

SRREN

ipcc

気候変動に関する政府間パネル
第3作業部会 - 気候変動の緩和（策）

再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書
最終版

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的・地域的状況	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、知見のギャップと将来の研究ニーズ	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 主たる動因、機会及び便益	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とその評価	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、不確かさを表現している。IPCCの不確か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の公式な不確か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。

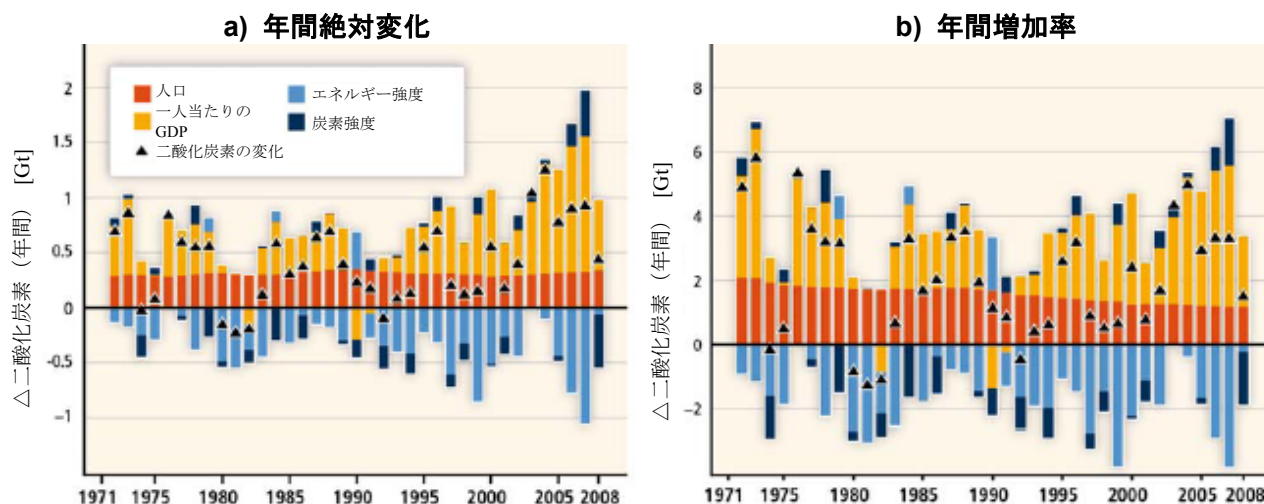


図 TS.1.2: 1971 年から 2008 年にかけての茅恒等式の要素（人口（赤）、一人当たりの GDP（オレンジ）、エネルギー強度（ライトブルー）、及び炭素強度（ダークブルー））による世界のエネルギー関連の二酸化炭素排出の a) 年間絶対変化及び b) 年間増加率の分解。色は各要素が、他の要素が一定であった場合に起こると思われる変化を示している。黒の三角形は総年間変化を示している [図 1.8]。

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かかわらず、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%を占めっ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す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。

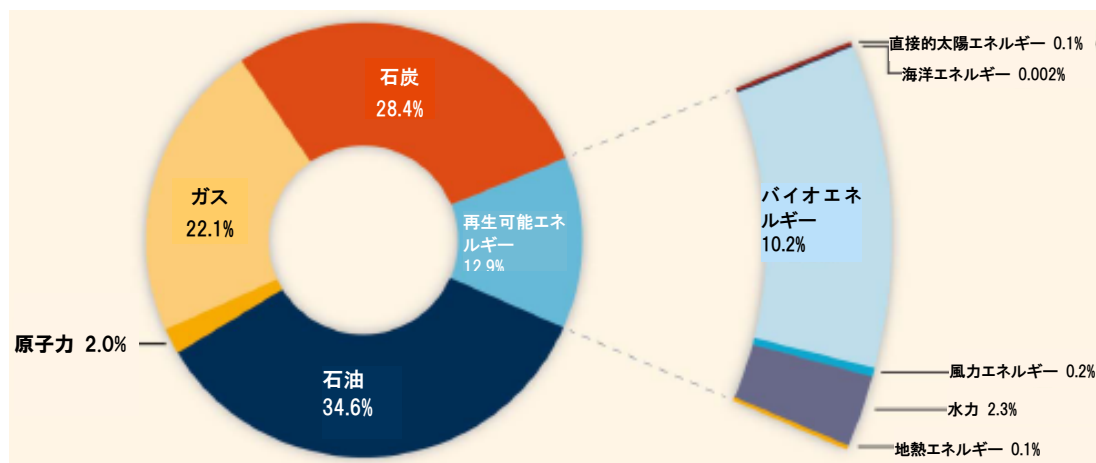


図 TS.1.3:世界の総一次エネルギー供給量（492EJ、2008 年）に占めるエネルギー源の割合。近代的バイオマスはバイオマスの割合全体の 38%を占める [図 1.10]。

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]。

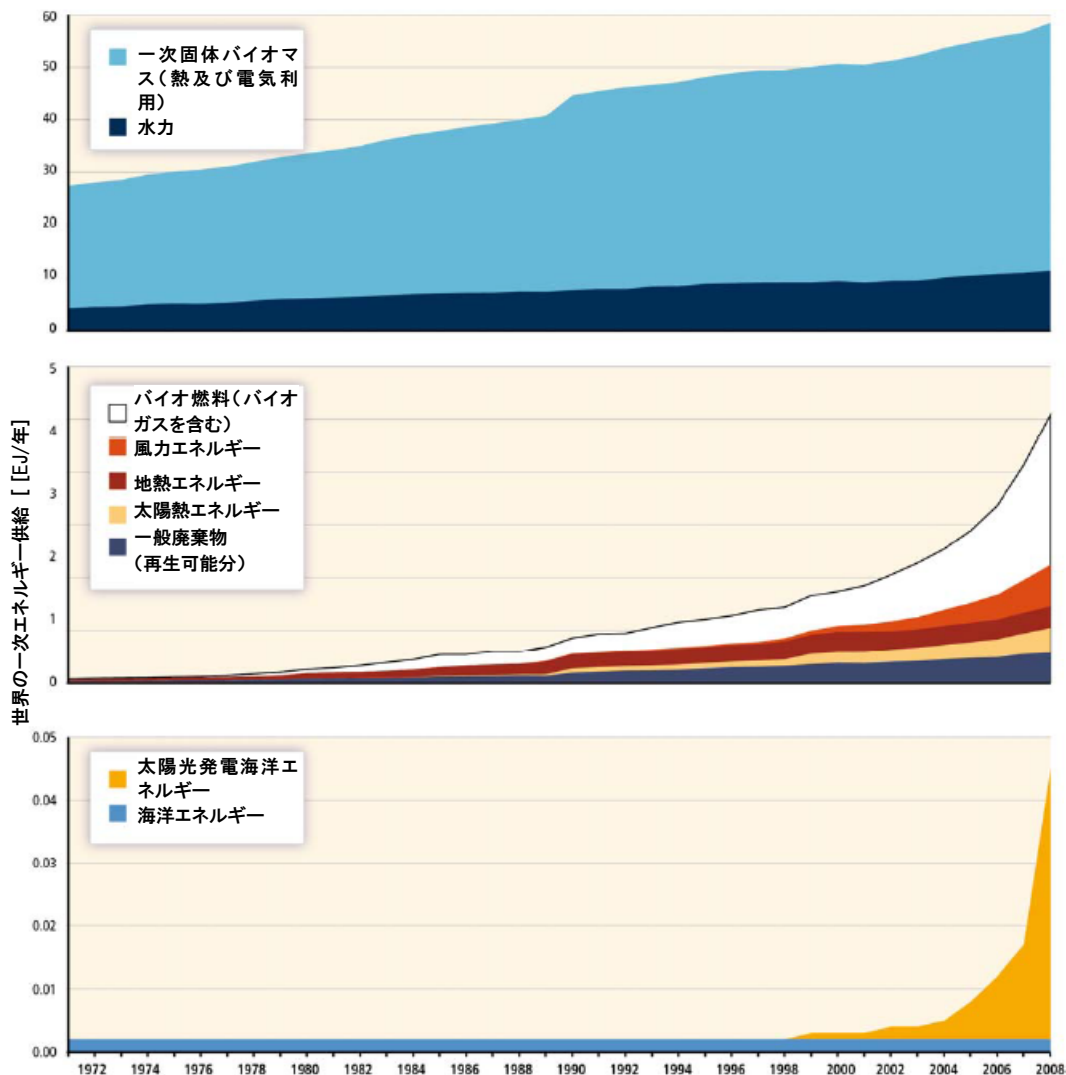


図 TS.1.4: 世界の一次エネルギー供給における再生可能エネルギー供給量の変遷（1971～2008 年）[図 1.12]

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]。

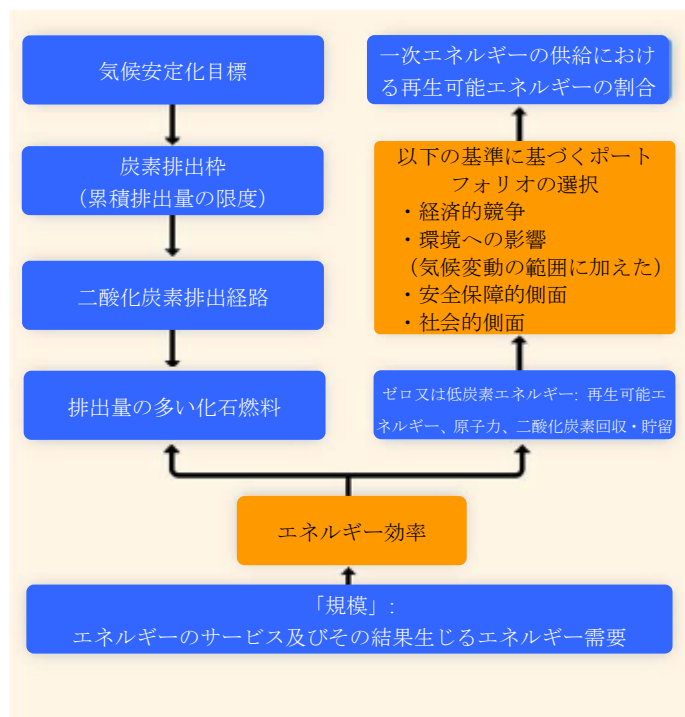


図 TS.1.5: ゼロ又は低炭素緩和オプションのポートフォリオにおける再生可能エネルギーの役割（定性的記述） [図 1.14]

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]。

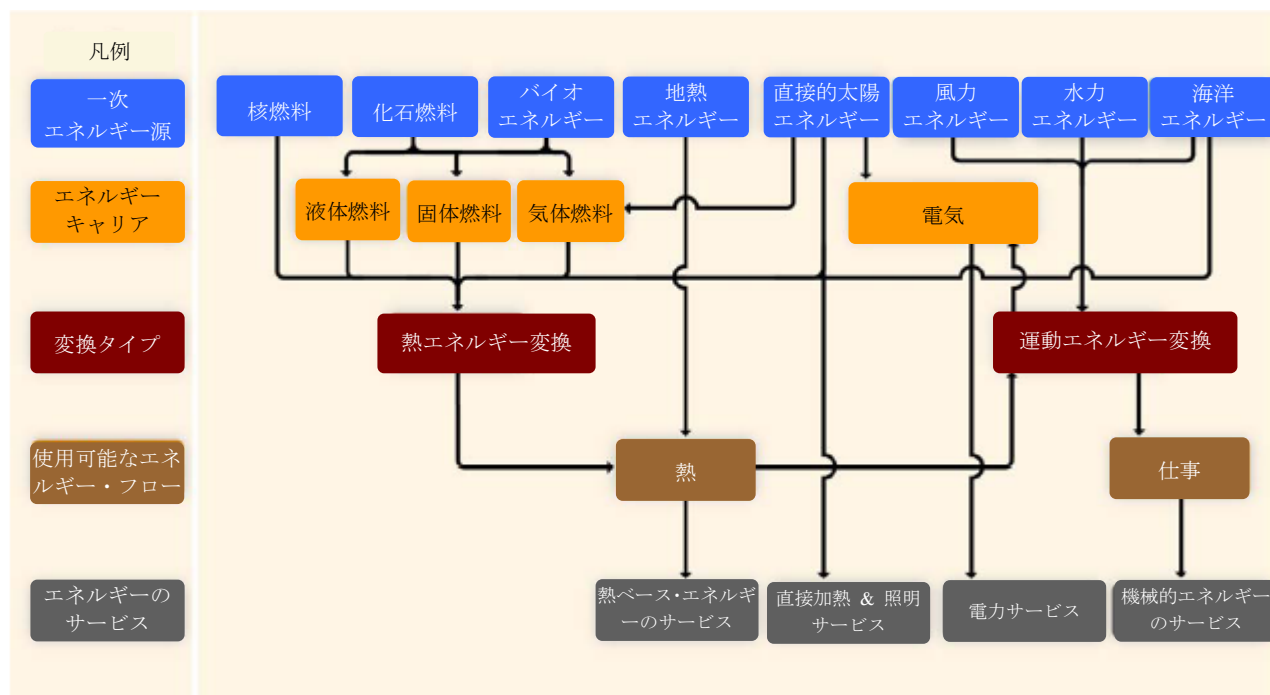


図 TS.1.6: エネルギー源からサービスへのエネルギー経路図。つながった線はすべて有効なエネルギー経路を示している。消費者に供給されるエネルギーのサービスは、量の異なる最終用途エネルギーで提供することが出来る。つまり、エネルギーのサービスは、多かれ少なかれ複数のエネルギー源からの一次エネルギーによって、二酸化炭素排出や他の環境への影響が異なる形で提供出来る[図 1.16]。

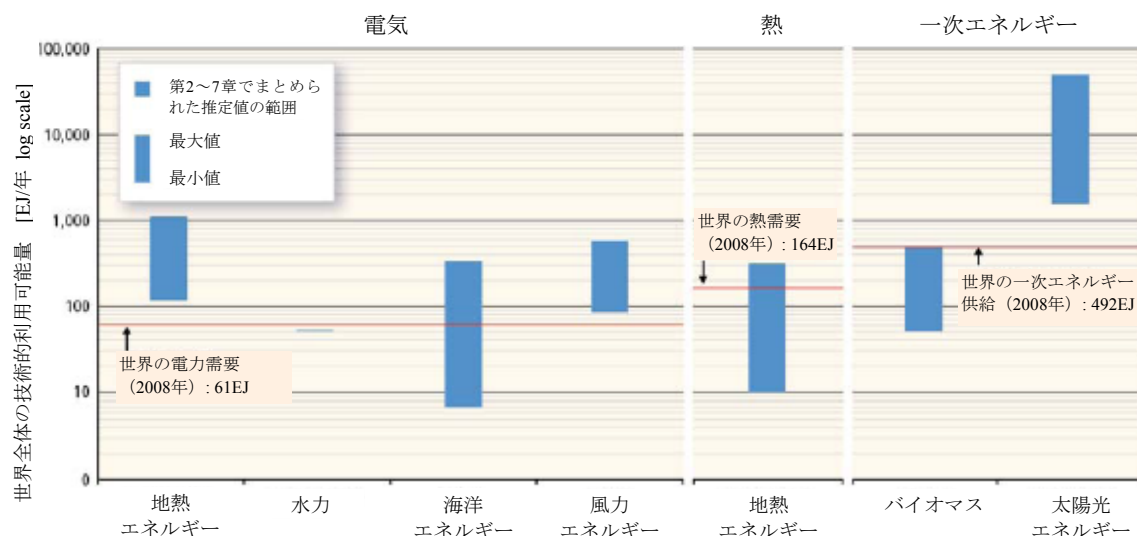
人々が必要としているのはエネルギーではなく、エネルギーのサービスである。そのため、この過程は二酸化炭素排出量を最小限に抑える低炭素技術を用いて、一次エネルギーの消費をあまり必要としない効率的な方法でニーズを満たすべきである。バイオマスや地熱を含む発電を行う熱転換プロセスでは、約 40～90%のエネルギーロスがあり、内燃機関を用いた輸送に必要な機械エネルギーを供給する場合は、約 80%のエネルギーロスが生じる。このような、転換ロスによって化石燃料を用いた一次エネルギーの占める割合が増え、熱から電力及び機械エネルギーを生成するために必要とされる、化石燃料を用いた一次エネルギー量が上昇する。太陽光発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

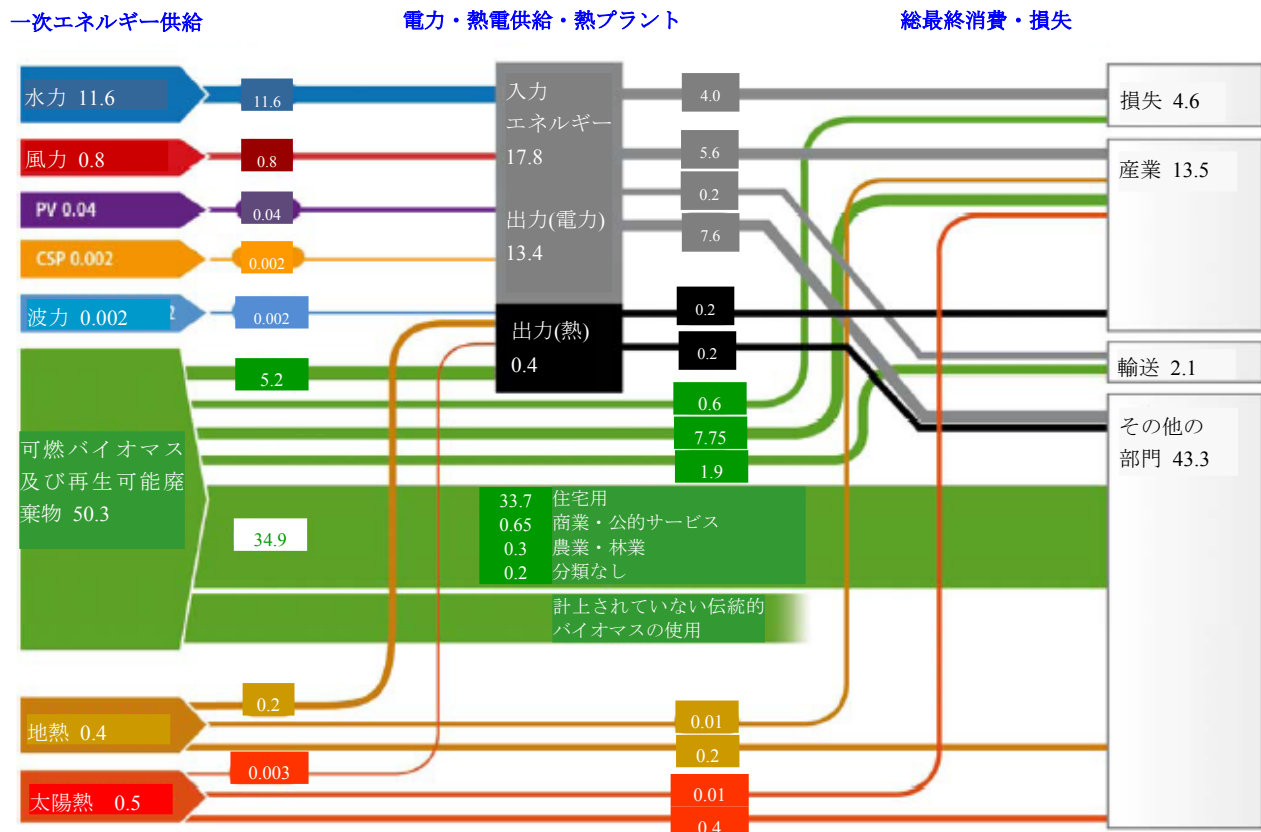
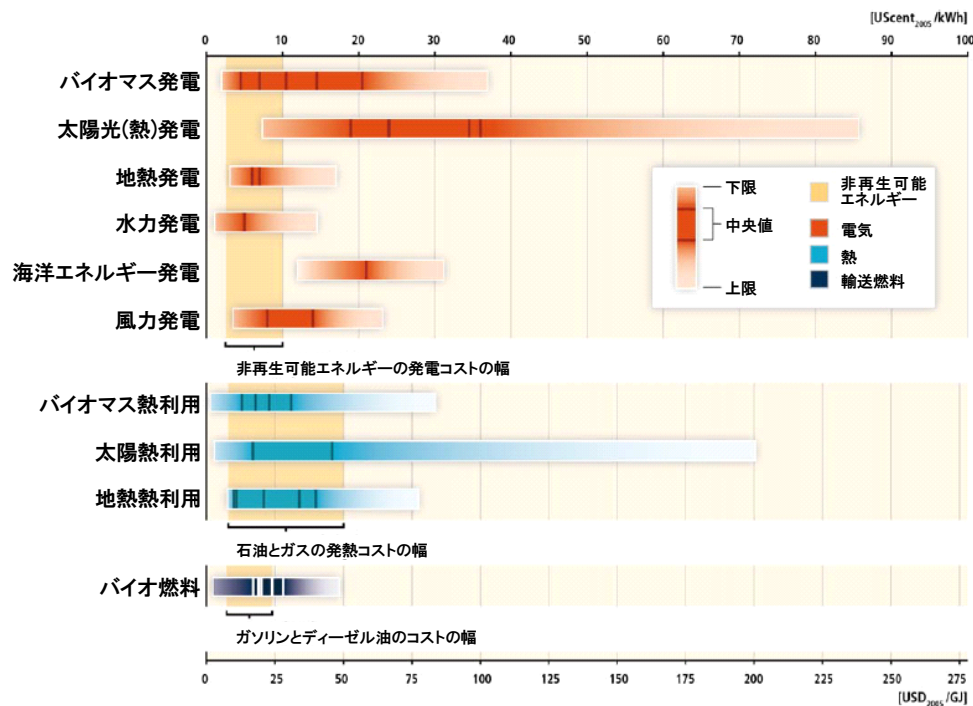


図 TS.1.8: 2008 年における、キャリアを介した主要な再生可能エネルギーから最終消費及び損失へのエネルギー・フロー（2008 年の EJ）（国際エネルギー機関（IEA）のデータに準拠）。「その他の部門」には、農業、商業用、住宅用建物、公共サービス、不特定の部門が含まれる。「輸送部門」には、国際航空及び国際船舶が含まれる [図 1.18]。

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]。

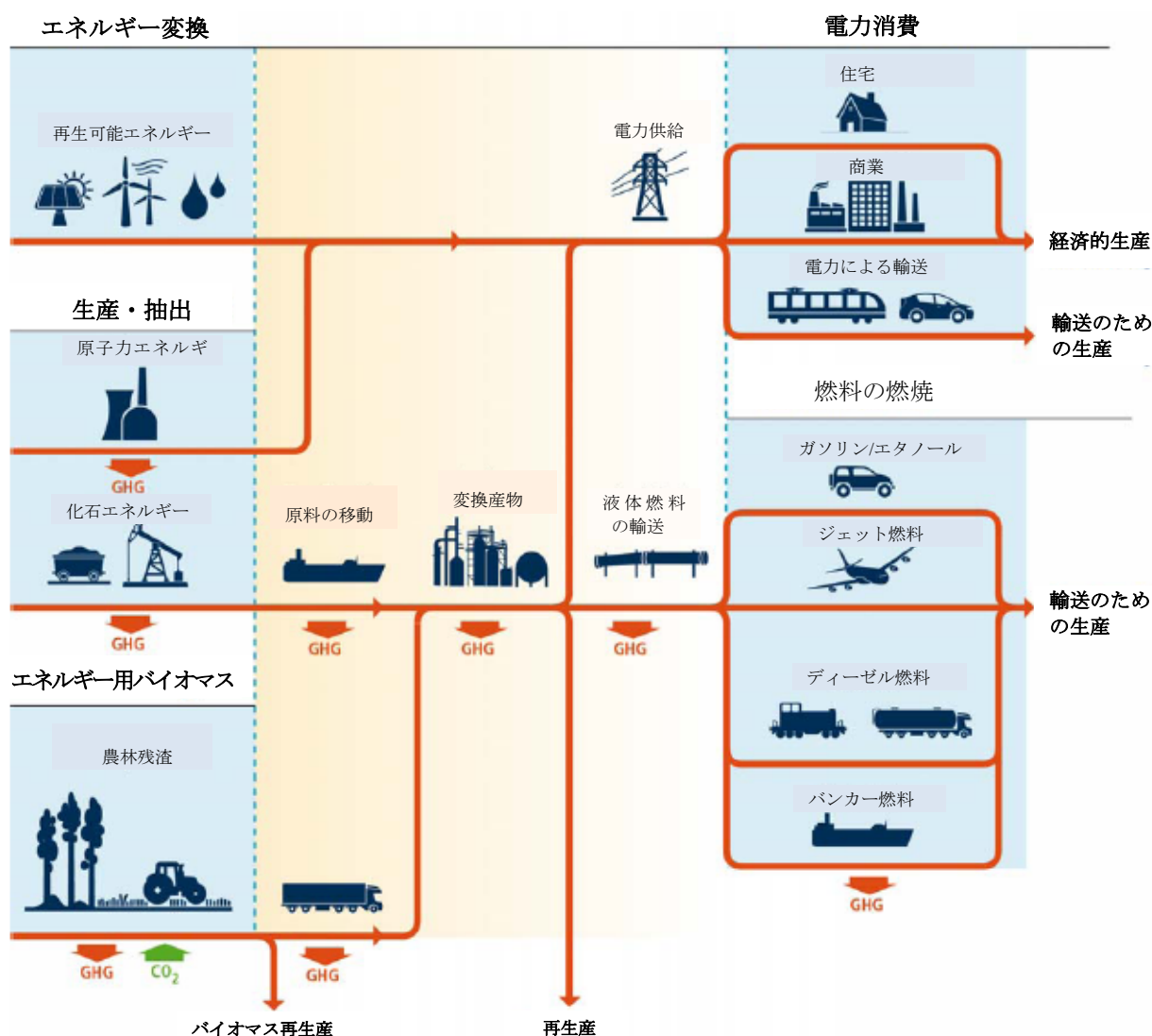


図 TS.1.10: 再生可能エネルギーと他の生産オプションの役割を示す、エネルギー生産と使用の体系。ライフサイクル・アセスメントを行うためには系統的アプローチが必要となる[図 1.22]。

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。これと関連して、非燃焼型再生可能エネルギー発電技術は、化石燃料を基盤とした発電と比較すると、地域的な大気汚染を大幅に減少させ、関連する健康への影響を軽減させる可能性がある。伝統的バイオマスの使用を改善すれば、持続可能な開発 (SD) に与える悪影響を減らせる。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実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。

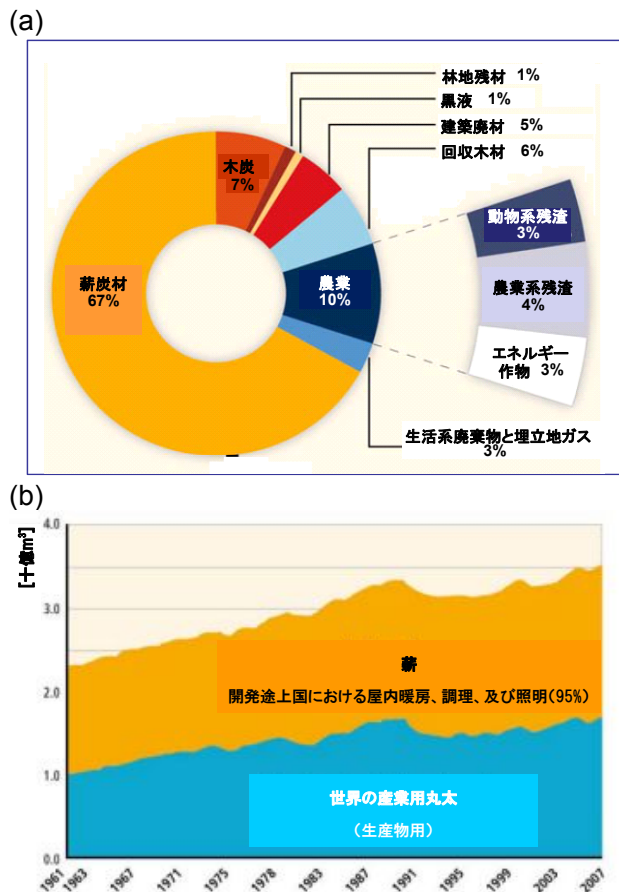


図 TS.2.1: (a) 世界のエネルギー用の一次バイオマス資源、及び (b) 世界の産業用丸太⁷の生産水準に平行している開発途上国で使用される薪の割合 [図 2.1]。

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 TS.2.2）。

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。

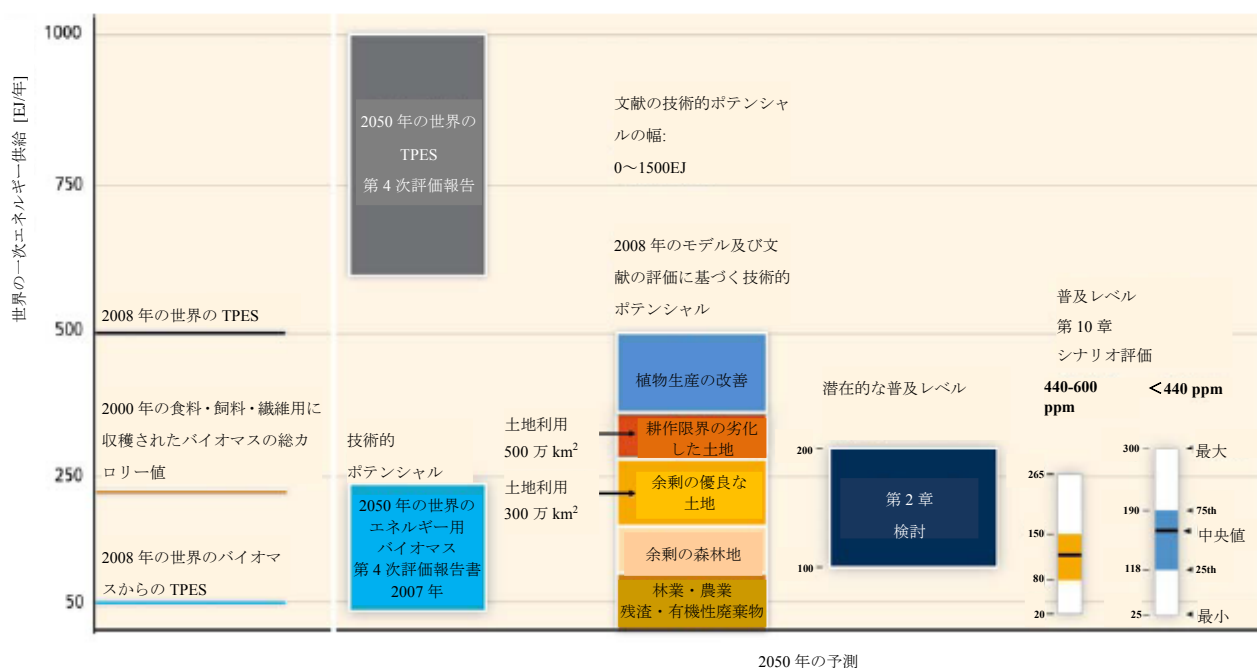


図 TS.2.2: 2008 年の世界の総一次エネルギーと世界の全バイオマス収穫量と同等のバイオマス供給と比較した、2050 年における世界の陸生バイオマスの技術的ポテンシャルと可能性のある普及レベルの主な予測 [図 2.25]

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。

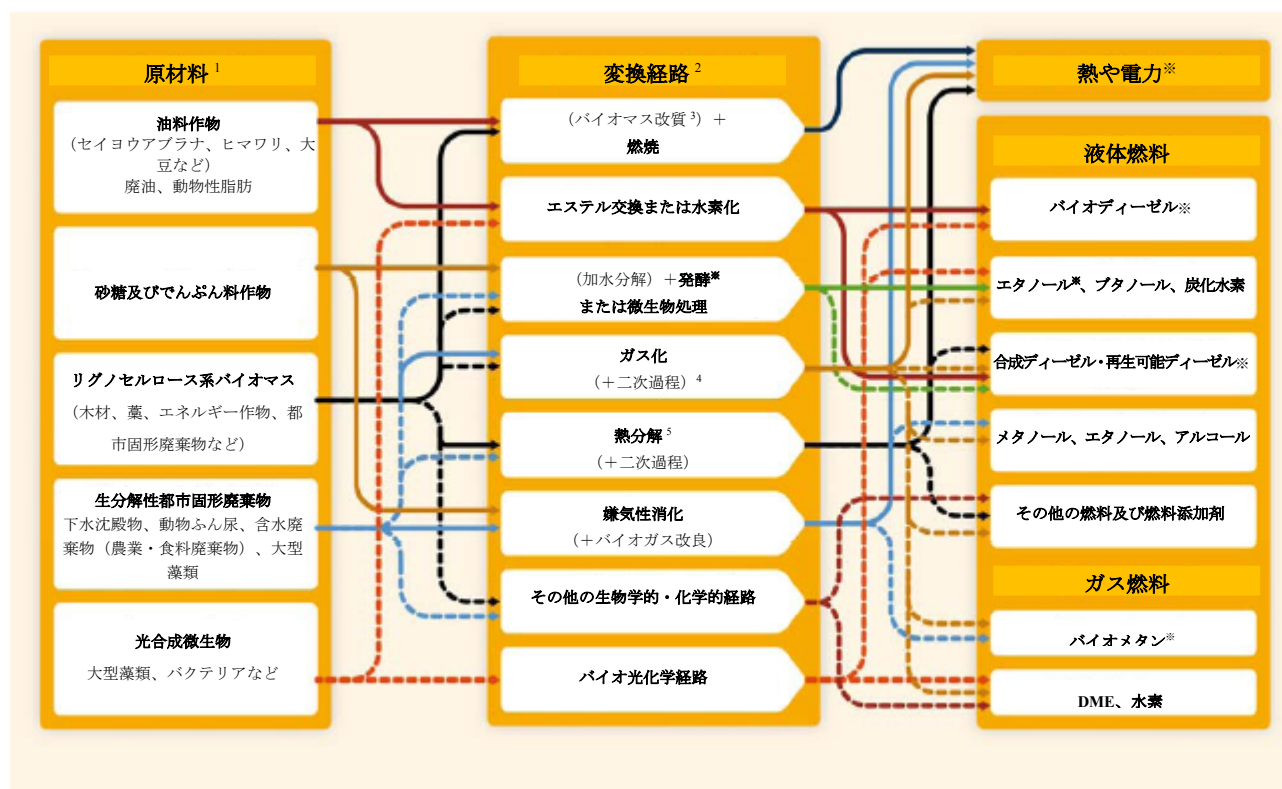


図 TS.2.3: バイオマス原材料から、熱、電力、コジェネレーション、及び液体・ガス燃料への熱化学的・化学的・生物学的変換経路による商業用（実線）及び発展途上（点線）のバイオエネルギー経路の種類を示した概略図。商業化された製品には星印を付けている [図 2.2, 2.1.1]。

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や電力を生産する。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。

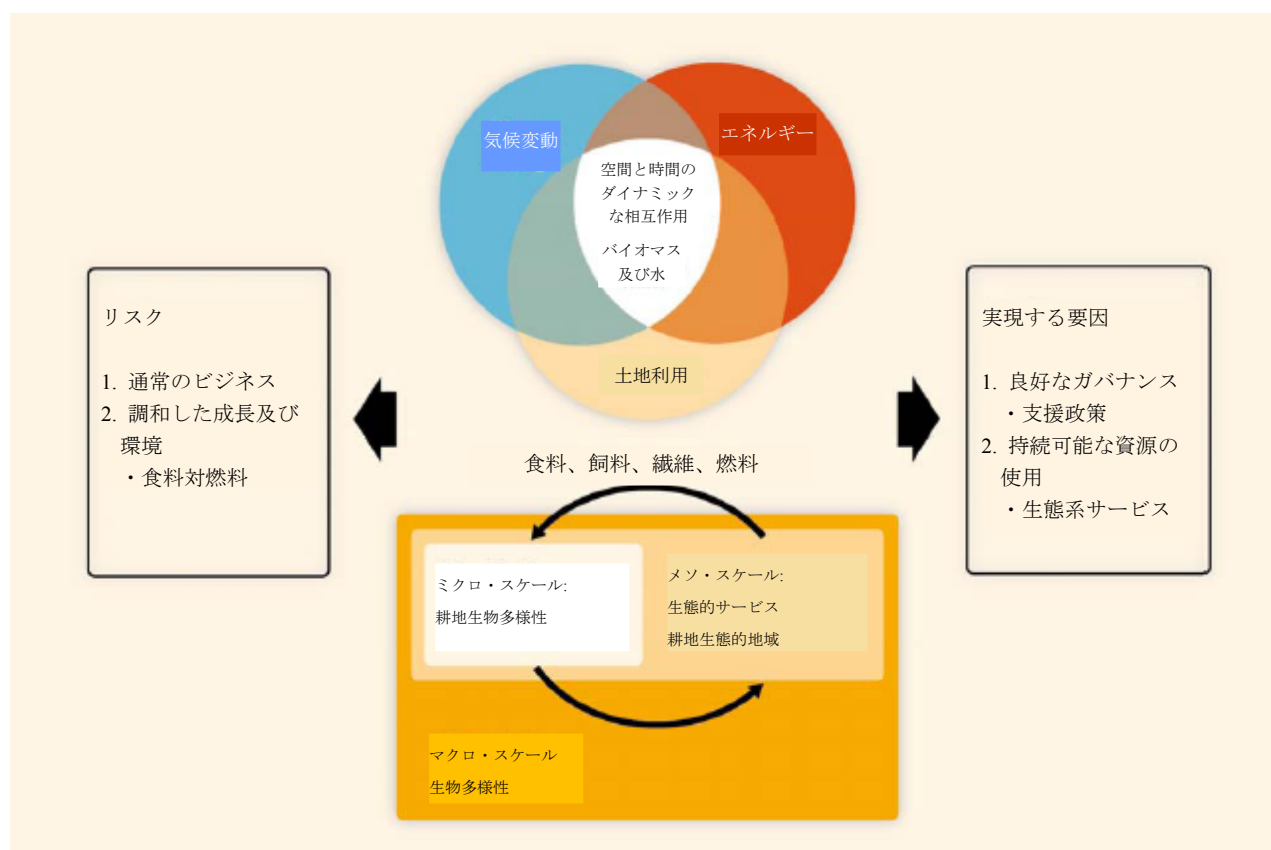


図 TS.2.4: 社会、エネルギー、環境間におけるバイオエネルギーの複雑かつダイナミックな相互作用。土地利用におけるガバナンスの欠如によっておこる食料や燃料の一貫性のない生産の方法は、旧態依然とした慣行の例である [図 2.15]。

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可能性がある。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]。

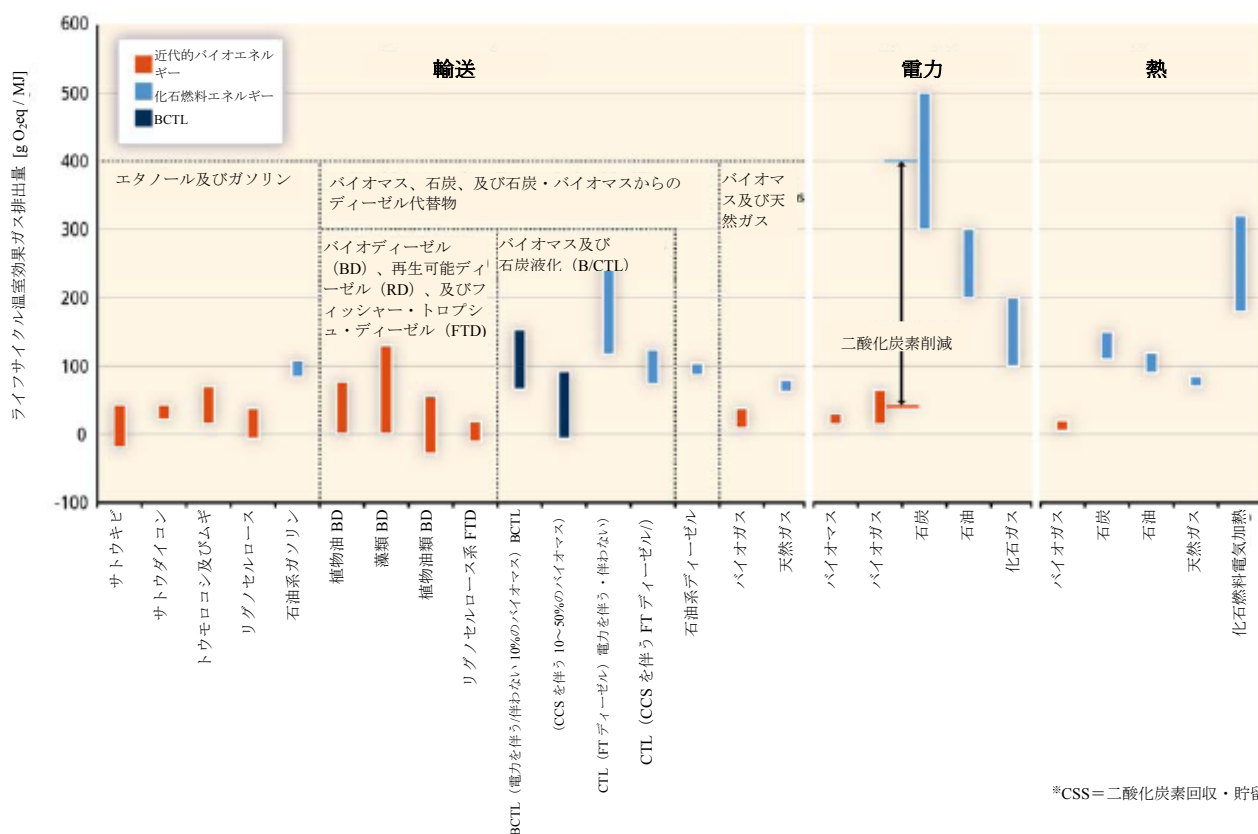


図 TS.2.5: 現在における選択された先進的な化石燃料エネルギーシステムと比較した、主な近代的バイオエネルギー・チェーンからの単位エネルギー生産量 (MJ) 当たりの温室効果ガス排出量の範囲 (土地利用に関連した炭素ストックの正味の変化及び土地管理による影響は除かれている)。ここでは、バイオマス・化石燃料技術のための商業化ならびに開発段階の (藻類バイオ燃料、フィッシャー・トロプシュなど) システムを示している。二酸化炭素回収・貯留技術が開発されると、バイオマス炭素排出の回収及び固定によって化石燃料ベースのエネルギー生産による排出を相殺することが出来る [図 2.10]。

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ティ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。

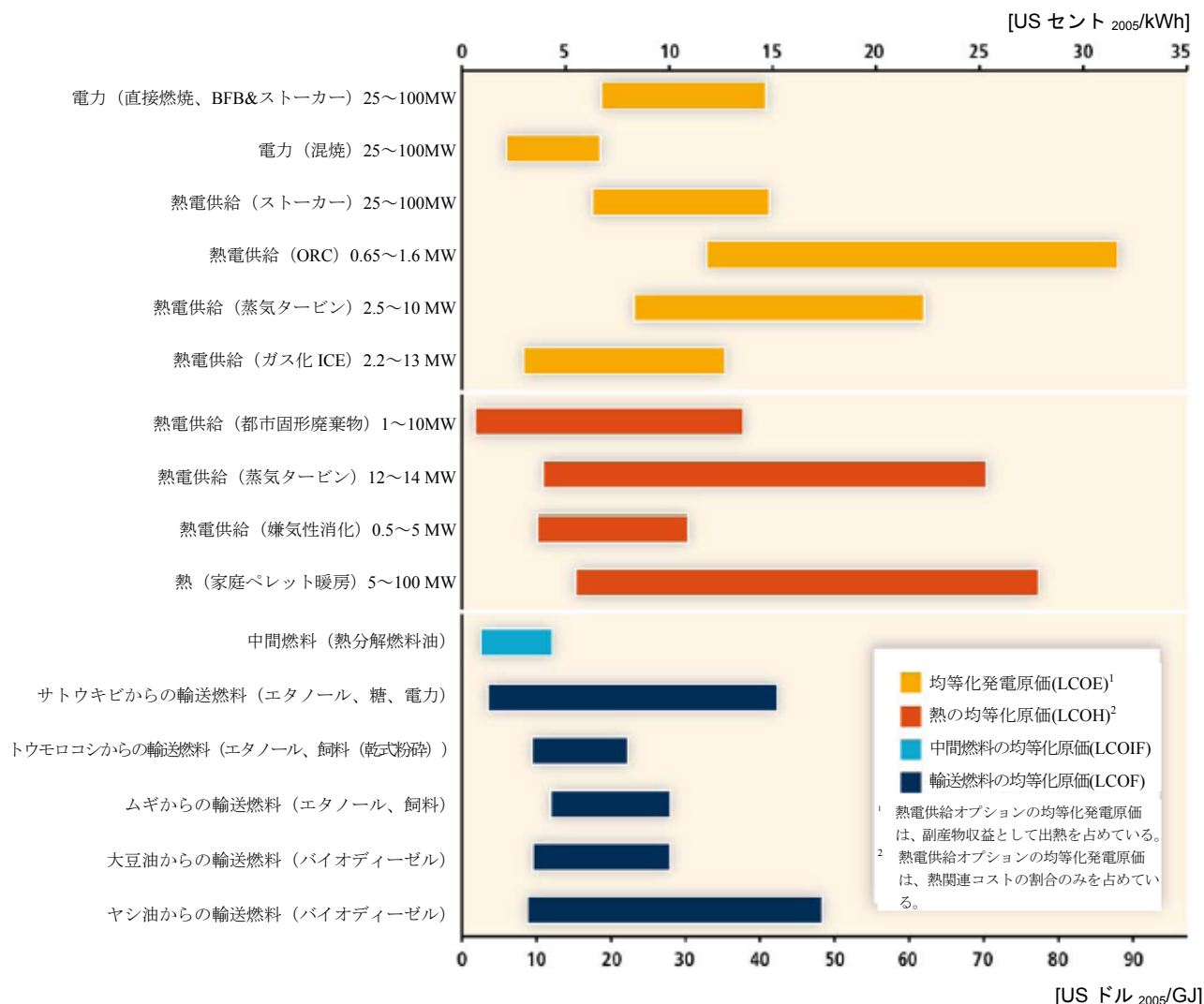


図 TS.2.6: 異なる技術における、年間の原材料コストに基づいて計算された、割引率 7%の商業化されているバイオエネルギー・システムからのエネルギーのサービスの典型的な最近の均等化コスト。このコストには、金利、税、減価償却、及び償還は含まれていない。[図 2.18] LCOE は均等化発電原価、LCOH は熱の均等化原価、LCOF は燃料の均等化原価、LCOIF は中間燃料の均等化原価、BFB はバブリング流動層、ORC は有機ランキン・サイクル、ICE は内燃機関を指している。バイオ燃料の場合、均等化発電原価及び熱の均等化原価はデータが利用可能な技術の主要ユーザ市場にのみ与えられるが、燃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

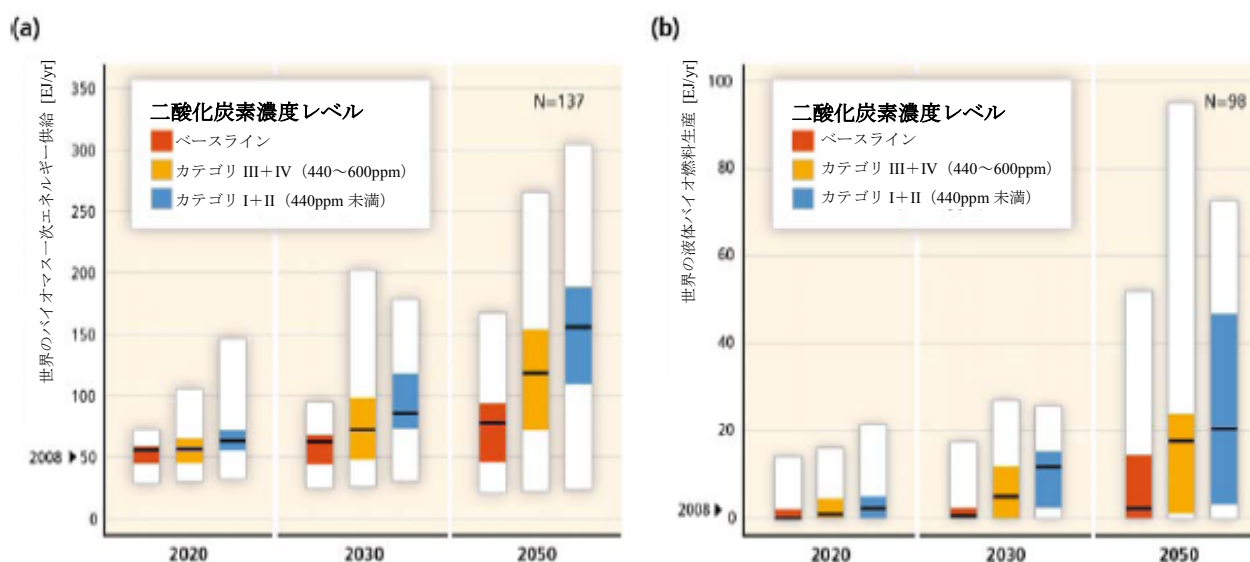


図 TS.2.7: (a) 一次エネルギーとして扱われている電力、熱、及びバイオ燃料の長期的シナリオにおけるバイオマスからの世界の一次エネルギー供給、(b) 二次エネルギーの観点から報告された長期的シナリオにおける世界のバイオ燃料生産。比較のため、2008 年における過去の水準を左の軸上に小さい黒矢印で示している [図 2.23]。

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、温温水暖房 (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 SRES 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]。

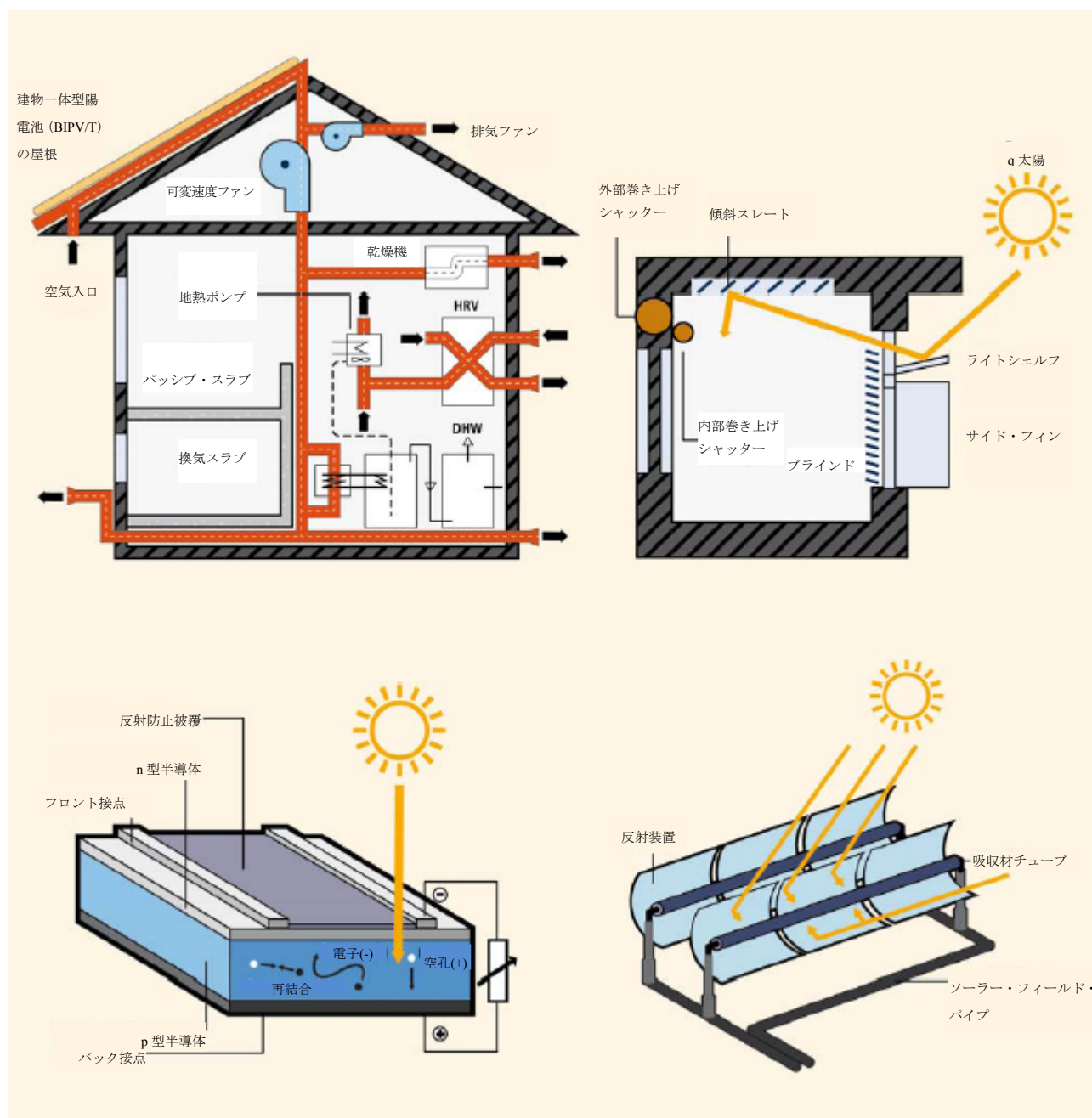


図 TS.3.1: (上) 建築物に組み込まれた太陽熱（パッシブ型とアクティブ型両方）、（左下）直接的太陽光から電力への変換の光起電装置、（右下）集光型太陽エネルギー技術の一般的な型式（トラフ型集光器）の例 [図 3.2, 3.5, 3.7 より]

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]。

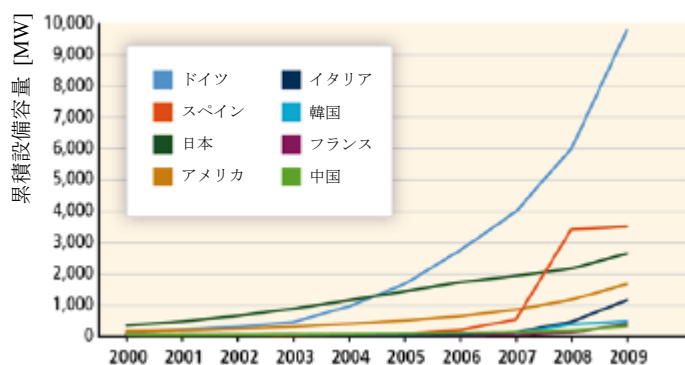


図 TS.3.2: 8 つの市場における 2000 年から 2009 年までの太陽光発電 (PV) 設備容量 [図 3.9]

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]。

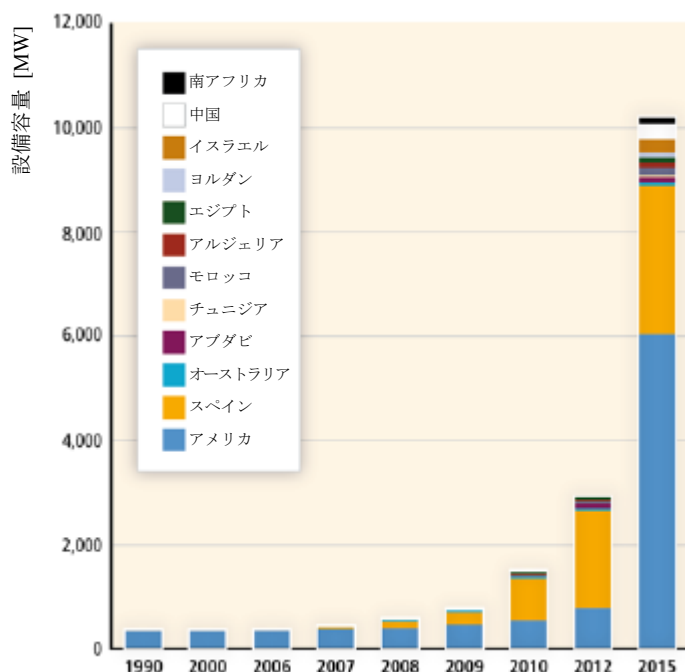


図 TS.3.3: 国によって導入及び計画されている集光型太陽熱発電所 [図 3.10]

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 m^2 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に移動させている。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っており、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]。

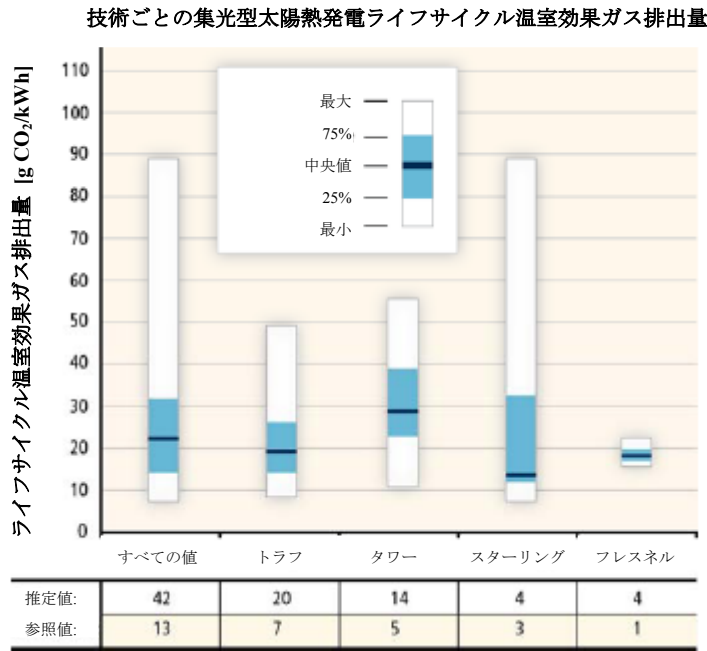
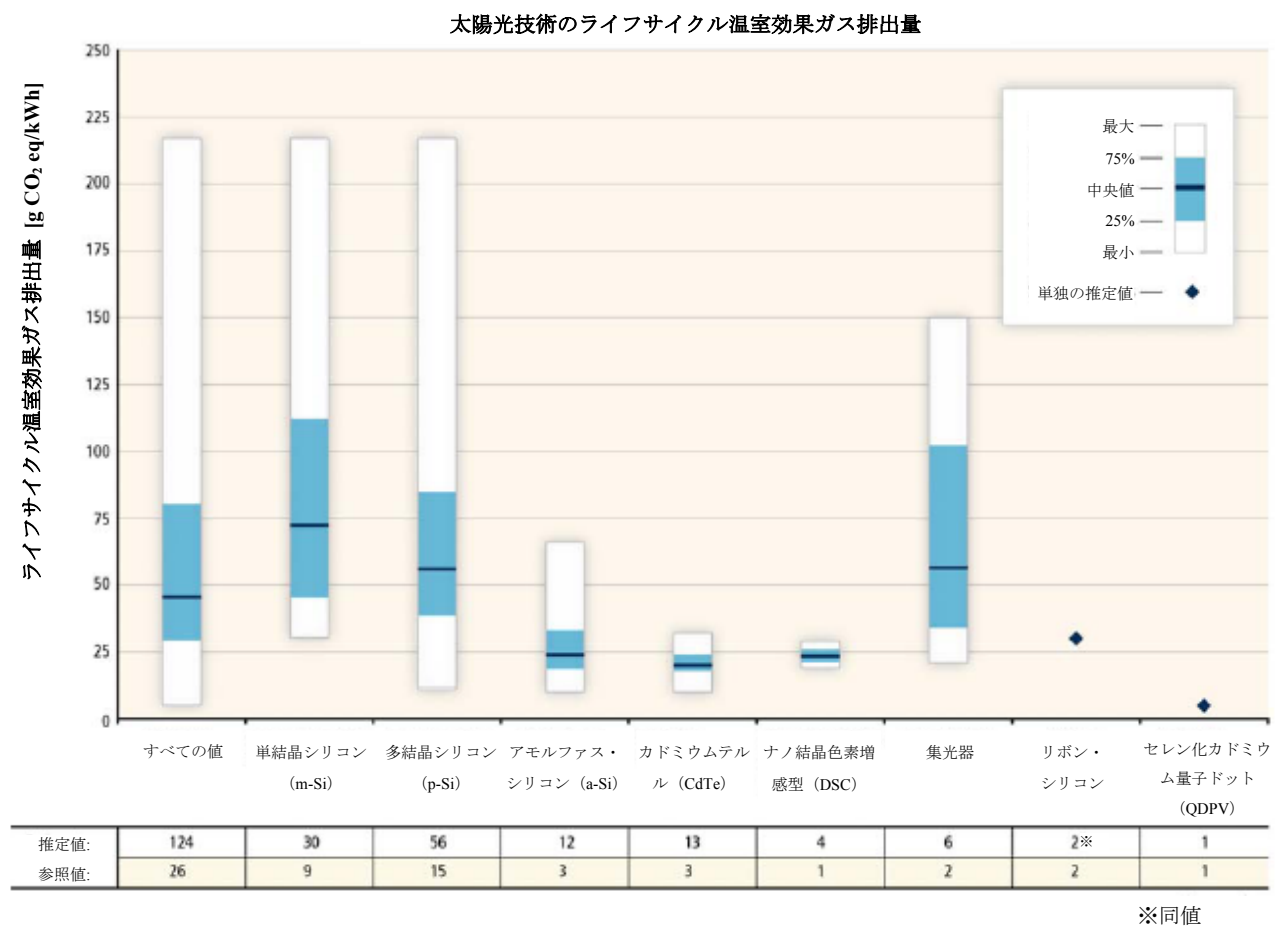


図 TS.3.4: （上）太陽光発電（PV）モジュール及び（下）集光型太陽熱発電（CSP）技術のライフサイクルからの温室効果ガス排出量。表示されている推定値に関係している文献の引用及び文献調査の詳細については Annex II を参照のこと [図 3.14, 3.15]。

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る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 100µm 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]。

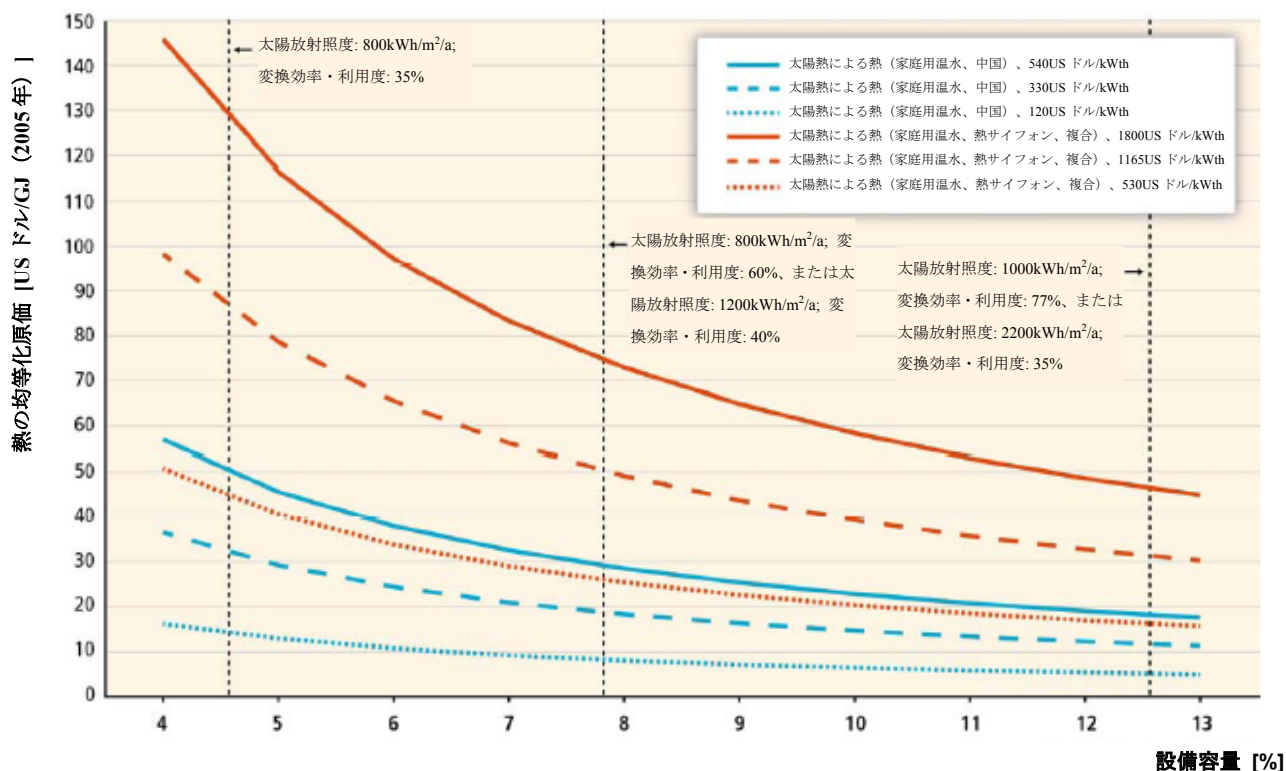


図 TS.3.5: 設備利用率の関数としての投資コストに対する熱の均等化原価の感度（割引率は 7%、年間運用・保守コストはそれぞれ 5.6US ドル/kW（2005 年）及び 14/kW、中国の家庭用温水（DHW）システムと OECD 諸国の様々なタイプのシステムのそれぞれの寿命設定は 12.5 年及び 20 年と想定されている） [図 3.16]。

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]。

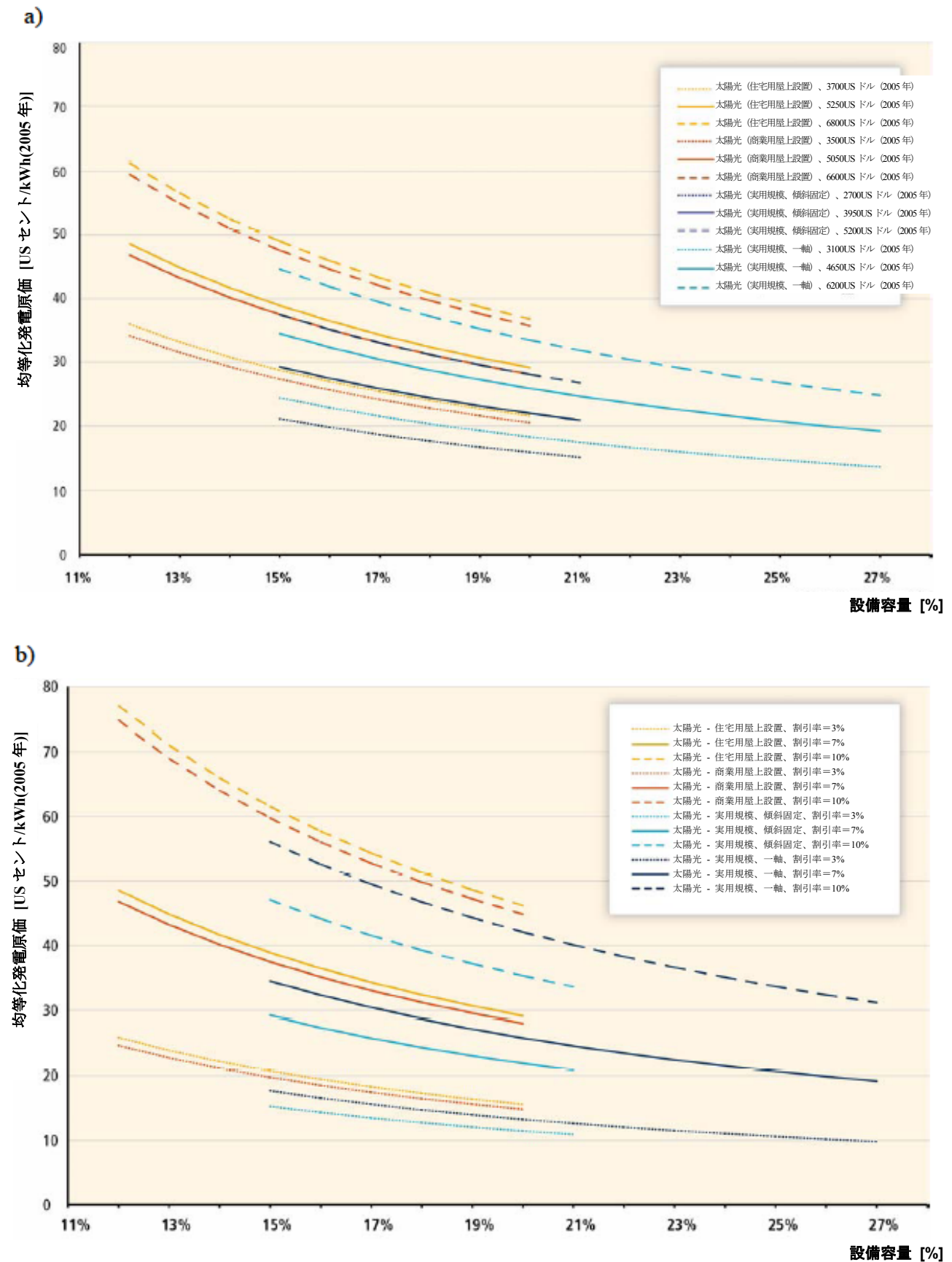


図 TS.3.6: (a) 設備利用率と投資コストの関数(※、※※※)としての、また b) 設備利用率と割引率の関数(※※、※※※)としての太陽光発電 (PV) の均等化発電原価 (2008~2009 年) [図 3.19]

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、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、 $10\pm 5\%$ 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
名 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。

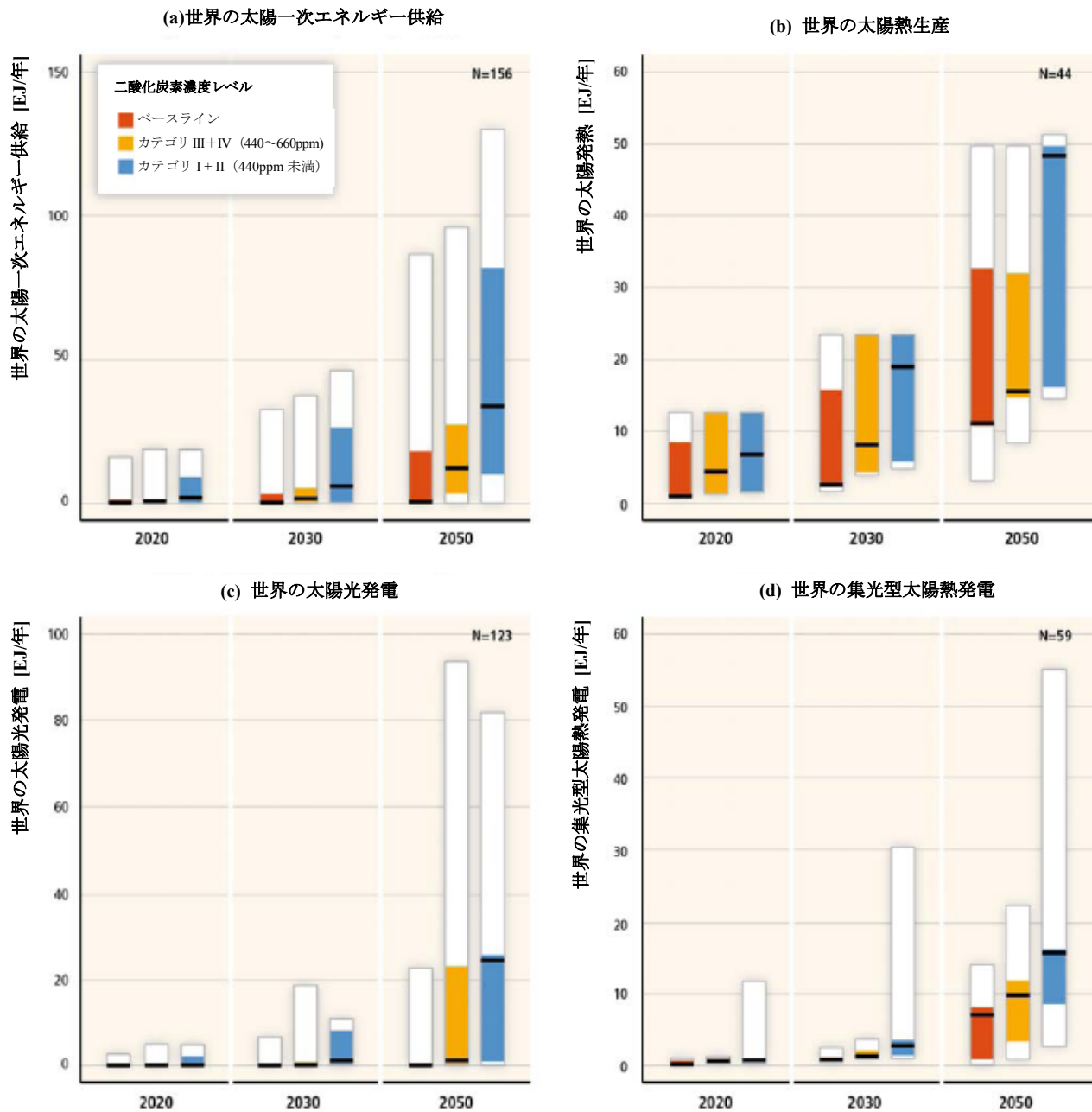


図 TS.3.7: 長期的シナリオにおける世界の太陽エネルギーの供給と生産（中央値、25～75 パーセントイルの範囲、及びシナリオの結果の全範囲。色分けは 2100 年の大気中の二酸化炭素濃度レベルのカテゴリに基づく。数値の基礎となるシナリオの具体的な数を右上の角に示す）。（a）世界の太陽一次エネルギー供給、（b）世界の太陽熱生産、（c）世界の太陽光発電（PV）、及び（d）世界の集光型太陽熱発電（CSP） [図 3.22]