生可能エネルギー資源基盤などの要素によって、より有効的で効率的な政策の組み合わせが異なることは、経験によって証明されている。

- ・ 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。たとえば長期的な協定では、リスクを低減するように策定されれば、割り当て政策も効果的になる。
- ・ 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。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。
- ・ 輸送部門では、再生可能エネルギー燃料の義務化や混合要件は、大部分の近代的バイオ燃料産業の開発におけるキードライバーである。その他の政策には、直接的な政府支払や減税などがある。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。

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。長期的には、再生可能エネルギーの技術的学習への支援は、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 [1.5.1, 11.1, 11.4, 11.5.7]。

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、任意の政策と他の再生可能エネルギー政策や、非再生可能エネルギー政策との相互作用に働きかけることによって作れる。そして、「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。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 [1.5.2, 11.6]。

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ない[1.5.2, 11.6.5]。

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（システムまたは非システム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。

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事例から学ぶことは重要である。再生可能エネルギーの割合が高い、国際的な温室効果ガス濃度安定化レベルを達成するためには、現在のエネルギーシステムの構造的な移行が、これから数十年にわたって必要となる。それが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 [1.5.3, 11.7]。

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。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 [1.2.5, 1.5.3, 11.7, 11.6, 11.7]。

第2章: バイオエネルギー

2.1 バイオマス及びバイオエネルギーの概論

バイオエネルギーは、食料、飼料、繊維の生産、及び林産物の世界的なバイオマス生産システムに加え、廃棄物・残渣管理に複雑な形で組み込まれている。最も重要と思われるのは、バイオエネルギーが開発途上国の数十億に上る人々の日常生活に密接かつ重要な役割を担っていることである。図 TS.2.1 は、開発途上国及び先進国においてバイオエネルギーに使用されるバイオマスの種類を示している。バイオエネルギー生産の拡大には、食料、飼料、繊維、林産物とエネルギーの原材料生産性の増加、変換技術の大幅な改善、バイオエネルギーの生産と使用に関連した複雑な社会・エネルギー・環境の相互作用の正確な理解といった、さまざまな要素が必要となる。

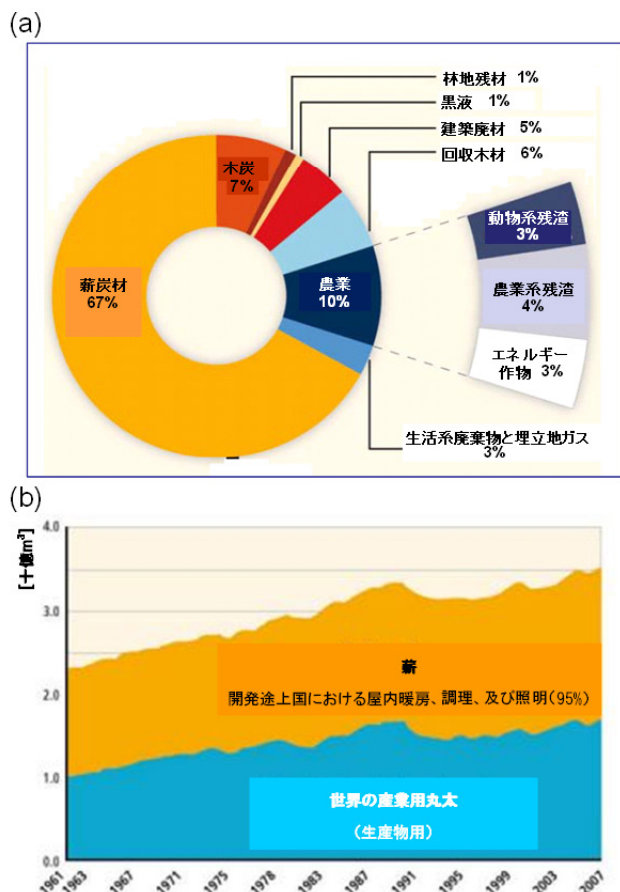


図 TS.2.1: (a) 世界のエネルギー用の一次バイオマス資源、及び (b) 世界の産業用丸太⁷の生産水準に平行している開発途上国で使用される薪の割合 [図 2.1]。

⁷ 丸太生産物とは、林産物産業の挽材と化粧板用丸太、及び紙、新聞印刷用紙、クラフト紙に使用されるパルプ材の生産に使用される木材チップのことである。2009 年には、経済の後退を反映して、32.5 (合計)・12.5 (産業用) 億 m³ 減少している。

表 TS.2.1: 2008 年における伝統的及び優良な近代的バイオマス・エネルギー・フローの例。特定のフロー及び計算上の課題に関する注については表 2.1 を参照のこと [表 2.1]。

種類	概算の一次エネルギー (EJ/年)	概算の平均効率 (%)	概算の二次エネルギー (EJ/年)
伝統的バイオマス			
IEA のエネルギー・バランス統計における計上	30.7	10-20	3-6
インフォーマル部門の推定（木炭など） [2.1]	6-12		0.6-2.4
伝統的バイオマスの合計	37-43		3.6-8.4
近代的バイオエネルギー			
バイオマス、一般廃棄物、バイオガスからの電力及び熱電供給	4.0	32	1.3
固体バイオマス及びバイオガスからの住宅用・公的・商業用建築物における熱供給	4.2	80	3.4
陸上輸送燃料（エタノール及びバイオディーゼル）	3.1	60	1.9
近代的バイオエネルギーの合計	11.3	58	6.6

2008 年には、バイオマスは世界の一次エネルギー供給の約 10% (50.3EJ/年) を占めている（表 TS.2.1 を参照）。主なバイオマスの使用は、大きく分けて以下の 2 つに分類される。

- ・ 木材、藁、家畜ふん尿、その他の動物ふん尿などの低効率な伝統的バイオマス⁸は、主に開発途上国における貧困層によって調理、照明、及び暖房に使用されている。このバイオマスの大部分は燃焼されるため、健康・生活状態に重大な悪影響を及ぼす。へき地では、次第に木炭が二次エネルギーキャリアになってきており、生産チェーン創出の機会が生まれてきている。伝統的バイオマスの使用規模の指標として、図 TS.2.1(b)は、伝統的バイオマスからの世界的な一次エネルギー供給が世界の産業用木材生産に平行していることを示す [2.5.4, 2.3, 2.3.2.2, 2.4.2, 2.5.7]。
- ・ 高効率な近代的バイオエネルギーは、様々な部門に対し、熱、電力、熱電供給（CHP）、及び輸送燃料として使用されている。二次エネルギーキャリアとして便利な固体、液体、及びガスは輸送燃料として使用されており、その中には世界的に陸上輸送やいくつかの産業用途で使用されるエタノールやバイオディーゼルといった液体バイオ燃料も含まれる。そして、農業残渣の嫌気性消化及び都市固形廃棄物（MSW）処理によるバイオマス由来ガス（主にメタン）は、電力、熱、またはその両方の生産に使用される。これらのエネルギーのサービスに最も大きく寄与しているのは、チップ、ペレット、回収された使用済み木材、及びその他の固体である。暖房には、地域暖房システムなどの、温水暖房が含まれる。近代的バイオエネルギーへの推定される、総一次バイオマス供給は 11.3EJ/年で、最終用途消費者に配給される二次エネルギーは約 6.6EJ/年である [2.3.2, 2.4, 2.4.6, 2.6.2]。

加えて、紙パルプ、林産物、及び食品産業などの産業部門では、主に工業プロセス蒸気のエネルギー源として年間約 7.7EJ のバイオマスが消費されている [2.7.2, 8.3.4]。

2.2 バイオエネルギー資源ポテンシャル

バイオマス資源固有の複雑性により、その複合的な技術的ポテンシャルの評価は、意見が分かれる問題であり、特徴づけが難しい。文献中の推定値は、地球規模のモデリングの取り組みによると、技術的ポテンシャルが無い場合（エネルギー生産に利用可能なバイオマスなし）から、最大理論技術的ポテンシ

⁸ 従来型のバイオマスは、開発途上国の住宅におけるバイオマスの消費と定義され、ほとんどの場合持続不可能な調理及び暖房目的の木材、木炭、農業残渣、及び動物ふん尿の利用である。その他のバイオマスの使用は全て近代的バイオマスと定義される。本報告書ではさらに、効率性の異なる高効率な近代的バイオエネルギーと産業用バイオエネルギーの利用を区別している [Annex I]。バイオマスの使用の再生可能性や持続可能性は主に、2.5.4 及び 2.5.5 節でそれぞれ検討している (1.2.1 節及び Annex I も参照のこと)。

ャルが約 1,500EJ の場合までの幅がある。図 TS.2.2 は、第 10 章のシナリオ分析によるデータを含め、主要な研究で見出された技術的ポテンシャルの概要を示している。エネルギー用のバイオマスの技術的ポテンシャルまで視野に入れると、現在、エネルギーに使用されている世界のバイオマスは約 50EJ/年に達しており、食料、飼料、及び繊維に使用したバイオマス収穫分すべては、カロリーに換算すると合計 219EJ/年（2000 データ）が含まれている。2050 年までにバイオエネルギーで 150EJ/年という実用レベルを達成するには現在の世界のバイオマス収穫分のほぼすべてが必要になる [2.2.1]。

2007 年において入手可能な文献の分析及び追加的なモデリング研究に基づく技術的ポテンシャルの評価によると、図 TS.2.2 の積み重ね棒グラフで示すように、2050 年における技術的ポテンシャルの上限は約 500EJ に達する可能性がある」と結論付けている。この研究では、土地利用の良好なガバナンス及び農業管理の大幅な改善を保証する政策枠組みを想定し、水の制限、生物多様性保護、土壌劣化、及び食料との競合を考慮している。林業、農業、及び有機性廃棄物（一般廃棄物、家畜ふん尿、プロセス残渣などの有機成分）から発生する残渣は、40～170EJ/年に達すると推定されており、平均推定値は約 100EJ/年となっている。技術的ポテンシャルの、この部分は比較的確実性が高いが、競合する用途によって、エネルギー利用用途の本質的な利用可能性を、この幅の下限に押し下げられる可能性がある。林業残渣によるもの以外の余剰林業については、60～100EJ/年の追加的な技術的ポテンシャルを持っている。余剰が出る可能性のある良質な農地・牧草地におけるエネルギー作物生産の低めの推定は 120EJ/年である。水不足の土地、耕作限界地、及び荒廃地の潜在的な貢献により、これに、最大で 70EJ/年追加する可能性がある。これには、水不足による制約があり、土壌劣化がより厳しい大きな地域を含んでいる。農業・家畜類管理を改善するための農業技術における十分な研究を想定すれば、さらに 140EJ/年が追加されるだろう。3 つの分類を合わせると、この分析による技術的ポテンシャルは最大約 500EJ/年になる（図 TS2.2）。

この技術的ポテンシャルの開発には大規模な政策的努力が必要となるだろう。そのため、実際の展開はより低くなる可能性が高く、バイオマス資源の基盤は、バイオマス残渣及び有機性廃棄物の割合、耕作限界地及び荒廃地におけるバイオエネルギー作物の栽培、バイオマスが他の主な参照されるオプション（サトウキビベースのエタノール生産など）に比べてより安価なエネルギー供給のオプションである地域に大きな制約を受ける[2.2.2, 2.2.5, 2.8.3]。

利用可能な科学文献に基づく専門家による検討の結論は以下の通りである [2.2.2.～2.2.4]。

- ・ 重要な要因として、(1) 人口、経済開発、技術開発、食料・家畜ふん尿・繊維需要（食事を含む）、及び農業と林業における開発、(2) 適応能力を含む将来の土地利用に対する気候変動の影響、(3) 土壌劣化、水不足、及び生物多様性・自然保護要件の範囲が含まれる。
- ・ 農業、林業における残渣フロー、及び利用されていない（または大規模に使用されていることにより耕作限界になっている・劣化している）農業用地を、短期的視点と長期的視点の両方においてエネルギー用バイオマス生産の拡大の重要な基礎として挙げている。生物多様性による制限、及び良好な生態系と土壌の劣化の回避を確実にすることにより、農業や林業における残渣抽出には制限が、かかっている。
- ・ 最適な植物（多年生の作物・基本種など）の栽培によって、従来型の食用作物にはあまり適さない土地におけるバイオエネルギーの生産を可能にし、技術的ポテンシャルを高めることが出来る。それは、そのような土地における従来型の作物の栽培が、土壌炭素排出につながる可能性がある」と考慮すれば、さらに高まる。
- ・ 農業・林業システムに、バイオエネルギー生産を統合した多機能的な土地利用システムは、生物多様性の保護に貢献し、土壌の生産性や良好な生態系の回復及び維持を助ける。
- ・ 水不足を経験した地域では、生産が限定的になる場合がある。バイオマス植林地への土地の転換によって、下流の水利用が減少する可能性を考慮する必要がある。乾燥耐性のある適切なエネルギー作物の利用によって、水不足に適応出来る。バイオマス資源ポテンシャルの評価においては、より注意深く、水利用可能性や競合する利用法についての制約や機会を、検討する必要がある。

上述の制約に基づき、専門家による検討では、2050年までのエネルギー用バイオマスの潜在的な普及レベルは、100～300EJの範囲に収まると結論付けられている。しかし、このポテンシャルには市場・政策条件などの大きな不確実性があり、食料・家畜ふん尿・繊維生産及び林産物の農業部門における改善率への依存性も強い。文献の1例では、バイオエネルギーは2020年の約100EJ/年から2030年の130EJ/年まで拡大可能であり、2050年には184EJ/年に達する可能性を示している [2.2.1, 2.2.2, 2.2.5]。

(図 TS.2.2 で示す) 専門家の検討による 300EJ/年の普及レベルの範囲で高い水準を達成するには、特に農業部門や優良な土地の利用・管理(区画化など)の改善及び効率性向上を目的とした大規模な政策的取り組みが必要となるだろう。

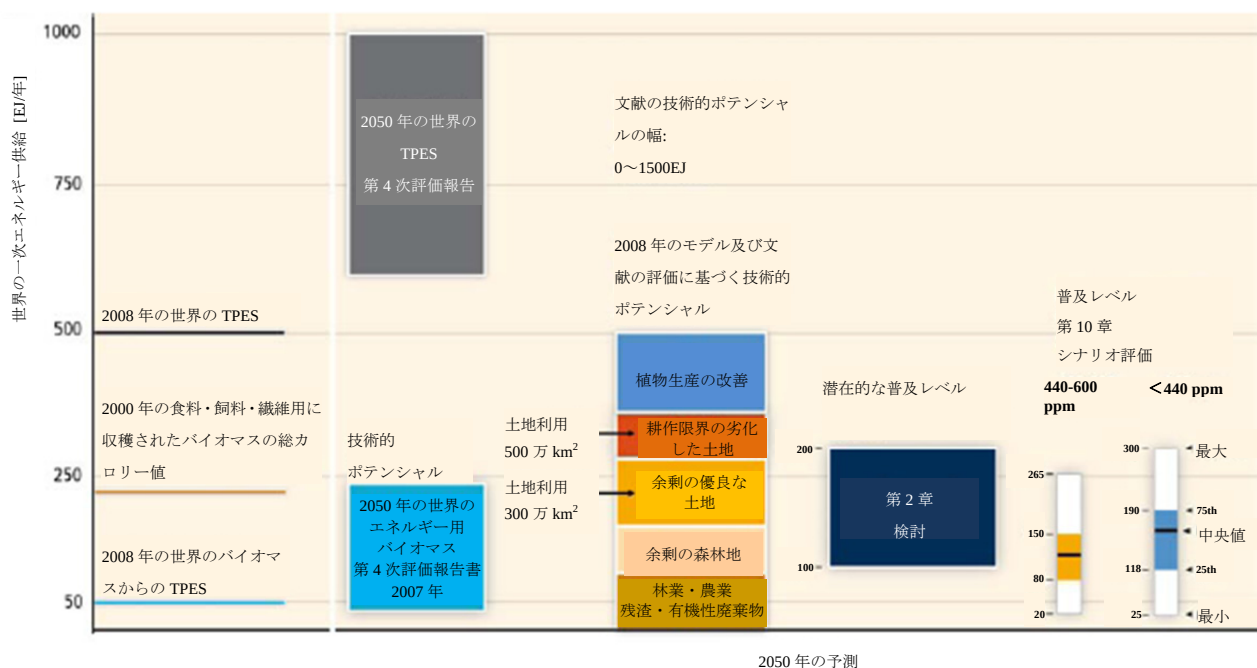


図 TS.2.2: 2008 年の世界の総一次エネルギーと世界の全バイオマス収穫量と同等のバイオマス供給と比較した、2050 年における世界の陸生バイオマスの技術的ポテンシャルと可能性のある普及レベルの主な予測 [図 2.25]

2.3 バイオエネルギー利用技術及びその用途

商業用バイオエネルギー利用技術の用途には、家庭での調理から大規模な地域暖房の熱生産までの範囲がある。これには、バイオマスの燃焼、熱電供給、またはバイオマスや化石燃料との共燃焼による発電、及び図 TS.2.3 の実践で示される油料作物(バイオディーゼル)と砂糖やでんぷん料作物からの第一世代液体バイオ燃料(エタノール)が含まれる。この図は、開発途上の原材料(水生バイオマスなど)、変換経路、及び生産物を説明している⁹ [2.3, 2.6, 2.7, 2.8]。

⁹ 新たな過程で生産されたバイオ燃料(リグノセルロースなど)は、先進・次世代バイオ燃料とも呼ばれている。

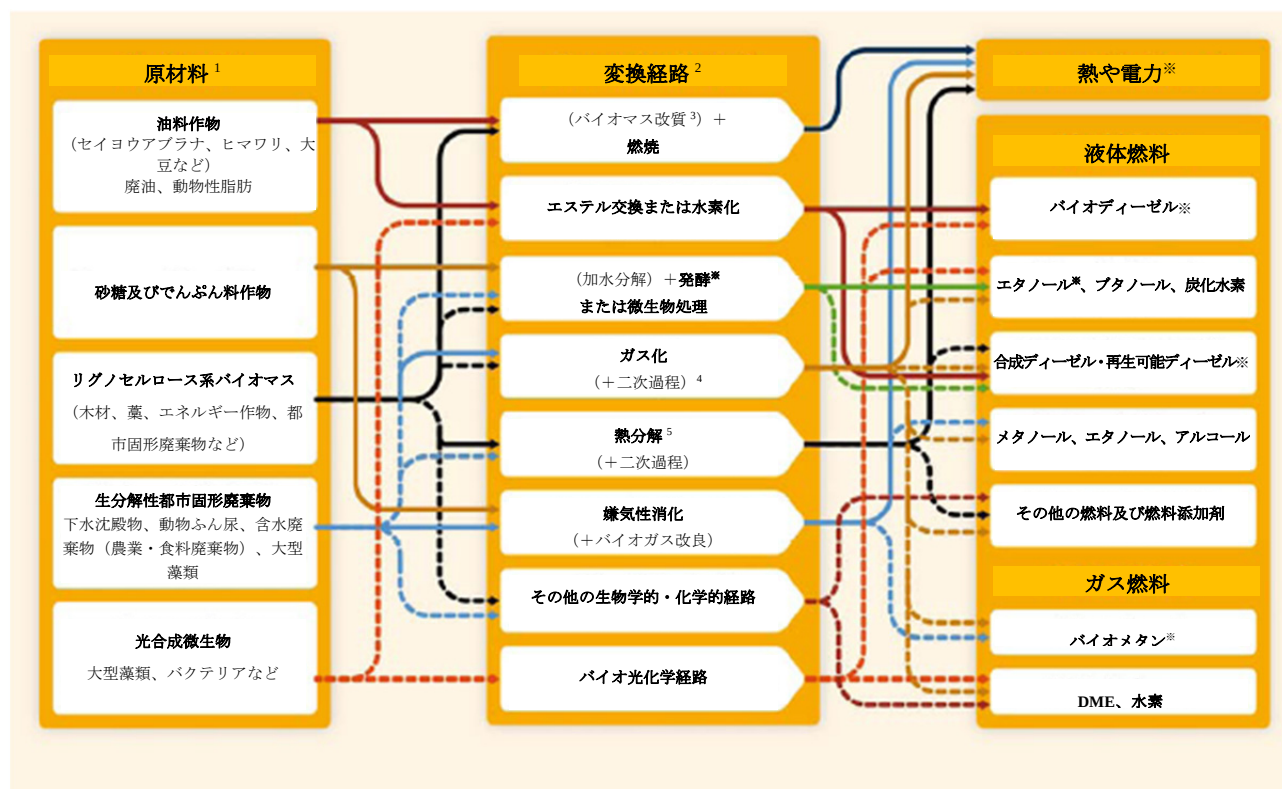


図 TS.2.3: バイオマス原材料から、熱、電力、コジェネレーション、及び液体・ガス燃料への熱化学的・化学的・生物学的変換経路による商業用（実線）及び発展途上（点線）のバイオエネルギー経路の種類を示した概略図。商業化された製品には星印を付けている [図 2.2, 2.1.1]。

注:¹ 各原材料の一部は他の経路でも使用可能である。² 各経路は副産物も発生させる。³ バイオマスの品質向上には、高密度化変換（ペレット化、熱分解、乾燥など）が含まれる。⁴ バイオメタン、特に天然ガスの主要な成分であるメタンに品質向上出来る様々なガスへの嫌気性消化。⁵ 水熱、液化などのその他の熱変換経路の可能性はある。DME＝ジメチルエーテル。

2.3 節では、バイオマス生産及びユーザ（伝統的・近代的バイオマスを利用する個人、二次エネルギー製品を使用・生産する企業、増加傾向にある木炭を生産・分配する非公式部門）への原材料供給の物流に関係する主要な問題を扱っている。バイオマスを便利な二次エネルギーキャリアに変える変換技術は熱化学的・化学的・生化学的過程を使用しており、2.3.1～2.3.3 及び 2.6.1～2.6.3 節に要約する。なお、既存・発展途上のエネルギーシステムとエネルギー製品の統合については第 8 章で扱う [2.3.1～2.3.3, 2.6.1～2.6.3]。

2.4 世界的・地域的な市場及び産業の展開の状態

バイオマス市場・政策の検討によって、近年、液体や気体のエネルギー輸送用近代的バイオマスの使用など、バイオエネルギーは急速に発達していること（2006～2009 年にかけて 37%の増加が見られる）が示されている。特に IEA の予測に加えて多くの国家目標が、再生可能エネルギーの大幅な割合の増加を実現する、バイオマスに期待している。バイオマスやバイオ燃料の国際貿易も、近年さらに重要度を増してきており、2009 年にはバイオ燃料（エタノールとバイオディーゼルのみ）の約 6%（2008 年には最大 9%水準まで到達）そしてエネルギー利用のための総ペレット生産のうち 1/3 が国際的に取引されている。後者によって、供給の制約を受けている地域についてバイオマスの利用増加と、需要が不足している地域からの資源の移動の両面が促進された。それにも関わらず、持続可能性基準も同時に満たすバイオマスとバイオ燃料の有効な商品取引の発展には、多くの障壁が残っている [2.4.1, 2.4.4]。

多くの国においてバイオエネルギー、特にバイオ燃料の政策的枠組みは、近年急速かつ大幅に変化している。食料と燃料の競合によるバイオマスをめぐる議論と、その他の対立による懸念が、持続可能性基準や枠組みの開発と施行に対する強い要求に加え、バイオエネルギーやバイオ燃料の目標とスケジュール

ルの変化につながっている。さらに、バイオリファイナリーと第二世代バイオ燃料¹⁰オプションの支援は、より持続可能な方向にバイオエネルギーを推進する[2.4.5]。

持続的で安定的な政策支援は、バイオマスの生産の能力、時とともに競争が激しくなる市場、必要なインフラなど、変換の能力における主な要因となっている。これらの条件は、ブラジルにおいて、エタノール生産コストがガソリンより低くなっている点で、プログラムの成功を導いている。再生可能性が高く、外国からの石油輸入を最小化するエネルギー・ポートフォリオ構成では、サトウキビ繊維バガスは熱と電力を生産する。スウェーデン、フィンランドも、再生可能電力と統合された資源の管理において大幅な成長を見せた。これは、産業の産業共生などのイノベーションに堅実につながった。アメリカは、主要な生産国の石油価格と不安定性の上昇に伴い、農村開発と安全なエネルギー供給の促進のため、1980年代から1990年代までは電力向け・1990年代から現在まではバイオ燃料向けの国家・地方政策の調整を行い、迅速に生産を増加させることが出来た [2.4.5]。

各国において、バイオエネルギーの更なる発展に対する優先度、アプローチ、技術選択、及び支援制度は異なっている。国家がそれぞれの開発の段階、資源への地理的アクセス、及び資源の利用可能性とコストを考慮に入れながら、農業と土地利用において何を優先させるかの特定のバランス、エネルギー政策・安全性、農村開発、環境保護、それぞれとのバランスを保とうとすると、市場と政策の複雑性が顕在化してくる [2.4.5, 2.4.7]。

1つの全体的な傾向として、バイオエネルギーとバイオ燃料に関する政策がより全体的になるにつれ、開始時点での持続可能性が、より強い基準になることが挙げられる。これは、EU、アメリカ、中国に加え、モザンビークやタンザニアなど、多くの開発途上国にも当てはまる。これは前向きな動きではあるが、まったく解決していない。バイオエネルギーとバイオ燃料に加え、農業・林業向けの持続可能性枠組みや認証システムの開発・施行のために、2009年までに世界で登録された70のイニシアチブは、取り組みの分裂につながる可能性がある。現在、統一化と、国際的及び多国間での協調と対話の必要性が広く強調されている [2.4.6, 2.4.7]。

2.5 環境及び社会的影響

バイオエネルギー生産は、その他の社会・環境システムと複雑に相互作用する。健康と貧困から、生物多様性や水の不足と質の向上までの範囲において、地域状況、技術・原材料選択、持続可能性基準設計、特定のプロジェクトの設計と実行など、多くの要素によって懸念事項が異なっている。おそらく最も重要なことは、農業・家畜類・繊維生産と食料などの需要を一致させることに加え、エネルギー目的でバイオマスが生産される場合、土地利用の全体的な管理と統治である [2.5]。

直接的土地利用変化（dLUC）は、バイオエネルギー原材料生産によって従来の土地利用が変更される場合に発生し、地上・地下の炭素ストックの変化につながる。間接的土地利用変化（iLUC）は、農産物の生産水準の変化（バイオエネルギー原材料の生産のための農地変更によって生じる食料または飼料の生産の減少など）によって、一次生産を拡大させる地域以外において、間接的な市場の変化により土地管理活動（つまり、直接的土地利用変化）が発生することである。間接的土地利用変化は、直接的に観察出来ないためモデル化が複雑であり、また、複数の実施者、産業、国、政策、及び市場がダイナミックかつ相互に影響し合うため、単一の要因に帰することは難しい [2.5.3, 9.3.4.1]。

¹⁰ **新たな過程で生産されたバイオ燃料（リグノセルロース系バイオマスなど）は、新型バイオ燃料とも呼ばれている。**

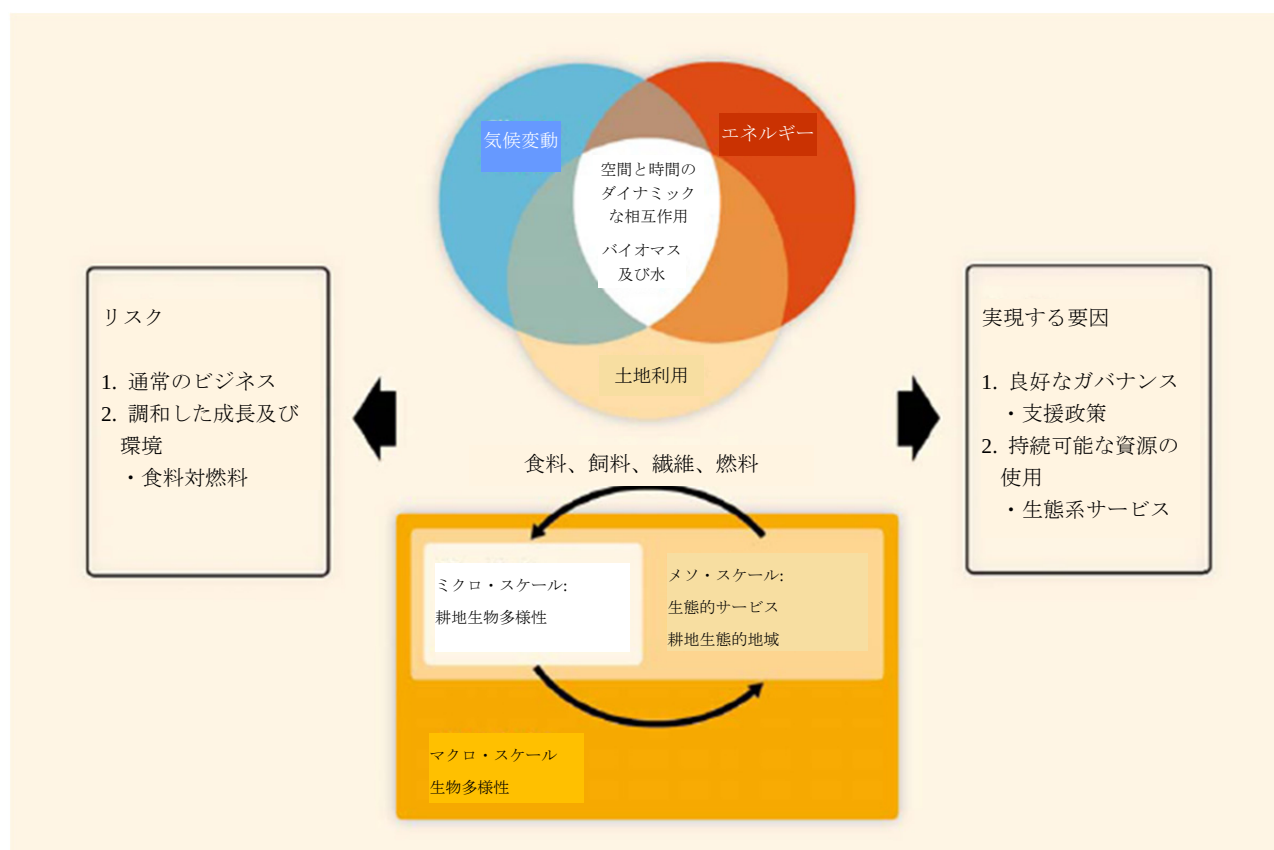


図 TS.2.4: 社会、エネルギー、環境間におけるバイオエネルギーの複雑かつダイナミックな相互作用。土地利用におけるガバナンスの欠如によっておこる食料や燃料の一貫性のない生産の方法は、旧態依然とした慣行の例である [図 2.15]。

バイオエネルギー用のバイオマス生産による土地利用の増加に、農業管理の改善（劣化した土地における永続的な作物・家畜類生産の強化など）が伴う場合、望ましくない（間接的）土地利用変化の影響を避けることが出来る。しかし、管理されない状態で放置された場合、対立が発生する可能性がある。そのため、バイオエネルギー生産システムの全体的な成果は、土地・水資源利用の管理と相互に関係している。これらの間にはトレードオフが存在し、適切な戦略と意思決定を通して管理する必要がある（図 TS.2.4） [2.5.8]。

ほとんどのバイオエネルギー・システムは従来型の化石燃料利用と置き換えられ、バイオエネルギー生産による温室効果ガスの排出量が低く抑えられる場合、気候変動緩和に寄与することが出来る。バイオマス原材料生産時の高い二酸化二窒素排出量とバイオマス変換過程における化石燃料（特に石炭）の使用は、温室効果ガス排出抑制に大きな影響を与える可能性がある。温室効果ガス排出量を下げるオプションには、肥料管理、損失を最小にするプロセスの統合、余剰熱の利用、プロセス燃料としてのバイオマス、または他の低炭素エネルギー源の使用などのベスト・プラクティスが含まれている。しかし、変換プロセスにおいて、プロセスエネルギーにバイオマス原材料が追加的に使用された場合、（代替エネルギーが石炭から生産されない限り）代替効果（バイオマス中の炭素と比較した温室効果ガス排出量）は低くなる可能性がある。バイオマスは液体燃料と電力の両方を生産出来る場合、代替効果を高く出来る [2.5.1～2.5.3]。

第一世代・第二世代バイオ燃料オプションの、温室効果ガス排出量を評価する主な方法は、複数存在する。バイオ原材料が商業化されている場合であれば、エネルギー・プロジェクトを適切に管理することにより、化石燃料の代替物と比較して（特に発電及び熱に利用されるリグノセルロース系バイオマスの場合）温室効果ガスの排出量を大幅に減らせる。これは農業残渣と有機性廃棄物（主として動物性残渣）を適切に使用すると、より有利となる。現在のバイオ燃料生産システムのほとんどは、間接的土地利用変化の効果を考慮しない場合、置き換えられる化石燃料と比較して温室効果ガス排出量を大きく減少させる。図 TS.2.5 は、各部門で一般的に使用されている化石燃料システムと比較した、近代的バイオマス

からの様々なエネルギー生産技術と関連するライフサイクルの、温室効果ガス排出量の幅のスナップショットを示している。バイオマス直接電力、電力用の嫌気性消化バイオガス、及び効率の高い近代的暖房技術などの商業チェーンが右側に示されており、これによる化石燃料と比較した大幅な温室効果ガス削減が実現される。図 2.11 では、複数のバイオマス電力生産技術を比較する温室効果ガスのメタ分析をさらに詳細に説明しており、ライフサイクル・温室効果ガス排出推定値の大部分は約 16~74g CO₂eq/kWh に集中していることを示している。

運輸部門では、今日と将来の技術を扱っている。現在、サトウキビと中期的な将来のリグノセルロース系原材料は、軽自動車においてガソリンと比較し大幅な排出量削減の実現可能性がある。ディーゼルの場合、温室効果ガス排出量の幅は、原材料炭素フットプリントに依存している。バイオガス由来バイオメタンも、（天然ガスと比較して）輸送部門における排出量削減に寄与する [2.5.2, 9.3.4.1]。

炭素のストックが多い土地（特に森林、中でも水はけの悪い泥炭土の森林）がバイオエネルギー生産用に転換された場合、正味の排出量削減を達成する前に、先行する排出によって数十年～数世紀のタイムラグが発生する場合がある。逆に生産力がなく、劣化した土壌でのバイオエネルギー植林地の構築は、土壌と地上バイオマスへの二酸化炭素の蓄積につながる可能性があり、これがエネルギー生産用に収穫されると、化石燃料の使用を置き換えることになってしまう。土地利用の適切な統治（適切な区画化など）とバイオマス生産システムの選択は、良好な成果を達成するために非常に重要である。農業や林業での使用済み有機性廃棄物と副生成物の使用は、これらのバイオマス資源が代替目的に利用されなかった場合、土地利用変化は発生させない [2.5.3]。

バイオエネルギー用のリグノセルロース系原材料は、重要な耕作地での土地利用の変化を低減させることができる。また、土地利用のあらゆる形式での生産性の向上を促進することでも、土地利用の変化は減少する [2.2.4.2, 2.5.2]。

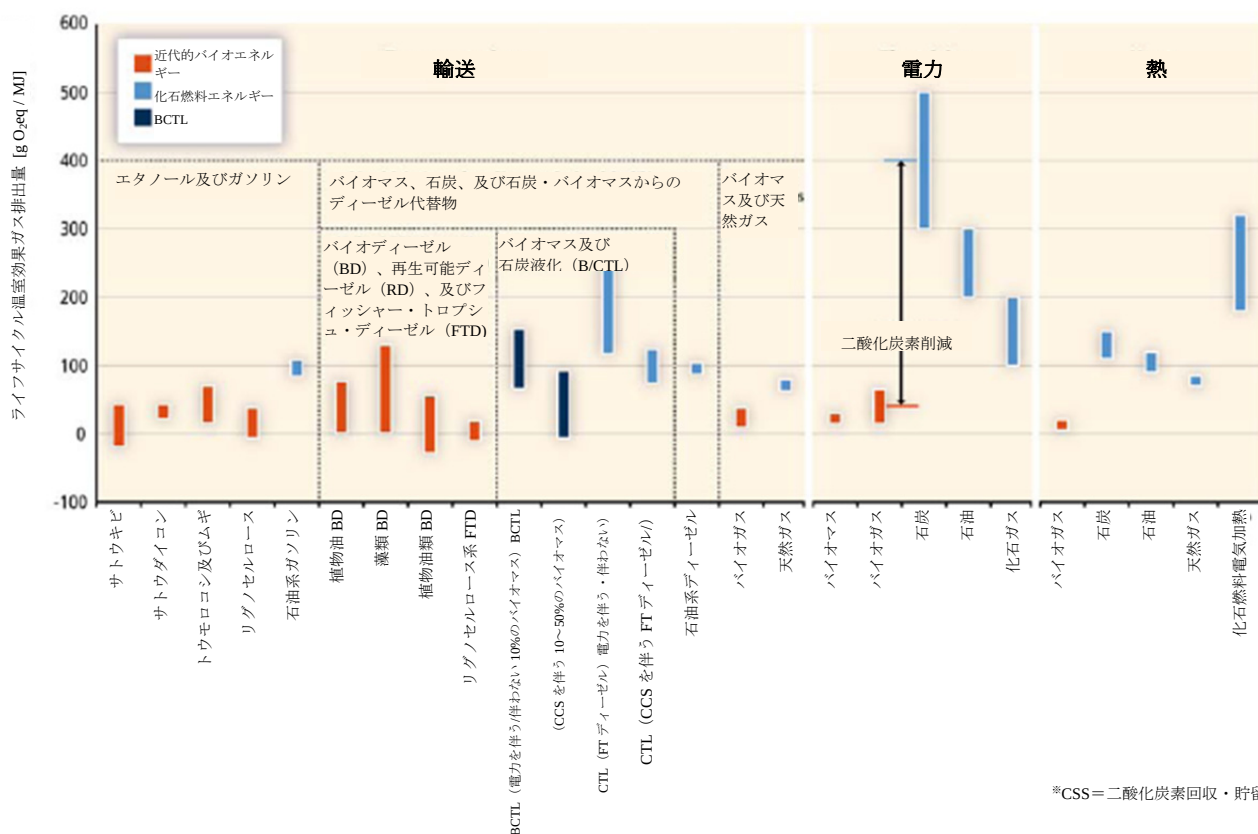


図 TS.2.5: 現在における選択された先進的な化石燃料エネルギーシステムと比較した、主な近代的バイオエネルギー・チェーンからの単位エネルギー生産量 (MJ) 当たりの温室効果ガス排出量の範囲 (土地利用に関連した炭素ストックの正味の変化及び土地管理による影響は除かれている)。ここでは、バイオマス・化石燃料技術のための商業化ならびに開発段階の (藻類バイオ燃料、フィッシャー・トロプシュなど) システムを示している。二酸化炭素回収・貯留技術が開発されると、バイオマス炭素排出の回収及び固定によって化石燃料ベースのエネルギー生産による排出を相殺することが出来る [図 2.10]。

入手可能な間接的土地利用変化に関する文献の評価によると、初期のモデルは地理的分解能が不足していたため、土地利用の割り当ての大部分が森林減少につながっていた。2008 年の研究は間接的土地利用変化の要素が 0.8 (バイオエネルギーに利用される土地がヘクタールごとに森林地が 0.8ha 減少) としているが、マクロ経済を生物物理学的モデルに結合した後の (2010 年の) 研究の報告では 0.15~0.3 まで減少している。その主な要因は、農業・家畜類管理の改善とバイオエネルギー生産の普及である。主なバイオ燃料生産国での土地分配の実際の変遷に関するモデルの高度化及びデータの改善の結果、全体の土地利用変化への影響低下につながるが、不確かさも大きい。すべての研究において、全体として土地利用管理が重要であることが認められている。土地利用変化の評価方法を改善し、現在の土地利用、バイオエネルギー由来産物、その他可能性のある要因に関する情報の利用可能性と質の向上によって、評価を容易にし、バイオエネルギーによる土地利用変化のリスクを緩和するツールを提供することが出来る [2.5.3, 9.3.4.1]。

バイオエネルギーの空気汚染の影響は、バイオエネルギー技術 (汚染管理技術を含む) と代替エネルギー技術の両方に依存する。伝統的なバイオマスを使用したためのバイオマス調理用ストーブの改善によって、健康及び生活の質に関し、調理・暖房用に伝統的なバイオマスに依存している 27 億人に対して大きな相乗便益をもたらし、大規模かつ費用対効果の高い温室効果ガス排出の緩和を実現することが出来る [2.5.4, 2.5.5]。

適切な管理が行われない場合、バイオマス生産の増加によって重要な地域における水の競合が増加してしまう可能性があり、非常に望ましくない事態となる。植生・土地利用の管理の変化の影響を全体として理解するためには、水は地域的レベルでより良く分析する必要がある重要な問題である。最近の研究では、保水性の改善及び土壌からの直接的な蒸発の低下によって、従来の農業、バイオエネルギー作物、場所や気候に依存する持続的な作付けシステムの水利用の効率性には大幅な改善の余地があることが

示されている [2.5.5, 2.5.5.1]。

生物多様性への影響の評価に関する現在の議論によれば、科学的不確実性は大きいとは言え、生物多様性に関しても同じことが言える。明らかに、自然地域を犠牲にした大規模な単一栽培の開発は、2007年の生物多様性条約で強調されるように、生物多様性に対して有害である。しかし、異なる多年生牧草及び木質作物の農地への統合は、土壌炭素及び生産性の増加、表層崩壊及び地域的「鉄砲水」の減少、生態的回廊の供給、風食と水食の減少、及び河川系に輸送される堆積物と栄養源の減少させることができる。森林バイオマス収穫によって、移植の条件の改善、生産性と残る群生の成長の改善、及び野火のリスクの減少が可能になる [2.5.5.3]。

バイオエネルギー生産の大規模な拡大と関連した社会的影響は、非常に複雑で定量化することが難しい。バイオ燃料の需要は、農業・林業部門における需要上昇の1つのドライバーとなっているため、世界の食料価格の上昇に寄与する。貧困な農家への価格上昇の便益を考慮しても、食料価格の上昇は貧困水準、食料安全保障や子供の栄養不足に対して悪影響を与える。一方で、バイオ燃料によって、開発途上国が農村開発の進展に加え、特にそれが経済的に持続可能である場合に農業成長を進展させる機会を得ることが出来る。加えて、輸入化石燃料に対する経費も減少させることが出来る。しかし、そのような便益が農村の農家に届くかどうかは、生産チェーンの構成や土地利用の統治の方法に大きく依存している [2.5.7.4~2.5.7.6, 9.3.4]。

持続可能性の枠組み及び基準の開発によって、バイオエネルギー生産に伴う潜在的悪影響を減少させ、現在のシステムよりも高い効率性を実現することが出来る。バイオエネルギーは、先進国と開発途上国で同様に気候変動緩和、安全かつ多様なエネルギー供給と経済成長に寄与する可能性がある。しかし、環境持続可能性に対するバイオエネルギーの効果は、他にもある多くの要素の中でも特に、地域的な条件、基準の定義方法、及びプロジェクトの設計・実施方法に依存し、良くも悪くもなり得る [2.4.5.2, 2.8.3, 2.5.8, 2.2.5, 9.3.4]。

2.6 技術の改善及び統合の展望

バイオエネルギーが図 TS.2.2 で示される最大の普及レベルに世界のエネルギー供給への寄与においては、バイオマス生産・変換技術のさらなる向上は、十分な可能性を秘めており、また必要なものである。土地の生産性向上は、エネルギー向けのバイオマスを将来的に大規模に普及させる重要な前提条件になる。これは、目的が食料かエネルギーかのいずれかを問わない。それは、バイオマスの栽培に使用可能な土地が拡大し、関連する土地需要も低下するためである。加えて、多機能な土地・水利用システムは、農業・林業システムに統合されたバイオエネルギーやバイオリファイナリーに伴って発展する可能性があり、生物多様性の保存に寄与し、土壌生産性及び良好な生態系の回復・維持を助ける [2.6.1]。

リグノセルロース系原材料は、以下の理由から非常に有望である。その理由は、1) 食料生産とは直接競合しない。2) エネルギー（またはエネルギー専用商品）を目的とした品質改質が可能であり、土地面積当たりの生産を向上出来る。また、非常に大きな製品市場が見込まれる。3) 作物生産や他のシステムから残渣として収穫出来るため、土地利用の効率性が高まる。4) 様々なその他の産業で廃棄物管理運用を統合出来るため、地域レベルで産業の共生関係が見込める。変換技術に関する文献及び投資の傾向によると、他の非炭素系燃料は利用することが出来ない航空輸送のための高エネルギー密度燃料への関心の高まりに合わせ、石油産業で行われたように、産業界が製品の多様性を増加させることが出来ることを示している [2.6.4]。

新世代の藻類原材料は、ディーゼル、ジェット燃料あるいは太陽光と二酸化炭素や水からの高付加価値製品となる、藻類の脂質を生産する。藻類は汽水、栽培に適さない土地、及び産業排水でもで成長出来るため、土地利用の影響を緩和する戦略が展開可能であり、暗闇の中でも活動し、燃料及び化学物質になる糖を生み出すことが出来る。微生物の多くは、マイクロサイズの工場として、特定の製品、燃料、または原料を生産し、化石燃料源に対する社会の依存を低下出来るだろう [2.6.1.2, 2.7.3]。

技術的進歩は目覚ましいものがあるが、リグノセルロース系バイオマスにはより複雑なプロセスが必要であり、新たな段階を多数統合することから、実証プラント、初期のプラント、初期の商用段階において、「Valley of Death」における開発をもたらす時間や支援が必要となる。幅広い原料とプロセスの変動性に

よるコスト予測は、非常に原材料コストの影響を受けやすく、10～30US ドル/GJ (2005 年) の間で変動している。アメリカ国立アカデミーは、2035 年までにバイオケミカル経路の運営コストは 40%削減され、12～15US ドル/GJ (2005 年) まで下がると予測している [2.6.3, 2.6.4]。

現在、バイオマスのガス化によって、産業用途、熱用途、及び共燃焼において約 1.4GW_{th} が供給されている。調理用ストーブ及び嫌気性消化システムから小型ガス化装置に至るまでの小規模システムにおける効率は、時とともに改善してきている。多くの利害関係者が、バイオエネルギーを原材料として使用する統合ガス化コンバインドサイクル (IGCC) 発電設備に大きな関心を寄せ始めている。この発電設備は、従来型の蒸気タービン・システムよりも効率的であると予測されているが、まだ完全には商業化されていない。しかし、それは二酸化炭素回収・貯留システムへのより効率的な統合のポテンシャルを秘めている。電力の供給に加えて、ガス化プラントからの合成ガスも幅広い範囲の燃料 (メタノール、エタノール、ブタノール、及び合成ディーゼル) 供給に使用出来る。あるいは、電力と燃料の複合的な方法にも使用することが出来る。これまで、技術的・工学的課題はこの技術オプションの展開の加速を妨げてきた。バイオマス液化油技術は、化石燃料用に開発済みの商業技術を使用している。図 TS.2.5 は、石炭液化燃料からの予測排出量、及び二酸化炭素回収・貯留技術とバイオマスを組み合わせた場合に、大気からの温室効果ガス除去に至るまでにバイオマスが発生させる相殺排出量を示している。ガス化製品 (水素、メタン、合成ガス) は、生産コストの推定値が低く、初期商用段階である [2.6.3, 2.6.4]。

熱分解や水熱油は低コストで輸送可能な油であり、熱または熱電供給用途に使用される。これは、単独の施設または石油化学リファイナリーと併用して改質する原材料になるだろう [2.3.4, 2.6.3, 2.6.4, 2.7.1]。

様々な廃棄物に由来するバイオガスの生産と、バイオメタンガスへの改質は、既に様々な用途の小規模な市場に浸透しており、スウェーデンの輸送、北ヨーロッパ諸国やヨーロッパ諸国の熱や電力などが事例として挙げられる。鍵となる要因は、廃棄物と農業残渣の組み合わせであり、改質の向上とさらなるコスト削減が今も必要である [2.6.3, 2.6.4]。

多くのバイオエネルギーとバイオ燃料変換経路は、二酸化炭素回収・貯留を用いれば、排出量削減・吸収の大きな可能性がある。二酸化炭素回収・貯留技術がさらに開発が進み検証されているなか、発酵による濃縮二酸化炭素流や、電力用のガス化複合発電を組み合わせることにより、炭素中立的な燃料、一部のケースでは炭素排出がマイナスの燃料を達成する機会が生ずる。この目標の達成は、バイオマス選択の幅を適切に設計したシステム、原材料の供給システム、二次エネルギーキャリアへの転換技術、既存及び将来のエネルギーシステムへのこのキャリアの統合により、円滑に進められる [2.6.3, 2.6.4, 9.3.4]。

2.7 現在のコスト及び動向

バイオマス生産、供給物量、及び変換過程は、最終生成物のコストに寄与する [2.3, 2.6, 2.7]。

原材料の経済的な側面や生産力は、世界の地域や原材料の種類によって大きく異なっており、コストで言えば 0.9～16US ドル/GJ (2005 年) の幅がある (2005～2007 年までのデータ)。バイオエネルギー向けの原材料生産は、林業・食料部門と競合するが、アグロフォレストリーや混作などの統合的生産システムによって、追加的な環境サービスに加えて相乗効果が得られる可能性がある。生産地から変換施設へのバイオマスの出荷及び輸送は、バイオエネルギー生産の総コストの 20～50%を占める可能性がある。規模拡大、イノベーション、及び競争激化などの要素によって、サプライチェーンの経済的及びエネルギーコストを 50%以上削減させることが出来る。輸送距離が 50km を超える場合、ペレット化またはブリケットングを通した高密度化が必要となる [2.3.2, 2.6.2]。

今日の重要なバイオエネルギー・システムのいくつか、特にサトウキビ・ベース・エタノール及び残渣・廃棄物バイオマスからの熱・発電は、競合的に展開される可能性がある [表 2.6, 2.7]。

Annex II で概説している標準化された方法、及び Annex III で要約しているコスト・成果データによると、地理的領域を考慮した様々な規模における商業バイオエネルギー・システムの推定生産コストは図 TS.2.6 に要約されている。この値には、生産、供給物流、及び変換コストが含まれている [1.3.2, 2.7.2, 10.5.1, Annex II, Annex III]。

コストは、地域、原材料の種類、原材料の供給コスト、バイオエネルギー生産の規模、及び年間における生産時期（主に季節の問題）によって異なる。推定される商業バイオエネルギーの均等化¹¹コスト幅としては、液体・気体バイオ燃料では約 2～48/US ドル/GJ（2005 年）、2MW 以上の電力またはコジェネレーションシステムでは（原材料コストが高位発熱量に基づき 3US ドル/GJ（2005 年）、蒸気の発熱量では 5US ドル/GJ（2005 年）/GJ、温水では 12US ドル/GJ（2005 年）の場合）約 3.5～25US セント/kWh（2005 年）（10～50US ドル/GJ（2005 年））、家庭・地域暖房システムでは原材料コストの幅が（固形廃棄物から木材ペレットまで）0～20US ドル/GJ（2005 年）、約 2～77US ドル/GJ（2005 年）となっている。これらの計算値は 2005～2008 年のデータを参照しており、7%の割引率の US ドル（2005 年）で表示している。図 TS.2.6 のバイオ燃料のコスト幅は、アメリカ、インド、中国、及びヨーロッパ諸国をカバーしている。暖房システムの場合、コストは主としてヨーロッパのものであり、電力・熱電供給コストは主として使用量の大きい国から発生している [2.3.1～2.3.3, 2.7.2, Annex III]。中期的には、既存のバイオエネルギー技術の成果にはまだ大幅な改善の余地があり、新たな技術によってエネルギー及び材料向けバイオマスのより効率的かつ競争力の高い展開の可能性が生まれている。バイオエネルギー・システム、具体的にはエタノール及びバイオ発電向けのものは、学習率で他の再生可能エネルギー技術に匹敵する、学習率の技術的学習曲線及び関連コスト削減を示している。これは、表 TS.2.2 で示すように、作付けシステム（サトウキビ及びトウモロコシの農業管理の進歩に続く）、供給システム・物流（北ヨーロッパ諸国及び国際物流で見られる）、及び変換（エタノール生産、発電、及びバイオガス）に対して当てはまる。技術的学習曲線に関して第 2 章で触れたバイオエネルギー・オプションがすべて調査されたわけではないが、いくつかの重要なバイオエネルギー・システムはコストを削減してきており、環境的成果も改善してきている。しかし、通常の場合、まだこれらは、経済開発（貧困削減、安全なエネルギー供給など）及びその他の国ごとの理由のために政府支援を必要としている。伝統的バイオマスの場合、バイオマスから作られた木炭は開発途上国における主要燃料の 1 つであり、高効率キルンの採用によって便益を得ることが出来るはずである [2.3, 2.6.1, 2.6.2, 2.6.3, 2.7.2, 10.4, 10.5]。

¹¹ 計算において同時に発生する熱の値が想定されている熱電供給システムにおける電力生産と同様、バイオ燃料システムでも、2 つの副産物が得られる場合がある（例：サトウキビから糖、エタノール、電力）。糖副産物の収益は約 2.6US ドル/GJ(2500 年)になり、その額によってエタノールのコストを相殺出来る可能性がある。

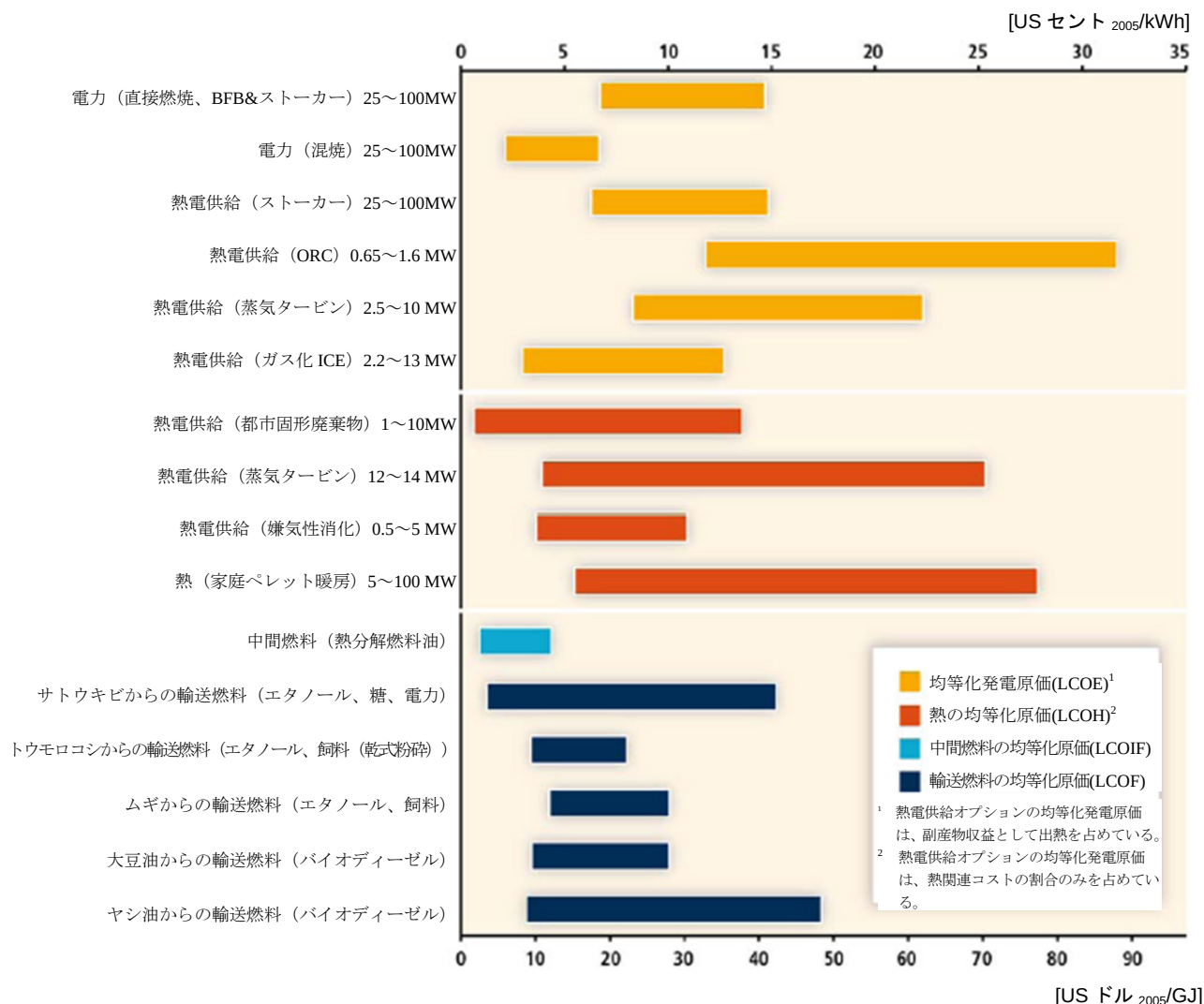


図 TS.2.6: 異なる技術における、年間の原材料コストに基づいて計算された、割引率 7%の商業化されているバイオエネルギー・システムからのエネルギーのサービスの典型的な最近の均等化コスト。このコストには、金利、税、減価償却、及び償還は含まれていない。[図 2.18] LCOE は均等化発電原価、LCOH は熱の均等化原価、LCOF は燃料の均等化原価、LCOIF は中間燃料の均等化原価、BFB はバブリング流動層、ORC は有機ランキン・サイクル、ICE は内燃機関を指している。バイオ燃料の場合、均等化発電原価及び熱の均等化原価はデータが利用可能な技術の主要ユーザ市場にのみ与えられるが、燃料の均等化原価の幅は様々な国における生産を表している。計算は高位発熱量に基づいている。

バイオ電力の（メタンまたはバイオ燃料を通した）競争力のある生産は、最終用途システム、風力・太陽エネルギーなどの代替エネルギーの成果、石炭変換と連携した開発中の二酸化炭素回収・貯留技術、及び原子力との統合に依存している。バイオマス変換と組み合わせて二酸化炭素回収・貯留を上手く導入することで、大気からの温室効果ガスの除去及び魅力的な緩和コスト水準の達成の可能性がある。が、これまでのところあまり注目を集めてはいない [2.6.3.3, 8.2.1, 8.2.3, 8.2.4, 8.3, 9.3.4]。

表 TS.2.2: 累積生産量の倍増当たりのコスト（または価格）の削減（%）として表したバイオエネルギー・システム及び最終エネルギーキャリアの主要な要素の経験曲線。LR は学習率、N は累積生産量の倍増の回数、 R^2 は統計データの相関係数、O&M は運転保守を指している[表 2.17]。

学習システム	LR (%)	期間	地域	N	R^2
原材料生産					
サトウキビ（トンゴとのサトウキビ）	32±1	1975～2005	ブラジル	2.9	0.81
トウモロコシ（トンゴとのトウモロコシ）	45±1.6	1975～2005	アメリカ	1.6	0.87
物流チェーン					
森林木材チップ（スウェーデン）	15～12	1975～2003	スウェーデン・フィンランド	9	0.87～0.93
投資及び運用・保守コスト					
熱電供給工場	19～25	1983～2002	スウェーデン	2.3	0.17～0.18
バイオガス工場	12	1984～1998		6	0.69
サトウキビからのエタノール生産	19±0.5	1975～2003	ブラジル	4.6	0.80
トウモロコシからのエタノール生産（運用・保守コストのみ）	13±0.15	1983～2005	アメリカ	6.4	0.88
最終エネルギーキャリア					
サトウキビからのエタノール	7	1970～1985	ブラジル		
	29	1985～2002		～6.1	該当なし
サトウキビからのエタノール	20±0.5	1975～2003	ブラジル	4.6	0.84
トウモロコシからのエタノール	18±0.2	1983～2005	アメリカ	6.4	0.96
バイオマスからのエタノール	9～8	1990～2002	スウェーデン	～9	0.85～0.88
CHP					
バイオマスからの電力	15	不明	OECD	該当なし	該当なし
バイオガス	0～15	1984～2001	デンマーク	～10	0.97

表 TS.2.3 は、短期的～中期的にコストの低下が予想される主要バイオエネルギー技術もあることを示している。リグノセルロース系バイオ燃料に関しては、最近の分析で、バレル当たり 60～80US ドル（2005 年）（リットル当たり 0.38～0.44US ドル（2005 年））の石油との競合において十分な改善ポテンシャルがあると示された。現在利用可能なシナリオ分析は、より短期的な研究開発・市場支援があれば、技術の進歩によって 2020 年ぐらいには商業化出来る可能性があることを示している（石油・炭素価格に依存）。また、これによってエネルギー用バイオマスの普及に大きな転換が発生するとしているシナリオもある。その理由は、競争力のある生産によって政策目標（義務）と普及がデカップリングし、バイオマスの需要が食用作物からバイオマス残渣、森林バイオマス、及び永続的作付けシステムに移動すると考えられることである。これまでは、そのような（急激な）変化の影響は十分に研究されてこなかった [2.8.4, 2.4.3, 2.4.5]。

リグノセルロース系エタノールの開発と実証は、いくつかの国で続けられている。重要な開発ステップの 1 つとして、木材・草類・農業残渣の細胞壁の抵抗性を低下させる前処理が挙げられる。これにより、炭化水素ポリマーが容易に加水分解（酵素など）されて、糖類からのエタノール（またはブタノール）、

プロセス加熱または電力のためのリグニンに発酵される。一方、複数のステップを組み合わせ、複数の生物と同時にバイオプロセスを行うことも出来る。酵素の分野における進歩の検討によると、プロセス改善によって 2030 年までに 40%のコスト削減が見込まれており、それによって推定生産コストが 18～22US ドル/GJ (2005 年) (パイロット・データ) から 12～15US ドル/GJ (競争力のある水準) まで落ちるとされている [2.6.3]。

表 TS.2.3: 開発中の技術の予測生産コスト幅 [表 2.18]

選択されたバイオエネルギー技術	エネルギー分野 (電力、熱、輸送) ※	2020～2030 年の予測生産コスト (US ドル/GJ (2005 年))
統合ガス化コンバインドサイクル発電 ¹	電力や輸送	12.8～19.1 (4.6～6.9 セント/kWh)
油脂植物ベース再生可能ディーゼル・ジェット燃料	輸送及び電療	15～30
リグノセルロース系糖ベース・バイオ燃料 ²	輸送	6～30
リグノセルロース系合成ガス・ベース・バイオ燃料 ³		12～25
リグノセルロース系熱分解・ベース・バイオ燃料 ⁴		14～24 (燃料混合成分)
気体バイオ燃料 ⁵	熱及び輸送	6～12
水生植物由来燃料・化学物質	輸送	30～140

注: ¹供給コストは 3.1US ドル/GJ (2005 年)、統合ガス化コンバインドサイクル発電 (将来) は 30～300MW、耐用年数は 20 年、割引率は 10%。²糖料・でんぷん作物及びリグノセルロース糖からのエタノール、ブタノール、及び微生物炭化水素。³合成ディーゼル、メタノール、ガソリンなど (エタノールへの合成ガス発酵変換経路)。⁴ガソリン・ディーゼル混合成分またはジェット燃料へのバイオマス熱分解・触媒アップグレード。⁵合成天然ガスになる合成燃料、メタン、ジメチルエーテル、バイオマス熱化学的・嫌気性消化からの水素 (大規模)。

※いくつかの用途において二酸化炭素回収・貯留との併用は、その技術 (二酸化炭素回収・貯留を含む) が成熟している場合には可能であり、それによって大気から温室効果ガスを除去することが出来る。

バイオマス熱分解変換及び水熱変換のコンセプトも、石油産業と連動して発展しており、技術的にはガソリンまたはディーゼルの混合材料、さらにはジェット燃料品質の生成物への石油のアップグレードも可能であることが実証されている [2.6.3]。

藻類などの光合成生物は、直接的にまたはバイオ燃料として使用可能な様々な炭水化物と脂質を生物学的に (二酸化炭素、水、及び太陽光を用いて) 生産する。藻類の光合成効率は油脂作物よりもかなり高いため、これらの開発の長期的ポテンシャルは大きい。植物からの潜在的なバイオエネルギー供給は非常に不確実性の高いものではあるが、その開発による汽水及び塩分の高い土壌も利用で出来るため、その利用は土地利用変化の影響を低下させる戦略の 1 つとなっている [2.6.2, 3.3.5, 3.7.6]。

バイオ材料の生産に関して言えばデータの利用可能性は限定的であり、バイオマスからの化学製品のコスト推定値はピア・レビューされた文献の中では少なく、将来予測や学習率に至ってはさらに少なくなっている。この状況は部分的には、成功しているバイオ由来の生産物が、本来化石燃料由来である生成物の成分の一部として、または糖発酵由来の乳酸をベースにしたポリラクチドなどの全く新しい合成重合体として市場に入っているという事実とも関係している。分析によると化石燃料を代替するバイオ燃料の生産に加えて、バイオ材料の連鎖的な使用及びそれに続くエネルギー向けの廃棄物の使用によって、使用されるバイオマスのヘクタール及びトン当たりのより効率的かつ大きな緩和効果が実現出来るとされている [2.6.3.5]。

2.8 潜在的な普及段階

1990 年から 2008 年にかけて、固体バイオマスに関するバイオエネルギーの利用は平均 1.5%の年間成長率で増加しており、液体及び気体の二次輸送体用の近代的バイオマスの利用はそれぞれ 12.1%及び 15.4%増加している。結果として、世界の陸上輸送におけるバイオ燃料の割合は 2008 年において 2%であった。2009 年において、エタノール及びバイオディーゼルの生産はそれぞれ 10%及び 9%増え、900

億リットルに達し、バイオ燃料は2009年の世界の陸上輸送の約3%を占めると同時に、石油の需要が1980年以来初めて減少した。様々な国における政策によって、2000年から2008年にかけて世界のバイオ燃料生産は5倍に増加した。バイオマス・再生可能廃棄物発電は、2007年には259TWh (0.93 EJ)、2008年には267TWh (0.96 EJ) となり、世界の電力の1%を占め、1990年 (131TWh (0.47 EJ)) 以来倍増している [2.4]。

2020～2050年の間のエネルギー用バイオマスの継続的普及の予想は、調査によって大きく異なっている。入手可能な考察から得られる重要な示唆として、大規模なバイオマス普及は資源基盤の持続可能な開発、土地利用のガバナンス、インフラの開発、及び主要技術のコスト削減例として、最も将来性のある第一世代原料からのエネルギー用一次バイオマス及び次世代リグノセルロース系バイオマスの効率的かつ完全な使用に大きく依存しているということが挙げられる[2.4.3, 2.8]。

図 TS.2.7 でまとめたシナリオの結果は、様々なモデリング・チーム、エネルギー需要増加、競合する低炭素技術のコストと利用可能性、再生可能エネルギー技術のコストと利用可能性などの幅広い想定から得られたものである。ほとんどのシナリオで、伝統的なバイオマスの使用は減少すると予想されているが、液体バイオ燃料、バイオガス、及びバイオマスから生産された電力と水素の使用は増加傾向にある。これら 2020 年、2030 年、及び 2050 年のシナリオにおけるエネルギー向けバイオマスの普及の結果は、AR4 に基づく 3 つの温室効果ガス安定化範囲 (カテゴリ III と IV (440～600ppm CO₂)、カテゴリ I と II (440ppm CO₂ 未満)、及びベースライン (600ppm CO₂ 超) (すべて 2100 年までの目標値)) に対して提示されているものである [10.1～10.3]。

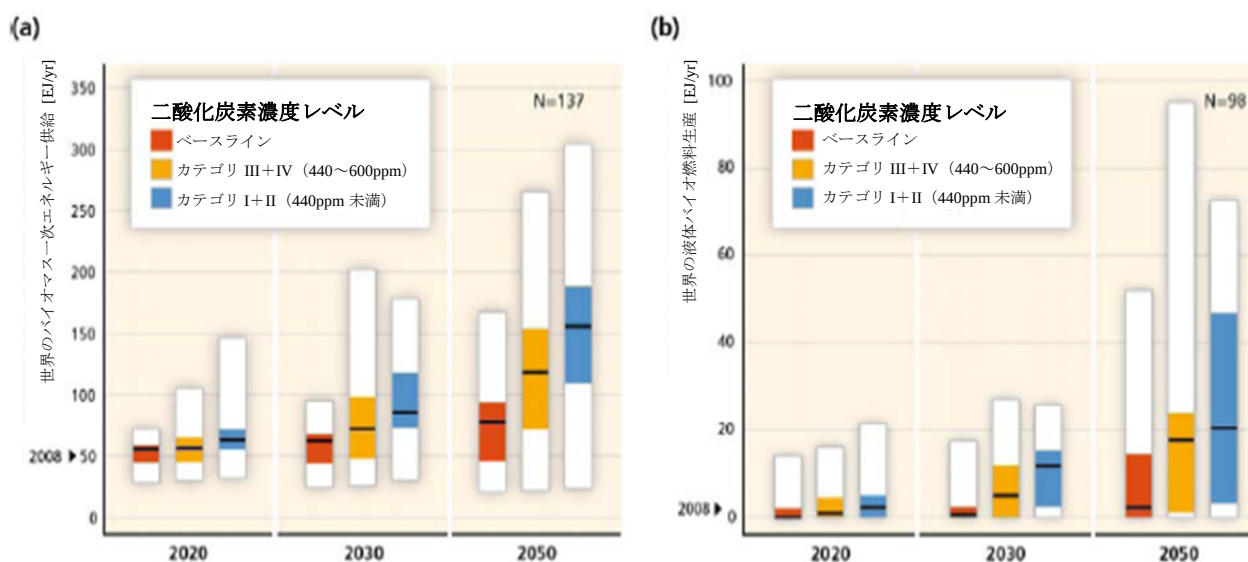


図 TS.2.7: (a) 一次エネルギーとして扱われている電力、熱、及びバイオ燃料の長期的シナリオにおけるバイオマスからの世界の一次エネルギー供給、(b) 二次エネルギーの観点から報告された長期的シナリオにおける世界のバイオ燃料生産。比較のため、2008 年における過去の水準を左の軸上に小さい黒矢印で示している [図 2.23]。

エネルギー用バイオマスの世界的な普及は、温室効果ガス濃度安定化レベルがより意欲的になるとともに増加すると予測されており、世界の温室効果ガス排出量の削減において長期的な役割を果たすと見られている。2030 年及び 2050 年の 2 つの緩和シナリオの中央値は、それぞれ 75～85EJ、120～155EJ となっており、これは 2008 年の普及レベルである 50EJ の約 2～3 倍である。これらの普及レベルは、専門家の検討による 2050 年の中間水準とほぼ同じである。図 TS.2.7(b)で示している 2020 年及び 2030 年の世界のバイオ燃料生産は極めて低い水準にあるが、ほとんどのモデルがそれぞれの変換経路及び関連する学習ポテンシャルの詳細な記述を欠いている [2.7.3]。440ppm 未満緩和シナリオの場合、バイオ燃料生産は 2008 年の実績値である 2EJ から 6 倍 (2030)、及び 10 倍 (2050) に到達している [2.2.5, 2.8.2, 2.5.8, 2.8.3]。

バイオエネルギーの部門レベルでの浸透は、従来型・近代的バイオマス利用の両者をモデル化し、想定

される産業や政府による投資及び目標を織り込んでいる 2010 年の IEA の World Energy Outlook (以下 WEO) などの、詳細な運輸部門を表現している単一のモデルを使用することで最も上手く説明される。このモデルでは、近代的バイオエネルギーの大きな増加及び伝統的バイオマスの使用の減少が予測されている。これらの予測は、第 10 章の結果と量的には整合している。IEA は、WEO の 450ppm 緩和シナリオの場合、2030 年には世界の輸送燃料の 11%が第二世代バイオ燃料を使用したバイオ燃料によって供給され、推定で 12EJ の 60%を占めるとされており、この半分は現行の政策の継続によって供給されると予測されている。バイオマス及び再生可能な廃棄物は、世界の発電量の 5%または 1,380TWh/年 (5EJ/年) (この内 555TWh/年 (2EJ/年) は強力な気候緩和戦略の結果) を供給するだろう。プロセス蒸気及び建築物の空調、温湯暖房 (2008 年には 3.3EJ) は、それぞれ絶対的に 2008 年の水準から倍増するだろう。しかし、想定される従来型バイオマスの減少によって、総暖房需要は減少すると予測されている。暖房は、継続的な近代的バイオエネルギーの発展にとって重要な分野であると見られており、バイオ燃料は、2030 年までに道路輸送による排出の 17%、航空輸送排出の 3%を緩和すると予測されている [2.8.3]。

2.8.1 普及に関する結論: バイオエネルギーに関する重要な示唆

第 10 章で検討された長期的なシナリオは、温室効果ガス濃度安定化レベルがより意欲的になるにつれバイオエネルギー供給が増加し、バイオエネルギーが世界の温室効果ガス排出量の削減において重要な長期的役割を果たすことを示している [2.8.3]。



図TS.2.8: 本報告書に適応させた2050年の描写の基礎となるバイオマスとバイオエネルギーのモデル、及び図TS.2.2におけるバイオマスの技術的ポテンシャルを示す積み重ね棒グラフの導出に使用される、主なSRESシナリオ変数のストーリーライン [図2.26]。

バイオエネルギーは現在、最大の再生可能エネルギー源であり、今世紀前半は引き続き最大の再生可能エネルギー源の1つである可能性が高い。成長ポテンシャルはかなりあるが、積極的な開発が必要である [2.8.3]。

- ・ 最近の文献における評価では、エネルギー用バイオマスの技術的ポテンシャルは 2050 年までに 500EJ/年の水準になる可能性があること示している。しかし、このポテンシャルに影響する市場・政策条件などの重要な要素に関して大きな不確実性が存在している [2.8.3]。
- ・ 第 2 章における専門家の評価は、2050 年までの潜在的導入の水準としては 100～300EJ/年を示し

ている。このポテンシャルの実現は主な課題を表し、2050 年における世界の一次エネルギー需要に大きく寄与するだろう。これは、農業及び林業における現在の世界規模のバイオマス産出相当の熱容量とほぼ同じである [2.8.3]。

- ・ バイオエネルギーは、資源が持続的に開発され、効率的な技術が提供された場合に温室効果ガスを緩和する大きなポテンシャルを持っている。多年生作物、林産物、バイオマス残渣・廃棄物などの特定された現行のシステムと主要な将来のオプション、及び先進変換技術によって、大きな温室効果ガス緩和パフォーマンス（化石エネルギー・ベースラインから 80～90%削減）を実現することが出来る。しかし、炭素ストックの重大な損失及び間接的土地利用変化の効果につながる土地転換及び森林管理によって、正味の温室効果ガス緩和影響が減少し、場合によっては相殺・逆転してしまう可能性がある [2.8.3]。
- ・ エネルギー用のバイオマスの高い潜在的な導入水準を達成するには、競合する食料・繊維需要を抑えて土地を適切に管理し、農業・林業収穫を大幅に増加させなければならない。土地利用の監視及び良好な管理がなされていない場合のバイオエネルギーの拡大は、食料供給、水資源、生物多様性に関する重大な対立のリスクに加え、温室効果ガスの便益が低くなるリスクが生じる。逆に、効果的な持続可能性の枠組み確立後に実施することで、適応策を組み合わせる機会を含め農村開発、土地改良、及び気候変動緩和などにおいて、そのような対立を緩和し、前向きな成果が実現出来る可能性がある [2.8.3]。
- ・ バイオマス生産・使用の影響及びパフォーマンスは、地域・場所により異なる。そのため、土地利用及び農村開発の良好なガバナンスの一環として、バイオエネルギー政策は農業（作物及び家畜類）・林業部門と協調し、地域条件・優先度を考慮する必要がある。バイオマス資源ポテンシャルは、気候変動影響に影響を受け、またそれと相互に作用するが、具体的な影響はまだほとんど解明されていない。この点については、地域差も大きいだろう。バイオエネルギー及び新しい（多年生）作物システムも、バイオマス資源の生産と適応策（土壌保護、水貯留、農業の近代化など）を組み合わせる機会を実現する [2.8.3]。
- ・ いくつかの重要なバイオエネルギー・オプション（ブラジルのサトウキビ・エタノール生産、優良な廃棄物エネルギー利用システム、効率的なバイオマス調理レンジ、バイオマス・ベースの熱電供給）は、現在すでに競争力があり、長期的オプションとの重要な相乗効果を発揮する可能性がある。ガソリン、ディーゼル、ジェット燃料の代替となるリグノセルロース系バイオ燃料、先進バイオ電力オプション、及びバイオリファイナリー概念によって、2020～2030 年の期間において競争力のあるバイオエネルギーの導入を実現出来る可能性がある。二酸化炭素回収・貯留とバイオマス変換の組み合わせによって、長期的な大気からの温室効果ガス除去（大幅な温室効果ガス排出量削減に必要である）の実現の可能性が高まる。先進バイオ材料はバイオエネルギー生産の経済性及び緩和においても将来性があるが、そのポテンシャルは、非常に不確かな水生バイオマス（藻類）の高い潜在的役割と同様にあまり解明されていない [2.8.3]。
- ・ 急速に変化している政策環境、最近の市場に基づく活動、先進バイオリファイナリーとリグノセルロース系バイオ燃料オプションへの支援の増加、そして特に持続可能性の基準と枠組みの発達はすべて、持続可能性の実現に向けてバイオエネルギー・システム及びその普及を促すポテンシャルを持っている。この目標の達成には、主要技術のコスト削減のための投資、バイオマス生産・供給インフラの改善、及び公的・政治的承認を得られる実施戦略が必要となるだろう [2.8.3]。

結論として、シナリオ変数（図 TS.2.8 を参照）、バイオエネルギー生産能力が開発される主要な前提条件、及び生じる可能性がある影響の相互関係の説明のため、図 TS.2.8 に 2050 年までの世界規模でのエネルギー向けのバイオマスの普及の異なる 4 つのスケッチを示している。資源ポテンシャルの検討から導かれた 100～300EJ の幅は、普及の下限及び上限を視覚的に示している。想定されるストーリーラインはおおよそ、IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES) の定義に従ってバイオエネルギーに適用され、図 TS.2.9 でまとめられている。その定義は、図 TS.2.2 の積み重ね棒グラフで示されている技術的ポテンシャルの導出にも使用されている [2.8.3]。

バイオマス及びその複数のエネルギー生成物は、持続可能なやり方と持続不可能なやり方両方で、食料、

飼料、繊維、及び林産物と同時に開発が可能である。IPCC シナリオ・ストーリーライン及び描写を通してみると、持続可能な開発及び気候変動緩和の方針を考慮するかどうかで達成出来る浸透水準の高低も変わってくる。これらのストーリーラインから、バイオエネルギー技術開発及び統合システムに関する洞察を得ることが出来る [2.8.3]。



図 TS.2.9: エネルギー用バイオマス普及の想定しうる未来像(2050 年)。図 TS.2.8 でまとめられた IPCC SRRES ストーリーラインに、特定の世界の条件に基づく主要な前提条件及び影響を説明した 4 つの比較描写 [図 2.27]。

第 3 章:直接的太陽エネルギー

3.1 はじめに

太陽光を直接変換するエネルギー技術は、その性格上多様であり、利用者の様々な用途（暖房、電力、及び燃料製造）に応じて、1 つの技術群を構成している。本要約は、以下の主要な 4 つの種類に焦点を当てた。それは、1) 太陽熱、これには建築物のポジティブ・パッシブ暖房、家庭用・商業用太陽熱温水や水泳プール暖房、及び産業用プロセス利用を含む、2) 太陽光発電 (PV)、すなわち太陽電池による電力への直接変換、3) 集光型太陽熱発電 (CSP)、すなわち太陽エネルギーの集光による高温液体または材料の生成が熱機関を駆動する発電方法、及び 4) 太陽燃料、すなわち有用な燃料の生産に太陽エネルギーを使用する生産方法である [3.1]。

「直接的」太陽エネルギーという用語は、太陽のエネルギーを直接的に利用する再生可能エネルギー技術に対するエネルギー基準を意味する。風力や海洋熱などの特定の再生可能エネルギー技術は、地球に吸収された後の太陽エネルギーを使用し、それを他の形に変換するものである（以下、本章では、太陽エネルギーに付けられた「直接的」という形容詞はほとんどの場合省かれている） [3.1]。

3.2 資源ポテンシャル

太陽エネルギーは、太陽の表面層から放出される熱放射から構成されている。地球の大気圏のすぐ外側での放射量は太陽放射照度と呼ばれ、太陽光との垂直面上で平均 $1,367 \text{ W/m}^2$ となる。地上（一般的には太陽が真上にある状態の海面水位とされる）では、この放射照度は大気によって弱められ、正午から 2 ～ 3 時間以内の晴天状態（「full sun」と呼ばれる状態）で約 $1,000 \text{ W/m}^2$ となる。大気圏外では、太陽のエネルギーは約 $0.25 \sim 3 \mu\text{m}$ の波長の電磁波として運ばれる。太陽放射の一部は、大気中で散乱されることなく太陽から直接届く光線によるものである。この「ビーム状」の太陽放射は直達光と呼ばれミラー及びレンズで集光することが可能であり、雲量の低い地域で最も利用されやすい。もう 1 つの放射は、散乱光と呼ばれる。直達光及び散乱光の照度の合計は、全天日射照度と呼ばれる [3.2]。

理論上の太陽エネルギー・ポテンシャル（エネルギーとして理論上利用可能な地表（陸域と海洋）での放射量を示すもの）は、 $3.9 \times 10^6 \text{ EJ/年}$ と推定されている。この数値は明らかにエネルギーの目安を与えるものであり、100%の変換効率ですべての利用可能な土地及び海面を完全に利用することを要件としている。最も有用な測定基準は技術的ポテンシャルであるが、これは、より現実的な変換効率を用いた変換設備によって実際に使われる土地の使用割合の評価に基づくものである。太陽エネルギーの技術的ポテンシャルは $1,575 \sim 49,837 \text{ EJ/年}$ （2008 年の世界の一次エネルギー消費の約 3 ～ 100 倍）の範囲であると見積もられている [3.2, 3.2.2]。

3.3 技術及び用途

図 TS.3.1 は、現在、太陽エネルギーを取り込み使用されている、住宅用エネルギー及び直接的な電力利用向けパッシブ（受動的）・アクティブ（能動的）型の太陽エネルギー利用技術を示している。本要約では、アクティブ型暖房及び電力の技術のみを掘り下げて扱う [3.3.1～3.3.4]。

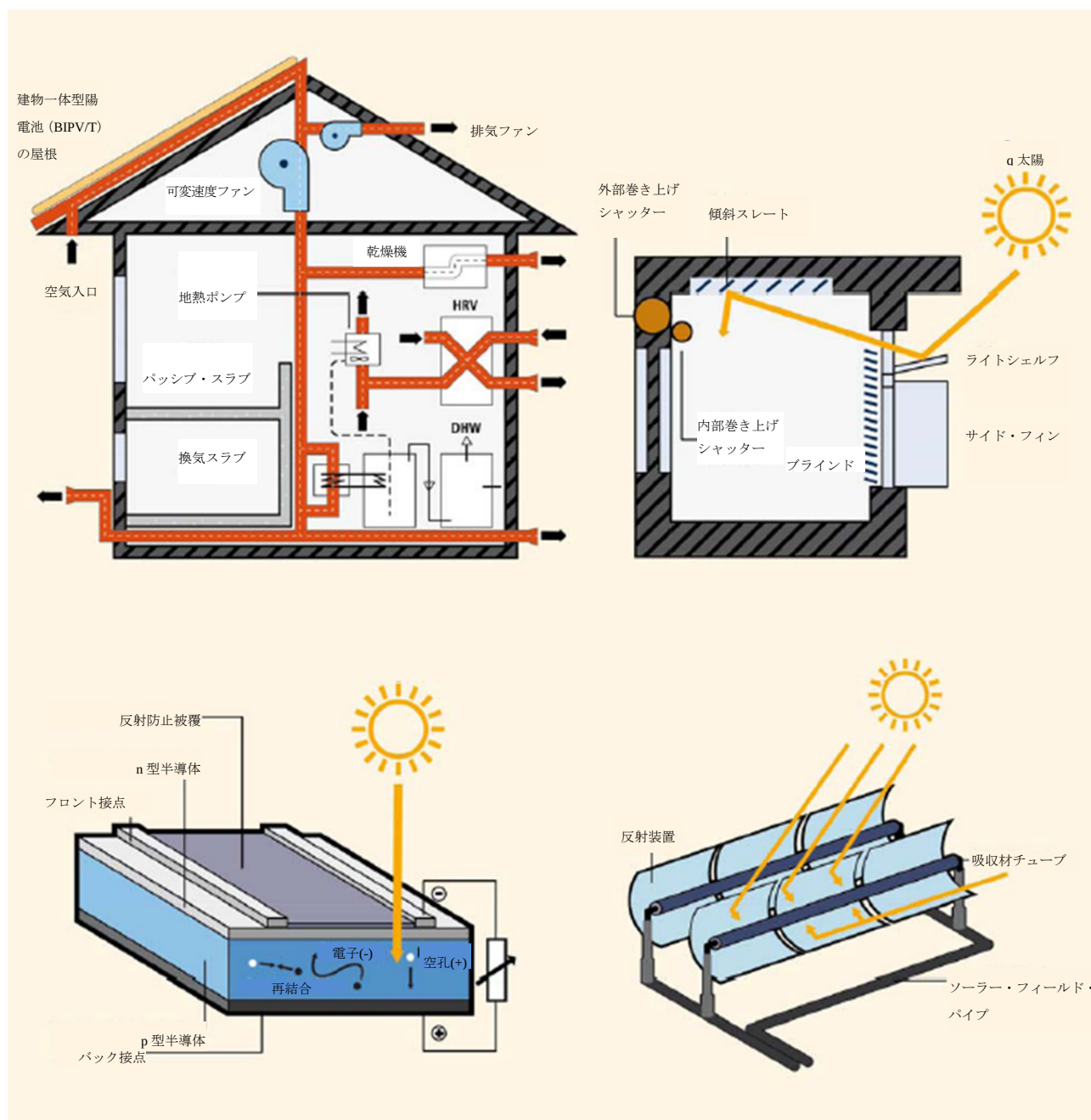


図 TS.3.1: (上) 建築物に組み込まれた太陽熱 (パッシブ型とアクティブ型両方)、(左下) 直接的太陽光から電力への変換の光起電装置、(右下) 集光型太陽エネルギー技術の一般的な型式 (トラフ型集光器) の例 [図 3.2, 3.5, 3.7 より]

太陽熱: アクティブ太陽熱システムの主要な要素機器は太陽熱集熱器である。平板太陽熱集熱器は、液体が流れるパイプ導が取り付けられた黒色プレートで構成され、その導管を通して液体が加熱される。平板集熱器は、以下の分類に区分される。大気温度より数度高い温度の熱の輸送に適した「非グレイズド型」、プレートに平行してガラス板またはその他の透明材を設置してその上に数センチメートルの空間を設け、約 30～60℃の熱の輸送に適した「グレイズド型」、グレイズド型と同じであるがプレートとガラス・カバーの間の空間がなく、約 50～120℃の熱の輸送に適した一種の集熱器である「真空型」である。真空を保つために、一般に真空集熱器のプレートは、集熱器のグレイジングとその容器両方を構成するガラス・チューブ内に設置される。真空型では、「選択性吸収表面」と呼ばれる特殊な黒色被膜が、吸収された熱の再放出を防止するプレートに施される。そのような被膜は非真空グレイズド型にもよく使用される。適切な温度で使用された太陽熱集熱器の一般的な効率、太陽が充分ある場合 40～70%となっている [3.3.2.1]。

平板集熱器は一般的に家庭用・商業用として利用する水の加熱に使用されているが、ビルの温度調整目的のアクティブ太陽エネルギー暖房にも使用可能である。太陽熱集熱器を使用して吸収冷凍サイクルを稼働させる熱を供給することで太陽熱冷房も可能となる。太陽熱由来の熱の別用途としては、産業用プロセス熱、作物の乾燥などの農業用途、及び調理が挙げられる。貯水槽は、日中・夜間または曇天時における短期間の熱の貯蔵に最もよく使用される装置である。これらのシステムは他の補助エネルギー源と共に用いられるが、一般的には対象用途の熱エネルギー需要の 40～80%を供給している [3.3.2.2～3.3.2.4]。

パッシブ太陽エネルギー暖房の場合、ビルそのもの（特に窓）が太陽熱集熱器として機能し、自然に熱の分配及び貯蔵に使用される。パッシブ暖房構造の基本的要素は、高効率な赤道（太陽の通り道）に面した窓と大きい内部サーマルマスである。また、ビルがしっかりと断熱され、過熱を防ぐ保護装置などの手段が組み込まれていなければならない。パッシブ太陽光の他の機能は「採光」であり、これには建築物内の自然（太陽）照明を最大限利用する特殊な手法が組み込まれている。北ヨーロッパまたは北アメリカにおける新しい建築物にこれらの手法を用いることで、建築物の暖房需要を 40%も削減することが出来ることが研究レベルで示されている。なお、既存の建築物にパッシブ暖房コンセプトを組み込んだ場合でも 20%もの削減が達成可能である [3.3.1]。

太陽光発電: 太陽光発電 (PV) がどのように機能するかについては、多くの教科書に示されている。シリコンなどの半導体物質の薄板を日の当たる場所に置く。2 つの異なる層によって構成されたシリコンの薄板においてシリコンに不純物を取り入れることで n 型層及び p 型層が形成され、それらが接触することで接合が形成されている。電池に当たる太陽からの光は、接合部で内部電界によって空間的に切り離される電子正孔対を発生させ、その結果、接触面の片側に負電荷を、反対側に正電荷を発生させる。この結果生じる電荷分離によって電圧が発生する。そして、光照射された電池の両側が電気機器に接続されると、電流が装置の片側から電気機器を通して電池の反対側に流れ、電力が発生する [3.3.3]。

様々な太陽光発電 (PV) 技術が並行して開発されている。商業利用が可能な太陽光発電 (PV) 技術としては、ウェハをベースにした結晶シリコン系太陽光発電 (PV) に加え、銅インジウム・ガリウム・(ジ)セレンアイド (CIGS)、カドミウムテルル (CdTe)、薄膜シリコン (アモルファス・微結晶シリコン)、及び色素増感太陽電池などが含まれる。また、集光ミラーやフレネル・レンズなどの集光器の焦点に高効率電池 (ヒ化ガリウム材料など) を置く集光型太陽光発電 (PV) も商業化されている。単結晶・多結晶 (multi-crystalline) (“polycrystalline”と呼ばれる場合もある) シリコン・ウェハ太陽光発電 (PV) (リボン技術を含む) は、太陽光発電 (PV) 市場において主要な技術であり、2009 年の市場割合の約 80% を占めている。様々な種類の電池によって実現される最大効率は、GaAs を基調とする集光式電池では 40%以上、単結晶シリコンでは約 25%、多結晶シリコンと CIGS では 20%、カドミウムテルルでは 17%、アモルファスシリコンでは約 10%となっている。一般的に、一群の電池を透明なシート (普通はガラス) の下に直列に接続され、最大 1 辺 1m の寸法で「モジュール」を形成する。効率を検討するにあたっては、(上で引用した) 電池効率とモジュール効率 (後者は一般的に前者の 50～80%) を区別するのが重要である。製造者は、自動化、電池加工の高速化、及び製造の低コスト・高スループット化によってパフォーマンスの改善及びコストの削減を続け、その性能は一般に製造者によって 20～30 年間保証されている [3.3.3.1, 3.3.3.2]。

有用な太陽光発電 (PV) の電力利用には、電池及びモジュール以上のものが必要である。たとえば、太陽光発電 (PV) システムは、電池からの直流電力を共通のネットワーク、及び装置と互換性のある交流電力に変換する変換機を含むことが多い。分散型利用の場合、このシステムはバッテリーなどの蓄電装置を含む可能性がある。これらの装置の信頼性の向上、コスト削減、及びモジュールと同程度の寿命延長の努力は継続的に行われている [3.3.3.4]。

太陽光発電 (PV) システムは、非系統連系型と系統連系型の 2 つの主要な種類に分類され、系統連系型システム自体は分散型と集中型の 2 つの種類に分類される。分散型システムは、多くの小型地域発電所で構成され、主に現地の顧客に電力を供給しており、その他の電力は送電網に送られる。一方、集中型システムは、1 つの大型発電所として機能する。非系統連系型システムはほとんどの場合、単一または小グループの顧客向け専用となっており、一般的に蓄電装置またはバックアップ電源を必要とする。これらのシステムは、電気が供給されていない地域において大きなポテンシャルを持っている [3.3.3.5]。

集光型太陽熱発電: 集光型太陽熱発電 (CSP) 技術は、太陽光線の集光によって発電機を稼働させる熱機関プロセス (蒸気タービンなど) で (直接的にまたは間接的に) 使用される媒体を加熱し、発電する。集光型太陽熱発電 (CSP) は、太陽放射の直達光成分のみを使用するため、その最大の便益は地理的に限定される。集光器は太陽光線を、集光タワーやディッシュシステムで使用された場合には一点 (点焦点) に集め (点集光システム)、トラフ型 (樋型) または線形フレネル型システムで使用された場合には線 (線焦点) に集める (線集光システム) (以下で説明するように、燃料生産用の熱化学過程の駆動にも同様のシステムが使用出来る)。トラフ型集光装置では、太陽の移動を追跡するパラボラ型反射装置の長い列によって、反射装置の焦線に沿って取り付けられた集熱器 (HCE) に太陽放射が約 70~100 倍に集光される。集熱器は、黒色内部パイプ (選択性吸収表面) とガラス外管で構成され、両者の間の空間は真空となっている。現在の商業設計では、熱伝達油はそれが加熱される (400℃近くまで) 鋼管を通して循環するが、熔融塩、直接蒸気やその他の熱伝達物質を用いた循環システムも現在実証中である [3.3.4]。

2 番目の線集光システム (線形フレネル型システム) は、平行する長い帯状のミラーが固定された線形の集熱器とともに使用される。点焦点システム (2 種) の 1 つである集光タワー (「パワー・タワー」とも呼ばれる) が、地上に並べたミラー (ヘリオスタット) を使用して、高い塔の頂点の一点に太陽光線が集中するように各々のヘリオスタットが太陽光を 2 つの軸で追尾する。その焦点はレシーバーに向けられており、その中には倒立のキャビティ (空隙形状の受光器) やチューブが取り付けられ、熱伝導流体が循環している。それは線焦点型よりも高い温度 (最大 1,000℃) に達する可能性があり、それによって (少なくとも理論上は) 熱機関がさらに多くの収集された熱を電力に変換出来るようになる。2 番目の点焦点システム (ディッシュ型集光器) では、2 つの軸で太陽を追跡する (反射鏡の列とは対照的な) 単一の放物面反射鏡が集光に使用される。ディッシュ型は、ディッシュに合わせて移動するディッシュの直径分離れた集熱器に太陽光線を集光するもので、集熱器上の温度は 900℃に達することもある。このコンセプトを具現化した有名なものの 1 つでは、発電機を駆動するスターリング・エンジンが中心に取り付けられている。スターリング・ディッシュ設備は比較的小型で、一般的に 10~25 kW を生産するが、フィールドで集約化することによって、より大型の集中型発電所並みの出力を実現することも出来る [3.3.4]。

集光型太陽熱発電所 (CSP) には 4 つの種類があり、相対的な利点及び不利点がある [3.3.4]。これらはすべて、すでに建設され、実証されている。集光型太陽熱発電 (CSP) 技術 (ディッシュ型を除く) の重要な利点は、集熱器で収集された熱エネルギーが熱機関に入る前に蓄熱出来ることである。検討されている貯蔵媒体としては、熔融塩、圧搾空気・蒸気貯蔵器 (短期貯蔵目的のみ)、個体セラミック粒子、高温相変化物質、グラファイト、及び高温コンクリートがある。15 時間に及ぶ蓄熱能力があり、必要に応じて電力を供給出来る、商業用集光型太陽熱発電所 (CSP) が建設中である [3.3.4]。

太陽燃料生産: 太陽燃料技術は、太陽エネルギーを水素、合成ガス、及びメタノールやディーゼルなどの液体のような化学燃料に変換する。単独または組み合わせて機能する太陽燃料への 3 つの基本的経路としては、(1) 電気化学的、(2) 光化学・光生物学的、及び (3) 熱化学的がある。1 つ目の経路の場合、水素は、太陽光発電 (PV) ・集光型太陽熱発電 (CSP) システムによって生成される太陽を利用した電力による電気分解で生産される。水の電解は、昔からの十分研究された技術であり、一般的に電力から水素へは 70% の変換効率が実現されている。2 つ目の経路の場合、太陽光は燃料を生成する光化学的または光生物学的反応を起こすために使用される。これは、植物や生物の活動を模したものである。半導体は水から水素を生成する光電気化学セルにおける光吸収陽極としても使用することが出来る。3 つ目の経路の場合、高温の太陽を利用した熱 (集光タワー型集光太陽熱発電所 (CSP) の集熱器で得られたものなど) が、燃料を生産する吸熱化学反応を引き起こすために使用される。ここで使用可能な反応物質としては、水、二酸化炭素、石炭、バイオマス、及び天然ガスの組み合わせなどが挙げられる。太陽燃料を構成する生成物は、水素、合成ガス、メタノール、ジメチルエーテル、及び合成油脂のどれか (またはその組み合わせ) である。化石燃料が反応物質として使用された場合、生成物の総発熱量は反応物質よりも高くなるため、より少ない化石燃料の燃焼で同じエネルギー放出が可能となる。太陽燃料は、太陽水素及び二酸化炭素から合成し、既存のエネルギー・インフラに対応可能な炭化水素を生成することも出来る [3.3.5]。

3.4 市場・産業展開の世界的・地域的状況

3.4.1 設備容量及び発電電力量

太陽熱: 住宅用・商業用建築物向けのアクティブ太陽暖房・冷房技術の市場は成熟している。この市場は、世界のほとんどの国に様々なレベルで分布しており、2007 年から 2009 年にかけて 34.9%成長し、年間約 16%の成長を続けている。2009 年末には、世界の熱エネルギーの設備容量は、180GW_{th}と推定されている。アクティブ太陽熱システムの販売の世界市場は、2008 年には 29.1GW_{th}、2009 年には 31GW_{th}に達したと推定され、グレーズド型集光器が、世界の市場の大部分を占めており、2008 年にはグレーズド型集光器の設置の 79%を中国が、約 14.5%を EU が占めているとなっている。アメリカ及びカナダでは、水泳プール暖房がまだ主要な用途であり、非グレーズド型プラスチック集光器の設備容量は 12.9GW_{th}となっている。平板・真空チューブ集光器の設備容量においては、2008 年に中国が 88.7GW_{th}で世界のトップに立ち、ヨーロッパは 20.9GW_{th}、日本は 4.4GW_{th}となっている。ヨーロッパでは、2002 年から 2008 年にかけて太陽熱の市場規模が 3 倍以上になっているものの、ヨーロッパにおける温水の需要の中でもわずかな割合しか占めていない。たとえば、最大の市場を有するドイツでは、一世帯・二世帯住宅の約 5%が太陽熱エネルギーを使用している。太陽エネルギーの一人当たりの年間使用量は、市場における普及率の 1 つの基準である。この観点から見れば、この数値が 1,000 人当たり 527kW_{th}であるキプロスが最も成熟しているといえる。なお、パンプ型太陽利用については市場及び産業への導入に関する利用可能な情報がないため、前述の数値はアクティブ型太陽利用のみを参照したものとなる [3.4.1]。

太陽光発電: 2009 年には、約 7.5GW の太陽光発電 (PV) システムが導入されたことによって、世界の太陽光発電 (PV) の累積設備容量が約 22GW に達した。これは、年間最大 26TWh (93,600TJ) を生産出来る数値である。この容量の 90%以上が 3 つの主要な市場で導入されたもので、EU が全体の 73%、日本が 12%、アメリカが 8%を占めている。経済協力開発機構諸国における太陽光発電 (PV) 設備容量の約 95%が系統連系型で、他は非系統連系型である。2009 年までの上位 8 位の太陽光発電 (PV) 市場の成長を、図 TS.3.2 で説明しているが、スペイン及びドイツで最近導入された量は群を抜いて大きい [3.4.1]。

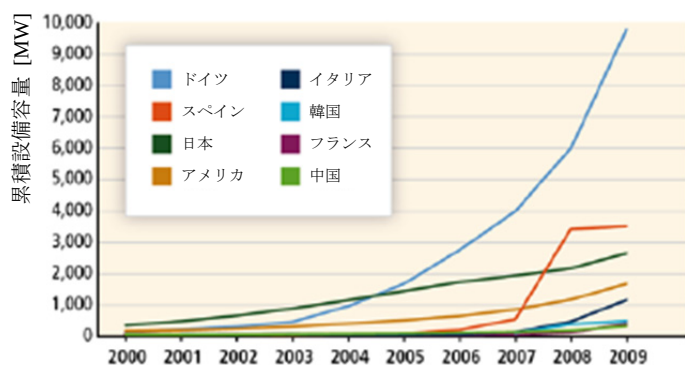


図 TS.3.2: 8 つの市場における 2000 年から 2009 年までの太陽光発電 (PV) 設備容量 [図 3.9]

集光型太陽エネルギー: 集光型太陽熱発電 (CSP) の累積設備容量は約 0.7GW に達し、さらに 1.5GW が現在建設中である。これらの集光型太陽熱発電 (CSP) 所の多くでは、25~75%の設備利用率が期待されており、これは太陽光発電 (PV) よりも高い可能性がある。何故ならば、集光型太陽熱発電 (CSP) の設備では、集光器の追加設置によってその余剰分を蓄熱に回すことが可能になるからである。設備利用率の幅の下限は、蓄熱媒体がない場合の数値であり、上限は最大 15 時間の蓄熱が可能な場合の数値である [3.8.4]。初の商業用集光型太陽熱発電所 (CSP) は、354MW の電力を生産可能なカリフォルニアの Solar Electric Generating Systems である。これは 1985 年から 1991 年にかけて設置され、今でも稼働中である。1991 年から 2000 年代初期にかけての集光型太陽熱発電 (CSP) の普及は遅かったが、2004 年あたりから計画的発電が大きく増加してきている。現在稼働中の集光型太陽熱発電 (CSP) の大半がトラフ型で構成されているが、点集光型の割合が増加しており、反射型スターリングエンジンの商業化が活発化している。2010 年初めの時点では、世界の計画容量の大半がアメリカとスペインのものであるが、最近では他の国も商業化計画を発表している。図 TS.3.3 は、2015 年までの集光型太陽熱発電 (CSP)

容量の現在の普及計画を示している [3.3.4, 3.4.1]。

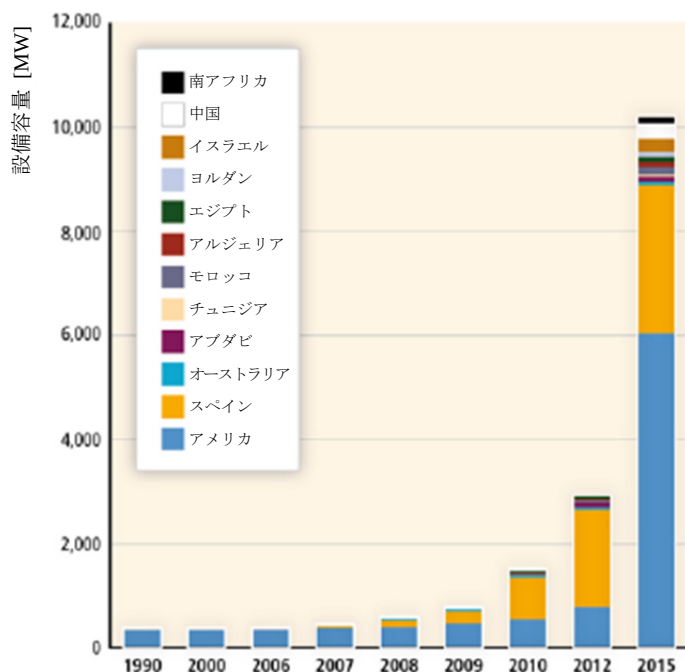


図 TS.3.3: 国によって導入及び計画されている集光型太陽熱発電所 [図 3.10]

太陽燃料生産: 現在、太陽燃料生産はパイロット・プラント段階である。電力幅が 300～500kW のパイロット・プラントが、酸化亜鉛の炭素熱還元、蒸気メタン改質、及び石油コークスの蒸気ガス化目的で建設されている。オーストラリアで、250kW 規模の蒸気改質反応炉が稼働中である [3.3.4, 3.4.1]。

3.4.2 生産能力及びサプライチェーン

太陽熱: 2008 年には約 4150 万 m² の太陽熱集熱器が生産されており、製造企業は多数に及んでいる。そして、多くの企業では大量生産と呼んでいる水準に達している。製造過程においては、容易に利用出来る材料（銅、アルミ、ステンレス鋼、断熱材など）からさまざまな結合技術を用いて集熱板が生産されており、その集熱器は、現在容易に利用可能なカバー・ガラス（ほとんどの場合、鉄組成の低い白板ガラス）で蓋をされる。ほとんどの生産は内需を対象とした中国のもので、大量生産技術に適した真空集光器が市場を支配し始めている。他の重要な生産地はヨーロッパ、トルコ、ブラジル、及びインドである。輸出市場の多くが、いわゆる太陽熱集熱器ではなく全太陽熱温水暖房システムによって構成され、主要な輸出国は、生産量の約 50%を輸出が占めているオーストラリア、ギリシャ、アメリカ、及びフランスである [3.4.2]。

パッシブ型太陽エネルギー暖房の場合、生産能力やサプライチェーンの一部は人、つまり技術者及び建築家に依存しており、パッシブ型暖房の建築物を作るためにはこれらの人が体系的に協力する必要がある。過去には、この両者の密接な協調が欠けていたが、各国によって発表された体系的な設計方法が普及したことで設計能力は向上してきた。窓及びグレージングはパッシブ型暖房の建築物の重要な一部であり、新世代の高効率な（低放射、アルゴン充填）ガラス窓が利用出来るようになったことで、建築部門における暖房需要に太陽エネルギーが大きく寄与出来るようになった。これらの窓は現在、高緯度国で設置されている新しい窓の大部分を占めており、より良い窓の採用を妨げる生産能力またはサプライチェーンの問題はないように思われる。受動暖房設計のもう 1 つの側面は建築物の構造の内部質量の増加による蓄熱である。最も広く使われている貯蔵材料であるコンクリート及びレンガはすぐにでも利用可能であるし、未来の貯蔵材料として検討されている相変化材料（パラフィンなど）にもサプライチェーン問題はないと予想される [3.4.2]。

太陽光発電: 2003 年から 2009 年にかけての太陽光発電（PV）製造生産における年間成長率は 50%を超える。2009 年には、太陽電池生産がいくつかの経済圏に分散されて年間 11.5GW（ピーク容量で計算）

に達した。中国が世界の生産の 51%（台湾の 14%を含む）、ヨーロッパは約 18%、日本は約 14%、アメリカは約 5%を占めている。世界では、300 以上の工場で太陽電池及びモジュールが生産されており、2009 年には、結晶シリコン太陽電池及びモジュールは世界市場の 80%に達した。残りの 20%の大部分は、カドミウムテルル、アルモファスシリコン、及び銅インジウムガリウムセレンで占められている。全体の市場は、薄膜モジュールの市場シェアとともに、今後数年にわたって全市場が大幅に増加すると予想されている。製造者は、製造ユニットの独自の設計に向かっており、またモジュール生産部を最終市場に近いところへ移動させている。2004 年から 2008 年初期にかけて、結晶シリコン（またはポリシリコン）の需要が供給を上回り、価格上昇につながった。新たな価格とともに、十分な供給が可能となり、太陽光発電（PV）市場は現在それ自体によるポリシリコンの調達を進めている [3.4.2]。

集光型太陽熱発電：過去数年間にわたって、集光型太陽熱発電（CSP）産業は停滞時期から回復し、2GW が稼働中または建設中である。10 以上の企業が現在、商業規模のプラントを建設または準備している。その企業は、新興企業から公共事業を含む国際的な建設管理ノウハウを持つ大規模な組織まで様々である。プラント建設のためのサプライチェーンは、原材料の利用可能性によって制限されることはない。約 18 ヶ月のリードタイムがあれば、容量の拡大が可能である [3.4.2]。

太陽燃料生産：太陽燃料技術はまだ新興のものであり、現在、商業用途向けに機能しているサプライチェーンは存在しない。太陽燃料は、石油化学産業におけるものと同様の下流技術に加え、他の高温集光型太陽熱発電（CSP）システムで導入されているものと同じソーラー・フィールド技術の大部分によって構成される [3.4.2]。

3.4.3 政策の影響

直接的太陽エネルギー技術は、大規模な普及を達成する上で様々な障壁に直面している。太陽エネルギー利用技術の成熟度はそれぞれ異なり、地域によってはすでに競争力のある用途もあるが、それらは一般的にコスト削減の必要性という 1 つの共通の障壁に直面している。発電所規模の集光型太陽熱発電（CSP）及び太陽光発電（PV）システムには、分散型太陽光発電（PV）及び太陽熱暖房・冷房技術とは異なる障壁に直面しており、重要なものとしては以下のようなものが挙げられる。それは、発電所規模のプロジェクトに好ましい太陽エネルギー資源を持つ土地開発における立地・認可・財務上の課題、電力需要地から離れた大規模なプロジェクトのための送電線の欠如、小規模なプロジェクトの場合の複雑な系統連系の法律・認可の手順・費用、分散型発電電力の価値を付与する一貫した系統連系の標準化と時間帯別電力料金構造の欠如、一貫性のない基準・認可が強いられること、技術横断的に起こる環境的便益及びリスク軽減の便益を高める規制構造の欠如である。適切な政策設計を通して、政府は研究開発資金や、経済的な導入障壁を乗り越えるインセンティブを提供することで太陽エネルギー利用技術を支援出来ることを示してきた。たとえば、ドイツ及びスペインでの FIT 政策による太陽光発電（PV）の普及拡大を受けて、価格主導のインセンティブ枠組みが一般化した。再生可能エネルギー利用割合基準や、政府による競争入札などの割り当て主導の枠組みは、それぞれアメリカと中国で一般的である。これらの規制枠組みに加え、財政政策及び財政支援メカニズム（税額免除、ソフトローン、助成金など）は、太陽エネルギー関連製品の製造の支援及び消費者需要の増加のためによく利用される。太陽光関連政策の最大の成功例は、特定の用途によって課される障壁に合わせて調整されている。そして、市場に明確で長期的かつ一貫した意図を送るものが最も有効な政策である [3.4.3]。

3.5 広範囲のエネルギーシステムへの統合

太陽エネルギー利用技術は、広範囲のエネルギーシステムへの統合を可能にする多くの優位性を持っている。この節では、太陽エネルギー利用技術に固有の統合エネルギーシステムの特徴のみをまとめている。これらには、低容量のエネルギー需要、地域の暖房・その他の熱負荷、太陽光発電（PV）の特性とならし効果、及び集光型太陽熱発電（CSP）の特性と系統安定化が含まれる [3.5.1～3.5.4]。

照明、太陽熱温水など、電力消費の低い用途では、太陽エネルギー利用技術には非再生可能の燃料技術と比べて利点がある。また、太陽エネルギー利用技術は、小規模な分散型の用途だけでなく大規模な集中型の用途にも利用出来る。世界のいくつかの地域では、高断熱の建築物は比較的低温なエネルギー媒体で効果的に暖めることが出来るため、地域の暖房・その他の熱需要へ太陽エネルギーを組み込むことは有効であることが実証された。また、場所によっては、地域冷暖房システムが、分散型の冷房よりも、

規模の経済性によるコスト優位性、建築物ごとに異なる冷房需要の違い、騒音・構造負荷の削減、設備スペースの削減などについて利点を持つことがある。また、バイオマスと低温の太陽熱エネルギーを組み合わせて、システム利用率と（温暖化ガスの）排出量特性を改善することが出来る [3.5.1, 3.5.2]。

ある特定の場所における太陽光発電（PV）を考えると、電力は1日・1年を通して規則正しく変動するだけでなく、気象条件によって不規則に変動する。この変動は、（太陽光発電の）普及の初期段階から地方の送配電システムの電圧及び電力フローに対して大きく影響するが、さらに普及が進むと全系統電力システムにおける需給調整に大きく影響する場合がある。この影響は、太陽光発電（PV）のシステム統合の制約になる可能性がある。しかし、モデル化及びシステム解析により、広範囲にわたって設置された多数の太陽光発電（PV）システム（の合計出力）では不規則性が平均化されると同時に、その変動の速度も遅くなることが示唆されており、これは、「ならし効果」と呼ばれる。大規模（2～200kmの間隔がある1,000か所のもの）かつ1分以下の時間スケールにおける実際のならし効果を評価及び定量化するための研究も進められている [3.5.3]。

集光型太陽熱発電所（CSP）では、貯蔵設備がない場合でも、集熱システム固有のサーマルマスとタービン内の回転質量によって、電気出力に対する太陽光強度の急速な変動の影響を大幅に減少させることができ、システムに対する影響を小さく出来る。蓄熱を含めた統合システムとすることで、将来、ベースロードとして必要な高い設備利用率が実現される可能性がある。また、集光型太陽熱発電所（CSP）を化石燃料発電機、特にガス燃焼太陽熱複合発電システム（貯蔵設備付）と統合することによって、燃料効率を改善するとともに稼働時間を延長すれば、最終的に、集光型太陽熱発電（CSP）やコンバインドサイクル発電所を別々に運用するよりも高い費用対効果が期待される [3.5.4]。

3.6 環境及び社会的影響

3.6.1 環境への影響

温室効果ガス削減の便益以外にも、太陽エネルギーを利用すると、これによって置き換えられる古い火力発電所と比較して、微粒子、有害ガスなどの汚染物質の放出も削減出来る。太陽熱発電（CSP）及び太陽光技術（PV）は、電力を生産する際に固体・液体・気体などの副産物を一切発生させない。これら太陽エネルギー利用の一連の技術は、管理方法によっては、空気、水、土地、及び生態系に対する新たなタイプの影響が生じる場合がある。太陽光発電（PV）製造においては、有害な爆発性ガスに加え、腐食性液体が使用されている。これらの材料の存在及び量は、電池の種類に大きく依存している。しかし、太陽光発電（PV）産業における生産プロセスにおける固有のニーズは、モジュール生産中での可能性のある危険物質の放出が最小限となるように、かなり厳密な管理方法が求められている。その他の太陽エネルギー技術では、一般的に大気・水質汚染の影響は比較的小さいと考えられている。加えて、特定の地域における太陽エネルギー利用技術では、パフォーマンスを維持するため、水の使用による洗浄が必要となる場合もある [3.6.1]。

様々な太陽光発電（PV）モジュール及び集光型太陽熱発電（CSP）技術に関する温室効果ガスのライフサイクル評価推定値が、図 TS.3.4 に示されている。太陽光発電（PV）モジュールの推定値の大半は、CO₂eq/kWh の30～80g/kWh に集中している。集光型太陽熱発電（CSP）による電力のライフサイクル温室効果ガス排出量は、最近では二酸化炭素換算量で14～32g/kWhになると推定されている。これらの排出水準はおおむね、天然ガス燃焼発電所よりも一桁低い水準にある [3.6.1, 9.3.4]。

土地利用は、環境に影響するもう一つの形である。屋上設置型太陽熱システムと太陽光発電（PV）システムの場合、これは問題になるものではないが、集中発電所型の太陽光発電（PV）や集光型太陽熱発電（CSP）の場合に問題となる可能性がある。環境的に影響を受けやすい土地の場合、集光型太陽熱発電（CSP）の認可には特別な課題が発生する。集光型太陽熱発電（CSP）と太陽光発電（PV）との間の違いの1つは、作動流体を冷却する方法を必要とし、その冷却のために乏しい水源が利用されることが多いという点である。空冷方式も実行可能なオプションであるが、発電所の効率は2～10%減少する [3.6.1]。

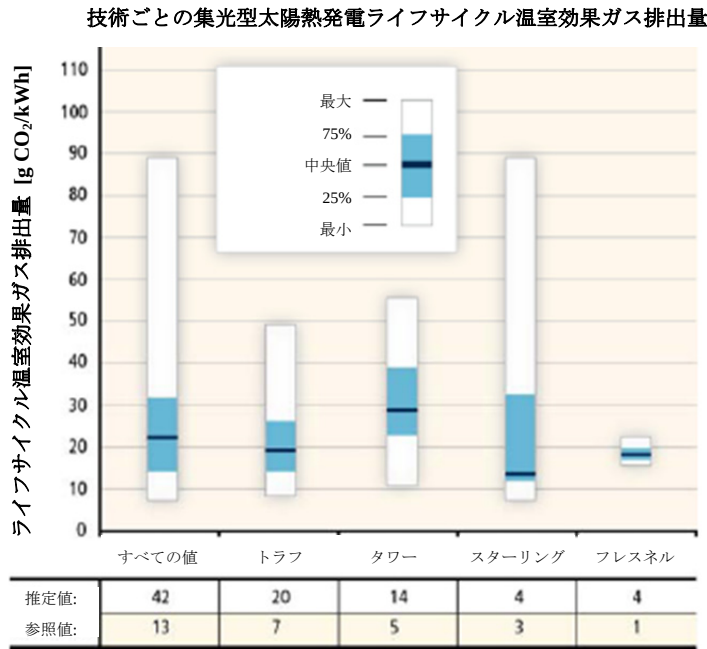
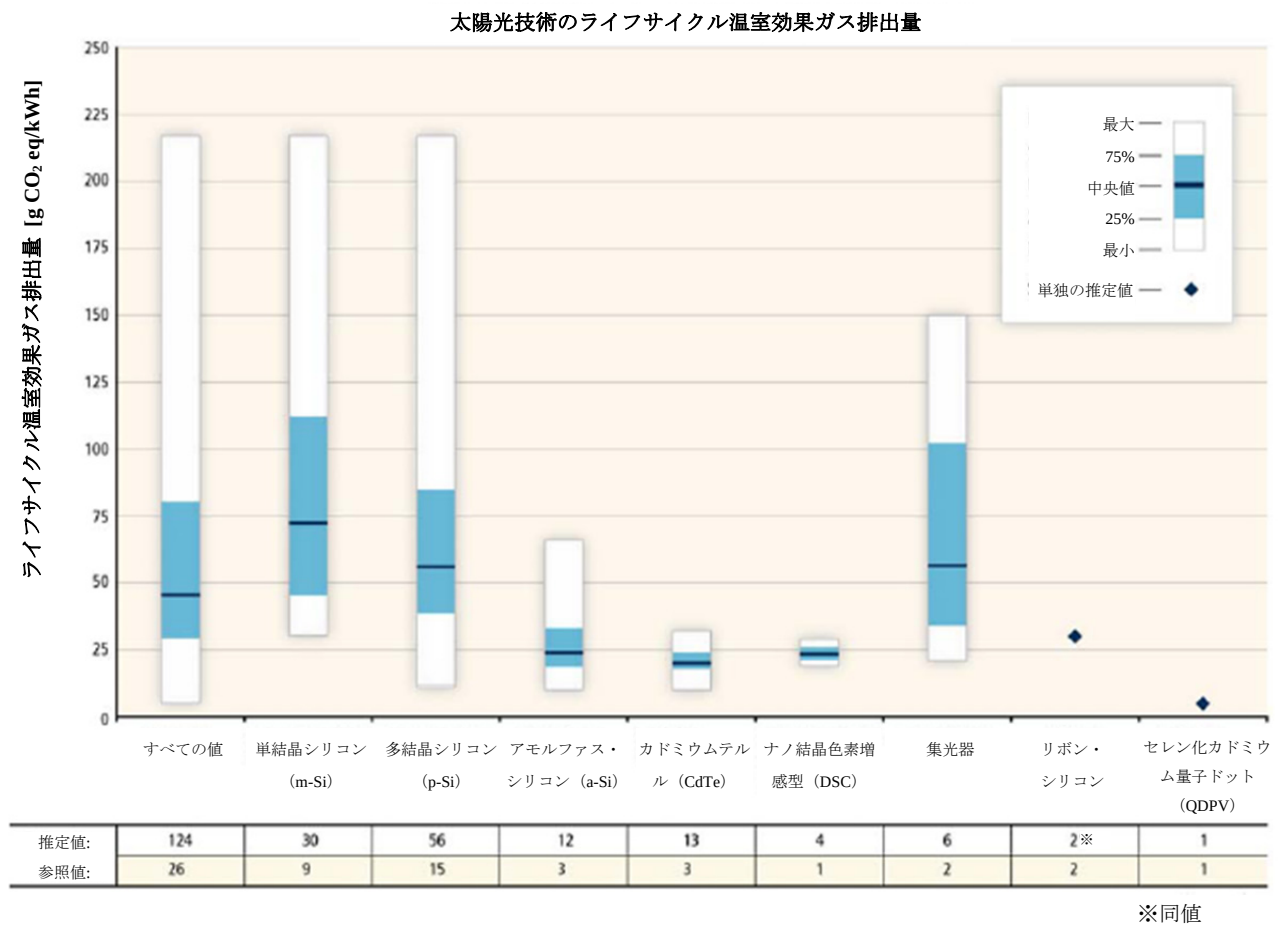


図 TS.3.4: （上）太陽光発電（PV）モジュール及び（下）集光型太陽熱発電（CSP）技術のライフサイクルからの温室効果ガス排出量。表示されている推定値に関係している文献の引用及び文献調査の詳細については Annex II を参照のこと [図 3.14, 3.15]。

3.6.2 社会への影響

開発途上国においては、太陽エネルギーの利益については、その使用の拡大については論議されている。

世界では約 14 億人が電力を使用出来ない。自立型住宅用太陽光 (PV) 設備及び太陽光発電 (PV) 電力の地域系統は、主系統につなぐために法外なコストが必要な遠隔地域に、電力を提供することが出来る。電力及び太陽エネルギー技術が、地域の全住民に多くの重要な便益を与える影響があることが分かっている。その便益というのは、屋内汚染をもたらす灯油ランプと効率の悪い調理用ストーブの置き換え、屋内での読書時間の増加、調理用の薪を集める時間の短縮（通常それを集める女性及び子供が他のことに専念出来る）、治安のための街路照明、ワクチンや食品の冷蔵による健康状態の改善、及び最終的には通信機器（テレビ、ラジオなど）などである。これらはすべて、人々の生活を改善する多様な便益を実現する [3.6.2]。

雇用創出は、太陽エネルギー技術に関連した重要な社会的検討事項である。分析によると、太陽光発電 (PV) は一連の太陽エネルギー利用技術の中でも最も高い雇用創出ポテンシャルを秘めていることが示されており、太陽光発電 (PV) によって、1GWh 当たり約 0.87 年の雇用機会が創出される。それに次ぐのは集光型太陽熱発電 (CSP) の 1GWh 当たりの 0.23 年の雇用機会である。これらの雇用に係る議論は、適切に行われることによって、視覚的（景観的）影響などの太陽エネルギーにまつわる欠点に対し、社会的受容を促進し、人々が受け入れようとする民意の成熟につながる [3.6.2]。

3.7 技術の改良及びイノベーションの見通し

太陽熱: 将来の建築物では、計画の初期段階で統合できれば、屋根及び前面の見える箇所はすべてにソーラー・パネル（太陽光発電 (PV)、集熱器、太陽光発電 (PV) - 熱複合（ハイブリッド）など）を設置するだろう。そのような建築物は、各建築業者・所有者の個人によって望まれるだけでなく、一部の地域では公共政策の義務の結果として建設される場合もある。たとえば、ヨーロッパ太陽熱技術プラットフォームの構想では、2030 年までに「アクティブ・ソーラー建築」を新しい建築物の基準として設定することになっている。アクティブ・ソーラー建築物とは、平均として、それ自体の温水及び空調用のエネルギー需要のすべてをカバーするものである [3.7.2]。

パッシブ太陽熱がより進化したものでは、暖房需要が優先される気候と、冷房需要が優先される気候による 2 つのタイプに分かれる。前者は以下により、広範囲に適用可能である— 真空（密封されたものと逆である）断熱ガラス、夜間の可動する外部断熱、及び自動的に太陽光の可視透過率を変更出来、断熱値も向上可能な透光性ガラス窓システム。後者は、以下により、使用の増加が見込まれている— クール・ルーフ（太陽エネルギーを反射する色の薄い屋根）、地面と水をヒート・シンクとして利用するなどの熱放散技術、建築物周辺の微気候を改善させる手法、及び太陽エネルギーの照明成分（熱成分ではない）の浸透を可能にする日射制御装置。両方の気候において、建築資材に蓄熱機能を埋め込むことが期待されている。また、吸収された太陽熱を建築物周辺や外気に分散させる（ファンなどの能動的な手法を用いると思われる）の向上策も期待されている。最終的には、設計ツールの向上によってこれらの様々な手法の改善が促進されると考えられる [3.7.1]。

太陽光発電: 現在でも比較的成熟した技術ではあるが、太陽光発電 (PV) はまだパフォーマンス及びコスト面で急速な向上を続けており、この着実な進歩が継続すると期待されている。これらの必要とされる取り組みは、政府間協調の枠組みや、ロードマップを要する。異太陽光発電 (PV) 技術に対して 4 つの広範囲な技術分類が同定されてされており、それぞれに個別の研究開発が必要である。それは、1) 電池の効率、安定性、及び寿命、2) モジュールの生産性と製造、3) 環境持続可能性、及び 4) 適用可能性であり、これらすべてにおいて標準化及び調整が必要となる。将来的には、太陽光発電 (PV) 技術は、現在の技術、新興技術、及び高リスク技術の 3 つの主要な種類に分類出来る。現在と新興技術は中期（10～20 年）的に中程度のリスクを示し、高リスク技術は 2030 年以降を目標とし、並外れたポテンシャルを持つが技術的ブレイクスルーを必要とする。新興電池の例としては、多接合の多結晶薄膜、及び 100 μ m 以下の厚さの結晶シリコンが挙げられる。高リスク電池の例としては、有機太陽電池、生態模倣装置、及び最大効率を大幅に増加させるポテンシャルを持つ量子ドット型が挙げられる。最後に、変換機装置、貯蔵器、充電制御器、システム構造、及びエネルギー・ネットワークなどを含むバランス・オブ・システム (BOS) も重要な技術として取り組むべきものである [3.7.3]。

集光型太陽熱発電: 現在、集光型太陽熱発電 (CSP) は発電所規模で実証済みの技術であるが、まだ技術の進歩は続いている。発電所が建設されるにつれ、大量生産と規模の経済性の両方によってコストが低減されている。ただし、太陽光から電力への効率の向上（一部は集光器温度の上昇による）を継続す

る余地はある。温度及び効率を増やすため、水（集熱器で沸騰させる）や溶融塩など油の使用に代わる熱伝導流体が開発されており、それによって作動温度を上昇させることが出来る。集合タワー型の場合、作動温度が高くなるため、全体効率は向上し、さらなる改善によって既存システムの約 2 倍で最大 35% のピーク効率（太陽光から電力）の達成が予想される。トラフ型は、太陽熱発電用の選択吸収膜が継続的に改良されたことにより便益が得られ、また集光タワー型及びディッシュ型では設計法の改善により、焦点において高強度の太陽放射を得ることが可能になるだろう。資本コストの削減は、大量生産、規模の経済性、及び過去の経験からの学習効果によって実現されると考えられる [3.7.4]。

太陽燃料生産: 太陽光発電 (PV) または集光型太陽熱発電 (CSP) を使用した太陽利用の電解は、ニッチな用途として利用可能だがまだ高コストであり、様々な方面から太陽燃料のコストを削減する技術の開発が進められている。これらには、固体酸化物電解セル、光電気化学セル（太陽水電解におけるすべてのステップを単一ユニットへ組み込んでいる）、先進的熱化学過程、及び光化学的・光生物学的過程（人工の生態模倣システムにおける人工光合成と生物の光生物学的水素生産を統合して組み合わせる場合もある）が含まれている [3.7.5]。

その他の潜在的な将来の用途: 中間的な熱力学的サイクルを用いない太陽熱技術を使用した発電方法があり、これらは研究段階であるが、熱電・熱電子・電磁流体力学・アルカリ金属を用いる方法が含まれている。宇宙で収集された太陽光を地上の受信アンテナへ向けてマイクロ波で送る宇宙太陽光発電も提案されている [3.7.6]。

3.8 コストの傾向

太陽エネルギーのコストは技術、用途、場所、及びその他の要素によって大きく異なっているが、コストは過去 30 年間に於いて大幅に削減され、技術的進歩及び政策的支援によってさらなるコスト削減のポテンシャルが提供されつづけている。イノベーションの継続の程度は、太陽光の普及レベルに重大な影響を受ける [3.7.2.~3.7.5, 3.8.2~3.8.5]。

太陽熱: 太陽熱暖房材器の経済性は、エネルギーのサービスの需要に関するシステムの適切な設計にかかっており、しばしば補助エネルギー源の使用を伴う。たとえば、中国南部のいくつかの地域では、太陽熱温水 (SWH) システムは従来型のオプションに対してコスト競争力がある。太陽熱温水 (SWH) システムは一般的に日当たりの良い地域においてコスト競争力が高いが、空間暖房の場合は通常、全体の加熱負荷がより高いため状況が異なる。寒冷地では、長めの暖房期間に資本コストを分散出来るため、太陽熱の競争力がさらに高くなる可能性がある [3.8.2]。

太陽熱暖房システムの投資コストは、使用される技術の複雑性に加え、稼働する国の市場条件によって大きく異なる。設置されたシステムのコストは、安いものでは中国の太陽熱温水 (SWH) システムの 83US ドル/m² (2005 年) から、高いものでは暖房システムの 1,200US ドル/m² (2005 年) まで幅広い。熱の均等化原価 (LCOH) は、投資コストの大きな変動を反映し、それを上回る数の変数（具体的なシステムの種類、システムの投資コスト、特定の場所で利用可能な太陽放射照度、システムの変換効率、操業費、システムの利用戦略、適用される割引率など）に依存する。Annex II で概説している標準化された方法、及び Annex III で要約しているコストとパフォーマンスのデータに基づき、膨大かつ多様な入力パラメータの下、太陽熱システムの熱の均等化原価は 9~200US ドル/GJ (2005 年) の幅で大きく変動すると計算されているが、パラメータ解析を用いてより具体的な設定の下での推定も可能である。図 TS.3.5 は、入力パラメータの範囲がある程度狭い場合の熱の均等化原価を示している。具体的には、この図では、コストが 1,100~1,200US ドル/kWh (2005 年) で変換効率が約 40%の太陽熱温水 (SWH) システムの場合、熱の均等化原価は、中欧や南欧のような地域では 30 強~50 弱 US ドル/GJ (2005 年)、太陽放射がより少ない地域では最大約 90US ドル/GJ (2005 年) になると予想されている。当然のことながら、図 TS.3.5 で示す、熱の均等化原価の推定値は、投資コスト及び設備利用率を含むパラメータのすべてに対して、非常に影響を受けやすくなっている [3.8.2, Annex II, Annex III]。

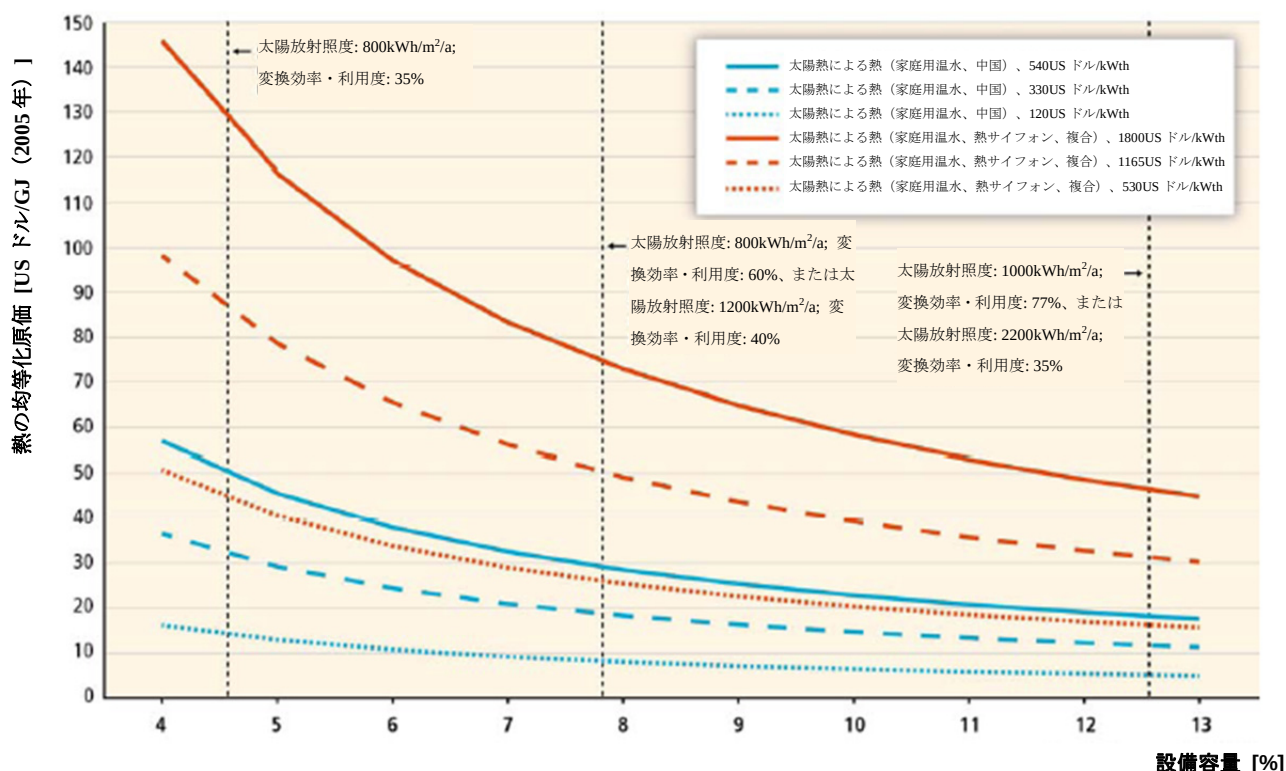


図 TS.3.5: 設備利用率の関数としての投資コストに対する熱の均等化原価の感度（割引率は 7%、年間運用・保守コストはそれぞれ 5.6US ドル/kW（2005 年）及び 14/kW、中国の家庭用温水（DHW）システムと OECD 諸国の様々なタイプのシステムのそれぞれの寿命設定は 12.5 年及び 20 年と想定されている） [図 3.16]。

過去 10 年間にわたってヨーロッパでは、太陽熱温水器の設備容量が 50%増加すると、投資コストは 20%下落している。IEA によると、OECD 諸国では、より安価な材料の使用、製造プロセスの改善、大量生産を行い、また集光器を多機能な建築部材かつモジュール方式の簡易設置システムとして建築物に直接的に組み込むことで、コストを削減出来るとしている。IEA は、OECD 諸国で投入されるエネルギーコストは最終的には 70～75%程度下落すると予想している [3.8.2]。

太陽光発電 (PV) : 太陽光発電 (PV) 価格は過去 30 年間で 10 分の 1 以下に下がったが、一般的に現在の太陽光発電 (PV) の均等化発電原価 (LCOE) はまだ電力の卸売市場価格よりも高い。用途によっては、太陽光発電 (PV) システムはすでに他の地域的な代替オプションよりも高い競争力を持っている（開発途上国の特定のへき地における電力供給の場合など） [3.8.3, 8.2.5, 9.3.2]。

太陽光発電 (PV) の均等化発電原価は、個別のシステム要素のコストに大きく依存しており、太陽光発電 (PV) モジュールがコストのうち最も大きい割合を占めている。均等化発電原価には、バランス・オブ・システム要素、設置のための人件費、運転保守 (O&M) コスト、場所・設備利用率、及び適用割引率も含まれる [3.8.3]。

太陽光発電 (PV) モジュールの価格は、1980 年の 22US ドル/W（2005 年）から 2010 年には 1.50US ドル/W（2005 年）以下まで下がった¹²。対応する過去の学習率は、11～26%となっており、平均学習率は 20%である。モジュール、バランス・オブ・システム、設置コストを含むシステム全体の価格も着実に下がってきており、2009 年までにいくつかの薄膜技術で 2.72US ドル/W (2005 年) まで落ちている [3.8.3]。

太陽光発電 (PV) の LCOE は初期投資のみに依存するだけでなく、システム要素の運用コストと寿命、地域的な太陽放射の水準、及びシステム・パフォーマンスも織り込まれている。Annex II で概説している標準化された方法、及び Annex III で要約しているコストとパフォーマンスのデータに基づき、異なる

¹² (訳注) 2005 年為替換算率

る種類の太陽光発電 (PV) システムの最近の均等化発電原価が計算されている。これによると、膨大かつ様々な入力パラメータに依存しており、最低値 0.074US ドル/kWh (2005 年) から最大値 0.92US ドル/kWh (2005 年) の間で大きな差があることを示している。ヨーロッパ及びアメリカの太陽放射の高い地域における発電所規模の太陽光発電 (PV) の 2009 年の均等化発電原価は、7%の割引率で約 0.15~0.4US ドル/kWh (2005 年) となっているが、これは利用可能な資源及びその他の枠組みの条件に依存して上下する可能性がある。図 TS.3.6 は、システム、投資コスト、割引率、及び設備利用率の種類による様々な太陽光発電 (PV) の均等化発電原価を示している [1.3.2, 3.8.3, 10.5.1, Annex II, Annex III]。

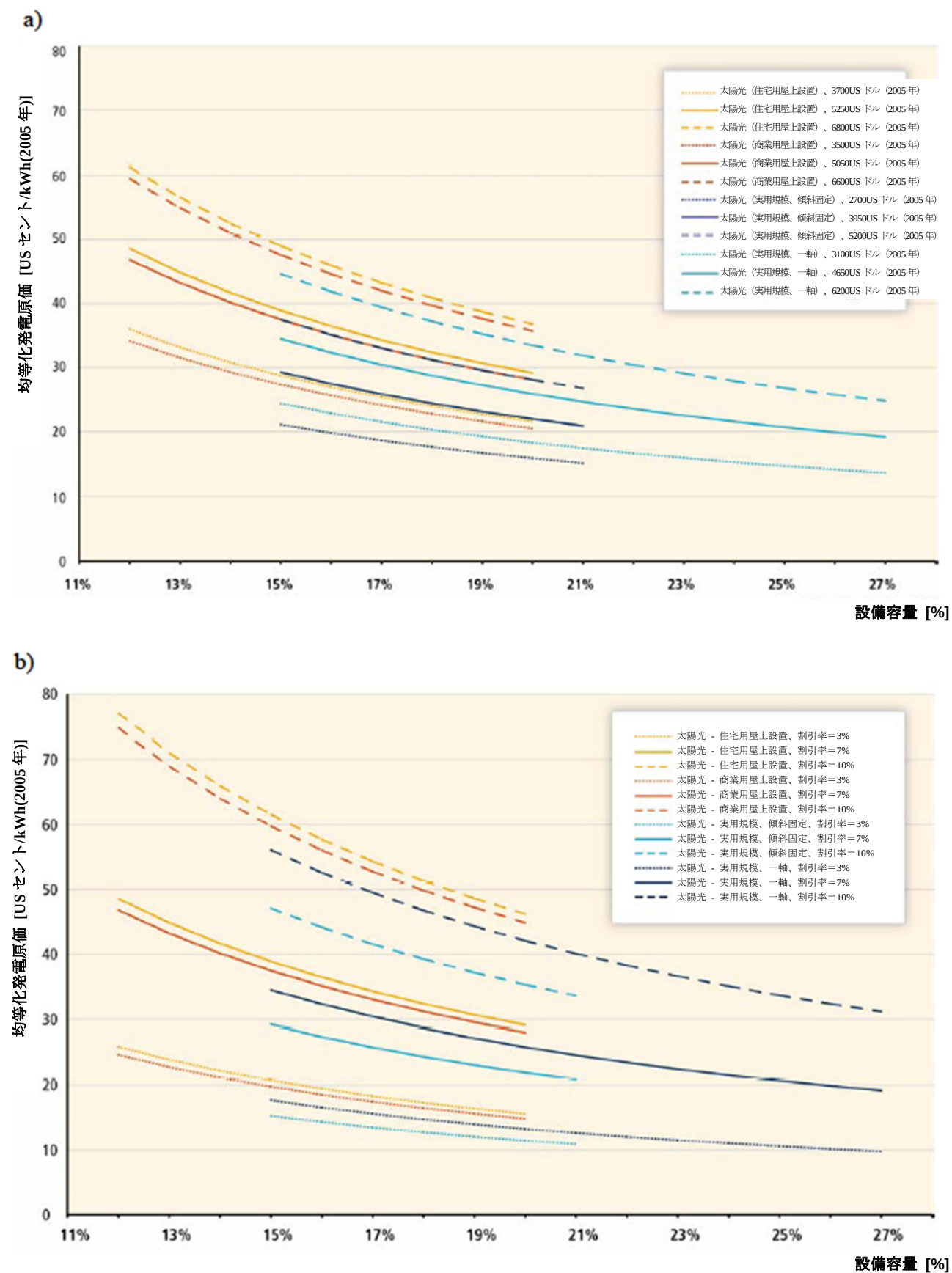


図 TS.3.6: (a) 設備利用率と投資コストの関数(※、※※※)としての、また b) 設備利用率と割引率の関数(※※、※※※)としての太陽光発電 (PV) の均等化発電原価 (2008～2009 年) [図 3.19]

注:

※割引率は 7%と仮定。

※※投資コストは、住宅用屋上設置システムの場合は 5,500US ドル/kW、商業用屋上設置システムの場合は 5,150US ドル、発電所規模の傾斜固定プロジェクトの場合は 3,650US ドル/kW、発電所規模の一軸プロジェクトの場合は 4,050US ドル/kW と仮定。

※※年間運用・保守コストは、寿命を 25 年間として、41~64US ドル/kW と仮定。

IEA は、発電コストまたは均等化発電原価は 2020 年には以下の数値に達すると予測している；2,000kWh/kW（設備利用率 22.8%相当）の好ましい条件下と 1,000kWh/kW の好ましくない条件下（設備利用率 11.4%相当）の間で、住宅の場合 14.5~28.6US セント/kWh（2005 年）、公益事業部門の場合 9.5~19US セント/kWh（2005 年）。米国エネルギー省の目標はさらに意欲的で、エンド・ユーザにもよるが、2015 年までに 5~10US セント/kWh（2005 年）の均等化発電原価目標を達成するとしている [3.8.3]。

集光型太陽熱発電：集光型太陽熱発電（CSP）システムは、複雑な資源・財政環境において運用される複雑な技術であり、多くの要素が均等化発電原価に影響している。公表されている集光型太陽熱発電所（CSP）の投資コストは、他の再生可能エネルギー源と比べて分かりにくいことが多い。何故ならば、様々なレベルの蓄熱との統合は投資を増加させる一方、他方では発電所の年間出力・設備利用率を向上させるためである。大規模な最先端のトラフ型発電所の場合、現在の投資コストは、人件費、土地代、技術、ビーム放射の量と分散、そして何より貯蔵量とソーラー・フィールドの大きさによって、3.82（蓄熱装置なし）~7.65（蓄熱装置あり）US ドル（2005 年）/W になると推定されている。特に蓄熱装置を備えた発電所の場合、2007 年以降の新しい発電所しか稼働していないため、近代的集光型太陽熱発電（CSP）のパフォーマンスのデータは限定的である。蓄熱装置がない初期の発電所の場合、設備利用率は最大 28%で、同じく蓄熱装置がない近代的発電所の場合は、設備利用率は約 20~30%と想定されている。一方、蓄熱装置のある発電所の場合、設備利用率は 30~75%に達する可能性がある。Annex II で概説している標準化された方法、及び Annex III で要約しているコストとパフォーマンスのデータに基づき、膨大かつ様々な入力パラメータに基づく、2009 年における 6 時間の蓄熱機能を持つ太陽熱トラフ型発電所の均等化発電原価は 10US セント/kWh（2005 年）強~約 30US セント/kWh（2005 年）の幅で変動すると算出されている。割引率の幅を 10%に限定すると、幅はある程度狭まり、文献で見られる 18~27US セント/kWh（2005 年）におおよそ一致する約 20~30US セント/kWh（2005 年）となる。適用割引率及び設備利用率を含む特定のコストとパフォーマンスのパラメータは、特定の均等化発電原価の推定値に影響するが、システム構成が異なっても本来同一のシステムの均等化発電原価はわずかに異なるだけである [3.8.4]。

集光型太陽熱発電（CSP）の学習率は、パワーブロックを除くと、 $10\pm5\%$ であると推定されている。具体的なアメリカの均等化発電原価目標は、2015 年までに 6 時間の貯蔵機能で 6~8US セント/kWh（2005 年）、2020 年までに 12~17 時間の貯蔵機能で 50~60US セント/kWh（2005 年）である。EU も同様の目標を目指している [3.8.4]。

3.9 普及のポテンシャル

3.9.1 短期的（2020 年）予想

表 TS.3.1 は、文献から得た 2020 年までの潜在的な普及に関する利用可能な研究の結果を要約したものである。表のデータの出典は、欧州再生エネルギー評議会 (EREC) - グリーンピース (Energy [r] evolution, reference and advanced scenarios)、及び IEA (CSP and PV Technology Roadmaps) である。太陽熱の項目に関しては、パッシブ・ソーラーの寄与はこれらのデータに含まれていない。この技術はエネルギー需要を減少させるものの、エネルギー統計に考慮されるサプライチェーンには含まれていない [3.9]。

表 TS.3.1: 累積太陽エネルギー容量の進化 [表 3.7]

		低温太陽エネルギー暖房 (GW _{th})			太陽光発電 (PV) による電力 (GW)			集光型太陽熱発電 (CSP) による電力 (GW)		
年		2009	2015	2020	2009	2015	2020	2009	2015	2020
普及シナリオ	現在の累積設備容量	180			22			0.7		
	欧州再生エネルギー評議会 - グリーンピース (reference scenario)		180	230		44	80		5	12
	欧州再生エネルギー評議会 - グリーンピース ([r] evolution scenario)		715	1,875		98	335		25	105
	欧州再生エネルギー評議会 - グリーンピース (advanced scenario)		780	2,210		108	439		30	225
	IEA Roadmaps		該当なし			95 ¹	210		該当なし	148

注: ¹2010~2020 年の平均成長率からの推定

3.9.2 二酸化炭素排出抑制からみた長期的な普及

図 TS.3.7 は、第 10 章で説明する 150 以上の長期的モデルシナリオの結果を示している。普及ポテンシャルのシナリオは、2050 年において直接的太陽エネルギーの果たす役割はほんのわずかであるというものから、主要なエネルギー供給源になるというものまで、様々である。現在、直接的太陽エネルギーは世界のエネルギー供給のわずかな割合しか占めていないが、このエネルギー源の潜在的将来性は最も大きなものの 1 つであることは明らかである。

直接的太陽エネルギーの商業性を高め、世界のエネルギー市場においてより大きな割合を獲得する上で、コスト削減は重要な課題である。これを達成するためには、主に市場規模に依存する学習曲線に沿って動く太陽光技術のコストを削減することが必須である。加えて、学習曲線の傾斜が早く平坦にならないようにするためには、継続的な研究開発の取り組みも必要である。現在存在する主な普及シナリオは単一の技術のみを考慮しているため、太陽エネルギー普及の実際のコストはまだ不明である。これらのシナリオでは、様々な再生可能エネルギー源及びエネルギーの効率向上技術を通じた再生可能・持続可能エネルギー供給の相乗効果は考慮されていない。

普及のポテンシャルは、それぞれの技術の実際の資源・利用可能性に依存している。しかし相当の程度までは、法規制の枠組みを置くことで、直接的太陽エネルギー利用の理解を促進することも、阻害することも出来る。建築物の向きや断熱に関する建築の最低基準を設けることで建築物のエネルギー需要を大幅に減らし、全体的な需要を増やすことなく再生可能エネルギー供給の割合を増加させることが出来る。透明性がある効率化された行政手続きによって、既存の送電網インフラへ太陽エネルギー源を組み込み、接続すれば、直接的太陽エネルギーに関係するコストをさらに下げることが出来る。

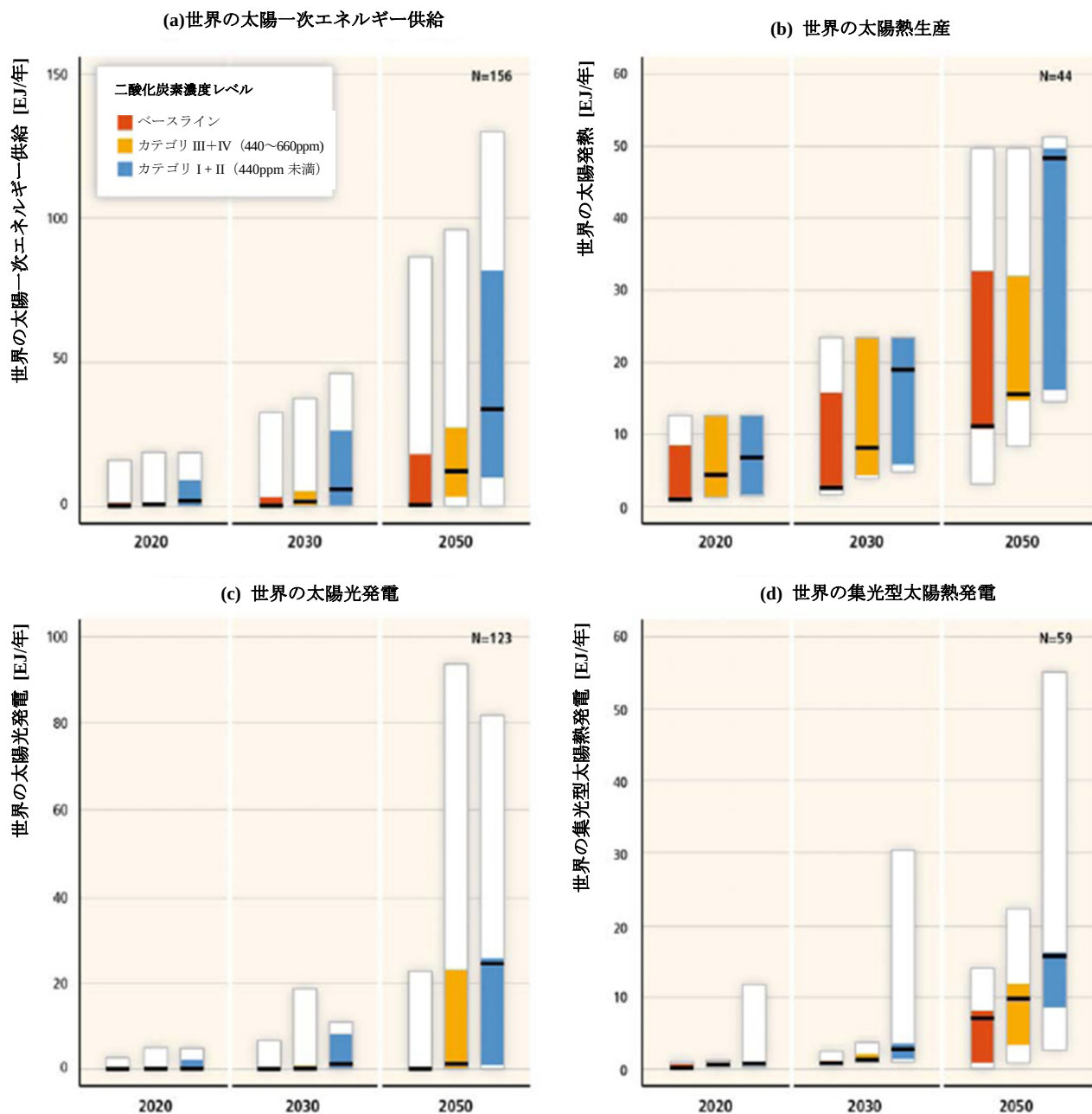


図 TS.3.7: 長期的シナリオにおける世界の太陽エネルギーの供給と生産（中央値、25～75 パーセントイルの範囲、及びシナリオの結果の全範囲。色分けは 2100 年の大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく。数値の基礎となるシナリオの具体的な数を右上の角に示す）。（a）世界の太陽一次エネルギー供給、（b）世界の太陽熱生産、（c）世界の太陽光発電（PV）、及び（d）世界の集光型太陽熱発電（CSP） [図 3.22]

第4章：地熱エネルギー

4.1 はじめに

地熱資源は、岩石と閉じ込められている蒸気や液体の水に貯蔵されている地球内部からの熱エネルギーからなる。そして、地熱発電所における電気エネルギーの生成や、家庭・農工業用途での熱を必要とする材器に加え、CHP 材器に利用されている。なお、気候変動は、地熱エネルギーの効用に重大な影響を与えることはない [4.1]。

活動中の貯留層から採取される熱は、周囲の温度が高い部分からの自然の熱産生・伝導・対流によって継続的に回復し、抽出された地熱流体は自然に再充填され、かつ冷却された流体の再注入によっても再充填されるため、地熱エネルギーは再生可能な資源であるといえる [4.1]。

4.2 資源ポテンシャル

地球の高温岩体に貯蔵された接近可能な熱は、10km の深度までで $110\sim 403\times 10^6\text{EJ}$ 、5km の深度までで $56\sim 140\times 10^6\text{EJ}$ 、3km の深度までで約 $34\times 10^6\text{EJ}$ と推定されている。熱水資源の過去の推定値や深度ごとの貯蔵された熱の推定値、及び涵養（または造成）地熱システムの場合の計算では、発電向けの地熱の技術的ポテンシャルの幅は $118\sim 146\text{EJ/年}$ （深度 3km）から $318\sim 1,109\text{EJ/年}$ （深度 10km）、直接利用の場合は $10\sim 312\text{EJ/年}$ となっている（図 TS.4.1） [4.2.1]。

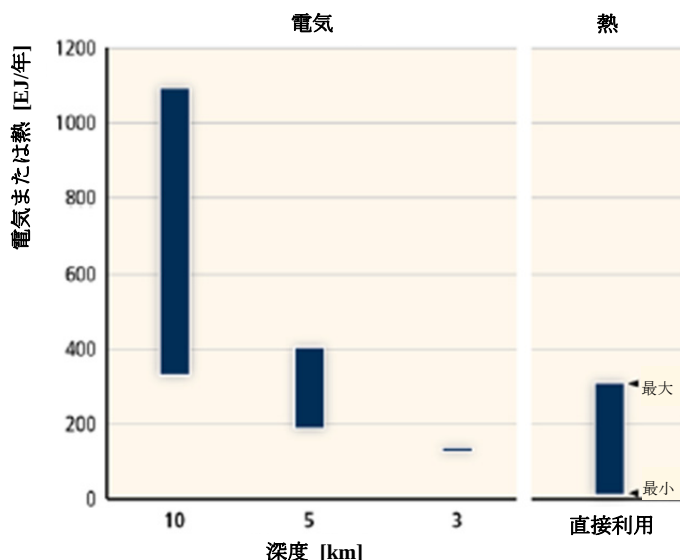


図 TS.4.1: 発電及び直接利用（熱）についての地熱の技術的ポテンシャル。直接利用の場合、一般的に深度約 3km 以上での開発は行わない [図 4.2]。

技術的ポテンシャルは、表 TS.4.1 に地域毎で示した。地域の内訳は、電力研究所の各国の理論上の地熱ポテンシャルの推定に使用している方法に基づいており、国が地域ごとにグループ化されている。そのため、世界の技術的ポテンシャルの現在の区分は、平均地温勾配の地域格差及び放熱異常域または火山活動やプレート境界に伴う高温領域の存在の原因となる要素に基づいている。電気・熱（直接利用）ポテンシャルへの分離はいくらか恣意的になっており、ほとんどの高温資源が熱電供給用途で地域的な市場条件によって電気・熱のどちらかまたは両方に使用出来る [4.2.2]。

表 TS.4.1: IEA 地域区分ごとの大陸における地熱の技術的ポテンシャル [表 4.3]

地域※	以下の深度における電力向けの技術的ポテンシャル（EJ/年）						直接利用向けの技術的ポテンシャル （EJ/年）	
	3 km		5 km		10 km			
	上限	下限	上限	下限	上限	下限	上限	下限
OECD 北アメリカ	25.6	31.8	38.0	91.9	69.3	241.9	2.1	68.1
ラテンアメリカ	15.5	19.3	23.0	55.7	42.0	146.5	1.3	41.3
OECD ヨーロッパ	6.0	7.5	8.9	21.6	16.3	56.8	0.5	16.0
アフリカ	16.8	20.8	24.8	60.0	45.3	158.0	1.4	44.5
移行経済	19.5	24.3	29.0	70.0	52.8	184.4	1.6	51.9
中東	3.7	4.6	5.5	13.4	10.1	35.2	0.3	9.9
アジアの開発途上国	22.9	28.5	34.2	82.4	62.1	216.9	1.8	61.0
OECD 太平洋	7.3	9.1	10.8	26.2	19.7	68.9	0.6	19.4
合計	117.5	145.9	174.3	421.0	317.5	1,108.6	9.5	312.2

※地域の定義及び国の分類については、Annex II を参照のこと。

この技術的ポテンシャルに到達するまで熱が抽出されたとしても、長期にわたって完全にまたは部分的に平均フラックス 65mW/m^2 の 315EJ/年 の大陸地殻熱流量によって再補充される [4.2.1]。

4.3 技術及び用途

現在、地熱エネルギーは、(a) 自然に高い浸透率を持つ熱水貯留層または (b) 人工流体経路をもつ涵養地熱システム (EGS) (図 TS.4.2) から、高温流体を生産する井戸及びその他の手段を使用して抽出されている。熱水貯留層からの発電の技術は成熟度及び信頼性が高く、約 100 年間稼働している。直接暖房やその他の用途向けの地中熱利用ヒートポンプシステム (GHP) を用いた直接利用の技術も成熟度が高い。涵養地熱システムの技術は、実証段階にある [4.3]。

地熱エネルギーからの電力は特にベースロード電力の供給に適しているが、意図的に操作し、ピーク電力量を満たすために使用することも出来る。そのため、地熱電力は様々な発電を補完することが出来る [4.3]。

地熱資源は地下にあるため、その発見及び評価のための探査方法（地質学的・地球化学的・地球物理学的調査など）が開発されてきた。地熱探査の目的は、掘削に先立って見込みのある地熱貯留層を確認及び順位付けすることである。現在、地熱井は、石油・ガス貯留層へのアクセスと同様の従来型のロータリー掘削で最大 5km の深度まで掘削されている。先進掘削技術によって、高温での動作が可能になり、傾斜掘削の技能も提供されている [4.3.1]。

現在使用されている地熱プラントの基本的な種類は、蒸気復水タービンとバイナリーサイクルのユニットである。復水発電所は、フラッシュ型または乾燥式蒸気型（後者は熱水分離を必要としないため、より簡易かつ安価な発電所となる）であり、バイナリーユニットよりも一般的である。これは中温・高温資源（150 度以上）に導入され、容量は 20～110MW_e であることが多い。バイナリーサイクル発電所においては、地熱流体は、沸点の低い作動流体が熱交換器を加熱されながら通り、これが蒸発してタービンを駆動させる。それによって、低温熱水貯留層及び涵養地熱システムの貯留層（一般的に 70～170℃）の使用が可能になり、容量が数 MW の連結されたモジュラ・ユニットとして構築されることが多い。複合・ハイブリッド発電所は、汎用性の向上、全体熱効率の増加、負荷追従能力の改善、及び広範な資源温度範囲の効率的なカバーのため、上述の基本的な種類のうち 2 つ以上から構成されている。最終的に、熱供給設備または熱電供給の設備は、直接利用向けの電力と温水両方を生産する [4.3.3]。

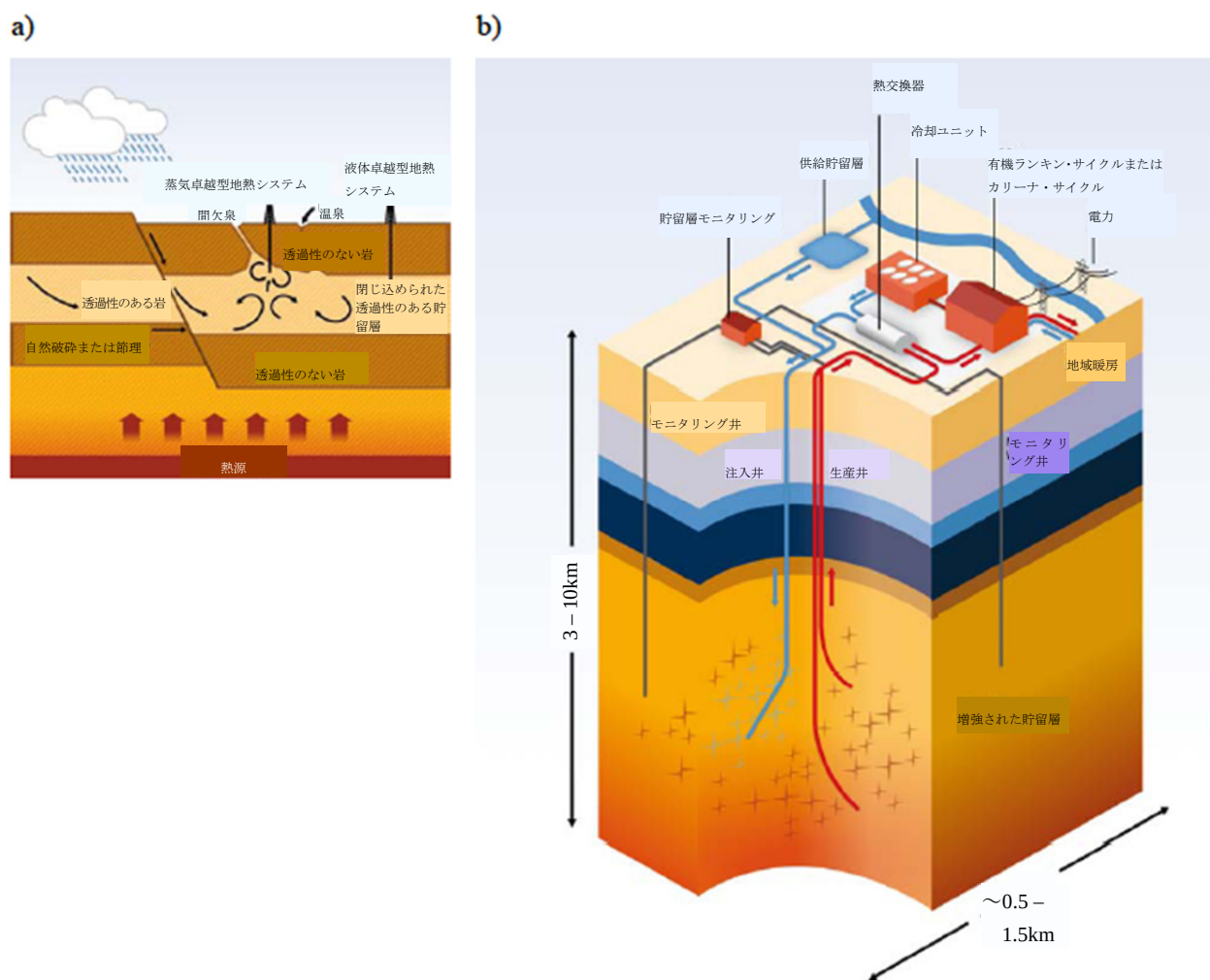


図 TS.4.2: a) 対流（熱水）資源及び b) 伝導（涵養地熱システム）資源（右）を示すスキーム [図 4.1]

涵養地熱システムの貯留層は、効果的に利用するために十分温度が高い地下領域の刺激を必要とする。ネットワーク状の亀裂で構成される貯留層は、注入井と生産井の間の流体経路を上手く繋げるために造成または増強される。熱は、閉じたループで貯留層を循環する水によって抽出され、発電、また産業用、住宅用暖房に使用することが出来る（図 TS.4.2 を参照） [4.3.4]。

直接利用によって、地域暖房、養魚池、温室、入浴、健康・水泳プール、浄水・脱塩、及び農産物・鉱物乾燥用の産業用・プロセス熱を含む建築物向けの暖房及び冷房が提供される。地中熱利用ヒートポンプシステムが地熱エネルギーの「本来の」用途かどうかは議論の余地があるが、それは世界のほぼどの地域においても暖房及び冷房に利用でき、4～30℃の比較的一定の地表・地下水温度を利用することが出来る [4.3.5]。

4.4 市場及び産業開発の世界的・地域的状況

約 1 世紀の間、地熱資源は発電に使用されてきた。2009 年の世界の地熱電力市場には様々な参入者がおり、設備容量は 10.7GW_e となっている。2008 年には 24 ヶ国で 67TWh_e (0.24EJ) 以上の電力が生産されており（図 TS.4.3）、そのうち 6 ヶ国において総電力需要の 10%以上を供給している。また、78 ヶ国で稼働中の直接地熱利用は 50.6GW_{th} であり、これにより 2008 年には 121.7TWh_{th} (0.44EJ) の熱が生産されている。地中熱利用ヒートポンプシステムは、直接利用のこの設備容量の 70% (35.2GW_{th}) を供給している [4.4.1, 4.4.3]。

過去 5 年間（2005～2010 年）における地熱電力の設備容量の世界の平均年間成長率は 3.7%で、過去 40 年間（1970～2010 年）では 7.0%である。地熱の直接利用の平均年間成長率は 12.7%（2005～2010 年）、11%（1975～2010 年）である [4.4.1]。

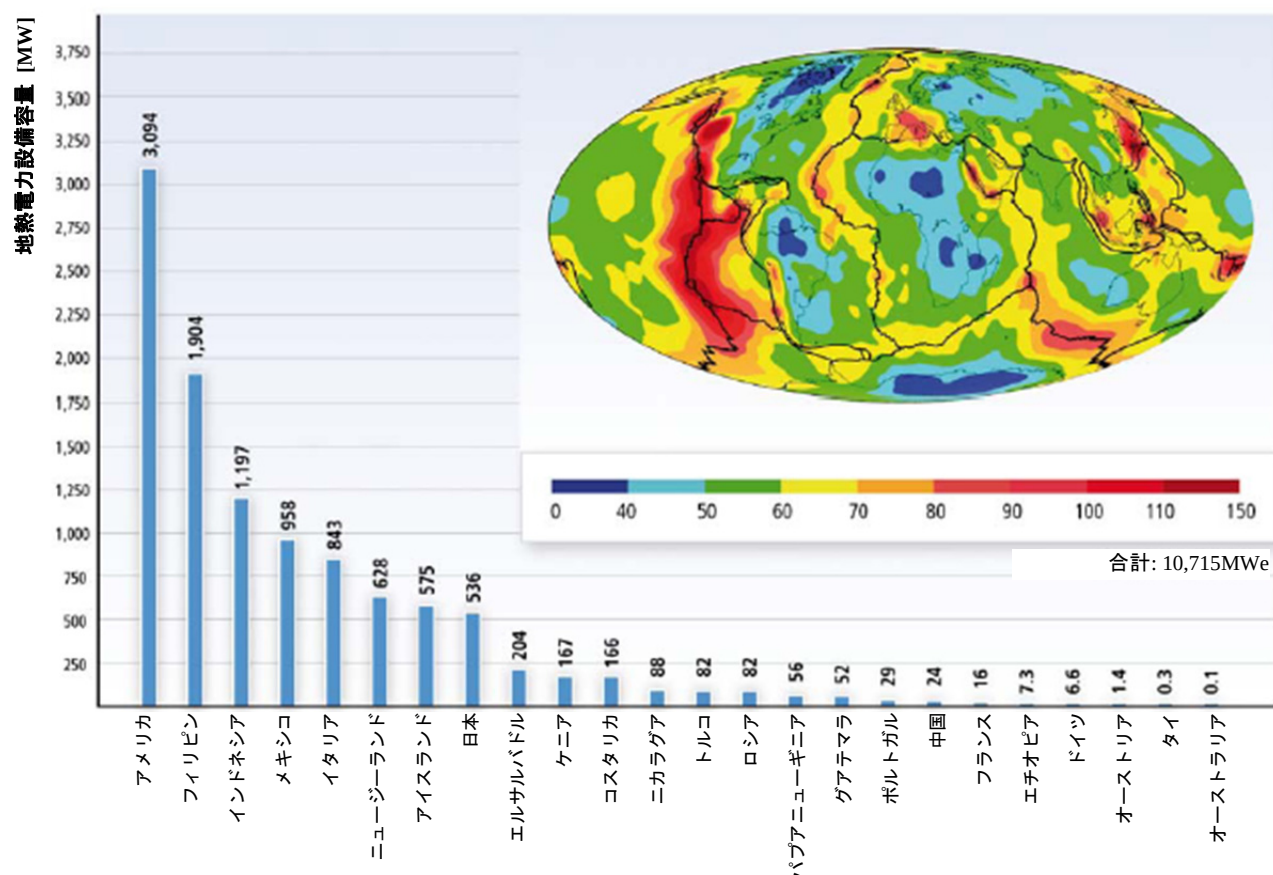


図 TS.4.3: 2009 年における国ごとの地熱電力設備容量。図は、 mW/m^2 で示した世界の平均熱流量及び構造プレート境界を示している。[図 4.5]。

涵養地熱システムはまだ実証段階であり、フランスで 1 つの小型発電所が稼働中で、ドイツで 1 つの試験計画がある。オーストラリアでは近年、涵養地熱システムの探査及び開発に膨大な投資がなされており、アメリカは最近、再開された国家地熱プログラムの一部として涵養地熱システムの研究、開発、及び実証の支援を増やしている [4.4.2]。

2009 年の年間エネルギー使用における直接地熱利用の主なタイプ（及び相対的割合）は、建築物の暖房（63%）、入浴と温泉療法（25%）、園芸（温室と土壌加熱）（5%）、産業用プロセス熱と農業乾燥（3%）、水産養殖（養魚）（3%）、及び融雪（1%）であった [4.4.3]。

地熱が気候変動緩和においてその働きを最大限にするためには、技術的・非技術的障壁を克服することが必要である。地熱技術に特有の政策措置によって、この障壁の克服を支援することが出来る [4.4.4]。

4.5 環境及び社会的影響

地熱に関する環境及び社会への影響は存在するが、多くの場合、それは場所及び技術に特有なものである。通常、この影響は管理可能であり、環境への悪影響は小さい。地熱運用からの主な温室効果ガス排出は二酸化炭素であるが（燃焼によって発生するわけではない）、自然発生源から放出されたものである。2001 年に稼働中であった地熱発電所の現地調査によると、技術設計及び地下貯留層における地熱流体の構成によって、二酸化炭素の直接排出率が $4 \sim 740 \text{g/kWh}_e$ の範囲で広範囲に広がっていることがわかった。涵養地熱システム発電所は直接排出量がゼロの液相閉ループ循環システムとして設計される場合が多いため、直接利用用途の直接二酸化炭素排出量はライフサイクル評価によると地熱発電所の場合は二酸化炭素換算排出量が 50g/kWh_e 以下、予測の涵養地熱システムの予測の場合は 80g/kWh_e 以下、地域暖房システム及び地中熱利用ヒートポンプシステムの場合は $14 \sim 202 \text{g/kWh}_{th}$ であると予想されている [4.5, 4.5.1, 4.5.2]。

地熱プロジェクトに伴う環境への影響は、ほとんどのエネルギー・プロジェクトに共通する建設・稼働

フェーズにおける地域の大気・土地・水利用への様々な影響に加え、地熱エネルギーに特有のものも考慮する必要がある。地熱システムは、自然現象を伴い、一般的に地表からの蒸気と混合されたガス及び温泉からの水に溶けた形での鉱物を排出する。ガスの中には危険なものが含まれる場合があるが、それは一般的に生産中に処理または監視される。過去には、分離水の地表廃棄は一般的であったが、現在では例外的な状況でしか行われなない。一般的に、地熱塩水は貯留層に注入され、貯留層圧力を維持し、環境への悪影響を避けている。天然の温泉の流量を大幅に超過している場合、またそれほど希薄化されない場合、地表廃棄は、河川、湖、海洋環境の生態環境に悪影響を与える可能性がある[4.5.3.1]。

微小地震、熱水蒸気噴出、及び地盤沈下などの自然現象から生じる地域的な危険性は、地熱地帯の運用の影響を受ける可能性がある。100年間に及ぶ開発期間において、地熱の運用や地域コミュニティの中にある建築物あるいは構築物が、地熱生産または注入活動による浅発地震によって重大な損傷を受けたことはない。涵養地熱システム実証プロジェクトは、特にヨーロッパの人口集中地域において社会的に反対されることがあった。高温岩体への冷水高压注入プロセスによって、微小地震事象は発生する。誘発地震事象が人間の負傷または重大な物的損害につながるほど大規模であったことはないが、この問題の適切な管理は、将来の涵養地熱システムプロジェクトの大幅な拡大を助ける重要なステップである[4.5.3.2]。

土地利用の要件は、 $160\sim 290\text{m}^2/\text{GWh}_e/\text{年}$ （井戸なし）から最大 $900\text{m}^2/\text{GWh}_e/\text{年}$ （井戸あり）までの幅がある。土地利用に対する具体的な地熱の影響には、湧水、間欠泉、噴気孔などの顕著な地表徴候への影響が含まれる。様々な環境における土地利用の問題（日本、アメリカ、ニュージーランドなど）は、地熱開発のさらなる拡大に対し大きな障害となる可能性がある [4.5.3.3]。

地熱資源はまた、他のエネルギー利用の置き換えに比べて、大きな環境的利点もある [4.5.1]。

4.6 技術の改善、イノベーション及び統合の展望

地熱資源は、大陸規模の大規模連系送電系統から、小さい孤立した村や独立した建築物でのオンサイト利用まで、あらゆる種類の電力供給システムに統合することが可能である。地熱は一般的にベースロード発電を提供するため、既存の電力システムへの新しい発電所の統合はそれほど難しくない。地熱の直接利用の場合は、統合問題は全く見られず、冷暖房については、地中熱利用ヒートポンプシステムを含む地熱が、国内のコミュニティ及び地域規模では、すでに広範囲に普及している。本要約の 8 章では、統合の問題についてより深く掘り下げている [4.6]。

技術的な改善及びイノベーションの幾つかの見込みは、地熱エネルギー生産コストの削減、高度なエネルギーの回収、フィールドの寿命延長、及び信頼性を向上させることにつながる。先進的な地球物理学的調査、注入最適化、スケール・浸食防止、及びより質の高い貯留層シミュレーション・モデリングは、持続可能な発電容量に設備容量を合致させ、資源リスクの削減を助ける [4.6]。

探査においては、伏在性の地熱システム（地表に現れていないものなど）の発見や涵養地熱システムの見通しのための研究開発が必要である。衛星・空中のハイパースペクトル、熱赤外、高解像度パナクロ、及びレーダー・センサーなどの高速探査地熱ツールをより高度に、より広く利用することで、探査活動がより効果的になる [4.6.1]。

硬岩掘削時の貫通速度の向上、コスト削減及び地熱生産設備の耐用年数の増加を主な目的とするスリムホール技術の開発などについては、掘削及び井戸建築技術に関する特別な研究が必要となる [4.6.1]。

地熱発電所及び直接利用の個別のシステム要素の効率はまだ改善の余地があり、生産された地熱流体中のエネルギーをより効率的に利用する変換システムの開発が重要である。他の可能性としては、発電用地熱エネルギーを供給出来る可能性のある適切な石油・ガス井戸の利用がある [4.6.2]。

現在、涵養地熱システムプロジェクトは実証・実験フェーズにある。涵養地熱システムは、地震災害のリスクを減少させながらの持続的な商業生産率を得つつ、地熱流体と地熱貯留層岩石の科学的相互作用の信頼出来る予測を可能にする数値シミュレータ及び評価方法の改善、注入井と生産井の貯留層接続を水压で刺激する革新的な手法を必要とする。地熱貯留の層における作動流体としての二酸化炭素利用の

可能性（特に涵養地熱システムにおける利用）も調査中である。何故ならば、それは、炭素を排出しない再生可能資源を用いた発電だけに留まらず、二酸化炭素排出量を低下させながら地熱エネルギー普及の効果を増強する手段になり得るためである [4.6.3]。

現在、海底の地熱資源を開発する技術は使用されていないが、理論的には熱水孔から直接的に電気エネルギーを生産することが可能である [4.6.4]。

4.7 コストの傾向

一般的に、井戸の掘削及び発電所建設の必要があるため、地熱プロジェクトは先行投資コストが高いが、運転コストが比較的低くなる。コストはプロジェクトによって異なるが、熱水資源を用いた発電所の均等化発電原価は現在の電力市場においては競争力が高い場合が多い。地熱の直接利用に関しても同じことが言える。涵養地熱システム発電所はまだ実証段階ではあるが、涵養地熱システムのコストの推定値は熱水貯留層よりも高くなっている [4.7]。

一般的に、井戸の掘削及び発電所建設の必要があるため、地熱プロジェクトは先行投資コストが高いが、運転コストが比較的低くなる。現在の投資コストは、世界規模で 1,800～5,200US ドル/kWe（2005 年）の間で変動している [4.7.1]。

井戸の補繕（生産または注入容量の低下の復旧、故障した井戸の置き換える）を含む地熱電力の運用・保守コストは、152～187US ドル/kW_e/年（2005 年）になると計算されているが、国によっては大幅に低くなる可能性がある（ニュージーランドでは 83～117US ドル/kW_e/年（2005 年）） [4.7.2]。

発電所の寿命及び設備容量も重要な経済パラメータである。世界の既存地熱発電所における 2008 年の設備容量平均は 74.5%であり、新たな設置は 90%を超えている [4.7.3]。

Annex II で概説している標準化された方法、及び Annex III で要約しているコスト・成果データに基づき、膨大かつ様々な入力パラメータによって算出された熱水地熱プロジェクトの均等化発電原価は、技術の種類及びプロジェクト固有の条件によって、3.1～17US セント/kWh（2005 年）になるとされている。パラメータの幅を狭めると、図 TS.4.4 が示すように、7%の割引率で、最近設置された未開発地域熱水プロジェクトに関して世界の平均設備利用率が 74.5%とすれば（及び [4.7.4] で指定されるその他の状況下で）、均等化発電原価は復水フラッシュ発電所では 4.9～7.2US セント/kWh（2005 年）、バイナリーサイクル発電所では 5.3～9.2US セント/kWh（2005 年）となっている。均等化発電原価は、設備利用率、投資コスト、及び割引率によって大きく異なることが示されている。涵養地熱システムに関しては均等化発電原価データが存在していないが、様々な温度及び深度のいくつかのケースに異なるモデルを使用して予測が行われてきた（比較的良質な涵養地熱システム資源の場合 10～17.5US セント/kWh（2005 年）など） [1.3.2, 4.7.4, 10.5.1, Annex II, Annex III]。

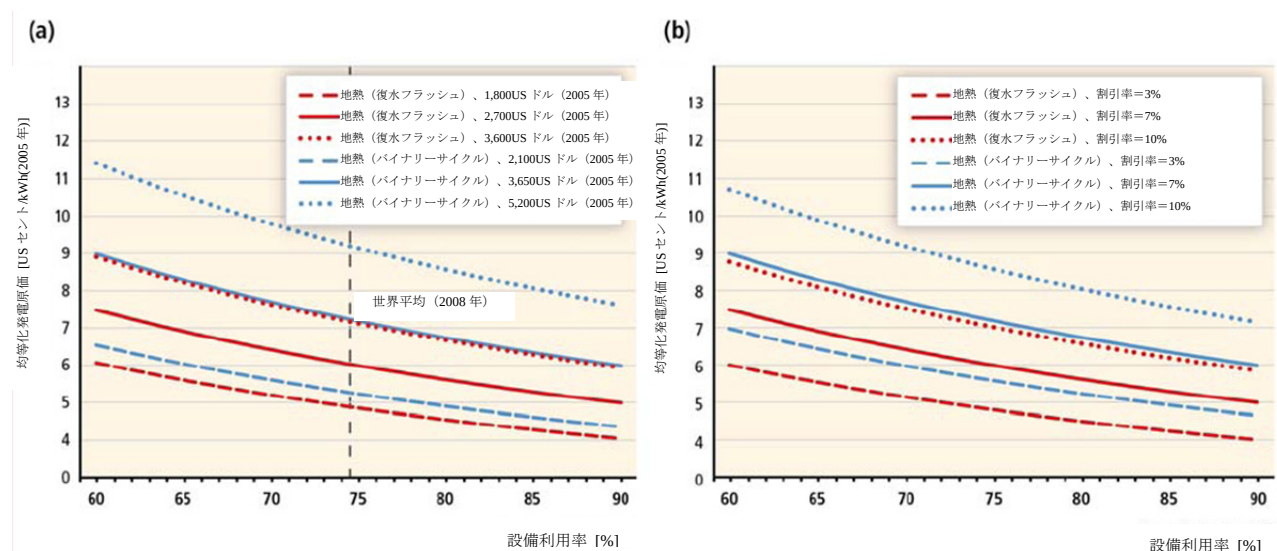


図 TS.4.4: (a)設備利用率とコストの関数(※、※※※)としての、また(b)設備利用率と割引率の関数(※※、※※※)としての 2008 年の均等化地熱電力原価: [図 4.8]

注:

※割引率は 7%と想定

※※投資コストは、復水フラッシュ発電所の場合は US ドル 2,700/kW、バイナリーサイクル発電所の場合は 3,650US ドル/kW と想定

※※※年間運用・保守コストは 170US ドル/kW、寿命を 27.5 年間として想定

発表されている学習曲線に関する研究は限られているため、設計変更及び技術の進歩からの可能性のあるコスト削減の推定値は、地熱プロセスのバリュー・チェーンの専門知識のみに依存している。地熱貯留層の設計と刺激の工学的手法による改善、及び材料、運用・保守の改善は、短期的な均等化発電原価に対して最も大きく影響し、設備利用率の上昇と、全体投資コストに占める掘削コストの割合低下などにつながる。2020 年の未開発地域プロジェクトの場合、世界平均の均等化発電原価の予測によると、世界の平均設備利用率を 80%、寿命を 27.5 年、割引率を 7%とすると、復水フラッシュ発電所では 4.5～6.6 US セント/kW (2005 年)、二量体サイクル発電所では 4.9～8.6US セント/kW (2005 年) になると予想されている。そのため、2020 年までに地熱フラッシュ・バイナリー発電所では世界平均で約 7%の均等化発電原価の削減が予想されている。そして、涵養地熱システムの将来的なコストも、より低い水準に下がると予想されている [4.7.5]。

直接利用プロジェクトの熱の均等化原価は、特定の利用、温度、必要な流速、関連する運転保守、人件費、及び製造された製品の出力により、ばらつきが大きくなる。また、新規建設のコストは、通常、古い建築物を改修するコストよりも低くなる。図 TS.4.2 に示されたコストの額は、アメリカまたはヨーロッパの北部に特有な気候に基づいている。アイスランド、スカンジナビア諸国、ロシアなどのより北部の気候になれば、暖房負荷は高くなる。ほとんどの数字は、アメリカにおけるコストに基づいているが、先進国では類似しており、発展途上国では低くなる [4.7.6]。

表 TS.4.2: いくつかの直接地熱利用における投資コスト及び計算された熱の均等化原価 (LCOH) [表 4.8]

熱利用	投資コスト (US ドル (2005 年) /kWth)	以下の割引率における熱の均等化原価 (US ドル/GJ (2005 年))		
		3%	7%	10%
暖房 (建築物)	1,600~3,940	20~50	24~65	28~77
暖房 (地域)	570~1,570	12~24	14~31	15~38
温室	500~1,000	7.7~13	8.6~14	9.3~16
蓋のない養殖池	50~100	8.5~11	8.6~12	8.6~12
GHP (住宅用及び商業用)	940~3,750	14~42	17~56	19~68

産業用途は、エネルギー要件及び生産する産物によって大きく異なるため、さらに定量化が難しい。通常、これらの施設はより高い温度を必要とし、発電所の利用と競合することが多い。しかし、これらは 0.40~0.70 の高い負荷率を持っており、それによって経済性が向上している。産業用途は、大規模な食品・材木・鉱物乾燥施設 (アメリカ及びニュージーランド) からパルプ・紙工場 (ニュージーランド) まで様々である [4.7.6]。

4.8 普及の可能性

地熱エネルギーは、短期的及び長期的炭素排出量の削減に寄与する。2008 年における世界の地熱エネルギー使用は、世界の一次エネルギー供給の約 0.1%しか占めていない。しかし、2050 年までには、地熱は世界の電力需要の約 3%、世界の冷暖房需要の 5%を満たすだろう [4.8]。

表 TS.4.3: 2015 年までの、地熱電力と直接利用 (熱) の地域的な設備容量の現在及び予想値、電力・熱の生産の予測値 [表 4.9]

地域*	現在の容量 (2010)		予想される容量 (2015)		予想される生産 (2015)	
	直接 (GW _{th})	電力 (GW _e)	直接 (GW _{th})	電力 (GW _e)	直接 (GW _{th})	電力 (GW _e)
OECD 北アメリカ	13.9	4.1	27.5	6.5	72.3	43.1
ラテンアメリカ	0.8	0.5	1.1	1.1	2.9	7.2
OECD ヨーロッパ	20.4	1.6	32.8	2.1	86.1	13.9
アフリカ	0.1	0.2	2.2	0.6	5.8	3.8
移行経済	1.1	0.1	1.6	0.2	4.3	1.3
中東	2.4	0	2.8	0	7.3	0
アジアの開発途上国	9.2	3.2	14.0	6.1	36.7	40.4
OECD 太平洋	2.8	1.2	3.3	1.8	8.7	11.9
合計	50.6	10.7	85.2	18.5	224.0	121.6

※地域の定義及び国の分類については、Annex II を参照のこと。

注: 2010 年~2015 年の推測される平均年間成長率は、電力の場合は 11.5%、直接利用の場合は 11%である。2015 年までに仮定された世界の平均設備利用率は 75% (電力の場合)、30% (直接利用の場合) である。

世界中の建設中または計画中の地熱電力プロジェクトを考慮すると、地熱設備容量は 2015 年までに 18.5GW_eに達すると予想されている。実質的には、2015 年までに稼働することが予想される新しい発電所はすべて、熱水資源を利用したフラッシュ復水・バイナリー型であり、涵養地熱システムプロジェクトの寄与は小さい。地熱直接利用 (地中熱利用ヒートポンプシステムを含む熱利用) は、同じ過去の年成長率 (1975~2010 年で 11%) で成長すると、85.2GW_{th}に達すると予想されている。2015 年までに、総発電量は 121.6TWh/年 (0.44EJ/年)、熱の直接生産は 224TWh_{th}/年 (0.8EJ/年) に達する可能性がある。この地域内訳は表 TS.4.3 に示されている [4.8.1]。

数値モデルをベースにするシナリオの包括的評価に基づく地熱エネルギーの長期的な普及の可能性は本要約の 10 章で述べられており、広範囲に及んでいる。AR4 のベースライン (600ppm CO₂ 超)、440~600ppm (カテゴリ III・IV)、及び 440ppm 未満 (カテゴリ I・II) に基づく 3 つの温室効果ガス濃度安定化範囲のシナリオ中央値は、2020 年で 0.39~0.71EJ/年、2030 年で 0.22~1.28EJ/年、2050 年で 1.16

～3.85EJ/年となっている。

炭素関連政策は、将来的な地熱開発を推し進める主な要因の1つである可能性が高い。好ましい温室効果ガス濃度安定化政策（440ppm 未満）では、2020 年、2030 年、及び 2050 年までの地熱開発は上述の中央値よりも大幅に高くなる可能性がある。2015 年の推定値から予測した地熱発電所及び直接利用の過去の平均年間成長率（それぞれ 7%と 11%）から予測すると、2020 年及び 2030 年における電力及び直接利用向けの地熱設備容量は表 TS.4.4 に示されている通りになる可能性がある。2050 年までに、地熱電力容量は 150GW_e（そのうち半分は涵養地熱システム施設で占められている）に達し、直接利用施設は 800GW_{th} 分追加されるだろう（図 TS.4.4） [4.8.2]。

表 TS.4.4: 2020 年から 2050 年にかけての電力及び直接利用に関する地熱の普及の可能性 [表 4.10]

年	使用	容量* (GW)	生産量 (TWh/年)	生産量 (EJ/年)	合計 (EJ/yr)
2020	電力	25.9	181.8	0.65	2.01
	直接	143.6	377.5	1.36	
2030	電力	51.0	380.0	1.37	5.23
	直接	407.8	1,071.7	3.86	
2050	電力	150.0	1,182.8	4.26	11.83
	直接	800.0	2,102.3	7.57	

注: 2020 年及び 2030 年の設備容量は、電力には 7%、直接利用には 11%の年間成長率を用いて 2015 年の推定値から推定した。2050 年については、第 4 章で引用した予測の中央値である。生産量は、電力向け平均世界設備利用率を 80%（2020）、85%（2030）、90%（2050）、直接利用向けを 30%として推定した。

地熱エネルギーの地球規模の一次エネルギー供給への長期的な貢献についての最も高い推定値（2050 年までに 52.5EJ/年）でさえ、技術的ポテンシャル（電力については 118～1,109EJ/年、及び直接利用については 10～312EJ/年）の範囲内にあり、熱水資源の上限内（28.4～56.8EJ/年）である。よって、技術的ポテンシャルが、少なくとも地球規模で、地熱普及（電力及び直接利用）のより意欲的なレベルの到達への障壁となる可能性は低い [4.8.2]。

約 120 のエネルギーと温室効果ガス削減シナリオを検討したところ、地熱供給が予想の上限を満たすことが示唆された。自然の蓄熱容量があるため、地熱は、ベースロード電力の供給に特に適している。技術的ポテンシャル及びな普及の可能性を考慮すれば、地熱エネルギーは、2050 年までに地球規模の電力需要の約 3%を満たし、2050 年までに冷暖房の地球規模の需要の約 5%を供給する可能性がある[4.8.3]。

第5章: 水力

5.1 はじめに

水力は、高い方から低い方に流れる水のエネルギーから電力を得る再生可能エネルギー源である。水力は、実績があつて成熟度も高く、出力が予測可能かつ価格競争力の高い技術である。流下する水の機械的なパワーは、2,000 年以上前のギリシャ時代から様々なサービスで利用されている、古くからの動力を得るツールである。世界初の 12.5kW の水力発電所は、1882 年 9 月 30 日、アメリカのウィスコンシン州アップルトンにおいてフォックス川のパルカン・ストリート発電所で稼働した。現在の世界のエネルギー供給における水力発電の主な役割は集中制御型の発電であるが、水力発電は他の電力系統とは離れた、へき地や遠隔地で用いられることが多い単独系統で運転することも可能である [5.1]。

5.2 資源ポテンシャル

世界の水力発電の年間発電電力量の技術的ポテンシャルは 14,576TWh (52.47 EJ) であり、これは推定される総容量のポテンシャル 3,721GW に対応している。この総容量ポテンシャルの値は、現在導入されている世界の水力発電容量の 4 倍である (図 TS.5.1)。未開発の容量の幅はヨーロッパの約 47% からアフリカの 92% まであり、世界全体で大きく、十分に広く分布した水力発電開発の機会があることを示している (表 TS.5.1 を参照)。アジア及びラテンアメリカが最大の技術的ポテンシャル及び最大の未開発資源を有している。アフリカは、ポテンシャル全体のうち未開発について最も高い割合を占めている [5.2.1]。

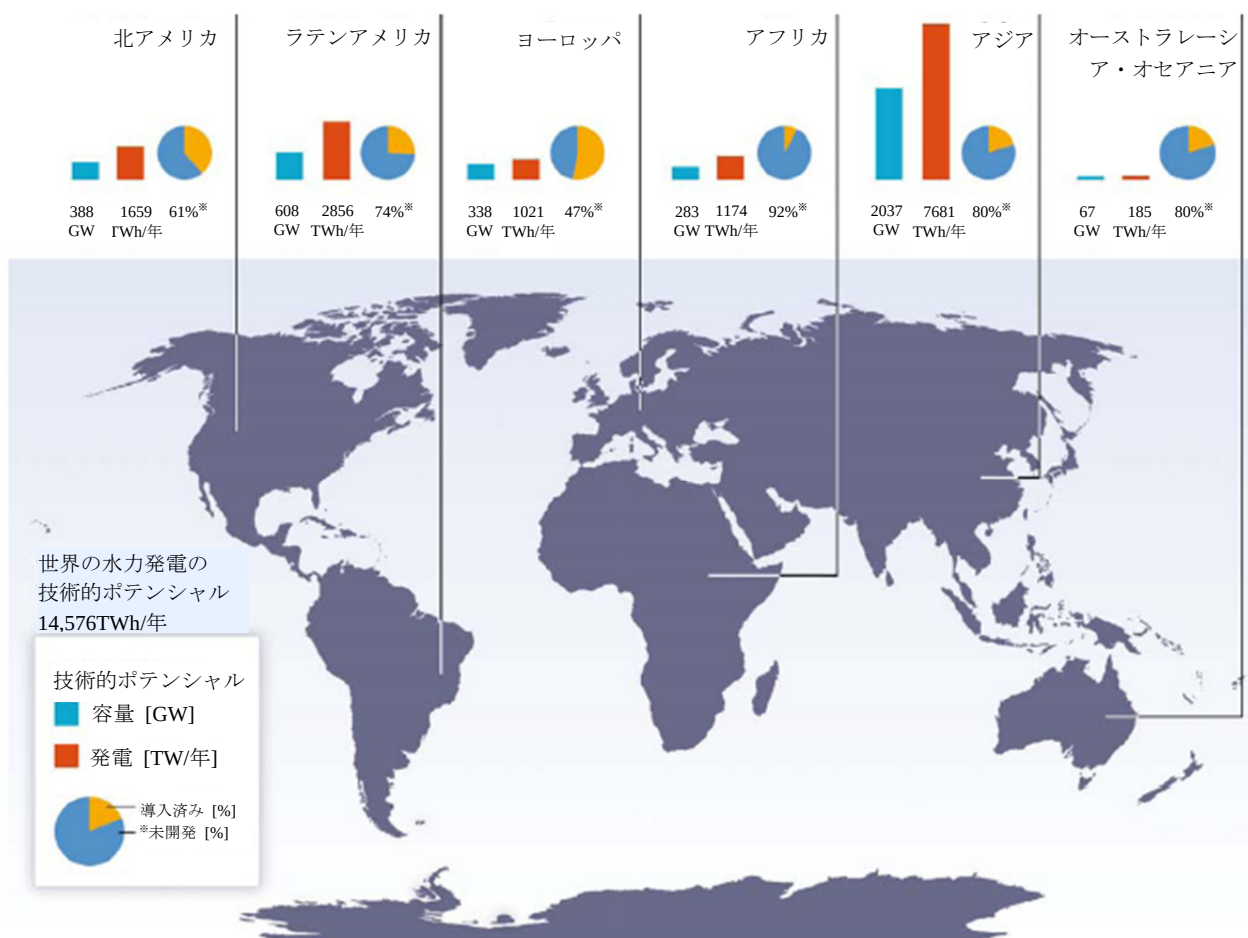


図 TS.5.1: 年間発電と設備容量で見た地域の水力発電の技術的ポテンシャルと 2009 年における未開発の技術的ポテンシャルの割合 [図 5.2]

北アメリカ、ラテンアメリカ、ヨーロッパ、及びアジアにおける水力発電の総設備容量の桁は同じなの

に対し、アフリカ及びオーストラレーシア（南洋州）・オセアニアは1桁小さいこと（アフリカは低開発、オーストラレーシア（南洋州）・オセアニアは設備規模、気候、及び地形のため）は注目に値する。水力発電プラントの世界の平均設備利用率は44%である。設備利用率は、水力発電がエネルギー構成（例えば、ピーク対応運転とベース負荷運転のどちらかへの対応、など）または利用可能な水に対していかに使われているか、設備の増強及び運転の最適化による発電電力量増加の機会があるかを示すことが出来る [5.2.1]。

表 TS.5.1: 年間発電量及び設備容量（GW）から見た地域的な水力発電の技術的ポテンシャル。現在の発電量、設備容量、平均設備利用率、結果としての2009年時点での未開発ポテンシャル [表 5.1]

世界の地域	技術的ポテンシャル、年間発電量 TWh/年 (EJ/年)	技術的ポテンシャル、設備容量 (GW)	2009 年における総発電量 TWh/年 (EJ/年)	2009 年における設備容量 (GW)	未開発ポテンシャル (%)	平均地域的設備利用率 (%)
北アメリカ	1,659 (5.971)	388	628 (2.261)	153	61	47
ラテンアメリカ	2,856 (10.283)	608	732 (2.635)	156	74	54
ヨーロッパ	1,021 (3.675)	338	542 (1.951)	179	47	35
アフリカ	1,174 (4.226)	283	98 (0.351)	23	92	47
アジア	7,681 (27.651)	2,037	1,514 (5.451)	402	80	43
オーストラレーシア（南洋州）・オセアニア	185 (0.666)	67	37 (0.134)	13	80	32
世界	14,576 (52.470)	3,721	3,551 (12.783)	926	75	44

水力発電の資源ポテンシャルは、気候変動によって変化する可能性がある。これまでの限られた研究によると、個別の国や地域によっては降水量及び自分流分の大きなポジティブまたはネガティブな変化を受ける場合もあるものの、既存の世界の水力発電システムに対する気候変動の影響は若干好ましいものと予想されている。SRES A1B シナリオ下の2050年における年間発電容量は、アジアでは2.7TWh (9.72PJ) 増加し、ヨーロッパでは0.8TWh (2.88PJ) 減少する可能性がある。他の地域では、変化はさらに小さいと考えられる。世界的には、気候変動による既存の水力発電システムの発電電力量の変化は0.1%以下であると推定されているが、これらの予測に関わる不正確さを下げるためにさらなる研究が必要である [5.2.2]。

5.3 技術及び用途

一般的に、水力発電プロジェクトは個別のニーズ及び個別の立地条件に合わせて設計され、プロジェクトの種類、落差（水力タービンの位置に対する水の位置の鉛直方向の高さ）、または目的（単一目的または多目的）によって分類される。規模（設備容量）による分類は、その国による定義に基づくもので、政策により世界的に異なるものとなっている。カテゴリーのMWの区分の上か下かによって、分類基準としての設備容量と、一般的な特性の間には、すべての水力発電プラント（HPP）に共通するような直接的な関係はない。全体的に見て、規模に基づく分類は一般的かつ行政管理上には単純であるが、ある程度恣意的になってしまう。「小規模な」または「大規模な」水力発電といった一般的な考え方は、影響度合い、経済性、特徴に関して技術的または科学的に厳密な指標ではない。水力発電プロジェクトは、その持続可能性または経済的パフォーマンスに基づいて評価し、より現実的な指標を設定の方が有用である。大規模な水力発電開発と小規模な水力発電開発の累計した環境的・社会的影響の相対的な大きさには、まだ不確かさが残っており、条件に依存する [5.3.1]。

水力発電プラントは、主な3つのプロジェクトの種類、即ち自流水式（RoR）、貯水池式、及び揚水式、に分類される。自流水式水力発電プラントは、貯水能力のない小規模の取水口を持つ。そのため、発電電力は流域の水のサイクルに従うものになる。自流水式水力発電プラントの場合、発電電力は水の利用可能分により変わるため、小河川のものは出力が変動する発電プラント、大河川のものはベース負荷対応発電プラントとして運用される場合が多い。大規模な自流水式水力発電プラントには、限定的ではあるがあ

る程度の水量は調整出来る能力を持つ場合があり、また、上流の貯水池式水力発電と同一水系で直列で運転する場合は、自流式水力発電所でも水力発電プラント群としての全体的な出力調整能力・需給バランス能力に貢献出来る可能性もある。4 つ目の分類として、流れ利用発電（流体動力学）の技術があるが、成熟度は低く、何も調整ができない自流式のような機能となる [5.3.2]。

貯水池（貯水池式水力発電）を持つ水力発電プロジェクトは、ベース負荷対応、ピーク対応、水の形でエネルギー貯蔵などの幅広いエネルギーのサービスを提供することが出来、他の電源の調整役の機能も持つ。さらに、洪水調整、水供給、航行、観光、灌漑などのエネルギー部門の範囲を超えたサービスを提供することも多い。揚水式発電プラントは、発電のエネルギー源となる水を貯え、水の流れを貯える方向から逆転させることにより、非常に短い応答時間で需要に応じて発電することが出来る。この方式は、現在利用可能な系統電力の貯蔵方法の種類の中で、最も容量の大きいものである [5.3.2.2～5.3.2.3]。

水中の土砂の流下と貯水池への堆砂は、水力発電プラントのパフォーマンスに多大な悪影響を及ぼすため、あらかじめ理解しておかなければならない問題である。その悪影響は、時間経過による貯水池の貯水容量の減少、下流における浸食の増加、貯水池上流における洪水リスクの増加、水力タービンの効率低下による発電ロス、修理・保守の頻度の増加、水力タービンの寿命の短縮及び発電の規則性の低下である。堆砂の問題は、究極的には、土地利用政策及び地域の植生の保護によって管理出来る。水力発電は、現在知られているエネルギー源の中でも最も変換効率が良く（約 90%の効率、水から電線の電力）、エネルギー収支比も非常に高い [5.3.3]。

通常、水力発電プラントの寿命は 40～80 年である。電気・機械機器及び制御装置は土木構造物よりも速く劣化し、一般的に 30～40 年で改造が必要になる。水力発電プラントの増強・改良には、実施手順を決定する上で重要な役割を果たす要素（水力学的、機械的、電氣的、及び経済的）が多いため、体系立ったアプローチが必要となる。技術・経済的な観点で見れば、改良は改造・新技術適用の方法とともに検討するべきである。パフォーマンスが向上した水力発電機器を組み込むことが出来、より柔軟かつピーク対応モードの運転という市場の需要を満たすことが出来る場合が多い。現在（2010 年）稼働中の 926GW の水力発電機器のほとんどは、2030～2040 年までに最新式にする必要があるだろう。既存の水力発電プラントの改修は、水力タービン容量が改良・増強されている場合または既存の土木インフラ（水路、堰、ダム、暗きょなど）が新しい水力発電設備の増設のために追加加工されている場合、水力発電容量の増加につながる事が多い [5.3.4]。

5.4 市場、産業の発達の世界的、地域的狀態

水力発電は、成熟度が高く、出力が予測可能かつ価格競争力のある技術である。現在、世界の総発電電力の約 16%、及びすべての再生可能エネルギー源からの電力の 86%を占めている。水力発電は 159 ヶ国においてある程度のレベルで発電に貢献しているが、5 ヶ国（中国、カナダ、ブラジル、アメリカ、及びロシア）で世界の水力発電の半分以上を占めている。しかし、これらの国の水力発電の電力のエネルギー・マトリックスにおける重要性は大きく異なっている。ブラジル及びカナダは水力発電に大きく依存しており、それぞれ全発電量の 84%及び 59%を占めているが、ロシア及び中国は水力発電はそれぞれ総電力中の 19%及び 16%しか生産していない。世界中で水力発電による電力が大きくのびているにも関わらず、水力発電の電力の比率は過去 30 年間（1973 年～2008 年）で 21%から 16%に下がっている。その理由は、電力需要及びその他の電源が水力発電よりも急速にのびたことである [5.4.1]。

炭素クレジットは、資金の確保及びリスクの減少を助けるため、水力発電プロジェクトには有益である。財政支援は、プロジェクト開発過程全体における大きな決断となる。水力発電プロジェクトは、京都議定書の柔軟性メカニズムに最も大きく貢献出来るものの 1 つであり、それは既存の炭素クレジット市場に対しても同様である。2010 年 3 月 1 日までにクリーン開発メカニズム（CDM）理事会に登録された 2,062 件のプロジェクトのうち、562 件が水力発電である。プロジェクトの総数のうち 27%を占め、水力発電は主要なクリーン開発メカニズムを展開させる再生可能エネルギー源となっている。中国、インド、ブラジル、及びメキシコは、主催されているプロジェクトのうち約 75%を占めている [5.4.3.1]。

多くの経済的な水力発電プロジェクトが、資金面での課題を抱えている。その 1 つは先行投資コストが高いため投資行為を妨げる要因となっていることであり、もう 1 つは、計画、認可、及び建設のリードタイムが非常に長くかかる傾向にあることである。ライフサイクル・コストの評価において、水力発電

は年間の運転保守コストが資本投資のごく一部しか占めておらず、非常に高いパフォーマンスを持つことが多い。水力発電及び水力発電産業は歴史も古く成熟しているため、水力発電産業は来るべき展開の予測による需要を満たすことが出来る。たとえば、2008 年には水力発電産業は世界全体で 41GW 以上の規模の新設分を据え付けることが出来ている [5.4.3.2]。

公共部門・民間部門の最適な役割を見出すような、適切な財政支援モデルの開発は、水力発電セクターにおける大きな課題である。水力発電の主な課題は、民間部門の信用形成やリスク低減、特にプロジェクト認可前の信用形成やリスク低減に関わるものである。グリーン・マーケット及び排出量削減の取引がインセンティブを提供することは明らかである。また、アフリカなどの開発地域では、国家間の電力系統の接続及び電力プールの形成によって、これらの新興市場における投資者の信頼が形成されている [5.4.3.2]。

設備容量 (MW) によって定義される「小規模」または「大規模」という水力発電プラントの分類の考え方は、水力発電の開発の障壁となる場合がある。たとえば、これらの分類が気候変動やエネルギー政策における水力発電の扱われ方を決めることで、新設する水力発電プラントの財政支援に影響する可能性がある。小規模水力発電に対しては国により様々なインセンティブが使用されているが (FIT、グリーン証書及び補助金)、大規模水力発電プラントに対しては利用可能なインセンティブがない。EU リンク指令は、水力発電プラントによる炭素クレジットの制限を 20MW に設定しており、UK Renewables Obligation (グリーン証書市場に基づくメカニズム) でも同じ制限が設けられている。同様に、いくつかの国においては、FIT は特定の規模制限 (フランスの 12MW、ドイツの 5MW、インドの 5MW 及び 25MW など) を上回る水力発電には適用されない [5.4.3.4]。

UNFCCC クリーン開発メカニズム理事会は、貯水池式水力発電が、CDM クレジットの適用を受けるためには、出力密度指標 (PDI: W/m^2 で表される設備容量/貯水池面積) によらなくてはならないと決定した。現在のところ、出力密度指標のルールでは貯水池式水力発電をクリーン開発メカニズム (または共同実施) のクレジットの適用から除外していると考えられるため、貯水の行われない自流式のオプションが好まれることになり、水力資源としては最適ではない開発を誘発する可能性がある。

5.5 より幅広いエネルギーシステムへの統合

水力発電は、その取れる容量の幅の大きさ、柔軟性、貯水能力 (貯水池と組み合わせた場合)、及び単独系統でどんな規模の電力系統も運転出来る能力によって、幅広いサービスを提供することが出来る [5.5]。

水力発電は、国家または地域の送電系統、小規模系統及び単独系統を通して供給出来る。開発途上国では、産業用・農業用・家庭用に使用する電力を遠距離のへき地、特に丘陵地で供給出来るため、小規模の水力発電を用いたスキームがこれらの場所の社会経済的開発に重要な役割を果たすという認識が生まれ始めている。中国では、小規模水力発電プラントがへき地の地方電化で最も成功した例の 1 つであり、合計容量は 55,000MW を超え、年間発電電力量は 160TWh (576PJ) に達する 45,000 以上の小規模水力発電プラントによって、3 億人以上が恩恵を受けている [5.5.2]。

水力発電プラントの規模と比較して非常に大きい貯水池 (または非常に安定した河川流量) がある場合、その水力発電プラントは年間を通してほぼ一定したレベルで発電することが (つまり、ベース負荷対応発電プラントとして運転することが) 出来る。一方、水力発電所の容量が貯水池の総貯水容量を大きく上回ると、その水力発電プラントが発電電力量に制限があるとみなされる場合がある。このような発電電力量に制限がある水力発電プラントは、年間を通して定格の容量で運転し続けられ、その「燃料供給」を使い切ってしまうようにする。このような場合、貯水池の貯水は、河川流量のみによって決まる時間ではなく、電力系統の視点から見て最も価値がある時間に水力発電を行うことが出来ることとなる。電力需要は日中と夜間、また 1 週間の間、及び季節によっても異なるため、貯水池式水力発電は電力系統からのニーズが最も大きくなる時間に合わせることが出来る。これらの時間はある程度電力需要のピーク時間帯に含まれる。需要が大きい時間に水力発電プラントを運転して発電することは、ピーク対応運転 (ベース負荷運転と対比して) と呼ばれる。しかし、貯水池式水力発電の場合でも、その貯水規模、水力発電プラントの定格発電容量、及び灌漑、レクリエーション、または河川流の環境利用による下流への流量の制約によって、さらに制限をうける。水力発電のピーク運転は、放水口が直接河川につなが

っている場合、河川の流量、河川水で覆われる範囲、河川の深度及び流速の急激な変化につながる。従って適切に管理されない限り、その場所の状況によって、河川に対する悪影響につながる可能性がある [5.5.3]。

化石燃料及び原子力発電の補助に加えて、水力は変動性のある再生可能電源の統合における問題の解消を助けることも出来る。たとえばデンマークでは、変動性のある風力発電が高いレベルにあることが（年間エネルギー需要の 20% 超）、一部、十分な貯水池式水力発電能力を有するノルウェーとの強力な連系（1GW）を通して対応されている。ヨーロッパとの連系を増やすことにより、デンマークやドイツにおける風力のシェアをさらに増加出来る可能性がある。出力変動性のある発電が増加することで、電力系統に必要な調整及び負荷追従を含む平衡化サービスの量を増やすことも出来る [5.5.4]。

水力発電は、発電エネルギー及び発電容量に加えて、大規模な電力系統サービスを提供するポテンシャルを持っているが、水力発電プラントの連系及び信頼性のある利用には電力系統の変更も必要となる場合がある。電力系統への水力発電の連系は、水力発電プラントから需要の中心地への十分な送電容量を必要とする。かつては、新しい水力発電プラントの追加は送電ネットワーク拡張のためのネットワーク投資が必要であった。十分な送電容量がなければ、水力発電プラントの運用は制約を受け、発電プラントが提供するサービスは制約を受けないシステムで提供可能なレベル以下になる可能性がある [5.5.5]。

5.6 環境及び社会的影響

すべてのエネルギー及び水管理オプションと同様、水力発電は環境及び社会に対し、好ましい影響と好ましくない影響の両方を与える。環境面で言えば、水力には地方及び地域のレベルで大きな環境フットプリントがあるが、マクロ生態学的には利益をもたらす。社会的影響に関して言えば、水力発電のプロジェクトは貯水池または建設場所の中や周辺に生活するコミュニティの移住、下流のコミュニティへの補償、公衆衛生問題、その他を伴う可能性がある。しかし、便益の共有方法に関して重要な問題が残るものの、適切に設計された水力発電プロジェクトは社会経済的発展を推進する可能性がある [5.6]。

すべての水力発電施設は、主に、水理的な変化、ダム、堤、また堰の建設により、土砂の流下や魚の回遊の生態的継続性の分断によって、河川の生態環境に影響を及ぼす。しかし、河川の物理的、化学的、及び生物学的变化の度合は、水力発電プラントの種類に大きく依存している。自流式水力発電は河川の流域には影響しないが、貯水池式水力発電における貯水池の構築には流れの速い河川の生態系を穏やかな池の生態系に転換することによる大きな環境変化を伴う [5.6.1.1～5.6.1.6]。

水力発電プロジェクトの地方及び地域のコミュニティ、土地利用、経済、安全衛生、または文化遺産に対するその社会的影響の程度は生態上への影響と同様、プロジェクトの種類や場所によって異なる。一般的に自流式発電による社会的変化は小さいが、人口密度の高い地域における貯水池の構築には、移住に関する大きな問題や、及び下流域の住民の生活への影響が伴う。影響を受けるコミュニティの生活水準の回復や向上は、過去に様々な形で上手く管理されてきた長期的かつ難しい課題である。水力発電プラントが社会経済的発展の促進に寄与するかどうかは、生産されるサービスや収益が複数のステークホルダーの間でどのように共有、分配されるかに大きく依存している。水力発電プラントは、発電だけでなく、河川水の貯水のスキームを通して洪水や干ばつから守るとともに、複数のその他の水に依存した活動（灌漑、航行、観光、漁業、地方自治体への十分な給水など）を促進することによって、地方コミュニティの生活条件及び地域の経済に対して良い影響も与える [5.6.1.7～5.6.1.11]。

水力発電プラント、特に大規模な水力発電プラントに関連する環境や社会への影響の評価及び管理は、水力開発における重要な課題となる。透明性の重視、開かれた参加型意思決定プロセス、ステークホルダーが協議して行うアプローチは、現在及び未来の水力発電をより環境に優しく、持続可能性の高い解決策にする。多くの国際的な金融機関が水力発電プロジェクトの経済的・社会的・環境的パフォーマンスを評価するためのそれぞれのガイドライン及び要求を作り上げてきた一方で、多くの国において、水力発電プロジェクトの開発及び運用のあり方を決定するために、国家による強力な法規制の枠組みが導入されてきた [5.6.2]。

燃料を燃焼させることに伴う大気汚染物質また廃棄物を出さないことは、水力発電の主な環境面でのアドバンテージの 1 つである。しかし、すべての河川水のシステムは、自然のものであれ人工のものであ

れ、有機物質の分解によって温室効果ガス（二酸化炭素、メタンなど）を排出する。これまでの水力発電プロジェクトに対して行われたライフサイクル評価（LCA）によると、すべての気候条件、貯水池の貯水前の土地表面の状態、稼働年数、水力発電技術、及びその他のプロジェクト固有の状況において、水力発電プロジェクトのライフサイクルの温室効果ガス排出量の推定を一般化することが困難であることを示している。ほとんどの水力発電プロジェクトは多目的に使われる性質のものであるため、いくつかの目的に全体の影響を分けていくことは難しい。これまでのライフサイクル評価の多くは、発電機能へ水力発電プロジェクトのすべての影響を担わせており、水力発電が「原因となる」排出量を多く見積もっている。建設、運転・保守、及び解体を通じた水力発電プラントの温室効果ガス排出量を評価するライフサイクル評価（図 TS.5.2）では、水力発電のライフサイクル温室効果ガス排出量推定値の大部分は二酸化炭素換算量で約 4~14g/kWh に集中しているが、外れ値が示すように特定のシナリオ下ではさらに大量の温室効果ガスを排出する可能性がある [5.6.3.1]。

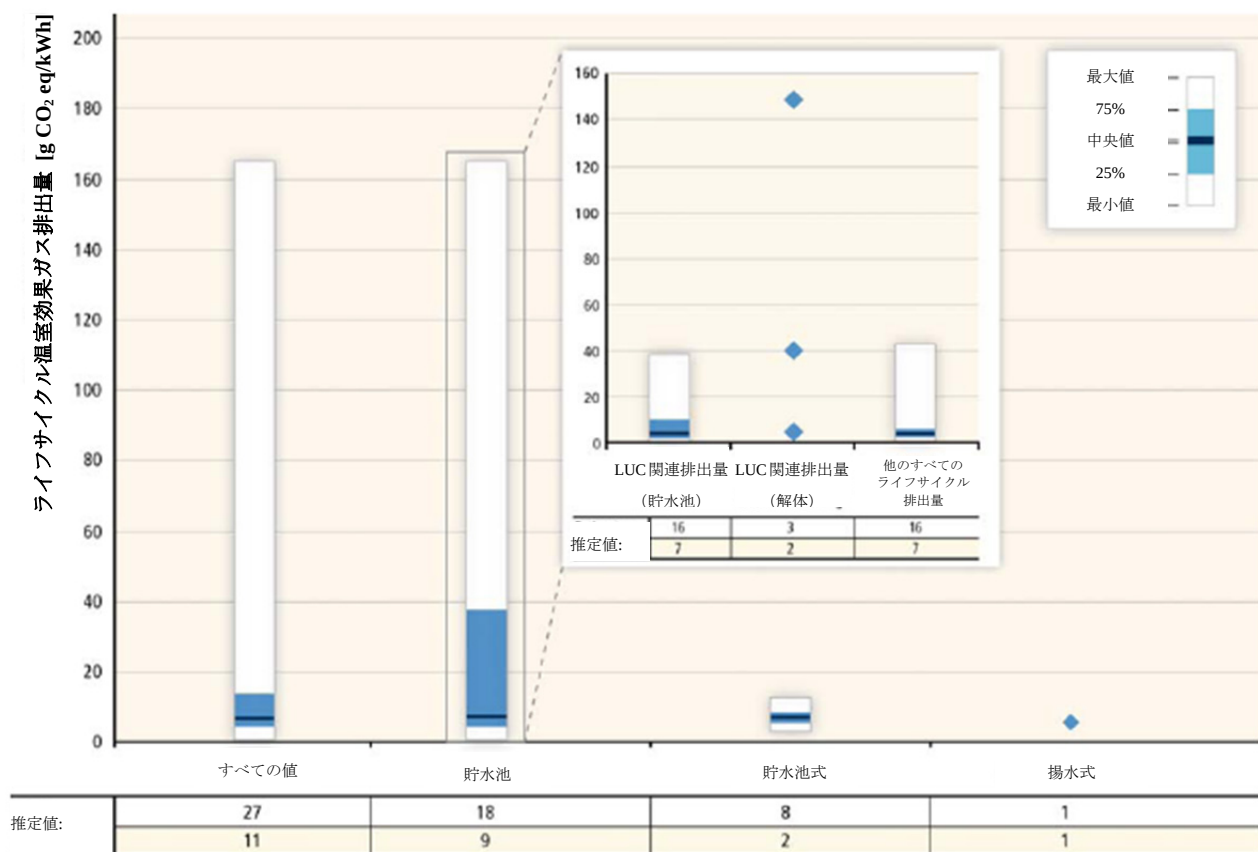


図 TS.5.2: 水力発電技術のライフサイクル温室効果ガス排出量（選定された文献の無修正値）。示されている推定値に寄与する文献調査及び文献引用の詳細については Annex I を参照のこと。貯水池表面からの排出量は総温室効果ガス排出量として参照されている [図 5.15]。

自然の水域及び河川水貯水池においては、温室効果ガスの排出量よりも吸収量が大きくなる場合もあるが、貯水池の設置によって発生する温室効果ガス排出の正味の変化についての適切な評価が必要なことは明確である。その評価に含まれるライフサイクル評価はすべて、貯水池からの総温室効果ガスのみを評価している。貯水池がなかった場合に発生したと考えられる排出量を考慮したときに、貯水池が温室効果ガスの正味の排出源であるかどうかは、盛んに研究されている。貯水池がある場合とない場合の全体の炭素サイクルの中で、人為的な排出総量の違いを考えると、現在のところ、貯水池が正味では排出源であるか吸収源であるかの結論は出ていない。現在、2 つの国際的な活動（国際連合教育科学文化機関（UNESCO）の国際水文学計画研究プロジェクト及び IEA 水力実施協定 Annex XII）によって、この問題が調査されている [5.6.3.2]。

5.7 技術の改善及びイノベーションの展望

水力発電は実証済みで非常に発達した技術であるが、まださらなる発展の余地がある。たとえば、運転の最適化、環境への影響の緩和または減少、新しい社会的・環境的要求への適応、及びさらに強固かつ費用対効果の高い技術的解決策の実施などである。現在、大容量の水力タービンの効率は技術的限界に近づいており、最高効率点で運転した場合で最大 96% の効率に達しているが、この効率は常に可能なわけではなく、幅広い流量でより高い効率の運転を可能にするために継続的な研究が必要である。古い水力タービンの場合、設計上の効率が低いか、腐食及びキャビテーションによって効率が低下している可能性がある。そのため、より効率の高い新しい機器への取り替えによるエネルギー出力増加のポテンシャルがあり、一般的には容量の増加も伴うものとなる。現在稼働中の既存の電気及び機械機器は、今後 30 年間で新たな技術を適用して取り替える必要があり、それにより効率の向上及び出力や発電エネルギーの増加が実現されていく。一般的に、発電機器はプロジェクトの寿命中に、2、3 回は技術的に進んだ電気機器、機械機器に改良または交換されるので、それによって同じ流量の水をより効率的に使用出来るようになる [5.7]。

落差及び流量における運用範囲の拡大に加え、環境的パフォーマンスと信頼性の向上、コストの削減を目的とした多くの新技術の開発や材料の研究が進行中である。開発中の将来性のある技術の中には、可変速技術、マトリックス技術、魚類に影響を与えにくい水力タービン、流れ利用の水力タービン、耐摩耗性の水力タービン、及び新しいトンネルやダム技術がある。低い (15m 未満) または非常に低い (5m 未満) 落差の利用を目的とした新技術によって、従来の技術では適用範囲外であった水力発電向けの場所を多く開拓出来る。水力発電の技術的ポテンシャルに関する利用可能なデータのほとんどは、低落差水力発電の優位性が高くなかった数十年前に現地調査に基づいて作られたものであるため、低落差の水力発電のポテンシャルに関する既存のデータは完全ではない。最終的に、発電プラントの運転を最適化する新しい方法を用いた水力発電プラントの運転の改善には、大きなポテンシャルがある [5.7.1~5.7.8]。

5.8 コストの傾向

新たな水力発電所プロジェクトの開発、実施、及び運転のコストはプロジェクトごとに異なるが、水力発電は、現在のエネルギーの市場価格に対して経済的競争力を有することが多い。水力発電は、高い初期投資を必要とすることが多いが、非常に低い運転保守コストと長寿命という利点がある [5.8]。

水力発電の投資コストには、計画、許認可、発電プラント建設、魚及び野生生物、また観光や歴史的・考古学的な遺跡に対する影響緩和、水質モニタリングのコストも含まれる。全体としては、コストは 2 つの主要な分類に分けることが出来る。1 つは一般的に水力発電の最も大きなコストである土木建設コスト、もう 1 つは電気・機械機器のコストである。土木建設コストは、プロジェクトの開発が予定されている国における価格の傾向に従う。経済が移行期にある国の場合、地域の労働力及び材料の利用によって、このコストは相対的に低くなる可能性が高い。電気・機械機器のコストは、世界レベルの価格の傾向に従う [5.8.1]。

Annex II で概説している標準化された方法論、及び Annex III で要約しているコストとパフォーマンスのデータに基づくと、水力発電プロジェクトの均等化発電原価は、膨大かつ様々な入力パラメータが用いられ、各プロジェクトの投資コストに関するその建設場所個有のパラメータ及び割引率、設備利用率、寿命や運転保守コストに関する想定値によって変わるが、1.1~15US セント/kWh (2005 年) になると計算されている [1.3.2, 5.8, 10.5.1, Annex II, Annex III]。

図 TS.5.3 は、水力発電プロジェクトの大部分のものに適用出来る、ある程度異なる一般的なパラメータ一群の水力発電プロジェクトの均一を示す。ここで異なる投資コストや異なる割引率の値の設備利用率の関数として示している。

設備利用率は、水文学的条件、設備容量と発電プラント設計、及びその発電プラントの運転方法によって決まる。何らかの規制の下、電力エネルギーの生産量を最大とする (ベース負荷運転) ためには、発電プラント設計の場合、設備利用率は 30~60% になることが多い。世界の異なる地域における平均設備利用率はグラフに示されている。ピーク対応型の発電プラントの場合は、設備利用率はさらに低くなる可能性がある。一方、自流式システムでは、地理的・気候学的条件、技術、及び運転の特徴によって、

幅広となる(20~95%)。平均設備利用率 44%で投資コスト 1,000~3,000US ドル/kW (2005 年) の場合の均等化発電原価は、2.5~7.5US セント/kWh (2005 年) になる。

(遅くとも 2020 年までの) 近い将来において開発されるプロジェクトの多くでは、プロジェクトごとには高コスト・低コストの場合があり得るものの、投資コスト及び均等化発電原価はこの幅に収まると予想されている。良い条件であれば、水力発電の均等化発電原価は 3~5US セント/kWh (2005 年) になり得る [5.8.3, 8.2.1.2, Annex III]。

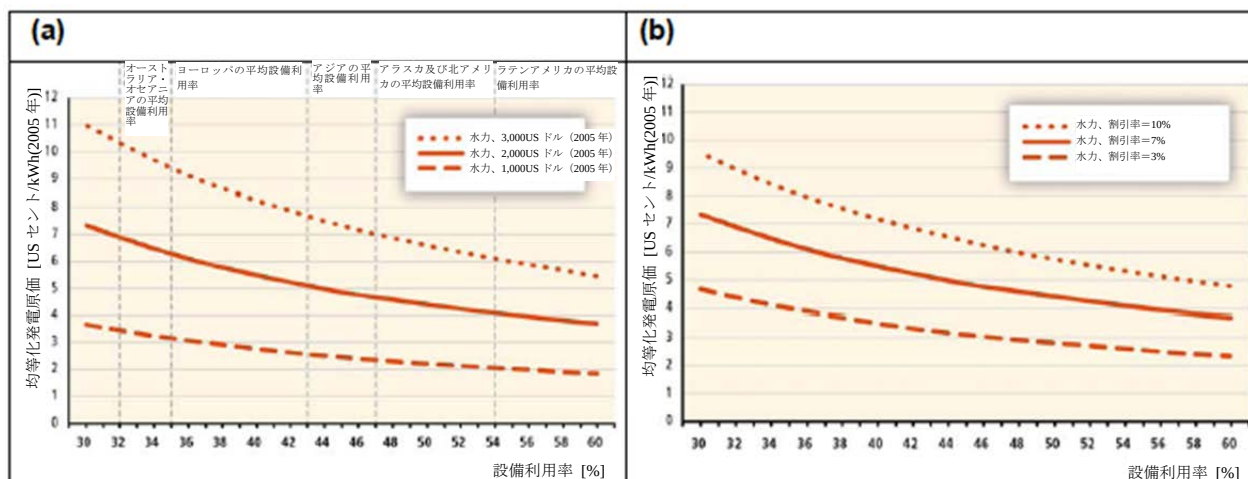


図 TS.5.3:: (a)設備利用率と投資コストの関数(※、※※※)としての、また (b)設備利用率と割引率の関数(※※、※※※)としての最近の水力の均等化発電原価[図 5.20]

注:

※割引率は 7%と想定

※※投資コストは 2000US ドル/kW と想定

※※※年間運転保守コストは、投資コストを 2.5%/年、プラント寿命を 60 年間と想定

文献上では、水力発電コストの過去の傾向に関する情報は比較的少ない。その理由の 1 つは、プロジェクトのコストが極めて設置場所に左右されやすいという事実に加えて、一部の(土木)構造物のコストは低下する可能性がある(トンネル建設コストなど)一方でコストが増加する可能性があるもの(社会的及び環境的緩和コストなど)もあるという、水力発電プラントの複雑なコスト構造である可能性がある [5.8.4]。

水力発電のコストを考えるに当たって複雑な要素の 1 つとして、多目的の貯水池を持つ場合、灌漑、洪水調整、航行、道路、飲用水供給、漁業、レクリエーションなど、その他の水利用を供給するためのコストを分担したり、割り当てを受けたりする必要があるということがある。個々の目的のコストの割り当てにはいくつか異なる方法があるが、それぞれ利点や不利な点がある。基本的な原則は、どの目的に割り当てられたコストもその目的からの便益を上回らず、また、各目的はその目的のためとして分離可能なコストで実行されるということである。どの目的の分離可能なコストも、その目的を含んだ場合の多目的プロジェクトの総コストから、その目的を除いた場合のプロジェクトのコストを引くことによって得られる。経済上の要素(エネルギー及び水の売価)とその社会的な利益(水不足の場合の農家への給水)、及び環境的な価値(最小の環境維持流量の確保)を合わせることは、多目的貯水池のコスト分配の検討のための手段となりつつある [5.8.5]。

5.9 普及のポテンシャル

水力発電は、短期的、長期的将来の炭素排出量削減の大きなポテンシャルを秘めている。世界的に、環境的及び社会的問題によっては慎重に管理しないと普及が限られる可能性があるが、水力資源量によって短中期的にさらなる開発が制約を受ける可能性は低い [5.9]。

これまで世界における水力発電ポテンシャルのうち 25%しか開発されていない(14,575TWh 中の 3,551TWh) (52.47EJ 中の 12.78EJ)。異なる長期的展望のシナリオが今後数十年で継続的に増加するこ

とを示している。いくつかの研究によれば、過去 10 年間にわたる水力発電容量の増加は、短期的から中期的な将来において今後も継続すると予想されている（2009 年の 926GW から 2015 年までに 1,047～1,119GW、年間 14～25GW の増加） [5.9, 5.9.1]。

第 10 章で示す予測例（164 の分析された長期的シナリオに基づく）では、世界のエネルギー供給における水力発電の幅広い役割が示されている（中央値は 2020 年では約 13EJ (3,600TWh)、2030 年では 16EJ (4,450TWh)、2050 年では 19EJ (5,300TWh)）。2009 年にはすでに 12.78EJ に達しているため、おそらく 2020 年の平均推定値である 13EJ は、現在までにすでに上回っているだろう。また、2020 年、2030 年、及び 2050 年に設備容量が現在の水準よりも低くなるとしているシナリオの結果もある。これは、水力発電の寿命の長さ、大きな市場ポテンシャル、及びその他の重要なサービスを考えれば、直観に反するものである。これらの結果は、モデル及びシナリオの貧弱さによって説明することが出来る（本報告書の 10.2.1.2 節の解説を参照）。そのため、温室効果ガス緩和政策がない場合、水力発電の電力供給への寄与が中央値で現在の 16%から 2050 年までに 10%以下まで下落したとしても、水力発電は成長すると予測される。別のシナリオでは温室効果ガス緩和政策はより厳しくなると想定されており、水力発電の寄与は大きくなる。2030 年までに、440～600ppm の範囲と 440ppm 未満の範囲の二酸化炭素安定化の政策においては、水力発電の寄与の中央値で約 16.5EJ (4,600TWh) に達し（ベースライン・ケースにおいては中央値 15EJ）、2050 年までに約 19EJ まで増加する（ベースライン・ケースにおいては中央値 18EJ） [5.9.2]。

2035 年における水力発電の地域的予測によると、2008 年の水準と比べてアジア太平洋地域では 98%、アフリカでは 104%の増加を示している。ブラジルは、同じ期間における中南米地域の水力発電プラントの 46%の増加を裏付ける主な推進力となっている。北アメリカ及びヨーロッパ・ユーラシアでは、この期間においてそれぞれ 13%及び 27%の緩やかな増加が予想されている [5.9.2]。

全体としては、今後 20 年間で比較的高いレベルの普及も実現可能であると示す証拠もある。世界の電力供給における水力発電の割合は 2050 年までに低下した場合でさえも、世界的な炭素削減シナリオの中において水力発電は魅力的な再生可能エネルギー源であり続けるだろう。さらに、貯水池式水力発電の開発の増加によって、水資源に関連する深刻な問題への対応に必要な水管理用インフラへの投資が出来る可能性がある [5.9.3]。

5.10 水管理システムへの統合

水、エネルギー、気候変動は、密接に関係している。水利用の可能性は水力発電を含む多くのエネルギー技術にとって重要であるが、一方で、特に開発途上国の水が乏しい地域においては農業、産業、及び家庭での給水の確保にエネルギーが必要になる。この相互依存が、特に気候変動及び持続可能な開発に関して、水とエネルギーの関係は包括的に扱わなければならないという理解につながる。持続可能な開発のためのエネルギー及び水の供給には、地域的・世界的な水管理の向上が必要となるだろう。それには貯水設備の設置を伴うことが多いが、水力発電はこれらの問題の交差する点に位置しており、エネルギーと水の両者の安全保障の強化において重要な役割を果たし得る [5.10]。

現在、約 7 億人が水ストレスまたは水不足のある国で生活している。2035 年までには、30 億人が重大な水ストレスの条件下で生活するようになると予測されている。水利用可能性が限定的な国の多くは、複数の国が共有する水資源に依存しており、それによってこの乏しい資源を巡る紛争のリスクが高まっている。そのため、気候変動影響への適応が、水の管理において非常に重要となるだろう [5.10.1]。

多目的の水力発電が気候変動と水不足の両方を緩和する手段となり得る状況において、これらのプロジェクトは貯水池への資金調達手段として電力部門を超えた促進的役割を果たすことができ、その貯水池が河川水の利用可能性の確保を助ける可能性がある。しかし、水量が少ない場合、複合的な利用が争いの可能性を引き起こし、エネルギー生産を減少させる可能性がある。

主な流域はいくつかの国家で共有されているため、地域的・国際的協調が重要となる。政府間の協定と国際機関によるイニシアチブの両方によって、これらの重要な協調が実際に支えられている [5.10.2, 5.10.3]。

第6章: 海洋エネルギー

6.1 はじめに

海洋エネルギーは、長期的な炭素排出量削減のポテンシャルを秘めているが、開発が初期段階であるため 2020 年までに短期的に大きな貢献をする可能性は低い。しかし、世界の海洋における 7,400EJ/年の理論的ポテンシャルは、現在の人間のエネルギーへの要求をはるかに上回る。政府の政策は、海洋エネルギー技術の発展に寄与しており、急速な進歩も可能であるという期待が高まっている。6 つの主な種類の海洋エネルギー技術は、様々な開発経路の可能性を持ち、現在の理解ではそのほとんどは環境への影響の可能性も低くなっている。研究開発及び実証が進み、普及するにつれ、海洋エネルギー技術の投資コスト及び均等化発電原価が現在の競争力の無いレベルが下がっているという良い兆しが現れている。このコスト削減が海洋エネルギーの広い普及を可能にするのに十分であるかどうかは、気候変動の緩和における海洋エネルギーの将来的な役割の評価のなかでも、最も不確実性が大きい [6ES, 6.1]。

6.2 資源ポテンシャル

海洋エネルギーは、海水を動力源として活用する、もしくは海水の化学・熱ポテンシャルを利用する技術から生産されたエネルギーと定義することが出来る。海洋の再生可能エネルギー源は、6 つの注目すべき供給源から得られ、それぞれ起源及び変換に必要な技術も異なる。これらの源は以下のとおりである。

波エネルギーは、海洋の表面を吹く風の運動エネルギーの置換から得られる。理論上の総波エネルギー資源は 32,000TWh/年 (115EJ/年) であるが、技術的ポテンシャルはそれを大きく下回る可能性が高く、波エネルギー技術の開発に依存している [6.2.1]。

潮汐（潮の満ち引き）は、地球、月、太陽間の引力の相互作用から得られる。世界の理論上の潮汐ポテンシャルは、1~3TW であり、比較的浅水域に位置している。また、技術的ポテンシャルは理論的ポテンシャルを大きく下回る可能性が高い [6.2.2]。

潮流は、潮汐と関連した沿岸海域の満ち引きに起因する流れから得られる。潮流の技術的ポテンシャルの現在の地域的推定値には、ヨーロッパの 48TWh/年 (0.17EJ)、中国の 30TWh/年 (0.11EJ/年) などがある。商業的に魅力的な場所としては、韓国、カナダ、日本、フィリピン、ニュージーランド、及び南アメリカと言える [6.2.3]。

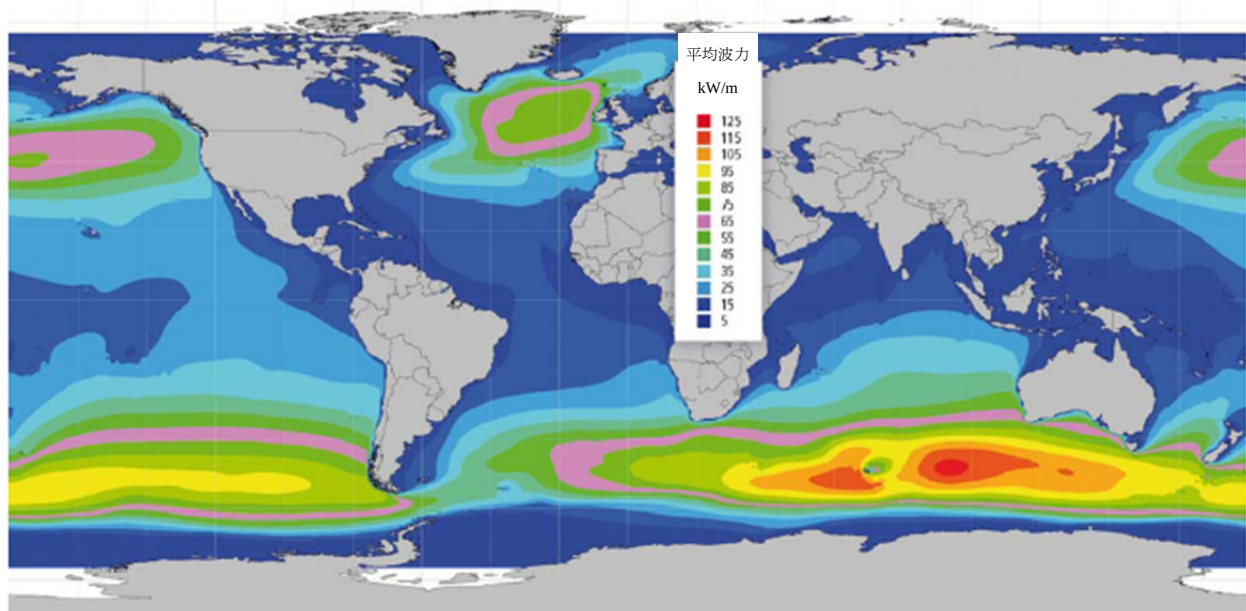
海流は、風成及び熱塩循環から得られる。最もよく特性が把握されている海流は、北アメリカのメキシコ湾流で、このフロリダ海流は 25GW の電力容量の技術的ポテンシャルを有する。将来的に可能性のある海洋循環を有する他の海域としては、南アフリカ沖のアガラス・モザンビーク海流、東アジア沖の黒潮、及び東オーストラリア海流が挙げられる [6.2.4]。

海洋温度差発電 (OTEC)は、海洋表層に熱として貯蔵される太陽エネルギーと通常 1,000m 以下の深層の低温海水によって生じる温度差から得られる。海洋温度差発電のエネルギー密度は比較的低いが、全体的な資源ポテンシャルは他の海洋エネルギーの形態よりもかなり大きい。2007 年の研究では、約 44,000TWh/年 (159 EJ/年) の定常電力の生産が可能になると推定しているものもある [6.2.5]。

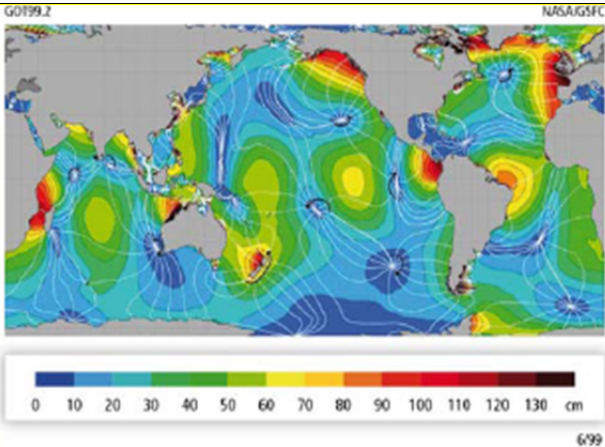
塩分濃度差（浸透膜発電）は、河口の淡水と海水の間の塩分濃度差から得られる。塩分濃度差の理論的ポテンシャルは、1,650TWh/年 6 EJ/年) と推定されている [6.2.6]。

図 TS.6.1 は、海洋エネルギー資源のうち、選択したものについての世界における分布例を示している。海流または塩分濃度差による電力など、地球規模で分散している海洋エネルギー資源もある。海洋温度差エネルギーは基本的に、赤道緯度（緯度 $0^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ）周辺の熱帯に位置しているが、年間波力が最も高いのは緯度 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ である。南半球の波力は、北半球よりも季節による変動が小さい。海流、海洋温度差エネルギー、塩分濃度差、及び幾らかの波力は、ベースロード電力の発電にも十分な信頼性を持っている。入手可能な文献はまだ初期段階にあり、海洋エネルギーの技術的ポテンシャルの不確かさも大きい。技術的な海洋エネルギー・ポテンシャルの推定値はばらつきが大きい [6.2.1～6.2.6]。

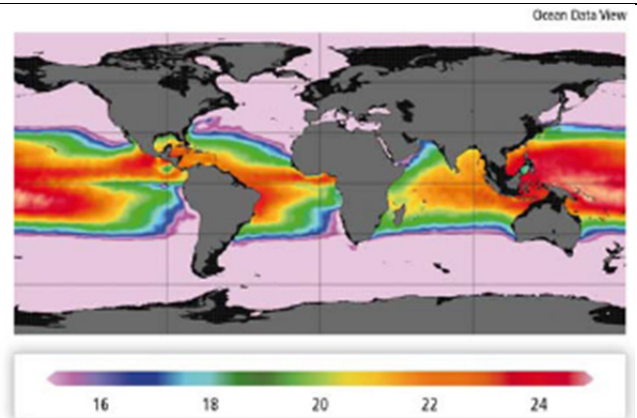
(a) 波力



(b) 潮汐



(c) 海洋温度差



(d) 海流



図 TS.6.1: 様々な海洋エネルギー資源の世界における分布[図 6.1, 6.2, 6.4, 6.3]

6.3 技術及び用途

現在の海洋エネルギー技術の開発状況は、構想段階及び基礎研究開発段階から試作段階、実証段階まで様々であるが、成熟していると考えられるのは潮汐発電技術のみである。現在、各海洋エネルギー源には多くの技術オプションがあるが、潮汐発電を除き、技術は収斂していない。過去 40 年間にわたって、その他の海洋産業（主に海底石油・ガス）は、材料、建造、防食、海底ケーブル、及び通信において大きく進歩してきた。海洋エネルギーは、これらの進歩から直接的に恩恵を受けると期待される [6.3.1]。

波のエネルギーを利用可能なエネルギーの形に変換するため、多種類の動作原理を持つ波力発電技術が考案されており、それらは多くの場合実証されている。主な動作原理としては、運動と波の相互作用（上下揺れ、前後揺れ、縦揺れ）によるものに加え、水深（深部、中部、浅部）及び陸からの距離（海岸線、沿岸、洋上）がある。波エネルギー技術は、振動水柱型（OWC:沿岸固定、浮体式）、振動物体型（洋上浮体式、海中式）、及び超波型（沿岸固定、浮体式）の 3 種に分類出来る [6.2.3]。動作原理を、図 TS.6.2 に示す。

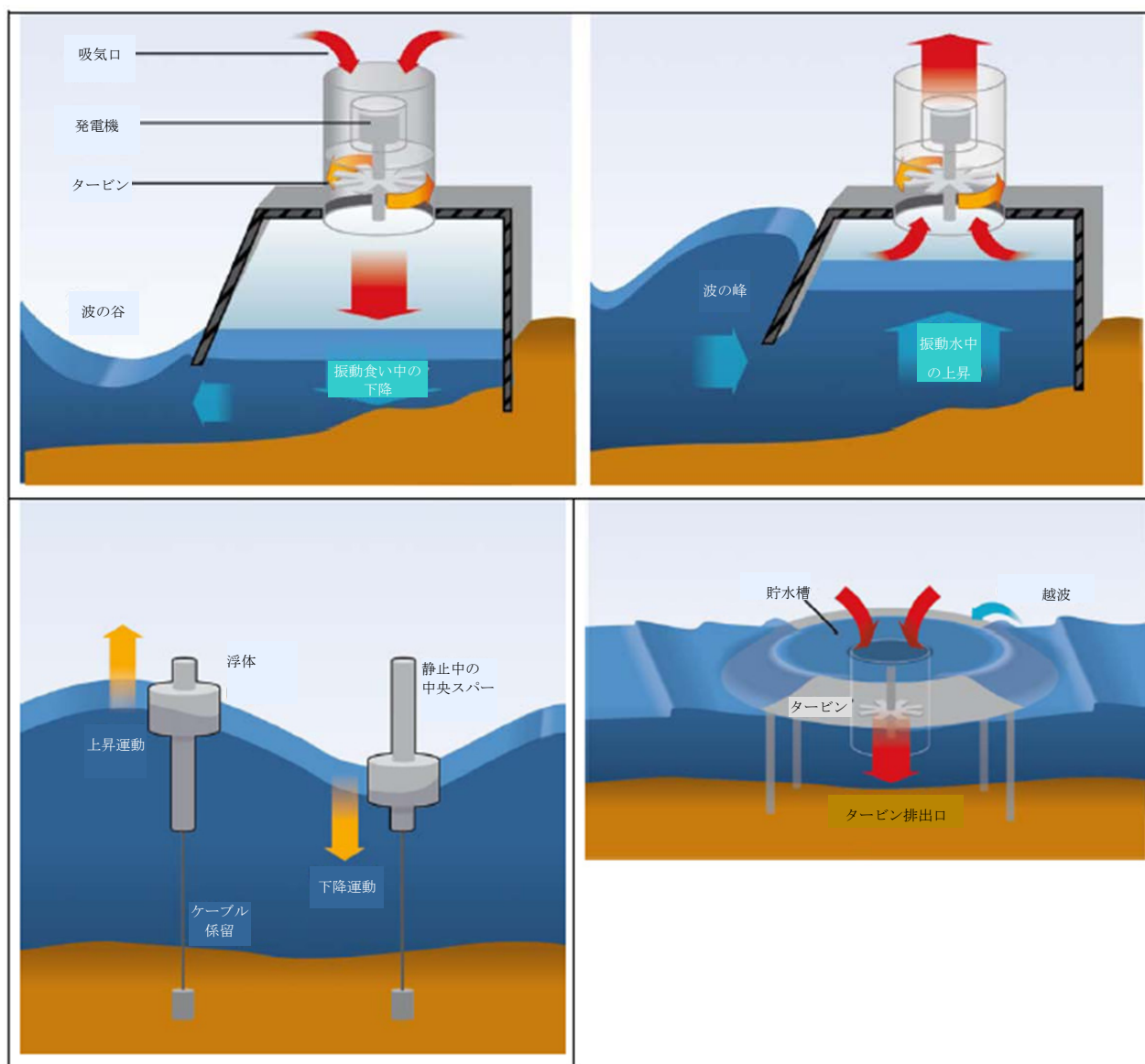


図 TS.6.2: 波力変換装置とその動作: (上) 振動水柱型装置、(左下) 振動物体型装置、(右下) 越波型装置 [図 6.6]。

潮汐エネルギーは、ダムで河口域を封鎖し河口に河川の水力発電ダムを設置することで利用出来る。このようなダムは、干潮時と満潮時両方において発電が可能であり、将来的には複数のダムを用いて連続的に発電することが可能になる。最新の技術はその概念のほとんどが、独立沿岸型の「潮汐ラグーン」である [6.3.3]。

潮流及び海流からの電力を利用する技術も開発中であるが、潮流エネルギー・タービンの方がより進歩している。潮流・海流エネルギー技術には、成熟した風力タービンと同様のものもあるが、海中タービンでは逆流、翼端のキャビテーション損傷、及び厳しい水中海洋条件を考慮しなければならない。潮流は、一般に一方向で速度は遅いが継続的である海流と比較して、二方向性を持って潮汐周期によって変動し、比較的速度がある。変換装置は、動作原理によって、図 TS.6.3 で示す軸流タービン、クロスフロー・タービン、及び往復運動機器に分類される [6.3.4]。

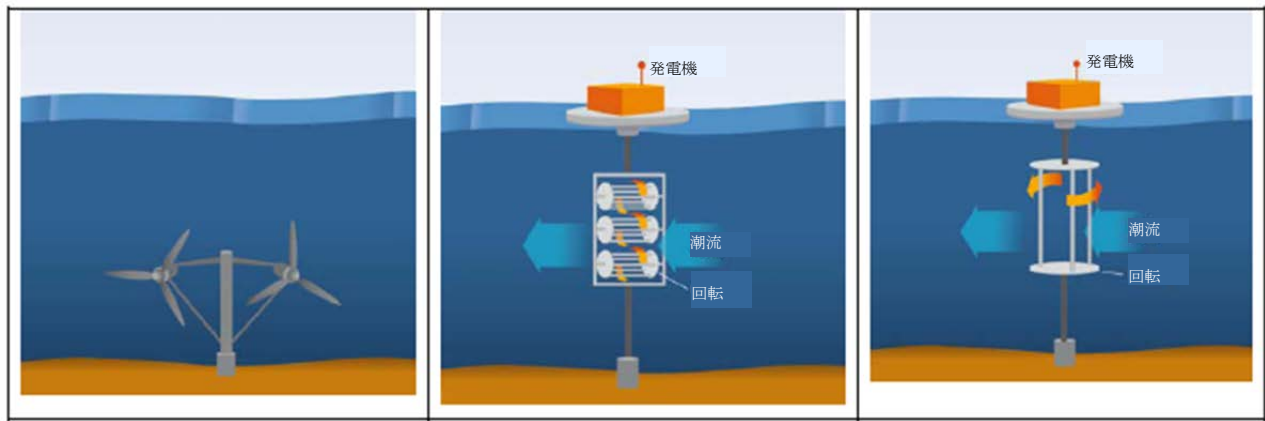


図 TS.6.3: 潮流エネルギー変換器とその動作: (左) 双子タービン水平軸装置、(中央) クロスフロー装置、(右) 垂直軸装置 [図 6.8]。

海洋温度差発電 (OTEC) プラントは、海面表層の温かい海水と深層 (基準レベルとしては 1,000m が使用されることが多い) の冷たい海水の温度差を利用して発電を行う。オープンサイクル海洋温度差発電システムは、海水を直接循環水として使用するが、クローズドサイクル・システムは熱交換器及び二次作動流体 (アンモニア水が最も一般的) を使用してタービンを駆動する。ハイブリッド・システムでは、オープンサイクル運転とクローズドサイクル運転の両方を使用する。海洋温度差発電技術の試験は行われてきたが、真空状態の維持、熱交換機の生物付着、及び腐食などの問題に遭遇している。現在の研究は、これらの問題の克服に焦点を当てている [6.3.5]。

河川の淡水と海水の塩分濃度差は、開発中である少なくとも 2 つの概念を用いて、電力源として利用することが出来る。逆電気透析 (RED) プロセスは、2 つの溶液の化学ポテンシャルにおける差を動力源とする概念である (図 TS.6.4)。浸透圧発電 (または浸透発電プロセス) は、塩分濃度の差による淡水が海水と混ざろうとする性質に起因する、自然に発生する浸透圧 (水圧ポテンシャル) の概念を利用する (図 TS.6.5) [6.3.6]。

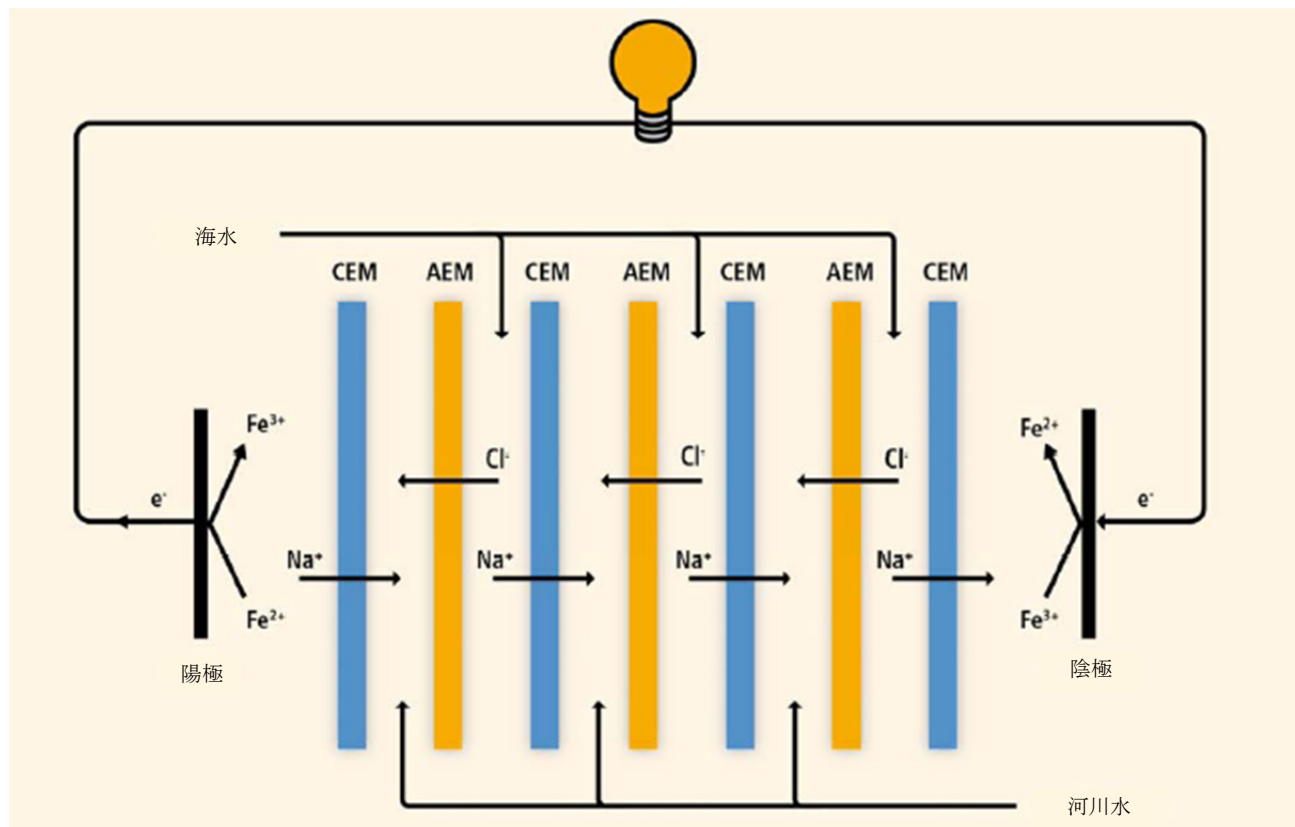


図 TS.6.4: 逆電気透析 (RED) システム [図 6.9]

注: CEM=陽イオン交換膜、AEM=陰イオン交換膜、Na=ナトリウム、Cl=塩素、Fe=鉄

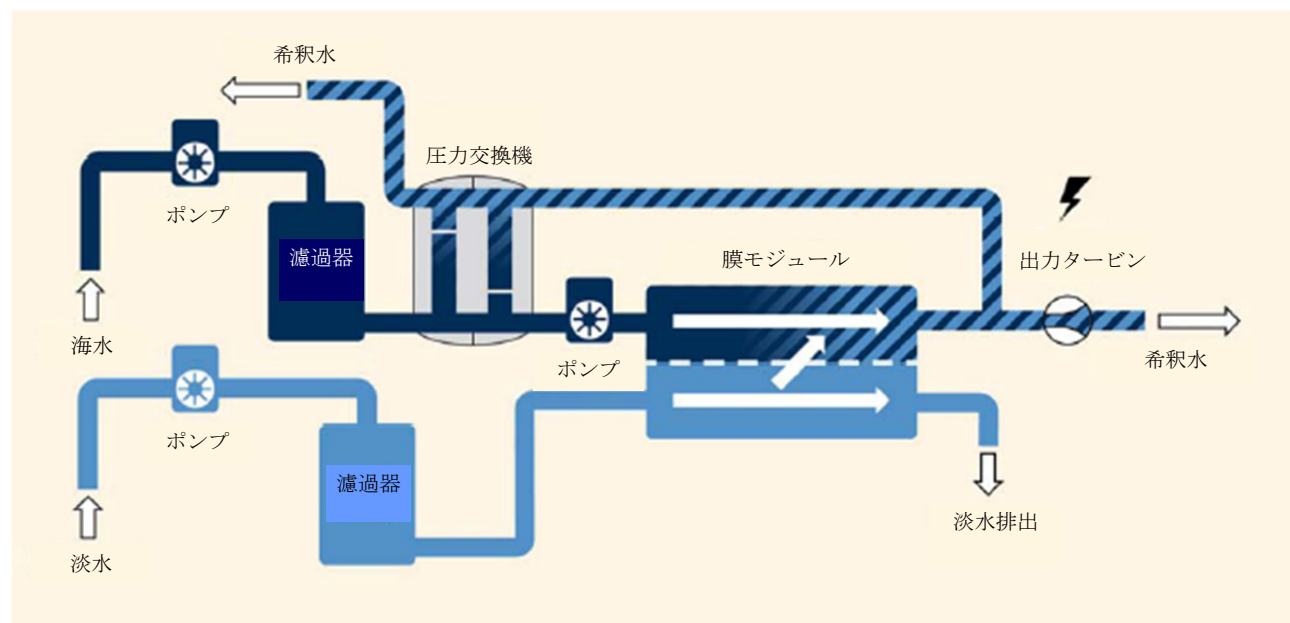


図 TS.6.5: 浸透圧発電 (PRO) プロセス [図 6.10]

6.4 市場及び産業の開発の世界的及び地域的状态

波・潮汐発電技術の研究開発プロジェクトは、過去 20 年間で急増し、中には現在本格的な商業化前の試作段階に入っているものもある。現在、唯一の利用可能な実用規模かつ運用可能な海洋エネルギー技術は潮汐発電である。その最も良い例は、1966 年に竣工したフランス北西部の 240MW のランス潮汐発電所である。254MW の始華発電所（韓国）は、2011 年に運用を開始する予定である。海洋温度差発電、

塩分濃度差、海流を含むその他の海洋エネルギー源を開発する技術は、まだ構想、研究開発、あるいは初期試作段階である。現在、100 を超える様々な海洋エネルギー技術が 30 以上の国で開発中である [6.4.1]。

海洋エネルギーの研究開発及び産業展開に出資する主な投資家は、各国の政府、連邦政府、州政府で、さらに主なエネルギー公共事業及び投資会社がそれに続く。各国及び地域の政府は、開発を支援する財政・規制・法的インセンティブにおいて、特に海洋エネルギーを支援している [6.4.7]。

海洋エネルギーの産業投資はごく初期段階であり、現在のところこれらの技術に関する製造業は存在していない。しかし、関心が高まるにつれ、新しい独自の革新的な側面とともに、生産能力、技術、及び性能が関連する産業から移転されてくる可能性がある。海洋エネルギーの興味深い特徴の 1 つとして、多くの国立の海洋エネルギー試験センターの開発が挙げられ、それらは装置実験、検査、及び先端研究開発の拠点となっている [6.4.1.2]。

産業開発の状況は、最近の海洋エネルギーシステムの産業展開によって評価することが出来る。

波力: 複数の沿岸固定式波力プロトタイプ装置が世界中で運用されている。2 つの振動水柱型装置が、ポルトガルとスコットランドで約 10 年間運用されている。また、これとは別に 2 つの洋上振動水柱型装置が、オーストラリアとアイルランドにおいて試作規模で試験されてきた。1990 年から 2005 年にかけてインドの南海岸沖でも振動水柱型が運用されていた。オーストラリア、ブラジル、デンマーク、フィンランド、アイルランド、ノルウェー、ポルトガル、スペイン、スウェーデン、ニュージーランド、英国、及びアメリカで、多くの企業が海上でパイロット規模または商業化前の試作品の実験をしており、最大のもので 750kW である [6.4.2]。

潮汐: フランスにあるラ・ランスの 240MW の発電プラントは、1996 年から運用されている。それ以降、その他の小規模プロジェクトが中国、カナダ、及びロシアで開始されている。韓国にある始華の 254MW の発電所は 2011 年中に稼働開始予定で、他の大規模なプロジェクトもいくつか検討されている [6.4.3]。

潮流発電及び海流発電: 概念設計または試作品開発の段階にある潮流装置は、おそらく 50 以上あると思われるが、大規模装置の開発コストはまだ実証されていない。最も進んでいる例はシーゲンの潮流タービンである。アイルランド北部に設置されており、1 年以上にわたって送電網に電力を供給している。アイルランドの企業がスコットランドで、さらに最近では中国でダクト付きタービンの試験を行っている。2 つの企業が、ノルウェー及びスコットランドで実証規模の垂直軸タービンを、別の企業がイタリアで垂直軸タービンを実証した。最後に、往復稼働装置が 2009 年に英国で実証された。これまで海流に関してはパイロットまたは実証プラントは導入されていないが、技術的に低速の海流も利用出来るようになれば、かなり規模は大きくなると想定される [6.4.4]。

海洋温度差発電: 日本、インド、アメリカ、及びその他いくつかの国が、海洋温度差発電パイロットプロジェクトの試験を行った。その多くは、ポンプの作用、真空状態の維持、及びパイプに関する工学的な課題に挑戦し経験をかせねている。大規模な海洋温度差発電の開発は、技術が費用対効果の高いエネルギー供給装置となる段階まで進めば、太平洋諸島、カリブ諸島、中央アメリカやアフリカ諸国を含む熱帯の海洋国家において大きな市場を形成する可能性がある [6.4.5]。

塩分濃度差発電: 浸透圧発電の研究はノルウェーで進められており、2009 年からの商業規模の浸透圧発電プラントの実現に向け、その一部として運転している。同時に、逆電気透析発電技術は、オランダで 75 年間使用されている締切大堤防に組み込む改修策として提案されている [6.4.6]。

6.5 環境及び社会的影響

海洋エネルギーは、運転中に二酸化炭素を直接排出することはないが、原材料の抽出、構成要素の製造、建設、保守、解体など、海洋エネルギーシステムのライフサイクルの別の過程において、温室効果ガスが排出される場合がある。1980 年以降に発表されたライフサイクル評価研究の包括的な検討によって、波・潮汐発電システムからのライフサイクル温室効果ガス排出量は 23g CO₂ eq/kWh 以下であり、波力発電ではライフサイクル温室効果ガス排出量の推定中央値は約 8g CO₂ eq/kWh となっている。他の種類の

海洋エネルギー技術からのライフサイクル排出量を推定するには、まだ入手可能な研究はあまりない。ただし、化石エネルギー発電技術に比べれば、海洋エネルギー装置からのライフサイクル温室効果ガス排出量は低いと考えられる [6.5.1]。

海洋エネルギー・プロジェクトの地域的な社会及び環境への影響は、実際に導入が増えるにつれて評価されるが、他の海運・海上産業の経験に基づいて推定することも可能である。海洋エネルギー技術の環境リスクは比較的低いと思われるが、海洋エネルギー発展の初期段階では、社会及び環境に関する問題によって最終的にどの程度開発が制約を受けるかという点に関しては不確かさが残る [6ES]。

海洋エネルギー技術の環境及び社会への影響は、それぞれの技術によって異なっている。海洋エネルギーの可能性のある好ましい影響としては、海洋装置周辺の海域においては他の人間の活動を減らすことによる海洋生物に対する悪影響を回避し、エネルギー供給と地域の経済成長、雇用、観光の増強などが挙げられる。マイナスの影響は、景観の悪化とその場所の利用へのアクセスの低下、建設中の騒音、運転中の騒音と振動、電磁場、生物相と生息環境の破壊、水質の変化と化学物質または石油流出などによる汚染の可能性、及び海域の生態系に対するその他の限定的な影響が挙げられる [6.5.2]。

6.6 技術の向上、イノベーション、及び統合の展望

新規技術として、海洋エネルギー装置は大きな技術的進歩のポテンシャルを持っている。この進歩を達成するためには、装置に特有の研究開発及び発展が重要である、海洋エネルギー変換装置の技術の向上及びイノベーションには、関連する分野の開発による影響も受ける可能性も高い [6.6]。

より広範囲の電力ネットワークへの海洋エネルギーの統合には、様々な資源の多種多様な発電の特徴を理解することが必要になる。たとえば、潮汐資源による発電は 1～4 時間では非常に変動性が高くなるが、一ヶ月以上の期間では変動性は非常に限定的となる [6.6]。

6.7 コストの傾向

商業的な市場はまだ海洋エネルギー技術の開発を進めていない。政府の支援による研究開発及び国家政策インセンティブは重要な動機づけとなる。潮汐発電以外の海洋エネルギー技術には成熟したものがないため（現在、他の技術の経験は実証・試作装置の検証でのみ利用可能になりつつある）、ほとんどの海洋エネルギー技術の経済的実用可能性を正確に評価することは難しい [6.7.1]。

表 TS.6.1 は、代表的な海洋エネルギーのそれぞれの均等化発電原価に影響する主なコスト要因に関する、入手可能なものの中で最良のデータを示している。ほとんどの場合、ピア・レビューされた参照データ及び実際の運用経験が不足しているため、これらのコストやパフォーマンスのパラメータはわずかな情報に基づいており、そのため工学知識に基づく推定コスト及びパフォーマンスを反映している場合が多い。少数ながら現在の投資コストが見られるものもあるが、それらはわずかなプロジェクト及び研究の例に基づいており、産業全体を代表するものとは言い難い [6.7.1]。

表 TS.6.1: 全ての代表的な海洋エネルギー技術のにおいて中心となる利用可能なコスト及びパフォーマンスのパラメータの要約 [表 6.3]

海洋エネルギー技術	投資コスト (US ドル/kW (2005 年))	年間運転保守コスト (US ドル/kW (2005 年))	設備利用率 (CF) (%)	設計寿命 (年)
波	6,200~16,100	180	25~40	20
潮汐	4,500~5,000	100	22.5~28.5	40
潮流	5,400~14,300	140	26~40	20
海流	該当なし	該当なし	該当なし	20
海洋温度差	4,200~12,300*	該当なし	該当なし	20
塩分濃度差	該当なし	該当なし	該当なし	20

※海洋温度差エネルギーのコスト数値については 2005 年時 US ドルに変換していないことに留意。

Annex II で概説している、標準化された方法、及び Annex III で要約しているコストとパフォーマンスのデータに基づき、膨大かつ様々な入力パラメータの下、潮汐発電（現在のところ唯一の商業利用が可能な海洋エネルギー技術）の均等化発電原価は、12~32US ドル/kWh (2005 年) になると計算されている。しかし、この幅は、現在までの経験の状態を想定した場合のみの指標とするべきである [1.3.2, 6.7.1, 6.7.3, 10.5.1, Annex II, Annex III]。

技術開発が初期段階にあるため、海洋エネルギーの将来的なコストの推定値は推測に基づかざるを得ない。しかし、海洋エネルギーのコストは、研究開発、実証、及び普及が進むにつれ、時間とともに低減すると予想されている [6.7.1~6.7.5]。

6.8 普及のポテンシャル

おおよそ 2008 年まで、海洋エネルギーは主な世界エネルギー・シナリオのモデル化において全く考慮されてこなかったため、将来の世界エネルギー供給及び気候変動緩和に対するその潜在的な影響はまだ調査が始まったばかりである。可能性のある成果は多岐にわたることもあって、発表された海洋エネルギーに関するシナリオ文献は少なく、まだ導入レベルである。具体的には、海洋エネルギーの普及のシナリオは、ここでは 3 つの主要な出典でしか検討されていない。それは、Energy [R]evolution (以下 E [R]) 2010、IEA の World Energy Outlook (以下 WEO) 2009、及び Energy Technology Perspectives (以下 ETP) 2010 である。E [R]及び ETP では複数のシナリオが検討されているが、WEO では単一の参照シナリオが示されている。各シナリオは、表 TS.6.2 にまとめられている。

海洋エネルギー普及の選択肢を記述したシナリオの初期の発表は、将来のエネルギー供給及び気候変動緩和における海洋エネルギーの貢献の可能性を示すことを目的とした、中長期的シナリオにおける海洋エネルギーの潜在的役割を検討する初めての試みである。限られた既存のシナリオが示すように、海洋エネルギーは、温室効果ガス排出を相殺して長期的な気候変動の緩和を助け、普及予測によると 2050 年までに最大 1,943TWh/年 (～7EJ/年) のエネルギー供給を実現するポテンシャルを持っている。他の開発されたシナリオでは、海洋エネルギーから 25TWh/年 (0.9EJ/年) の普及しか想定していないものもある。結果にばらつきが大きいのは、気候変動緩和がエネルギー部門の変革をどの程度促すかという不確かさによるものであるが、海洋エネルギーの場合は、様々な海洋エネルギー技術が有効なコストで商業的に利用可能になる時期と、その可能性についての特有の不確かさも原因となっている。気候変動緩和における海洋エネルギーの潜在的な役割をより良く理解するには、継続的な技術の進歩が必要となるだけでなく、シナリオのモデル化過程において、資源ポテンシャル、現在と将来の投資コスト、運用・保守コスト、及び予想される設備利用率の良いデータを用いて、様々な代表的な可能性のある海洋エネルギー技術をさらに織り込む必要がある。世界及び地域規模でのデータの利用可能性が広がることは、シナリオの文献でカバー出来る海洋エネルギーを広げるために重要な要素である [6.8.4]。

表 TS.6.2: 海洋エネルギーを含む主要な発表された研究の中長期的シナリオの主な特徴 [表 6.5]

シナリオ	普及 TWh/年 (PJ/年)				GW	注
	2010	2020	2030	2050	2050	
Energy [R]evolution (参考)	該当なし	3 (10.8)	11 (36.6)	25 (90)	該当なし	政策の変更なし
Energy [R]evolution	該当なし	53 (191)	128 (461)	678 (2,440)	303	50%の炭素削減を仮定
Energy [R]evolution (高度)	該当なし	119 (428)	420 (1,512)	1,943 (6,994)	748	80%の炭素削減を仮定
世界エネルギー展望 2009	該当なし	3 (10.8)	13 (46.8)	該当なし	該当なし	E [R]の参照ケースの基礎
ETP BLUE map 2050	該当なし	該当なし	該当なし	133 (479)	該当なし	電力部門が実質的に脱炭素化される場合
ETPBLUE map no CCS 2050	該当なし	該当なし	該当なし	274 (986)	該当なし	BLUE Map Variant: 二酸化炭素回収・貯留が不可能である場合
ETPBLUE map hi NUC 2050	該当なし	該当なし	該当なし	99 (356)	該当なし	BLUE Map Variant: 原子力のシェアが 2,000GW まで増加する場合
ETP BLUE map hi REN 2050	該当なし	該当なし	該当なし	552 (1,987)	該当なし	BLUE Map Variant: 再生可能エネルギーのシェアが 75%に増加する場合
ETP BLUE map 3%	該当なし	該当なし	該当なし	401 (1444)	該当なし	BLUE Map Variant: 発電プロジェクトの割引率を 3%に設定した場合

第7章: 風力エネルギー

7.1 はじめに

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

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

7.2 資源ポテンシャル

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

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

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

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

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

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

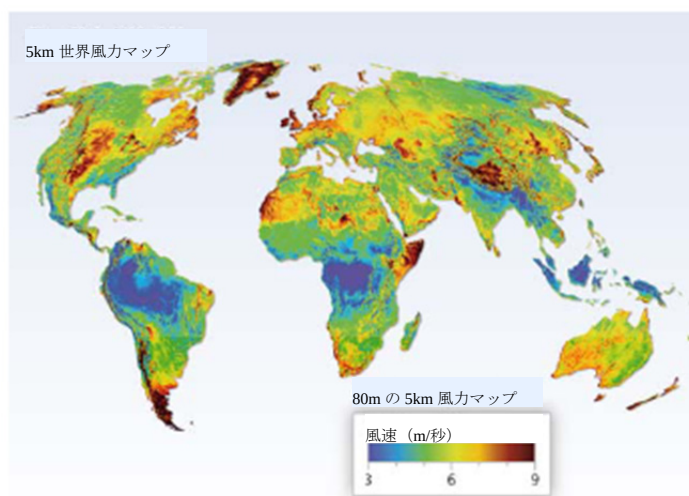


図 TS.7.1: 5km×5km の解像度の世界の風資源マップの例 [図 7.1]

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

7.3 技術及び応用

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

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

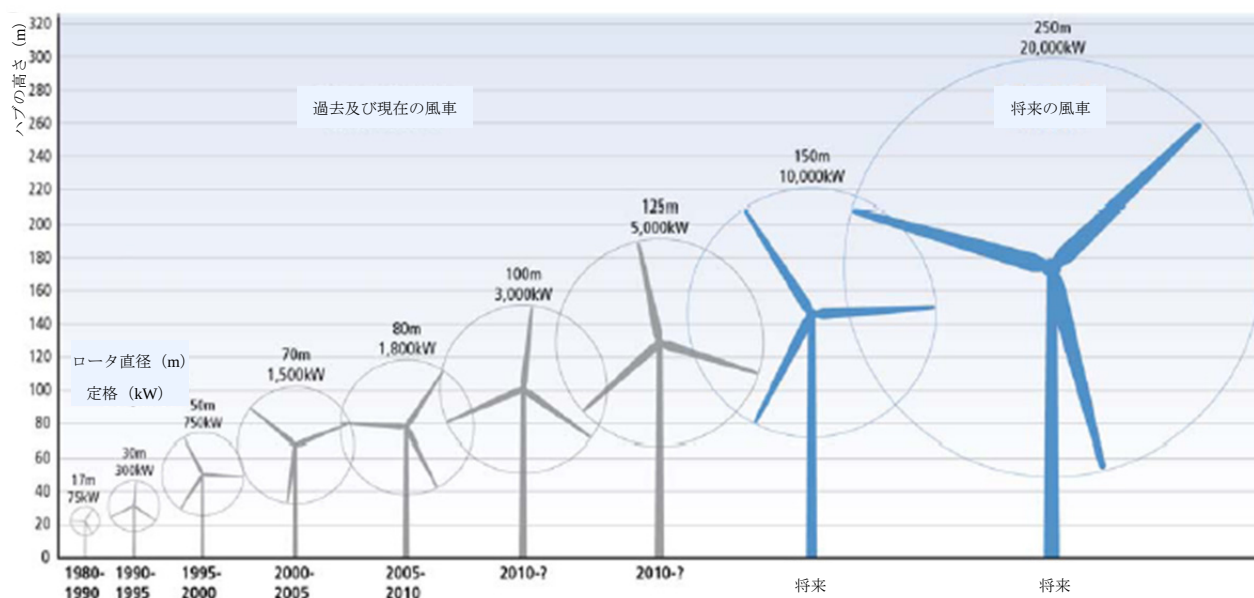


図 TS.7.2: 一般的な商用風車のサイズの発展[図 7.6]

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

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

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

7.4 市場及び産業発達の世界的・地域的状況

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

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

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

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

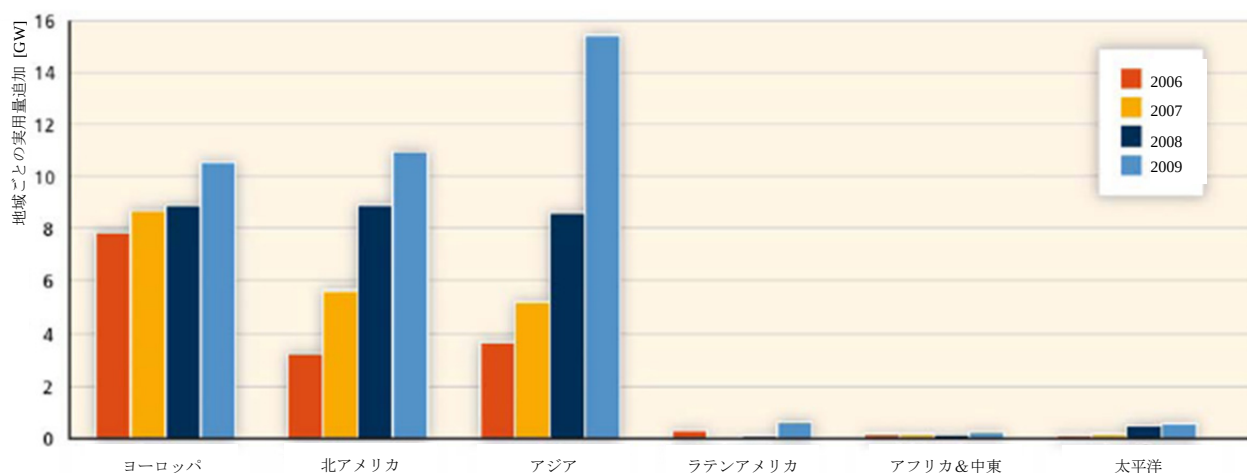


図 TS.7.3: 地域ごとの年間風力発電容量の追加 [図 7.10]

注: 図で示されている地域は、この調査で定義されたものである。

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

7.5 系統連系問題の短期的課題

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

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

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

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

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

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

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

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

7.6 環境及び社会的影響

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

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

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

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

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

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

7.7 技術の改良及びイノベーションの見通し

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

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

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

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

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

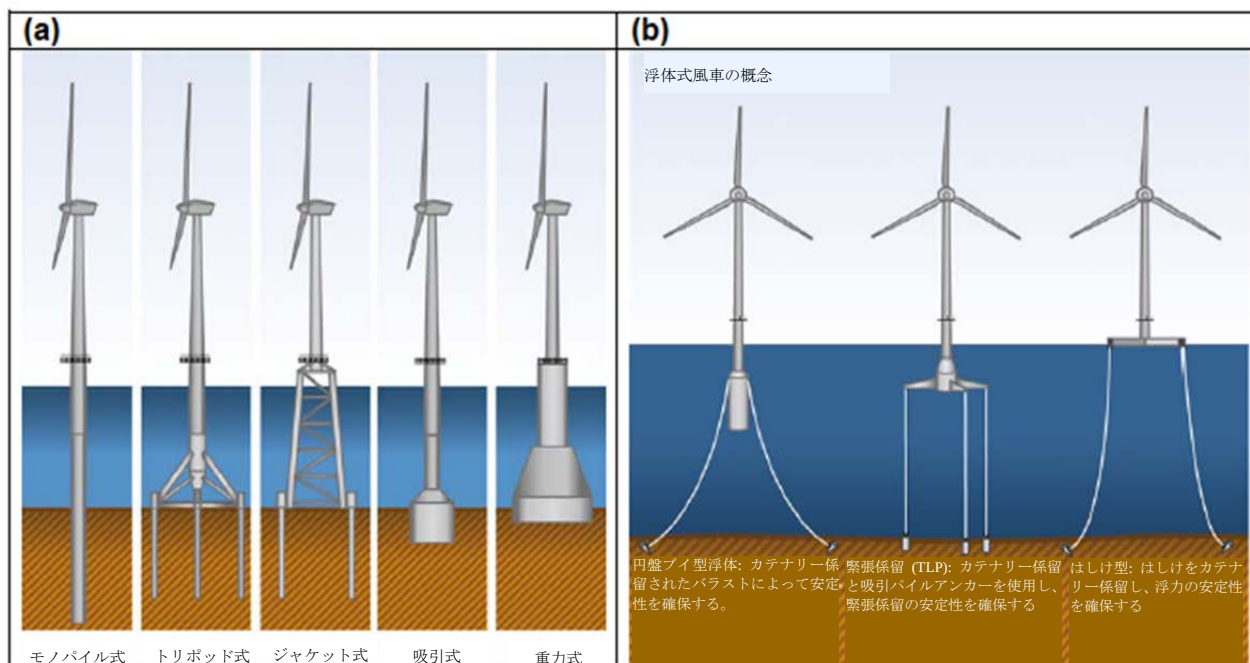


図 TS.7.4: 洋上風車の基礎設計：(a) 短期的コンセプト、(b) 浮体式洋上風車のコンセプト [図 7.19]

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

7.8 コストの動向

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

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

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

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

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

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

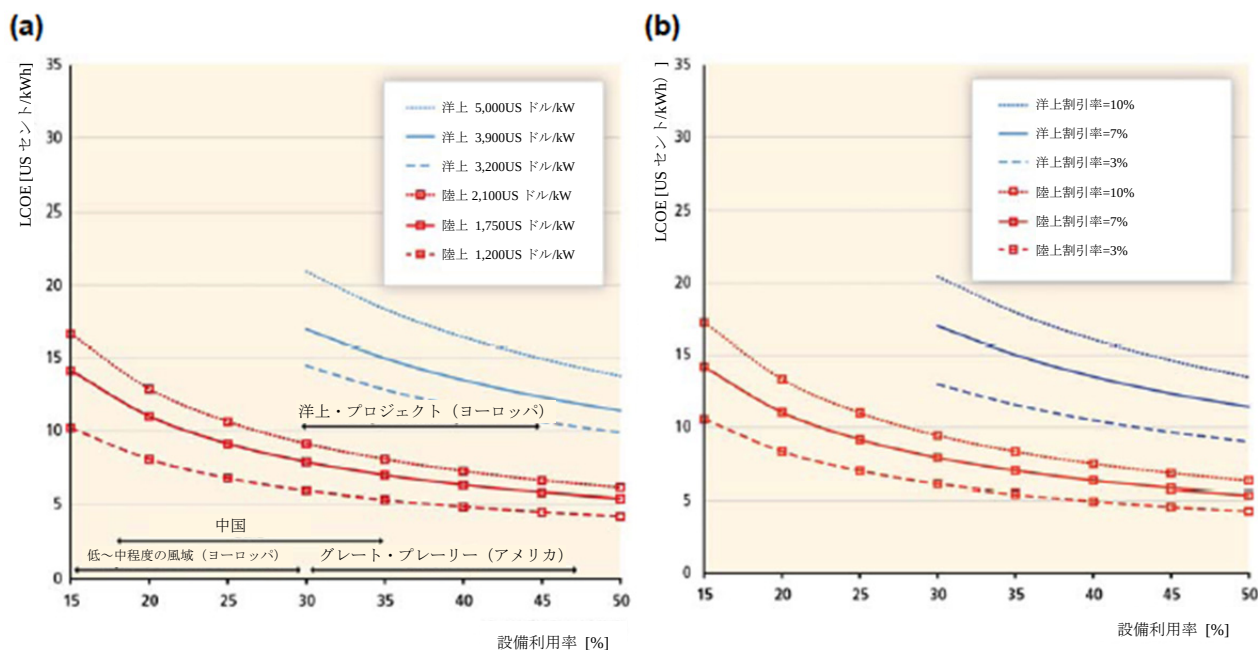


図 TS.7.5: (a)設備利用率と投資コストの関数(※)としての、また(b)設備利用率と割引率の関数(※※)としての陸上、洋上風力風車の均等化発電原価(2009 年) [図 7.23]

注:

※割引率は 7%と想定。

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

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

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

7.9 導入ポテンシャル

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

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

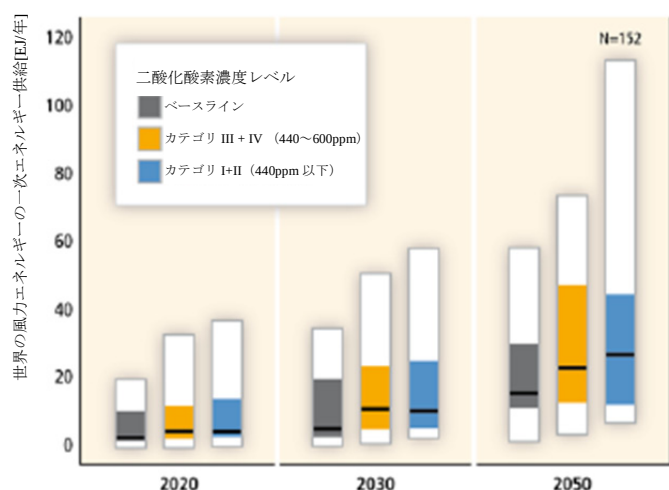


図 TS.7.6: 長期的シナリオにおける世界の総供給電力量に占める風力発電のシェア（中央値、25～75% の範囲、及びシナリオの結果の全範囲。色分けは 2100 年の大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく。数値の基礎となるシナリオの具体的な数を右上の角に示す）[図 7.24]。

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

第 8 章: 現在、将来のエネルギーシステムへの再生可能エネルギーの統合

8.1 序論

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

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

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

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

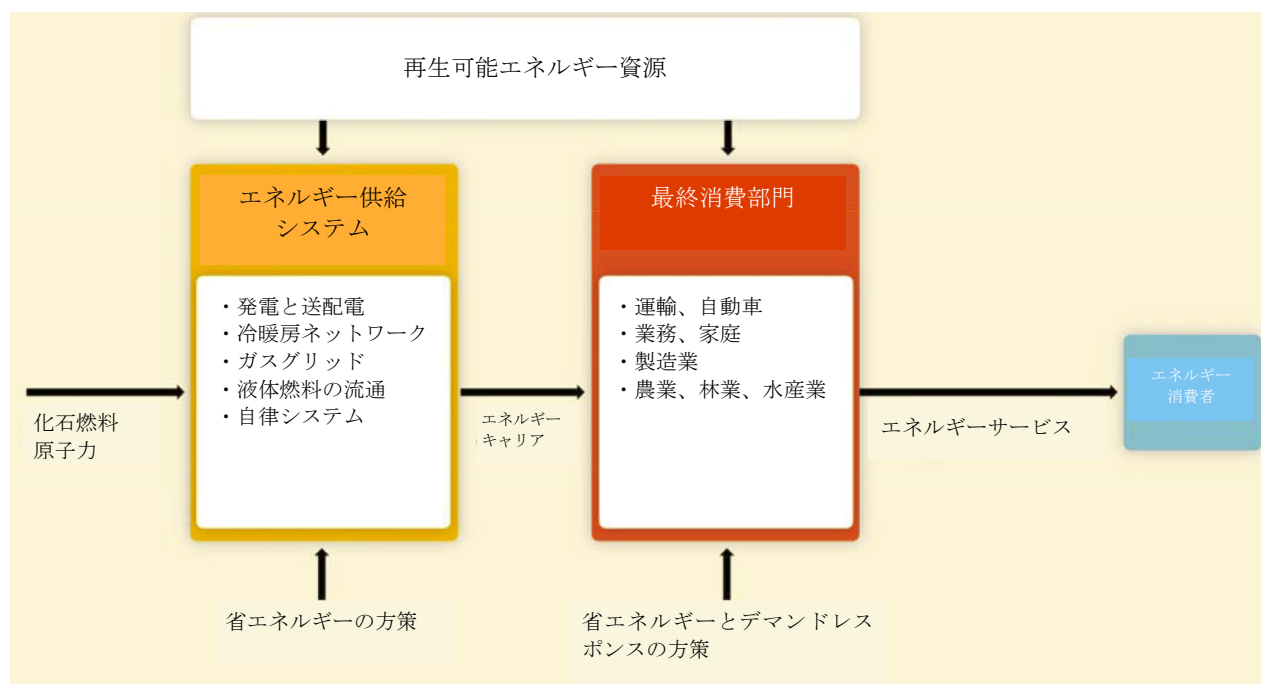


図 TS.8.1: エネルギーのサービスの提供に向けた、エネルギー供給システムまたはオンサイトでの最終消費部門に対する再生可能エネルギーの統合の道筋 [図 8.1, 8.1]。

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

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

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

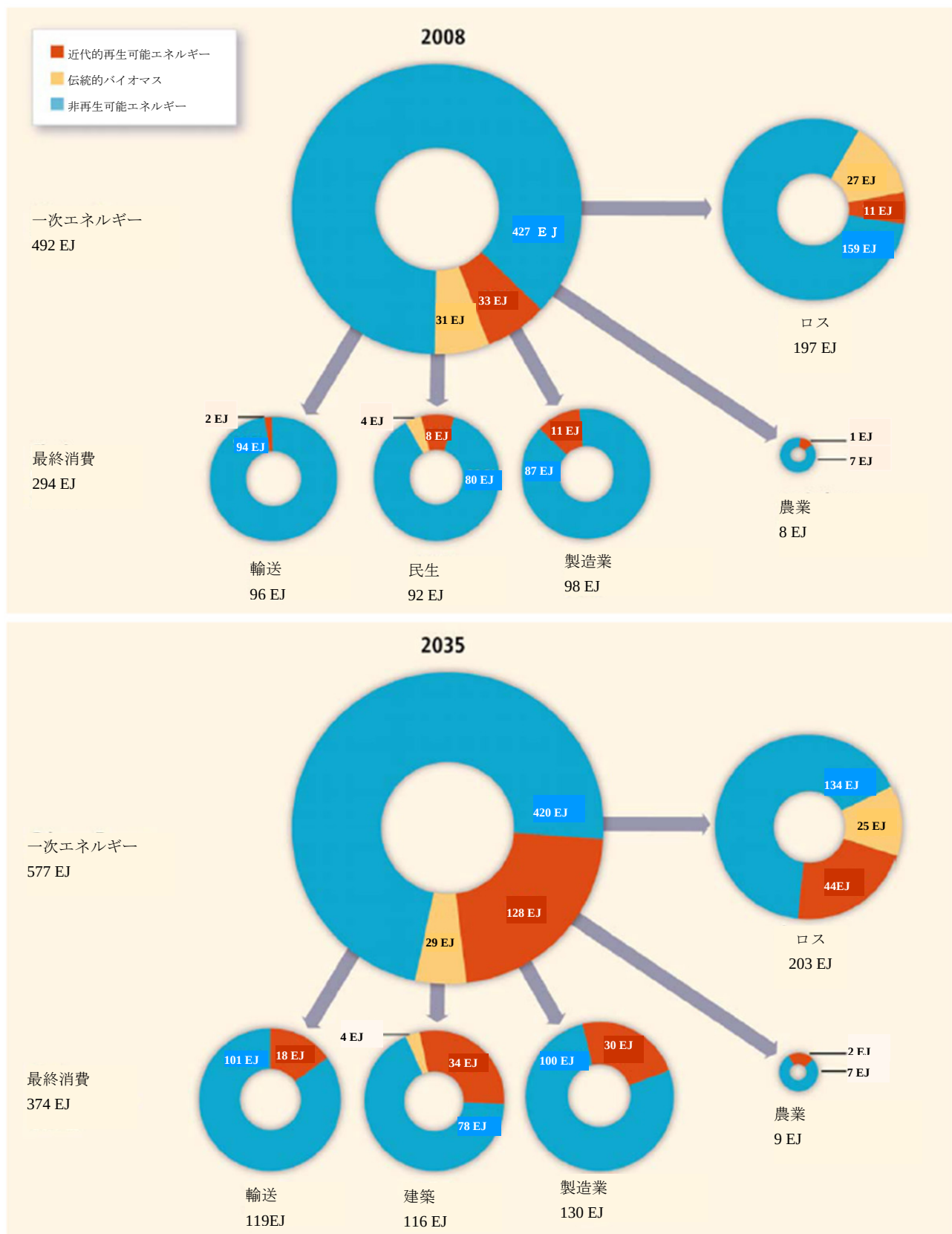


図 TS.8.2: 2008 年における輸送、民生（伝統的バイオマスを含む）、産業、農業の各部門における一次エネルギーと最終消費エネルギーにおける再生可能エネルギーの割合（赤）と、二酸化炭素濃度を 450ppm で安定させるための 2035 年での再生可能エネルギーの割合。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

8.2 電力システムへの再生可能エネルギーの統合

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

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

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

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

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

¹⁶ (訳注) kW 価値と呼ばれる。以下「容量価値」とする。

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

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

表 TS.8.1: 再生可能エネルギー技術の統合に関する特徴[表 8.1]

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

※集光型太陽熱発電は、米国南西部で 6 時間の地熱貯蔵を想定

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

注:

電源容量: 一般的なプラントの発電容量の範囲

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

8.3 冷暖房ネットワークへの再生可能エネルギーの統合

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

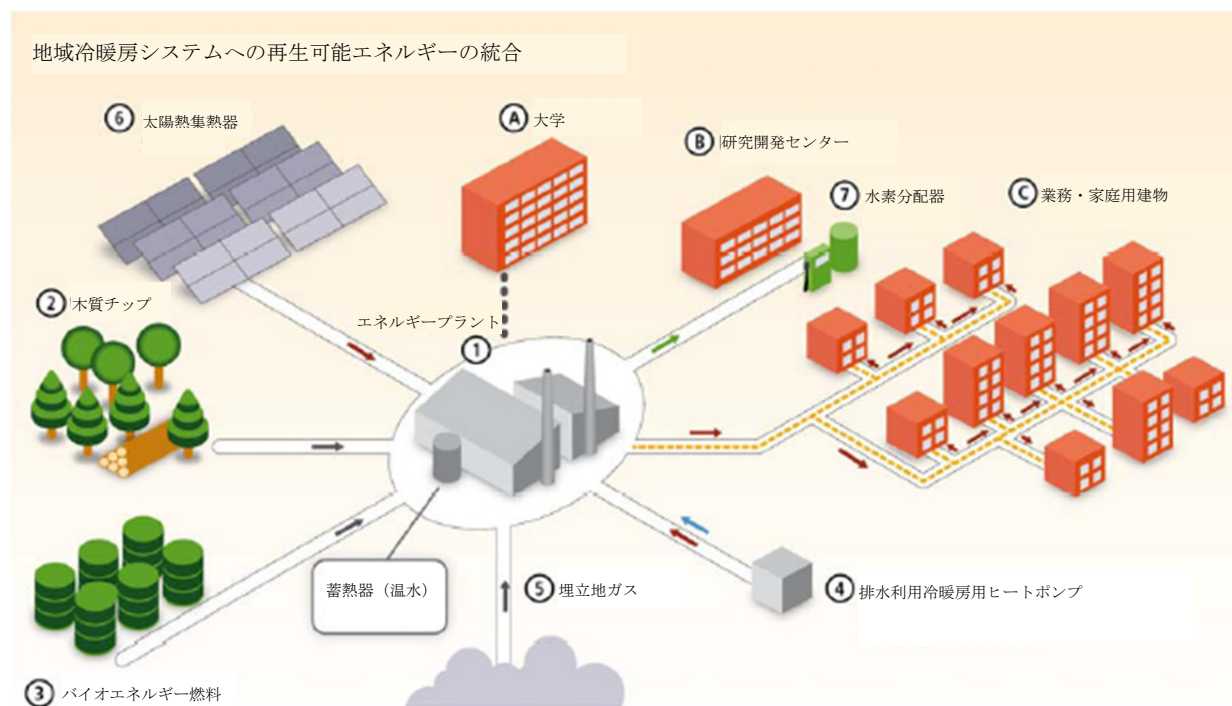


図 TS.8.3: 再生可能エネルギーをベースにした統合的なプラント（ノルウェーのリレストロム）。変動性の再生可能エネルギー源、熱貯蔵、水素の製造分配システムを組み合わせた地域冷暖房システムで、大学、研究開発センター、様々な業務用建物・住宅に供給（投資総額は約 2,500 万 US ドル（2005 年）で、2011 年に完成予定）。（1）1,200m³ のタンク型蓄熱器を持つ中央エネルギーシステム（2）木質燃焼システム（20MW_{th}）（排煙による排熱回復装置つき）、（3）バイオ・オイルバーナー（40MW_{th}）、（4）ヒートポンプ（4.5MW_{th}）、（5）ごみ処分場ガスのバーナ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

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

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

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

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

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

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

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

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

8.4 ガス導管網への再生可能エネルギーの統合

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

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

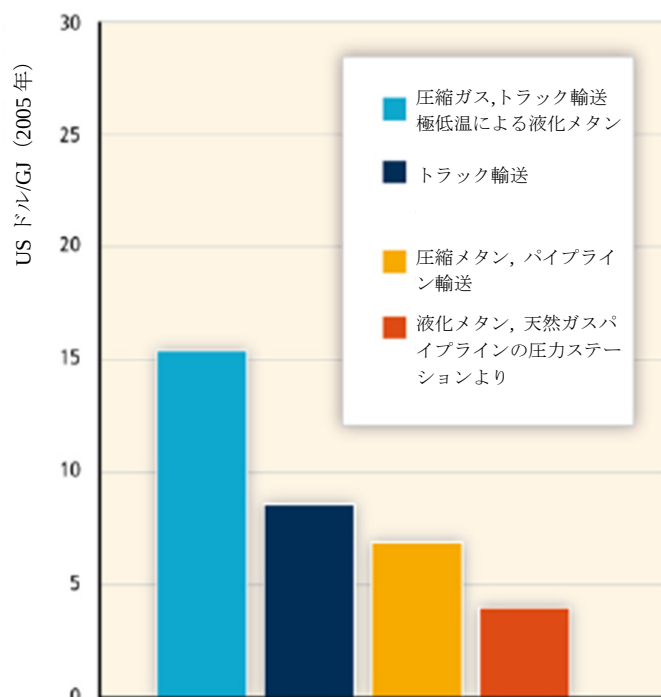


図 TS.8.4: 中規模なバイオメタンの配送と充填コストの比較（圧縮または液化のいずれか。トラックかパイプラインによる配送） [図 8.9]

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

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

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

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

8.5 液体燃料への再生可能エネルギーの統合

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

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

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

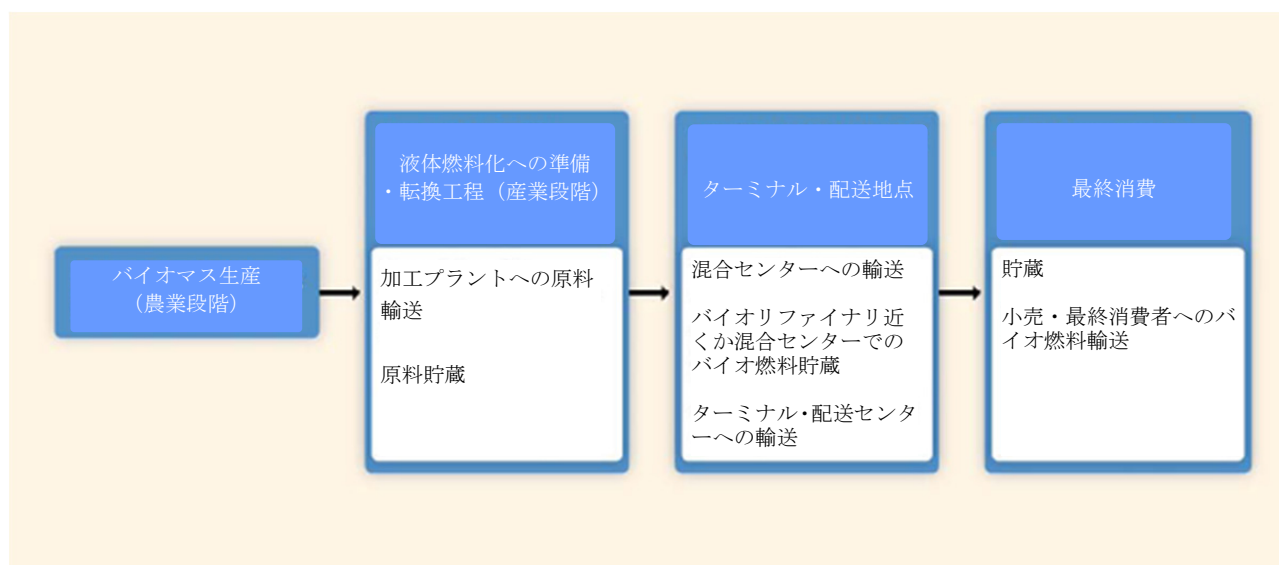


図 TS.8.5: 液体バイオ燃料の生産、混合、配送システム。バイオマス原料によらず類似している[8.2.4][図 8.11]。

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

8.6 自立システムへの再生可能エネルギーの統合

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

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

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

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

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

8.7 最終消費部門：移行の道筋に向けた戦略的要素

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

8.7.1 輸送

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

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

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

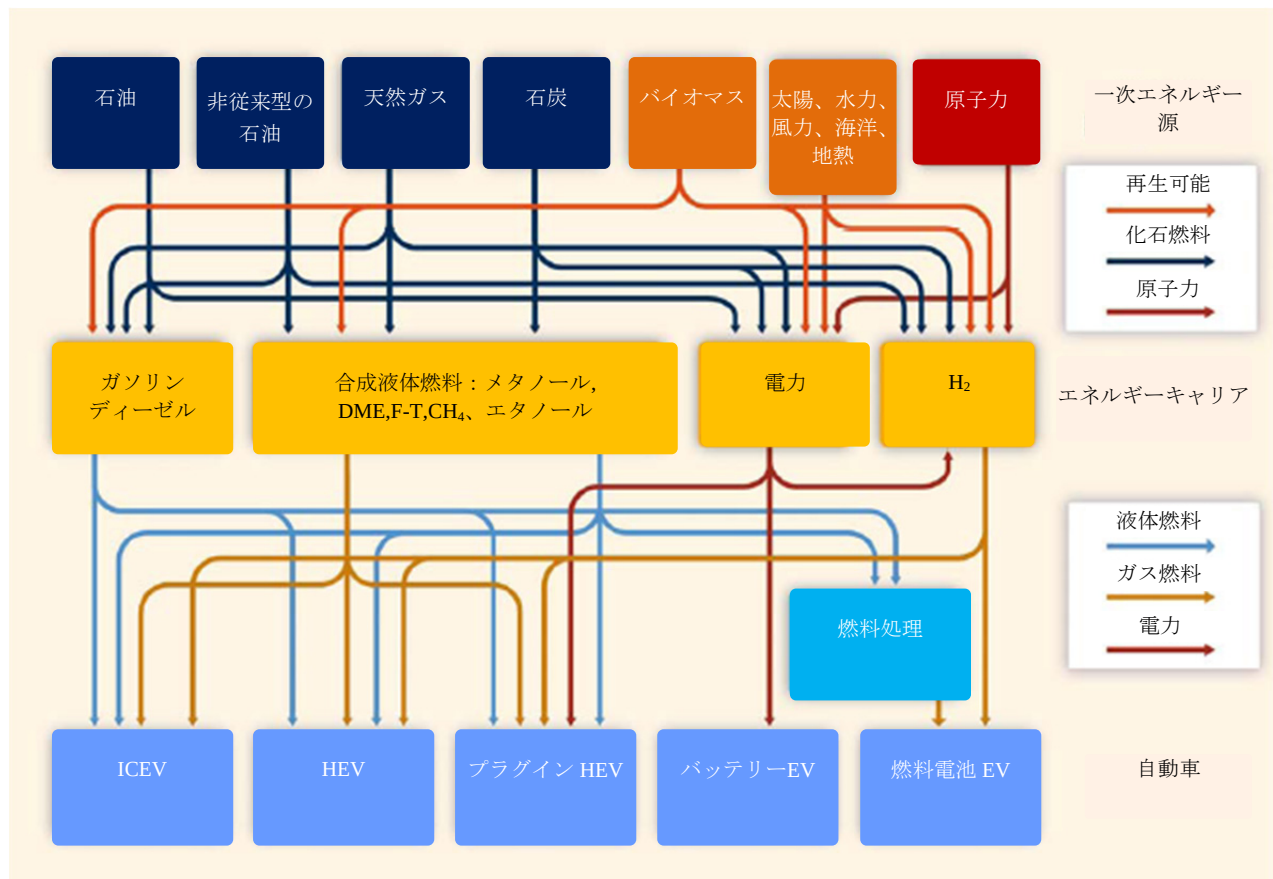


図 TS.8.6: 軽量自動車燃料の道筋の可能性。一次エネルギー源（上）から、エネルギー媒体を通じ、最終消費である自動車駆動系の選択肢（下）へ（再生可能エネルギー源はオレンジ色で表示） [図 8.13]

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

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

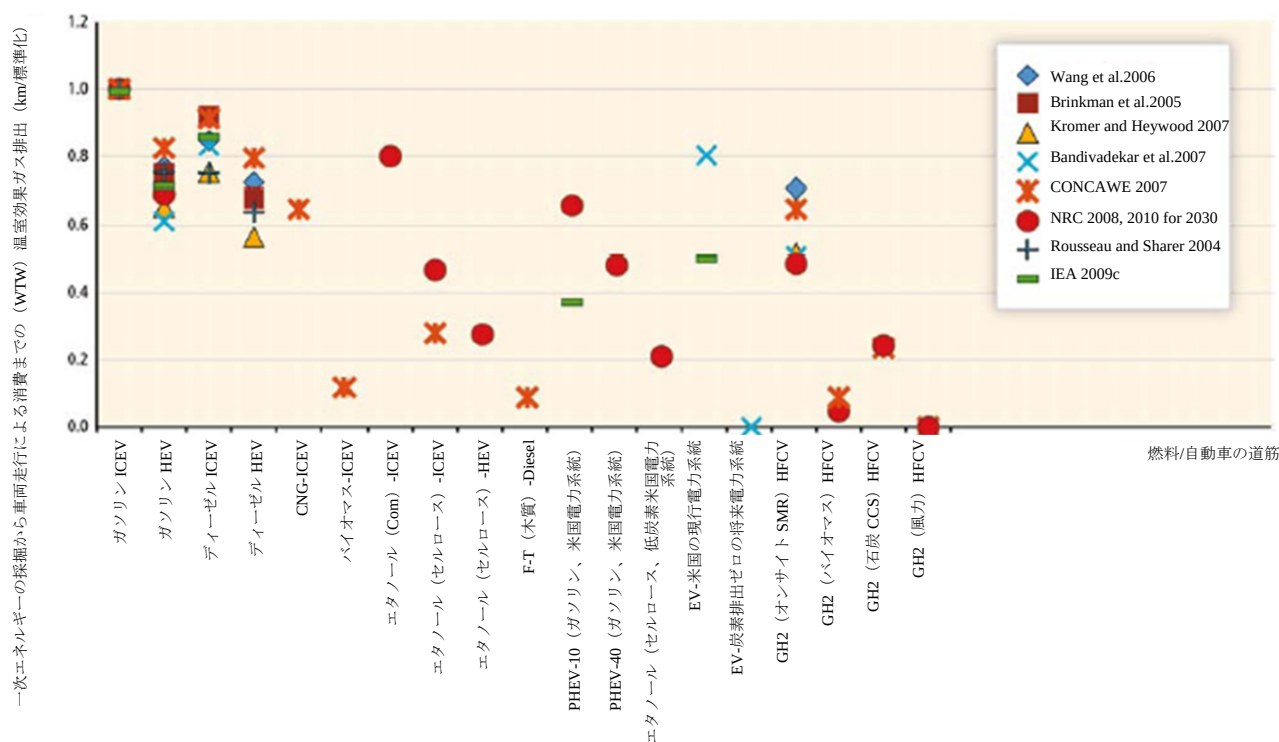


図 TS.8.7: 一次エネルギーの採掘から車両走行による消費温室効果ガス排出削減（移動 km 当たり）。軽量自動車の燃料から自動車の道筋についての複数の研究より抽出。ガソリン内燃機関軽量自動車（ICEV）の温室効果ガス排出量で正規化し、土地利用変化、自動車製造、及び燃料供給設備製造の影響を除いた[図 8.17]。

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

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

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

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

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

¹⁷ (訳注) 両者とも 2012 現在、各国で発売が開始されている。

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

注：※ コストは常に、初期の自動車増分コストの資本回収を含むわけではない。

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

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

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

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

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

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

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

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

8.7.2 業務・家庭

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

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

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

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

8.7.3 工業

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

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

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

産業における主要な再生可能エネルギー統合には、以下の機会が含まれる。

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

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

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

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

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

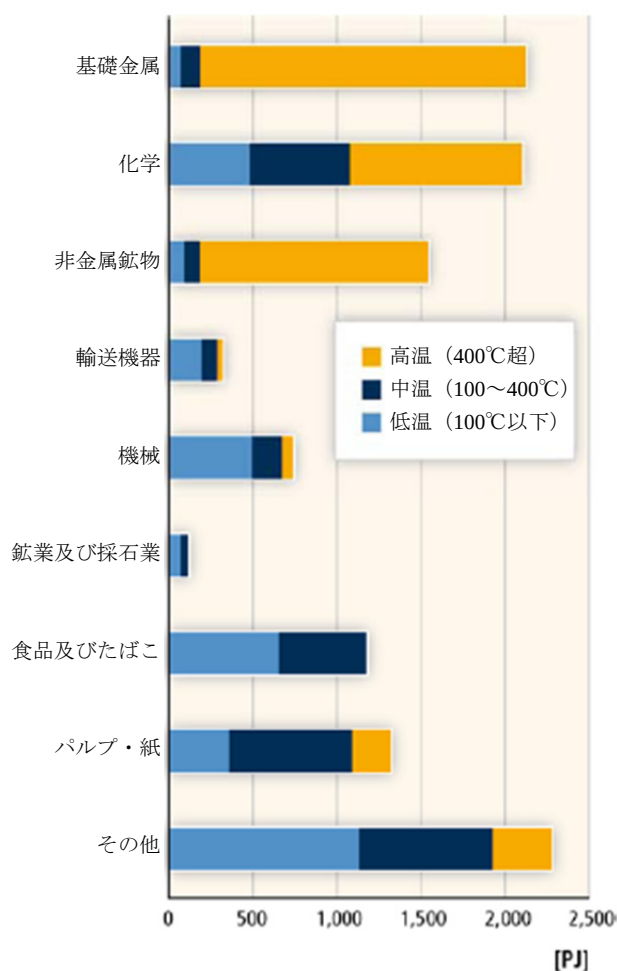


図 TS.8.8: 重工業、軽工業の業種による、温度別の熱需要（ヨーロッパ 32 か国内の評価による）[図 8.23]

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

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

8.7.4 農林水産業

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

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

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

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

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

第9章：持続可能な開発における再生可能エネルギー

9.1 序論

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

9.2 持続可能な開発と再生可能エネルギー間の相互作用

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

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

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

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

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

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

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

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

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

9.3 社会、環境、経済的な影響：世界及び地域の評価

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

9.3.1 社会及び経済の発展

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

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

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

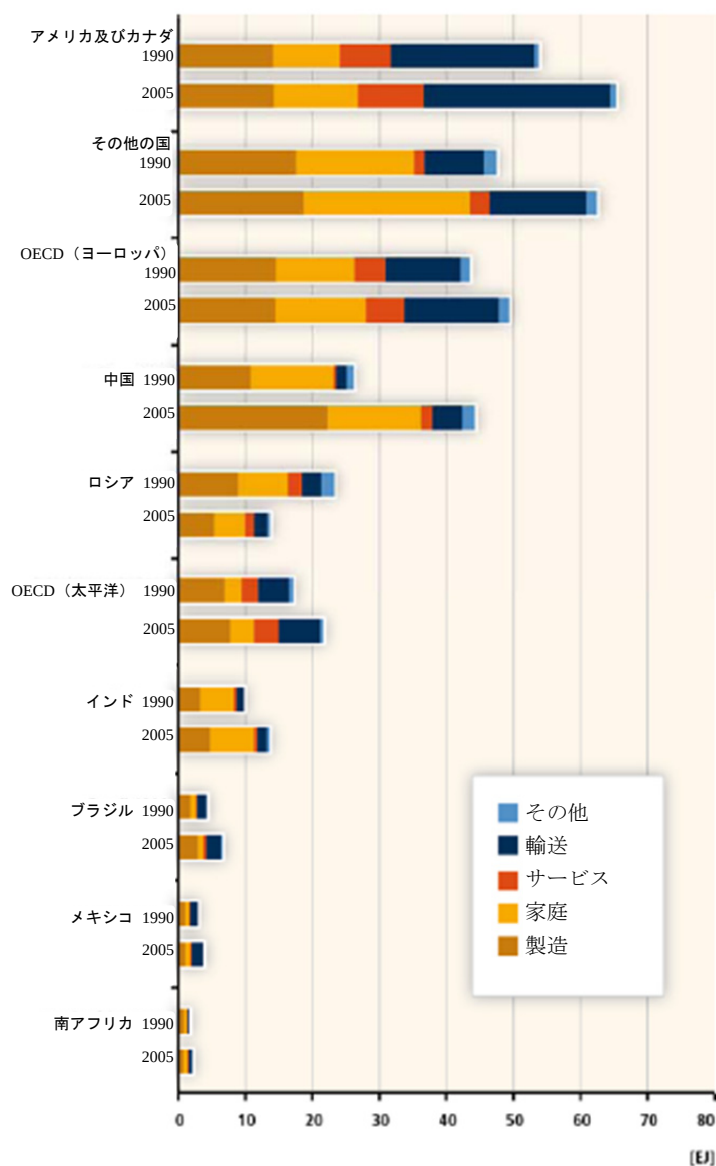


図 TS.9.1: 経済部門別のエネルギー使用（EJ）。基礎データは、直接換算法ではなく IEA の物理量法（physical content method）で計算されている点に留意が必要である。¹⁹ 注: RoW = その他の国 [図 9.2]

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

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

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

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

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

9.3.2 エネルギーアクセス

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

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

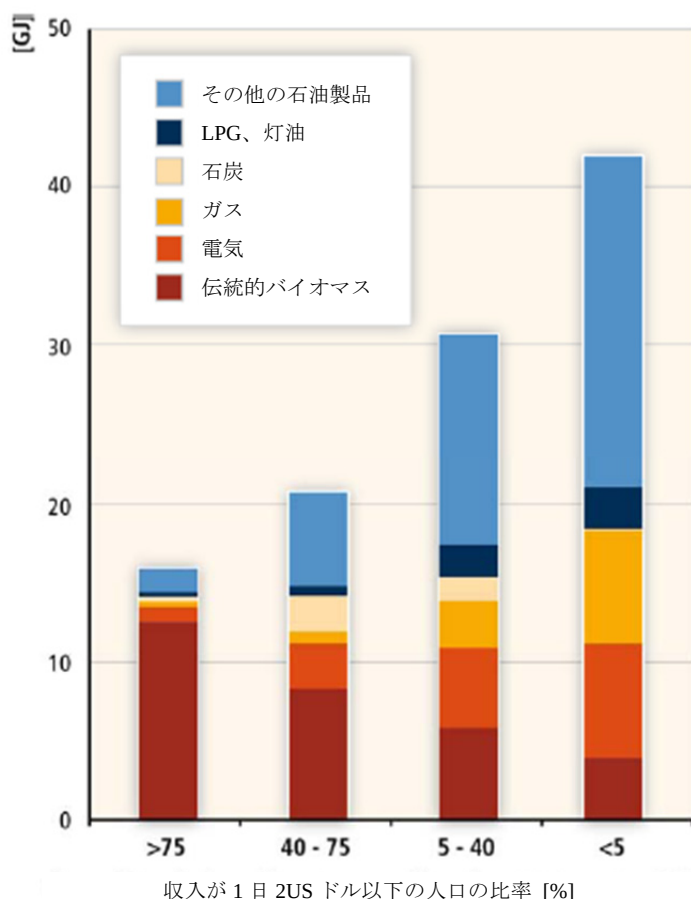


図 TS.9.2: 発展途上国における一人当たりの最終エネルギー消費と収入の関係。2000～2008 年の入手可能な最新データを参照。注: LPG = 液化石油ガス [図 9.5]。

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

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

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

9.3.3 エネルギー安全保障

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

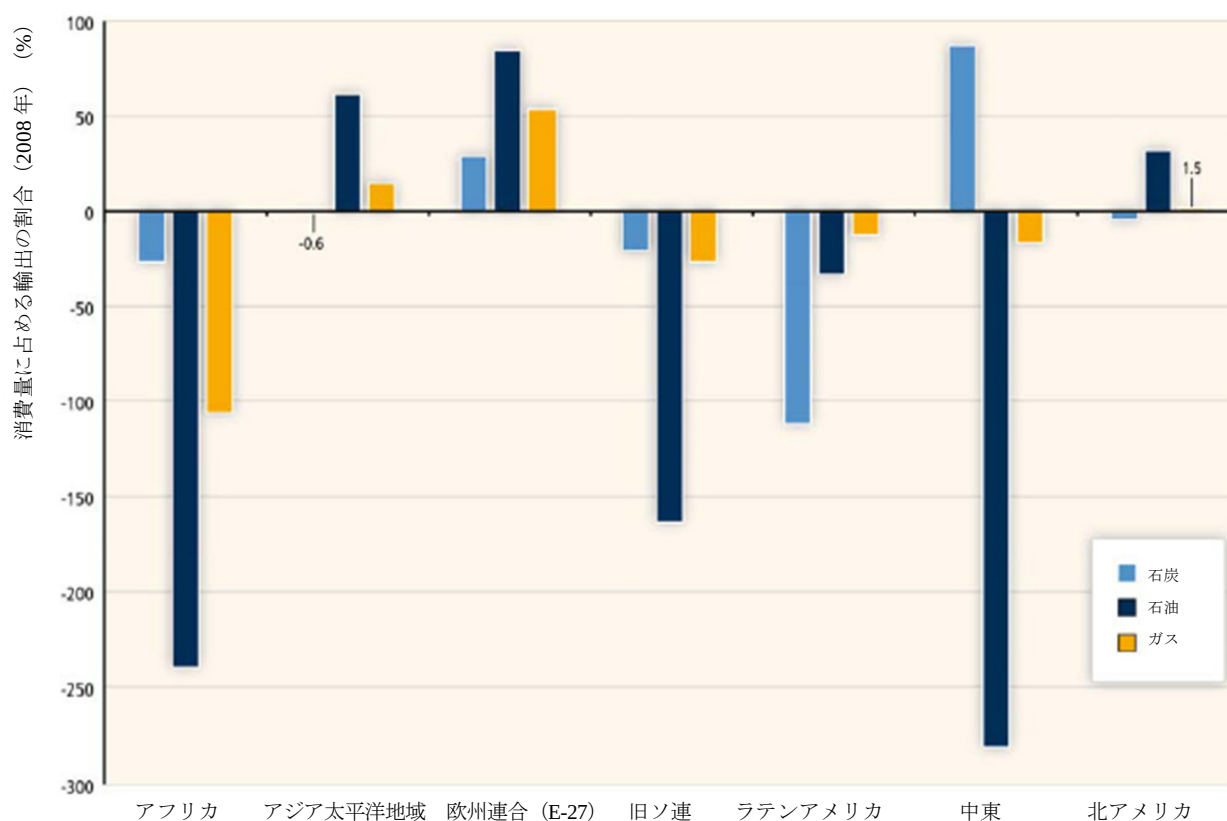


図 TS.9.3: 世界の特定の地域における総一次エネルギー消費量に占める石炭（硬質炭及び褐炭）、原油、天然ガスのエネルギー輸入の割合（2008 年）（%）。マイナスの値はエネルギーキャリアの純輸出を示す [図 9.6]。

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

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

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

9.3.4 気候変動の緩和と環境、健康への影響の軽減

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

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

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

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



図 TS.9.4: 広範なカテゴリの発電技術に加え、二酸化炭素回収・貯留を組み合わせた一部技術におけるライフサイクル温室効果ガス排出量 (g CO₂e/kWh) の推定。土地利用に関連する炭素ストックの正味の変化（バイオマス発電及び貯水池からの水力が主に該当する）と土地管理の影響は除外している。バイオマス発電の負の推定値²⁰は、埋立処分及び副産物の残渣や廃棄物からの排出回避についての想定に基づく。レビューの参考文献及び方法は、Annex II で報告されている。推計の数が参考文献の数を上回るのは、多くの研究で複数のシナリオを検討しているためである。丸括弧内に報告した数は、二酸化炭素回収・貯留を併用した技術を評価した追加の参考文献及び推定値に関するものである。分布情報はライフサイクル評価関連の文献から現在入手出来る推計にするものであるが、あらゆる普及の条件の検討には、基礎となる理論的極限值、実際の極限值（practical extrema）、あるいは実際の中心となる傾向には必ずしも関連しない [図 9.8]。

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

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

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

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

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

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

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

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

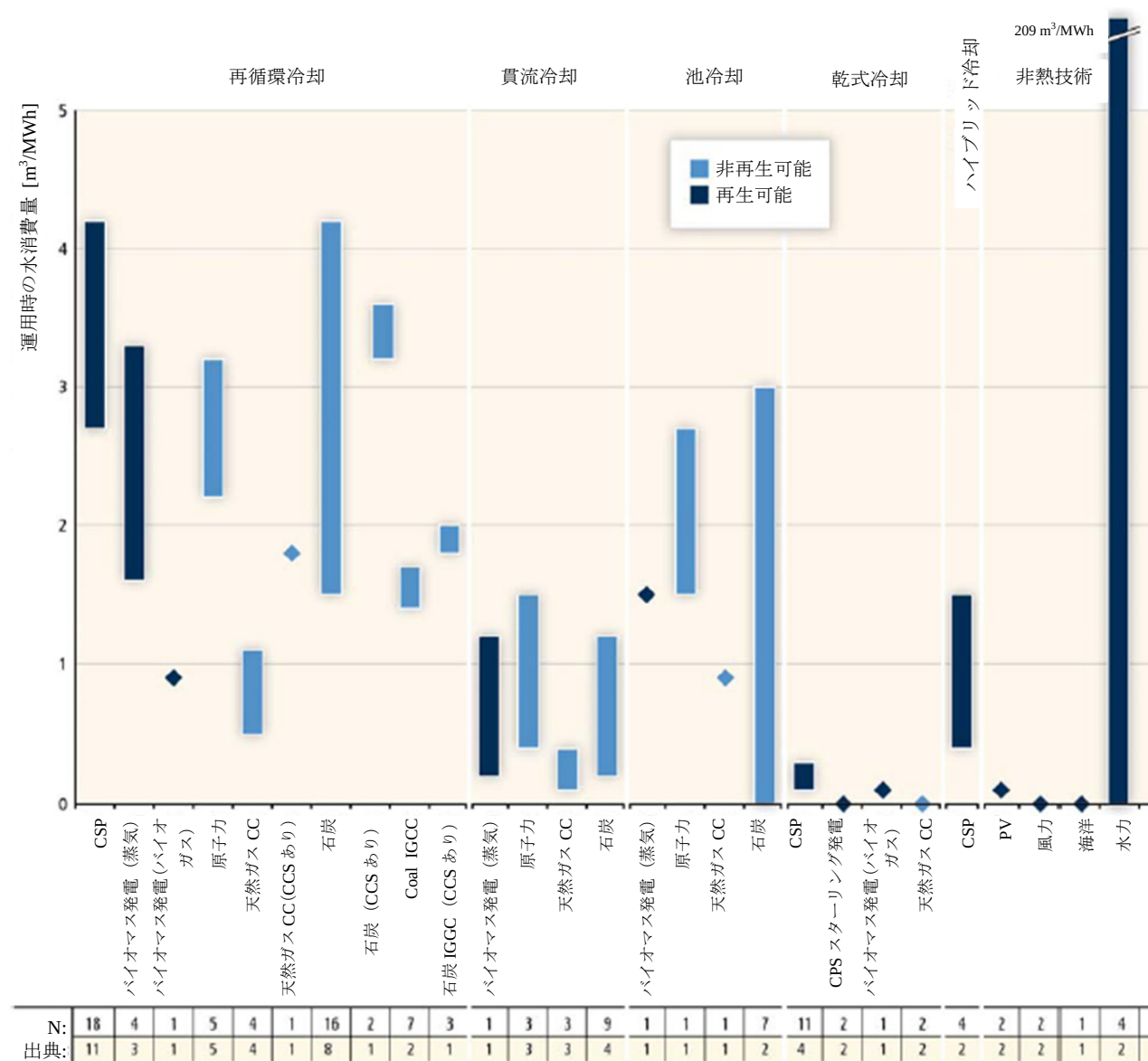


図 TS.9.5: 非熱発電技術と熱による発電技術で見た場合の、運用に必要な水消費量の範囲（利用可能な文献のレビューに基づく (m^3/MWh)）。棒は、利用可能な文献における絶対範囲、ダイヤモンドは単一の推計を示す。n は出典で報告された推計値の数を示す。水力の上限値は総蒸発量を測定したいくつかの研究によるもので、代表的なものではない場合があることに留意が必要である（Box 5.2 参照）[図 9.14]。

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

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

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

9.4 再生可能エネルギーに関する持続可能な開発の道筋の示唆

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

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

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

9.4.1 社会、経済の発展

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

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

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

9.4.2 エネルギーアクセス

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

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

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

9.4.3 エネルギー安全保障

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

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

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

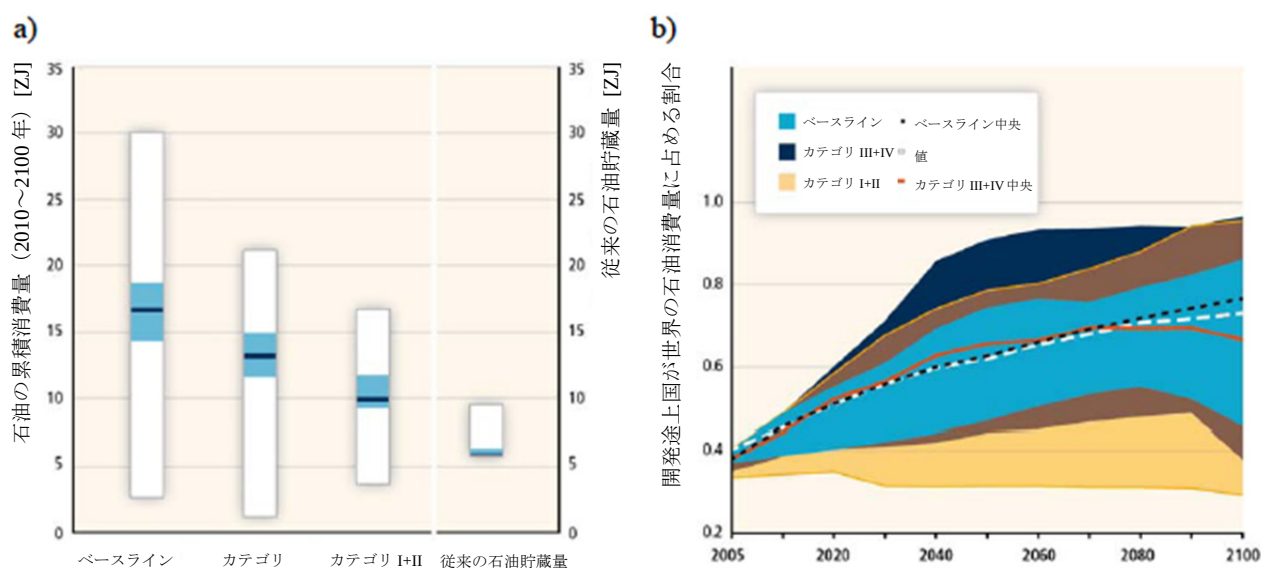


図 TS.9.6: a) 第 10 章で評価された様々なシナリオ群（ベースライン、カテゴリ III、カテゴリ IV、カテゴリ I+II（二酸化炭素安定化濃度が低い場合））における、従来の石油埋蔵量と 2010～2100 年の石油の累積消費量予想の比較（ZJ）。濃い青の太線は中央値、淡い青の棒は四分位間範囲（25～75 パーセント）、周囲にある白い部分はすべての評価シナリオの全範囲を示す。最後の列は、従来の確認可採埋蔵量（淡い青の棒）と推定の追加埋蔵量（周りにある白い棒）を示す。b) 様々な長期シナリオ群を対象とした、非附属書 I 諸国の石油消費量が世界に占める割合。第 10 章の評価シナリオに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

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

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

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

9.4.4 気候変動の緩和と環境、健康への影響の低減

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

持続可能な開発に悪影響を与える可能性がある [9.4.4]。

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

9.5 持続可能な開発における再生可能エネルギーの障壁と機会

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

9.6 統合、知見のギャップと将来の研究ニーズ

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

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

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

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

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

第 10 章: 緩和ポテンシャルとコスト

10.1 序論

将来の温室効果ガス排出量の推定は、特に経済的成長、人口増加、関連するエネルギー需要、エネルギー資源、及びエネルギー供給や最終消費技術の将来のコストや性能など、様々な将来の要因に多く依存している。将来における緩和政策と他の非緩和政策の構造もまた、緩和技術の普及に影響を与えるため、温室効果ガス排出や気候変動の目標を達成する可能性にも影響する。気候緩和における再生可能エネルギーの役割を検討する場合、これらのすべての異なる影響を同時に検討する必要があるだけでなく、今日の時点で確実に知ることが不可能だが、これらの様々な主な影響力 (key force) の数十年後の見通しについても検討する必要がある [10.1]。

再生可能エネルギー源が将来に果たすであろう役割についての疑問や、温室効果ガス緩和の道筋への貢献の可能性については、幅広い面において調査する必要がある。10 章では、広範囲の統合モデルからの 164 の中長期のシナリオのレビューによって、気候緩和における再生可能エネルギーの役割を理解するための背景を示す。このレビューでは、最近のシナリオで示されている地球規模の再生可能エネルギーの普及レベルを調査し、普及レベルの違いを生む主な影響をいくつか示す。(本章は、既に公表されたシナリオのみに依るものであり、いかなる新たなシナリオを形成するものではないことに留意する必要がある)。レビューは、再生可能エネルギー全体だけでなく、個々の再生可能エネルギー技術についても行う。また他の緩和技術との相互作用と競争の重要性や、エネルギー需要の進化についても広く焦点を当てる [10.2]。

セクション 10.3 では、164 のシナリオから 4 つの例示シナリオを使用し、より詳細に論じることで、広範囲のレビューを補完している。4 つのシナリオでは、再生可能エネルギーの特徴に関する異なる将来見通しの範囲に及び、様々な温室効果ガス安定化レベルを含み、また様々な基本的なモデル手法を用いている。これは、用途別 (発電、冷暖房、輸送など)、地域別に区別して再生可能エネルギーが気候変動の緩和に果たす役割を探る次の段階について詳細に論じている [10.3]。

前述の再生可能エネルギーの役割は、コスト要因に大きく依存して決まるため、費用曲線とコストについてもより一般的な議論を行う。この議論は再生可能エネルギー源を用いた緩和に関連するもので、再生可能エネルギーと温室効果ガス緩和の供給曲線の長所と短所を評価し、さらに地域の再生可能エネルギーの供給曲線や削減コスト曲線に関する既存の文献をレビューするものである [10.4]。

次に、再生可能エネルギーの商用化と普及に必要なコストについて議論する。本節では、現在の再生可能エネルギーのコストと、これらのコストがどのように将来に変化し得るかの予測について検討する。将来の市場規模と投資ニーズの評価を可能にするため、4 つの例示シナリオの結果に基づき、気候変動防止の意欲的な目標を達成しようとする場合に特に必要になりそうな事柄に関して、再生可能エネルギーへの投資について論じる [10.5]。

標準的な経済対策はコストについての全ての項目を対象にしているわけではない。そこで、気候変動の緩和と持続可能な開発に関連した再生可能エネルギーの普及拡大による社会的及び環境的成本と便益を統合した議論を行った [10.6]。

10.2 様々な再生可能エネルギー戦略に関する緩和シナリオの統合

将来のエネルギー供給と気候変動の緩和に対する再生可能エネルギーが果たし得る役割について、見通しを示す統合シナリオの数は増えている。そこで、再生可能エネルギーについての緩和における役割と緩和コストに対する影響を幅広い面で理解するため、世界的かつ大規模な 16 の統合モデルから得られた全部で 164 の最近の中・長期的シナリオについてレビューした。シナリオは募集を通じて収集された。シナリオ全体では、二酸化炭素濃度は広範囲に及び (2100 年までの大気中の二酸化炭素濃度は 350~1,050ppm、表 10.1 参照)、緩和シナリオと政策無し又はベースラインのシナリオの双方が描かれている [10.2.2.1]。

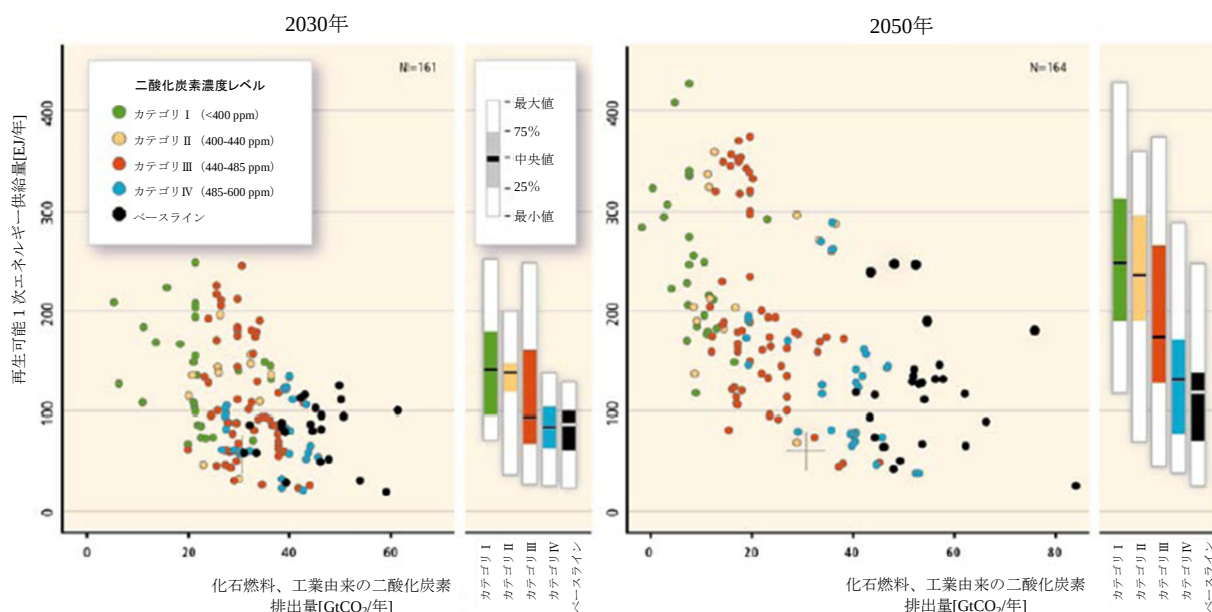


図 TS.10.1: 164 の長期シナリオから得られた、2030 年及び 2050 年における化石燃料と工業由来の二酸化炭素排出量と比較した、世界の再生可能エネルギー供給量（直接等価法）。色別の分類は、2100 年の大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく。分布図の右側にある図は、大気中の二酸化炭素濃度の各カテゴリにおける再生可能エネルギーの普及レベルを示す。黒の細線は中央値、棒内の着色部分は四分位範囲（25～75%）、白の棒の両端は全ての評価対象のシナリオの全体の範囲を示す。十字は 2007 年における値を示す。2 つのデータセットのピアソンの相関係数は、-0.40（2030 年）と -0.55（2050 年）である。評価対象のシナリオは 164 あるが、2030 年の結果はデータ報告の都合上 161 のシナリオのみである。再生可能エネルギーの普及レベルが現在を下回るのは、モデル結果と伝統的バイオマスの報告の差異による。[図 10.2]。

これらのシナリオでは、中・長期における気候変動と気候変動緩和における再生可能エネルギーの役割について、最新かつ洗練された考えのいくつかが示されている。だが、分析は数十年後の見通しを示しているため、慎重に解釈しなければならない。シナリオのすべては定量モデルを用いて求められたが、シナリオ構築に使用されたモデルの詳細やその構造には非常に大きな違いがある。加えて、シナリオは、伝統的な不確実性分析に使用され得るシナリオの無作為抽出を代表するものではない。いくつかのモデルグループでは、他のグループよりも多くのシナリオを提供している。本章のレビューのように、様々な研究から収集したシナリオに基づき行われたシナリオのアンサンブル解析においては、シナリオは本当の意味で無作為抽出ではないということと、シナリオ間にばらつきがあっても将来に対して現実的かつしばしば明快な考察を与えるか、そうでないかということについては、避けがたい葛藤がある [10.2.1.2, 10.2.2.1]。

再生可能エネルギーが気候変動の緩和に果たす役割に関する根本的な問題は、再生可能エネルギーの普及度を長期的な大気中の二酸化炭素濃度または関連する気候変動の目標とどの程度強く関連づけるかという点にある。シナリオによると、化石燃料と工業由来の二酸化炭素排出の道筋は、シナリオ全体の二酸化炭素濃度の長期目標と強い相関がある。再生可能エネルギーの普及と二酸化炭素濃度の目標に見られるこの関係は、それほど強くはない（図 TS.10.1）。一般に、二酸化炭素濃度の目標が厳しいほど再生可能エネルギーの普及は進むが、どのような二酸化炭素濃度の目標にしても、再生可能エネルギーの普及レベルには非常に大きな幅が見られる。たとえば、大気中の二酸化炭素濃度を 440ppm 未満とするシナリオ（カテゴリ I と II）では、再生可能エネルギーの普及レベルの中央値はそれぞれ、2030 年に 139EJ/年、2050 年に 248EJ/年で、最大値は 2030 年の時点で 252EJ/年だが、2050 年までに最大 428EJ/年に達する。これらのレベルは、ベースラインシナリオの再生可能エネルギーの普及レベルに比べてかなり高いが、二酸化炭素安定レベルの各カテゴリにおける再生可能エネルギーの普及の範囲が広いことは認めざるを得ない。[10.2.2.2]。

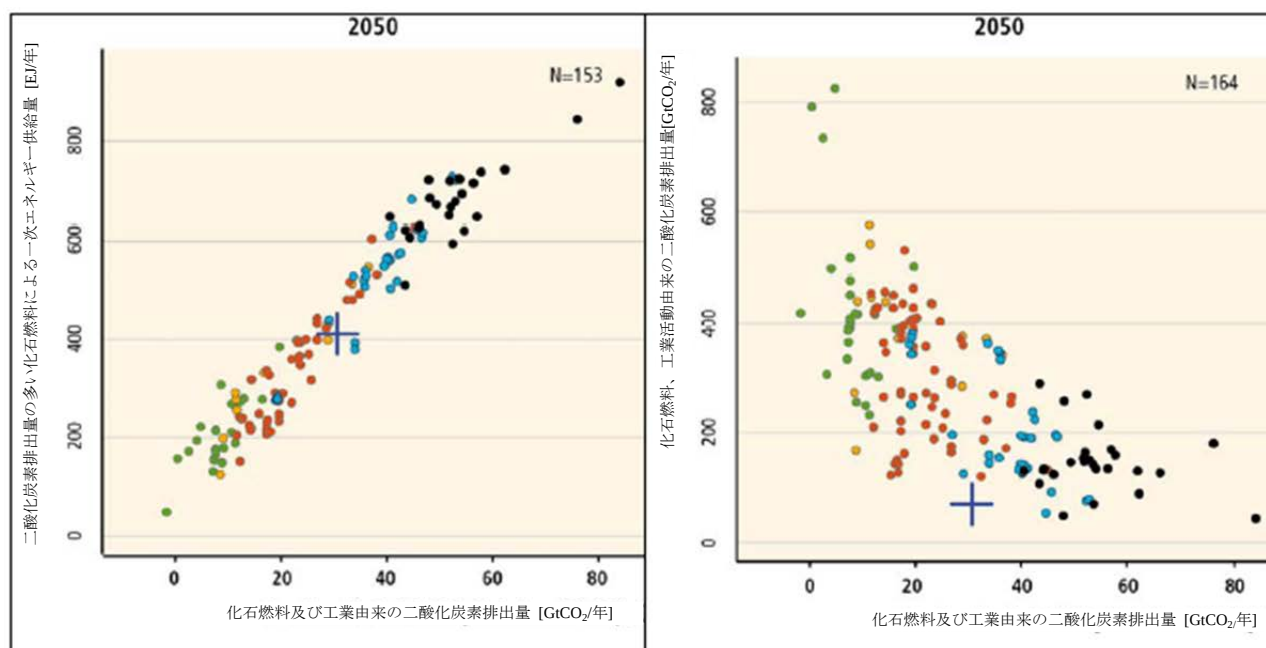


図 TS.10.2: 化石燃料及び工業由来二酸化炭素排出量を関数とした、2050 年における世界の化石燃料を無制限に放出した場合の一次エネルギー供給量（左図、直接等価法）と、低炭素の一次エネルギー供給量（右図、直接等価法）。これらは 164 の長期的シナリオで示されたものである。低炭素のエネルギーとは、再生可能エネルギーによるエネルギー、二酸化炭素回収・貯留を備えた化石エネルギー、原子力エネルギーを指す。色別の分類は、2100 年における大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく。青十字は 2007 年における値を示す。2 つのデータセットのピアソンの相関係数は 0.97（二酸化炭素排出量の多い化石燃料による排出）と -0.68（低炭素エネルギー）である。評価されたシナリオは 164 あるが、データ報告の都合上、二酸化炭素排出量の多い化石燃料による排出量と低炭素の一次エネルギーは、それぞれ 161、153 シナリオの結果のみを使用している。[右側: 図 10.4, 左側: 図 10.5]。

同時に、こうした幅があっても、大多数のシナリオでは、再生可能エネルギー普及の絶対的な規模は現在より大幅に拡大することに注視することも重要である。2008 年、世界における再生可能一次エネルギー供給量はおよそ 64EJ/年であり（直接等価法）、このうち伝統的バイオマスは 30EJ/年と大きな割合を占めていた。これに対し、多くのシナリオでは 2030 年までの再生可能エネルギーの導入量は現在の 2 倍を超えとしている。大半のシナリオでは、同時に伝統的バイオマスが減少し、非伝統的な再生可能エネルギー源の大幅な成長が示唆されている。2050 年までに、大半のシナリオでは再生可能エネルギーの導入量は 100EJ/年以上になり（中央値は 173EJ/年）、多くのシナリオでは 200EJ/年に達し、いくつかのケースでは 400EJ/年をも超える。大半のシナリオで伝統的バイオマスの使用が減少する点を考えると、各国の（伝統的バイオマスを除く）再生可能エネルギーの生産水準はおおよそ 3～10 倍に増加すると予想される。世界の一次エネルギー供給における再生可能エネルギーの割合は、シナリオによって大きく異なる。半数以上のシナリオでは、一次エネルギー供給における再生可能エネルギーの割合は 2030 年に 17%以上に、2050 年に 27%以上になることが示されているが、最も高い見込みを示すシナリオでは、2030 年に約 43%、2050 年に約 77%の割合になり、2050 年以降はさらに増加する。これは再生可能エネルギーによるエネルギー生産の驚異的な拡大である[10.2.2.2]。

実際、温室効果ガス安定化レベルを想定していないベースラインシナリオの多くでも、再生可能エネルギーの普及は拡大する。再生可能エネルギーの導入量は 2030 年には最大で 120EJ/年に、多くのベースラインシナリオでは 2050 年には 100EJ/年を超え、いくつかのシナリオでは最大で 250EJ/年に達する。これらのベースライン導入量は様々な前提を基にしている。たとえば、21 世紀にはエネルギーサービスの需要の大幅な伸びが継続すること、増加するエネルギーアクセス向上への再生可能エネルギーの貢献、あるいは化石燃料資源の使用可能性が長期的には限定的となること、他の前提（再生可能エネルギー技術のコスト低下や性能向上など）などである。これらによって、気候政策がない場合でさえ、再生可能エネルギー技術は多くの用途において経済的な競争力が高まるとしている [10.2.2.2]。

再生可能エネルギーが気候変動の緩和に果たす役割には不確実性がある。この原因は、再生可能エネルギー

ギー普及に影響する多数の影響力や不確実性に起因する。2つの重要な要因として、エネルギー需要の成長と、二酸化炭素排出削減の他の選択肢（主に原子力、化石エネルギーと二酸化炭素回収・貯蔵の組み合わせ）との競合が挙げられる。気候変動の長期的な目標を達成するには、エネルギーからの二酸化炭素排出と他の人為的排出源からの排出を削減する必要がある。いずれの気候変動の目標でも、この削減は比較的明確に定義されている。化石燃料と工業由来の二酸化炭素排出と、シナリオ全体の二酸化炭素を無制限に放出した化石エネルギーの間には、密接な関係がある（図 TS.10.2）。低炭素エネルギーへの需要（再生可能エネルギー、原子力、及び二酸化炭素回収・貯留を有する化石エネルギー）は、単純一次エネルギーの総需要量と二酸化炭素を無制限に放出した化石エネルギー生産量の差と考えられる。つまり、気候変動の制約によって例えば二酸化炭素を無制限に放出する化石エネルギーによるエネルギー供給が出来なくなっても、低炭素エネルギーの利用かエネルギー消費の削減かの、いずれかの方法によってエネルギーは供給せざるを得ない。しかしながら、シナリオは、エネルギー需要の成長、特に将来の数十年については非常に大きな不確実性があることを示している。このばらつきは一般に、緩和がエネルギー消費に与える影響に比べかなり大きい。エネルギー需要の変動性のため、二酸化炭素濃度のいずれの目標についても、低炭素エネルギーについての変動性は依然としてかなり大きい（図 TS.10.2）[10.2.2.3]。

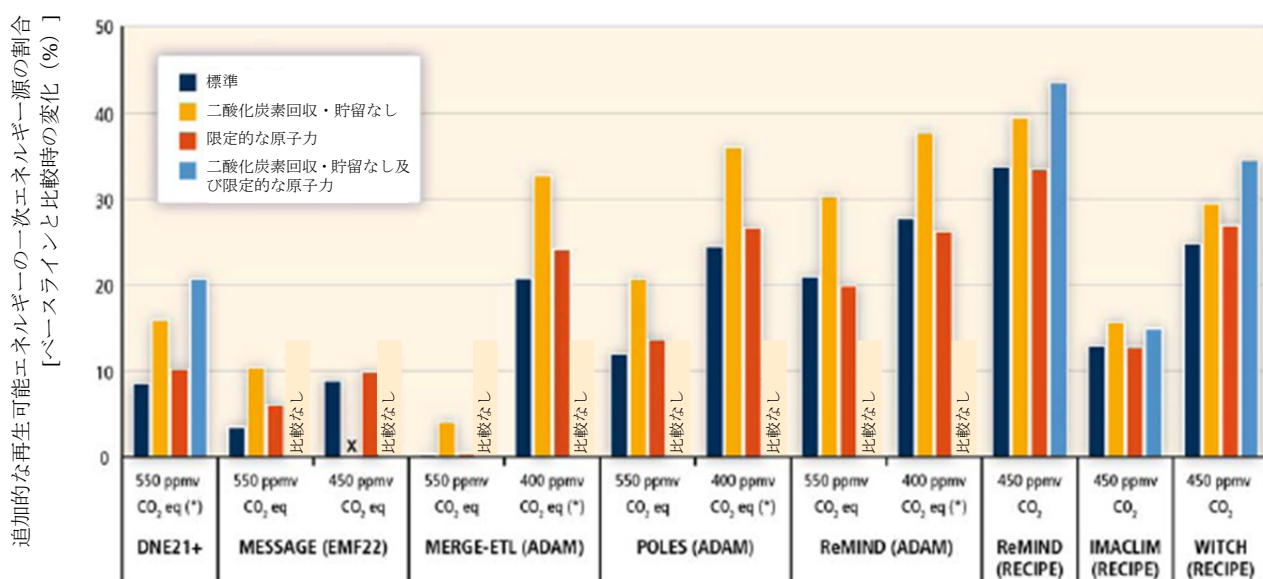


図 TS.10.3: ベースラインシナリオと比較した、特定の技術的制約シナリオにおける世界の再生可能一次エネルギーの割合の増加（2050年、直接等価法）。「X X X」は、シナリオの各濃度レベルが未達成だったことを示す。「限定的な原子力」と「二酸化炭素回収・貯留なし」の定義は、モデル間で異なる。DNE21+、MERGE-ETL、POLESの各シナリオは、様々なスピードで原子力の段階的撤廃を示している代表例である。MESSAGEシナリオでは普及を2010年までに限定している。ReMIND、IMACLIM、WITCHの各シナリオは、原子力の貢献を各ベースラインシナリオに限定しているため、現在の普及レベルに比べて大幅な拡大を暗示している。ReMIND (ADAM) の400ppmv・二酸化炭素回収・貯留なしのシナリオでは、二酸化炭素貯留の累積量が120Gt CO₂に制限されるシナリオを参照している。MERGE-ETLの400ppmv・二酸化炭素回収・貯留なしのシナリオでは、二酸化炭素貯留の累積可能量は約720Gt CO₂としている。POLESの400ppmv CO₂/eq・二酸化炭素回収・貯留なしのシナリオは実現不可能だったため、ここで示すシナリオの各濃度レベルは約50ppm CO₂下げられたものである。DNE21+シナリオは、2050年までの排出の道筋に基づき550ppmv CO₂/eqと見積もっている [図 10.6]。

再生可能エネルギー、原子力、化石エネルギー（二酸化炭素回収・貯留あり）の競合により、再生可能エネルギーの普及と二酸化炭素濃度の目標の関係は、さらに変動性が高まる。競合する供給サイドの選択肢（再生可能エネルギー、原子力、化石エネルギー（二酸化炭素回収・貯留あり））のコスト、性能、使用可能性もまた不確実である。これらのその他の供給サイドの緩和技術を導入する選択肢は、コストと性能だけでなく、潜在的には環境、社会、国家安全保障上の障壁が原因となった制約もある。すべての条件が同じと仮定すれば、再生可能エネルギーの普及レベルはさらに高くなるであろう（図 TS.10.3）[10.2.2.4]。

個々の再生可能エネルギー技術の普及の特徴にも大きな違いがある。普及の絶対的規模は技術によってかなり異なり、一部の技術については、他の技術と比較した場合の普及の大きさも大きな違いが見られる（図 TS.10.4 と TS.10.5）。さらに、普及の時間スケールも様々な再生可能エネルギーによって異なり、その主なものは技術の相対的成熟度についての現在の普及レベルと（もっぱら）関連する想定との違いを示すものである [10.2.2.5]。

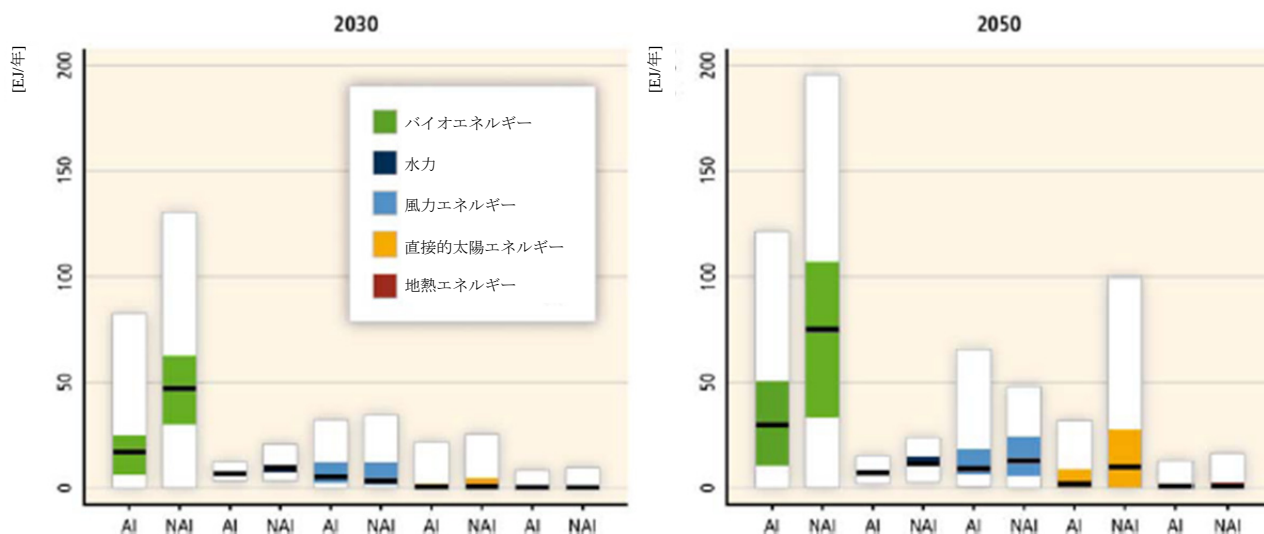


図 TS.10.4: 164 の長期的シナリオにおける附属書 I 諸国（AI）、非附属書 I 諸国（NAI）におけるエネルギー源別の地球規模の再生可能エネルギーによる一次エネルギー供給量（直接等価法による）（2030 年と 2050 年）。黒の細線は中央値、棒内の着色部分は四分位範囲（25～75%）、白の棒の両端は全ての評価対象のシナリオ全体の範囲を示す。エネルギー源によって、これらの数字の元になるシナリオの数は 122～164 と異なっている。情報を解釈する価値はあるものの、164 のシナリオは伝統的な統計分析に従った無作為抽出を代表するものではないことに留意。（バイオエネルギー供給が他のエネルギー源の供給量を一見上回っている理由の 1 つとして、本図では一次エネルギーを表示するために、直接等価法が使用されることがある。バイオエネルギーは、エタノールなどの燃料や電力などに変換される前に計算されている。他の技術は主に（100%ではないが）発電に用いられ、発電量に基づき計算される。代替法に基づき、直接等価法でなく一次等価法が用いられた場合、非バイオマスの再生可能エネルギー源によるエネルギー生産は上図の 3 倍になる）。また海洋エネルギー、ごく一部のシナリオでしか検討されていないため、対象にしていない図 10.8]。

シナリオでは一般に、再生可能エネルギーの総普及量は附属書 I 諸国に比べ非附属書 I 諸国のほうが長期的には多いことが示されている。すべてのシナリオは事実上、附属書 I 諸国に比べ非附属書 I 諸国のほうが経済成長とエネルギー需要の成長は将来の時点で大きいという想定を取り込んでいる。この結果、ベースラインまたは政策措置のないケースでは、非附属書 I 諸国における二酸化炭素排出量の割合が大幅に大きくなる。このため、長期的な排出量削減も多くならざるを得ない（図 10.4） [10.2.2.5]。

再生可能エネルギーと緩和に関するもう一つの根本的な問題は、再生可能エネルギーと緩和コストの関係である。多くの研究が、再生可能エネルギーだけでなく、原子力や、二酸化炭素回収・貯留と化石燃料の組み合わせなどを含め、個々の緩和の選択肢の普及に対する制約を想定したときのシナリオの感度を求めている（図 TS.10.6 と TS.10.7）。これらの研究では、再生可能エネルギーを含む選択肢が使用出来ない場合、緩和コストは上昇することが示されている。実際、再生可能エネルギーの限界に対するペナルティコストは、原子力や二酸化炭素回収・貯留と化石燃料の組み合わせの限界に対するペナルティコストと、少なくとも同じ程度になる場合が多い。また、これらの研究は、再生可能エネルギーの選択肢やその他の低炭素の選択肢が利用出来ない場合、より積極的な濃度目標を設定することは不可能であることも示されている。同時に、本評価の対象であるシナリオの全範囲での幅広い想定を考慮すると、シナリオは、コストの測定（炭素価格など）と再生可能エネルギーの絶対的な普及レベルには意味のある関連はないことを示している。このばらつきは、シナリオ形成に用いられた大規模な統合モデルが、パラメータの想定とモデル構造の双方に基づく、幅広い炭素価格と緩和コストの特徴を持つことを示している。まとめると、再生可能エネルギー技術の普及が制約されると緩和コストが増加することと、よ

り意欲的な二酸化炭素濃度安定レベルは達成出来ないことについては合意があるが、コスト増加が正確にどの程度の規模になるかについては、合意はほとんど無い [10.2.2.6]。

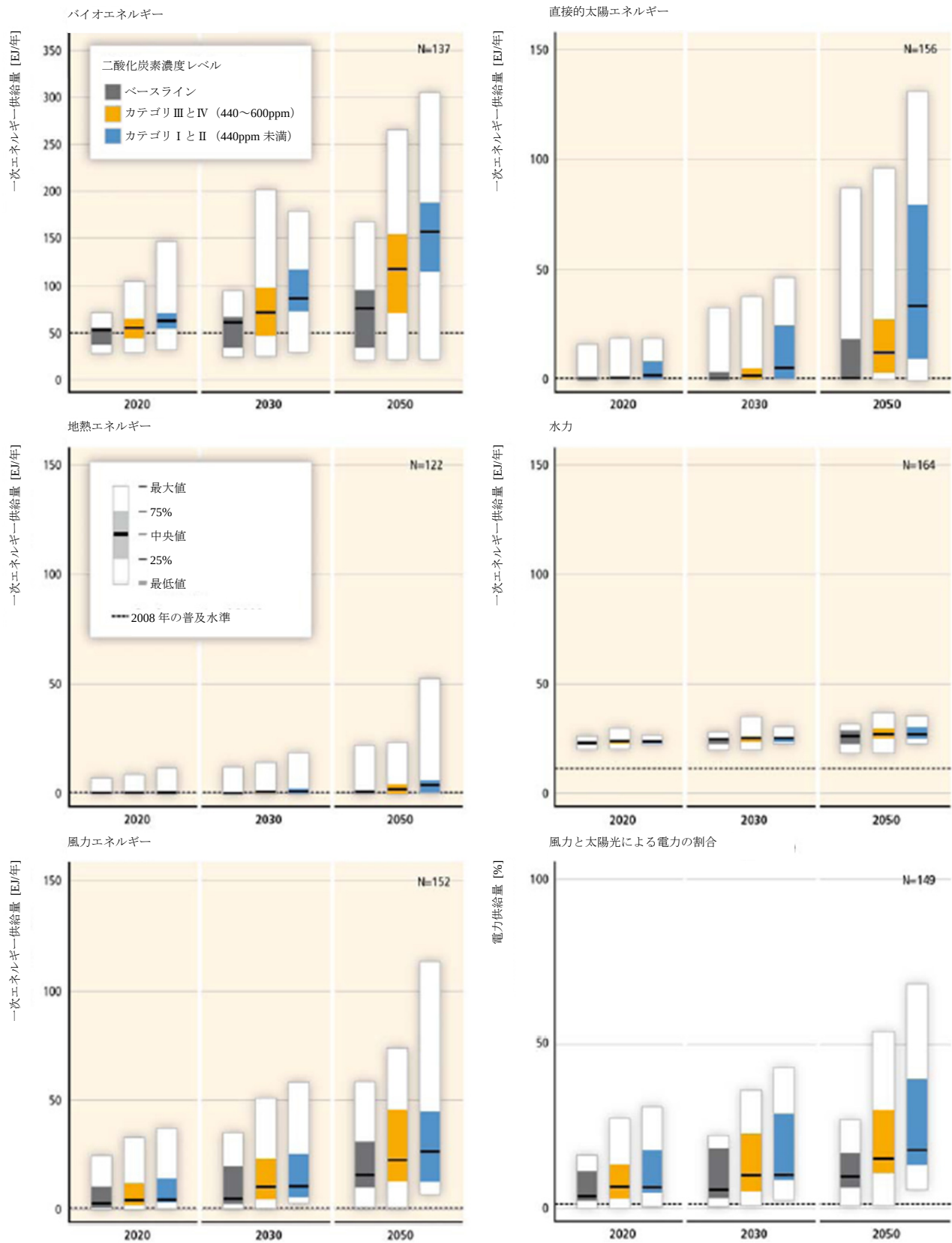


図 TS.10.5: 164 の長期シナリオを、2100 年の大気中の二酸化炭素濃度レベルでカテゴリ分けして、バイオマス、風力、太陽光、水力、地熱エネルギーの 2020 年、2030 年と 2050 年の世界の一次エネルギー供給量（直接等価法）を比較したもの。黒の細線は中央値、棒内の着色部分は四分位範囲（25～75%）、

白の棒の両端は全ての評価対象のシナリオの全体の範囲を示す [図 10.9]。

注:シナリオは計 164 あるが、データ報告の都合上、各図に用いられたシナリオの数はかなり異なっており、その数は右上に示してある。バイオエネルギー供給が他のエネルギー源の供給量を一見上回る理由のひとつとして、本図では一次エネルギーを表示するために直接等価法が使用されていることがある。バイオエネルギーは、エタノールなどの燃料や電力、熱に変換される前に計算される。他の技術は主に（100%ではないが）発電や熱生産に用いられ、生産された二次エネルギーに基づき計算される。代替法に基づき、直接等価法でなく一次等価法が用いられた場合、非バイオマスの再生可能エネルギーによるエネルギー生産は上図の 2~3 倍になる。また、海洋エネルギーは、シナリオではほぼ検討されていないため、表示していない。最終的に、2100 年の二酸化炭素レベルが、すべての安定化シナリオで 600ppm 以下であることと、最も低いベースラインシナリオで 600ppm を若干超えるレベルであることから、カテゴリ V とそれ以上は含まれておらず、またカテゴリ IV については 570ppm から 600ppm に伸びている。

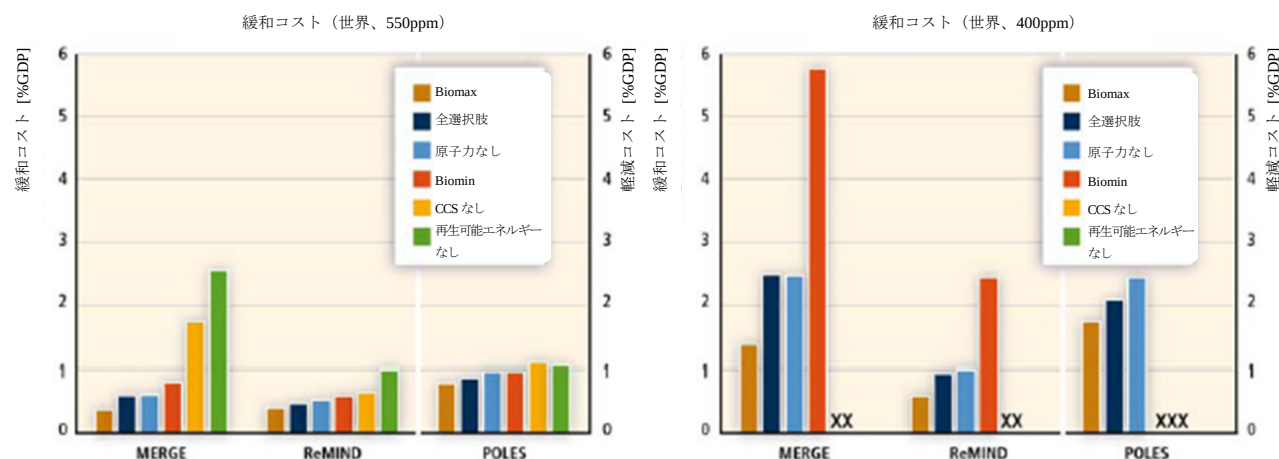


図 TS.10.6: ADAM プロジェクトに基づく世界の緩和コスト。長期的な安定化濃度が 550ppmv CO₂/eq と 400ppmv CO₂/eq の場合における、技術の使用可能性に関する様々な想定に基づく。「全選択肢」は、様々なモデルにおける標準的な技術ポートフォリオを指し、「最大バイオマス (Biomax)」と「最小バイオマス (Biomin)」はそれぞれ、バイオマスの標準的な技術ポテンシャル (200EJ) に対し 2 倍であるものと 0.5 倍であるものを指す。「二酸化炭素回収・貯留なし」は緩和ポートフォリオから二酸化炭素回収・貯留を除いたもの、「原子力なし」と「再生可能エネルギーなし」は原子力と再生可能エネルギーの普及レベルをベースラインに制限したものを指しているが、それでもなお、現在と比べればかなりの拡大の可能性を示している。右側の「X」は、技術の選択肢が限定的な場合、400ppmv CO₂/eq の水準の達成が不可能であることを示す [図 10.11]。

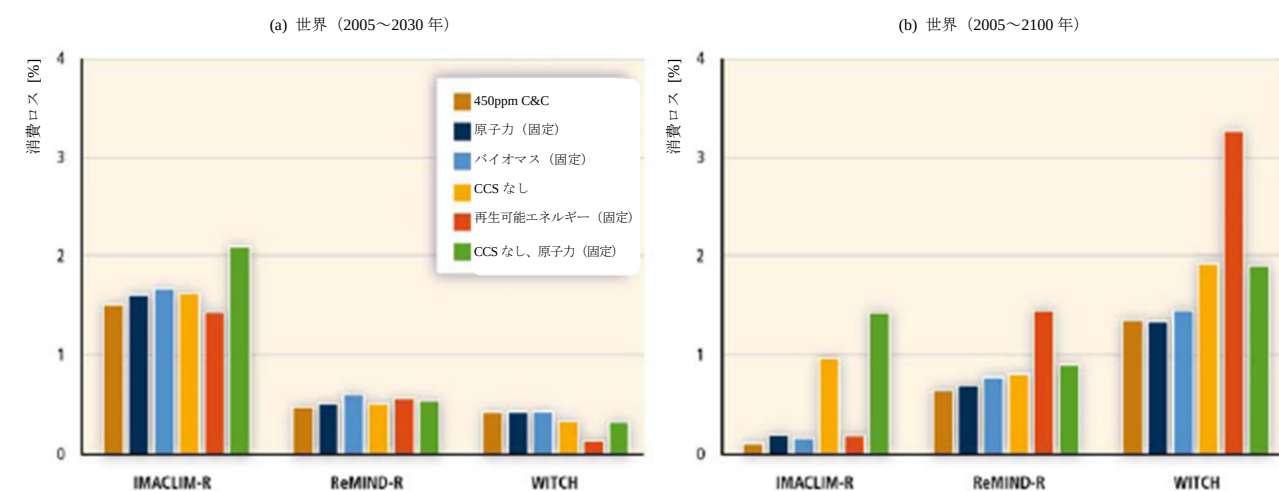


図 TS.10.7: RECIPE プロジェクトによる緩和コスト。長期的な二酸化炭素の安定化濃度を 450ppmv とした場合の、様々な技術の可能性の想定に基づく。オプションで示す技術の値は、既知 (CCS) またはベースラインのレベル (他の全ての技術) に限定されたシナリオによる消費エネルギーの削減を示す。期間は (a) 2005~2030 年と (b) 2005~2100 年である。オプションの値は、ある技術がベースライ

ンのシナリオに対して制限されているシナリオの消費エネルギーの削減の差が計算されたものである。WITCH の場合、実在的な緊急時の備えの技術 (generic backstop technology) は「再生可能エネルギー (固定)」シナリオでは利用出来ない想定であることに留意 [図 10.12]。

10.3 様々な再生可能エネルギー戦略に対する代表的な緩和シナリオの評価

164 の大規模シナリオに基づく 4 つの例示シナリオにおいて詳細分析を行い、様々な地域や部門における特定の再生可能エネルギー技術の貢献の可能性について、より詳細に検討した。ベースラインシナリオの例としては、IEA の World Energy Outlook (IEA WEO 2009) が選択され、その他のシナリオでは明確な温室効果ガス濃度安定レベルが設定された。選択された緩和シナリオは、ReMIND-RECIPE (ポツダム研究所)、MiniCAM EMF 22 (Energy Modelling Forum Study 22)、Energy [R]evolution (以下 ER2010) (ドイツ航空宇宙研究センター、グリーンピースインターナショナル、EREC) である。これらのシナリオは例示としては有用であるが、厳密な意味ですべてのシナリオを代表するわけではない。ただし、これらのシナリオは、様々な手法と幅広い想定に基づき 4 つの異なる将来の道筋を示している。これらは特に、特定の政策によって部門における現在の活発な成長 (増加率) が維持される一方で、楽観的な再生可能エネルギー適用の道筋を示すシナリオを示すような、典型的なベースラインからの様々な再生可能エネルギーの適用の道筋を示している [10.3.1]。

図 TS.10.8 は、2020 年、2030 年、2050 年の 4 つのシナリオから導かれた供給源ごとの予測される一次エネルギー生産の概観を示すとともに、世界の一次エネルギー供給の値を範囲で比較したものである。ここで行われているものと同様に直接等価法を用いた場合、選択されたシナリオ全てにおける市場シェア (2050 年) で最も大きいのはバイオエネルギーであり、太陽エネルギーがそれに続く。2050 年までの一次エネルギー構成における再生可能エネルギーの割合は 4 つのシナリオ群で大きく異なる。最も低い見込みを示すシナリオは IEA WEO 2009 で、2050 年までで 15%としている。これは現在のレベル (2008 年に 12.9%) を若干上回る程度である。ER2010 は一番高い 77%である。また、MiniCam EMF 22 は 31%が、ReMIND-RECIPE は 48%が、2050 年の世界の一次エネルギー需要のうち再生可能エネルギーで賄われる割合であるとしている。再生可能エネルギーの割合の範囲が幅広いのは、技術コストと性能データ、他の緩和技術 (二酸化炭素回収・貯留や原子力) の使用可能性、インフラや統合上の制約、非経済的な障壁 (持続可能性の側面など)、特有の政策、将来のエネルギー需要見通しの想定が様々であることによる [10.3.1.4]。

加えて、長期的に様々な技術の普及が大幅に進んだ場合においても、世界の様々な地域でほとんどの技術を適用したシナリオさえ、その再生可能エネルギーの貢献は技術的ポテンシャルに比べて非常に低くなっている (図 TS.10.9)。分析した全てのシナリオにおいて、2050 年までの世界の再生可能エネルギーの総導入量は、使用可能な再生可能エネルギーの技術的ポテンシャルの 2%にすら及んでいない。地域レベルで見ると、2050 年の世界の再生可能エネルギーの総導入量は最大で中国の計 18% (ER2010) で、次いで OECD ヨーロッパの 15% (ER2010)、インドの 13% (MiniCam EMF 22) である。さらに、2 つの地域において、使用可能な再生可能エネルギーの技術的ポテンシャルの導入率は約 6%程度となっており、その内訳は開発途上のアジアの 7% (MiniCam EMF 22)、OECD の北アメリカの 6% (ER 2010) である。その他の 5 つの地域では、使用可能な再生可能エネルギーの技術的ポテンシャルの 5%以下しか使用可能にならない [10.3.2.1]。

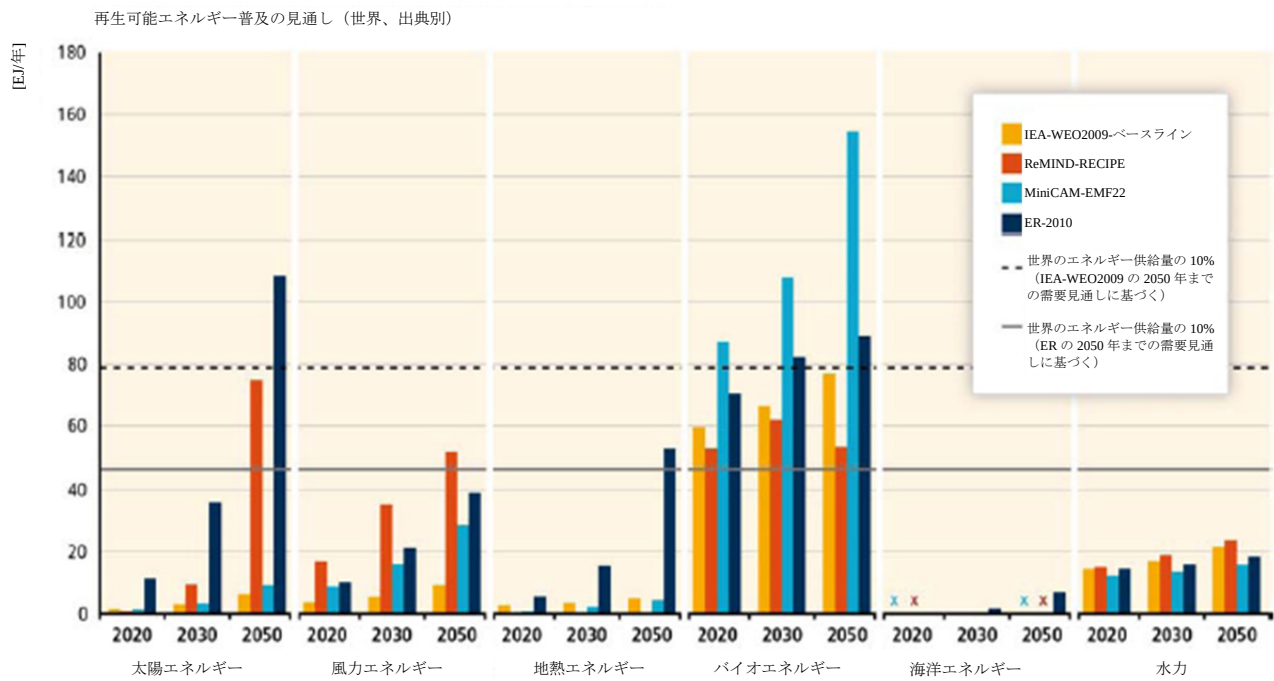
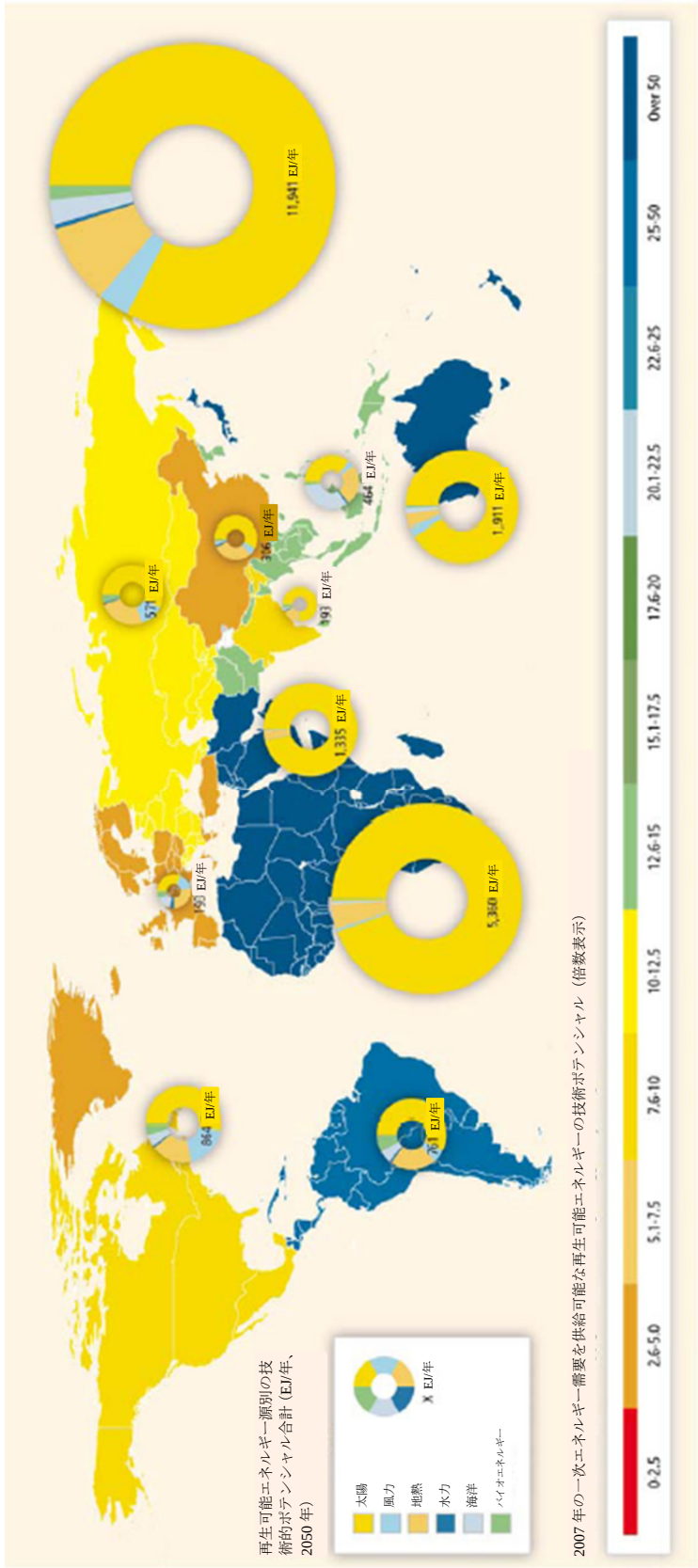


図 TS.10.8: 4 つの例示シナリオにおける供給源ごとの世界の再生可能エネルギー普及の予測と一次再生可能エネルギーの割合[図 10.14]。



範囲グラフ：2050年までの再生可能エネルギー普及レベル（シナリオ別）と再生可能エネルギー（EJ/年）

再生可能エネルギーのポテンシャル分析：本ページの再生可能エネルギーの技術ポテンシャルは、Krewitt et al. (2009) が2009年以前に公表した研究のレビューに基づき、世界合計と地域のポテンシャルを示したものである。エネルギー生産に既に活用されているポテンシャルは差し引いていない。研究の間に見られる方法論の相違や計算方法によって、技術、地域、あるいは一次エネルギー需要に対してこれらの推定値を厳密に比較することは出来ない。2009年以降に公表された再生可能エネルギーの技術ポテンシャルの分析は一部のケースで高くなっているが、この図では含んでいない。しかしながら、一部の再生可能エネルギー技術は土地についての競合が生じる場合があり、再生可能エネルギーの技術全体を低下させる可能性がある。

シナリオデータ：IEA WEO 2009 Reference Scenario/International Energy Agency (IEA), 2009; Teske et al.; ReMIND-RECIPE 450ppm Stabilization Schenani (Luderer et al. 2009) ; MiniCAM EMF 22 1st-best 2.6 W/2 Overshoot Scenario (Calvin et al. 2009) ; Advanced Energy [R]evolution 2010 (Tresje et al., 2010)

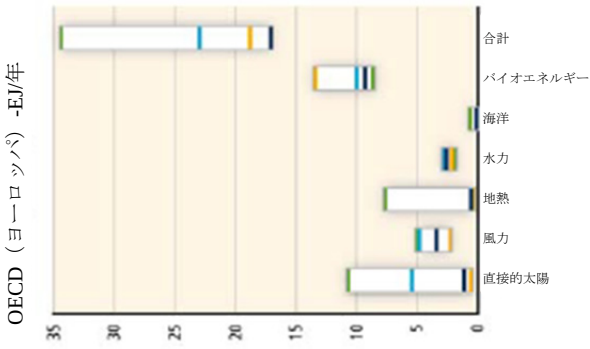
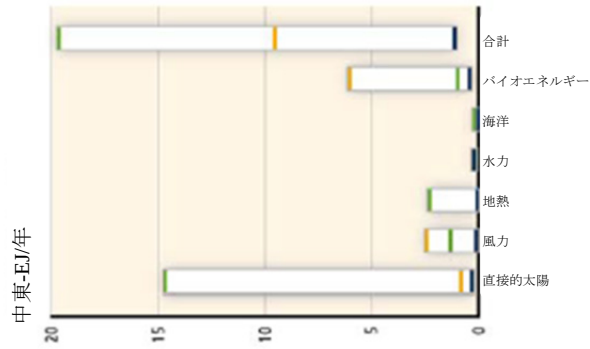
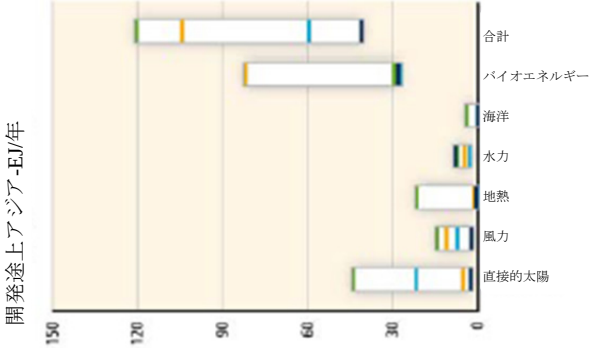
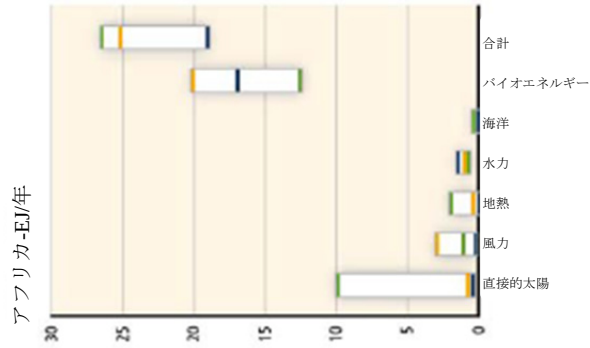
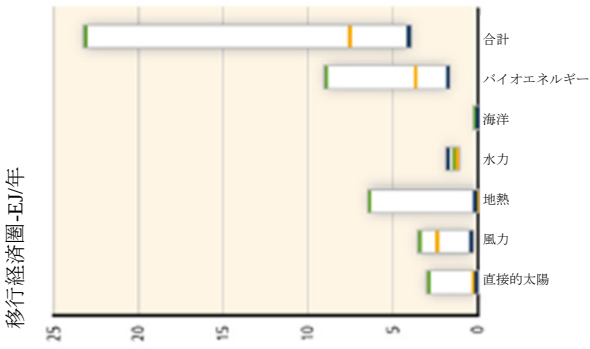
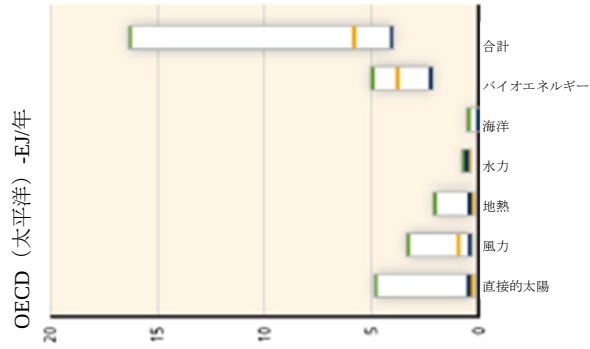
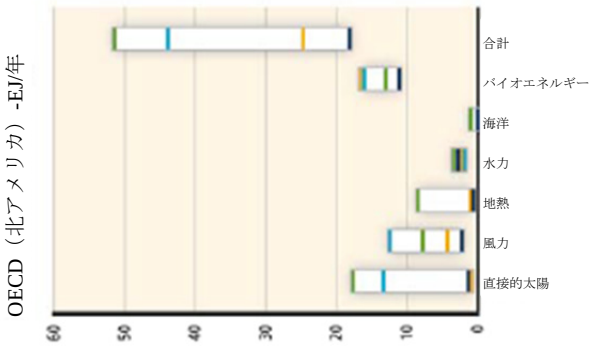
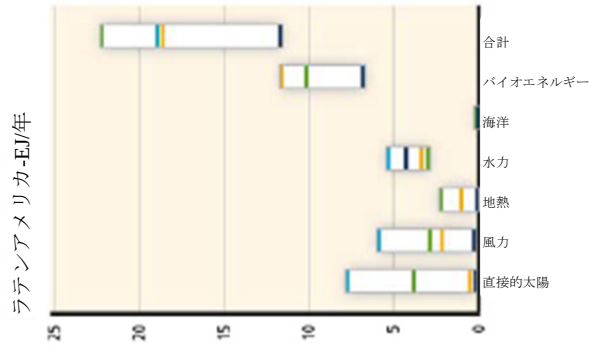


図 TS.10.9: 地域別に見た 4 つの例示シナリオにおける再生可能エネルギーの普及 (2050 年) と様々な技術に対する技術的ポテンシャルに相当する普及ポテンシャルの比較。4 つの例示シナリオは 164 シナリオの包括的な調査の一部である。これらは、具体的な温室効果ガス安定化濃度レベルを定めていない参照シナリオ (IEA WEO 2009) から、様々な二酸化炭素濃度カテゴリを代表する 3 つのシナリオまで及ぶ。3 つのシナリオのうちの 1 つがカテゴリ III (440~485ppm) の REMind-RECIPE、2 つがカテゴリ I (400pp 未満) の MiniCam EMF 22 と ER2010 である。カテゴリ I のうち MiniCam EMF 22 では、緩和の選択肢として原子力と二酸化炭素回収・貯留が含まれていることによって、その濃度レベルを達成しているのだが、ER2010 は再生可能エネルギーの楽観的な適用の道筋を採ることにより達成している。移行経済圏は、以前の中央計画経済から自由経済システムに変わった国を指す [図 10.19]。

選択された 4 つの例示シナリオでの再生可能エネルギーの普及に基づき、対応する温室効果ガス緩和ポテンシャルも計算されている。各部門では排出要因が特定され、再生可能エネルギーが代替する発電や熱供給の類いについて明示されている。代替エネルギーは全体的なシステム挙動に左右されるため、新しく一貫性のあるシナリオ分析が複雑な発電プラントの負荷配分の分析がなければ、正確には実行出来ない。従って、計算は必然的に単純な前提に基づいて行われるため、指標としての参照のみ可能である。一般に、再生可能エネルギーの正確な緩和ポテンシャルの特性は、注意深く調べる必要がある [10.3.3]。

再生可能エネルギーの適用によって、既存の化石燃料使用の構成を完全に代替するとされていることはとても多いが、例えば、原子力を含んでいる場合や再生可能エネルギー自体のポートフォリオ内で再生可能エネルギーが競争力がある場合でも、現実的には正しいとは言えないだろう。不確実性を補うために、部分的には排出要因が特定できるこのであっても、3 つの異なるケースに分けることとする (上位のケース: 化石燃料による発電構成で、具体的かつ平均的な二酸化炭素の排出。ベースラインシナリオに基づく。中位のケース: 発電構成全体における具体的かつ平均的な二酸化炭素の排出。ベースラインシナリオに基づく。下位のケース: 特定の分析シナリオの発電構成で、具体的かつ平均的な二酸化炭素の排出)。輸送部門のバイオ燃料とその他の再生可能エネルギーは、データの利用可能性が限定的なため、計算から除外した。加えて、直接暖房に使用されるバイオエネルギーのため節約された部分による温室効果ガスの排出を反映すると、計算で考慮されるのは理論的な二酸化炭素削減の半分のみである。不確実性の高さと組み込まれた温室効果ガスの変動性を考えると、前提をもう一度単純化することが必要である [10.3.3]。

図 TS.10.10 は、2020 年、2030 年、2050 年までの再生可能エネルギー源による二酸化炭素の累積削減ポテンシャルを示す。本章で詳細に検討した 4 つの例示シナリオによる。分析されたシナリオは中位のケースのアプローチであり、それぞれ、ベースライン条件に基づく 244Gt CO₂ (IEA WEO 2009)、297Gt CO₂ (MiniCam EMF 22)、482Gt CO₂ (ER 2010)、490Gt CO₂ (ReMIND-RECIPE のシナリオ) の間の累積の削減ポテンシャル (2010~2050 年) を示している。計算されたすべてのケースとシナリオによる全体の範囲は、WEO 2009 参照シナリオによる化石燃料と工業由来の累積二酸化炭素排出量約 1,530Gt CO₂ に対し、同じ期間において、IEA WEO 2009 のベースラインで 218Gt CO₂、ReMIND-RECIPE で 561Gt CO₂ となっている。しかし、これらの数字は輸送部門 (バイオ燃料と電気自動車を含む) の再生可能エネルギー使用に関する二酸化炭素削減は除いている。このため、全体的な二酸化炭素緩和ポテンシャルはこれ以上になる可能性がある [10.3.3]。

様々なシナリオに基づく再生可能エネルギー普及の道筋における世界の二酸化炭素累積削減量
(2010 年から 2020 年、2030 年、2050 年まで)

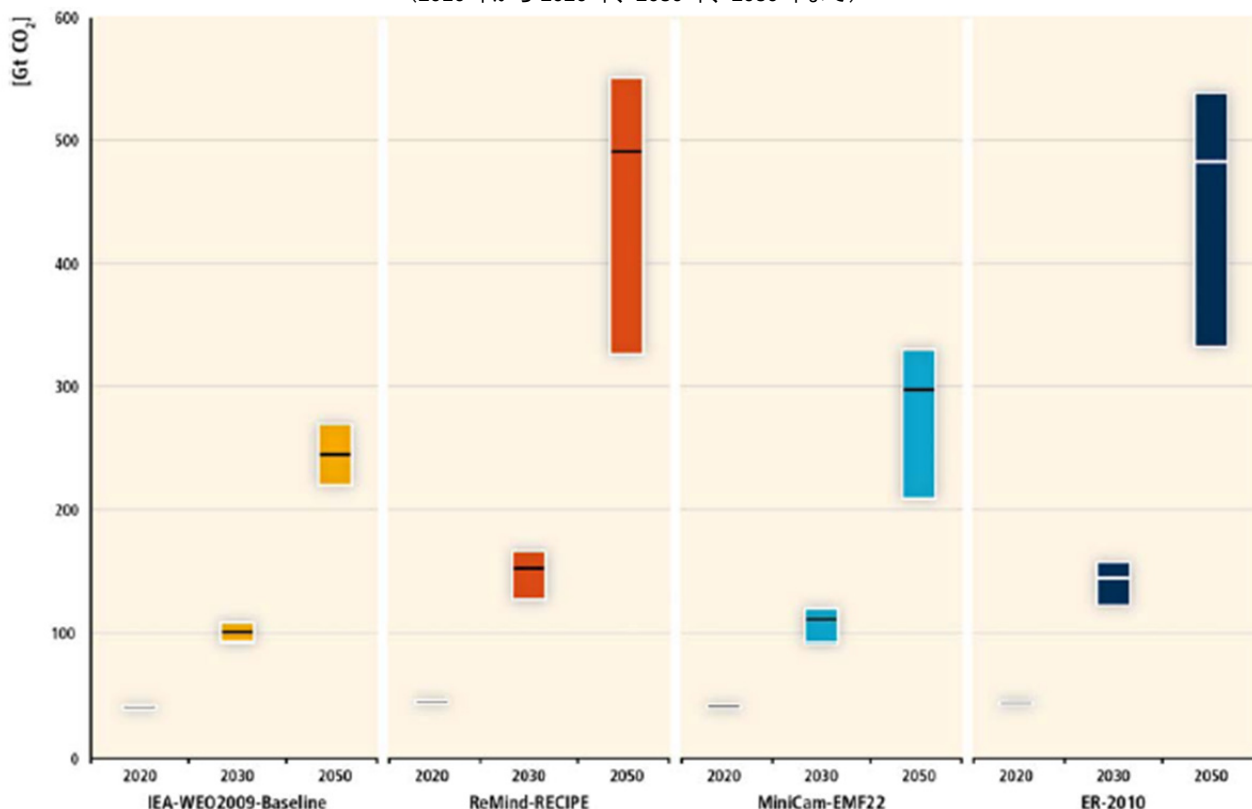


図 TS.10.10: 4 つの例示シナリオ群に示される 2010 年から 2050 年の間の世界の二酸化炭素削減量。表示範囲は、代替される在来型エネルギー源に関する不確実性を示す。上限は高炭素の化石燃料を完全に代替する想定であるが、下限は分析したシナリオ自体における具体的な二酸化炭素排出を考慮している。中央の線は、再生可能エネルギーが参照したシナリオにおける具体的なエネルギー構成を代替すると想定して計算されたものである [図 10.22]。

10.4 再生可能エネルギー源による緩和に対する地域的な費用曲線

炭素削減、エネルギー、またはエネルギー節約の供給曲線の概念は全て、同一の基盤によるものである。これらは一般に、個別のステップにより構成される曲線であり、各ステップは軽減措置や発電技術、あるいはそのポテンシャルに対する省エネルギーの限界コストに関連している。これらのステップはコストの順にランク付けされる。グラフで説明すると、これらのステップは左の最低コストから始まり、コストが高くなるにつれ右に移動し、右肩上がりの限界コスト曲線を形成する。結果として、得られた曲線は、伝統的な経済学における供給曲線と似た解釈が可能になる [10.4.2.1]。

省エネルギー供給曲線の概念はよく使用されるが、共通する特定の制限がある。最も頻繁に指摘される制限は、負のコストのポテンシャルについて科学者間で論争があること、行為者が曲線に反映されるような基準ではない他の基準に基づいて決定するような現実を単純化すること、エネルギー価格の上昇や割引率を含む将来の予想に特有の経済的または技術的な不確実性、強い集合の偏りによるさらなる不確実性、ベースラインの想定に関する高い感度、将来の発電電のポートフォリオ全体も挙げられる。個々の措置を別々に検討し、同時にまたは異なった順番で適用される措置の間の相互依存性を無視している点であり、また炭素削減曲線の場合については（不確かな）排出要因の想定に対する感度の高さも制限の 1 つと言える [10.4.2.1]。

これらの批判を念頭に置けば、方法論を詳しく述べた包括的かつ一貫性のある手法を用いた研究がほとんどない状況のなか、再生可能エネルギーの軽減コストと供給曲線に関するデータと調査結果を比較するのは非常に難しいことにも注目すべきである。地域、国レベルの研究の多くは、中期の二酸化炭素排出軽減のベースラインは 10%以下、軽減コストは約 100US ドル/t CO₂ (2005 年) としている。ここでレビューされたシナリオの多くで報告されている緩和ポテンシャルに比べ、低コストの軽減ポテンシャル

は極めて低い [10.4.3.2]。

10.5 商業化と普及のコスト

一部の再生可能エネルギー技術は、現在の市場のエネルギー価格に対して大まかには競争力を持っている。その他のほとんどの再生可能エネルギー技術は、たとえば、好ましい資源条件の地域や、他の低価格のエネルギー供給のインフラが不足している地域など、特定の状況のもとで競争力のあるエネルギーのサービスを提供することが可能である。しかしながら、世界の大部分の地域では、多くの再生可能エネルギー源の急速な普及を確実なものにするためには依然として政策措置が不可欠である [2.7, 3.8, 4.6, 5.8, 6.7, 7.8, 10.5.1, 図 TS.1.9]。

図 TS.10.11 及び TS.10.12 は、均等化発電原価 (LCOE) についての追加的なデータを示している。これは、特定の再生可能エネルギー技術や再生可能暖房技術においては、それぞれ、均等化単価 (levelized unit costs) または均等化発電コスト (levelized generation cost) とも呼ばれる。図 TS.10.13 は、輸送燃料の均等化原価 (LCOF) を示す。均等化発電原価は、エネルギー変換装置の全原価（つまり、投資費用、運転保守費用、燃料費、廃棄費用など）を指し、耐用年数内のエネルギー出力に対してこれらのコストを割り当てたものである。ただし、補助金や政策インセンティブは考慮していない。一部の再生可能エネルギー技術（たとえば太陽光発電、集光型太陽熱発電、風力エネルギーなど）は、様々なコストに対し投資コストが高い割合を占めるという特徴があるため、適用される割引率は、これらの技術の均等化発電原価に大きな影響を与える（図 TS.10.11, TS.10.12, 及び TS.10.13 参照） [10.5.1]。均等化発電原価は、文献レビューに基づき、可能である最新のコストデータを示すものである。同一の技術の均等化原価は、再生可能エネルギー源の基盤や地域的な投資費用、財政支援や運転保守などによって、世界各地でばらつきがあるため、それぞれの範囲はかなり幅広い。異なる技術間の比較は、図 TS 1.9, TS 10.11, TS.10.12, 及び TS.10.13 で提供されるコストデータのみに基づいて行うべきではなく、場所、プロジェクト、投資家に特有な状況も考慮すべきである。技術の章 [2.7, 3.8, 4.7, 5.8, 6.7, 7.8] では、この点について有益な鋭い視点を提供している [10.5.1]。

ここに示されたコストの幅には、統合コスト（第 8 章）、外部コストまたは便益（第 9 章）、または政策コスト（第 11 章）は反映されていない。適切な条件を仮定すると、その範囲の下限は、一部の再生可能エネルギー技術がすでに、世界の大部分の地域における現在のエネルギー市場において、従来型の技術と競合することが出来ることを示している [10.5.1]。

[10.4.4, 図 10.23, 10.25, 10.26, 及び 10.27] に示した供給コスト曲線は、使用可能な資源の主材料についての追加的な情報を示すものである（資源採取に関連する均等化発電原価の関数として示される）。これとは対照的に、[10.3.2.1, 図 10.15～10.17] で検討されている供給コスト曲線は、再生可能エネルギー拡大の特定の軌道がたどられた時点における、様々な地域において利用される再生可能エネルギーの（再び、関連する均等化発電原価の関数としての）総量を示す。加えて、技術の章のコストに関する節で示された均等化発電原価と図 TS.10.11, TS.10.12, 及び TS.10.13（及び Annex III において）示された均等化発電原価は、現在のコストについてのものであることは強調しなければならない [10.5.1]。

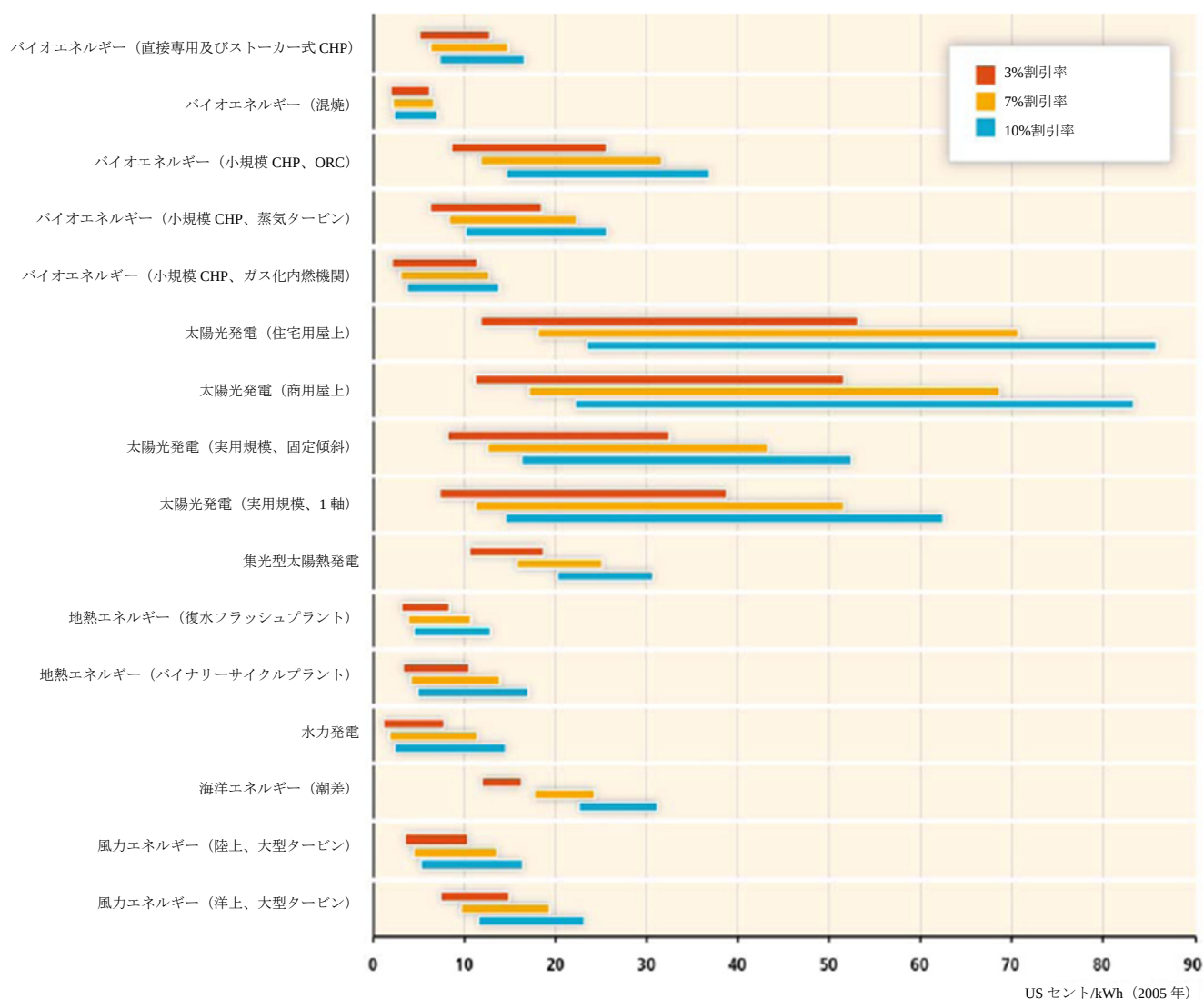


図 TS.10.11: 3%、7%、10%の割引率における商用可能な再生可能エネルギー技術の均等化発電原価。すべての技術に対する均等化発電原価の推定値は、Annex III で要約されている入力データ及び Annex II で説明されている手法に基づく。均等化原価幅の下限は、投資、運転保守、(該当する場合) バイオマスコストの幅の下限、及び設備利用率と耐用年数の幅の上限、また(該当する場合) 変換効率、副産物収入の幅の上限に基づく。均等化原価幅の上限は、投資、運転保守、(該当する場合) バイオマスコストの幅の上限、及び設備利用率と耐用年数の幅の下限、また(該当する場合) 変換効率、副産物収入の幅の下限に基づく。変換効率、副産物収入、耐用年数は、場合によっては基準値または平均値に設定されることに注意。データや補足情報については、Annex III を参照 (CHP: コージェネレーション、ORC: 有機ランキンサイクル、ICE: 内燃機関) [図 10.29]。

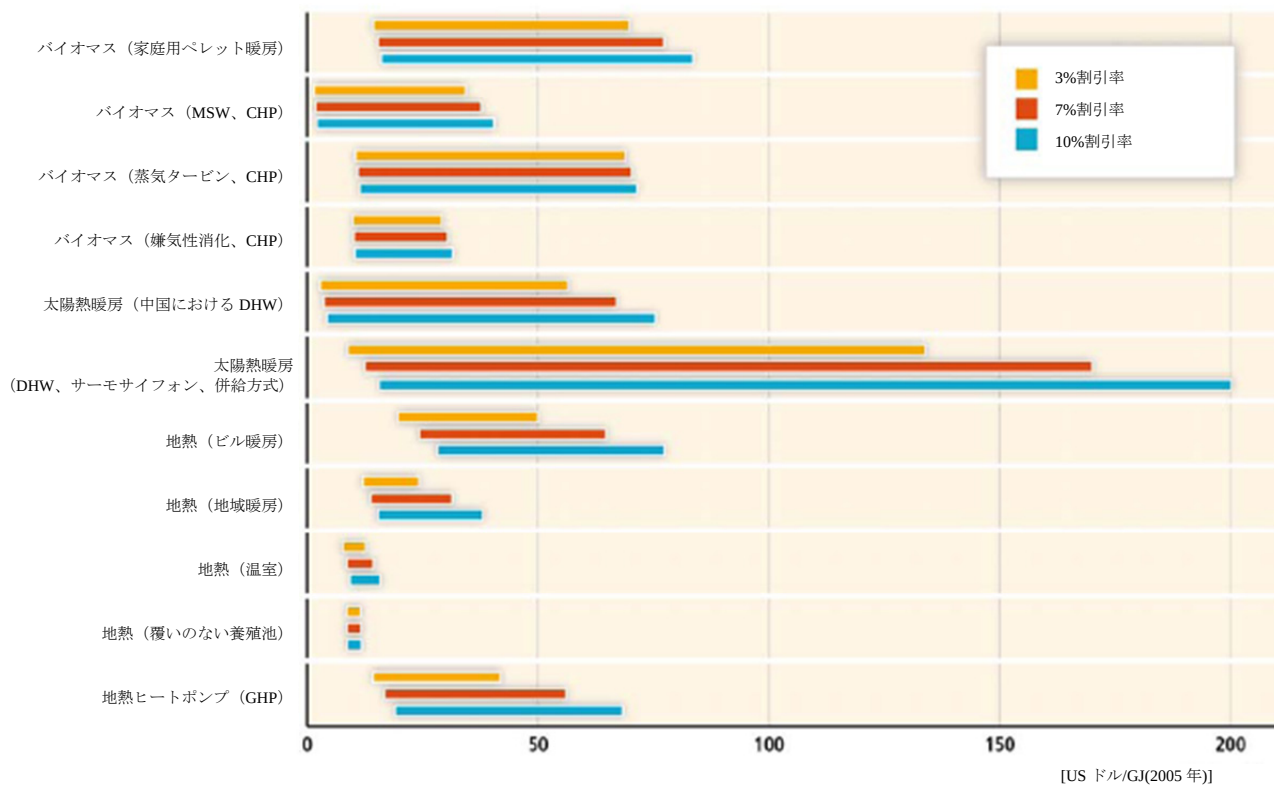


図 TS.10.12: 3%、7%、10%の割引率における商用可能な再生可能エネルギー技術の熱の均等化原価 (LCOH)。すべての技術に対する熱の均等化原価の推定値は、Annex III で要約されている入力データ及び Annex II に説明されている手法に基づく。均等化原価幅の下限は、投資、運転保守 (O&M)、(該当する場合) 供給原料のコストの幅の下限、及び設備利用率と耐用年数の幅の上限、また (該当する場合) 変換効率、副産物収入の幅の上限に基づく。均等化原価幅の上限は、従って、投資、運転保守 (O&M)、(該当する場合) 供給原料のコストの幅の上限、及び設備利用率と耐用年数の幅の下限、また (該当する場合) 変換効率、副産物収入の幅の下限に基づく。設備利用率、及び耐用年数は、場合によって、基準値または平均値に設定されることに注意。データや補足情報については、Annex III を参照 (MSW: 一般廃棄物、DHW: 住宅用温水) [図 10.30]。

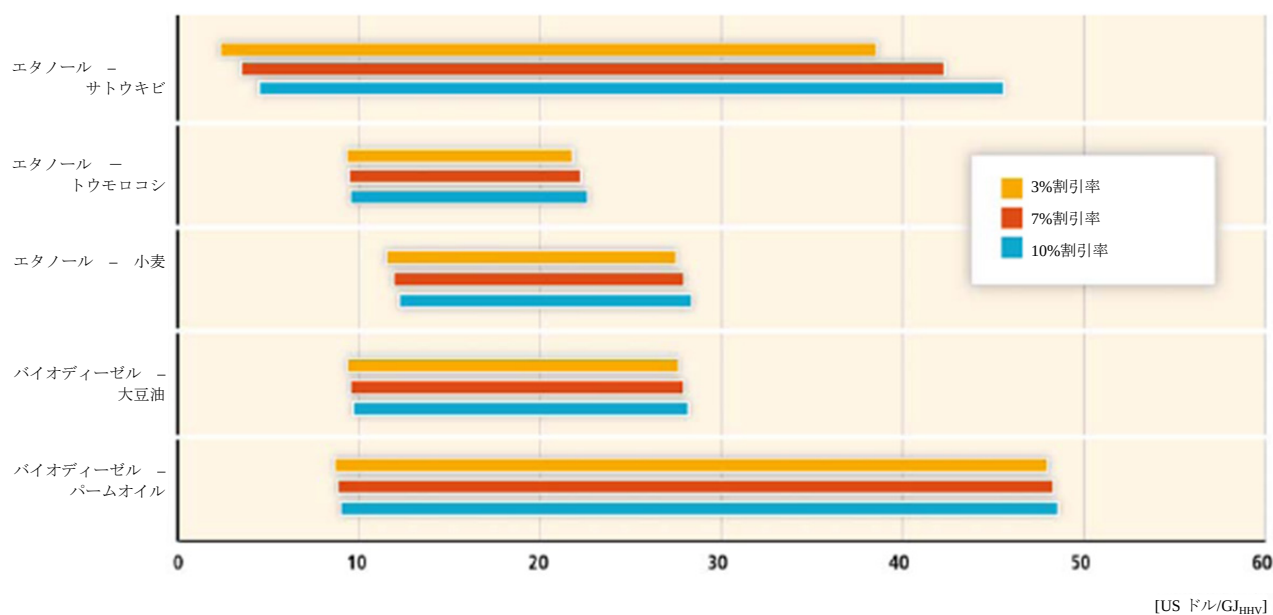


図 TS10.13: 3%、7%、10%の割引率における商用可能なバイオマス変換技術の燃料の均等化原価（LCOF）。すべての技術に対する燃料の均等化原価の推定値は、Annex III にまとめられている入力データ及び Annex II にて説明されている手法に基づく。均等化原価幅の下限は、投資、運転保守（O&M）、供給原料のコストの幅の下限によって決まる。均等化原価幅の上限は、投資、運転保守、供給原料のコストの幅の上限によって決まる。変換効率、副産物収入、設備利用率、及び耐用年数は、平均値になっていることに注意。データや補足情報については、Annex III を参照（HHV: 高位発熱量）[図 10.31]。

再生エネルギー技術における大きな進歩と関連したコスト削減は、過去 10 年間で実証された。ただし、これらを牽引する様々なドライバーや相互作用（たとえば、研究開発による学習、経験による学習、使用による学習、相互作用による学習、技術の大型化、規模の経済）は、必ずしも詳細には理解されていない [2.7, 3.8, 7.8, 10.5.2]。

経験的見地から見れば、コスト削減は、経験（または、「学習」）曲線によって説明することが出来る。

（累積の）設備容量の倍増に対し、多くの技術において、特定の投資コスト（特定のコスト指標に依存する均等化原価や単価）はほぼ一定割合の減少を示した。この改善を示す数値は、学習率（LR）と呼ばれる。観測された学習率の概要を、表 TS.10.1.に示す [10.5.2]。

表 TS.10.1: 様々なエネルギー供給技術に関する観測された学習率。古い文献では短い期間を対象としているため、信頼性が低いことに注意[表 10.10]。

技術	出典	国/地域	期間	学習率 (%)	性能測定単位
陸上風力					
	Neij, 1997	デンマーク	1982 - 1995	4	風力タービンの価格 (US ドル/kW)
	Mackay and Probert, 1998	アメリカ	1981 - 1996	14	風力タービンの価格 (US ドル/kW)
	Neij, 1999	デンマーク	1982 - 1997	8	風力タービンの価格 (US ドル/kW)
	Durstewitz, 1999	ドイツ	1990 - 1998	8	風力タービンの価格 (US ドル/kW)
	IEA, 2000	アメリカ	1985 - 1994	32	発電コスト (US ドル/kWh)
	IEA, 2000	EU	1980 - 1995	18	発電コスト (US ドル/kWh)
	Kouvaritakis et al., 2000	OECD	1981 - 1995	17	風力タービンの価格 (US ドル/kW)
	Neij, 2003	デンマーク	1982 - 1997	8	風力タービンの価格 (US ドル/kW)
	Junginger et al., 2005a	スペイン	1990 - 2001	15	ターンキー投資コスト (ユーロ/kW)
	Junginger et al., 2005a	イギリス	1992 - 2001	19	ターンキー投資コスト (ユーロ/kW)
	Soderholm and Sundqvist, 2007	ドイツ、イギリス、デンマーク	1986 - 2000	5	ターンキー投資コスト (ユーロ/kW)
	Neij, 2008	デンマーク	1981 - 2000	17	発電コスト (US ドル/kWh)
	Kahouli - Brahmi, 2009	世界	1979 - 1997	17	投資コスト (US ドル/kWh)
	Nemet, 2009	世界	1981 - 2004	11	投資コスト (US ドル/kWh)
	Wiser and Bolinger, 2010	世界	1982 - 2009	9	投資コスト (US ドル/kWh)
洋上風力					
	Isles, 2006	EU 諸国 8 か国	1991 - 2006	3	風力発電基地への投資コスト (US ドル/kW)
太陽光発電 (PV)					
	Harmon, 2000	世界	1968 - 1998	20	太陽光モジュール価格 (US ドル/Wpeak)
	IEA, 2000	EU	1976 - 1996	21	太陽光モジュール価格 (US ドル/Wpeak)
	Williams, 2002	世界	1976 - 2002	20	太陽光モジュール価格 (US ドル/Wpeak)
	ECN, 2004	EU	1976 - 2001	20-23	太陽光モジュール価格 (US ドル/Wpeak)
	ECN, 2004	ドイツ	1992 - 2001	22	システムコストのバランス価格
	van Sark et al., 2007	世界	1976 - 2006	21	太陽光モジュール価格 (US ドル/Wpeak)
	Kruck and Eltrop, 2007	ドイツ	1977 - 2005	13	太陽光モジュール価格 (ユーロ/Wpeak)
	Kruck and Eltrop, 2007	ドイツ	1999 - 2005	26	システムコストのバランス価格
	Nemet, 2009	世界	1976 - 2006	15-21	太陽光モジュール価格 (US ドル/Wpeak)
集光型太陽熱発電 (CSP)					
	Enermodal, 1999	アメリカ	1984 - 1998	8-15	設備投資コスト (US ドル/kW)
バイオマス					
	IEA, 2000	EU	1980 - 1995	15	発電コスト (US ドル/kWh)
	Goldemberg et al., 2004	ブラジル	1985 - 2002	29	エタノール燃料価格 (US ドル/m ³)
	Junginger et al., 2005b	スウェーデン、フィンランド	1975 - 2003	15	森林木材チップ価格 (ユーロ/GJ)
	Junginger et al., 2006	デンマーク	1984 - 1991	15	バイオマス生産コスト (ユーロ/Nm ³)
	Junginger et al., 2006	スウェーデン	1990 - 2002	8-9	バイオマス CHP 電力 (ユーロ/kWh)
	Junginger et al., 2006	デンマーク	1984 - 2001	0-15	バイオマス生産コスト (ユーロ/Nm ³)
	Junginger et al., 2006	デンマーク	1984 - 1998	12	バイオガスプラント (ユーロ/m ³ バイオガス/日)
	Van den Wall Bake et al., 2009	ブラジル	1975 - 2003	19	サトウキビ由来のエタノール (US ドル/m ³)
	Goldemberg et al., 2004	ブラジル	1980 - 1985	7	サトウキビ由来のエタノール (US ドル/m ³)
	Goldemberg et al., 2004	ブラジル	1985 - 2002	29	サトウキビ由来のエタノール (US ドル/m ³)
	Van den Wall Bake et al., 2009	ブラジル	1975 - 2003	20	サトウキビ由来のエタノール (US ドル/m ³)
	Hettinga et al., 2009	アメリカ	1983 - 2005	18	トウモロコシ由来のエタノール (US ドル/m ³)
	Hettinga et al., 2009	アメリカ	1975 - 2005	45	トウモロコシ生産コスト (US ドル/t トウモロコシ)
	Van den Wall Bake et al., 2009	ブラジル	1975 - 2003	32	サトウキビ生産コスト (US ドル/t)

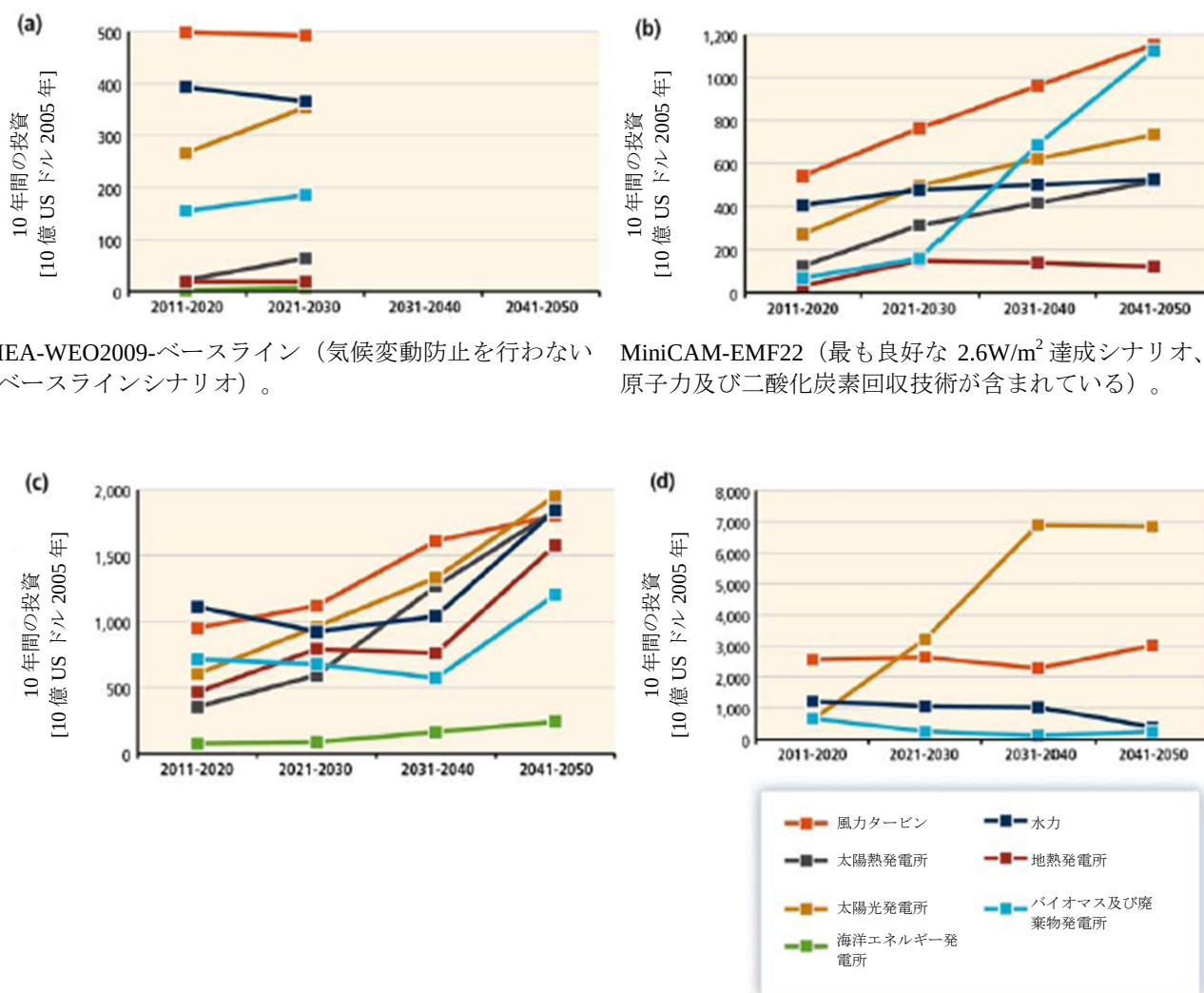
過去の経験曲線を推定することによって将来のコストを評価するあらゆる取り組みにおいては、学習率の不確実性に加え、注意事項や知識のギャップを考慮に入れなければならない。[10.5.6 と 7.8.4.1] 補足的な方法として、専門家への聞き取り調査は、将来のコスト削減の可能性についての追加的な情報を収集するために利用することができ、学習率を使用して得られた評価と比較出来る。さらに、技術改良の可能性を特定するための工学的なモデル分析も、コスト予測を開発する追加的な情報を提供する [2.6, 3.7, 4.6, 6.6, 7.7, 10.5.2]。

たとえば、重要な潜在的技術進歩や関連するコスト削減は、以下の応用分野（これに限るものではない

が）で期待されている：次世代バイオ燃料やバイオリファイナリー、先進的な太陽光発電（PV）や集光型太陽熱発電（CSP）の技術や製造プロセス、涵養地熱システム、複数の先端海洋技術。水力発電に関するさらなるコスト削減については、他の再生可能エネルギー技術ほど重要ではない可能性が高いが、広い自然条件下で水力発電プロジェクトを技術的に実行可能にし、新規及び既存のプロジェクトの技術性能を改善するための研究開発のチャンスは存在する [2.6, 3.7, 4.6, 5.3, 5.7, 5.8, 6.6, 7.7]。

特定の革新的な技術へ先行投資すべきかどうかという疑問に対する回答は、その技術を単独で扱っている限り、出すことができない。この問題点を明らかにし、とりわけ、今後の気候変動防止技術同士の競争を調べる初めての試みとして、統合評価のモデリングを行う研究者が内生的な手法による技術的学習モデルを開発し始めている。こうしたモデリングによる比較の結果、気候に関する厳しい目標を背景として、技術学習における先行投資は多くの場合正当化され得るということが示されている[10.5.3.]。

しかしながら、図 TS.10.14 で検討されている様々なシナリオやその他の研究が明白に示すように、これらの投資の正確な量や時期についてはかなりの不確実性が伴う [10.5.4]。



ER-2010 (450 ppmv CO₂eq、原子力及び二酸化炭素回収技術は含まれていない)。

ReMIND-RECIPE (450 ppmv CO₂eq、原子力及び二酸化炭素回収技術は含まれる)。集光型太陽熱発電は考慮されていないので、他のシナリオと比較して太陽光発電の割合が高い。

図 TS.10.14: 野心的な気候変動防止目標を達成するために必要な、世界における 10 年間の投資の例(単位:10 億 US ドル (2005 年))。比較対象として、(a) は IEA-WEO2009-ベースライン (気候変動防止を行わないベースラインシナリオ) を示す[図 10.34]。

10.3 節で詳細に分析された 4 つの例示シナリオは、発電部門における 10 年間にわたる世界の累積投資の範囲をカバーしている。その範囲は、2011～2020 年の 10 年間で 1 兆 3600～5 兆 1000 億 US ドル (2005 年)、2021～2030 年の 10 年間で 1 兆 4900～7 兆 1800 億 US ドル (2005 年) であり、これらの数値によって、将来の市場価格とその投資機会を評価することが出来る。低い数値は、国際エネルギー機関 (IEA) の World Energy Outlook 2009 のシナリオを参照したものであり、高い数値は、大気中の二酸化炭素 (単独) 濃度を 450ppm に安定化させるシナリオを参照したものである。参照シナリオにおける年間の平均投資額は、2009 年に報告された各々の投資額よりもわずかに減っている。2011～2020 年における再生可能エネルギー発電所部門の投資額で年間平均値の高いものは、この分野における世界の投資が現在よりも 3 倍に膨れ上がるという予測にほぼ対応したものである。さらに、次の 10 年間 (2021～2030 年) においては、5 倍に増加することが予測されている。但し、年間投資の額の多い数値でさえ、世界の GDP の 1%にも満たない。さらに、再生可能エネルギー発電所の設備容量が増えれば、化石及び原子力燃料の量は減ることになるが、一方で、一定の電力需要を満たすためにはこれらの燃料が必要とされる場合もある[10.5.4]。

10.6 社会的、環境的コストと便益

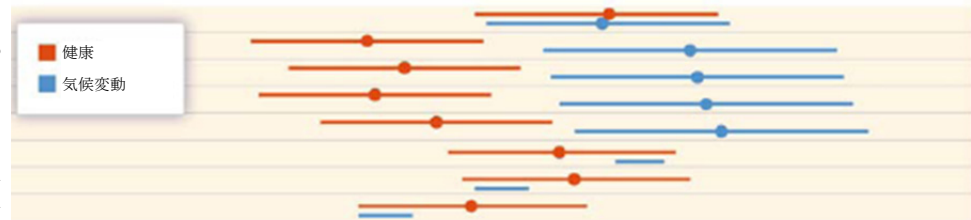
エネルギー抽出、変換、及び使用は、著しい環境的影響や社会的コストを発生させる。多くの場合、化石燃料を基盤としたエネルギーを再生可能エネルギーに変えることで、温室効果ガス排出量を削減し、それ自身による他の環境的影響や外部コストもある程度削減し得るが、再生可能エネルギーも同様に、環境的影響と外部コストを持っており、それはエネルギー源や技術に左右される。これらの影響やコストも考慮しなければならない、また、包括的なコスト評価が必要とされる場合には考慮しなければならない [10.6.2]。

図 TS.10.15 は、2つの主な外部コストの構成要素、つまり気候関連の外部コストと健康関連の外部コストの不確実性の幅が広範囲にわたっていることを示している。小規模のバイオマス燃焼 CHP 発電所は、微粒子排出による健康への影響のために、比較的高い外部コストを生じる。洋上風力エネルギーは、外部コストが最小になるものと思われる。原子力に対する外部コストは、ここでは報告されていない。それは、外部コストの特徴と評価、低頻度事故や近い将来の廃棄物処理場からの放射能漏れによる放射性核種の放出からくるリスクが、実質的に避けられない例えば気候変動や大気汚染のものとは大きく違っているからである。しかしながら、そうした原子力関連の外部影響は、社会における議論や判断によって考慮することが出来る。また、様々なエネルギーの生産チェーン（石炭、石油、ガス、水力など）による死亡者数で見た事故のリスクは、OECD 加盟国よりも非加盟国において一般に高い [10.6.3, 9.3.4.7]。

個別の技術については外部コストのみが図 TS.10.15 に示されているため、1つの技術が別の技術を代替すると仮定した場合、便益が導き出される。再生可能エネルギー源とそれを発電のために使う技術は、化石燃料を基盤とした技術よりも、発電量当たりの外部コストがほとんどの場合低い。しかしながら、例外もあるため、事例に応じた検討が必要である [10.6.3]。

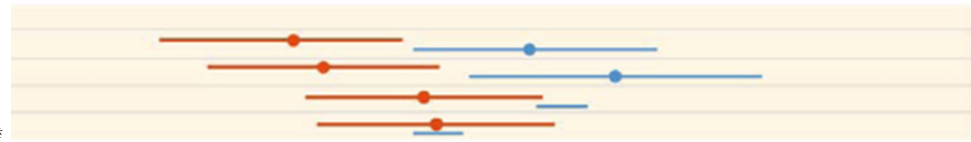
石炭火力発電所

- (A) 既存のアメリカの発電所
- (B) 石炭コンバインドサイクル $\eta=46\%$
- (B) 石炭 $\eta=43\%$
- (B) 褐炭コンバインドサイクル $\eta=48\%$
- (B) 褐炭 $\eta=40\%$
- (C) 硬質炭 800 MW
- (C) 硬質炭 燃焼後、二酸化炭素回収・貯留付き
- (C) 褐炭 酸素燃焼、二酸化炭素回収・貯留付き



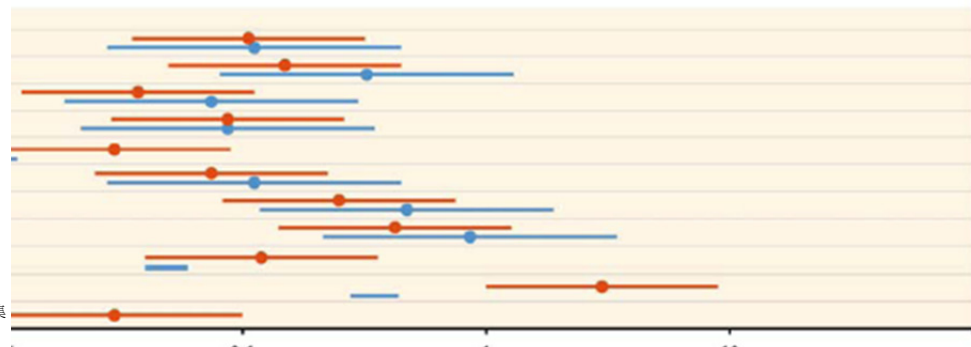
天然ガス火力発電所

- (A) 既存のアメリカの発電所
- (B) 天然ガス $\eta=58\%$
- (C) 天然ガス コンバインドサイクル
- (C) 天然ガス 燃焼後、二酸化炭素回収・貯留付き



再生可能エネルギー

- (B) 太陽熱
- (B) 地熱
- (B) 風力 2.5 MW、洋上
- (B) 風力 1.5 MW、陸上
- (C) 風力、洋上
- (B) 水力 300 kW
- (B) 太陽光発電 (2030 年)
- (B) 太陽光発電 (2000 年)
- (C) 太陽光発電、南ヨーロッパ
- (C) バイオマス CHP 6 MWeI
- (D) バイオマス、火格子ボイラー、静電集塵器(ESP) 付き 5・10 MW 燃料



外部コスト[US セント/kWh]

図 TS.10.15: 再生可能エネルギー及び化石エネルギーの発電のライフサイクルに起因する外部コストの例。この図は対数スケールとなっていることに注意。黒線は、気候変動に起因する外部コストの範囲を示し、赤線は、大気汚染物質による健康への影響に起因する外部コストの範囲を示す。化石エネルギーでは、二酸化炭素回収・貯留が装備されていない場合、気候変動に起因する外部コストが大部分を占める。Comb.C: コンバインドサイクル (Combined Cycle)、Postcom: 燃焼後 (Post-Combustion)、 η : 効率要素。これらの結果は、それぞれ異なる仮定による 4 つの研究に基づく (A~D)。健康への影響の外部コストに対する不確実性は、3 倍であると考えられている [図 10.36]。

しかし、エネルギー源の外部影響に関する評価及び判断については、不確実性が多く存在している。物理学的、生物学的、及び健康面での損害についての評価には、多くの不確実性が含まれ、その推定値は通常、計算モデルに基づいている（その結果については、多くの場合立証が難しい）。その損害や変化は、コスト算出に利用されるような市場価値をほとんど持たない。従って、損害の評価は間接的な情報またはその他の方法を使用せざるを得ない。また、損害の多くは、遠い将来において、ここで検討されたエネルギー生産の恩恵を受けている社会とはまったく異なる社会において起こるものであるため、判断を複雑なものにしている。こうした要因は、外部コストの不確実性の一因となっている [10.6.5]。

しかしながら、再生可能エネルギー由来の外部コストと便益に関する知見は、最良の選択肢を選び、エネルギーシステムを全体として省エネルギーと高福祉の方向へ導くための社会への助言を提供する [10.6.5]。

第 11 章：政策、財政支援及び実行

11.1 序論

再生可能エネルギーの生産量は世界で急速に増加しているが、多数の障壁がその発展を阻害し続けている。したがって、再生可能エネルギーが、気候変動緩和に多大に且つ急速に貢献する可能性がある場合、様々な形の経済支援政策や促進的環境を作り出す政策が必要とされる可能性が高い [11.1]。

再生可能エネルギー政策は、再生可能エネルギーの技術開発及び普及を妨げる様々な障壁を乗り越えるのを支援し、再生可能エネルギーが占める割合の拡大を促進してきた。再生可能エネルギー政策はすべてのレベルの行政（地方、州・県、国、世界）において制定されており、その範囲は技術開発に対する基礎的な研究開発から、導入される再生可能エネルギーシステムやそれらが生み出す電力、熱、燃料の利用促進までである。一部の国では、規制機関や公益事業が責任を与えられているか、または独自のイニシアチブで再生可能エネルギーのメカニズムの支援を計画し、実行する。国際機関、開発銀行のような非政府関係者も重要な役割を担っている [1.4, 11.1, 11.4, 11.5]。

再生可能エネルギーは、配電（利用可能性）の時間や信頼性、再生可能エネルギーのネットワークへの統合に関するその他の測定基準といった、新たな評価因子によって評価される。また、再生可能エネルギー普及を促す環境を作り出すために、政府やその他の主体が出来ることもたくさんある [11.1, 11.6]。

11.1.1 気候変動政策をはじめとした再生可能エネルギー特有の政策の根拠

再生可能エネルギーは、社会に多くの便益をもたらす。一部の再生可能エネルギー技術は現在の市場エネルギーの価格と広範囲にわたり競合している。広範囲にわたる競合をしていない別の再生可能エネルギーの多くも、一定の状況下では競合するエネルギーサービスを提供している。しかし世界の大部分の地域においては、いまだに再生可能エネルギーの普及拡大の促進には政策措置が必要とされている [11.1, 10.5]。

気候政策（炭素税、排出量取引または規制政策）は、炭素集約技術と比較すると低炭素技術の関連費用を減少させる。しかし、気候政策（炭素価格など）のみで再生可能エネルギーに関する広範囲の環境・経済的・社会的目的を満たすのに十分なレベルで、再生可能エネルギーの促進を図れるかは疑問である [11.1.1]。

2 つの関連性のない市場の失敗が、排出量取引市場（または一般に温室効果ガス価格政策）が存在していても、技術開発の潜在力が高い革新的な再生可能エネルギー技術の追加支援を行う理由を作り出している。1 つ目の市場の失敗は、温室効果ガス排出の外部費用である。2 つ目の市場の失敗はイノベーションの分野にある。つまり、企業が再生可能エネルギー技術の学習に対する投資の将来の便益を過小評価する場合、またはそれらの便益を使用できない場合、企業はマクロ経済の観点から最適とされる額よりも少ない額で投資をする、ということである。温室効果ガス価格政策だけではなく再生可能エネルギーに特有な政策も、関連する技術開発の機会があるならば（または気候変動緩和を超える目標が達成されるならば）、経済的観点から妥当である。ロックイン、炭素リーケージ及びリバウンドの影響のような潜在的悪影響は、政策のポートフォリオ設計において考慮されなければならない [11.1.1, 11.5.7.3]。

11.1.2 政策のタイミングと強み

展開政策に対する研究開発政策の調整のタイミング、強み、レベルは、その政策の効率と効果、社会に対する総コストに対し、次の 3 つの方法で影響を与える。1) 国が再生可能エネルギーを直ちに促進するか、あるいはコストがさらに下がるまで待つか 2) 国が再生可能エネルギーを支援すると決断した場合、その後の研究開発政策が普及政策に移行するタイミング、強さ、及びコーディネート 3) 加速させる「市場需要」政策と緩やかな「市場需要」政策の実施のコストと便益の比較についての重要な議論。1 つ目に関して、化石燃料技術に対し、十分な競争力を持つには、損益分岐点に達するまで再生可能エネルギーに対する大幅な事前投資が必要となる。その投資を行わなければならない時期は目標によって異なるが、国際社会が世界の気温上昇を 2℃に安定させることを目標とするならば、低炭素技術に対する投資はすぐにでも開始しなければならない。

11.2 現在の動向：政策、財政支援及び投資

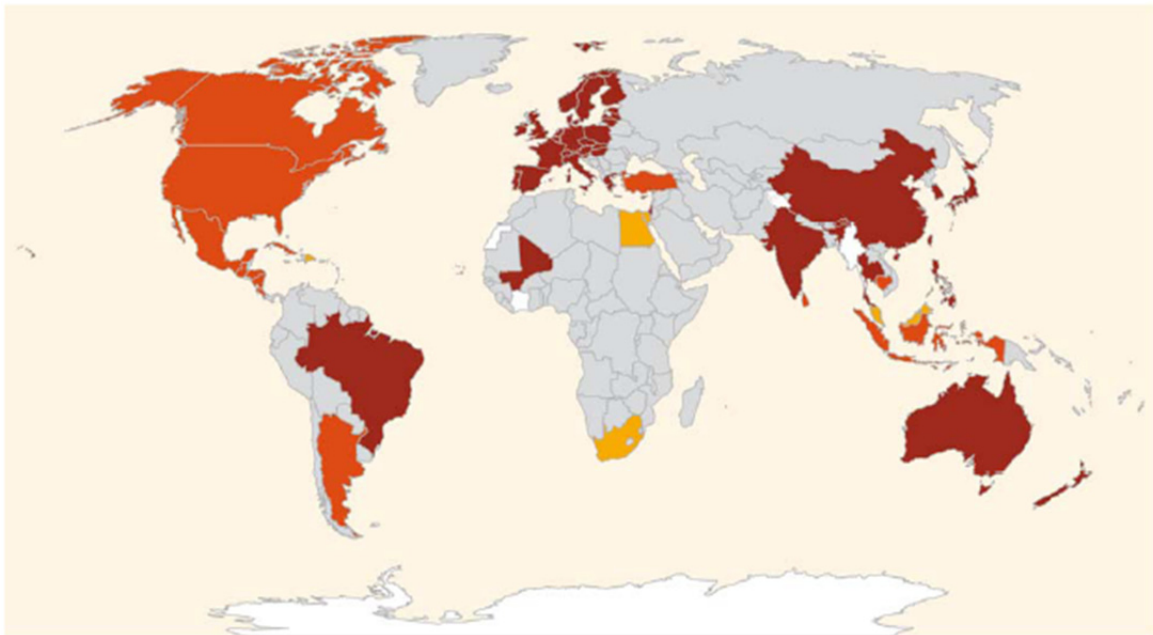
ここ数年、再生可能エネルギー政策の数及び種類が増えたことにより、1990 年代初頭までは、再生可能エネルギーの利用を促進する政策を制定する国はわずかであった。その後、特に 2000 年代初頭から中頃以降は、だんだん多くの国の地方自治体、州・県並びに国家レベル、また国際レベルにおいて政策が制定され始めている（図 TS.11.1 参照）[1.4, 11.1, 11.2.1, 11.4, 11.5]。

当初導入された政策の多くは先進国におけるものであったが、1990 年代後半から 2000 年代初頭以降は、再生可能エネルギーの利用を促進する政策の枠組みを政府の様々なレベルで制定する発展途上国も増えてきている。2010 年代初頭までにこれらの再生可能エネルギーの電力政策を持つ国のうち、約半数が世界各地の発展途上国である [11.2.1]。

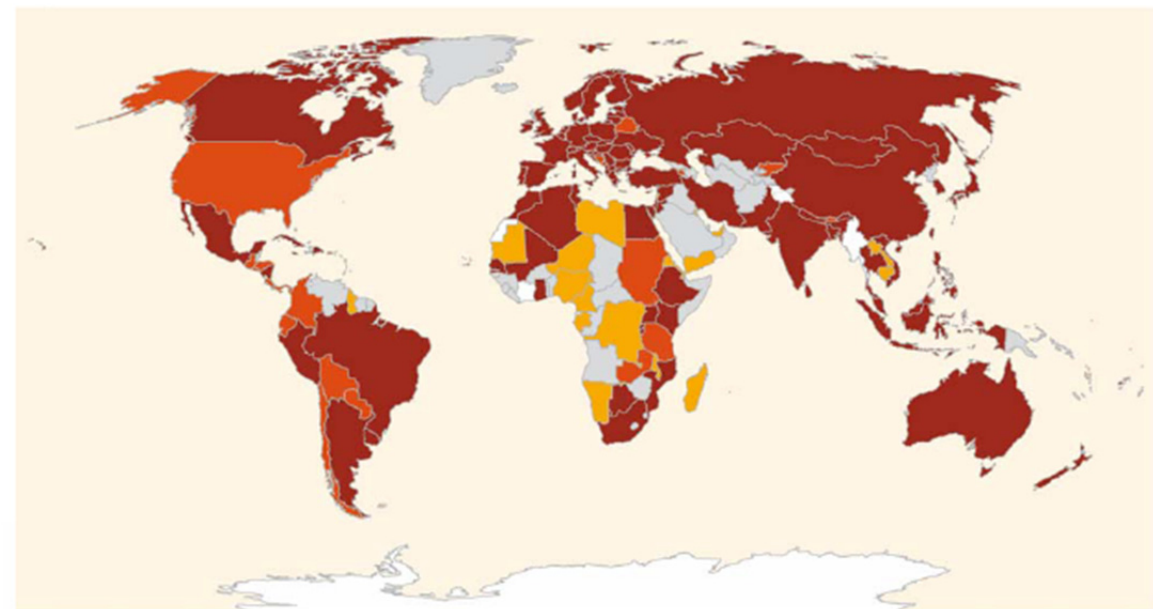
再生可能エネルギー政策を持つ多くの国は整備された複数の枠組みを有しており、現行の政策と対象の多くは時間とともに強化されてきた。国家の政策を超えて、国際政策や協定も増えている。世界中の数百に及ぶ都市や地方政府も、目標の確立、または再生可能エネルギー普及政策や地方の再生可能エネルギー開発を促進するためのその他の機構の制定を行っている [11.2.1]。

再生可能エネルギー政策の焦点は、冷暖房及び輸送部門を含めた、もっぱら電力だけに集中するものから変化している。これらの傾向は、再生可能エネルギー技術の範囲の拡大とその製品及び実際における成功例が増加するのとは一致している（第 2～7 章を参照）。同様に再生可能エネルギーにおける年間投資の急速な増加、及び、特に 2004 年や 2005 年以降の財政支援機関の多様性と一致している[11.2.2]。

2005 年



2011 年初頭



■ 1つ以上の再生可能エネルギーに特化した政策があり、1つ以上の再生可能エネルギーの普及目標を持つ国
■ 1つ以上の再生可能エネルギーに特化した政策を持つ国
■ 1つ以上の再生可能エネルギーの普及目標を持つ国
■ 再生可能エネルギーに特化した政策、再生可能エネルギーの普及目標のどちらも持たない国

図 TS.11.1: 2005 年中頃及び 2011 年初頭における少なくとも 1 つ以上の再生可能エネルギーに特化した普及目標や普及政策を持つ国。この図は、国家レベルの目標や政策を持つ場合に限り（地方自治体や州/県レベルを含まない）、必ずしも包括的なものではない [図 11.1]。

支援政策環境の拡大に呼応して、2004～2005 年以降、世界的に再生可能エネルギー部門全体の投資レベルが大幅に増加している。ファイナンスは、「一連の」技術開発またはその個々の段階に対して行われる。一連の技術開発には、1) 研究開発、2) 技術開発及び商業化、3) 設備製造及び販売、4) プロジェクトの建設、及び 5) 主に合併及び買収を通じた借り換え及び企業の売却、の 5 つの区分がある。以下のようにファイナンスは再生可能エネルギー部門の現在及び予想される成長の指標となり、これらの段階のそれぞれにおいて時間とともに増額されてきた [11.2.2]。

- （1）研究開発のファイナンスと（2）技術開発及び商業化の動向は、その部門の中長期的予想の指標となる。通常、数年後に技術が完全に商業化されて初めて利益が上がり始める形の投資が行

われている [11.2.2.2, 11.2.2.3]。

- ・（3）製造販売の投資の動向は、その部門（特に市場需要の増加が続く場合）の短期的予想の指標となる [11.2.2.4]。
- ・（4）建設投資の動向は、温室効果ガスに関連するコストの内部化が再生可能エネルギー・プロジェクトへの新しい資金の流れにつながる可能性の程度を含め、現在の部門の活動の指標となる [11.2.2.5]。
- ・（5）産業の合併・買収の動向は、その部門の成熟度全体を反映し、時間とともに広がる借り換え活動の動きは、従来の大口投資家が初期段階の成功した投資を先行者から買収しつつ、さらにその部門に参入することを意味する [11.2.2.6]。

11.3 主たる動因、機会及び便益

再生可能エネルギーは社会に対し多くの便益をもたらすことが出来る。二酸化炭素排出量の削減に加え、政府は地方環境の整備と健康効果など、以下のような多数の目標を達成するための再生可能エネルギー政策を決定してきた。すなわちエネルギー利用の促進、特に地方に対するもの、エネルギー技術及びエネルギー資源のポートフォリオ多様化によるエネルギー安全保障目標の向上、及び潜在的な雇用機会や経済成長による社会的及び経済発展などである [11.3.1–11.3.4]。

再生可能エネルギーにおける動因の相対的重要性は国によって異なり、時間が経つにつれ変化する。エネルギーの利用は、発展途上国では一次の動因とされるが、先進国ではエネルギー安全保障と環境に関する懸案事項が最も重要である [11.3]。

11.4 再生可能エネルギーの政策立案、実行、及びファイナンスに対する障壁

再生可能エネルギー政策は、再生可能エネルギーの技術開発や普及を妨げる様々な障壁を取り除く支援をすることで、再生可能エネルギーの割合の増加を促進してきた。再生可能エネルギー政策の決定、実行及び財政支援それぞれに特有の障壁（市場の失敗など）は再生可能エネルギーの普及をさらに阻害する可能性がある [1.4, 11.4]。

政策の策定及び制定の障壁には、再生可能エネルギー資源、技術、政策オプションに関する情報及び意識の不足、「ベストな」政策設計またはエネルギーの移行を実行する方法に関する理解の不足、外部コストと便益の定量化及び内部化に伴う困難性、既存の技術、政策にロックインされてしまうことなどがある [11.4.1]。

政策実行に関連する障壁には、既存の規制との矛盾、熟練労働者の不在や再生可能エネルギー政策を実施する制度の能力不足が含まれる [11.4.2]。

財政支援への障壁には、投資家間の認識不足、タイムリーで適切な情報の不足、財政支援構造及びプロジェクトの規模に関する問題、限定的な実績に関する問題が含まれる。また、一部の国では、不完全な資本市場や手ごろな財政支援を利用する手段の不足などの組織的な脆弱性がある。これらすべてはリスクとしての認識を増大させ、その結果コストが増加し、または再生可能エネルギーのプロジェクト財政支援の獲得をより困難にする。最も肝心なのは、多くの再生可能エネルギー技術が、現在のエネルギー市場価格に対する経済的競争力を持たないことであり、様々な形の政策の支援がないために投資家にとってそれらの技術が金融的に無益なものになること、また、それにより投資資本が制限されることである [11.4.3]。

11.5 政策オプションの経験とその評価

多くの政策オプションにより、再生可能エネルギー技術支援は、初期段階、実証、商業化の前段階から成熟及び広範囲の普及までの段階で可能となっている。

これらの政策には、再生可能エネルギー技術を促進させるための政府の研究開発政策（供給プッシュ）、再生可能エネルギー技術の市場を生み出す目的の普及政策（需要プル）が含まれる。政策は様々な方法で分類され得るが、世界的に認められた再生可能エネルギーの政策オプションまたは分類のリストは存在しない。本章では簡略化するために、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]。

- ・ 財政上のインセンティブ：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、あるいは払い戻しまたは助成金という形で国庫から支払いを受けている。
- ・ 公的ファイナンス：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：適用される者の行為を指導または制御する規則

目標は政策の中心的要素ではあるが、実施中の政策を成功させるのに特定の目標が必要なわけではない。さらに、目標を設定しても、それを遂行する政策がない場合、その目標は達成されない可能性が高い [11.5]。

政策手段の成功は、様々な目的や基準をどの程度達成可能かという点で決まる。

- ・ **効果**：意図した目的が達成された度合
- ・ **効率**：投入資本（インプット）に対する結果の比率、つまり経済的資源の消費に対して、実現した再生可能エネルギーの目標の比率
- ・ **エクイティ（株式の出資持ち分）**：政策の負担と配当の結果
- ・ **制度の実現可能性**：政策手段が合理的だとされ、賛同を得、採用され、実行される可能性の度合 [11.5.1]。

文献の多くは政策の効果及び効率に重点を置いている。特定の政策オプションの要素により、政策オプションが様々な基準を達成しやすくなったり、しにくくなったりする。また、これらの政策の設計や実行方法により、どの程度これらの基準を満たすかが決まる。政策やその設計の細部の選択は、最終的には政策決定者が考える目的や優先順位に依存する [11.5.1]。

11.5.1 再生可能エネルギーの研究、開発に関する政策

新しい低炭素技術の研究開発、イノベーション、普及及び展開は導入者が考えている以上に社会に便益をもたらし、その結果、その取り組みにかかる投資は少なくて済む。したがって、政府の研究開発は再生可能エネルギーを発展させる重要な役割を果たすことが出来る。全ての国が公的資金で研究開発を支える余裕があるわけではないが、一定のレベルの支援が可能な大多数の国では、再生可能エネルギーの公的研究がその初期技術の性能を高めることで初期の採用者の要求を満たすことが出来、既に商業環境で機能する既存の技術も改良している [11.5.2]。

政府の研究開発政策は学術的研究開発基金、助成金、賞金、税控除及び公営研究センターの利用などの財政的インセンティブや、長期低利貸し付け、転換権付き貸し付け、公的出資比率及びベンチャー・キャピタル基金などの公的な融資を含む。研究開発の題目で行われる投資は、再生可能エネルギーの資源マッピングから、商用の再生可能エネルギー技術の改良に到るまで、技術開発のライフサイクルに沿った幅広い活動にまたがっている [11.5.2]。

研究開発政策の成功は多くの要因に左右される。その一部は明確に定まるが、残りは文献の中で論争の対象となる。研究開発プログラムの結果の成功は、割り当てられた資金総額だけに関係するのではなく、毎年の財政支援の一貫性にも関係がある。研究開発が運用されたりされなかったりすると、技術の学習には悪影響が出る。また、学習とコスト削減は、継続性、コミットメントと取り組みの組織化、資金の

管理場所と管理方法に左右され、また同様に取り組みの規模にも依存する。文献には、急進的な技術進歩ではなく、漸増的な改善を目指す研究を通じた進展が研究開発政策にとってより成功するアプローチであると論じている。研究開発に対する助成金（及びその範囲を超えるもの）は「出口戦略」を持つよう設計されており、それにより技術が商品化され、環境の整った機能的で持続可能な部門を離れていくにつれ、助成金は徐々に廃止される [11.5.2.3]。

理論的な文献と技術的なケーススタディの両者から得られた最も確実な研究成果の1つによれば、研究開発投資は、他の政策手段で補完される場合に最も効果的である。限定的ではないが、特に、新たな再生可能エネルギー技術の需要を同時並行で強化する政策が、これに当てはまる。技術開発において、比較的初期の普及政策は、たとえば日本やデンマークのように、研究開発を通じたものか（製造の結果としての）活用を通じたものかを問わず、その学習を促進させる。研究開発及び普及政策は、一体となって研究開発に対する民間部門投資を引き出すプラス方向のフィードバック・サイクルを形成する（図TS.11.2を参照）[11.5.2.4]。

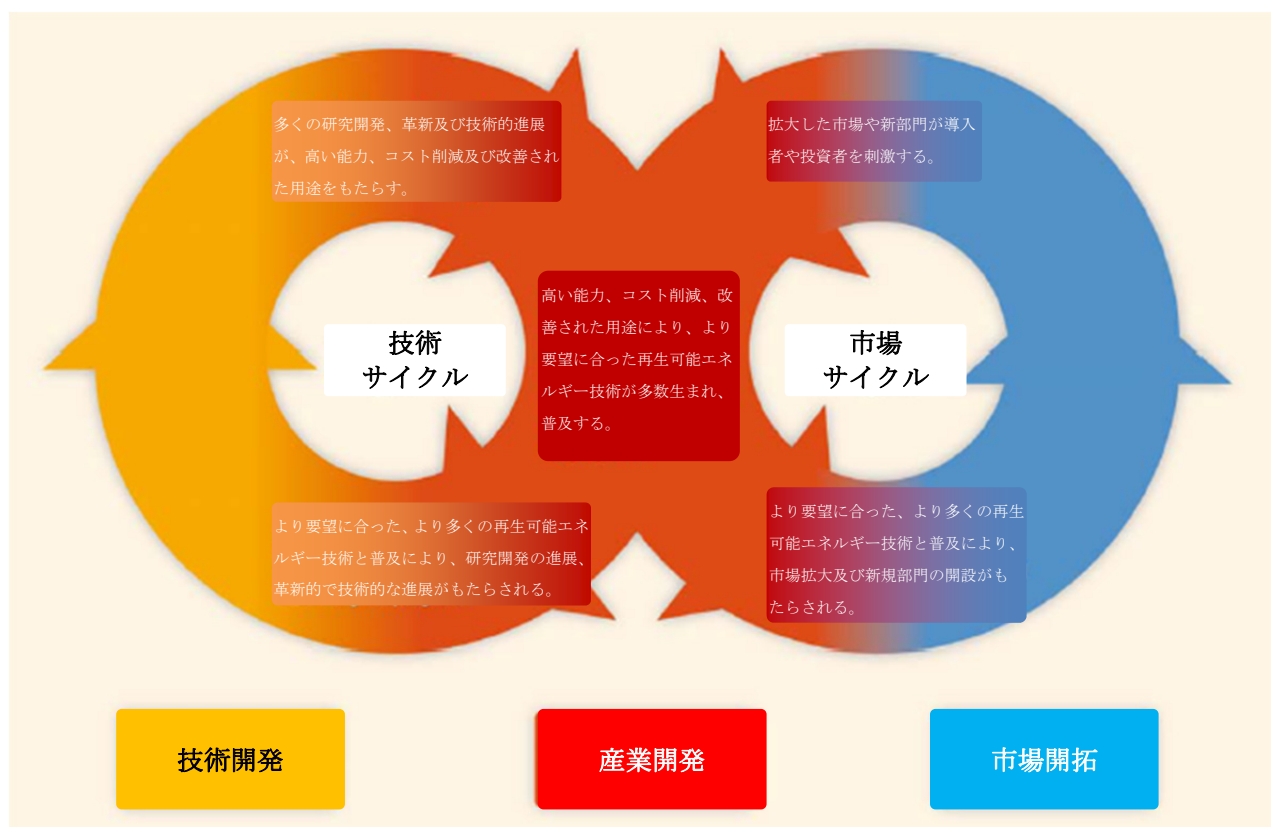


図 TS.11.2: 技術コストを下げる技術開発と市場展開の相互強化サイクル[図 11.5]

11.5.2 普及政策

特に再生可能エネルギーの普及を促進するために制定された政策の枠組みは多様であり、すべてのエネルギー部門に応用が可能である。これらには財政的インセンティブ（助成金、エネルギー生産報酬、割り戻し、税控除、減免、可変または加速減価償却）、公的ファイナンス（株式投資、保証、貸付、公的調達）及び、規則（市場割当、入札・競売、固定価格買取制度、エコ表示とグリーン・エネルギー購入、余剰電力購入、優先アクセス又はアクセスの保証、優先送電）が含まれる。規則とその影響は、ある最終消費部門と別の最終消費部門とでは大きく異なる一方、財政的インセンティブ及び公的ファイナンスはすべての部門に対し、広く適用される [11.5.3.1]。

インセンティブは、設置関連の先行投資コストの低減、生産コストの低下、または再生可能エネルギー発電で受け取る支払いの増加により、再生可能エネルギー投資のコスト及びリスクを軽減することが出来る。財政上のインセンティブはまた、エネルギー市場価格に比べて再生可能エネルギーが競争的に不利な立場のままになっている様々な市場の失敗を補償し、再生可能エネルギー投資の財政的負担を減ら

す手助けとなる [11.5.3.1]。

財政的インセンティブは種類の異なる政策を組み合わせた場合、最も効果的となる傾向にある。一般に、生産に助成金を出すインセンティブは、望ましい結果、即ちエネルギーの発生 (Sawin, 2001) を促進するため、投資助成金に比べ好まれる。しかし政策は、特定の技術や成熟の段階に合わせなければならず、投資の助成金は、ある技術が依然として比較的割高な場合か、その技術の適用規模が小さい場合 (小規模な屋上の太陽熱システムなど) に役立つものになり得る。特に、技術の基準とシステム及び設備の最低限の質を保証する証明が組み合わされている場合に当てはまる。交付や割り戻しの利益はあらゆる収入レベルの人に対し公平であり、その結果、幅広い投資と活用を促進するので、風力エネルギー政策の実例からは、生産交付及び割り戻しは税控除が望ましいとされる。また、一般的に購入または生産の時点、またはその前後で交付や割り戻しが行われるため、(課税期間の終了時に向けて最大限投資する傾向よりも) 時間が経つにつれより一様に増加する結果となる。税を基にしたインセンティブは、昔から最も成熟し、安価な利用可能技術のみを促進するのに利用される傾向にある。一般に、多くの利益を上げ、納税しており、税控除を有益に利用する立場にある民間部門企業が存在する国では税控除が最適な働きをする [11.5.3.1]。

公的ファイナンスのメカニズムには2つの目的がある。1つは再生可能エネルギー・プロジェクトへの商業的な投資を直接集めたり実施すること、もう1つはこれらの技術を対象にした大規模で商業的に持続可能な市場を間接的に創り出すことである。長期低利貸し付けや保証のような従来の公的ファイナンスの政策に加え、多数の革新的な枠組みが、地方行政レベルなどの様々なところで現れてきている。これには、再交付が、エネルギーの節約 (カリフォルニア州の Property Assessed Clean Energy など) や多目的に利用する政府資金の「リサイクル」 (再生可能エネルギーのプロジェクトのエネルギー効率向上により貯蓄される公的資金の利用など) に適合可能にする資産所有者に対する長期貸付による再生可能エネルギーのプロジェクトの投資が含まれる [11.5.3.2]。

再生可能エネルギー技術及びエネルギー供給の公共調達、再生可能エネルギー市場を刺激するメカニズムと言及されることが多いが、実際にはそれほど活用されているわけではない。政府は、自己の保有施設用に再生可能エネルギーを購入する公約を行うか、消費者に対しクリーン・エネルギーのオプションを推奨することによって、再生可能エネルギー開発を支援することが出来る。この枠組みのポテンシャルは大きい。多くの国、州、及び国家において、エネルギー購入は公的支出の最も大きい割合を示し、政府が最大のエネルギー消費者である [11.5.3.2]。

規制政策には、量主導型政策と価格主導型政策がある。これには、クォータ制、固定価格買取制度、質的側面と質的インセンティブ、及びネットメーターなどのアクセス手段などが含まれる。量主導型政策は、達成すべき量を定め、市場が価格を決定出来るようにする。一方、価格主導型政策は、価格を定め、市場が量を決定出来るようにする。量主導型政策は、義務または命令の形式をとることで最終消費部門の3部門全てに利用可能である。質的インセンティブには、グリーン・エネルギー購入とグリーンラベルプログラムなどがある (政府により義務づけられることがあるが、常時ではない)。質的インセンティブには、グリーン・エネルギー購入及びグリーン表示プログラムなどがある (政府により義務づけられることがあるが、常時ではない)。このプログラムは、消費者にエネルギー製品の質に関する情報を提供し、自発的に決定出来るようにし、再生可能エネルギーの需要を牽引する [11.5.3.3]。

普及に対する政策 - 電力

今日まで、冷暖房や輸送よりも発電に対して再生可能エネルギーの利用を促進する政策はるかに多く制定されてきた。これらには、再生可能エネルギー電力発電に対する投資や、それを促進するための財政的インセンティブ、公的ファイナンス、及び様々な電力に特有の規制政策が含まれる。政府は再生可能エネルギー電力の利用を促進する様々な政策形式を使用するが、実施している最も一般的な政策は固定価格買取制度や市場割当 (または再生可能エネルギー利用割合基準 (RPS)) である [11.5.4]。

量基準型政策 (市場割当、再生可能エネルギー利用割合基準、及び入札・競売政策) や価格基準型政策 (固定価格及び割り増し価格の固定価格買取制度)、主に市場割当及び固定価格買取制度の評価を行い、効果及び効率の基準に焦点を置く文献が多数存在する。欧州委員会向けに実施されたものを含む、多くの過去の研究は、「適切な設計の」及び「適切に実施された」固定価格買取制度が、今まで再生可能エネルギー電力を促進するのに最も効率的 (受け取るトータル・サポートと発電コストの比較で決まる)

かつ効果的（消費される再生可能エネルギー電力の割合を増加させる能力）な支援政策であると結論付けている [11.5.4]。

適切に実施された固定価格買取制度が成功した主な理由の 1 つは、この制度が通常、長期固定価格の支払い、電力網接続とすべての発電に対する送電網の利用保証を組み合わせたことにより、投資の高い安全性を保証していることである。適切な設計の固定価格買取制度は技術的、地理的多様性の両方を助長してきており、様々な規模のプロジェクトを促進するのにより適切であることがわかっている。固定価格買取制度政策の成功はその内容次第である。最も効果的かつ効率的な政策は、以下の要素の大部分またはすべてを含んでいる [11.5.4.3]。

- ・ ユーティリティへの購入義務
- ・ 優先アクセスと優先給電
- ・ 発電コストをベースに、技術タイプやプロジェクトの規模によって区分された、綿密に算出した開始値を持つタリフ
- ・ 法に付記されている追加調整を伴う、長期の定期的な設計の評価と、短期の支払基準の調整。これは技術や市場の変化を反映させ、イノベーションや技術の変更を促し、コストを制御するためのものである。
- ・ ユーティリティを含む、ポテンシャルのある全ての発電機に関するタリフ
- ・ 適正利率を確保するための十分な期間にわたって保証されるタリフ
- ・ 利率に基づき、また国や地域全体で均等に分配されたコストへの統合
- ・ 明確な接続標準と、送配電コストを割り振る手順
- ・ 合理化された管理と申請プロセス
- ・ 適用除外が好ましいグループへの注意。たとえば競争の観点からの大口利用者、または低収入その他社会的に弱い立場の顧客など。

数か国における実例は、適切な設計の政策のもと、価格変動を少なくし（完全になくすことではない）、リスクを低減する長期契約を伴う再生可能エネルギーの証明書が発行される場合、市場割当スキームの効果は法に則った高いレベルに達する可能性があることを示している。一方、これらは最も成熟した、最低コストの技術に役立つことがわかっている。この効果は、様々な再生可能エネルギー・オプションが区別されている、または他のインセンティブと対になる場合には、政策の設計段階で対処される。最も効果的で効率的な量基準型枠組みには、以下の要素のすべてではないとしても、そのほとんど、特にリスクの最小化を支援するものが含まれている [11.5.4.3]。

- ・ 市場の大部分への適用（市場割当のみ）
- ・ 資源及び関係者などに対する明確に定義された適応ルール（市場割当及び入札・競売に該当）
- ・ 新設容量に明確な焦点を当てたバランスのとれた需給状態。市場割当は現時点での供給を上回るが、合理的なコストで達成可能（市場割当のみ）
- ・ 長期契約・特定買取義務及び終了日。市場割当とその次の市場割当の間に時間の空白が無いこと（市場割当のみ）。
- ・ 規則違反に対する適切な罰則と適切な執行（市場割当と入札・競売に該当）
- ・ 最低 10 年間の長期目標（市場割当のみ）
- ・ 技術固有の幅、あるいは差別的支援の適応（市場割当と入札・競売に該当）
- ・ 適切なリターン及び財政支援を可能にするための最低交付金（市場割当と入札・競売に該当）

ネットネーターまたは売電システムでは、指定した売電期間の別の時間に、小規模生産者が送電網に対し、顧客の超過負荷がその余剰発電で相殺される場合に限り、彼らの全需要量を超えて発電した再生可

能エネルギー電力のすべてを小売価格にてリアルタイムで「売却」出来るようにしている。これは、顧客に小規模の分散型電源に対する投資を促し、系統に電力を流れ込ませる動機を与えるための管理しやすい手段と考えられており、また、需要がピークとなる時間帯に再生可能エネルギー電力が生産される場合、ロードファクターを改善することで提供者に利益をもたらす。しかし、この制度のみでは、発電コストが小売価格よりも高額となる太陽光発電のような競争力の低い技術の著しい成長を促す刺激としては、発電コストが小売価格よりも高額となるため、ほとんどの場合で不十分であることが分かっている [11.5.4]。

普及のための政策 - 冷暖房

ますます多くの国で、再生可能エネルギーを利用した冷暖房（H/C）技術を向上させるためのインセンティブや指令が実施されている。再生可能エネルギーを利用した冷暖房への支援を行うに当たっては、政策立案者は分散になりがちな冷暖房技術に伴う特有の課題に取り組む必要がある。冷暖房サービスは一軒の住宅に行われる小・中規模の設備設置により提供される。或いは、地域暖房と冷房を提供する大規模な装置を備えることが可能である。再生可能エネルギーを利用した暖房（RE-H）と冷房（RE-C）両方に対する政策手法は特に、規模の大きさ、様々な温度にする調整能力、広範囲にわたる需要、熱負荷との関係、利用の変動性、及び中心となる供給または取引のメカニズムの欠如などの、より雑多な資源の特性に特に取り組む必要がある [11.5.5]。

冷暖房の再生可能エネルギー源の利用を支援する政策の数は、ここ数年増えており、その結果、再生可能エネルギーを利用した冷暖房の発電（IEA, 2007b）が増加している。しかし、支援体制の多くは再生可能エネルギーを利用した暖房に焦点を当ててきた。現在の再生可能エネルギーを利用した暖房を促進する政策はリベートや助成金、減税及び税控除のような財政上のインセンティブ、財政支援のような公的ファイナンス政策、利用義務のような規則、及び教育努力を含む [11.5.5.1→11.5.5.3, 11.6]。

これまで、財政上のインセンティブが広く利用されている政策であったが、再生可能エネルギーを利用した暖房システムの導入後に利用可能な税額控除（つまり事後）は、導入前に事前承認が必要となる助成金と比べ、輸送の面で有利となる可能性がある。ただし、このオプションの利用は限定される。利用義務、クォータ制などの規制政策によって、再生可能エネルギーを利用した冷暖房の成長を公共予算から独立して、促進するポテンシャルに対する関心が高まってきた。しかし、現在まで、これらの政策を利用した事例は少ない [11.5.5]。

再生可能エネルギーによる発電及び輸送と同様に、再生可能エネルギーを利用した冷暖房の政策は、設計の段階で特定の技術、現在の市場及び現在のサプライチェーンの成熟状態を考慮した場合、特定の条件や場所により適したものになる。生産インセンティブは、費用対効果が低い測定・監視方法を持つ小規模で分散型のオンサイトの冷暖房システムの導入よりも、地域暖房網など大規模な冷暖房システムのほうが、より有効である [11.5.5]。

再生可能エネルギーを利用した冷房技術を支援する政策例はいくつかあるが、再生可能エネルギーを利用した冷房のみの普及促進を目的とする政策は、概して、再生可能エネルギーを利用した暖房の場合の政策に比べ、あまり発展していない。

上記で取り上げた枠組みの多くは、再生可能エネルギーを利用した冷房にも適用出来るが、一般に、暖房の場合と同じようなメリットとデメリットがある。再生可能エネルギーを利用した冷房に対する普及政策での経験不足は、多くの再生可能エネルギーを利用した冷房技術の技術開発が初期段階にあることと関係している可能性が高い。初期市場及びサプライチェーンを発達させるための研究開発支援及び政策支援は、近い将来における再生可能エネルギーを利用した冷房技術の普及を促進する上で特に重要となる可能性がある [11.5.5.4]。

普及のための政策 - 運輸

運輸用の再生可能エネルギーの普及を支援するために、様々な政策が実施されてきたが、これらの政策の大多数と関連する事例がバイオ燃料に特有のものになっている。バイオ燃料の支援政策は財政上のインセンティブ（バイオ燃料くみ上げ時の税控除など）又は規則（混合義務など）による国内消費の促進、生産設備に対する公的ファイナンス（融資など）や原材料の支援または政策減税（消費税免除など）による国内生産の促進を目的とする。通常、政府は政策を組み合わせで制定する [11.5.6]。

税上のインセンティブは一般にバイオ燃料の支援のため使用され、それによって化石燃料に対するバイオ燃料の費用競争力が変動する。この政策はバイオ燃料のバリュー・チェーン全体に沿って導入されるが、通常、この政策が最も対象となるのは、バイオ燃料生産者（消費税免除・控除など）と、最終消費者（バイオ燃料くみ上げ時の税控除など）のいずれか、またはその両方である [11.5.6]。

しかし、ヨーロッパの一部の国及びその他の G8+5 の国々は、バイオ燃料に対する優遇税制措置の利用から混合義務へと次第に移行し始めている。一般的にこれらの義務が暗示する価格は公にされない（電力部門などとは対照的）ため、バイオ燃料義務の下で支援の水準を評価することは難しい。バイオ燃料使用義務は多くの最新のバイオ燃料産業の発展と成長におけるキー・ドライバーである一方、燃料提供者は低コストのバイオ燃料を混合する傾向にあるため、特定種類のバイオ燃料の利用促進にはあまり適していないことがわかっている。元来、バイオ燃料使用義務は、広範囲に平等な分配を達成し、内在する社会的・環境的悪影響を最小化するためのさらなる要件を慎重に検討する必要がある。輸送燃料消費におけるバイオ燃料の占める割合が特に高い国々では、義務（罰則込み）に財政的インセンティブ（率優先した税免除）を組み合わせたハイブリッドシステムが存在する [11.5.6]。

統合

急速に再生可能エネルギーの普及を拡大し、政府/社会が特定の目標を達成出来るようにするためには、一部の政策要素が他よりも効果的かつ効率的であることが示されている。政策設計及び実施の詳細部分は、効果及び効率を判断する際に、実施中の具体的な政策と同程度重要だろう。主要な政策要素の例を以下に示す [11.5.7]。

- ・ 投資家が、リスクに見合ったリターンで投資を回収出来るようにコストをカバーする固定価格買取制度などの助成金による適切な価格。
- ・ ネットワーク及び市場へのアクセスの保証、もしくは最低でも保証された明確に定義されたアクセスの除外規定。
- ・ リスクを緩和することによりファイナンス・コストを下げる長期契約。
- ・ 技術及び用途の多様性を織り込んだ規定。再生可能エネルギー技術の成熟度及び特徴は様々であり、それに伴う障壁も大きく異なっていることが多い。気候変動を緩和するためには、複数の再生可能エネルギー源及び技術が必要となる可能性があり、現在は他のものより成熟度が低かったり、コストが高かったりする技術も、将来的にエネルギー需要の充足及び温室効果ガス排出量削減において重要な役割を果たす可能性がある。
- ・ 技術や市場が進歩するにつれて時間とともに減少すると予想されるインセンティブ。
- ・ 透明性が高く、容易にアクセス出来るため、関係者が政策及びその機能に加え市場への参入やコンプライアンスに必要となるものを理解出来る政策。中長期的政策目標のような透明性も含まれる。
- ・ 供給側（伝統的生産者、技術またはエネルギー供給の販売業者（電力、熱、燃料の別なく））及び需要側（事業、家庭など）両方における参入のポテンシャルを可能な限り広くすることを意味する包括性。これは分散型再生可能エネルギーとともに「自発的に発生」し、より多くの資本の投資を促してより幅広い再生可能エネルギー向け公的支援の構築を助け、競争を強化する、より広範な参入を可能にする。
- ・ 優遇された免除グループ、たとえば競争的地盤での主要な利用者や低収入及び脆弱な消費者への、公平性と分配面における配慮。

また、全ての政策に合う雛型的政策は存在せず、政策立案者は経験から学び、必要に応じてプログラムを調整する能力を発揮することが有効な事を認識することも重要である。政策は、地方の政治的、経済的、社会的、生態的、文化的、そして財政上の需要及び条件に加え、技術の成熟度、手の届く資本の利用可能性、地方及び国家の再生可能エネルギー資源材料などの要因に対応する必要がある。さらに、中

国の経験ではっきりとわかるように、再生可能エネルギーの様々な障壁を克服するためには一般的に政策の組み合わせが必要となる。透明性が高く持続する政策の枠組みは、特定の政策の予測可能性から、炭素の価格決定及びその他の外部性、再生可能エネルギーの長期目標に至るまで、投資リスクを低減、再生可能エネルギー展開及び低コストの用途の発展を促進するのに重要であることが明らかになった [11.5.7]。

再生可能エネルギー政策のマクロ経済的影響

供給プッシュ型再生可能エネルギー利用促進への支払金は公共の予算（多国間、国、地方）からの出費となる傾向にあり、一方、需要プッシュ型の枠組みのコストは大抵、最終消費者が負担する。たとえば、再生可能電力政策は国の電力部門に対して行われ、ここで発生する新たなコストは大抵、電力消費者が負担するが、免除または再配分により、個人の顧客や社会的に立場の弱い顧客に対するコストを必要に応じ削減出来る。いずれにせよ支払うべきコストは発生する。目的がこの先数十年にわたってエネルギー部門を変革することである場合、この期間全体でのコストを最小限に抑えることが重要であり、この計算に社会に対するコスト及び便益をすべて含めることも重要である [11.5.7.2]。

再生可能エネルギーのコストと便益の総合分析は、これらの正味の影響の判断において非常に多くの要素が関与するので非常に難しい。影響は次の 3 つに分類される。（1）システムの直接的及び間接的コストと再生可能エネルギーの普及の便益。（2）分散の影響（再生可能エネルギーの利用促進の結果として経済的関係者またはグループが受ける便益や負担）。（3）GDP や雇用に与える影響のようなマクロ経済的側面。たとえば、再生可能エネルギー政策は将来の経済成長や雇用創出の機会をもたらすが、正味の影響を測ることは複雑で不正確なものである。これは再生可能エネルギー利用促進の新たなコストが経済に対し配分及び予算の影響を発生させるからである。国、または地域経済に対するこれらの影響を調査している研究はほとんどない。しかし、実施されている研究では、ほとんどの場合、正味の経済的なプラス効果があるとしている [11.3.4, 11.5.7.2]。

再生可能エネルギー政策と気候政策の相互作用、及び想定外の潜在的影響

再生可能エネルギーの展開における重複する要因と根拠、重複する管轄区域（地方、国、世界）により、時折、想定外の影響を伴う多数の政策間相互作用が発生する。したがって、政策間の相互作用と複数の政策の累積的な影響の明確な理解が重要である [11.3, 11.5.7, 11.6.2]。

世界規模で包括的に適用されない場合、炭素価格設定と再生可能エネルギー政策の両方が「炭素漏損（リーケージ）」のリスクを生む。1 つの管轄区域または部門における再生可能エネルギー政策は、その管轄区域または部門における化石燃料エネルギーの需要を縮小させる。他の条件が等しければ、それによって世界規模で化石燃料価格が低下するため、他の管轄区域または部門における化石エネルギー需要が押し上げられる。全世界で実施しても、準最適な炭素価格と再生可能エネルギー政策は炭素の排出量を潜在的に増加させる可能性がある。たとえば、化石燃料資源の所有者が長期的により強力な再生可能エネルギー普及支援政策を恐れている場合、再生可能エネルギー支援が穏やかな限り、その所有者は資源抽出を増加させる可能性がある。同様に、将来の炭素価格の上昇見通しは、油田やガス井の所有者が炭素税の低い内に資源をより早く抽出する動機づけとなり、気候及び再生可能エネルギー技術の普及の両方についての、政策立案者の目標を弱体化させる。このような「グリーン・パラドックス」の状況はかなり特異的であり、炭素価格設定は低い水準から始め、急速に上昇させる必要がある。同時に補助金付きの再生可能エネルギーは化石燃料を基盤とする技術よりも、価格が高いままでなければならない。しかし、炭素価格と再生可能エネルギーの補助金が最初から高水準で開始する場合、このようなグリーン・パラドックスが起こる可能性は低い [11.5.7]。

再生可能エネルギーの補助金を伴う炭素税のような、固定の炭素価格を設定する混合政策の累積的な影響は、大部分は付加的である。言い換えると、再生可能エネルギーの補助金を伴う炭素税の増額は、排出量を抑え、再生可能エネルギーの展開を促進する。しかし、排出量取引や再生可能エネルギーのクォータ制のような内因性価格政策を組み合わせたエネルギーシステムへの影響は、一般的にそれほど直接的ではない。排出量取引制度にさらに再生可能エネルギー政策を追加すると、通常、炭素価格を低下させ、次に、炭素強度（石炭エネルギーなど）の技術を、天然ガス、原子力やエネルギー効率改善などの他の非再生可能エネルギー減少オプションと比較してより魅力的なものにする。この場合、排出量全体は上限までに固定されたままだが、再生可能エネルギー技術が、他のエネルギー技術よりも規模の大きな特定の外部性及び市場障壁に遭遇している場合にのみ、再生可能エネルギー政策は法的順守のコスト

を減少させ、社会福祉を改善する [11.5.7]。

最後に、再生可能エネルギー政策単独（つまり炭素価格は含まない）では、非再生可能エネルギーの低炭素技術及びエネルギー効率の改善を含む利用可能な最小コストの緩和オプションを全て利用するのに十分なインセンティブを提供しないため、必ずしも炭素排出量を削減する効率的な手法とはならない [11.5.7]。

11.6 促進的環境と地域問題

再生可能エネルギー技術は、エネルギーシステムの変化を促進する広範囲の「促進的」政策とともに実施される場合、気候変動緩和における重要な役割を担う。「促進的」環境は、さまざまな制度、関係者（金融業界、経済界、市民社会、政府など）、インフラ（ネットワーク及び市場など）及び政治的成果（国際協定・協力、気候変動戦略など）を網羅する（表 TS.11.1 を参照） [11.6]。

エネルギーシステムにおけるイノベーションの促進を通じて再生可能エネルギーにとって有利な、または「促進的」環境を作り出すことが可能である。すなわち、既定の政策と、その他の再生可能エネルギー政策やその他の非再生可能エネルギー政策とを、出来る限り相互に作用させる。再生可能エネルギー開発事業者による財源確保やプロジェクトの達成促進を行う。再生可能エネルギーの導入や成果のためのネットワークや市場へのアクセスに対する障壁を取り除く。技術移転や人材育成を可能にする。機関やコミュニティのレベルでの教育の質向上や意識向上を行う。そして、「促進的」環境の存在により、再生可能エネルギーを普及させる政策の効率や効果を上げることが出来る [11.6.1～11.6.8]。

イノベーションに関する文献では、普及している技術により適切な制度環境が整備されるため、確立された社会技術システムがイノベーションの多様性を狭める傾向にある、という結論が一般に受け入れられている。この結論は強力な経路依存性を発生させ、競合するよりよい代替候補を除外（またはロック・アウト）する可能性がある。以上の理由により、社会技術システムの変化には時間がかかり、その変化には線形ではなく体系的な変化が含まれる。再生可能エネルギー技術は、世界の大部分で、現存するエネルギー供給構成に対応するために構築されるエネルギーシステムに統合されつつある。その結果、インフラは現在の主要な燃料、及び考慮する必要のあるロビー活動や同業者に有利に働く。技術変化は複雑なため、全レベルの政府（地方から世界まで）が政策を通じて再生可能エネルギー開発を促すこと、非政府関係者も政策の策定や実施に関与することが重要である [11.6.1]。

お互いに補足しあう政府の政策は成功する可能性が極めて高く、個々の再生可能エネルギー政策の設計も、他の政策との調整がうまくいくかどうかに影響する。農業に対するエネルギーから水政策まで、といった複数の部門にわたる政策の相補性を積極的に推進しようと試みることは、一方でそれぞれの独立した目的も考慮するが、容易な作業ではなく、ありうるトレードオフによっては双方に裨益するかあるいはどちらかが有利な状況や勝つか負けるかという状況を作り出す。これは、部門間の政策の矛盾や不一致を除外し、同時に複数の管理レベルにて活動の調整を行う強力な中枢の必要性を意味する [11.6.2]。

広範囲の促進的環境には、再生可能エネルギー技術またはプロジェクトの特有のリスクとリターンのプロファイルを反映する条件にて、財政支援の利用手段を提供出来る金融部門が含まれる。財政支援やその利用手段のコストは、投資時に普及している広範囲の金融市場の状況、プロジェクトや技術及び関係者特有のリスクに左右される。広範囲の状況とは、再生可能エネルギー特有の政策の域を超え、政策及び通貨リスク、さらにエネルギー部門の他の部分からの投資をめぐる競争など、エネルギー関連問題、エネルギー部門の規則または改革の状態を含む [11.6.3]。

表 TS.11.1: 再生可能エネルギーの管理体制を成功させる要因及び参加者
[表 11.4]

促進的環境の 特徴→ 再生可能エネルギー政策を成功 させる要因及び 関係者↓	11.6.2 節 統合政策（国の 政策、超国家的 政策）	11.6.3 節 金融と投資リス クの 削減	11.6.4 節 地方における計 画及び許可	11.6.5 節 再生可能エネル ギー技術のイン フラ、ネットワ ークと市場の提 供	11.6.6 節 技術移転と人材 育成	11.6.7 節 政府の域を超え るアクターから の学習
制度	設計段階で再生可能エネルギー政策を他の政策と統合させることにより、政府の政策同士の不一致の可能性を減少させる。	融資を行う制度及び機関の整備により、国同士の協力を促進し、長期低利貸し付け又はクリーン開発メカニズム（CDM）を提供出来る。 長期公約はリスクに対する認知を低減する。	計画及び許可プロセスにより、地方において、再生可能エネルギー政策が非再生可能エネルギー政策と統合出来るようになる。	政策決定者及び取締役官は、安全基準や利用規則などのネットワークや市場に対するインセンティブ及び規則を制定することが出来る。	再生可能エネルギー技術の信頼性は認証により保証される。 制度協定は技術移転を可能にする。	他の関係者から自由に学ぶことにより政策の設計を補完でき、現在の社会状況において機能することにより政策の効果を高めることが出来る。
市民社会（個人、世帯、非政府組織、共同体など）	市町村または都市は地方における国の政策の統合についての決定的役割を担う。	コミュニティ投資は投資リスクを共有し、削減出来る。 投資及びプロジェクト開発における官民パートナーシップは政策手段に関するリスクの低減に貢献する。 適切な国際制度により、資金の公平な分配が可能。	地方の計画及び許可プロセスへの市民社会の参加により、多くの社会的に関連する再生可能エネルギー・プロジェクトの選択が可能になることがある。	市民社会はエネルギーの共同生産及び新たな分散型モデルを通じて、電力供給網の一部となることが出来る。	地方の関係者及び非政府組織は、多国籍企業、非政府組織、中小企業をまとめる新たなビジネスモデルを用いて、技術移転に関与することが出来る。	公開政策プロセスへの市民社会参加により、新たな知識が創造され、制度変更が促される。 市町村及び都市は地方でも可能な再生可能エネルギーの技術開発を行うソリューションを開発する。 人々（個人または集団）は政策の意図及び背景の制約に整合性がある場合、発展するエネルギーに関連した活動をする可能性がある。
金融業界と経済界	-	投資及びプロジェクト開発における官民パートナーシップは政策手段に関するリスクの低減に貢献する。	再生可能エネルギー・プロジェクトの開発事業者は、（1）計画及び許可要件を伴うプロジェクト開発の調整（2）地方におけるニーズと条件に対する、計画及び許可プロセスの適合について、ノウハウと	ネットワーク及び市場規則が明確であると、投資家の信頼性が増す。	融資機関及び政府機関は政府と提携し、長期低利融資またはクリーン開発メカニズム（CDM）を提供出来る。	多国籍企業は地方の非政府組織または中小企業を新しい技術開発（新たなビジネスモデル）に関与させることが出来る。 法人及び国際機関の整備は投資リスクを低減させる。

			業務用ネットワークを提供する。 経済界は整合性がある統合された政策に対し、積極的にロビー活動を行う可能性がある。			
インフラ	ネットワーク規則・市場規則に政策を統合することで、低炭素経済に適したインフラ整備が可能になる。	ネットワーク及び市場規則が明確であると、投資のリスクが低下し、投資家の信頼性が増す。		明確で透明性の高いネットワーク規則及び市場規則は、将来の低炭素社会を補完するインフラをもたらす可能性が一段と高い。		都市及びコミュニティの、長年にわたるインフラ及びネットワーク開発の枠組みにより、政策決定への地方の関係者の関与を持続させることが可能である。
政策（国際協定・協力、気候変動戦略、技術移転など）	超国家的ガイドライン（「合理化」、海洋計画、影響研究におけるEUなど）は、再生可能エネルギー政策を他の政策と統合するのに貢献する。	再生可能エネルギー政策の長期にわたる政策公約は、再生可能エネルギー・プロジェクトにおける投資リスクを軽減する。	超国家的ガイドラインは計画及び許可プロセスの進展に貢献する可能性がある。	開発法人はインフラ整備の持続を支援し、低炭素技術を利用しやすくする。	クリーン開発メカニズム、知的財産権（IPR）及び特許契約は技術移転に貢献する。	非政府機関からの適切な提供意見は、社会的に関連するより多くの合意を促す。 技術移転に関する専門家グループ（EGTT）、地球環境ファシリティ（GEF）、クリーン開発メカニズム（CDM）及び共同実施（JM）などの気候変動枠組条約のプロセスの枠組みは再生可能エネルギー政策決定における非国家関係者の関与を促進するガイドラインを示す。

これまでの成功した再生可能エネルギー技術の普及では、国家及び地方両方において好ましい手続きが併用されていた。利用許可の「効率化」などの普遍的な手続きの調整は、場所及び規模に固有の条件を無視してしまうと思われるため、プロジェクト普及のレベルにおけるステークホルダー間の対立を解消する可能性は低い。再生可能エネルギーの導入を促進する計画の枠組みは、以下の要素を含むことがある。すなわち、関係者の期待や興味の調整、再生可能エネルギー普及の背景の重要性についての理解、便益共有の枠組みの採用、協業ネットワークの構築、及び交渉の対立部分を明確に示す枠組みの導入などである [11.6.4]。

再生可能エネルギー・プロジェクトが計画承認を受領したのちは、以下の場合に再生可能エネルギー・プロジェクトの構築に対する投資が行われる。(1) ネットワークへの経済的連携が合意された後 (2) プロジェクトがネットワークとの再生可能エネルギー生産の「買い入れ」についての契約を結ぶ時 (3) 通常は市場経由で行うエネルギーの販売が補償される時。これらの要件を満足させる能力、そのゆとり

及びコストは再生可能エネルギー・プロジェクトが実現出来るかどうかの中核をなす。さらに、再生可能エネルギーがエネルギーシステムに統合される方法は、再生可能エネルギーの統合全体のシステムのコストや様々なシナリオの道筋のコストに影響を及ぼす。再生可能エネルギー・プロジェクトのインフラ及び接続を時宜に応じて拡張及び強化するため、経済的規制者が、「先行」または「事前」ネットワーク投資や本格的なインフラ強化に先立つプロジェクト接続を認めなければならない可能性がある [11.6.5, 8.2.1.3]。

多くの国では、主要な課題は再生可能エネルギー技術へのアクセスと関係している。再生可能エネルギー技術を含む、多くの低炭素技術は数か国で開発され、その数か国に集中している。比較的発展した経済国において開発されたクリーン技術へのアクセスなしに産業発展の汚染が激しい段階を「リープフロッグ」することが出来る可能性が低いと言われている。しかし、非援助国における環境政策がその技術の採用に対してインセンティブを付与しない限り、再生可能エネルギー技術のような技術は一般的に、国境を越えていくことはない。また、技術移転は置き換えるのではなく、人材育成における国内での取り組みを補完するべきである。都会から離れた農村のコミュニティにおいて再生可能エネルギーに関する適応、導入、保守、修理、及び改善の能力を得るためには、技術移転への投資を、専門性、導入に関する助言及び訓練、技術適応、修理、及び保守を提供するコミュニティに根差した拡張サービスへの投資によって補完しなければならない [11.6.6]。

技術移転に加えて、制度学習も再生可能エネルギーの普及を進めるうえで重要な役割を担う。制度学習は制度変更につながり、再生可能エネルギー政策の選択及び設計を制度が改善する余地が生まれる。これは、再生可能エネルギー・プロジェクトにおける位置決定や投資について多数の決定を行う必要がある、より深いレベル（農村の場合が多い）での制度面の能力強化を図っている。制度学習は、政策立案者が、政策立案における協調的アプローチのためにこれらの非政府関係者を引き寄せられる場合に、制度学習は発生する可能性がある。情報及び教育はエネルギーに関する活動に影響を与える主要政策ツールとして重視されている。しかし、教育ベース及び情報ベースの政策の効果は、背景要因により制限され、情報ベース及び教育ベースの政策のみへの過度な依存には注意が必要となる。エネルギーに関する活動の変化は、個人の基準や態度が価格、政策の意図、及び再生可能エネルギー技術自体、個人が自身を知る社会的背景と相互作用を行うプロセスの結果である。これらの文脈的要因は、個人の行動よりも複雑ではあるが効果的でもある変化の媒体としての集団行動の重要性を示している。このことは、政策立案者が再生可能エネルギー移行への個人の関与を望む場合における狭義の「態度行動変化」政策の枠を超えた協調的な体系的政策を支持している [11.6.7, 11.6.8]。

11.7 構造的変化

もし政策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緩和目標を達成しようとするならば、長期にわたって実例から学ぶ意思と柔軟性が重要となる。再生可能エネルギーの割合を高く保ちながら温室効果ガス濃度安定化レベルを達成するには、今後数十年にわたり現在のエネルギーシステムの構造的変化が必要となるだろう。この低炭素エネルギーへの移行は、移行可能な期間が数十年に制限される。そのため開発後は、将来の再生可能エネルギーの高い普及率のもとで必要となる構造とは大きく異なる現在エネルギー構造のもとで構築されるシステムへ、統合されなければならない。そのため、以前とは異なるエネルギー移行（薪から石炭、石炭から石油など）となる [11.7]。

主に再生可能エネルギーを基盤とする世界的なエネルギーシステムへの構造的変化は、再生可能エネルギーと併用してエネルギー効率を向上させるという重要な役割を担うことから始まる。しかし、これには、炭素リーケージ及びリバウンドの影響を回避する税または排出量取引スキーム形式の妥当な炭素価格政策が必要となる。技術の普及を支援するため、研究開発の枠を超えて拡張する新たな政策が必要であり、これは、教育及び意識向上を含む促進的環境の構築、農業・輸送・水道管理・都市計画などの広範囲にわたる部門と行う統合政策の系統的開発である [11.6, 11.7]。再生可能エネルギーへの最大の投資を促す政策の枠組みは、リスクを減少させ、魅力的なリターンを実現し、投資期間にわたって安定的であるように設計されるものである [11.5]。エネルギーのインフラが開発途上の場合や、エネルギー需要が将来増加すると見込まれる場合は、適切かつ信頼し得る手段が一段と重要になる [11.7]。